

จลนศาสตร์การอบแห้งฟักทองโดยใช้เทคนิคการอบแห้งแบบอินฟราเรดร่วมกับเบดสั่น  
KINETICS OF VIBRATORY BED ASSISTED INFRARED DRYING OF PUMPKIN

วรวิทย์ นาวิระ  
สกาวัฒน์ แสงเรืองนาค  
อชิระ อัสวเดชเมธากุล

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมเกษตร  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2560

จลนศาสตร์การอบแห้งฟักทองโดยใช้เทคนิคการอบแห้งแบบอินฟราเรดร่วมกับเบตสัน  
KINETICS OF VIBRATORY BED ASSISTED INFRARED DRYING OF PUMPKIN

วรวิทย์ นาวิระ

สกาวัฒน์ แสงเรืองนาค

อชิระ อัสวเดชเมธากุล

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเกษตร

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2560

# KINETICS OF VIBRATORY BED ASSISTED INFRARED DRYING OF PUMPKIN

Worawit Naweera

Sakawrat Sangruangnak

Achira Assawadejmethakul

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT  
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF  
BACHELOR OF ENGINEERING IN AGRICULTURAL ENGINEERING  
FACULTY OF ENGINEERING  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG  
ACADEMIC YEAR 2017

ปริญญานิพนธ์ปีการศึกษา 2560

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ใบรับรองปริญญานิพนธ์

.....

หัวข้อปริญญานิพนธ์      จลนศาสตร์การอบแห้งฟักทองโดยใช้เทคนิคการอบแห้งแบบอินฟราเรดร่วมกับเบดสั่น  
KINETICS OF VIBRATORY BED ASSISTED INFRARED DRYING OF PUMPKIN


นักศึกษาผู้จัดทำ      นายวรวิทย์                      นาวิระ                      รหัสนักศึกษา 57011114  
   นางสาวสกวรัตน์              แสงเรืองนาค              รหัสนักศึกษา 57011293  
   นายอชิระ                      อัสวเดชเมธากุล              รหัสนักศึกษา 57011449

ปริญญา                      วิศวกรรมศาสตร์ (วิศวกรรมเกษตร)

หลักสูตร                      วิศวกรรมเกษตร

ภาควิชา                      วิศวกรรมเกษตร

ปีการศึกษา                      2560

อาจารย์ผู้ควบคุมปริญญานิพนธ์	ลายมือชื่อ
ดร.จิราพร ศรีภิญโญวณิชย์ จงยิ่งเจริญ	

หัวข้อปริญญานิพนธ์	จลนศาสตร์การอบแห้งฟักทองโดยใช้เทคนิคการอบแห้งแบบอินฟราเรดร่วมกับเบตสัน		
นักศึกษาผู้จัดทำ	นายวรวิทย์	นาวีระ	รหัสนักศึกษา 57011114
	นางสาวสกวรัตน์	แสงเรืองนาค	รหัสนักศึกษา 57011293
	นายอชิระ	อัครเดชเมธากุล	รหัสนักศึกษา 57011449
อาจารย์ที่ปรึกษา	ดร.จิราพร ศรีภิญโญวิชย์ จงยิ่งเจริญ		
ปีการศึกษา	2560		

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีจุดประสงค์เพื่อศึกษาลักษณะการอบแห้งของฟักทองในระบบการอบแห้งแบบอินฟราเรดร่วมกับเบตสัน (Vibratory bed-infrared drying, VIR) และศึกษาลักษณะทางกายภาพ (พื้นที่ภาพถ่าย ปริมาตร ความหนาแน่น การหดตัว และสี) ของฟักทองในระหว่างกระบวนการอบแห้งแบบ VIR รวมถึงวิเคราะห์สัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผลในการอบแห้งฟักทองโดยพิจารณาการหดตัวของวัสดุในระบบการอบแห้งแบบ VIR ฟักทองขนาด  $2 \times 2 \times 0.5 \text{ cm}^3$  ที่มีความชื้นเริ่มต้นประมาณ  $9 \text{ g}_{\text{water}}/\text{g}_{\text{dry matter}}$  ถูกอบแห้งจนมีความชื้นสุดท้ายประมาณ  $0.5 \text{ g}_{\text{water}}/\text{g}_{\text{dry matter}}$  โดยระดับความเข้มรังสีของอินฟราเรดคือ 500, 750 และ  $1000 \text{ W/m}^2$  และการสั่นสะเทือน 750 RPM จากการทดลองความเข้มรังสีที่เพิ่มขึ้นทำให้ระยะเวลาในการอบแห้งลดลงเป็น 175, 120 และ 100 นาทีตามลำดับ และอัตราการทำแห้งสูงสุดเพิ่มขึ้นเป็น 0.10, 0.11 และ  $0.13 \text{ g}_{\text{water}}/\text{g}_{\text{dry matter}} \cdot \text{min}$  ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการอบแห้งแบบลมร้อน (Hot-air drying, HA) ที่อุณหภูมิ  $60^\circ\text{C}$  และการอบแห้งแบบอินฟราเรดปกติ (Infrared drying, IR) ที่ระดับความเข้มรังสีเท่ากัน การอบแห้งแบบ VIR ทุกสภาวะให้ลักษณะการอบแห้งที่ดีกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับอัตราการทำแห้งสูงสุด อีกทั้งการอบแห้งลักษณะทางกายภาพของฟักทองด้วยวิธีการอบแห้งแบบ VIR ให้ผลที่ดีกว่าคือ พื้นที่ภาพถ่าย ปริมาตร การหดตัวและสีมีค่าลดลงน้อยกว่า ในขณะที่ความหนาแน่นมีค่าเพิ่มขึ้นน้อยกว่า การคำนวณสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผลโดยคำนึงถึงการหดตัวให้ผลที่สอดคล้องกับลักษณะการอบแห้งมากกว่าเมื่อไม่คำนึงถึงการหดตัวของวัสดุ

**คำหลัก:** ฟักทอง, รังสีอินฟราเรด, การอบแห้ง, จลนศาสตร์การอบแห้ง, การหดตัว

Thesis Title	KINETICS OF VIBRATORY BED ASSISTED INFRARED DRYING OF PUMPKIN		
Authors	Worawit	Naweera	Student NO. 57011114
	Sakawrat	Sangruangnak	Student NO. 57011293
	Achira	Assawadejmethakul	Student NO. 57011449
Thesis Advisor	Jiraporn Sripinyowanich Jongyingcharoen, Ph.D.		
Academic Year	2560		

### Abstract

The objective of this research was to determine drying characteristics and physical properties (i.e. projected area, volume, solid density, shrinkage, and color) of pumpkin during vibratory bed assisted infrared (VIR) drying. Effective moisture diffusivity ( $D_{eff}$ ) of pumpkin considering shrinkage of the material was also evaluated. Pumpkin ( $20 \times 20 \times 5 \text{ mm}^3$ ) with an initial moisture content of  $9 \text{ g}_{\text{water}}/\text{g}_{\text{dry matter}}$  was dried to the moisture content of  $0.5 \text{ g}_{\text{water}}/\text{g}_{\text{dry matter}}$ . Infrared radiation intensities of 500, 750, and  $1000 \text{ W/m}^2$  and vibration of 750 RPM were operated. Higher intensities resulted in the decreased drying time of 175, 120, and 100 min and the increased maximum drying rate of 0.10, 0.11, and  $0.13 \text{ g}_{\text{water}}/\text{g}_{\text{dry matter}} \cdot \text{min}$ , respectively. As compared to hot-air drying (HA) at  $60^\circ\text{C}$  and infrared drying (IR) at the same levels of infrared intensity, VIR drying provided improved drying characteristics of pumpkin and better physical properties of dried pumpkin.  $D_{eff}$  with consideration of shrinkage showed better fitted to the drying characteristics than  $D_{eff}$  without consideration of shrinkage.

**Keywords:** pumpkin, infrared radiation, drying, drying kinetics, shrinkage

### กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี เนื่องจากได้รับความกรุณาอย่างสูงด้วยความจริงใจจาก ดร.จิราพร ศรีภิญโญวณิชย์ จงยิ่งเจริญ อาจารย์ที่ปรึกษาปริญญาานิพนธ์ที่กรุณาให้คำแนะนำและคำปรึกษา ตลอดจนปรับปรุงแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ ด้วยความเอาใจใส่อย่างดียิ่ง คณะผู้จัดทำตระหนักถึงความตั้งใจจริง และความทุ่มเทของอาจารย์และขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ ที่นี้

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.ปานมนัส ศิริสมบูรณ์ ที่ให้ความอนุเคราะห์เครื่องมือจนทำให้ ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี อนึ่งผู้วิจัยหวังว่างานวิจัยฉบับนี้จะมีประโยชน์อยู่ไม่น้อย จึงขอมอบ ส่วนดีทั้งหมดนี้ให้แก่เหล่าคุณอาจารย์ที่ได้ประสิทธิประสาทวิชาจนทำให้ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้เป็นประโยชน์ต่อผู้ที่เกี่ยวข้อง

สุดท้ายนี้ขอมอบความกตัญญูแด่คุณแต่คุณอาจารย์ บุคลากร ภายในภาควิชาวิศวกรรมเกษตร คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังทุกท่านอย่างสุดซึ้ง

นายวรวิทย์

นาวิระ

นางสาวสกาวิรัตน์

แสงเรืองนาค

นายอชิระ

อัศวเดชเมธากุล

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ช
สารบัญรูป	ซ
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ความสำคัญและที่มา	1
1.2 วัตถุประสงค์	2
1.3 ขอบเขตการศึกษา	2
1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ	2
1.5 ขั้นตอนดำเนินงาน	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	
2.1 พืชทอง	5
2.2 รังสีอินฟราเรดและการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด	6
2.2.1 การให้ความร้อนโดยใช้รังสีอินฟราเรด	7
2.2.2 ประโยชน์ของการใช้เทคนิคการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดต่อวัสดุทางการเกษตร	7
2.3 ทฤษฎีการอบแห้ง	8
2.3.1 ความชื้น	8
2.3.1.1 การแสดงค่าความชื้นของอาหาร	8
2.3.1.2 การวัดความชื้นของอาหาร	9
2.3.2 อัตราส่วนความชื้น	9
2.3.3 อัตราการทำแห้ง	9
2.3.4 กราฟอัตราการทำแห้ง	11
2.4 ทฤษฎีสมการการอบแห้ง	12
2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	15

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 3 วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีการทดลอง	
3.1 ตัวอย่างทดลองและวิธีการเตรียมตัวอย่าง	17
3.2 เครื่องอบแห้ง	18
3.3 แผนการทดลอง	19
3.4 การวิเคราะห์ลักษณะการอบแห้ง	21
3.4.1 ความชื้น	21
3.4.2 อัตราส่วนความชื้น	21
3.4.3 อัตราการอบแห้ง	21
3.5 การวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพ	22
3.5.1 พื้นที่	22
3.5.2 ปริมาตร	22
3.5.3 ความหนาแน่น	22
3.5.4 การหดตัว	23
3.5.5 สี	23
3.6 การคำนวณสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผล	24
บทที่ 4 ผลการทดลอง	
4.1 ลักษณะการอบแห้งของฟักทอง	27
4.2 สมบัติทางกายภาพของฟักทอง	31
4.2.1 พื้นที่ภาพถ่าย	39
4.2.2 ปริมาตร	41
4.2.3 ความหนาแน่นเนื้อ	43
4.2.4 วัตถุประสงค์การหดตัว	45
4.2.5 สี	47
4.3 คุณภาพของผลิตภัณฑ์ฟักทองอบแห้ง	51
4.4 สัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผล	55

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง	57
เอกสารอ้างอิง	58
ภาคผนวก	60

## สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 1.1 ระยะเวลาการดำเนินงาน	4
ตารางที่ 4.1 เวลาในการอบแห้งและอัตราการทำให้แห้งสูงสุดจากการอบแห้งฟักทองด้วยวิธีต่างๆ	27
ตารางที่ 4.2 คุณสมบัติทางกายภาพที่ผลิตภัณฑ์สุดท้าย	52
ตารางที่ 4.3 ค่าความสว่าง ความแดง ความเหลือง และความแตกต่างของสี ในผลิตภัณฑ์ฟักทองอบแห้ง	54
ตารางที่ 4.4 อิทธิพลของวิธีการต่อสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผลโดยไม่คำนึงการหดตัว	55

## สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 สเปกตรัมของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเนื่องจากอุณหภูมิของวัตถุ	6
รูปที่ 2.2 หลักการเกิดความร้อนในวัสดุ	7
รูปที่ 2.3 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการทำแห้งและความชื้นของสาร	12
รูปที่ 2.4 ลักษณะที่เปลี่ยนแปลงของผลิตภัณฑ์เมื่อมองด้วยตาเปล่า	15
รูปที่ 3.1 ชุดเครื่องหั่นและแม่พิมพ์	17
รูปที่ 3.2 ตัวอย่างชิ้นฟักทองที่ใช้ในการอบ	17
รูปที่ 3.3 เครื่องอบแห้ง	18
รูปที่ 3.4 หลอดอินฟราเรดและเบดสั่นสะเทือนภายในห้องอบแห้ง	19
รูปที่ 3.5 แผนผังการทดลอง	20
รูปที่ 3.6 สิ่งทดลองในการทดลอง	20
รูปที่ 3.7 พิคโนมิเตอร์	22
รูปที่ 3.8 เครื่องวัดสียี่ห้อ HunterLAB	24
รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นกับเวลา	28
รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับเวลา	29
รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการอบแห้งกับอัตราส่วนความชื้น	30
รูปที่ 4.4 พื้นผิวและภาพตัดขวางของฟักทองที่ผ่านการอบแห้งแบบ HA ที่เวลาต่างๆ	32
รูปที่ 4.5 พื้นผิวและภาพตัดขวางของฟักทองที่ผ่านการอบแห้งแบบ IR500 ที่เวลาต่างๆ	33
รูปที่ 4.6 พื้นผิวและภาพตัดขวางของฟักทองที่ผ่านการอบแห้งแบบ IR750 ที่เวลาต่างๆ	34
รูปที่ 4.7 พื้นผิวและภาพตัดขวางของฟักทองที่ผ่านการอบแห้งแบบ IR1000 ที่เวลาต่างๆ	35
รูปที่ 4.8 พื้นผิวและภาพตัดขวางของฟักทองที่ผ่านการอบแห้งแบบ VIR500 ที่เวลาต่างๆ	36
รูปที่ 4.9 พื้นผิวและภาพตัดขวางของฟักทองที่ผ่านการอบแห้งแบบ VIR750 ที่เวลาต่างๆ	37
รูปที่ 4.10 พื้นผิวและภาพตัดขวางของฟักทองที่ผ่านการอบแห้งแบบ VIR1000 ที่เวลาต่างๆ	38
รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างพื้นที่ภาพฉายกับอัตราส่วนความชื้น	40
รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรกับอัตราส่วนความชื้น	42
รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นเนื้อกับอัตราส่วนความชื้น	44
รูปที่ 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การหดตัวกับอัตราส่วนความชื้น	46

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความสว่าง( $L^*$ ) กับเวลา	48
รูปที่ 4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแดง( $a^*$ ) กับเวลา	49
รูปที่ 4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเหลือง( $b^*$ ) กับเวลา	50
รูปที่ 4.18 คุณสมบัติทางกายภาพของผลิตภัณฑ์ฟักทองอบแห้งตามกระบวนการ	51
รูปที่ 4.19 สีของผลิตภัณฑ์ฟักทองอบแห้งตามกระบวนการ	53
รูปที่ 4.20 อิทธิพลของความเข้มข้นสีต่อสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผลโดยคำนึงการหดตัว	56

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความสำคัญและที่มา

หลักการโดยทั่วไปของการอบแห้งวัสดุคือ การให้ความร้อนแก่วัสดุเพื่อลดปริมาณน้ำในวัสดุให้ลดน้อยลงตามความต้องการเพื่อให้วัสดุมีอายุการเก็บรักษาที่นานขึ้น อันเนื่องมาจากแบคทีเรียหรือจุลินทรีย์บางประเภทที่เป็นตัวการสำคัญที่ส่งผลให้วัสดุเกิดการเน่าเสีย เช่น เชื้อราชนิดต่างๆ เมื่อลดปริมาณน้ำในวัสดุให้อยู่ในปริมาณที่แบคทีเรียหรือจุลินทรีย์ไม่สามารถเจริญเติบโตได้ก็จะทำให้สามารถเก็บรักษาวัสดุได้นานยิ่งขึ้น โดยเฉพาะวัสดุทางการเกษตรที่มีความอ่อนไหวต่อสิ่งแวดล้อมต่างๆ ได้ง่าย และที่สำคัญคือ คุณภาพทางประสาทสัมผัสและรูปร่าง ได้แก่ ขนาด น้ำหนัก ลักษณะปรากฏที่ประเมินด้วยสายตา กลิ่นรส และเนื้อสัมผัส เป็นปัจจัยหลักๆทางด้านความรู้สึกของมนุษย์เมื่อพบเห็นอาหารหรือวัสดุต่างๆทางการเกษตร จึงเป็นแรงบันดาลใจในความต้องการที่จะรักษาสภาพวัสดุให้คงรูปและเนื้อสัมผัสให้ใกล้เคียงกับวัสดุสดมากที่สุด ไม่ว่าจะเป็นในด้าน สี เนื้อสัมผัส หรือขนาดให้ยังคงสภาพไว้โดยมีความสนใจในการเลือกใช้เทคนิคการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดร่วมกับเบดส์ขึ้น เนื่องจากรังสีอินฟราเรดมีหลักการให้ความร้อนจากภายในเนื้อวัสดุซึ่งต่างจากการอบแบบลมร้อนที่เป็นลมผ่านผิววัสดุ การอบลมร้อนจึงทำให้ลักษณะทางกายภาพเปลี่ยนแปลงไปจากเดิมเป็นอย่างมาก อย่างไรก็ตามยังคงหน้าที่หลักของการอบแห้งคือการเก็บรักษาเอาไว้ไม่ให้ด้อยลงแต่อาจจะส่งผลให้มีอายุการเก็บรักษาได้นานขึ้น เพราะการให้ความร้อนแบบอินฟราเรดเป็นการแผ่ความร้อน ซึ่งไม่จำเป็นต้องมีตัวกลางเหมือนการอบแห้งแบบลมร้อนที่เป็นการพาความร้อนผ่านตัวกลางไปยังผิววัสดุแล้วจากผิววัสดุจะเป็นการนำความร้อนสู่เนื้อวัสดุด้านในเมื่อไม่ผ่านตัวกลางก็สามารถควบคุมคุณภาพของวัสดุได้ง่ายยิ่งขึ้น

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นศึกษาเกี่ยวกับการเปลี่ยนแปลงทางจุลนาศาสตร์ของวัสดุด้วยวิธีการอบแห้งแบบอินฟราเรดร่วมเบดส์ขึ้นโดยทำการเปรียบเทียบกับการอบแห้งแบบลมร้อน มีการศึกษาถึงลักษณะทางกายภาพของวัสดุในระหว่างกระบวนการอบแห้ง เพื่อเป็นแนวทางในการปรับปรุงลักษณะปรากฏของวัสดุอบแห้งด้วย

## 1.2 วัตถุประสงค์

- 1.2.1 เพื่อศึกษาลักษณะการอบแห้งของฟักทองในระบบการอบแห้งแบบอินฟราเรดร่วมกับเบดส์
  - 1.2.2 เพื่อศึกษาลักษณะทางกายภาพ (พื้นที่ภาพถ่าย ปริมาตร ความหนาแน่น การหดตัวและสี) ของฟักทองในระหว่างกระบวนการอบแห้งแบบอินฟราเรดร่วมกับเบดส์
  - 1.2.3 เพื่อวิเคราะห์สัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผลในการอบแห้งฟักทองโดยพิจารณาการหดตัวของวัสดุในระบบการอบแห้งแบบอินฟราเรดร่วมกับเบดส์
- โดยมีการทดลองเปรียบเทียบกับ การอบแห้งแบบอินฟราเรด และการอบแห้งแบบลมร้อนด้วย

## 1.3 ขอบเขตการศึกษา

- 1.3.1 การใช้เครื่องอบแห้งแบบอินฟราเรดร่วมกับเบดส์เพื่อเปรียบเทียบกับ การอบแห้งแบบอินฟราเรดที่ไม่มีเบดส์
- 1.3.2 วัสดุที่ใช้คือ ฟักทอง ควบคุมขนาดและรูปร่างของชิ้นวัสดุเป็นปริซึมฐานสี่เหลี่ยมผืนผ้า ความกว้าง ความยาว และความหนา 2 cm 2 cm และ 0.5 cm ตามลำดับ

## 1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.4.1 กระบวนการอบแห้งฟักทองที่ปรับปรุงขึ้นจากกระบวนการอบแห้งที่ใช้อยู่ในปัจจุบัน
- 1.4.2 ได้ข้อมูลจลนศาสตร์การอบแห้งฟักทองในระบบการอบแห้งแบบอินฟราเรดร่วมกับเบดส์ โดยพิจารณาการหดตัวของวัสดุเพื่อสามารถต่อยอดไปสู่การพัฒนากระบวนการอบแห้งในระดับที่ใหญ่ขึ้นได้

## 1.5 ขั้นตอนดำเนินงาน

- 1.5.1 ค้นคว้าข้อมูลและศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องในเรื่อง ทฤษฎีการอบแห้ง การอบแห้งแบบอินฟราเรด การเปลี่ยนแปลงสมบัติและลักษณะของวัสดุอันเนื่องมาจากการอบแห้ง
- 1.5.2 ทดลองอบแห้งวัสดุที่สนใจได้แก่ มันฝรั่ง ฟักทอง กีวี่ และแคนตาลูป ด้วยวิธีอบแห้งแบบลมร้อนที่อุณหภูมิ 60 °C ระยะเวลา 300 min ขนาดความกว้าง ความยาว และความหนา 2 cm 2 cm และ 0.3 cm ตามลำดับ ดูความเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นเพื่อใช้ในการตัดสินใจเลือกวัสดุที่ต้องการทดลอง (ฟักทอง)
- 1.5.3 สร้างอุปกรณ์ในการหั่น
- 1.5.4 ศึกษาลักษณะการอบแห้งของฟักทองในระบบการอบแห้งแบบอินฟราเรดร่วมกับเบดส์
- 1.5.5 ศึกษาลักษณะการอบแห้งของฟักทองในระบบการอบแห้งแบบลมร้อนเพื่อเปรียบเทียบ

1.5.6 ศึกษาการเปลี่ยนแปลงลักษณะทางกายภาพของฟักทองระหว่างกระบวนการอบแห้ง

1.5.7 วิเคราะห์ข้อมูลและสร้างแบบจำลองการอบแห้ง

1.5.8 สรุปผล และเขียนรายงาน

ตารางที่ 1.1 ระยะเวลาการดำเนินงาน

ขั้นตอนการดำเนินงาน	พ.ศ. 2560 (สี่ปีดาร์ท)																				พ.ศ. 2561 (สี่ปีดาร์ท)							
	ส.ค.				ก.ย.				ต.ค.				พ.ย.				ธ.ค.				ม.ค.				ก.พ.			
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
1. ค้นหาข้อมูลและศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	■	■	■	■																								
2. ทดลองอบแห้งวัสดุที่สนใจ				■																								
3. สร้างอุปกรณ์ในการหั่น					■	■																						
4. ศึกษาลักษณะการอบแห้งของฟักทองในระบบการอบแห้งแบบอินฟราเรดร่วมกับเบดสั่น									■	■	■	■																
5. ศึกษาลักษณะการอบแห้งของฟักทองในระบบการอบแห้งแบบลมร้อนเพื่อเปรียบเทียบ													■	■	■	■	■											
6. ศึกษาการเปลี่ยนแปลงลักษณะทางกายภาพของฟักทองระหว่างกระบวนการอบแห้ง																	■	■	■	■								
7. วิเคราะห์ข้อมูลและสร้างแบบจำลองการอบแห้ง																					■	■	■	■				
8. สรุปผล และเขียนรายงาน																									■	■	■	■

## บทที่ 2

### ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 ฟักทองและงานวิจัยด้านการอบแห้งฟักทอง

ฟักทอง ชื่อสามัญ Pumpkin ชื่อวิทยาศาสตร์ *Cucurbita moschata* Duchesne จัดอยู่ในวงศ์แตง (CUCURBITACEAE) ฟักทองแบ่งออกเป็น 2 ตระกูล คือ ตระกูลฟักทองอเมริกัน (Pumpkin) ผลใหญ่ เนื้อนุ่ม และตระกูลสควอช (Squash) ซึ่งได้แก่ ฟักทองไทยและฟักทองญี่ปุ่น โดยฟักทองไทยจะมีผิวของผล ในขณะที่ยังเป็นผลอ่อนเป็นสีเขียว เมื่อผลแก่จะเปลี่ยนเป็นสีเหลืองสลับเขียว ผิวเปลือกมีลักษณะขรุขระเล็กน้อยและแข็ง ส่วนเนื้อด้านในเป็นสีเหลือง พร้อมด้วยเมล็ดสีขาวแบนติดอยู่บริเวณกลางผลด้านใน

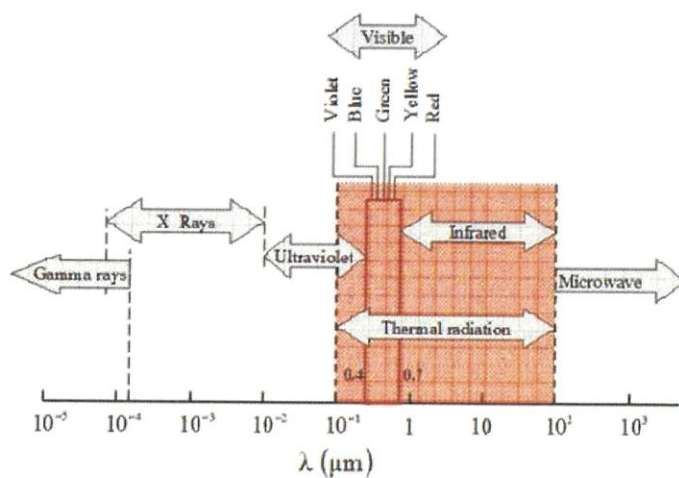
ฟักทองอุดมไปด้วยสารสำคัญมากมายไม่ว่าจะเป็นวิตามินและแร่ธาตุที่มีประโยชน์ เช่น วิตามินเอ วิตามินบี 1 วิตามินบี 2 วิตามินบี 3 วิตามินบี 5 วิตามินบี 6 วิตามินซี วิตามินอี ฟอสฟอรัส แคลเซียม โพแทสเซียม โซเดียม แมงกานีส เหล็กและสังกะสี (สถาบันวิจัยโภชนาการ มหาวิทยาลัยมหิดล, 2541)

Guiné et al. (2011) กล่าวว่าวิธีการอบแห้งด้วยลมร้อนหมุนเวียนฟักทองจะถูกทำแห้งโดยการพาความร้อนในอุณหภูมิต่างๆระหว่าง 30 °C และ 70 °C โดยสมบัติทางเคมีที่ถูกวิเคราะห์ในฟักทองสดและแห้ง ได้แก่ ปริมาณความชื้น น้ำตาลรวม น้ำตาลรีดิคซ์ ความเป็นกรดโปรตีนไขมัน เส้นใยดิบ และเถ้า ผลการทดลองสรุปได้ว่าการอบแห้งแบบลมร้อนหมุนเวียนที่อุณหภูมิต่ำสุด 30 °C ทำให้โปรตีนลดลง 14% น้ำตาล 65% และเส้นใย 36% นอกจากนี้อุณหภูมิการอบแห้งดูเหมือนจะมีผลกระทบต่อลักษณะทางโภชนาการของฟักทองเล็กน้อยเนื่องจากผลการอบแห้งที่อุณหภูมิ 30 °C ใกล้เคียงกับการอบแห้งที่อุณหภูมิ 70°C แต่กลับกันคือลักษณะทางกายภาพนั้นมีการเปลี่ยนแปลงที่แตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัดในเรื่องการหดตัว สี และการบดของวัสดุที่เห็นได้ชัดเจนด้วยตาเปล่า

นันทวัน เทอดไทย และ สุพิชา กระจำงเมธิกุล (2555) ให้ผลการวิจัยว่าการใช้ไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนในการอบแห้งฟักทองสามารถลดเวลาในการอบแห้ง ช่วงสุดท้ายที่การอบแห้งแบบลมร้อนมีอัตราการอบแห้งลดลง จึงทำให้ปริมาณเบต้าแคโรทีนคงเหลือในฟักทองอบแห้งมากกว่าการอบแห้งด้วยลมร้อนเพียงอย่างเดียว และส่งผลให้การเปลี่ยนแปลงสีเมื่อเปรียบเทียบกับสีฟักทองก่อนการอบแห้งลดลง นอกจากนี้การให้ความร้อนอย่างรวดเร็วโดยไมโครเวฟทำให้เกิดแรงดันไอสูงและความเป็นรูพรุน ส่งผลให้การอัตราการคืนตัวเพิ่มขึ้น การใช้ไมโครเวฟภายใต้สภาวะสุญญากาศ เพิ่มความแตกต่างของความดันทำให้เกิดโครงสร้างรูพรุนมากขึ้นและมีอัตราการคืนตัวสูง

## 2.2 รังสีอินฟราเรดและการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด

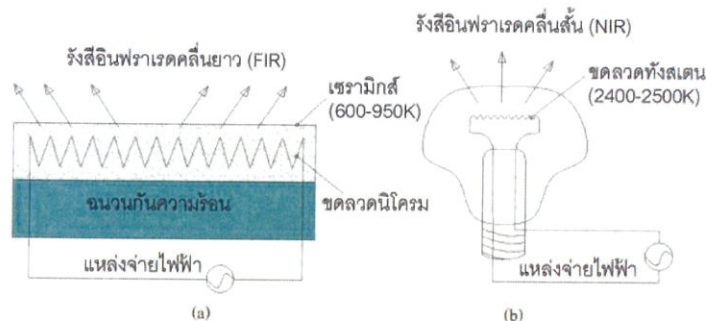
ฟิสิกส์ราชมงคล (2547) ให้ความหมายคลื่นรังสีอินฟราเรดหรือคลื่นรังสีความร้อน ถูกค้นพบโดย Sir William Herschel นักวิทยาศาสตร์ชาวอังกฤษ ซึ่งได้ค้นพบรังสีอินฟราเรดสเปกตรัม (Infrared Ray) ในปี ค.ศ. 1800 ในขณะที่ William Herschel กำลังศึกษาเกี่ยวกับดวงอาทิตย์อยู่นั้นเกิดเหตุการณ์ผิวดังเกิดในกล้องดูดาวที่ต้องมีการใช้เลนส์กรองแสง ซึ่งมีรูปแบบเป็นสีต่างๆ เพราะ William Herschel ต้องการที่จะทราบว่า ในเลนส์แต่ละสีที่ติดตั้งไปนั้นจะสามารถเปลี่ยนค่าการแสดงความร้อนของดวงอาทิตย์ได้หรือไม่ จึงคิดค้นและประดิษฐ์อุปกรณ์การทดลองอย่างง่าย เพื่อค้นหาคำตอบ ซึ่งนับเป็นวิธีทดลองที่ชาญฉลาดเป็นอย่างมากโดยการใช้ปริซึมแยกแสงแล้วให้แสงต่างๆมาตกกระทบที่เทอร์โมมิเตอร์ ซึ่งทำสีดำที่เกาะเปาะไว้เพื่อให้มีความสามารถในการดูดความร้อนดียิ่งขึ้น แต่ก็มีที่ตั้งเทอร์โมมิเตอร์อีกตัวหนึ่งนอกเหนือจากแสงสีต่างๆ เพื่อเป็นตัวแปรควบคุมการทดลองพบว่า แสงสีต่างๆมีอุณหภูมิสูงกว่าแสงสีขาว และอุณหภูมิสูงขึ้นไปยังสีแดง William Herschel จึงเกิดความอยากรู้อยากเห็น แล้ววัดแถบเหนือแสงสีแดงขึ้นไปที่ไม่ปรากฏมีสีอะไรดูเหมือนแสงอาทิตย์ธรรมดาเท่านั้นเอง แต่เทอร์โมมิเตอร์ตัวที่อยู่นอกเหนือจากแสงสีแดงนั้น กลับวัดได้อุณหภูมิสูงกว่าทุกตัว และทำการทดลองต่อไปจนทราบว่ามีความสัมพันธ์ทางกายภาพเช่นเดียวกับคลื่นแสงที่มองเห็นได้ทุกประการ เช่น การหักเห การดูดซับ ส่องผ่านหรือไม่ผ่านตัวกลาง



รูปที่ 2.1 สเปกตรัมของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเนื่องจากอุณหภูมิของวัตถุ/ที่มา ฟิสิกส์ราชมงคล(2547)

### 2.2.1 การให้ความร้อนโดยใช้รังสีอินฟราเรด

วัชรินทร์ ดงบัง (2556) อธิบายว่ารังสีอินฟราเรดเป็นการให้ความร้อนในรูปของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าโดยอยู่ในช่วงความยาวคลื่นของรังสีอินฟราเรด ซึ่งจะสัมพันธ์กับแสงที่มองเห็นได้ และรูปแบบอื่นของพลังงานคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ช่วงรังสีอินฟราเรดสามารถแบ่งได้ 3 กลุ่ม คือ คลื่นสั้น คลื่นปานกลาง และคลื่นยาว การดูดซับรังสีอินฟราเรดจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับความยาวของคลื่นอินฟราเรด ส่วนประกอบของวัตถุ ลักษณะพื้นผิวของวัตถุ มุมการตกกระทบ และสีของวัตถุ โดยการให้ความร้อนแก่วัตถุทางการเกษตรเหมาะที่จะใช้ช่วงความยาวของคลื่นในลักษณะคลื่นยาวเพราะให้ความร้อนต่อพื้นที่ต่ำและสามารถผ่านเข้าไปในเนื้อวัสดุได้ดีเหมาะกับการให้ความร้อนที่อุณหภูมิไม่สูงมากและจำกัดบริเวณผิวหรือสารเคลือบวัสดุ ความร้อนที่เกิดขึ้นนั้นเกิดจากการดูดซับรังสีอินฟราเรดของวัสดุ ดังนั้นวัสดุเหมาะกับการให้ความร้อนโดยรังสีอินฟราเรดจะต้องมีคุณสมบัติดูดซับรังสีอินฟราเรดได้ดีและไม่มีลักษณะผิวมันวาวสะท้อนแสงซึ่งจะทำให้รังสีส่วนใหญ่ถูกสะท้อนออกและทำให้ประสิทธิภาพการให้ความร้อนต่ำ



รูปที่ 2.2 หลักการเกิดความร้อนในวัสดุ/ที่มา วัชรินทร์ ดงบัง (2556)

### 2.2.2 ประโยชน์ของการใช้เทคนิคการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดต่อวัสดุทางการเกษตร

การให้ความร้อนโดยคลื่นอินฟราเรดเป็นการให้ความร้อนที่มีประสิทธิภาพและรวดเร็วเนื่องจากพลังงานจะถ่ายเทไปยังวัสดุโดยการแผ่รังสีโดยตรง ซึ่งต่างจากการให้ความร้อนด้วยเชื้อเพลิงหรือขดลวดความร้อนที่ใช้อากาศหรือตัวกลางในการพาหรือการนำความร้อนซึ่งจะมีการสูญเสียพลังงานมากกว่าและต้องใช้ระยะเวลานานกว่าในการถ่ายเทความร้อน นอกจากนี้การให้ความร้อนโดยอินฟราเรดยังสามารถให้ออกแบบให้เกิดความร้อนเฉพาะส่วนของวัสดุหรือที่ระดับความลึกต่างๆโดยไม่ต้องทำให้วัสดุทั้งชิ้นเกิดความร้อนได้ (Maryam Barzegar et al, 2015) อีกทั้งยังส่งผลให้ระยะเวลาการ

อบแห้งให้ลดลงและปริมาณสารสำคัญในวัสดุเมื่อเทียบกับการอบแบบลมร้อนปกติจะมีปริมาณมากขึ้น โดยใช้สารสำคัญในวัสดุสดเป็นบรรทัดฐาน คือ เมื่ออบแห้งด้วยเทคนิคอินฟราเรดสารสำคัญที่ได้จะใกล้เคียงกับสารสำคัญตั้งต้นในวัสดุสดมากกว่าการใช้เทคนิคการอบแห้งแบบลมร้อน หรือเกิดสารสำคัญชนิดใหม่ขึ้นมาที่ไม่มีในวัสดุสด (Raquel P.F. Guiné et al, 2011)

## 2.3 ทฤษฎีการอบแห้ง

2.3.1 ความชื้น (moisture content) บอกลถึงปริมาณน้ำที่อยู่ในอาหาร ซึ่งมีผลต่อปัจจัยหลากหลายที่จะเกิดขึ้นต่ออาหาร ได้แก่

2.3.1.1 การเน่าเสียของอาหาร (food spoilage) โดยเฉพาะการเน่าเสียจากจุลินทรีย์ อาหารที่มีความชื้นหรือปริมาณน้ำสูงจะเป็นอาหารที่เน่าเสียง่าย (perishable food) เนื่องจากมีสภาวะเหมาะสมกับการเจริญของจุลินทรีย์ที่ทำให้อาหารเสื่อมเสีย เช่น แบคทีเรีย ยีสต์ และรา ซึ่งกระทบต่ออายุการวางจำหน่าย (shelf life)

2.3.1.2 ความปลอดภัยทางอาหาร (food safety) อาหารที่มีความชื้นสูงเหมาะกับการเจริญของจุลินทรีย์ก่อโรค (pathogen) และการสร้างสารพิษ (toxin) ที่ก่อให้เกิดโรคอาหารเป็นพิษ รวมถึงการสร้างสารพิษของรา (mycotoxin) เช่น aflatoxin และ patulin ซึ่งเป็นอันตรายต่อผู้บริโภค

2.3.1.3 สมบัติทางกายภาพ และสมบัติเชิงความร้อนของอาหารด้านต่างๆ เช่น จุดหลอมเหลว จุดเดือด การนำความร้อน (thermal conductivity) ความร้อนจำเพาะ (specific heat)

2.3.1.4 อัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีที่มีผลกระทบทางลบต่ออาหารระหว่างการเก็บรักษา เช่น ปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาล (browning reaction) ปฏิกิริยาออกซิเดชันของลิพิด (lipid oxidation)

2.3.1.5 คุณภาพทางประสาทสัมผัส ซึ่งมีผลต่อการยอมรับของอาหาร ได้แก่ เนื้อสัมผัส (texture) เช่น ความกรอบ ความหนืด (viscosity) การเกาะติดกันเป็นก้อน (caking)

2.3.1.6 การกำหนดราคาสินค้า เช่น ข้าว เมล็ดธัญพืช กำหนดราคาข้าวเปลือกตามปริมาณความชื้น

2.3.2 การแสดงค่าความชื้นของอาหาร ปริมาณความชื้น นิยมบอกเป็นเปอร์เซ็นต์มี 2 รูปแบบ

2.3.2.1 ความชื้นฐานเปียก (wet basis) เป็นค่าที่ใช้บ่งชี้ความชื้นโดยทั่วไป มักบอกเป็นเปอร์เซ็นต์ เป็นค่าที่นิยมใช้ในทางการค้า สามารถคำนวณได้จากสูตร

$$MC(\%wb) = \frac{(W_w - W_d)}{W_w} \times 100 \quad (2.1)$$

เมื่อ	MC	คือ ความชื้นฐานเปียกหรือแห้ง ( $g_{\text{water}}/g_{\text{dry matter}}$ )
	$W_w$	คือ มวลวัสดุเริ่มต้น (g)
	$W_d$	คือ มวลวัสดุที่แห้ง (g)

2.3.2.2 ความชื้นฐานแห้ง (dry basis) เป็นค่าที่นิยมใช้กันในการวิเคราะห์กระบวนการอบแห้ง (dehydration) เพราะช่วยให้คำนวณได้สะดวก เนื่องจากน้ำหนักแห้งของอาหารคงที่ อาจบอกเป็นจำนวนกรัมของน้ำต่อจำนวนกรัมของของแข็ง ( $g_{\text{water}}/g_{\text{dry matter}}$ ) หรือเปอร์เซ็นต์ สามารถคำนวณได้จากสูตร

$$MC(\%db) = \frac{(W_w - W_d)}{W_d} \times 100 \quad (2.2)$$

เมื่อ	MC	คือ ความชื้นฐานเปียกหรือแห้ง ( $g_{\text{water}}/g_{\text{dry matter}}$ )
	$W_w$	คือ มวลวัสดุเริ่มต้น (g)
	$W_d$	คือ มวลวัสดุที่แห้ง (g)

2.3.3 การวัดความชื้นของอาหาร น้ำที่อยู่ในอาหารแต่ละชนิดมีการยึดติดอยู่ในโครงสร้างหรือโมเลกุลของสารอื่นๆ ที่เป็นส่วนประกอบของอาหารในรูปแบบ และความแข็งแรงต่างกัน ดังนั้นเทคนิคที่ใช้ในการหาความชื้นของอาหารแต่ละชนิดย่อมแตกต่างกันไป ทั้งความยากง่าย ความซับซ้อนของอุปกรณ์ และความถูกต้องแม่นยำของค่าที่ได้ เพื่อให้สามารถนำไปใช้งานได้ตามความเหมาะสมของอาหาร

2.3.3.1 การวัดความชื้นโดยตรง (direct method) เป็นการวัดปริมาณความชื้นที่มีอยู่ในอาหารโดยตรง สามารถทำได้หลายวิธี ได้แก่ การแยกเอาน้ำออกด้วยวิธีทางกายภาพ เช่น การอบแห้ง ทำให้น้ำระเหยออกไป การกลั่นแยกเอาน้ำออกจากอาหาร หรือการใช้วิธีการทางเคมี โดยการใส่สารเคมีทำปฏิกิริยากับน้ำ เป็นต้น วิธีการวัดโดยตรงเป็นการวัดที่ทำลายตัวอย่าง แต่ละวิธีจะมีความถูกต้องแตกต่างกัน วิธีที่มีการยอมรับกันทั่วไปว่ามีความถูกต้องแม่นยำสูง จะนิยมใช้เป็นค่าความชื้นมาตรฐาน เพื่อใช้ปรับเทียบค่าที่ได้จากการวัดด้วยวิธีการอื่นๆ ก่อนนำค่าที่ได้ไปใช้ประโยชน์

ก. Karl fischer method การทำปฏิกิริยาเคมี (chemical reaction)

ข. การวิเคราะห์ความชื้นด้วยการอบแห้ง

ค. การวิเคราะห์ความชื้นด้วยการกลั่น (distillation) นำตัวอย่างเมล็ดพืชที่บดเป็นแป้งผสมกับตัวทำละลายโทลูอีน (toluene) แล้วนำไปต้ม น้ำจะระเหยออกมาและควบแน่นเป็นหยดน้ำ ซึ่งวัดเป็นปริมาตรและน้ำหนักได้

ง. การใช้รังสีอินฟราเรดหรือคลื่นไมโครเวฟ (infrared and microwave radiation) เป็นการใช้รังสีอินฟราเรดหรือคลื่นไมโครเวฟ เพื่อระเหยน้ำในแป้งที่ได้จากการบดตัวอย่างเมล็ดพืช วิธีวัดความชื้นเหล่านี้มีจุดเด่นที่ให้ผลการวัดถูกต้อง แต่จุดด้อยสำคัญคือ อุปกรณ์และเครื่องมือมีราคาแพง การใช้งานต้องเตรียมอุปกรณ์หลายชิ้น และการวัดแต่ละครั้งใช้เวลานาน

2.3.3.2 การวัดโดยอ้อม (indirect methods) เป็นการวัดสมบัติทางไฟฟ้าของเมล็ดพืชด้วยอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ เช่น วัดค่าความจุไฟฟ้า การวัดความชื้นโดยทางอ้อมมีจุดเด่นตรงรู้ผลเร็ว สะดวก และทำได้บ่อย จุดด้อยคือ ค่าที่ได้จากการวัดเป็นค่าโดยประมาณการ การวัดโดยอ้อมวัดได้หลายวิธีเช่นกัน

ก. การวัดความต้านทานไฟฟ้า (resistance) อุปกรณ์วัดความต้านทานไฟฟ้าของเมล็ดพืช ทำได้โดยบรรจุเมล็ดพืชตัวอย่างลงช่องว่างระหว่างขั้วไฟฟ้าในภาชนะปิดแน่น ค่าความต้านทานไฟฟ้าที่วัดได้จะแปรเป็นค่าปริมาณความชื้น

ข. ความจุไฟฟ้า (capacitance) ตัวอย่างจะถูกบรรจุในภาชนะปิด โดยผนังภาชนะทำหน้าที่ปล่อยกระแสไฟฟ้าความถี่สูงออกมา การวัดวิธีนี้จำเป็นต้องใช้ตารางคาลิเบรชัน (calibration) ประกอบด้วยค่าความชื้นที่ได้จากการวัดด้วยวิธีนี้จะมี ความแม่นยำมากกว่าการวัดจากค่าความต้านทานไฟฟ้า

ค. ความชื้นสัมพัทธ์ (relative humidity) เป็นวิธีหาค่าความชื้นในเมล็ดพืชจากการวัดความชื้นสัมพัทธ์ในช่องอากาศระหว่างเมล็ด เนื่องจากปริมาณความชื้นในเมล็ดจะทำให้ความชื้นสัมพัทธ์ในช่องอากาศระหว่างเมล็ดเปลี่ยนแปลง ซึ่งความถูกต้องของค่าความชื้นที่วัดได้จากวิธีนี้ขึ้นอยู่กับ การกระจายตัวของความชื้น ดังนั้นการวัดด้วยวิธีนี้ต้องรอเวลานานประมาณ 1-2 ชั่วโมง เพื่อให้ความชื้นสัมพัทธ์ในช่องอากาศต่างๆ เกิดสมดุลก่อนวัดเพื่อให้ได้ค่าที่ถูกต้อง (พิมพ์เพ็ญ พรเฉลิมพงศ์, 2560)

2.3.4 อัตราส่วนความชื้น (Moisture ratio) ปริมาณน้ำที่เหลืออยู่ในวัสดุที่กำลังอบแห้ง เทียบกับปริมาณน้ำทั้งหมดที่มีอยู่ในวัสดุที่สามารถระเหยได้ภายใต้สภาวะการอบแห้งหนึ่งๆ (นิรนาม, 2560)

$$MR = \frac{M - M_{eq}}{M_0 - M_{eq}} \quad (2.3)$$

เมื่อ	MR	คือ อัตราส่วนความชื้น
	M	คือ ความชื้นที่เวลาใดๆ ( $g_{water}/g_{dry matter}$ )
	$M_0$	คือ ความชื้นเริ่มต้น ( $g_{water}/g_{dry matter}$ )
	$M_{eq}$	คือ ความชื้นสมดุล (มีค่าเท่ากับ 0) ( $g_{water}/g_{dry matter}$ )

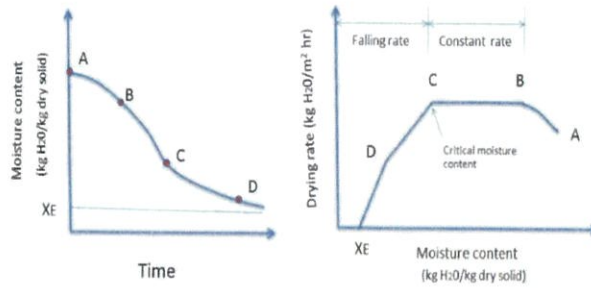
2.3.5 อัตราการทำแห้ง (Drying rate) อัตราที่น้ำระเหยออกจากวัสดุต่อพื้นที่ที่เกิดการระเหยต่อหน่วยเวลาระหว่างการทำแห้ง (dehydration)

อัตราการทำแห้งของอาหาร ขึ้นอยู่กับสภาพธรรมชาติของอาหารเริ่มต้นก่อนการทำแห้ง และสภาวะแวดล้อมระหว่างการทำแห้ง เช่น ชนิดของเครื่องทำแห้ง อุณหภูมิ เวลา ความชื้นสัมพัทธ์สัมประสิทธิ์การพาความร้อน (heat transfer coefficient) เป็นต้น (พิมพ์เพ็ญ พรเฉลิมพงศ์, 2560)

2.3.6 กราฟอัตราการทำแห้ง (Drying rate curve) สามารถแบ่งได้เป็น 3 ช่วงคือ

2.3.6.1 ช่วงการปรับสถานะเบื้องต้น (Initial adjustment period -AB) ช่วงเริ่มต้นของการอบแห้ง ความชื้นเริ่มต้นของอาหารจะมีค่าสูง ในช่วงนี้จะเกิดการถ่ายเทความร้อนระหว่างตัวกลางกับอาหารทำให้อุณหภูมิพื้นผิวของอาหารสูงขึ้นจนถึงอุณหภูมิสมดุลที่เงื่อนไขกำหนดในการอบแห้งเพื่อให้เกิดการถ่ายเทมวลของน้ำไปยังอากาศ อัตราการทำแห้งค่อยๆ เพิ่มขึ้น จนถึงช่วงอัตราทำแห้งคงที่

2.3.6.2 ช่วงอัตราทำแห้งคงที่ (Constant rate period-BC) ช่วงนี้น้ำภายในอาหารจะเคลื่อนที่ออกมายังผิวหน้าและระเหยออกไปด้วยพลังงานความร้อนอย่างต่อเนื่อง เป็นช่วงความชื้นของอาหารลดลงเป็นสัดส่วนกับเวลาจนถึง ความชื้นวิกฤต (critical moisture content) อัตราการทำแห้งจะเริ่มลดลงเรื่อยๆ



รูปที่ 2.3 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการแห้งและความชื้นของสาร

2.3.6.3 ช่วงอัตราการอบแห้งลดลง (Falling rate period CD และ DE) เป็นช่วงที่ความชื้นในอาหารเหลือน้อยลง การแพร่ไปยังผิวหน้าอาหารไม่ต่อเนื่องทำให้อุณหภูมิที่ผิวของอาหารสูงขึ้น และผิวหน้าอาหารแห้งลง อัตราการแห้งและความชื้นจะลดลงเรื่อยๆจนถึงค่าความชื้นสมดุล (equilibrium moisture content, XE) ซึ่งเป็นความชื้นที่ต่ำสุด ภายใต้สภาวะที่ใช้อยู่ในขณะนั้น ที่ความชื้นนี้อัตราการแห้งเป็นศูนย์ น้ำในอาหารไม่สามารถระเหยออกมาได้อีก (พิมพ์เพ็ญ พรเฉลิมพงศ์, 2560)

## 2.4 ทฤษฎีสมการการอบแห้ง

- 2.4.1 การเคลื่อนที่ของของเหลวเนื่องจากแรงดันผิว
- 2.4.2 การเคลื่อนที่ของของเหลวเนื่องจากความแตกต่างของความเข้มข้น
- 2.4.3 การเคลื่อนที่ของของเหลวเนื่องจากการกระจายความชื้นบนพื้นผิวที่มีรูพรุน
- 2.4.4 การเคลื่อนที่ของไอน้ำเนื่องจากความเข้มข้นความชื้นที่แตกต่างกัน
- 2.4.5 การเคลื่อนที่ของไอน้ำเนื่องจากความแตกต่างของอุณหภูมิ
- 2.4.6 การเคลื่อนที่ของน้ำและไอน้ำเนื่องจากความแตกต่างของความดัน

Luikov (1966) ได้พัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่ออธิบายการอบแห้งของผลิตภัณฑ์ที่มีรูพรุนโดยอาศัยกลไกทางกายภาพที่ระบุไว้ข้างต้น เป็นสมการเชิงอนุพันธ์ดังต่อไปนี้

$$\frac{\partial M}{\partial t} = \nabla^2 K_{11} M + \nabla^2 K_{12} \theta + \nabla^2 K_{13} P \quad (2.4)$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \nabla^2 K_{21} M + \nabla^2 K_{22} \theta + \nabla^2 K_{23} P \quad (2.5)$$

$$\frac{\partial P}{\partial t} = \nabla^2 K_{31} M + \nabla^2 K_{32} \theta + \nabla^2 K_{33} P \quad (2.6)$$

ที่ K11, K22 และ K33 เป็นค่าสัมประสิทธิ์ phenomenological ในขณะที่ค่า K อื่น ๆ แสดงค่าสัมประสิทธิ์ร่วม การรวมผลรวมของความขึ้น อุณหภูมิและความดันโดยรวมที่มีต่อความขึ้น พลังงาน และการถ่ายโอนมวลรวม ในปัจจุบันมีการระบุค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนข้อมูลวัสดุที่มีรูพรุนน้อยมาก ดังนั้นระบบ Luikov ของสมการ 2.4, 2.5 และ 2.6 ยังใช้ไม่ได้กับวัสดุที่มีรูพรุน

การอบแห้งด้วยวัสดุที่มีรูพรุนเกิดขึ้นภายใต้สภาพแวดล้อมที่ทำให้การคำนวณสมการของ Luikov ง่ายขึ้น ตัวอย่างเช่นการไหลของของเหลวเนื่องจากการไล่ระดับความดันโดยรวมจะมีความสำคัญมากในการอบแห้งที่อุณหภูมิสูงกว่าช่วงอุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้งด้วยวัสดุที่มีรูพรุน หมายความว่า จะสามารถลดเงื่อนไขของ persusurs ในระบบ Luikov ของสมการ ดังนั้นสมการที่อธิบายการอบแห้งของวัสดุที่มีรูพรุนจะกลายเป็นสมการดังนี้

$$\frac{\partial M}{\partial t} = \nabla^2 K_{11} M + \nabla^2 K_{12} \theta \quad (2.7)$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \nabla^2 K_{21} M + \nabla^2 K_{22} \theta \quad (2.8)$$

สมการข้างต้นสองสมการได้ถูกประยุกต์ใช้กับผลิตภัณฑ์หลายชนิดเช่น ข้าวโพด (Husain et al., 1972) สรุปได้ว่าอุณหภูมิและความขึ้นในการวิเคราะห์การอบแห้งของวัสดุที่มีรูพรุนสามารถใช้แค่ตัวอย่างเดียวในการวิเคราะห์ ดังนั้นสมการ phenomenological

ทฤษฎีการอบแห้งและการจำลองในวัสดุที่มีรูพรุน

$$\frac{\partial M}{\partial t} = \nabla^2 K_{11} M \quad (2.9)$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \nabla^2 K_{22} \theta \quad (2.10)$$

สมการ 2.9 และ 2.10 อธิบายการอบแห้งและการถ่ายเทความร้อนของวัสดุที่มีรูพรุนเป็นอย่างดี อย่างไรก็ตามในการวิเคราะห์วัสดุที่มีรูพรุนที่อบแห้งด้วยอุณหภูมิต่างๆ ไม่จำเป็นต้องใช้สมการที่ 2.10 ดังนั้นจึงเหลือแค่สมการ 2.9

$$\frac{\partial M}{\partial t} = \nabla^2 K_{11} M$$

เนื่องจากความชื้นของวัสดุจะถ่ายเทออกในรูปของการแพร่ที่  $K_{11}$  โดยการถ่ายโอนค่าสัมประสิทธิ์การแพร่กระจาย (D) สำหรับสมการ 2.11 สามารถเขียนเป็น

$$\frac{\partial M}{\partial t} = D \left[ \frac{\partial^2 M}{\partial r^2} + \frac{c}{r} \frac{\partial M}{\partial r} \right] \quad (2.11)$$

โดยที่ค่า  $c$  สำหรับแผ่นเรียบมีค่าเท่ากับ 0, สำหรับทรงกระบอกเท่ากับ 1 และสำหรับทรงกลมมีค่าเท่ากับ 2 โดยมีเงื่อนไขดังนี้

$$M(r, 0) = M(\text{in}) \quad (2.12)$$

$$M(r_0, t) = M(\text{eq}) \quad (2.13)$$

การวิเคราะห์สัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผลของรูปทรงต่างๆ (crank, 1957) สามารถทำได้ดังนี้ สำหรับแผ่นบาง

$$MR = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp \left[ -\frac{(2n+1)^2 \pi^2}{4} X^2 \right] \quad (2.14)$$

สำหรับทรงกลม

$$MR = \frac{6}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} \exp \left[ -\frac{n^2 \pi^2}{9} X^2 \right] \quad (2.15)$$

สำหรับทรงกระบอก

$$MR = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{\lambda_n^2} \exp \left[ -\frac{\lambda_n^2}{4} X^2 \right] \quad (2.16)$$

เมื่อ  $\lambda_n$  คือ รากของฟังก์ชัน Bessel ที่  $n = 0$  ในสมการ 2.16 ค่าเฉลี่ยของความชื้นและเวลา แสดงในรูป MR และ X ตามลำดับ

$$MR = \frac{\bar{M}(t) - M(eq)}{M(in) - M(eq)} \quad (2.17)$$

$$X = \frac{A}{V} (Dt)^{1/2} \quad (2.18)$$

เมื่อ A คือ พื้นที่พื้นผิว ( $\text{cm}^2$ )

V คือ ปริมาตร ( $\text{cm}^3$ )

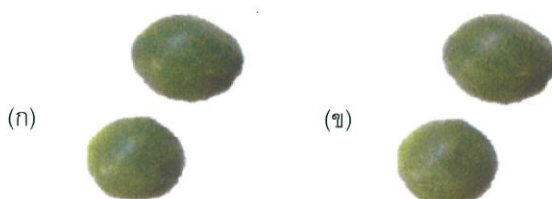
สำหรับรูปทรงแผ่นบาง  $\frac{A}{V}$  คือ ความหนาครึ่งหนึ่ง

สำหรับรูปทรงกลม  $\frac{A}{V}$  คือ รัศมี/3

สำหรับทรงกระบอก  $\frac{A}{V}$  คือ รัศมี/2

## 2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในการศึกษานี้ได้ทำการศึกษาการอบแห้งของผลิตภัณฑ์ทรงกลมขนาดเล็ก เช่น ถั่วเขียว จากความชื้น  $75.34 \pm 0.53$  (% w.b.) เป็น  $20.02 \pm 0.14$  (% w.b.) ในเครื่องอบแห้งแบบอินฟราเรดร่วมเบดสั้น ลักษณะทางกายภาพของผลิตภัณฑ์ที่เปลี่ยนไปคือ ความชื้น ความเป็นทรงกลม การหดตัว และสี โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ในการเก็บผลการทดลองที่ อุณหภูมิภายในห้องอบแห้ง 30, 40 และ 50°C ในระดับความเข้มของรังสีอินฟราเรดต่างๆที่ 2000, 4000 และ 9000  $\text{W/m}^2$  จากนั้นนำผลที่ได้มาเปรียบเทียบกับ การอบแห้งแบบอินฟราเรดเบดสั้น ทำให้สามารถนำผลการทดลองที่ได้มาสร้างแบบจำลองลักษณะทางกายภาพ ดังรูป



รูปที่ 2.4 ลักษณะที่เปลี่ยนแปลงของผลิตภัณฑ์เมื่อมองด้วยตาเปล่า (ก) การอบแห้งแบบอินฟราเรดร่วมเบดสั้นที่ความเข้มรังสี 9000 , 50 °C (ข) การอบแห้งแบบอินฟราเรดที่มีเบดสั้นที่ความเข้มรังสี 9000 , 30 °C ที่มา (Maryam Barzegar et al, 2015)

ในการศึกษาการสร้างแบบจำลองการอบแห้งโดยคำนึงถึงการหดตัวของมันฝรั่งในระหว่างกระบวนการอบแห้ง (Marcelo S. Bacelosa, 2011) ด้วยวิธีการอบแห้งแบบลมร้อนที่อุณหภูมิ 60 °C โดยใช้ตัวอย่างวัสดุคือมันฝรั่งรูปทรงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 mm และความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ  $5 \text{ kg}_{\text{water}}/100 \text{ kg}_{\text{dry air}}$  โดยแบบจำลองการอบแห้งจะแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวกับเวลาเพื่ออธิบายถึงจลนพลศาสตร์การอบแห้งของมันฝรั่งในแง่ของผลกระทบของการหดตัวต่อการถ่ายเทมวล

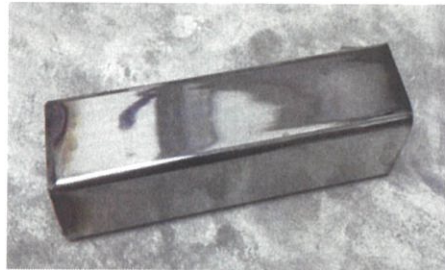
## บทที่ 3

### วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีการทดลอง

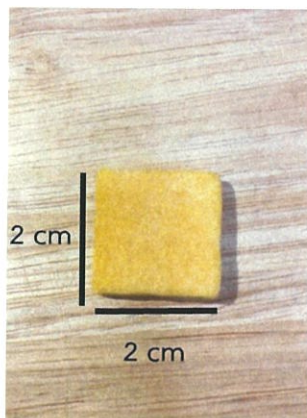
#### 3.1 ตัวอย่างทดลองและวิธีการเตรียมตัวอย่าง

ตัวอย่างวัสดุที่ใช้ในการทดลอง คือ ฟักทองพันธุ์ไทยที่มีน้ำหนักต่อลูกประมาณ 5 kg ในการเตรียมฟักทองเพื่อใช้ในการทดลองอบแห้ง กำหนดให้ฟักทองมีรูปทรงสี่เหลี่ยมที่มีความกว้าง × ความยาว × ความสูงเป็น  $2 \times 2 \times 0.5$  cm<sup>3</sup> เป็นชิ้นโดยชุดเครื่องหั่นฟักทองและแม่พิมพ์แสดงอยู่ในรูปที่ 3.1 และชิ้นฟักทองที่ใช้ในการทดลองแสดงอยู่ในรูปที่ 3.2 ความชื้นเริ่มต้นของฟักทองจากวิธีการวิเคราะห์ความชื้นที่แสดงในหัวข้อ

3.4 คือ  $9 \text{ g}_{\text{water}}/\text{g}_{\text{dry matter}}$



รูปที่ 3.1 ชุดเครื่องหั่นและแม่พิมพ์



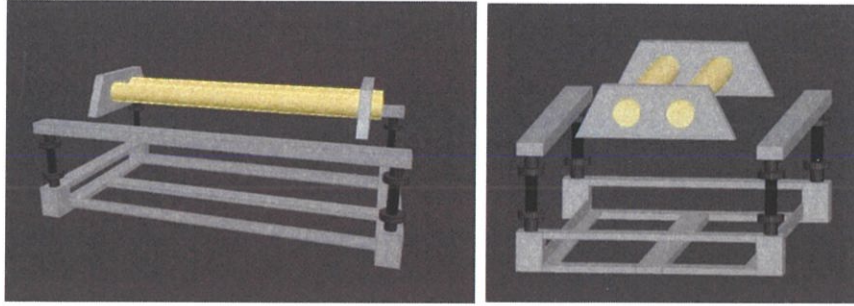
รูปที่ 3.2 ตัวอย่างชิ้นฟักทองที่ใช้ในการอบ

### 3.2 เครื่องอบแห้ง

เครื่องอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดร่วมกับเบดสั้น ประกอบไปด้วยส่วนประกอบหลัก 4 ส่วน ได้แก่ ส่วนให้ความร้อนด้วยรังสีอินฟราเรด ส่วนเบดพร้อมระบบสั้นสะเทือน ส่วนระบบควบคุมและพัดลม ห้องอบแห้งห้องอบแห้งทำด้วยเหล็กกล้าไร้สนิมทรงกระบอกสองชั้นมีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 30 cm ความยาว 60 cm ส่วนที่ให้ความร้อนด้วยรังสีอินฟราเรดประกอบด้วยหลอดอินฟราเรดสองดวงขนาด 800 W ติดตั้งอยู่ด้านบนของห้องอบแห้ง โดยให้ความร้อนที่อุณหภูมิพื้นผิวประมาณ 750 °C ที่ความยาวคลื่นสูงสุดเท่ากับ 3.1 mm เมื่อกำหนดให้วัสดุรับรังสีเป็นวัตถุดิบดำ ฝาครอบอลูมิเนียมถูกวางไว้ที่ด้านบนของหลอดอินฟราเรดเพื่อเป็นตัวสะท้อนรังสีอินฟราเรด กำหนดระยะห่างระหว่างตัวให้ความร้อนและถาดอบแห้งไว้ที่ 20 cm ถาดอบแห้งทำจากสแตนเลสแบบเจาะรู มีขนาด 40x20x5 cm<sup>3</sup> ติดตั้งอยู่เหนือระบบสั้นสะเทือน ระบบสั้นสะเทือนทำงานโดยใช้มอเตอร์ขนาดเล็กติดตั้งร่วมกับเพลาลูกเบี้ยวเพื่อส่งผ่านการสั้นสะเทือนไปยังถาดอบแห้ง แพลตฟอร์มการสั้นสะเทือนของถาดรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้านี้เกิดขึ้นจากการติดตั้งขดสปริงแปดจุดทั้งด้านบนและด้านล่าง ซึ่งทำให้แพลตฟอร์มการสั้นสะเทือนที่ได้เป็นลักษณะการสั้นในแนวตั้ง ในส่วนของการควบคุมอากาศใช้พัดลมแบบแรงเหวี่ยงที่ขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ขนาด 0.5 kW ช่วยการพาความร้อนในกรณีอบแห้งแบบลมร้อนดังรูป 3.3 และ 3.4



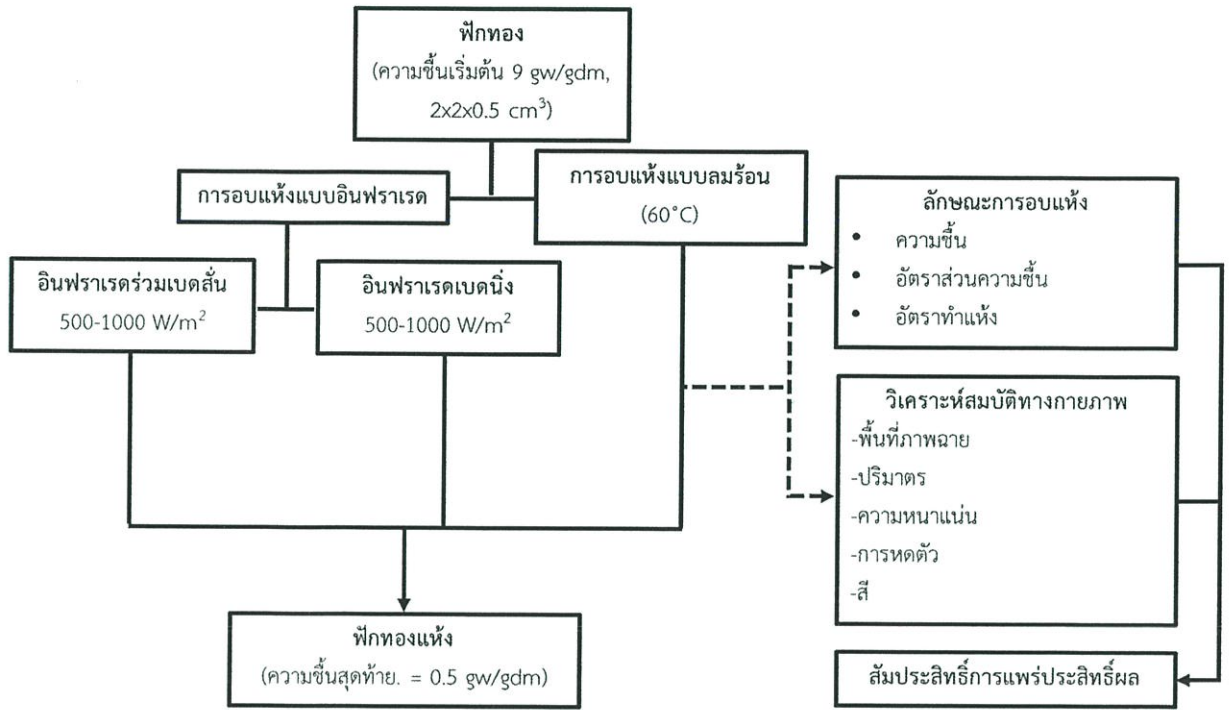
รูปที่ 3.3 เครื่องอบแห้ง



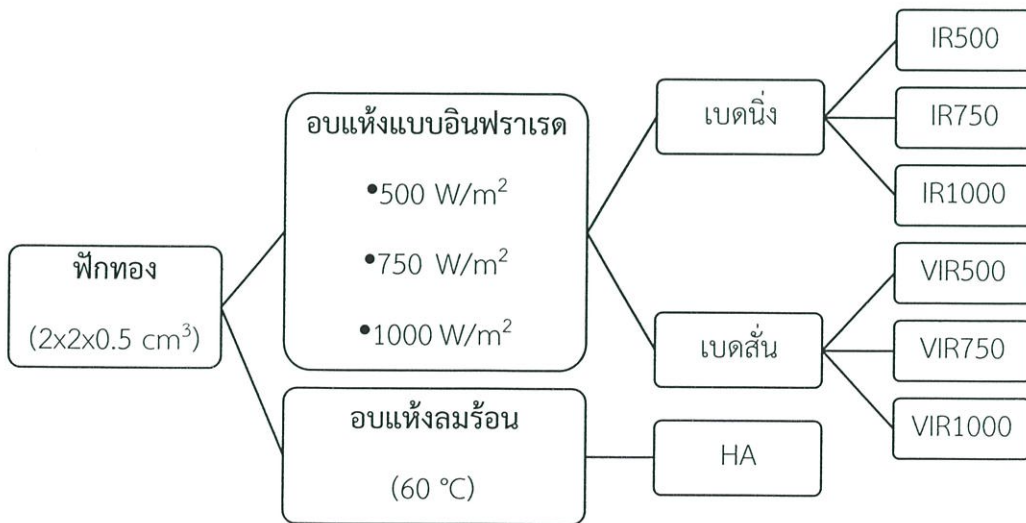
รูปที่ 3.4 หลอดอินฟราเรดและเบตสันสะท้อนภายในห้องอบแห้ง

### 3.3 แผนการทดลอง

ชิ้นฟักทอง ( $20 \times 20 \times 5 \text{ mm}^3$ ) ที่มีน้ำหนัก  $200 \text{ g}$  ต่อการทดลองถูกนำมาอบแห้งในลักษณะการอบแห้งแบบชั้นเดียว (Single layer drying) ด้วยวิธีการอบแห้ง 3 วิธี ได้แก่ การอบแห้งแบบอินฟราเรดร่วมกับเบตสัน การอบแห้งแบบอินฟราเรดและการอบแห้งแบบลมร้อน โดยสภาวะการทดลอง ได้แก่ ความเข้มรังสีอินฟราเรด  $500, 750$  และ  $1000 \text{ W/m}^2$  สำหรับการอบแห้งแบบอินฟราเรดทั้งแบบร่วมกับเบตสันและเบตสัน ส่วนการอบแห้งแบบลมร้อนใช้อุณหภูมิอบแห้ง  $60 \text{ }^\circ\text{C}$  ในการตั้งค่าการสั่นของเบต ใช้การสั่น  $750 \text{ rpm}$  เพื่อให้ชิ้นฟักทองเกิดการพลิกกลับในระหว่างการอบแห้ง ในระหว่างการอบแห้งมีการเก็บข้อมูลลักษณะการอบแห้ง ได้แก่ ความชื้น อัตราส่วนความชื้นและอัตราการอบแห้ง (หัวข้อ 3.4) ซึ่งนำมาใช้ในการตัดสินใจเวลาในการอบแห้งที่เหมาะสมเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ฟักทองอบแห้งที่มีความชื้นสุดท้าย  $0.5 \text{ g}_{\text{water}}/\text{g}_{\text{dry matter}}$  นอกจากนี้มีการเก็บข้อมูลสมบัติทางกายภาพในระหว่างการอบแห้งด้วย โดยสมบัติทางกายภาพของฟักทองที่ทำการวิเคราะห์ได้แก่ พื้นที่ ปริมาตร ความหนาแน่น การหดตัว และสี (หัวข้อ 3.5) ข้อมูลการเปลี่ยนแปลงลักษณะการอบแห้งและสมบัติทางกายภาพในระหว่างการอบแห้งที่ได้มาถูกนำมาวิเคราะห์เชิงจลนศาสตร์ และสามารถประเมินสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผลโดยพิจารณาการหดตัวของวัสดุตั้งวิธีที่แสดงในหัวข้อ 3.6



รูปที่ 3.5 แผนผังการทดลอง



รูปที่ 3.6 สิ่งทดลองในการทดลอง

### 3.4 การวิเคราะห์ลักษณะการอบแห้ง

3.4.1 ความชื้น วิเคราะห์จากความชื้นของวัสดุสามารถทำได้โดยการบันทึกค่าน้ำหนักของวัสดุ ณ เวลาใดๆและนำไปคำนวณหาความชื้นจากสูตร

$$MC (db) = \frac{W_w - W_d}{W_d} \quad (3.1)$$

เมื่อ	MC	คือ ความชื้น ( $g_{\text{water}}/g_{\text{dry matter}}$ )
	$W_w$	คือ น้ำหนักเปียก (g)
	$W_d$	คือ น้ำหนักแห้ง (g)

### 3.4.2 อัตราส่วนความชื้น

$$MR = \frac{M - M_{eq}}{M_0 - M_{eq}} \quad (3.2)$$

เมื่อ	MR	คือ อัตราส่วนความชื้น
	M	คือ ความชื้นที่เวลาใดๆ ( $g_{\text{water}}/g_{\text{dry matter}}$ )
	$M_0$	คือ ความชื้นเริ่มต้น ( $g_{\text{water}}/g_{\text{dry matter}}$ )
	$M_{eq}$	คือ ความชื้นสมดุล (มีค่าเท่ากับ 0) ( $g_{\text{water}}/g_{\text{dry matter}}$ )

### 3.4.3 อัตราการอบแห้ง

$$DR = \frac{M_{t-dt} - M_t}{d_t} \quad (3.3)$$

เมื่อ	DR	คือ อัตราทำแห้ง ( $g_{\text{water}}/g_{\text{dry matter}} \cdot \text{min}$ )
	$M_{t-dt}$	คือ ความชื้นที่เวลาก่อนหน้า ( $g_{\text{water}}/g_{\text{dry matter}}$ )
	$M_t$	คือ ความชื้นที่เวลาใดๆ ( $g_{\text{water}}/g_{\text{dry matter}}$ )
	$d_t$	คือ ผลต่างเวลาอบแห้ง (min)

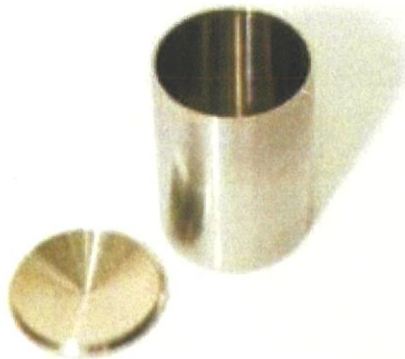
### 3.5 การวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพ

3.5.1 พื้นที่ พื้นที่ที่ภาพฉายได้จากกล้องจุลทรรศน์สามมิติถ่ายผ่านซอฟต์แวร์ EOS แล้วทำการวัดขนาดจากซอฟต์แวร์ AxioVision SE64

3.5.2 ปริมาตร วัดจากพิคโนมิเตอร์โดยใช้สารโทลูอินแทนน้ำเพื่อป้องกันการซึมเข้าของน้ำคำนวณได้จากสมการ

$$V_{\text{วัสดุ}} = \frac{m_{\text{โทลูอิน}}}{D_{\text{โทลูอิน}}} \quad (3.4)$$

เมื่อ  $V_{\text{วัสดุ}}$  คือ ปริมาตร ( $m^3$ )  
 $D_{\text{โทลูอิน}}$  คือ ความหนาแน่น ( $kg/m^3$ )  
 $m_{\text{โทลูอิน}}$  คือ มวล ( $kg$ )



รูปที่ 3.7 พิคโนมิเตอร์

3.5.3 ความหนาแน่น คำนวณจากมวลต่อปริมาตรของวัสดุที่ได้จากการวัดโดยพิคโนมิเตอร์ดังนี้

$$D_{\text{วัสดุ}} = \frac{m_{\text{วัสดุ}}}{V_{\text{วัสดุ}}} \quad (3.5)$$

เมื่อ  $D_{\text{วัสดุ}}$  คือ ความหนาแน่น ( $kg/m^3$ )  
 $m_{\text{วัสดุ}}$  คือ มวล ( $kg$ )  
 $V_{\text{วัสดุ}}$  คือ ปริมาตร ( $m^3$ )

3.5.4 การหัดตัว คำนวณจากปริมาตร ผลต่างระหว่างปริมาตรของวัสดุที่วัดได้ต่อปริมาตรวัสดุเริ่มต้นตั้งสมการ

$$\% \text{การหัดตัว} = \frac{V_1 - V_2}{V_1} \times 100 \quad (3.6)$$

เมื่อ  $V_1$  คือ ปริมาตรเริ่มต้น ( $m^3$ )  
 $V_2$  คือ ปริมาตรที่เวลาใดๆ ( $m^3$ )

เปอเซ็นต์การหัดตัวโดยคิดจากพื้นที่ภาพฉาย ผลต่างระหว่างพื้นที่ภาพฉายของวัสดุที่วัดได้ต่อพื้นที่ภาพฉายวัสดุเริ่มต้นตั้งสมการ

$$\% \text{การหัดตัว} = \frac{A_1 - A_2}{A_1} \times 100 \quad (3.7)$$

เมื่อ  $A_1$  คือ พื้นที่ภาพฉายเริ่มต้น ( $m^2$ )  
 $A_2$  คือ พื้นที่ภาพฉายที่เวลาใดๆ ( $m^2$ )

3.5.5 สี วัดจากเครื่องวัดสียี่ห้อ HunterLAB ในระบบการวัดสีแบบ  $L^*a^*b^*$  จากนั้นนำมาคำนวณหาค่า  $\Delta E$  จากสมการ

$$\Delta E = \sqrt{[(L^* - L_0^*)^2 + (a^* - a_0^*)^2 + (b^* - b_0^*)^2]} \quad (3.8)$$

เมื่อ  $\Delta E$  คือ ความแตกต่างของสี  
 $L^*$  คือ ค่าความสว่างที่เวลาใดๆ  
 $L_0^*$  คือ ค่าความสว่างเริ่มต้น  
 $a^*$  คือ ค่าความแดงที่เวลาใดๆ  
 $a_0^*$  คือ ค่าความแดงเริ่มต้น  
 $b^*$  คือ ค่าความเหลืองที่เวลาใดๆ  
 $b_0^*$  คือ ค่าความเหลืองเริ่มต้น



รูปที่ 3.8 เครื่องวัดสีที่ชื่อ HunterLAB

### 3.6 การคำนวณสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผล

จากสมการพื้นฐานในการคำนวณสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผลสำหรับแผ่นบาง

$$M = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp \left[ -\frac{(2n+1)^2 \pi^2}{4} X^2 \right] \quad (3.9)$$

แต่ในการทดลองครั้งนี้ เราจะใช้ความหนาของวัสดุที่เป็นความหนาจริงจะได้

$$X^2 = \left( \frac{1}{L} \right)^2 (Dt) \quad (3.10)$$

$$X^2 = \left( \frac{1}{\frac{L}{2}} \right)^2 (Dt) \quad (3.11)$$

เมื่อ  $L$  คือ ความหนาของวัสดุ (m)

จากนั้นนำสมการ 3.11 ไปแทนค่าในสมการพื้นฐานในการคำนวณสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผล สำหรับแผ่นบางสมการ 3.9 จะได้ สมการคำนวณสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผลสำหรับวัสดุแบบแผ่นบาง ที่ไม่คำนึงถึงการหดตัว

สมการคำนวณสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผลสำหรับวัสดุแบบแผ่นบางที่ไม่คำนึงถึงการหดตัว

$$MR = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp\left(-\frac{(2n+1)^2 \pi^2 D_{eff} t}{L^2}\right) \quad (3.12)$$

เมื่อ  $L$  คือ ความหนาของวัสดุ (m)

ใส่  $\ln$  ในสมการ 3.12 จะได้

$$\ln MR = \ln\left(\frac{8}{\pi^2}\right) - \frac{1}{(2n+1)^2} \left(\frac{(2n+1)^2 \pi^2 D_{eff} t}{L^2}\right) \quad (3.13)$$

จะได้สมการเส้นตรง คือ

$$\ln MR = \ln\left(\frac{8}{\pi^2}\right) - \left(\frac{\pi^2 D_{eff} t}{L^2}\right) \quad (3.14)$$

ทำการสร้างกราฟ ระหว่าง  $\ln MR$  กับ  $t$  จะได้

$$\text{Slope} = \frac{\pi^2 D_{eff}}{L^2} \quad (3.15)$$

และได้จุดตัดแกน  $y$

$$\text{Intercept} = \ln\left(\frac{8}{\pi^2}\right) \quad (3.16)$$

แต่ในงานวิจัยของเรา เรามีการใช้สูตรอีกสูตรหนึ่งซึ่งคำนึงถึงการหดตัวของวัสดุโดยเราได้เปลี่ยนจากค่าความหนาย้อนกลับไปพื้นฐานของสูตรเดิมก็คือ เป็นปริมาตรส่วนด้วยพื้นที่ ซึ่งปริมาตรและพื้นที่เราได้ทำการวิเคราะห์โดยวิเคราะห์ตามเวลาในการอบแห้งด้วยเพื่อให้เกิดความแม่นยำของข้อมูลมากขึ้นเพราะในระหว่างกระบวนการอบแห้งวัสดุเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างอยู่ตลอดเวลา จึงได้ดังนี้

$$MR = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp\left(-\frac{(2n+1)^2 \pi^2 D_{\text{efs}} t}{\left(\frac{V}{\Lambda}\right)^2}\right) \quad (3.17)$$

ใส่  $\ln$  ในสมการ (3.17) จะได้

$$\ln MR = \ln\left(\frac{8}{\pi^2}\right) - \frac{1}{(2n+1)^2} - \left(\frac{(2n+1)^2 \pi^2 D_{\text{efs}} t}{\left(\frac{V}{\Lambda}\right)^2}\right) \quad (3.18)$$

จะได้สมการเส้นตรงคือ

$$\ln MR = \ln\left(\frac{8}{\pi^2}\right) - \left(\frac{\pi^2 D_{\text{efs}} t}{\left(\frac{V}{\Lambda}\right)^2}\right) \quad (3.19)$$

ทำการสร้างกราฟ ระหว่าง  $\ln MR$  กับ  $t$  จะได้

$$\text{Slope} = -\frac{\pi^2 D_{\text{efs}}}{\left(\frac{V}{\Lambda}\right)^2} \quad (3.20)$$

และได้จุดตัดแกน  $y$

$$\text{Intercept} = \ln\left(\frac{8}{\pi^2}\right) \quad (3.21)$$

## บทที่ 4

### ผลการทดลอง

#### 4.1 ลักษณะการอบแห้งของฟักทอง

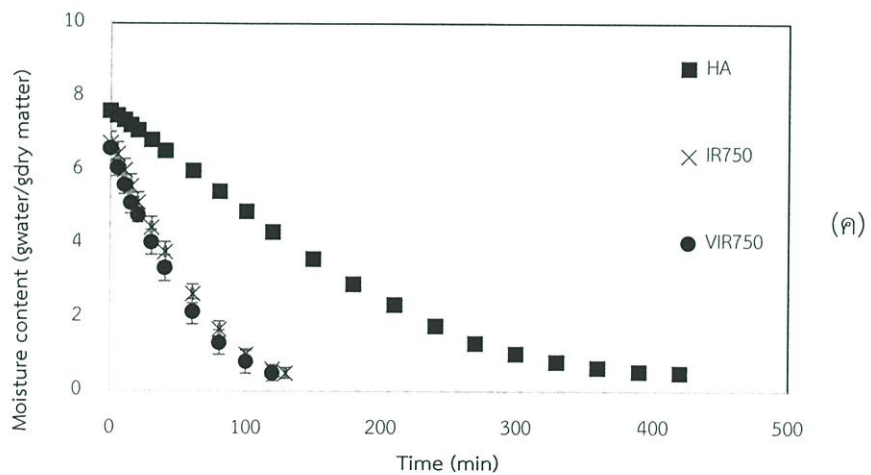
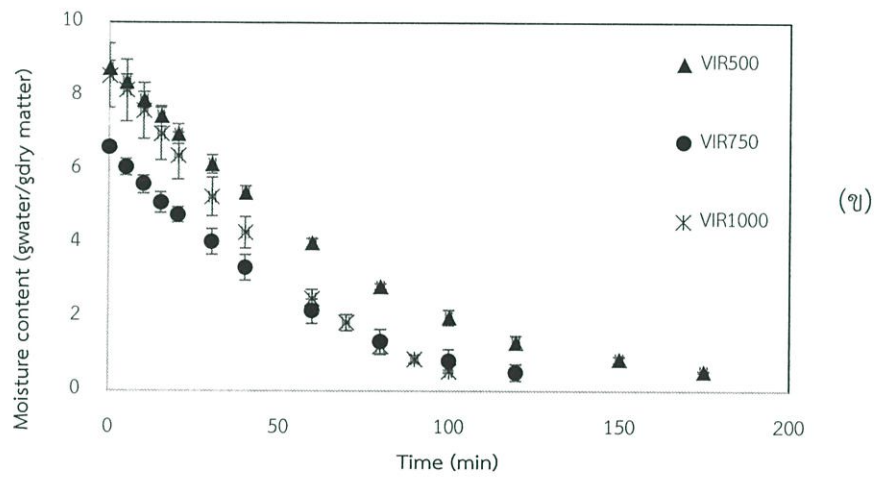
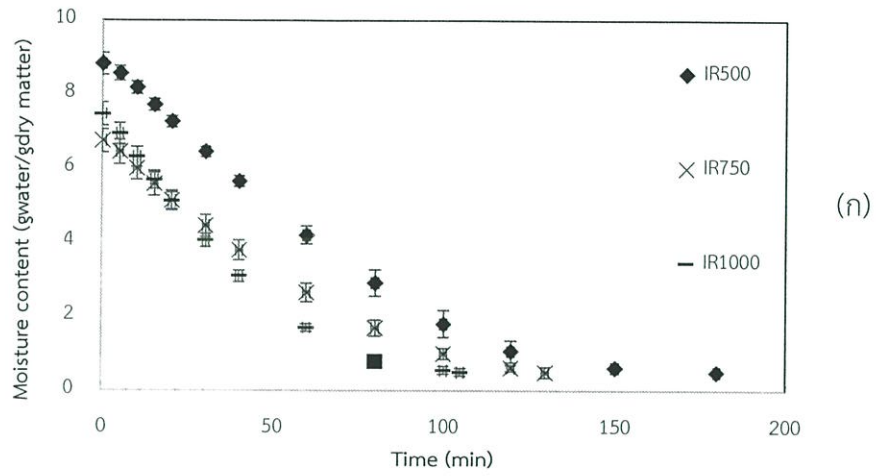
ทดลองอบแห้งฟักทองโดยเลือกวิธีอบแห้งแบบอินฟราเรดโดยให้อากาศไหลผ่านฟักทองในอัตราการไหลที่เท่ากัน คือ 0.5 m/s ที่ความเข้มรังสีแตกต่างกันคือ 500, 750 และ 1000 W/m<sup>2</sup> ในเงื่อนไขอีกประการคือการใช้อินฟราเรดร่วมกับเบตสันและเบตนิ่ง โดยทำการลดความชื้นของฟักทองให้เหลือ 0.5 g<sub>water</sub>/g<sub>dry matter</sub> เพื่อให้ง่ายต่อการเปรียบเทียบผลการทดลองอบแห้งของฟักในแต่ละเงื่อนไขที่ใช้ในการอบแห้ง ผู้ทดลองได้ทำการแสดงค่าความชื้นฟักทองในรูปของความชื้น(MC) อัตราส่วนความชื้น(MR) และอัตราการอบแห้ง(DR) ดังแสดงในรูปที่ 4.1 (ก), (ข), 4.2 (ก), (ข) และ 4.3 (ก), (ข)

ทดลองอบแห้งฟักทองโดยเลือกวิธีอบแห้งแบบลมร้อนโดยให้อากาศไหลผ่านฟักทองในอัตราการไหลที่เท่ากัน คือ 0.5 m/s ที่อุณหภูมิ 60°C โดยอบจนถึงความชื้นสุดท้ายที่ 0.5 g<sub>water</sub>/g<sub>dry matter</sub> เป็นเป้าหมายการลดความชื้นที่เท่ากันกับการอบแบบอื่นๆที่ทำการทดลองเพื่อให้สามารถนำมาเปรียบเทียบลักษณะการอบแห้งได้อย่างเห็นได้ชัดในกระบวนการอบแห้ง ดังแสดงในรูปที่ 4.1 (ก), (ข) และ(ค)

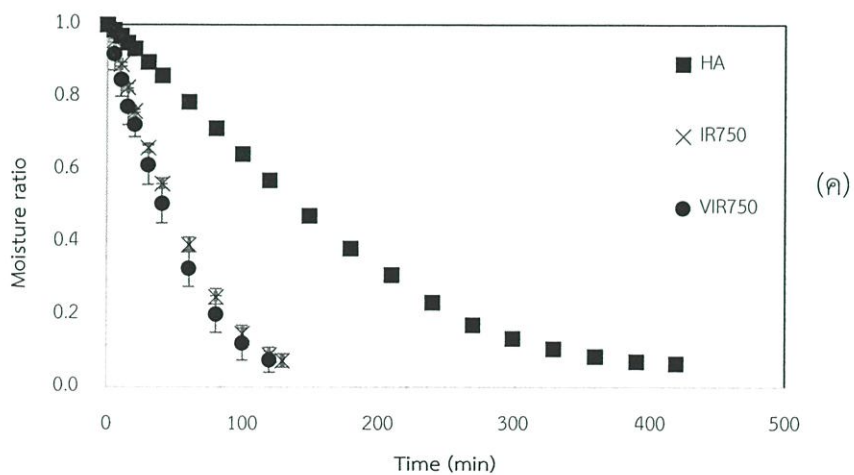
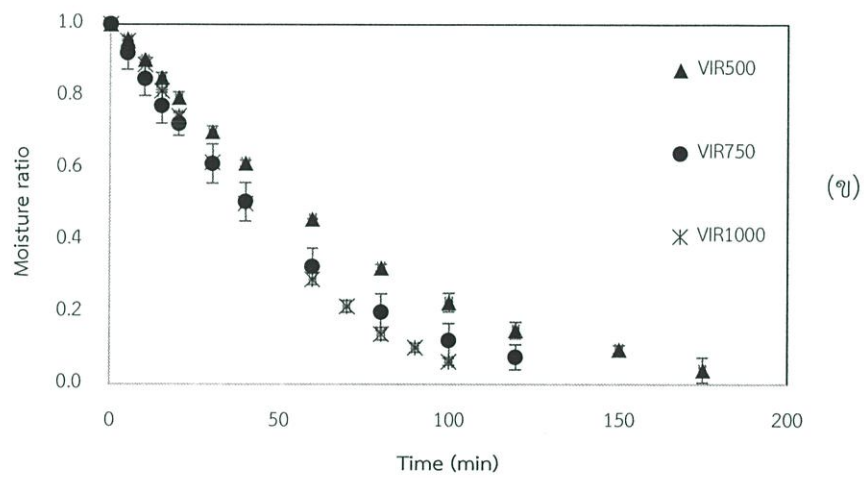
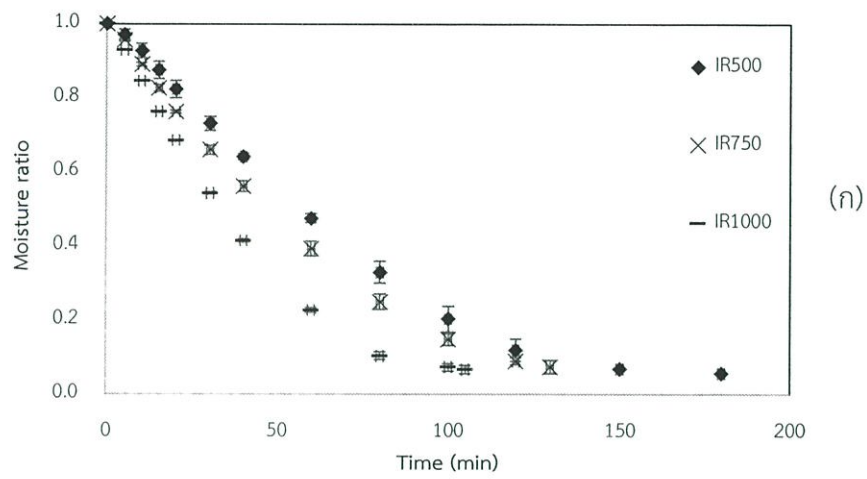
จากตาราง 4.1 แสดงให้เห็นถึงวิธีการอบแห้งแบบอินฟราเรดมีอิทธิพลต่อการลดความชื้นของฟักทอง โดยที่ความเข้มรังสีเป็นตัวแปรสำคัญในการทำให้ความชื้นของฟักทองลดลงอย่างรวดเร็ว และการใช้เบตสันมีส่วนช่วยเล็กน้อยในด้านการลดระยะเวลาในการอบแห้งฟักทอง สามารถสังเกตได้จากค่าอัตราการอบแห้งได้จากตาราง 4.1 และกราฟ 4.1, 4.2 และ 4.3 ดังนี้

ตารางที่ 4.1 เวลาในการอบแห้งและอัตราการแห้งสูงสุดจากการอบแห้งฟักทองด้วยวิธีต่างๆ

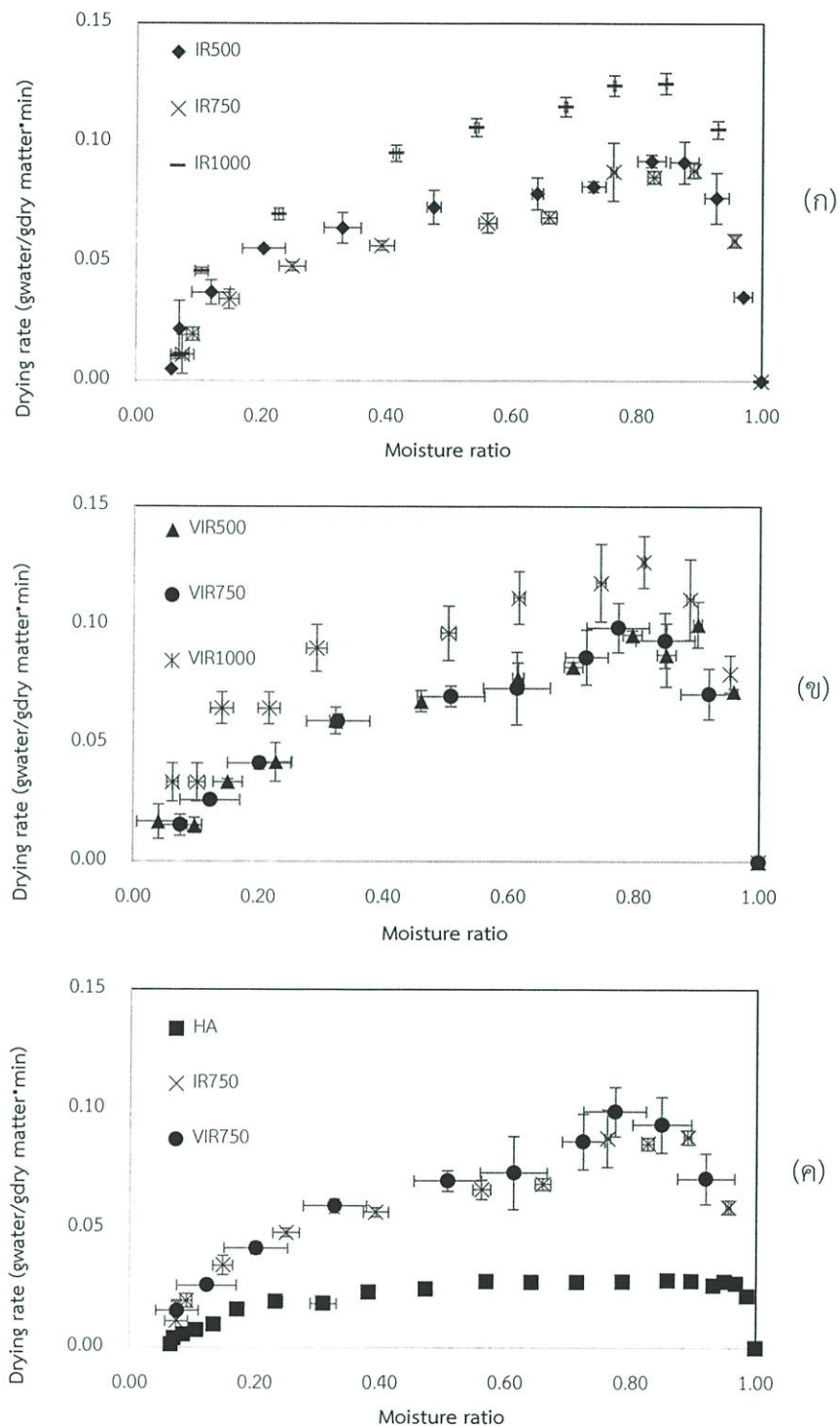
Treatment	Drying time (min)	Maximum drying rate (g <sub>water</sub> /g <sub>dry matter</sub> ·min)
HA	420	0.03
IR500	180	0.09
IR750	130	0.09
IR1000	105	0.12
VIR500	175	0.10
VIR750	120	0.09
VIR1000	100	0.13



รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นกับเวลา (ก) การอบแห้งแบบ IR ที่ความเข้มรังสีต่างๆ (ข) การอบแห้งแบบ VIR ที่ความเข้มรังสีต่างๆ และ (ค) การอบแห้งแบบ HA ที่อุณหภูมิ 60 °C เทียบกับการอบแห้งแบบ IR และ VIR ที่ความเข้มรังสี 750 W/m<sup>2</sup>



รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับเวลา (ก) การอบแห้งแบบ IR ที่ความเข้มรังสีต่างๆ (ข) การอบแห้งแบบ VIR ที่ความเข้มรังสีต่างๆ และ (ค) การอบแห้งแบบ HA ที่อุณหภูมิ 60 °C เทียบกับการอบแห้งแบบ IR และ VIR ที่ความเข้มรังสี 750 W/m<sup>2</sup>

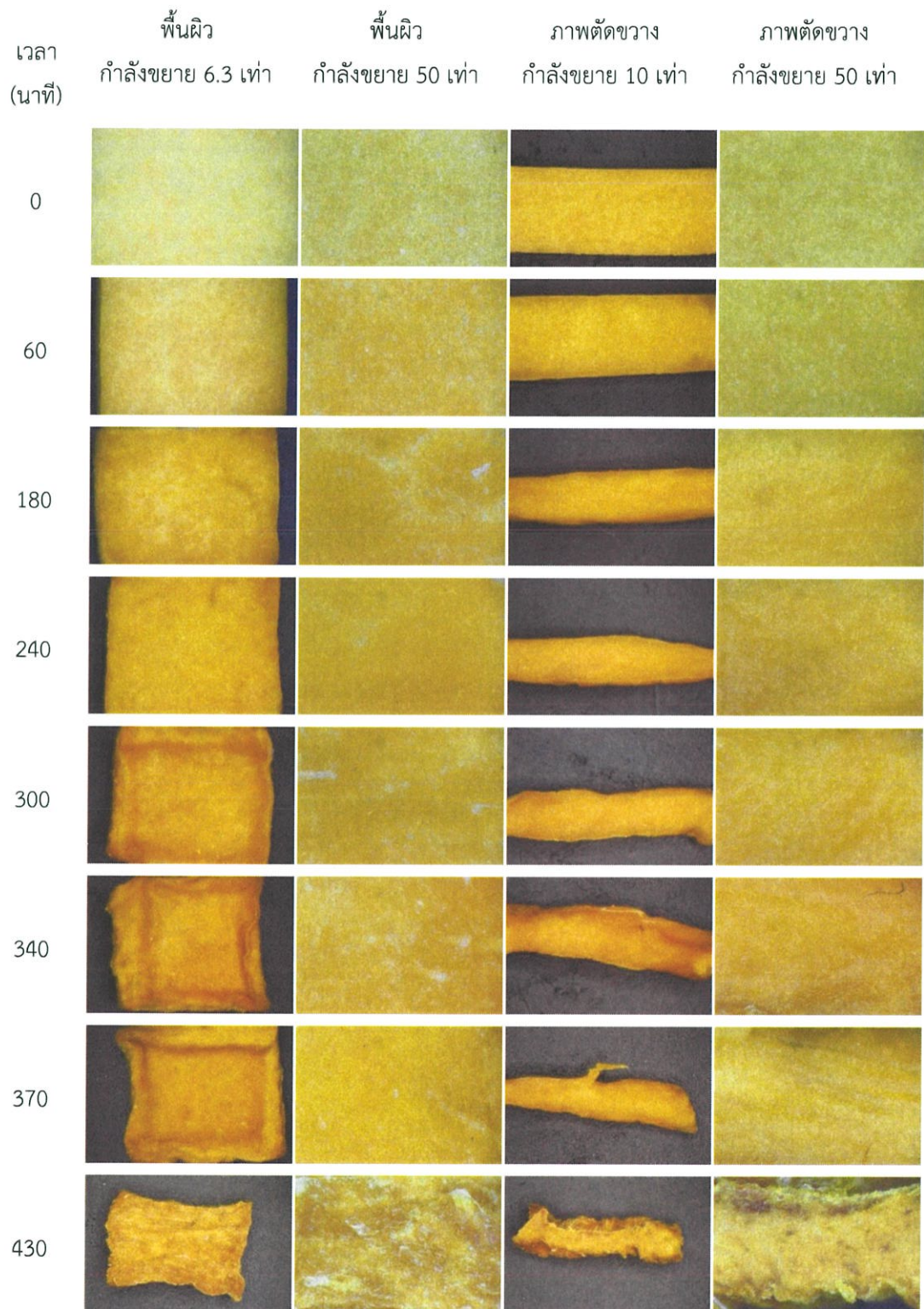


รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการอบแห้งกับอัตราส่วนความชื้น (ก) การอบแห้งแบบ IR ที่ความเข้มรังสีต่างๆ (ข) การอบแห้งแบบ VIR ที่ความเข้มรังสีต่างๆ และ (ค) การอบแห้งแบบ HA ที่อุณหภูมิ 60 °C เทียบกับการอบแห้งแบบ IR และ VIR ที่ความเข้มรังสี 750 W/m<sup>2</sup>

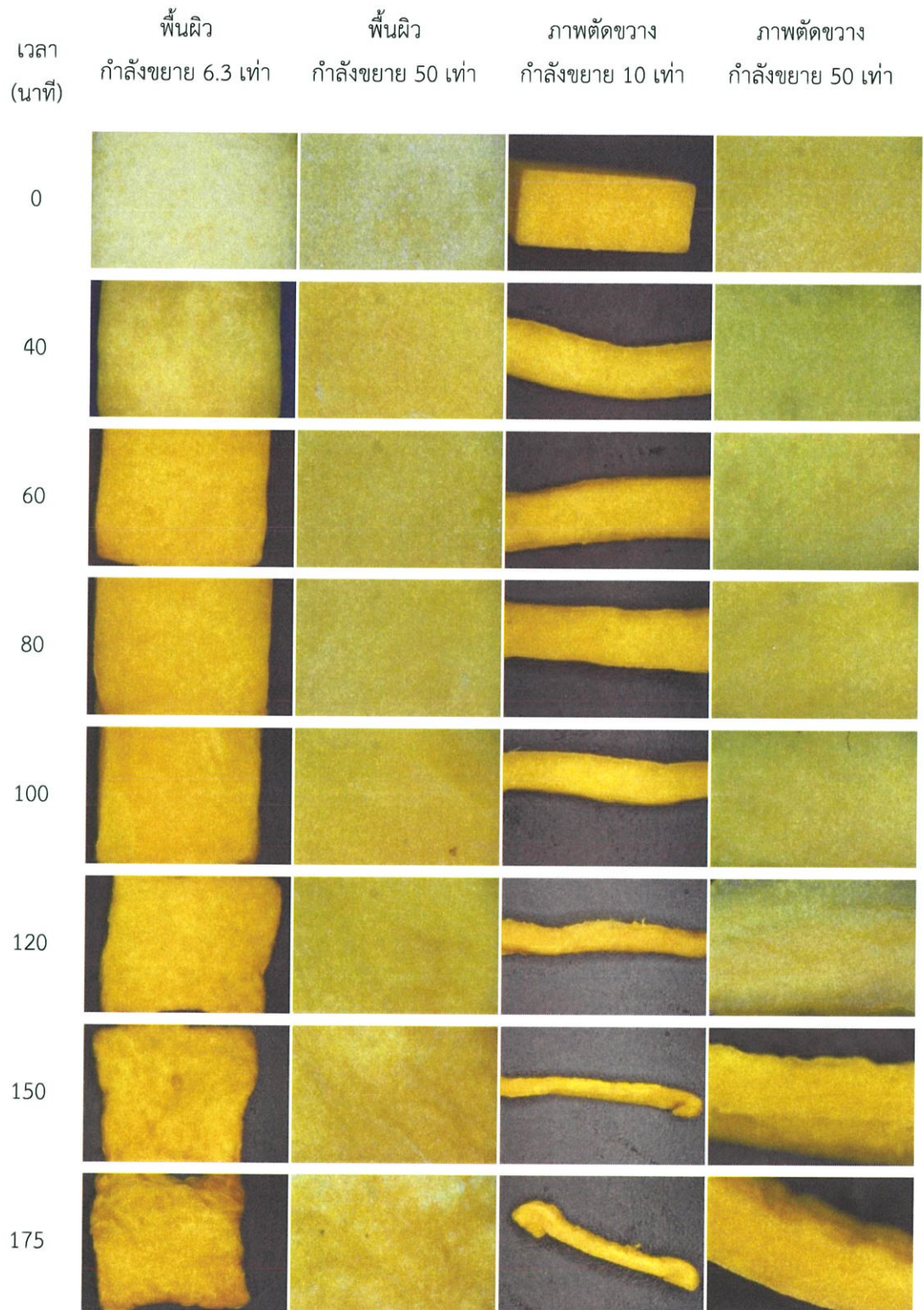
#### 4.2 สมบัติทางกายภาพของฟักทอง

ในการวิเคราะห์คุณภาพฟักทองอบแห้งประกอบด้วย พื้นที่ภาพฉาย ปริมาตร ความหนาแน่นเนื้อ การหดตัว และสี เป็นการวิเคราะห์คุณภาพเชิงลึกในเชิงจลนศาสตร์ โดยเป็นการวิเคราะห์คุณภาพที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาในการอบแห้ง

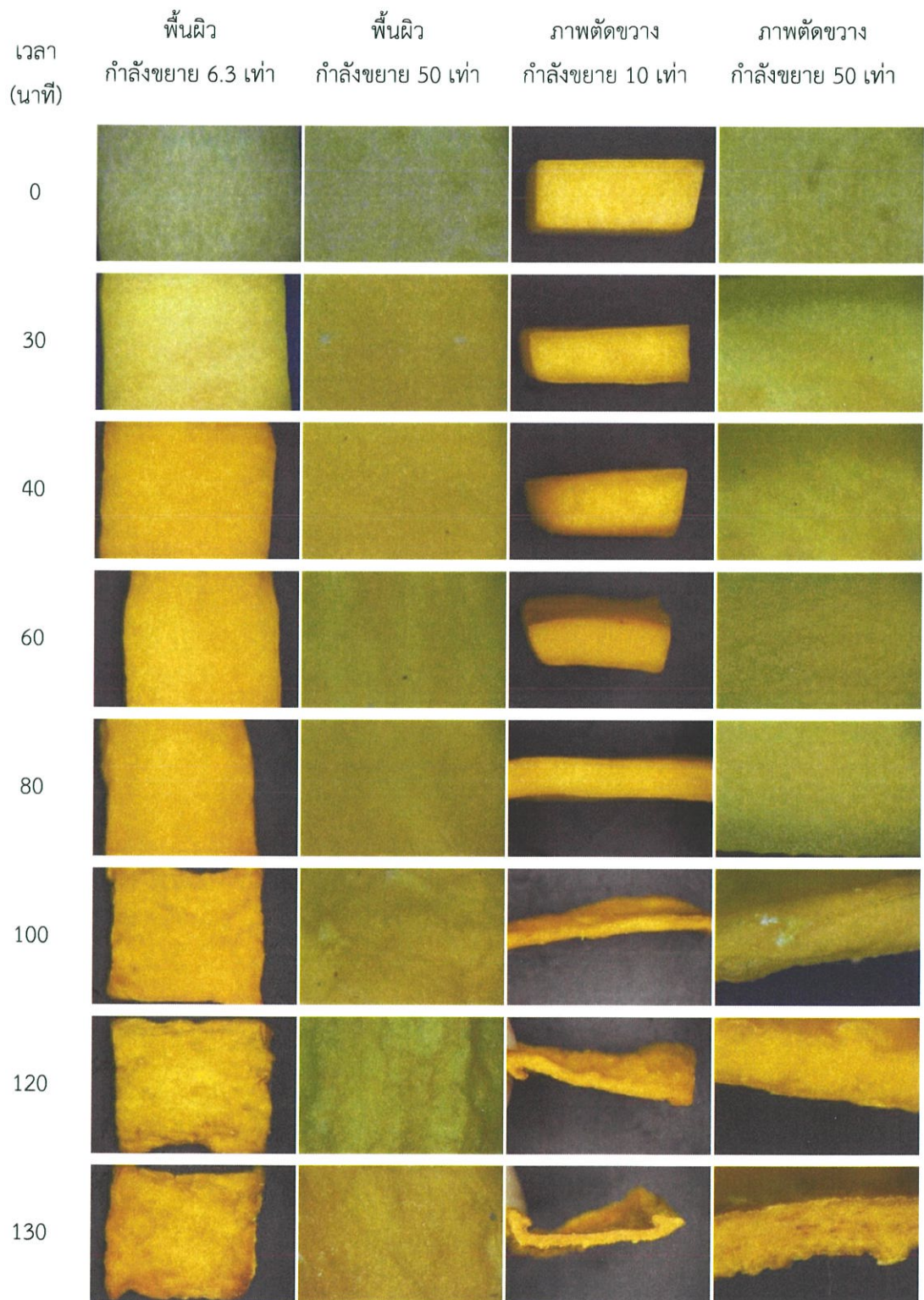
จากการทดลองการอบแห้งแบบอินฟราเรดที่ความเข้มรังสีที่ 500, 750 และ 1000 W/m<sup>2</sup> พบว่าที่ความเข้มรังสีอินฟราเรดที่ 750 W/m<sup>2</sup> มีอิทธิพลในการเปลี่ยนแปลงคุณภาพทางกายภาพของฟักทองที่น้อยกว่าความเข้มรังสีอื่นๆ จากการวัดพื้นที่ภาพฉาย ปริมาตร ความหนาแน่นเนื้อ และการหดตัว



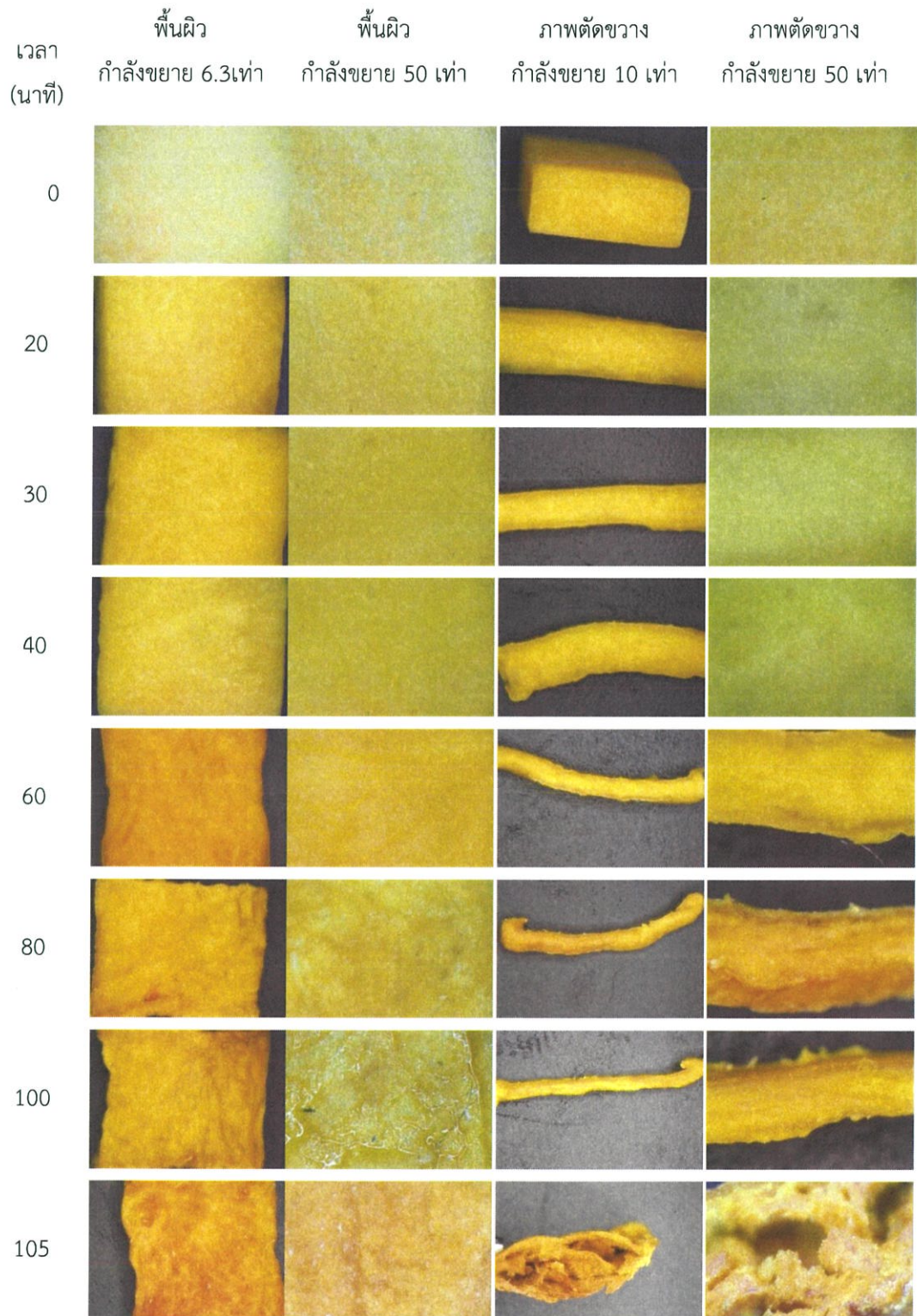
รูปที่ 4.4 พื้นผิวและภาพตัดขวางของฟักทองที่ผ่านการอบแห้งแบบ HA ที่เวลาต่างๆ



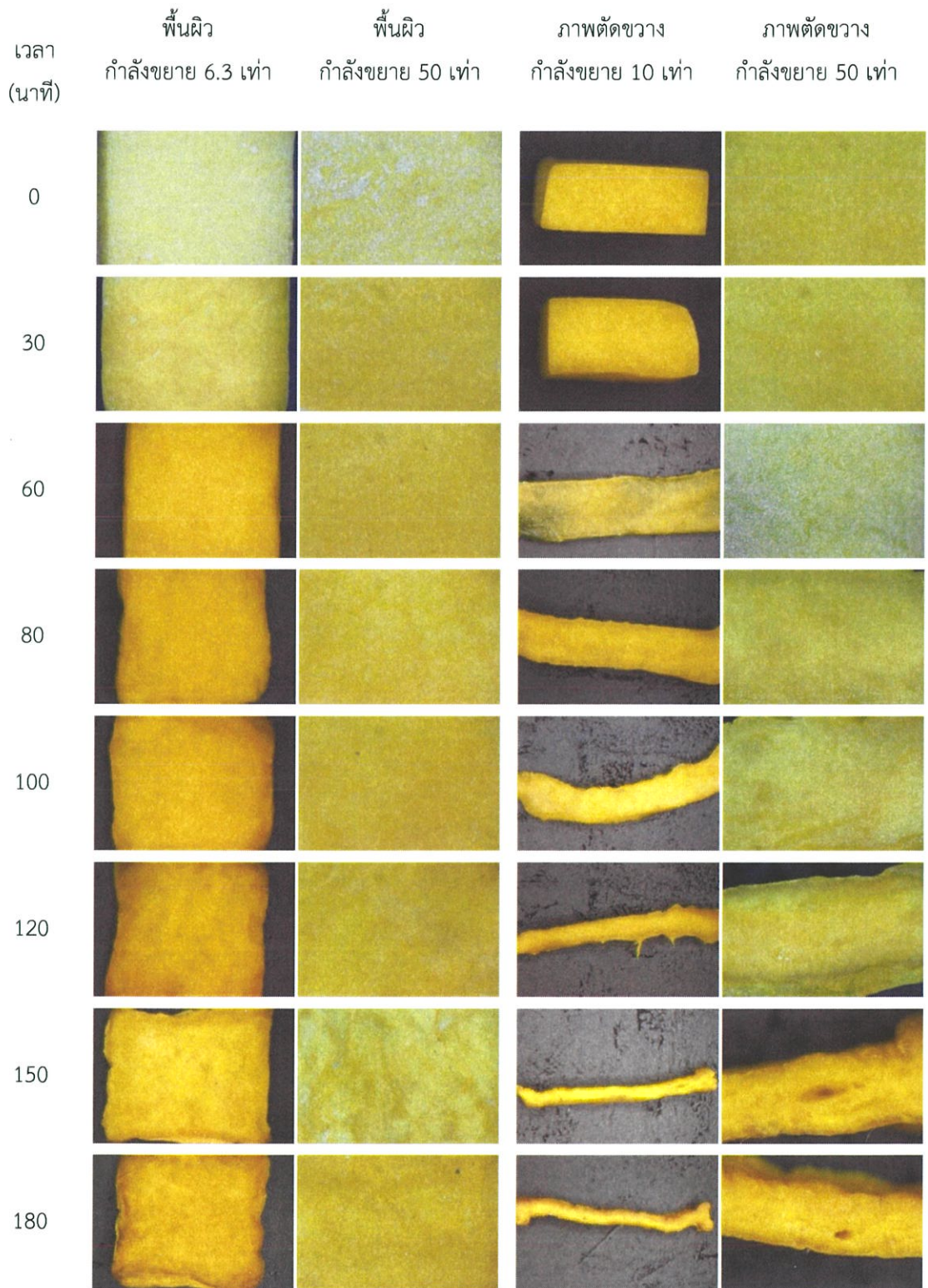
รูปที่ 4.5 พื้นผิวและภาพตัดขวางของฟักทองที่ผ่านการอบแห้งแบบ IR500 ที่เวลาต่างๆ



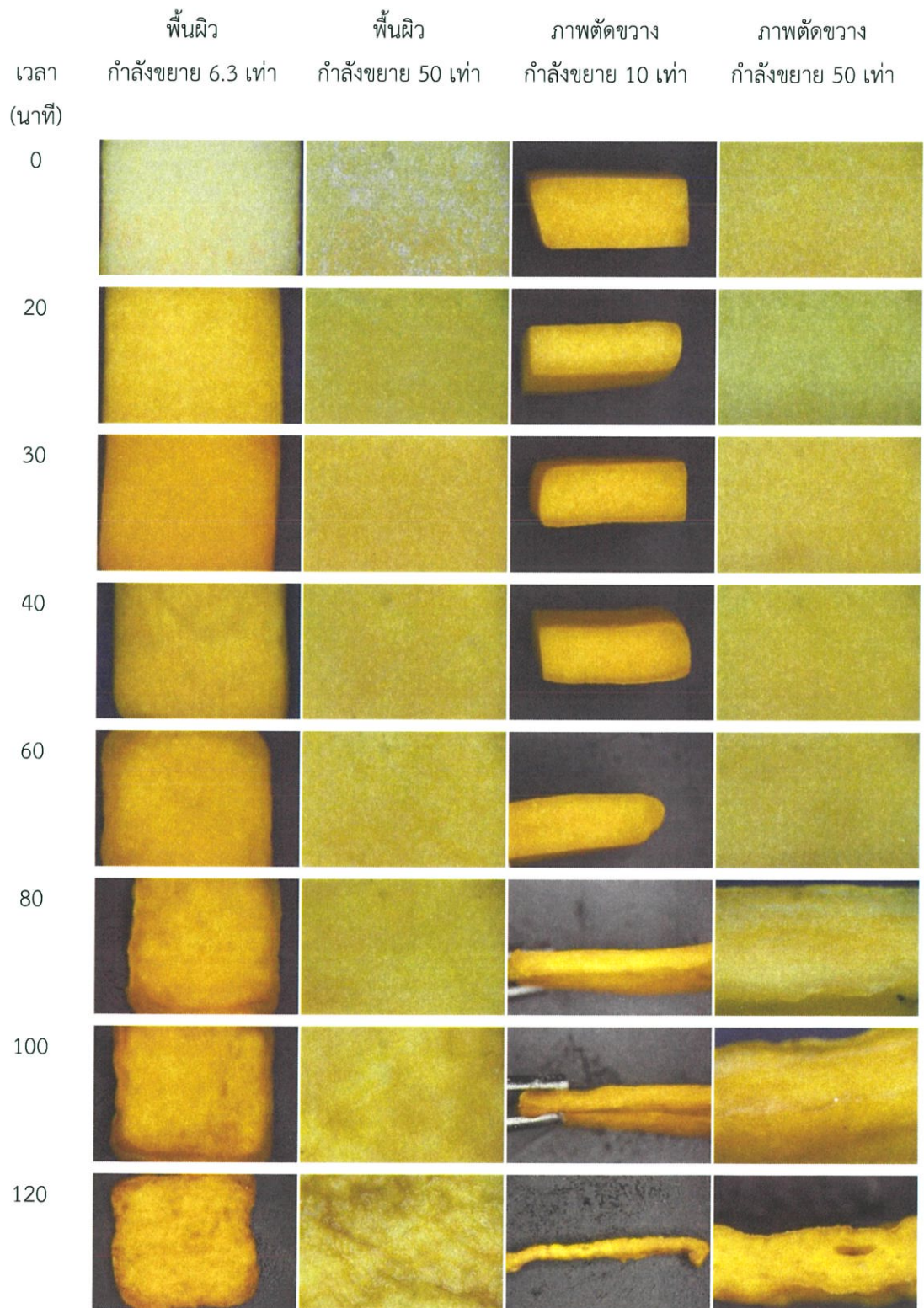
รูปที่ 4.6 พื้นผิวและภาพตัดขวางของฟักทองที่ผ่านการอบแห้งแบบ IR750 ที่เวลาต่างๆ



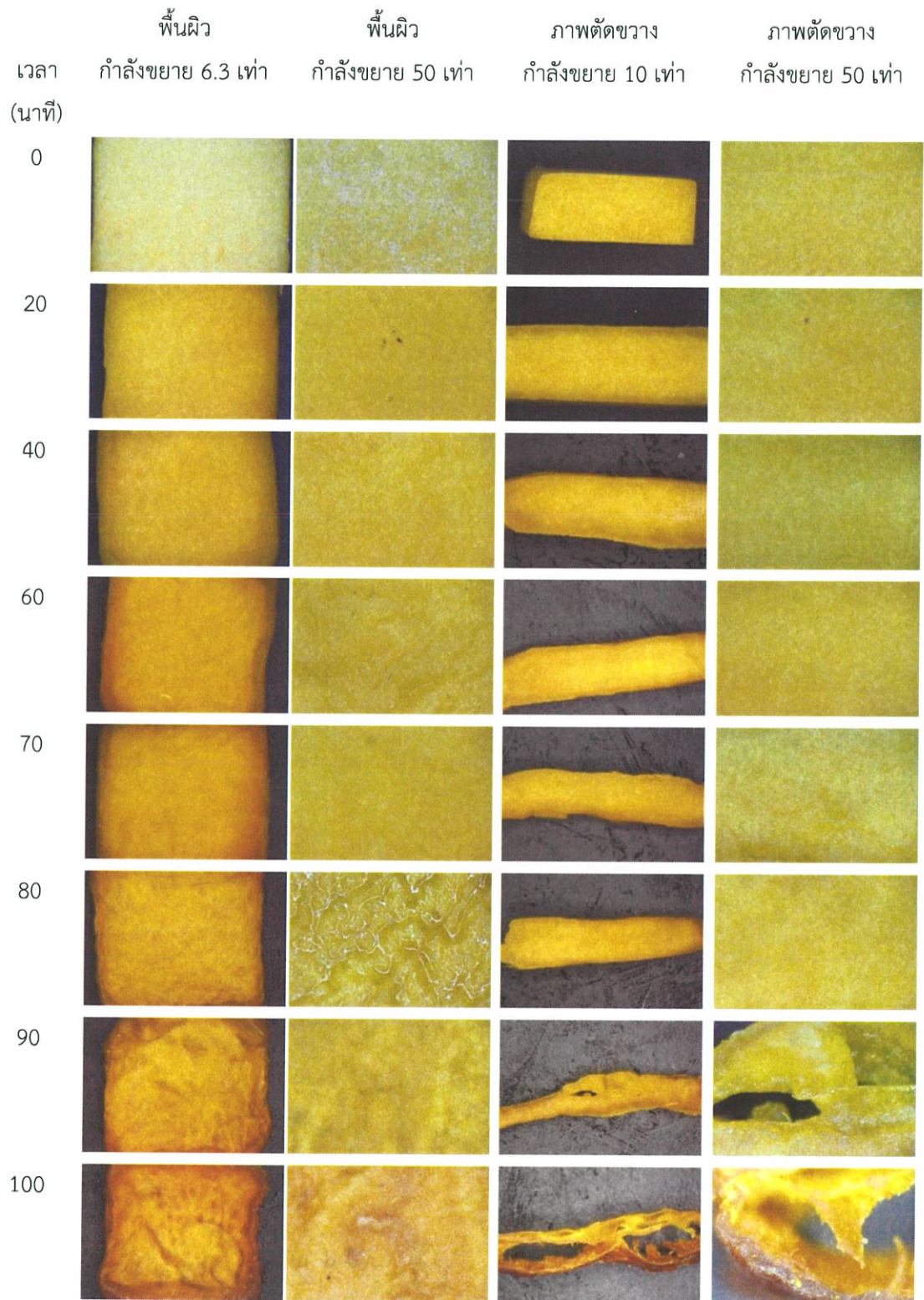
รูปที่ 4.7 พื้นผิวและภาพตัดขวางของฟักทองที่ผ่านการอบแห้งแบบ IR1000 ที่เวลาต่างๆ



รูปที่ 4.8 พื้นผิวและภาพตัดขวางของฟีกทองที่ผ่านการอบแห้งแบบ VIR500 ที่เวลาต่างๆ



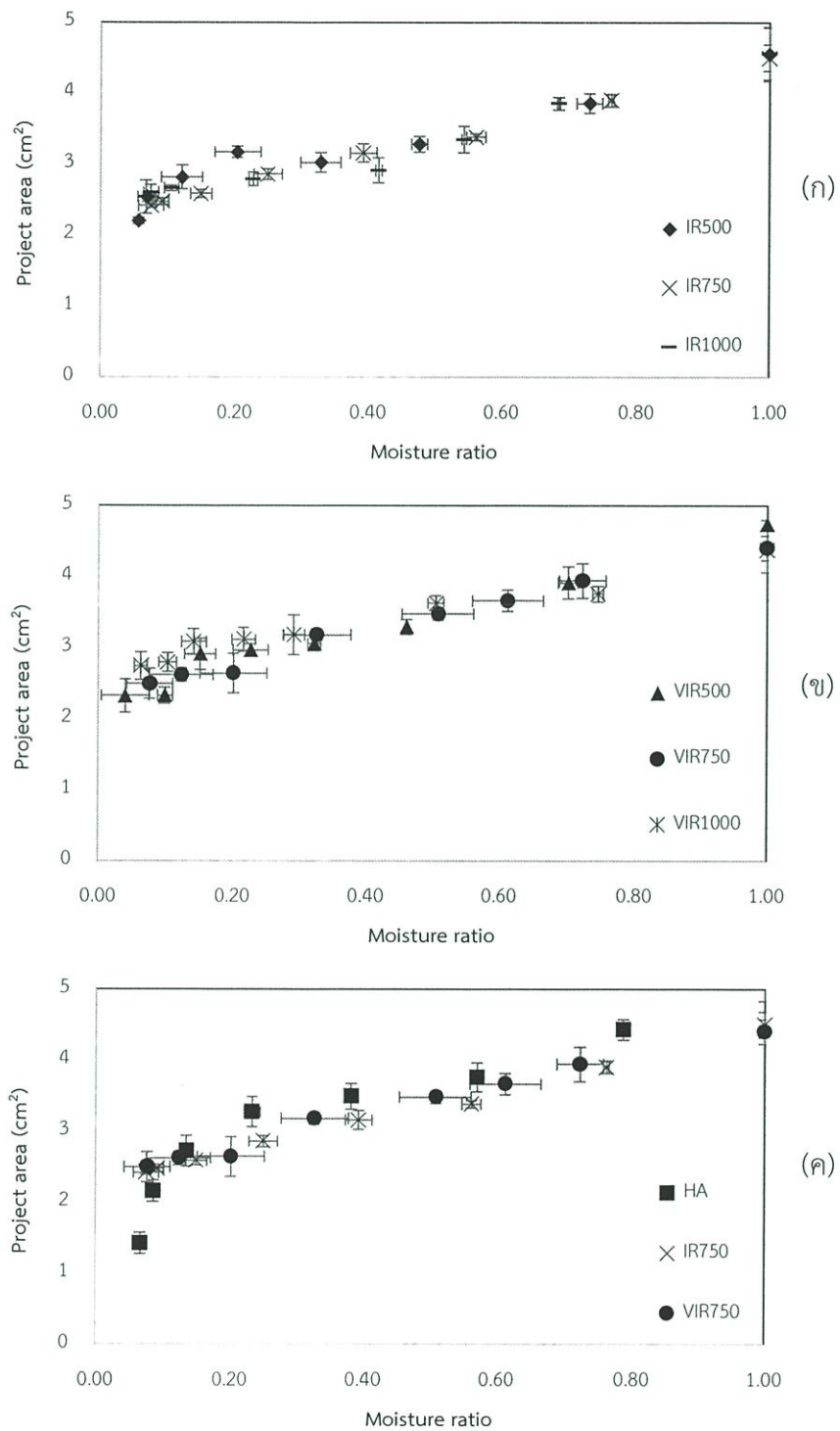
รูปที่ 4.9 พื้นผิวและภาพตัดขวางของฟักทองที่ผ่านการอบแห้งแบบ VIR750 ที่เวลาต่างๆ



รูปที่ 4.10 พื้นผิวและภาพตัดขวางของฟักทองที่ผ่านการอบแห้งแบบ VIR1000 ที่เวลาต่างๆ

#### 4.2.1 พื้นที่ภาพฉาย

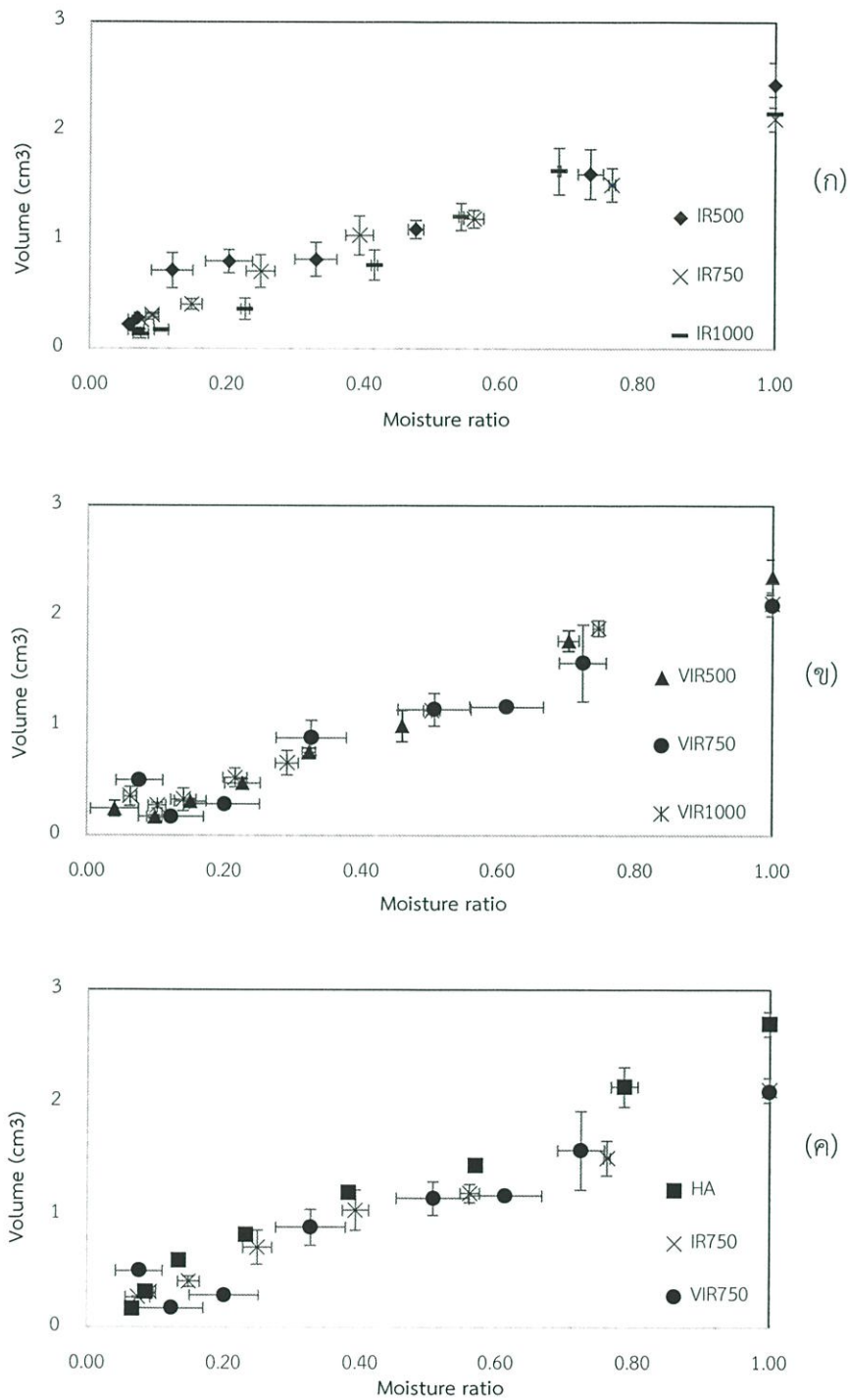
จากรูปที่ 4.11 แสดงปริมาตรของวัสดุที่เปลี่ยนแปลงตามอัตราส่วนความชื้น โดย (ก) และ (ข) จะทำการเปรียบเทียบที่ความชื้นรังสีต่างๆ พบว่าที่ความชื้นสูงกว่าจะทำให้การเปลี่ยนแปลงพื้นที่ภาพฉายน้อยกว่า และ (ค) เป็นการเปรียบเทียบระหว่างกระบวนการอบแห้ง พบว่าการอบแห้งแบบลมร้อนปริมาตรของวัสดุจะลดลงอย่างต่อเนื่อง โดยเฉพาะในช่วงท้ายของกระบวนการปริมาตรของวัสดุลดลงอย่างรวดเร็ว เนื่องจากช่วงดังกล่าวเป็นช่วงอัตราส่วนความชื้นลดลงทำให้ระยะเวลาในการอบแห้งมากกว่ากระบวนการอื่นๆ ซึ่งในช่วงเวลานั้นพื้นที่ของวัสดุยังคงลดลงอย่างต่อเนื่อง ทำให้ที่ความชื้นสุดท้ายพื้นที่ภาพฉายของกระบวนการอบแห้งแบบลมร้อน น้อยกว่ากระบวนการอบแห้งแบบอินฟราเรด และหากเปรียบเทียบระหว่างกระบวนการอบแห้งแบบอินฟราเรดกับกระบวนการอบแห้งแบบอินฟราเรดร่วมเบดส์ันที่ความชื้นรังสีเท่ากัน ( $750 \text{ W/m}^2$ ) พบว่าเบดส์ันมีอิทธิพลต่อการลดลงของพื้นที่ภาพฉายอีกด้วย ดังนั้นการใช้อินฟราเรดร่วมกับเบดส์ันซึ่งให้ค่าพื้นที่ภาพฉายมากกว่ากระบวนการอื่นๆ จึงได้ค่าพื้นที่ภาพฉายใกล้เคียงกับวัสดุสดที่สุด



รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างพื้นที่ภาพฉายกับอัตราส่วนความชื้น (ก) การอบแห้งแบบ IR ที่ความเข้มรังสีต่างๆ (ข) การอบแห้งแบบ VIR ที่ความเข้มรังสีต่างๆ และ (ค) การอบแห้งแบบ HA ที่อุณหภูมิ 60 °C เทียบกับการอบแห้งแบบ IR และ VIR ที่ความเข้มรังสี 750 W/m<sup>2</sup>

#### 4.2.2 ปริมาตร

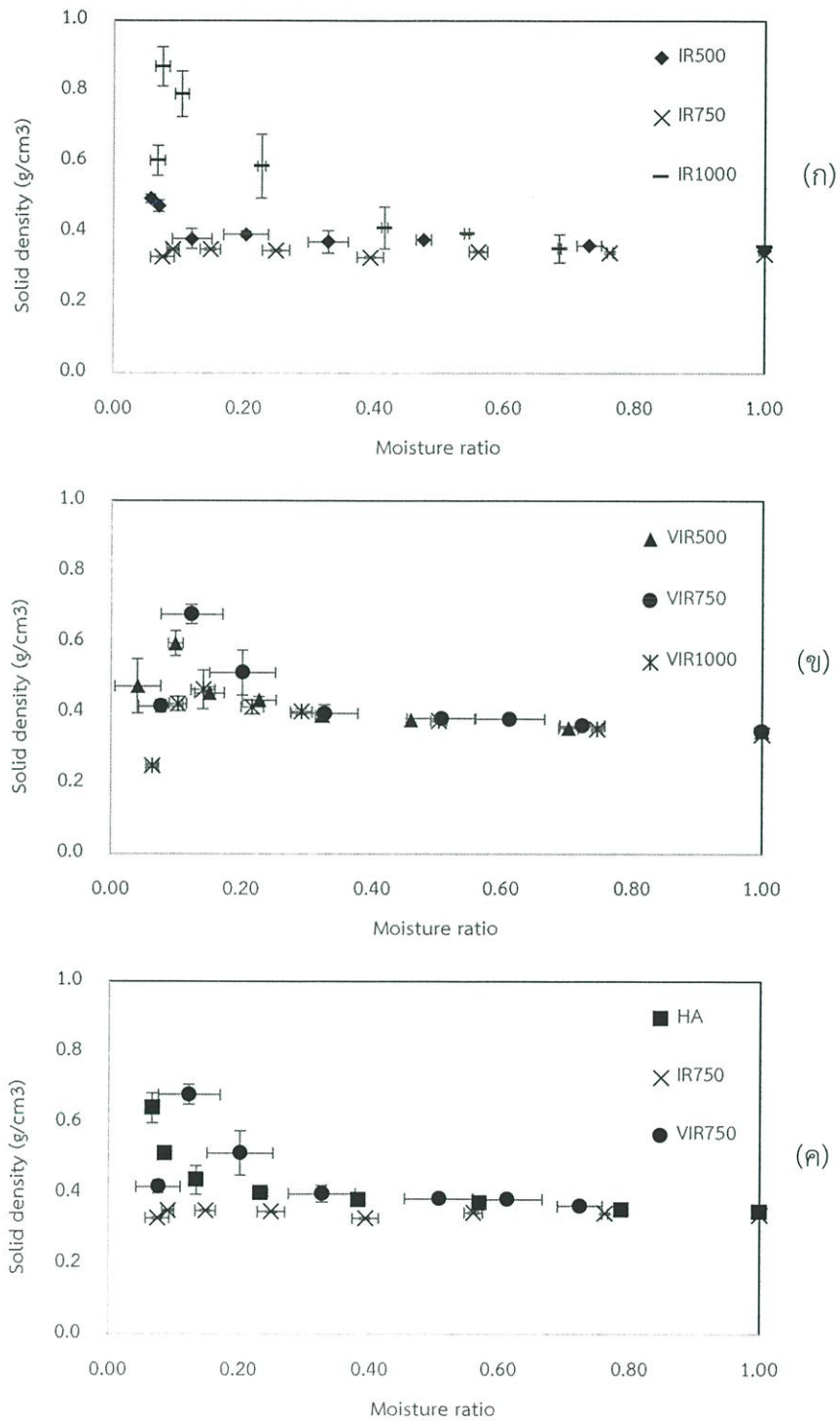
การวัดปริมาตรของวัสดุในระหว่างกระบวนการโดยอาศัยหลักการแทนที่ของเหลว จากรูปที่ 4.12 (ก) และ (ข) เป็นการเปรียบเทียบที่ความเข้มรังสีต่างๆ พบว่าเมื่ออัตราส่วนความชื้นลดลงจะทำให้ปริมาตรลดลงตามไปด้วย โดย (ก) ความเข้มรังสีที่มากส่งผลให้ปริมาตรของวัสดุลดลงมากตามไปด้วย โดยที่ความเข้มรังสี  $1000 \text{ W/m}^2$  ในช่วงท้ายของกระบวนการพบว่าวัสดุเกิดการพองตัวขึ้น แสดงว่าความเข้มรังสีมีส่วนเล็กน้อยในการทำให้วัสดุเกิดการพองตัว แต่ (ข) ซึ่งเป็นการใช้เบตสันพบว่าเบตสันมีอิทธิพลต่อปริมาตรของวัสดุ โดยเมื่อถึงจุดวิกฤตเบตสันจะทำให้ฟักทองเกิดการพองตัวขึ้นในทุกความเข้มรังสี แสดงว่าการสั่นมีอิทธิพลต่อการพองตัวของวัสดุ ซึ่งการพองตัวของวัสดุนี้เองก็เป็นปัจจัยที่ทำให้ปริมาตรของวัสดุอบแห้งมีค่าใกล้เคียงกับวัสดุสดมากยิ่งขึ้น และ (ค) ซึ่งเป็นการเปรียบเทียบระหว่างกระบวนการพบว่าการอบแห้งแบบอินฟราเรดที่ความเข้มรังสีเท่ากัน ( $750 \text{ W/m}^2$ ) ทั้งแบบเบตนิ่งและเบตสั่นจะมีปริมาตรใกล้เคียงกันตั้งแต่ช่วงแรก แต่ในช่วงท้ายของกระบวนการ การอบแห้งแบบอินฟราเรดร่วมกับเบตสั่นจะเกิดการพองตัวขึ้นตามที่ได้อธิบายข้างต้น แต่ในการอบแห้งแบบลมร้อนช่วงแรกของกระบวนการปริมาตรของวัสดุจะลดลงเพียงเล็กน้อยเท่านั้น ดังนั้นกระบวนการอบแห้งแบบอินฟราเรดร่วมกับเบตสั่นซึ่งให้ค่าปริมาตรมากกว่ากระบวนการอื่นๆ



รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรกับอัตราส่วนความชื้น (ก) การอบแห้งแบบ IR ที่ความเข้มรังสีต่างๆ (ข) การอบแห้งแบบ VIR ที่ความเข้มรังสีต่างๆ และ(ค) การอบแห้งแบบ HA ที่อุณหภูมิ 60 °C เทียบกับการอบแห้งแบบ IR และ VIR ที่ความเข้มรังสี 750 W/m<sup>2</sup>

#### 4.2.3 ความหนาแน่นเนื้อ

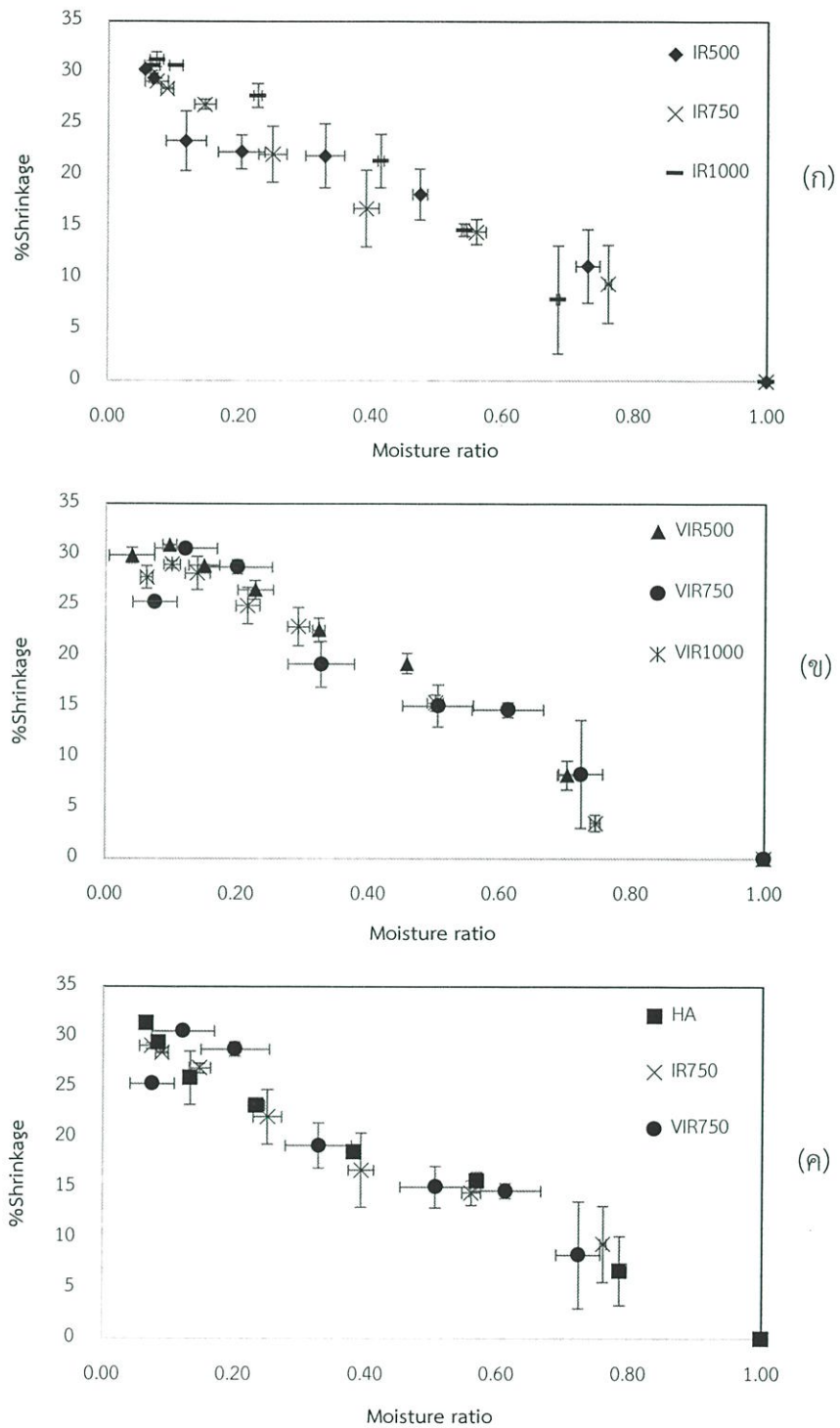
จากการวัดปริมาตรของวัสดุในระหว่างกระบวนการโดยอาศัยหลักการแทนที่ของเหลว ทำให้ได้ค่าความหนาแน่นเนื้อของวัสดุที่เปลี่ยนแปลงไปตามอัตราส่วนความชื้นในแต่ละวิธีการอบแห้ง จากรูปที่ 4.13 (ก) และ (ข) เป็นการเปรียบเทียบที่ความเข้มรังสีต่างๆ พบว่าเมื่ออัตราส่วนความชื้นลดลงจะทำให้ความหนาแน่นเนื้อเพิ่มขึ้น โดย (ก) จะเห็นได้ว่าที่ความเข้มรังสี  $1000 \text{ W/m}^2$  ที่ช่วงท้ายของกระบวนการพบว่าความหนาแน่นเนื้อของวัสดุเพิ่มขึ้นและลดลงอย่างรวดเร็วเนื่องจากการพองตัวของวัสดุ แสดงว่าความเข้มรังสีมีอิทธิพลเล็กน้อยต่อการพองตัวของวัสดุ แต่ (ข) ซึ่งเป็นการใช้เบดสั้นพบว่าในช่วงท้ายของการทดลองในทุกความเข้มรังสี ความหนาแน่นเนื้อเพิ่มขึ้นและลดลงอย่างรวดเร็วเนื่องจากการพองตัวของวัสดุเช่นกัน แสดงว่าการสั้นมีอิทธิพลต่อการพองตัวของวัสดุ และ (ค) ที่กระบวนการอบแห้งแบบลมร้อนจะเห็นได้ว่าในช่วงท้ายของกระบวนการความหนาแน่นเนื้อของวัสดุมีค่าสูงขึ้นอย่างรวดเร็วเนื่องจากวัสดุเกิดการหดตัวนั่นเอง และที่กระบวนการอบแห้งแบบอินฟราเรดร่วมเบดนิ่งและสั้น จะสังเกตได้ว่าความหนาแน่นเนื้อช่วงสุดท้ายมีค่าใกล้เคียงกับช่วงแรก



รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นเนื้อกับอัตราส่วนความชื้น (ก) การอบแห้งแบบ IR ที่ความเข้มรังสีต่างๆ (ข) การอบแห้งแบบ VIR ที่ความเข้มรังสีต่างๆ และ(ค) การอบแห้งแบบ HA ที่อุณหภูมิ 60 °C เทียบกับการอบแห้งแบบ IR และ VIR ที่ความเข้มรังสี 750 W/m<sup>2</sup>

#### 4.2.4 การหดตัว

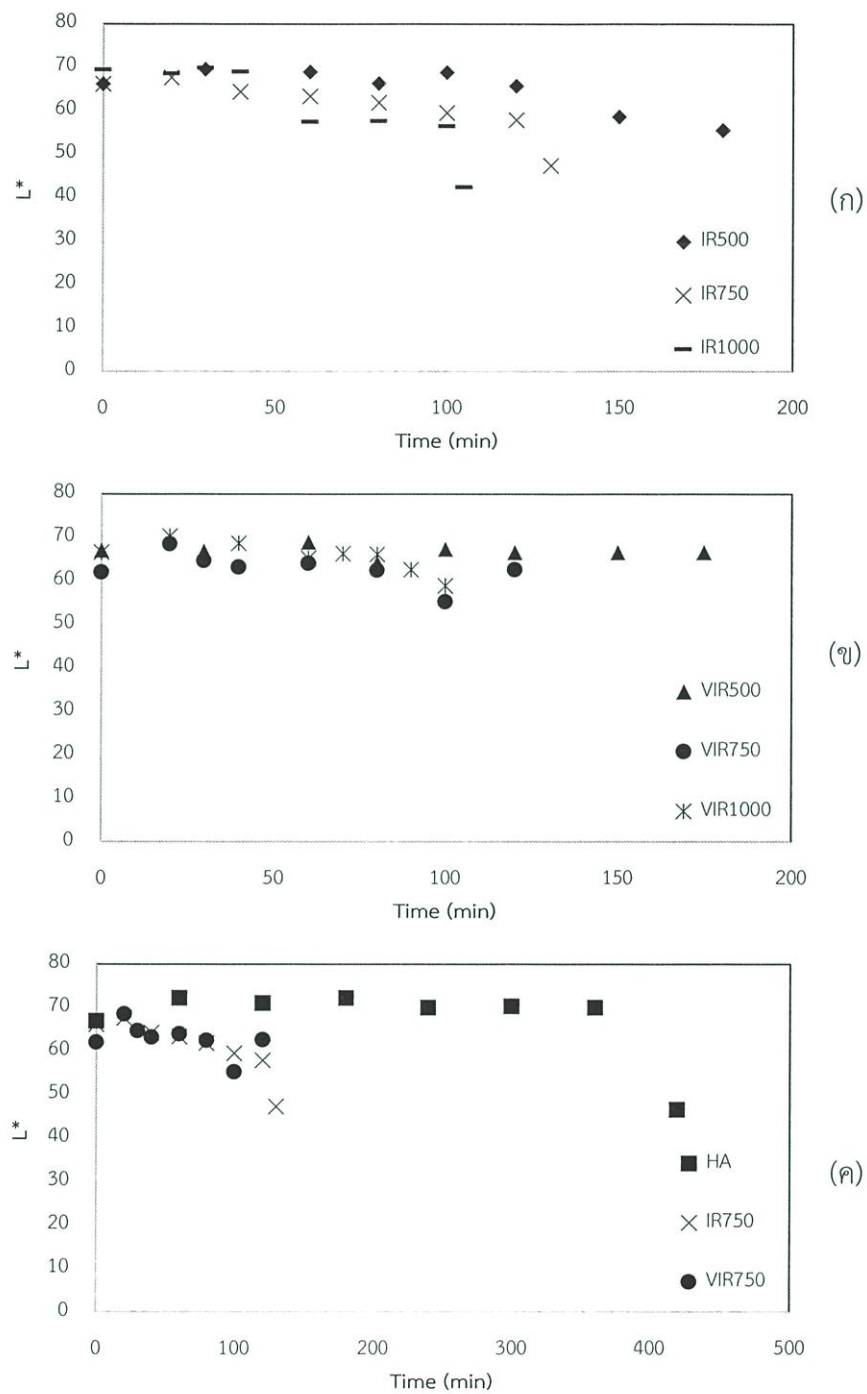
จากการวัดปริมาตรของวัสดุในระหว่างกระบวนการโดยอาศัยหลักการแทนที่ของเหลว ทำให้ได้ค่าการหดตัวของวัสดุที่เปลี่ยนแปลงไปตามอัตราส่วนความชื้นในแต่ละวิชาการอบแห้ง โดย (ก) และ (ข) เป็นการเปรียบเทียบที่ความชื้นรังสีต่างๆ พบว่าความชื้นรังสีที่น้อยส่งผลให้การหดตัวของวัสดุมากขึ้น โดย (ก) ที่ความชื้นรังสี  $1000 \text{ W/m}^2$  ในช่วงท้ายของกระบวนการพบว่าการหดตัวลดลงเล็กน้อยเนื่องจากการพองตัวของวัสดุ แสดงว่าความชื้นรังสีมีผลเล็กน้อยต่อการหดตัวของวัสดุ แต่ (ข) ซึ่งเป็นการใช้เบตสัน ในช่วงท้ายของกระบวนการพบว่าการค่าการหดตัวลดลงเล็กน้อย ในทุกความชื้นรังสีเนื่องจากการพองตัวของวัสดุ แสดงว่าการสั่นมีอิทธิพลต่อการหดตัวของวัสดุ และ (ค) ในระหว่างกระบวนการจะเห็นได้ว่าการอบแห้งแบบลมร้อนจะให้ค่าการหดตัวที่สูงกว่ากระบวนการอื่นตลอดกระบวนการอบแห้ง แต่กระบวนการอบแห้งแบบอินฟราเรดร่วมเบตสันให้ค่าการหดตัวที่ต่ำกว่าซึ่งใกล้เคียงกับวัสดุสดมากที่สุด



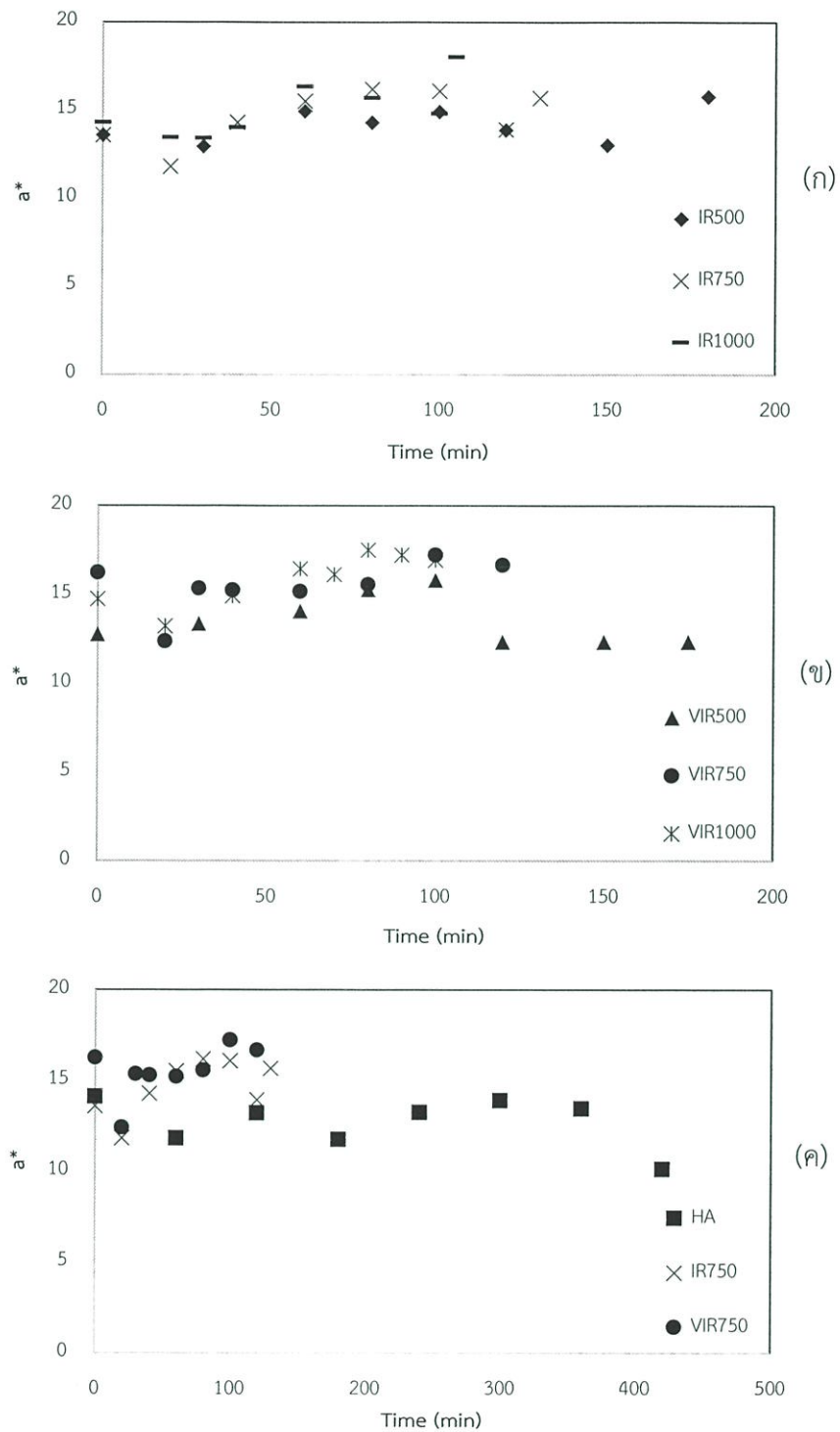
รูปที่ 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การหดตัวกับอัตราส่วนความชื้น (ก) การอบแห้งแบบ IR ที่ความเข้มรังสีต่างๆ (ข) การอบแห้งแบบ VIR ที่ความเข้มรังสีต่างๆ และ (ค) การอบแห้งแบบ HA ที่อุณหภูมิ 60 °C เทียบกับการอบแห้งแบบ IR และ VIR ที่ความเข้มรังสี 750 W/m<sup>2</sup>

#### 4.2.5 สี

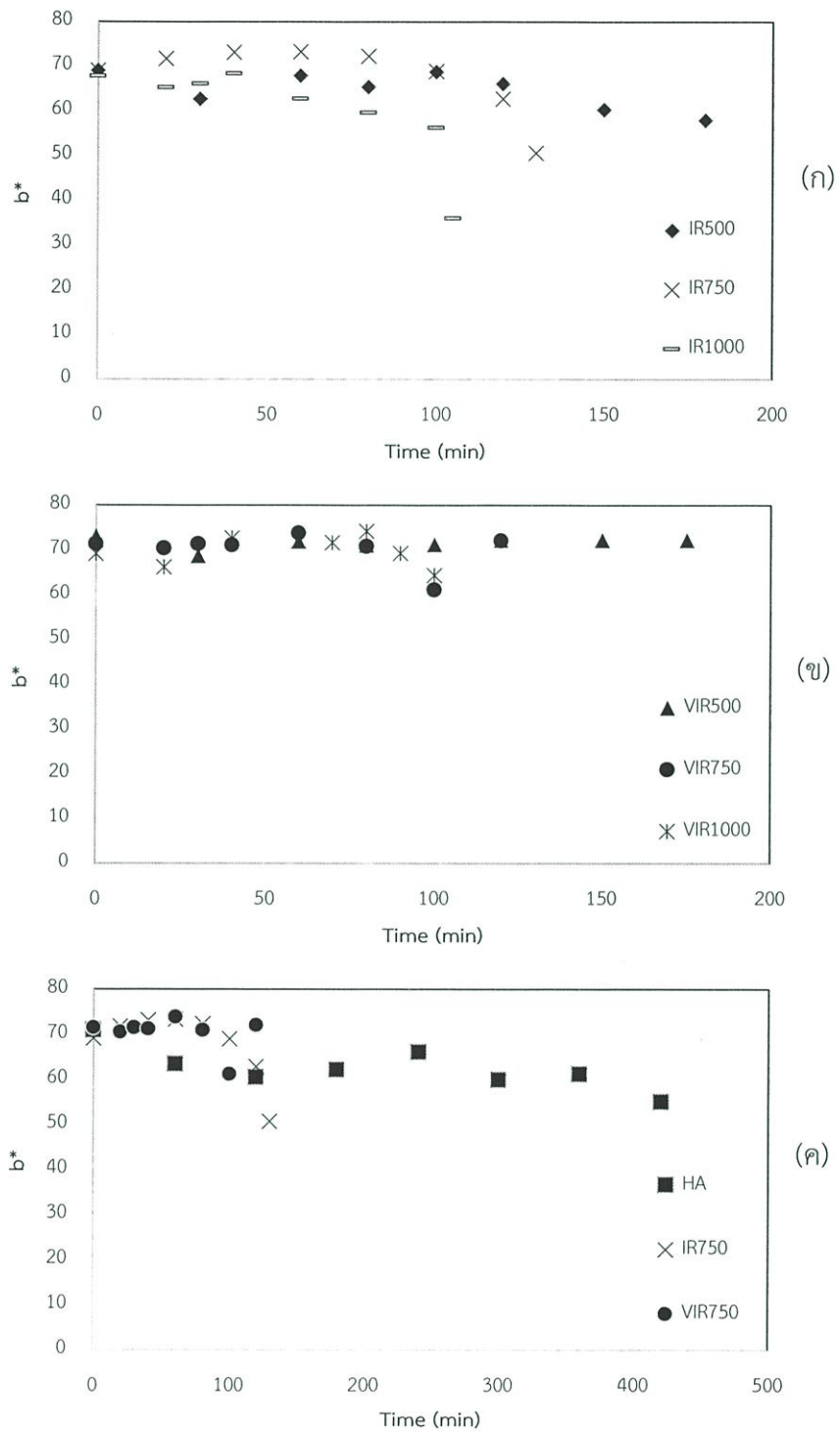
จากรูปที่ 4.15 (ก) และ (ข) เป็นการเปรียบเทียบระหว่างความเข้มรังสี พบว่าความเข้มรังสีมีผลต่อความสว่างของวัสดุ โดยเมื่อความเข้มรังสีมากจะส่งผลให้ค่าความสว่างลดลงมากเช่นเดียวกัน โดยเฉพาะที่ความเข้มรังสี  $1000 \text{ W/m}^2$  พบว่าค่าความสว่างลดลงอย่างต่อเนื่อง และหากสังเกตที่ (ค) ซึ่งเป็นการเปรียบเทียบระหว่างกระบวนการอบแห้ง ที่กระบวนการอบแห้งแบบลมร้อนค่าความสว่างจะลดลงมากที่สุด ส่วนการอบแห้งแบบอินฟราเรดค่าความสว่างจะลดลงอย่างต่อเนื่องและลดลงอย่างรวดเร็วในช่วงท้ายของกระบวนการ และการอบแห้งแบบอินฟราเรดร่วมเบดสั้นค่าความสว่างจะมีการเปลี่ยนแปลงบ้างเล็กน้อยตลอดกระบวนการ แสดงให้เห็นว่าการใช้อินฟราเรดร่วมกับเบดสั้นจะทำให้ค่าความสว่างเปลี่ยนแปลงน้อยที่สุด จากรูปที่ 4.16 (ก) และ (ข) เป็นการเปรียบเทียบระหว่างความเข้มรังสี พบว่าความเข้มรังสีมีผลต่อความแดงของวัสดุ โดยเมื่อมีความเข้มรังสีมากจะส่งผลให้ค่าความแดงมากขึ้นเช่นกัน โดยค่าความแดงที่เกิดขึ้นในกระบวนการอบแห้งแบบอินฟราเรดนั้น เป็นการแดงที่เกิดจากปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาล ซึ่งเกิดจากการเผาไหม้ น้ำตาลที่อุณหภูมิสูง และรูป (ค) เป็นการเปรียบเทียบระหว่างกระบวนการอบแห้ง พบว่าในช่วงท้ายของกระบวนการอบแห้งแบบลมร้อน ค่าความแดงจะลดลงเป็นระยะ ทำให้สีของวัสดุมีความคล้ำเขียวมากยิ่งขึ้น จากรูปที่ 4.17 (ก) และ (ข) เป็นการเปรียบเทียบระหว่างความเข้มรังสี พบว่าความเข้มรังสีมีผลต่อความเหลืองของวัสดุ โดย (ก) ในช่วงท้ายของกระบวนการพบว่าค่าความเหลืองลดลงทุกความเข้มรังสี ส่วน (ข) พบว่าเบดสั้นมีอิทธิพลต่อค่าความเหลือง เนื่องจากค่าความเหลืองมีค่าเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยตลอดกระบวนการในทุกความเข้มรังสี และ (ค) เป็นการเปรียบเทียบระหว่างกระบวนการอบแห้ง พบว่าในช่วงท้ายของกระบวนการอบแห้งแบบลมร้อน ค่าความเหลืองจากลดลงอย่างรวดเร็ว ส่วนในการอบแห้งแบบอินฟราเรดที่ช่วงท้ายของกระบวนการค่าความเหลืองจะลดลงเล็กน้อย แต่ในการอบแห้งแบบอินฟราเรดร่วมเบดสั้นค่าความเหลืองจะมีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยเท่านั้น แสดงให้เห็นว่าการใช้อินฟราเรดร่วมเบดสั้นทำให้ค่าความเหลืองเปลี่ยนแปลงน้อยกว่ากระบวนการอื่นๆ



รูปที่ 4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความสว่าง(L\*) กับเวลา (ก) การอบแห้งแบบ IR ที่ความเข้มรังสีต่างๆ (ข) การอบแห้งแบบ VIR ที่ความเข้มรังสีต่างๆ และ (ค) การอบแห้งแบบ HA ที่อุณหภูมิ 60 °C เทียบกับการอบแห้งแบบ IR และ VIR ที่ความเข้มรังสี 750 W/m<sup>2</sup>



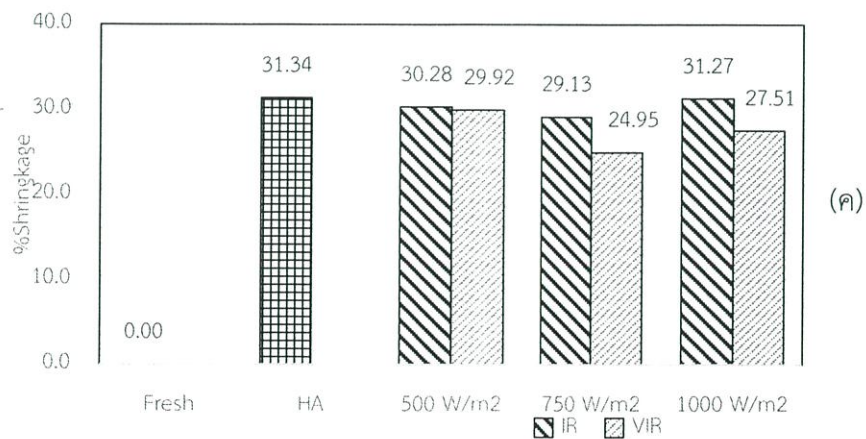
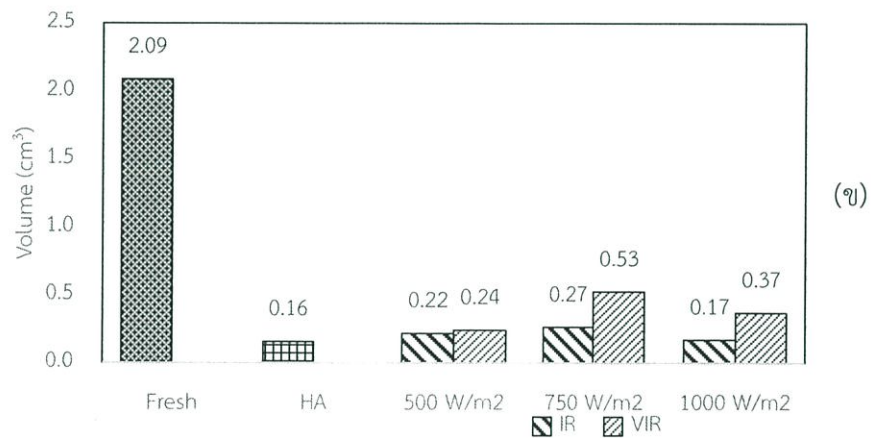
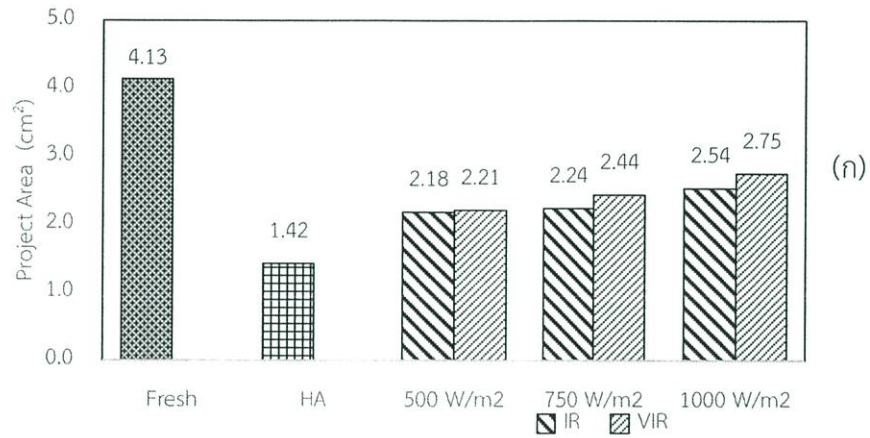
รูปที่ 4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแดง( $a^*$ ) กับเวลา (ก) การอบแห้งแบบ IR ที่ความเข้มรังสีต่างๆ (ข) การอบแห้งแบบ VIR ที่ความเข้มรังสีต่างๆ และ (ค) การอบแห้งแบบ HA ที่อุณหภูมิ 60 °C เทียบกับการอบแห้งแบบ IR และ VIR ที่ความเข้มรังสี 750 W/m<sup>2</sup>

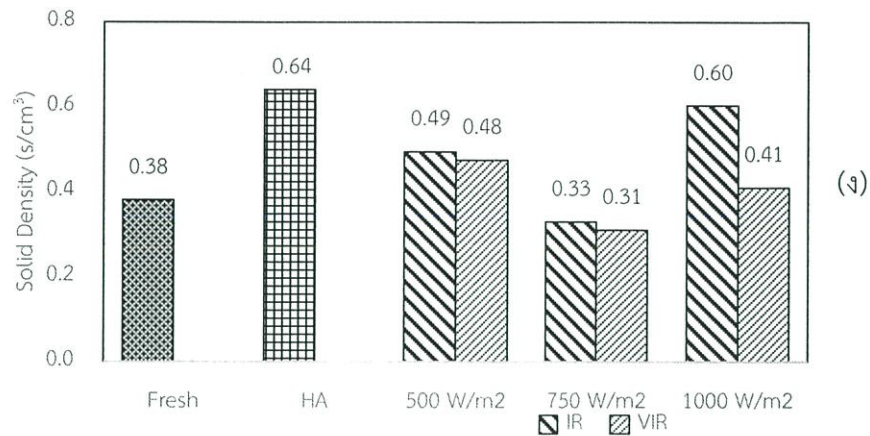


รูปที่ 4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเหลือง( $b^*$ ) กับเวลา (ก) การอบแห้งแบบ IR ที่ความเข้มรังสีต่างๆ (ข) การอบแห้งแบบ VIR ที่ความเข้มรังสีต่างๆ และ (ค) การอบแห้งแบบ HA ที่อุณหภูมิ 60 °C เทียบกับการอบแห้งแบบ IR และ VIR ที่ความเข้มรังสี 750 W/m<sup>2</sup>

### 4.3 คุณภาพของผลิตภัณฑ์ฟักทองอบแห้ง

เป็นการเปรียบเทียบคุณภาพด้านต่างๆของผลิตภัณฑ์ฟักทองอบแห้งได้แก่ พื้นที่ภาพฉาย ปริมาตร ความหนาแน่นเนื้อ การหดตัว และสี ซึ่งผลิตภัณฑ์ที่ได้จะมีความชื้นสุดท้ายเท่ากับ  $0.5 \text{ g}_{\text{water}}/\text{g}_{\text{dry matter}}$  โดยมีการเปรียบเทียบตัวอย่างสดกับผลิตภัณฑ์ฟักทองอบแห้งจากกระบวนการต่างๆ



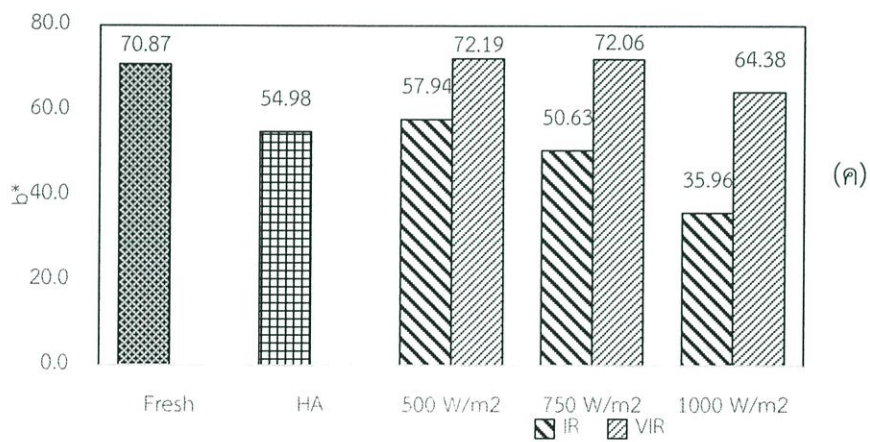
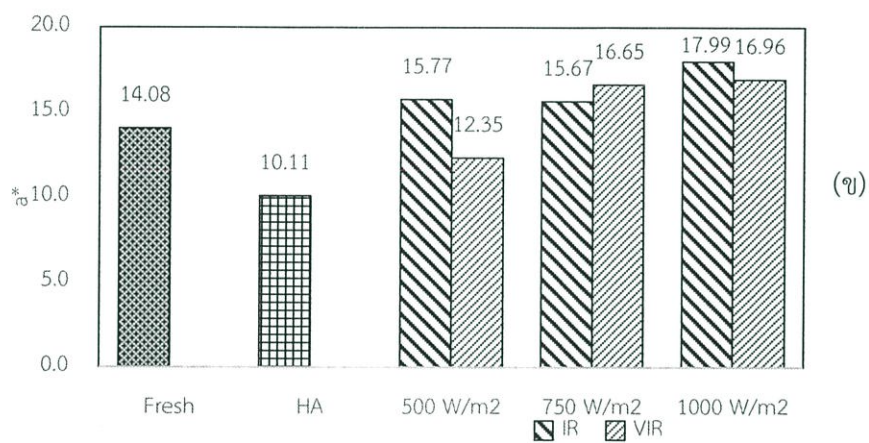
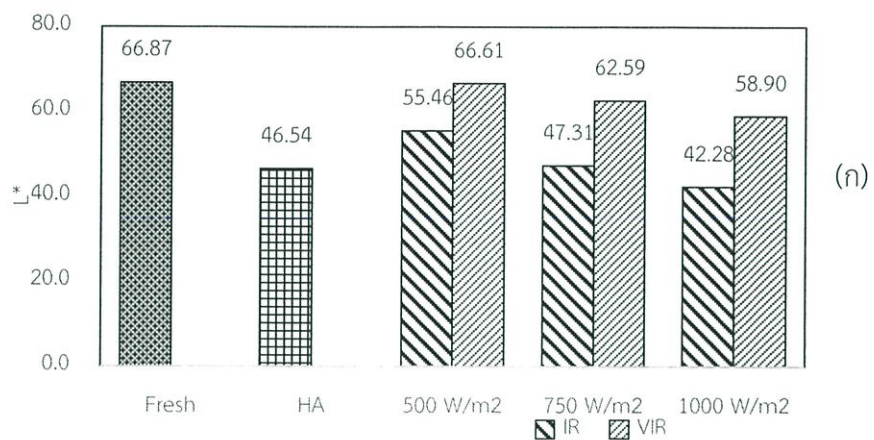


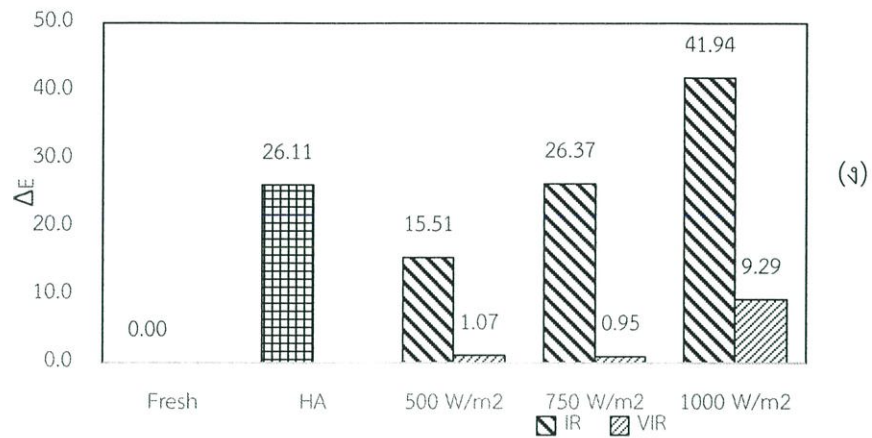
รูปที่ 4.18 คุณสมบัติทางกายภาพของผลิตภัณฑ์ฟักทองอบแห้งตามกระบวนการ (ก) พื้นที่ภาพถ่าย (ข) ปริมาตร (ค) ความหนาแน่นเนื้อ และ (ง) เปอร์เซ็นต์การหดตัว

จากตารางที่ 4.2 แสดงให้เห็นว่าที่ความเข้มรังสี 1000 W/m<sup>2</sup> ร่วมกับเบดสันมีค่าพื้นที่ภาพถ่ายของผลิตภัณฑ์ใกล้เคียงกับวัสดุสดมากที่สุด ส่วนความเข้มรังสี 750 W/m<sup>2</sup> ร่วมกับเบดสันมีค่าปริมาตร ความหนาแน่นเนื้อ และการหดตัว ใกล้เคียงกับวัสดุสดมากที่สุด

ตารางที่ 4.2 คุณสมบัติทางกายภาพที่ผลิตภัณฑ์สุดท้าย

Treatment	Project Area (cm <sup>2</sup> )	Volume (cm <sup>3</sup> )	Solid Density (g/cm <sup>3</sup> )	%Shrinkage
Fresh	4.13	2.09	0.38	0.00
HA	1.42	0.16	0.64	31.34
IR500	2.18	0.22	0.49	30.28
IR750	2.24	0.27	0.33	29.13
IR1000	2.54	0.17	0.60	31.27
VIR500	2.21	0.24	0.48	29.92
VIR750	2.44	0.53	0.31	24.95
VIR1000	2.75	0.37	0.41	27.51





รูปที่ 4.19 สีของผลิตภัณฑ์ฟักทองอบแห้งตามกระบวนการ (ก) ค่าความสว่าง (ข) ค่าความแดง (ค) ค่าความเหลือง และ (ง) ค่าความแตกต่างของสี

จากตารางที่ 4.3 แสดงให้เห็นว่าที่ความเข้มรังสี 750 W/m<sup>2</sup> ร่วมกับเบดสั้นมีค่าความแตกต่างของสีใกล้เคียงกับวัสดุสดมากที่สุด

ตารางที่ 4.3 ค่าความสว่าง ความแดง ความเหลือง และความแตกต่างของสี ในผลิตภัณฑ์ฟักทองอบแห้ง

Treatment	L*	a*	B*	ΔE
HA	46.54	10.11	54.98	26.11
IR500	55.46	15.77	57.94	15.51
IR750	47.31	15.67	50.63	26.37
IR1000	42.28	17.99	35.96	41.94
VIR500	66.61	12.35	72.19	1.07
VIR750	62.59	16.65	72.06	0.95
VIR1000	58.90	16.96	64.38	9.29

#### 4.4 สัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผล

##### 4.4.1 ไม่คำนึงถึงการหดตัว

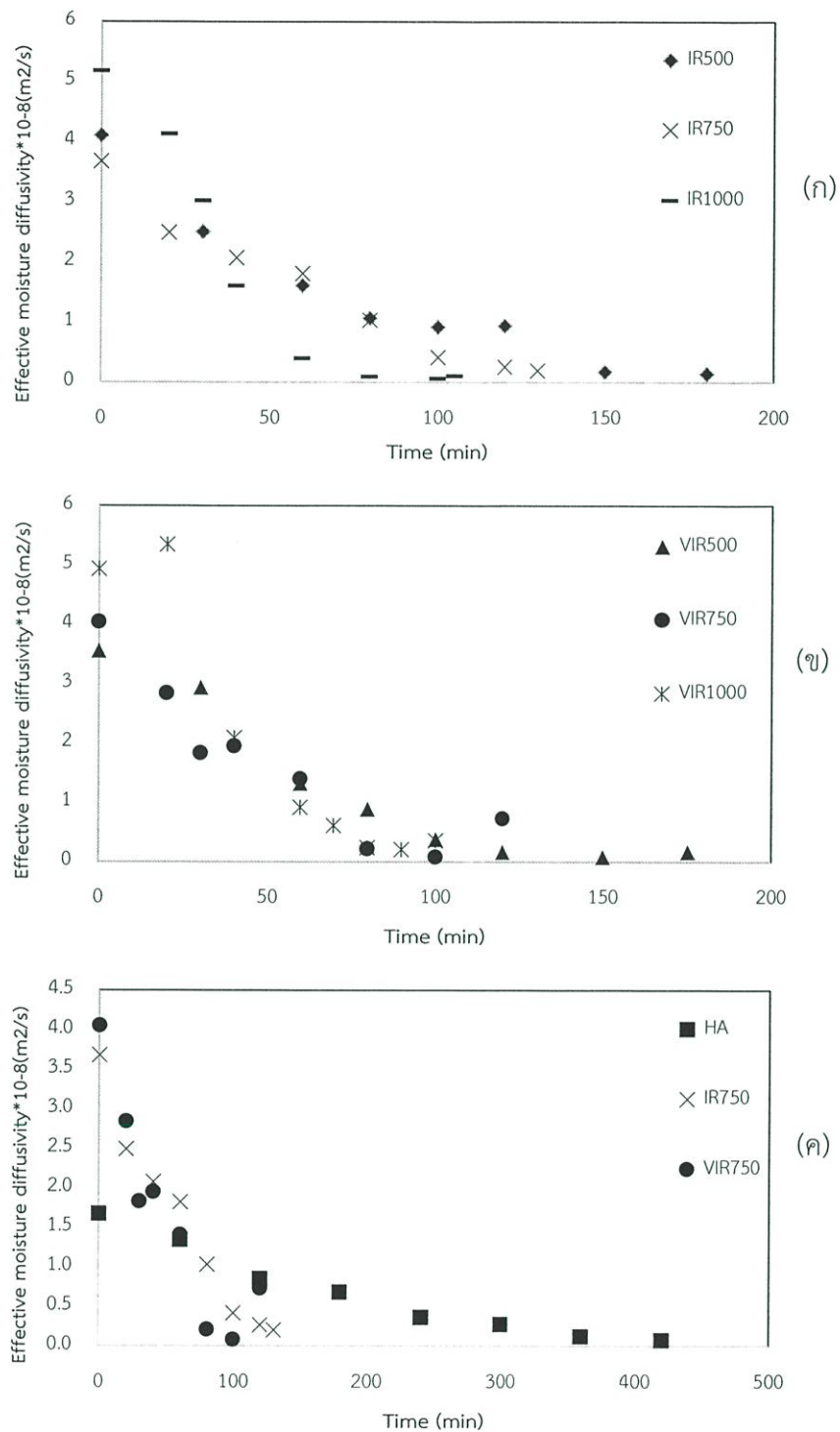
จากตาราง 4.4 ทราบได้ถึงอิทธิพลของความเข้มข้นสีและเบดสั้น ต่อค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผล ซึ่งในทางทฤษฎีทางความเข้มข้นสีมากร่วมกับเบดสั้นจะให้ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผลมาก แต่จากการทดลองพบว่าที่ความเข้มข้นสีมากร่วมกับเบดสั้นให้ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผลมากที่สุด ซึ่งเกิดจากการประมาณค่าสูงไป

ตารางที่ 4.4 อิทธิพลของวิธีการต่อสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผลโดยไม่คำนึงการหดตัว

Treatment	Effective moisture diffusivity (m <sup>2</sup> /s)	R <sup>2</sup>
HA	1.4438E-08	0.9347
IR500	3.6222E-08	0.9308
IR750	4.1795E-08	0.9301
IR1000	5.7753E-08	0.9481
VIR500	3.5969E-08	0.9285
VIR750	4.4835E-08	0.9499
VIR1000	5.3194E-08	0.9010

##### 4.4.2 คำนึงถึงการหดตัว

จากการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผลแบบไม่คำนึงถึงการหดตัวซึ่งได้ผลคลาดเคลื่อน ผู้ทดลองจึงเลือกใช้การคำนวณสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผลแบบคำนึงถึงการหดตัว โดยที่ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผลจะเปลี่ยนแปลงไปตามระยะเวลา ทำให้ทราบว่าเมื่อใช้ผลของค่าการหดตัวเข้ามาร่วมในการคำนวณทำให้ผลที่ได้มีความสอดคล้องกับอัตราการทำแห้งมากยิ่งขึ้น



รูปที่ 4.20 อิทธิพลของความเข้มรังสีต่อสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผลโดยค่านิ่งการหดตัว (ก) การอบแห้งแบบ IR ที่ความเข้มรังสีต่างๆ (ข) การอบแห้งแบบ VIR ที่ความเข้มรังสีต่างๆ และ(ค) การอบแห้งแบบ HA ที่อุณหภูมิ 60 °C เทียบกับการอบแห้งแบบ IR และ VIR ที่ความเข้มรังสี 750 W/m<sup>2</sup>

## บทที่ 5

### สรุปผลการทดลอง

ความเข้มรังสีสูงซึ่งขึ้นร่วมกับการสิ้นสعهเทือนมีอิทธิพลให้เวลาการอบแห้งลดลงและอัตราการทำแห้งสูงขึ้น การอบแห้งแบบ VIR  $1000 \text{ W/m}^2$  ใช้เวลาในการอบแห้งสั้นที่สุด คือ 100 min และอัตราการทำแห้งสูงสุดมากที่สุดคือ  $0.13 \text{ g}_{\text{water}}/\text{g}_{\text{dry matter}} \cdot \text{min}$  ในขณะที่การอบแห้งแบบ HA เป็นการอบแห้งชนิดเดียวที่เกิดช่วงอัตราการทำแห้งคงที่ซึ่งถือว่าเป็นช่วงที่น้ำที่อยู่ภายในเนื้อฟักทองแพร่ออกมายังผิว กับน้ำที่ผิวแพร่ไปยังอากาศเกิดการแพร่ในอัตราที่คงที่ แต่หากสังเกตจากอัตราการทำแห้งเฉลี่ยแล้ว พบว่าอัตราการอบแห้งเฉลี่ยในวิธีการอบแห้งแบบ HA ยังคงเป็นอัตราการอบแห้งเฉลี่ยที่ต่ำที่สุดทำให้ต้องใช้เวลาในการอบแห้งมากกว่าแบบอื่น

การอบแห้งแบบ VIR มีอิทธิพลทำให้สมบัติทางกายภาพดีขึ้นที่สภาวะความเข้มรังสี  $750 \text{ W/m}^2$  คือพื้นที่ภาพฉาย  $2.75 \text{ cm}^2$  ปริมาตรมากขึ้น  $0.53 \text{ m}^3$  ความหนาแน่น  $0.31 \text{ g/cm}^3$  การหดตัว 24.95% และค่าสีที่  $\Delta E = 0.95$

จากการวิเคราะห์สัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผลในการอบแห้งแบบ VIR ได้ผลว่าเมื่อใช้การหดตัวของวัสดุเข้ามาร่วมในการคำนวณ ทำให้มีความสอดคล้องกับอัตราการทำแห้งของวัสดุมากกว่า

## เอกสารอ้างอิง

- จิราพร ศรีภิญโญวณิชย์ จงยิ่งเจริญ. 2559. “การอบแห้งและการเก็บรักษาวัสดุทางการเกษตร.” กรุงเทพฯ : วิศวกรรมเกษตร. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. เอกสารอัดสำเนา.
- นิรนาม. 2560. การใช้พลังงานในระบบลดความชื้น. [Online]. Available : [http://aookaui.fireexit.co.th/MJUnew/pro\\_detail/7/การใช้พลังงานในระบบลดความชื้น.pdf](http://aookaui.fireexit.co.th/MJUnew/pro_detail/7/การใช้พลังงานในระบบลดความชื้น.pdf).
- นันทวัน เทอดไทย และสุพิชา กระจ่างเมธีกุล. 2555. “ผลของการใช้ไมโครเวฟร่วมกับการอบแห้งแบบลมร้อนต่อคุณภาพของผักทองอบแห้ง.” ภาควิชาพัฒนาผลิตภัณฑ์ คณะอุตสาหกรรมเกษตรมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- พิมพ์เพ็ญ พรเฉลิมพงศ์, ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. และนิธิยา รัตนาปนนท์, ศาสตราจารย์เกียรติคุณ ดร. 2560. ความชื้น[Online]. Available : <http://www.foodnetworksolution.com/wiki/word/0830/moisturecontent-ความชื้น>.
- พิมพ์เพ็ญ พรเฉลิมพงศ์, ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. และนิธิยา รัตนาปนนท์, ศาสตราจารย์เกียรติคุณ ดร. 2560. อัตราการทำแห้ง. [Online]. Available : <http://www.foodnetworksolution.com/wiki/word/0663/drying-rate-อัตราการทำแห้ง>.
- พิสิทธ์ราชมงคล. 2560. รังสีอินฟราเรด. [Online]. Available:<http://www.rmutphysics.com/charud/naturemystery/sci3/Electromagnetic-wave/infrared.htm>
- วัชรินทร์ ดงบัง. 2556. “รังสีอินฟราเรดและการประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมอาหาร.” วารสารวิทยาศาสตร์บูรพา. 18:299-304

- สถาบันวิจัยโภชนาการ มหาวิทยาลัยมหิดล. 2541. **มหัศจรรย์ผัก 108**. พิมพ์ครั้งที่ 2. ม.ป.ท.
- Charm, S. E. (1971). Dehydration of foods. In *The Fundamentals of food engineering* (2<sup>nd</sup> ed.). The Avi Publishing Company.
- Maryam Barzegar, Dariush Zare and Richard L. Stroshine. 2015. **An integrated energy and quality approach to optimization of green peas drying in a hot air infrared-assisted vibratory bed dryer**. 166:302-315.
- Park, K. J. (1998). "Diffusional model with and without shrinkage during salted fish muscle dry," *Drying Technology*. 16(3-5): 889-905.
- Raquel P.F. Guiné, Susana Pinho and Maria João Barroca. 2011. **Study of the convective drying of pumkin (*Cucurbita maxima*)**. 89:422-428.
- Uddin, M.S., Hawlader, M. N. A., & Hui, X. (2004). "A comparative study on heat pump, microwave and freeze drying of fresh fruits," In *Proceedings of the 14<sup>th</sup> international Drying Symposium, São Paulo, Brazil*, pp. 2035-2042.

ภาคผนวก

## ภาคผนวก

ตารางที่ 6.1 ความชื้น อัตราส่วนความชื้น และอัตราการแห้งของการอบแบบลมร้อน 60 °C (HA)

เวลา (นาที)	เวลา (วินาที)	Moisture content ( $g_w/g_{dm}$ )		Moisture ratio		Drying rate ( $g_w/g_{dm}\cdot m$ )	
		avg	s.d.	avg	s.d.	avg	s.d.
0	0	7.6073	0.0544	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000
5	300	7.4997	0.0816	0.9858	0.0058	0.0215	0.0088
10	600	7.3660	0.0745	0.9683	0.0068	0.0267	0.0040
15	900	7.2281	0.0732	0.9502	0.0073	0.0276	0.0013
20	1200	7.0977	0.0724	0.9330	0.0084	0.0261	0.0027
30	1800	6.8197	0.0733	0.8965	0.0092	0.0278	0.0009
40	2400	6.5391	0.0756	0.8596	0.0102	0.0281	0.0010
60	3600	5.9867	0.0747	0.7870	0.0097	0.0276	0.0002
80	4800	5.4377	0.0730	0.7148	0.0088	0.0275	0.0004
100	6000	4.8888	0.0730	0.6426	0.0075	0.0274	0.0010
120	7200	4.3360	0.0724	0.5700	0.0080	0.0276	0.0004
150	9000	3.6000	0.0740	0.4732	0.0078	0.0245	0.0005
180	10800	2.9075	0.0852	0.3822	0.0089	0.0231	0.0010
210	12600	2.3557	0.1747	0.3096	0.0208	0.0184	0.0038
240	14400	1.7768	0.1050	0.2335	0.0122	0.0193	0.0028
270	16200	1.3051	0.0728	0.1715	0.0089	0.0157	0.0023
300	18000	1.0212	0.0758	0.1342	0.0093	0.0095	0.0005
330	19800	0.8083	0.0697	0.1063	0.0093	0.0071	0.0024
360	21600	0.6475	0.0282	0.0851	0.0041	0.0054	0.0016
390	23400	0.5356	0.0037	0.0704	0.0009	0.0037	0.0008
420	25200	0.5030	0.0035	0.0661	0.0006	0.0011	0.0002

ตารางที่ 6.2 ความชื้น อัตราส่วนความชื้น และอัตราการทำให้แห้งของการอบแบบอินฟราเรดเบดนิ่งที่ความเข้มรังสี  $500 \text{ W/m}^2$  (IR500)

เวลา (นาที)	เวลา (วินาที)	Moisture content ( $g_w/g_{dm}$ )		Moisture ratio		Drying rate ( $g_w/g_{dm}\cdot m$ )	
		avg	s.d.	avg	s.d.	avg	s.d.
0	0	8.8176	0.2973	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000
5	300	8.5590	0.1984	0.9709	0.0150	0.0354	0.0008
10	600	8.1754	0.1726	0.9275	0.0196	0.0767	0.0105
15	900	7.7170	0.1591	0.8756	0.0230	0.0917	0.0087
20	1200	7.2559	0.1520	0.8233	0.0229	0.0922	0.0026
30	1800	6.4417	0.1392	0.7309	0.0185	0.0814	0.0022
40	2400	5.6559	0.1467	0.6416	0.0089	0.0786	0.0066
60	3600	4.1980	0.2397	0.4759	0.0117	0.0729	0.0072
80	4800	2.9151	0.3551	0.3300	0.0299	0.0641	0.0065
100	6000	1.8036	0.3647	0.2039	0.0348	0.0556	0.0011
120	7200	1.0623	0.3023	0.1200	0.0307	0.0371	0.0051
150	9000	0.6221	0.0164	0.0694	0.0032	0.0216	0.0121
180	10800	0.5000	0.0000	0.0567	0.0000	0.0049	0.0000

ตารางที่ 6.3 ความชื้น อัตราส่วนความชื้น และอัตราการทำแห้งของการอบแบบอินฟราเรดเบตนิ่งที่ความเข้มรังสี 750 W/m<sup>2</sup> (IR750)

เวลา (นาที)	เวลา (วินาที)	Moisture content (g <sub>w</sub> /g <sub>dm</sub> )		Moisture ratio		Drying rate (g <sub>w</sub> /g <sub>dm</sub> ·m)	
		avg	s.d.	avg	s.d.	avg	s.d.
0	0	6.7364	0.3128	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000
5	300	6.4420	0.3246	0.9562	0.0039	0.0589	0.0028
10	600	6.0010	0.3141	0.8907	0.0057	0.0882	0.0029
15	900	5.5737	0.3184	0.8271	0.0095	0.0855	0.0027
20	1200	5.1349	0.2678	0.7621	0.0044	0.0878	0.0121
30	1800	4.4491	0.2913	0.6601	0.0125	0.0686	0.0025
40	2400	3.7868	0.2701	0.5617	0.0143	0.0662	0.0041
60	3600	2.6518	0.2514	0.3931	0.0197	0.0568	0.0019
80	4800	1.6899	0.2187	0.2503	0.0213	0.0481	0.0018
100	6000	1.0035	0.1470	0.1486	0.0159	0.0343	0.0041
120	7200	0.6115	0.0898	0.0906	0.0098	0.0196	0.0029
130	7800	0.5012	0.1459	0.0744	0.0181	0.0110	0.0081

ตารางที่ 6.4 ความชื้น อัตราส่วนความชื้น และอัตราการทำให้แห้งของการอบแบบอินฟราเรดเบดนิ่งที่ความเข้มรังสี 1000 W/m<sup>2</sup> (IR1000)

เวลา (นาที)	เวลา (วินาที)	Moisture content (g <sub>w</sub> /g <sub>dm</sub> )		Moisture ratio		Drying rate (g <sub>w</sub> /g <sub>dm</sub> ·m)	
		avg	s.d.	avg	s.d.	avg	s.d.
0	0	7.4613	0.3062	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000
5	300	6.9341	0.2879	0.9293	0.0006	0.1054	0.0037
10	600	6.3103	0.2664	0.8457	0.0013	0.1248	0.0044
15	900	5.6911	0.2450	0.7627	0.0019	0.1238	0.0043
20	1200	5.1160	0.2252	0.6856	0.0026	0.1150	0.0040
30	1800	4.0533	0.1888	0.5432	0.0037	0.1063	0.0037
40	2400	3.0987	0.1565	0.4152	0.0047	0.0955	0.0034
60	3600	1.7018	0.1106	0.2280	0.0063	0.0698	0.0025
80	4800	0.7792	0.1062	0.1042	0.0105	0.0461	0.0012
100	6000	0.5547	0.1001	0.0741	0.0108	0.0112	0.0004
105	6300	0.5028	0.1048	0.0671	0.0115	0.0104	0.0014

ตารางที่ 6.5 ความชื้น อัตราส่วนความชื้น และอัตราการทำแห้งของการอบแบบอินฟราเรดเบดสั้นที่ความ  
เข้มรังสี 500 W/m<sup>2</sup> (VIR500)

เวลา (นาท)	เวลา (วินาที)	Moisture content (g <sub>w</sub> /g <sub>dm</sub> )		Moisture ratio		Drying rate (g <sub>w</sub> /g <sub>dm</sub> ·m)	
		avg	s.d.	avg	s.d.	avg	s.d.
0	0	8.7575	0.2065	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000
5	300	8.3978	0.2008	0.9589	0.0004	0.0719	0.0013
10	600	7.8966	0.2283	0.9016	0.0067	0.1003	0.0097
15	900	7.4598	0.2780	0.8517	0.0149	0.0874	0.0133
20	1200	6.9810	0.2693	0.7970	0.0151	0.0958	0.0020
30	1800	6.1588	0.2497	0.7031	0.0148	0.0822	0.0020
40	2400	5.3837	0.1874	0.6147	0.0088	0.0775	0.0066
60	3600	4.0258	0.1045	0.4597	0.0012	0.0679	0.0046
80	4800	2.8341	0.0716	0.3237	0.0095	0.0596	0.0057
100	6000	1.9921	0.2087	0.2277	0.0264	0.0421	0.0081
120	7200	1.3179	0.1874	0.1507	0.0231	0.0337	0.0011
150	9000	0.8587	0.0888	0.0982	0.0112	0.0153	0.0033
175	10500	0.5261	0.0241	0.0404	0.0350	0.0169	0.0073

ตารางที่ 6.6 ความชื้น อัตราส่วนความชื้น และอัตราการแห้งของการอบแบบอินฟราเรดเบดสั้นที่ความ  
เข้มรังสี 750 W/m<sup>2</sup> (VIR750)

เวลา (นาที)	เวลา (วินาที)	Moisture content (g <sub>w</sub> /g <sub>dm</sub> )		Moisture ratio		Drying rate (g <sub>w</sub> /g <sub>dm</sub> ·m)	
		avg	s.d.	avg	s.d.	avg	s.d.
0	0	6.6058	0.0821	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000
5	300	6.0744	0.2294	0.9199	0.0455	0.0709	0.0106
10	600	5.6073	0.2506	0.8492	0.0472	0.0934	0.0116
15	900	5.1128	0.2787	0.7743	0.0499	0.0989	0.0104
20	1200	4.7820	0.2037	0.7240	0.0339	0.0864	0.0116
30	1800	4.0498	0.3488	0.6131	0.0538	0.0732	0.0153
40	2400	3.3510	0.3564	0.5073	0.0540	0.0699	0.0044
60	3600	2.1642	0.3374	0.3275	0.0505	0.0593	0.0030
80	4800	1.3316	0.3365	0.2015	0.0511	0.0416	0.0026
100	6000	0.8105	0.3130	0.1227	0.0477	0.0261	0.0016
120	7200	0.5015	0.2232	0.0759	0.0340	0.0154	0.0045

ตารางที่ 6.7 ความชื้น อัตราส่วนความชื้น และอัตราการแห้งของการอบแบบอินฟราเรดแบบคลื่นที่ความเข้มรังสี 1000 W/m<sup>2</sup> (VIR1000)

เวลา (นาที)	เวลา (วินาที)	Moisture content (g <sub>w</sub> /g <sub>dm</sub> )		Moisture ratio		Drying rate (g <sub>w</sub> /g <sub>dm</sub> ·m)	
		avg	s.d.	avg	s.d.	avg	s.d.
		0	0	8.5564	0.8767	1.0000	0.0000
5	300	8.1598	0.8377	0.9536	0.0003	0.0793	0.0078
10	600	7.6055	0.7639	0.8890	0.0051	0.1109	0.0170
15	900	6.9723	0.7091	0.8149	0.0036	0.1266	0.0111
20	1200	6.3836	0.6372	0.7462	0.0077	0.1177	0.0164
30	1800	5.2697	0.5284	0.6160	0.0085	0.1114	0.0111
40	2400	4.3043	0.4272	0.5033	0.0122	0.0965	0.0114
60	3600	2.5010	0.2643	0.2926	0.0165	0.0902	0.0098
70	4200	1.8525	0.2182	0.2168	0.0176	0.0648	0.0068
80	4800	1.2040	0.1859	0.1410	0.0187	0.0648	0.0068
90	5400	0.8691	0.1088	0.1020	0.0130	0.0335	0.0080
100	6000	0.5342	0.0422	0.0630	0.0095	0.0335	0.0080

ตารางที่ 6.8 ข้อมูลที่ใช้ในการคำนวณสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผลของการอบแบบ HA 60 °C

เวลา (นาที)	Moisture content (gw/gdm)	Moisture ratio	ln MR	MCV	MR	lnMR
0	7.61	1.00	0.00	2.82	1.00	0.00
60	5.99	0.79	-0.24	2.80	0.99	-0.01
120	4.34	0.57	-0.56	3.02	1.07	0.07
180	2.91	0.38	-0.96	2.43	0.86	-0.15
240	1.78	0.23	-1.45	2.17	0.77	-0.26
300	1.02	0.13	-2.01	1.73	0.61	-0.49
360	0.51	0.07	-2.70	1.63	0.58	-0.55
420	0.29	0.04	-3.27	1.81	0.64	-0.45

ตารางที่ 6.9 ข้อมูลที่ใช้ในการคำนวณสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผลของการอบแบบ IR500

เวลา (นาที)	Moisture content (gw/gdm)	Moisture ratio	ln MR	MCV	MR	lnMR
0	8.82	1.00	0.00	3.64	1.00	0.00
30	6.44	0.73	-0.31	4.02	1.10	0.10
60	4.20	0.48	-0.74	3.84	1.05	0.05
80	2.92	0.33	-1.11	3.56	0.98	-0.02
100	1.80	0.20	-1.59	2.25	0.62	-0.48
120	1.06	0.12	-2.12	1.48	0.41	-0.90
150	0.62	0.07	-2.65	2.21	0.61	-0.50
175	0.47	0.05	-2.93	2.12	0.58	-0.54

ตารางที่ 6.10 ข้อมูลที่ใช้ในการคำนวณสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผลของการอบแบบ IR750

เวลา (นาที)	Moisture content (gw/gdm)	Moisture ratio	ln MR	MC/V	MR	lnMR
0	6.74	1.00	0.00	3.19	1.00	0.00
20	5.13	0.76	-0.27	3.41	1.07	0.07
40	3.79	0.56	-0.58	3.18	1.00	0.00
60	2.65	0.39	-0.93	2.55	0.80	-0.23
80	1.69	0.25	-1.38	2.38	0.75	-0.29
100	1.00	0.15	-1.90	2.46	0.77	-0.26
120	0.61	0.09	-2.40	1.97	0.62	-0.48
130	0.50	0.07	-2.60	1.88	0.59	-0.53

ตารางที่ 6.11 ข้อมูลที่ใช้ในการคำนวณสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผลของการอบแบบ IR1000

เวลา (นาที)	Moisture content (gw/gdm)	Moisture ratio	ln MR	MC/V	MR	lnMR
0	7.46	1.00	0.00	3.46	1.00	0.00
20	5.12	0.69	-0.38	3.14	0.91	-0.10
30	4.05	0.54	-0.61	3.35	0.97	-0.03
40	3.10	0.42	-0.88	4.04	1.17	0.16
60	1.70	0.23	-1.48	4.06	1.17	0.16
80	0.78	0.10	-2.26	4.55	1.32	0.28
100	0.55	0.07	-2.60	3.84	1.11	0.11
105	0.50	0.07	-2.70	2.90	0.84	-0.18

ตารางที่ 6.12 ข้อมูลที่ใช้ในการคำนวณสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผลของการอบแบบ VIR500

เวลา (นาที)	Moisture content (gw/gdm)	Moisture ratio	ln MR	MC/V	MR	lnMR
0	8.76	1.00	0.00	3.72	1.00	0.00
30	6.16	0.70	-0.35	3.48	0.94	-0.07
60	4.03	0.46	-0.78	4.04	1.09	0.08
80	2.83	0.32	-1.13	3.74	1.01	0.01
100	1.99	0.23	-1.48	4.17	1.12	0.12
120	1.32	0.15	-1.89	4.25	1.14	0.13
150	0.86	0.10	-2.32	5.13	1.38	0.32
180	0.53	0.06	-2.81	2.16	0.58	-0.54

ตารางที่ 6.13 ข้อมูลที่ใช้ในการคำนวณสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผลของการอบแบบ VIR750

เวลา (นาที)	Moisture content (gw/gdm)	Moisture ratio	ln MR	MC/V	MR	lnMR
0	6.61	1.00	0.00	3.16	1.00	0.00
20	4.78	0.72	-0.32	3.04	0.96	-0.04
30	4.05	0.61	-0.49	3.46	1.10	0.09
40	3.35	0.51	-0.68	2.92	0.93	-0.08
60	2.16	0.33	-1.12	2.43	0.77	-0.26
80	1.33	0.20	-1.60	4.65	1.47	0.39
100	0.81	0.12	-2.10	4.74	1.50	0.41
120	0.50	0.08	-2.58	0.95	0.30	-1.20

ตารางที่ 6.14 ข้อมูลที่ใช้ในการคำนวณสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผลของการอบแบบ VIR1000

เวลา (นาที)	Moisture content (gw/gdm)	Moisture ratio	ln MR	MCV	MR	lnMR
0	8.56	1.00	0.00	4.06	1.00	0.00
20	6.38	0.75	-0.29	3.38	0.83	-0.18
40	4.30	0.50	-0.69	3.79	0.93	-0.07
60	2.50	0.29	-1.23	3.80	0.94	-0.07
70	1.81	0.21	-1.55	3.44	0.85	-0.16
80	1.20	0.14	-1.96	3.68	0.91	-0.10
90	0.85	0.10	-2.31	3.11	0.77	-0.27
100	0.56	0.07	-2.73	1.50	0.37	-0.99

ตารางที่ 6.15 ปริมาตรของวัสดุของการอบแบบ HA 60 °C

ปริมาตรวัสดุ (m3)			ปริมาตรวัสดุต่อชิ้น (cm3)				
1	2	3	1	2	3	avg	s.d.
8.77	8.23	7.28	2.92	2.74	2.43	2.70	0.25
5.94	7.08	6.21	1.98	2.36	2.07	2.14	0.20
4.76	4.53	3.63	1.59	1.51	1.21	1.44	0.20
3.97	3.54	3.26	1.32	1.18	1.09	1.20	0.12
2.62	2.39	2.37	0.87	0.80	0.79	0.82	0.05
1.70	1.33	2.28	0.57	0.44	0.76	0.59	0.16
0.89	0.95	0.99	0.30	0.32	0.33	0.31	0.02
0.43	0.52	0.49	0.14	0.17	0.16	0.16	0.02

ตารางที่ 6.16 ปริมาตรของวัสดุของการอบแบบ IR500

ปริมาตรวัสดุ (cm <sup>3</sup> )			ปริมาตรวัสดุต่อชิ้น (cm <sup>3</sup> )				
1	2	3	1	2	3	avg	s.d.
7.46	7.76	6.59	2.49	2.59	2.20	2.42	0.20
5.55	4.22	4.66	1.85	1.41	1.55	1.60	0.23
3.17	3.11	3.56	1.06	1.04	1.19	1.09	0.08
2.01	2.41	2.95	0.67	0.80	0.98	0.82	0.16
2.77	2.15	2.29	0.92	0.72	0.76	0.80	0.11
1.61	2.28	2.56	0.54	0.76	0.85	0.72	0.16
0.78	0.87	0.87	0.26	0.29	0.29	0.28	0.02
0.67	0.68	0.64	0.22	0.23	0.21	0.22	0.01

ตารางที่ 6.17 ปริมาตรของวัสดุของการอบแบบ IR750

ปริมาตรวัสดุ (m <sup>3</sup> )			ปริมาตรวัสดุต่อชิ้น (cm <sup>3</sup> )				
1	2	3	1	2	3	avg	s.d.
6.48	6.55	5.95	2.16	2.18	1.98	2.11	0.11
4.29	4.21	5.05	1.43	1.40	1.68	1.50	0.15
3.39	3.85	3.48	1.13	1.28	1.16	1.19	0.08
2.68	2.98	3.71	0.89	0.99	1.24	1.04	0.18
1.61	2.36	2.43	0.54	0.79	0.81	0.71	0.15
1.36	1.24	1.07	0.45	0.41	0.36	0.41	0.05
0.97	0.97	0.86	0.32	0.32	0.29	0.31	0.02
0.77	0.82	0.80	0.26	0.27	0.27	0.27	0.01

ตารางที่ 6.18 ปริมาตรของวัสดุของการอบแบบ IR1000

ปริมาตรวัสดุ (m <sup>3</sup> )			ปริมาตรวัสดุต่อชั้น (cm <sup>3</sup> )				
1	2	3	1	2	3	avg	s.d.
6.87	6.60	5.95	2.29	2.20	1.98	2.16	0.16
4.57	4.47	5.62	1.52	1.49	1.87	1.63	0.21
3.89	3.79	3.21	1.30	1.26	1.07	1.21	0.12
2.53	1.82	2.56	0.84	0.61	0.85	0.77	0.14
1.28	1.24		0.43	0.41		0.42	0.01
0.53	0.55	0.46	0.18	0.18	0.15	0.17	0.02
0.26	0.26	0.77	0.09	0.09	0.26	0.14	0.10
0.53	0.45	0.57	0.18	0.15	0.19	0.17	0.02

ตารางที่ 6.19 ปริมาตรของวัสดุของการอบแบบ VIR500

ปริมาตรวัสดุ (m <sup>3</sup> )			ปริมาตรวัสดุต่อชั้น (cm <sup>3</sup> )				
1	2	3	1	2	3	avg	s.d.
7.62	6.76	6.83	2.54	2.25	2.28	2.36	0.16
5.48	4.99	5.47	1.83	1.66	1.82	1.77	0.09
3.48	2.71	2.78	1.16	0.90	0.93	1.00	0.14
2.16	2.26	2.39	0.72	0.75	0.80	0.76	0.04
1.31	1.45	1.54	0.44	0.48	0.51	0.48	0.04
1.01	0.90	0.89	0.34	0.30	0.30	0.31	0.02
0.55	0.48	0.47	0.18	0.16	0.16	0.17	0.01
0.98	0.64	0.57	0.33	0.21	0.19	0.24	0.07

ตารางที่ 6.20 ปริมาตรของวัสดุของการอบแบบ VIR750

ปริมาตรวัสดุ (m <sup>3</sup> )			ปริมาตรวัสดุต่อชั้น (cm <sup>3</sup> )				
1	2	3	1	2	3	avg	s.d.
6.40	6.21	6.22	2.13	2.07	2.07	2.09	0.04
5.54	5.07	3.53	1.85	1.69	1.18	1.57	0.35
3.46	3.44	3.63	1.15	1.15	1.21	1.17	0.04
3.91	3.02	3.39	1.30	1.01	1.13	1.15	0.15
3.22	2.40	2.38	1.07	0.80	0.79	0.89	0.16
0.83	1.00	0.75	0.28	0.33	0.25	0.29	0.04
0.51	0.47	0.56	0.17	0.16	0.19	0.17	0.02
1.60	1.49	1.64	0.53	0.50	0.55	0.53	0.03

ตารางที่ 6.21 ปริมาตรของวัสดุของการอบแบบ VIR1000

ปริมาตรวัสดุ (cm <sup>3</sup> )			ปริมาตรวัสดุต่อชั้น (cm <sup>3</sup> )				
1	2	3	1	2	3	avg	s.d.
6.48	6.55	5.95	2.16	2.18	1.98	2.11	0.11
5.63	5.89	5.46	1.88	1.96	1.82	1.89	0.07
3.51	3.37	3.34	1.17	1.12	1.11	1.14	0.03
1.61	2.26	2.06	0.54	0.75	0.69	0.66	0.11
1.57	1.32	1.84	0.52	0.44	0.61	0.53	0.09
0.64	1.26	1.03	0.21	0.42	0.34	0.33	0.10
0.76	0.91	0.79	0.25	0.30	0.26	0.27	0.03
1.26	1.31	0.77	0.42	0.44	0.26	0.37	0.10

ตารางที่ 6.22 ความหนาแน่นของเนื้อวัสดุของการอบแบบ HA 60 °C

ความหนาแน่นวัสดุ (g/cm <sup>3</sup> )			ความหนาแน่นวัสดุต่อชิ้น(g/cm <sup>3</sup> )				
1	2	3	1	2	3	avg	s.d.
1.02	1.04	1.07	0.34	0.35	0.36	0.35	0.01
1.07	1.04	1.06	0.36	0.35	0.35	0.35	0.00
1.10	1.11	1.13	0.37	0.37	0.38	0.37	0.01
1.12	1.16	1.15	0.37	0.39	0.38	0.38	0.01
1.18	1.20	1.21	0.39	0.40	0.40	0.40	0.01
1.28	1.45	1.21	0.43	0.48	0.40	0.44	0.04
1.56	1.53	1.52	0.52	0.51	0.51	0.51	0.01
2.07	1.84	1.86	0.69	0.61	0.62	0.64	0.04

ตารางที่ 6.23 ความหนาแน่นของเนื้อวัสดุของการอบแบบ IR500

ความหนาแน่นวัสดุ (g/cm <sup>3</sup> )			ความหนาแน่นวัสดุต่อชิ้น(g/cm <sup>3</sup> )				
1	2	3	1	2	3	avg	s.d.
1.05	1.04	1.04	0.35	0.35	0.35	0.35	0.00
1.08	1.09	1.08	0.36	0.36	0.36	0.36	0.00
1.14	1.14	1.12	0.38	0.38	0.37	0.38	0.00
1.20	1.01	1.14	0.40	0.34	0.38	0.37	0.03
1.15	1.20	1.19	0.38	0.40	0.40	0.39	0.01
1.23	1.13	1.06	0.41	0.38	0.35	0.38	0.03
1.45	1.45	1.36	0.48	0.48	0.45	0.47	0.02
1.44	1.50	1.51	0.48	0.50	0.50	0.49	0.01

ตารางที่ 6.24 ความหนาแน่นของเนื้อวัสดุของการอบแบบ IR750

ความหนาแน่นวัสดุ (g/cm <sup>3</sup> )			ความหนาแน่นวัสดุต่อชิ้น(g/cm <sup>3</sup> )				
1	2	3	1	2	3	avg	s.d.
1.01	1.01	1.02	0.34	0.34	0.34	0.34	0.00
1.03	1.03	1.02	0.34	0.34	0.34	0.34	0.00
1.03	1.04	1.04	0.34	0.35	0.35	0.34	0.00
1.06	1.04	0.86	0.35	0.35	0.29	0.33	0.04
1.04	1.04	1.05	0.35	0.35	0.35	0.35	0.00
1.07	1.04	1.05	0.36	0.35	0.35	0.35	0.01
1.06	1.08	1.02	0.35	0.36	0.34	0.35	0.01
1.00	0.96	1.01	0.33	0.32	0.34	0.33	0.01

ตารางที่ 6.25 ความหนาแน่นของเนื้อวัสดุของการอบแบบ IR1000

ความหนาแน่นวัสดุ (g/cm <sup>3</sup> )			ความหนาแน่นวัสดุต่อชิ้น(g/cm <sup>3</sup> )				
1	2	3	1	2	3	avg	s.d.
1.07	1.08	1.09	0.36	0.36	0.36	0.36	0.00
1.12	1.13	0.92	0.37	0.38	0.31	0.35	0.04
1.19	1.18	1.19	0.40	0.39	0.40	0.40	0.00
1.29	1.39	1.04	0.43	0.46	0.35	0.41	0.06
1.57	1.64		0.52	0.55		0.54	0.02
2.21	2.32	2.59	0.74	0.77	0.86	0.79	0.06
2.80	3.59	1.92	0.93	1.20	0.64	0.92	0.28
1.83	1.92	1.67	0.61	0.64	0.56	0.60	0.04

ตารางที่ 6.26 ความหนาแน่นของเนื้อวัสดุของการอบแบบ VIR500

ความหนาแน่นวัสดุ (g/cm <sup>3</sup> )			ความหนาแน่นวัสดุต่อชิ้น(g/cm <sup>3</sup> )				
1	2	3	1	2	3	avg	s.d.
1.04	1.04	1.05	0.35	0.35	0.35	0.35	0.00
1.07	1.07	1.07	0.36	0.36	0.36	0.36	0.00
1.12	1.15	1.14	0.37	0.38	0.38	0.38	0.01
1.20	1.16	1.17	0.40	0.39	0.39	0.39	0.01
1.34	1.31	1.27	0.45	0.44	0.42	0.44	0.01
1.32	1.43	1.34	0.44	0.48	0.45	0.46	0.02
1.70	1.91	1.76	0.57	0.64	0.59	0.60	0.03
1.17	1.49	1.62	0.39	0.50	0.54	0.48	0.08

ตารางที่ 6.27 ความหนาแน่นของเนื้อวัสดุของการอบแบบ VIR750

ความหนาแน่นวัสดุ (g/cm <sup>3</sup> )			ความหนาแน่นวัสดุต่อชิ้น(g/cm <sup>3</sup> )				
1	2	3	1	2	3	avg	s.d.
1.06	1.06	1.01	0.35	0.35	0.34	0.35	0.01
1.06	1.08	1.13	0.35	0.36	0.38	0.36	0.01
1.13	1.16	1.15	0.38	0.39	0.38	0.38	0.00
1.13	1.18	1.14	0.38	0.39	0.38	0.38	0.01
1.11	1.22	1.25	0.37	0.41	0.42	0.40	0.02
1.39	1.48	1.75	0.46	0.49	0.58	0.51	0.06
2.04	2.12	1.95	0.68	0.71	0.65	0.68	0.03
1.20	1.31	1.20	0.40	0.44	0.40	0.41	0.02

ตารางที่ 6.28 ความหนาแน่นของเนื้อวัสดุของการอบแบบ VIR1000

ความหนาแน่นวัสดุ (g/cm <sup>3</sup> )			ความหนาแน่นวัสดุต่อชิ้น(g/cm <sup>3</sup> )				
1	2	3	1	2	3	avg	s.d.
1.01	1.01	1.02	0.34	0.34	0.34	0.34	0.00
1.07	1.06	1.06	0.36	0.35	0.35	0.35	0.00
1.12	1.14	1.13	0.37	0.38	0.38	0.38	0.00
1.24	1.20	1.20	0.41	0.40	0.40	0.40	0.01
1.28	1.29	1.18	0.43	0.43	0.39	0.42	0.02
1.58	1.30	1.31	0.53	0.43	0.44	0.47	0.05
1.33	1.21	1.29	0.44	0.40	0.43	0.43	0.02
0.74	0.77	1.30	0.25	0.26	0.43	0.31	0.11

ตารางที่ 6.29 เปอร์เซ็นต์การหดตัวของวัสดุที่อบแบบ HA

เปอร์เซ็นต์การหดตัว			เปอร์เซ็นต์การหดตัวต่อชิ้น				
1	2	3	1	2	3	avg	s.d.
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
32.24	13.97	14.69	10.75	4.66	4.90	6.77	3.45
45.74	44.97	50.08	15.25	14.99	16.69	15.64	0.92
54.78	56.98	55.13	18.26	18.99	18.38	18.54	0.39
70.12	70.95	67.46	23.37	23.65	22.49	23.17	0.61
80.60	83.80	68.72	26.87	27.93	22.91	25.90	2.65
89.91	88.41	86.41	29.97	29.47	28.80	29.41	0.58
95.15	93.72	93.21	31.72	31.24	31.07	31.34	0.34

ตารางที่ 6.30 เปอร์เซ็นต์การหดตัวของวัสดุที่อบแบบ IR500

เปอร์เซ็นต์การหดตัว			เปอร์เซ็นต์การหดตัวต่อชิ้น				
1	2	3	1	2	3	avg	s.d.
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
25.58	45.63	29.32	8.53	15.21	9.77	11.17	3.55
57.47	59.85	45.90	19.16	19.95	15.30	18.14	2.49
73.04	68.89	55.15	24.35	22.96	18.38	21.90	3.12
62.87	72.30	65.27	20.96	24.10	21.76	22.27	1.63
78.43	70.67	61.08	26.14	23.56	20.36	23.35	2.90
89.52	88.74	86.74	29.84	29.58	28.91	29.44	0.48
91.06	91.26	90.23	30.35	30.42	30.08	30.28	0.18

ตารางที่ 6.31 เปอร์เซ็นต์การหดตัวของวัสดุที่อบแบบ IR750

เปอร์เซ็นต์การหดตัว			เปอร์เซ็นต์การหดตัวต่อชิ้น				
1	2	3	1	2	3	avg	s.d.
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
33.87	35.79	15.25	11.29	11.93	5.08	9.43	3.78
47.70	41.23	41.51	15.90	13.74	13.84	14.49	1.22
58.69	54.56	37.64	19.56	18.19	12.55	16.77	3.72
75.18	64.04	59.27	25.06	21.35	19.76	22.05	2.72
79.08	81.05	82.05	26.36	27.02	27.35	26.91	0.50
85.11	85.26	85.52	28.37	28.42	28.51	28.43	0.07
88.12	87.54	86.49	29.37	29.18	28.83	29.13	0.28

ตารางที่ 6.32 เปอร์เซ็นต์การหดตัวของวัสดุที่อบแบบ IR1000

เปอร์เซ็นต์การหดตัว			เปอร์เซ็นต์การหดตัวต่อชิ้น				
1	2	3	1	2	3	avg	s.d.
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
35.46	32.23	5.60	11.82	10.74	1.87	8.14	5.46
46.10	42.51	46.14	15.37	14.17	15.38	14.97	0.69
67.02	72.47	56.95	22.34	24.16	18.98	21.83	2.63
86.35	81.18	100.00	28.78	27.06		27.92	1.22
97.87	91.64	92.28	32.62	30.55	30.76	31.31	1.14
101.95	95.99	87.07	33.98	32.00	29.02	31.67	2.50
97.87	93.21	90.35	32.62	31.07	30.12	31.27	1.27

ตารางที่ 6.33 เปอร์เซ็นต์การหดตัวของวัสดุที่อบแบบ VIR500

เปอร์เซ็นต์การหดตัว			เปอร์เซ็นต์การหดตัวต่อชิ้น				
1	2	3	1	2	3	avg	s.d.
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
28.05	26.19	19.87	9.35	8.73	6.62	8.23	1.43
54.30	59.86	59.26	18.10	19.95	19.75	19.27	1.02
71.64	66.50	64.98	23.88	22.17	21.66	22.57	1.16
82.81	78.57	77.44	27.60	26.19	25.81	26.54	0.94
86.73	86.73	87.04	28.91	28.91	29.01	28.94	0.06
92.76	92.86	93.10	30.92	30.95	31.03	30.97	0.06
87.18	90.48	91.58	29.06	30.16	30.53	29.92	0.76

ตารางที่ 6.34 เปอร์เซ็นต์การหดตัวของวัสดุที่อบแบบ VIR750

เปอร์เซ็นต์การหดตัว			เปอร์เซ็นต์การหดตัวต่อชิ้น				
1	2	3	1	2	3	avg	s.d.
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
13.46	18.33	43.25	4.49	6.11	14.42	8.34	5.33
45.96	44.63	41.59	15.32	14.88	13.86	14.69	0.75
38.96	51.30	45.47	12.99	17.10	15.16	15.08	2.06
49.73	61.30	61.74	16.58	20.43	20.58	19.20	2.27
87.07	83.89	87.99	29.02	27.96	29.33	28.77	0.72
92.10	92.41	90.94	30.70	30.80	30.31	30.61	0.26
75.04	75.93	73.57	25.01	25.31	24.52	24.95	0.40

ตารางที่ 6.35 เปอร์เซ็นต์การหดตัวของวัสดุที่อบแบบ VIR1000

เปอร์เซ็นต์การหดตัว			เปอร์เซ็นต์การหดตัวต่อชิ้น				
1	2	3	1	2	3	avg	s.d.
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
13.12	10.18	8.30	4.37	3.39	2.77	3.51	0.81
45.92	48.60	43.82	15.31	16.20	14.61	15.37	0.80
75.18	65.44	65.44	25.06	21.81	21.81	22.90	1.87
75.71	79.82	69.11	25.24	26.61	23.04	24.96	1.80
90.07	80.70	82.63	30.02	26.90	27.54	28.16	1.65
88.30	86.14	86.68	29.43	28.71	28.89	29.01	0.37
80.50	80.00	87.07	26.83	26.67	29.02	27.51	1.31

ตารางที่ 6.36 พื้นที่ภาพฉายที่อบแบบ HA

เวลา (นาที)	พื้นที่ภาพฉาย (mm <sup>2</sup> )					Avg (mm <sup>2</sup> )	sd
	1	2	3	4	5		
0	487.56	483.81	521.70	494.54	520.30	501.58	18.15
60	449.92	417.39	448.30	445.55	454.29	443.09	14.71
120	363.70	377.89	383.64	403.80	350.81	375.97	20.13
180	350.12	327.76	375.41	335.94	356.14	349.07	18.52
240	314.71	320.79	303.84	340.41	357.12	327.37	21.29
300	272.36	271.29	291.34	287.34	236.15	271.70	21.76
340	207.85	219.93	273.89	290.74	222.29	242.94	36.84
370	226.89	221.25	219.99	221.00	189.53	215.73	14.89
430	130.59	163.98	125.16	145.20	146.00	142.19	15.19

ตารางที่ 6.37 พื้นที่ภาพฉายที่อบแบบ IR500

เวลา (นาที)	พื้นที่ภาพฉาย (mm <sup>2</sup> )					Avg (mm <sup>2</sup> )	s.d.
	1	2	3	4	5		
0	473.59	404.26	425.10	483.81	487.56	454.86	37.76
30	388.45	366.04	401.53	379.16	393.08	385.65	13.62
60	325.16	335.32	334.89	310.73	335.91	328.40	10.83
80	310.32	305.39	279.64	303.50	313.75	302.52	13.41
100	329.59	319.54	311.42	312.18	313.12	317.17	7.65
120	295.86	288.10	296.93	265.34	262.33	281.71	16.71
150	253.59	255.08	253.01	244.91	262.09	253.74	6.12
175	215.24	232.38	226.23	246.35	231.48	230.34	11.25

ตารางที่ 6.38 พื้นที่ภาพฉายที่อบแบบ IR750

เวลา (นาที)	พื้นที่ภาพฉาย (mm <sup>2</sup> )					Avg (mm <sup>2</sup> )	s.d.
	1	2	3	4	5		
0	465.27	473.59	404.26	431.95	425.10	440.03	28.86
5	446.60	425.04	428.59	417.44	433.50	430.23	10.86
20	390.54	396.35	387.54	399.37	356.42	386.04	17.20
30	344.04	355.23	358.62	350.84	372.51	356.25	10.60
40	342.98	337.09	342.73	330.35	307.04	332.04	14.89
60	299.75	296.94	298.84	314.75	338.92	309.84	17.74
80	267.17	281.09	282.31	279.72	298.73	281.80	11.24
100	268.08	227.24	215.42	232.60	218.52	232.37	21.10
120	224.20	193.94	193.79	230.92	204.73	209.52	17.22
130	208.43	185.92	198.27	188.63	192.05	194.66	8.98

ตารางที่ 6.39 พื้นที่ภาพฉายที่อบแบบ IR1000

เวลา (นาที)	พื้นที่ภาพฉาย (mm <sup>2</sup> )					Avg (mm <sup>2</sup> )	s.d.
	1	2	3	4	5		
0	413.43	465.27	479.23	500.30	421.95	456.04	37.28
20	384.59	397.17	375.23	391.89	379.79	385.73	8.88
40	354.60	339.30	312.72	349.27	318.27	334.83	18.59
60	288.48	303.57	277.05	314.42	272.26	291.16	17.74
70	277.97	283.15	273.27	292.37	266.93	278.73	9.68
80	267.45	262.72	269.49	270.31	261.59	266.31	3.96
90	267.67	249.36	252.29	255.43	274.97	259.94	10.91
105	267.88	236.00	235.09	240.55	288.34	253.57	23.63

ตารางที่ 6.40 พื้นที่ภาพถ่ายที่ออกแบบ VIR500

เวลา (นาที)	พื้นที่ภาพถ่าย (mm <sup>2</sup> )					Avg (mm <sup>2</sup> )	s.d.
	1	2	3	4	5		
0	481.52	470.60	479.23	468.54	469.60	473.90	6.01
30	385.83	387.61	363.37	426.55	395.73	391.82	22.83
60	333.44	339.96	310.85	332.31	330.67	329.45	10.98
80	298.88	320.00	298.00	315.85	298.31	306.21	10.80
100	292.55	302.75	303.64	301.89	284.43	297.05	8.35
120	321.71	261.80	297.37	292.99	283.00	291.37	21.82
150	220.71	226.54	242.85	227.61	247.20	232.98	11.41
180	206.66	167.33	267.90	242.20	219.45	220.71	37.87

ตารางที่ 6.41 พื้นที่ภาพถ่ายที่ออกแบบ VIR750

เวลา (นาที)	พื้นที่ภาพถ่าย (mm <sup>2</sup> )					Avg (mm <sup>2</sup> )	s.d.
	1	2	3	4	5		
0	441.66	440.14	444.65	461.66	413.43	440.31	17.31
20	427.15	411.54	388.52	368.02	377.65	394.58	24.38
30	374.39	380.67	354.69	346.04	376.58	366.47	15.19
40	338.41	356.47	357.57	342.14	345.07	347.93	8.63
60	308.62	312.24	329.44	324.16	315.86	318.06	8.58
80	296.05	229.64	244.07	264.02	287.43	264.24	28.08
100	223.81	270.95	244.41	237.02	273.75	249.99	21.73
120	208.21	202.73	209.23	217.07	211.57	209.76	5.22

ตารางที่ 6.42 พื้นที่ภาพถ่ายที่อบแบบ VIR1000

เวลา (นาที)	พื้นที่ภาพถ่าย (mm <sup>2</sup> )					Avg (mm <sup>2</sup> )	s.d.
	1	2	3	4	5		
0	455.27	483.61	404.26	421.95	425.10	438.04	31.39
20	392.62	379.50	369.19	376.21	363.56	376.22	11.06
40	368.70	353.01	376.42	364.54	352.24	362.98	10.37
60	353.91	303.37	306.10	341.77	286.62	318.35	28.26
70	338.21	316.43	300.62	309.77	293.81	311.77	17.11
80	314.01	314.30	321.22	317.55	275.86	308.59	18.53
90	265.00	294.21	271.57	292.19	275.76	279.75	12.89
100	265.50	283.82	303.36	252.30	268.06	274.61	19.59

ตารางที่ 6.43 ค่าสีตามเวลาการอบแบบ HA

เวลา (นาที)	L*	a*	b*
0	66.87	14.08	70.87
5	62.94	16.08	71.47
10	67.28	13.86	72.16
15	72.74	11	64.33
20	71.28	11.87	62.68
30	73.11	10.99	60.12
40	70.14	12.85	65.05
60	72.25	11.8	63.27
80	72.87	10.97	64.12
100	72.66	10.75	63.01
120	70.95	13.2	60.41
150	72.28	11.07	60.08
180	72.23	11.72	62.01
210	71.65	12.75	60.99
240	69.94	13.24	66.01
270	69.62	14.93	62.19
300	70.22	13.9	59.81
330	71.83	13.42	60.5
360	70.98	13.46	63.43
420	69.93	13.45	61.08

ตารางที่ 6.44 ค่าสีตามเวลาการอบแบบ IR500

เวลา (นาที)	L*	a*	b*
0	66.08	13.56	69.03
5	65.64	13.09	66.07
10	67.25	13.37	65.68
15	67.99	12.77	63.5
20	66.53	12.35	64.45
30	69.53	12.95	62.71
40	67.63	12.48	64.58
60	68.89	14.92	67.86
80	66.24	14.29	65.34
100	68.77	14.9	68.75
120	65.73	13.88	66.08
150	58.61	13.02	60.35
175	55.46	15.77	57.94

ตารางที่ 6.45 ค่าสีตามเวลาการอบแบบ IR750

เวลา (นาที)	L*	a*	b*
0	66.94	12.98	74.29
5	67.93	11.93	71.54
10	64.79	12.87	72.68
15	67.14	11.84	72.22
20	67.58	11.8	71.77
30	65.74	14.45	73.05
40	64.3	14.28	73.16
60	63.33	15.52	73.21
80	61.85	16.17	72.23
100	59.55	16.08	68.91
120	57.87	13.91	62.75
130	47.31	15.67	50.63

ตารางที่ 6.46 ค่าสีตามเวลาการอบแบบ IR1000

เวลา (นาที)	L*	a*	b*
0	69.37	14.29	67.76
5	68.82	13.56	65.22
10	70.9	13.36	67.06
15	72.18	12.93	63.79
20	68.49	13.45	65.27
30	69.8	13.41	66.15
40	68.86	14.02	68.36
60	57.43	16.32	62.77
80	57.6	15.69	59.63
100	56.31	14.79	56.27
105	42.28	17.99	35.96

ตารางที่ 6.47 ค่าสีตามเวลาการอบแบบ VIR500

เวลา (นาที)	L*	a*	b*
0	67.06	12.75	73.08
5	68.66	12.37	68.95
10	66.4	12.68	68.27
15	67.86	12.51	68.59
20	67.45	12.14	70.12
30	66.92	13.36	68.72
40	68.92	13.5	70.58
60	68.89	14.07	72.02
80	64.25	15.28	71.17
100	67.27	15.82	71.32
120	66.61	12.35	72.19
150	66.61	12.35	72.19
180	66.61	12.35	72.19

ตารางที่ 6.48 ค่าสีตามเวลาการอบแบบ VIR750

เวลา (นาที)	L*	a*	b*
0	62.06	16.24	71.38
5	65.34	13.51	69.8
10	65.33	13.82	71.41
15	67.56	12.98	70.26
20	68.45	12.38	70.4
30	64.68	15.34	71.4
40	63.2	15.26	71.12
60	64	15.19	73.75
80	62.43	15.56	70.84
100	55.21	17.23	61.09
120	62.59	16.65	72.06

ตารางที่ 6.49 ค่าสีตามเวลาการอบแบบ VIR1000

เวลา (นาที)	L*	a*	b*
0	66.54	14.76	69.19
5	70.24	12.91	65.1
10	69.78	12.94	66.91
15	66.59	14.62	71.71
20	70.22	13.23	66.2
30	68.19	14.14	71.22
40	68.63	14.93	72.69
60	65.22	16.44	72.12
80	66.17	17.5	74.25
100	58.9	16.96	64.38