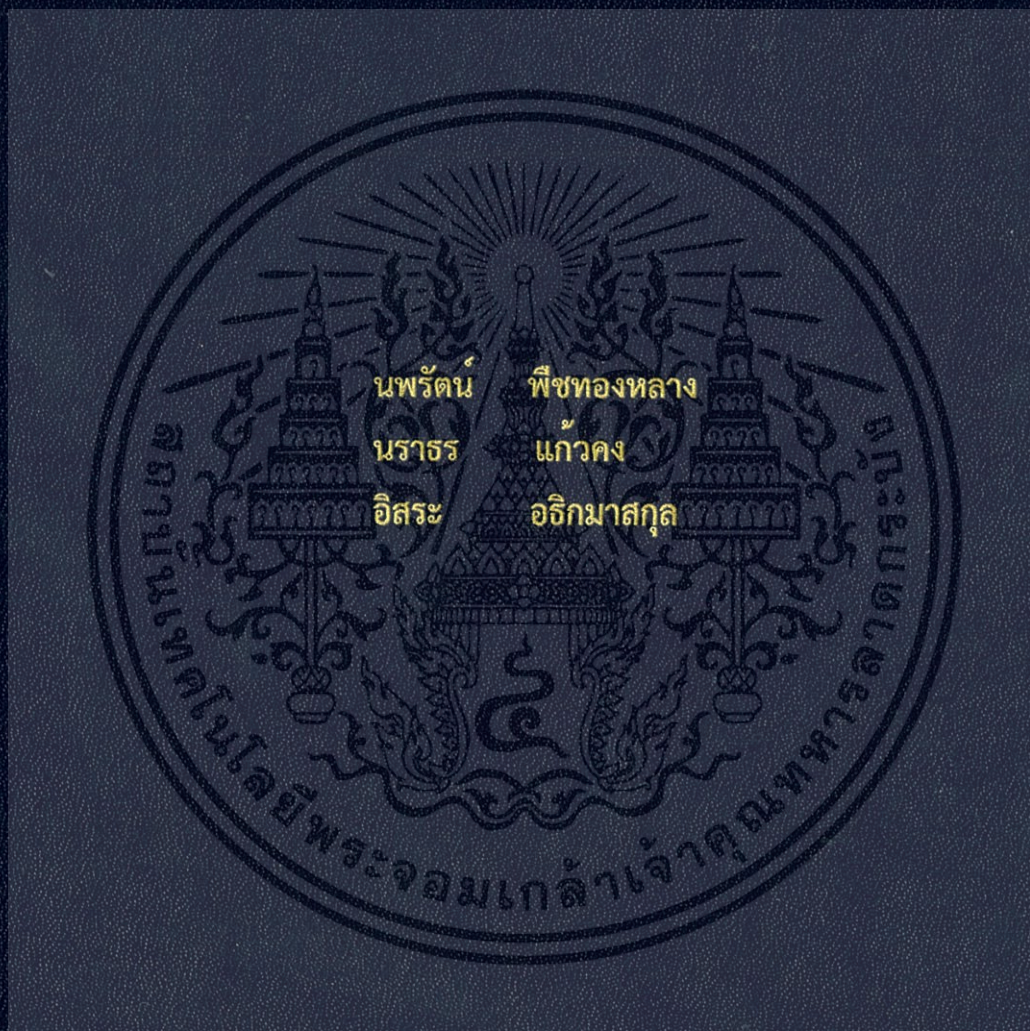


การอบแห้งข้าวกล้องงอกด้วยเทคนิคการอบแห้งแบบอินฟราเรดร่วมกับลมร้อน
Germinated Brown Rice Drying using the Hot Air-Assisted Infrared Drying



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิศวกรรมเกษตร
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2557

การอบแห้งข้าวกล้องงอกด้วยเทคนิคการอบแห้งแบบอินฟราเรดร่วมกับลมร้อน
Germinated Brown Rice Drying using the Hot Air-Assisted Infrared Drying



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิศวกรรมเกษตร
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2557

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Germinated Brown Rice Drying using the Hot Air-Assisted Infrared Drying



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILMENT
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 2014

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญานิพนธ์ปีการศึกษา 2557
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองปริญญานิพนธ์

หัวข้อปริญญานิพนธ์ การอบแห้งข้าวกล้องงอกด้วยเทคนิคการอบแห้งแบบอินฟราเรด
ร่วมกับลมร้อน
Germinated Brown Rice Drying using the Hot Air-Assisted
Infrared Drying

นักศึกษาผู้จัดทำ นพรัตน์ พีชทองกลาง 54010661
นราธร แก้วคง 54010670
อิสระ อธิกมาสกุล 54011567

ปริญญญา วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมเกษตร)

หลักสูตร วิศวกรรมเกษตร

สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล

ปีการศึกษา 2557

อาจารย์ผู้ควบคุมปริญญานิพนธ์	ลายมือชื่อ
ดร.จิราพร ศรีภิญโญวนิชย์ จงยิ่งเจริญ	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อปริญญานิพนธ์	การอบแห้งข้าวกล้องงอกด้วยเทคนิคการอบแห้งแบบอินฟราเรดร่วมกับลมร้อน	
นักศึกษาผู้จัดทำ	นพรัตน์ พีชทองกลาง	54010661
	นราธร แก้วคง	54010670
	อิสระ อธิกมาสกุล	54011567
อาจารย์ที่ปรึกษา	ดร.จิราพร ศรีภิญโญวณิชย์ จงยิ่งเจริญ	
ปีการศึกษา	2557	

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการอบแห้งข้าวกล้องงอกด้วยวิธีการอบแห้งแบบอินฟราเรดร่วมกับลมร้อน (hot air-assisted infrared drying, HA-IR) โดยเปรียบเทียบกับวิธีการอบแห้งแบบลมร้อน (hot air drying, HA) การอบแห้งแบบ HA-IR ใช้อุณหภูมิลมร้อน 45°C และกำลังไฟฟ้าของหลอดรังสีอินฟราเรด 700, 1,000 และ 1,600 W และการอบแห้งแบบ HA ใช้อุณหภูมิ 40, 60, 80 และ 100°C ข้าวกล้องงอกมีความชื้นเริ่มต้น 30-35%wb ถูกอบแห้งจนมีความชื้นสุดท้ายเป็น 10-13%wb การอบแห้งแบบ HA-IR ที่ 700, 1,000 และ 1,600 W ใช้เวลาในการอบแห้ง 25, 18 และ 16 นาที และมีอัตราการอบแห้งสูงสุด 0.0147 ± 0.0004 , 0.0159 ± 0.0013 และ 0.0250 ± 0.0034 g/g dry matter•min ตามลำดับ ในขณะที่การอบแห้งแบบ HA ที่ 40, 60, 80 และ 100°C ใช้เวลาในการอบแห้ง 420, 180, 120 และ 80 นาที และมีอัตราการอบแห้งสูงสุด 0.0009 ± 0.0001 , 0.0031 ± 0.0001 , 0.0044 ± 0.0001 และ 0.0048 ± 0.0005 g/g dry matter•min ตามลำดับ แบบจำลองการอบแห้งที่เหมาะสมสำหรับการอบแห้งข้าวกล้องงอกทั้งแบบ HA-IR และ HA คือ แบบจำลอง Page พลังงานจำเพาะสำหรับการอบแห้งแบบ HA-IR คือ 12.59, 9.72 และ 14.23 kJ/kg water ตามลำดับ ในขณะที่การอบแห้งแบบ HA ใช้พลังงานจำเพาะ 66.68, 68.47, 65.32 และ 63.43 kJ/kg water ในด้านคุณภาพ ข้าวกล้องงอกที่อบแห้งแบบ HA-IR มีความสามารถในการดูดซับน้ำดีกว่าข้าวกล้องงอกที่อบแห้งแบบ HA เมื่อหุงสุกความแข็งและความเหนียวของข้าวกล้องงอกที่ไม่ผ่านการเพาะงอกมีค่ามากที่สุดคือ 40.61 และ 12.07 N ตามลำดับ ในขณะที่ข้าวกล้องงอกมีความแข็งและความเหนียวอยู่ในช่วง 20.71-30.36 N และ 8.47-10.15 N ตามลำดับ ข้าวกล้องงอกที่อบแห้งแบบ HA-IR มีปริมาณสารกาบาอยู่ในช่วง 16.68-16.77 mg/100g ซึ่งสูงกว่าข้าวกล้องงอกที่อบแห้งแบบ HA ที่มีปริมาณสารกาบาอยู่ในช่วง 15.32-16.16 mg/100g อย่างมีนัยสำคัญ แต่ยังคงมีค่าต่ำกว่าข้าวกล้องงอกตัวอย่างมาตรฐานที่มีปริมาณสารกาบา 17.75 mg/100g

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis Title	Germinated Brown Rice Drying using the Hot Air-Assisted Infrared Drying
Authors	Noparat Puedthonglang Naraton Kaewkhong Itsara Atikamasakul
Thesis Advisor	Jiraporn Sripinyowanich Jongyingcharoen, Ph.D.
Year	2014

Abstract

The purpose of this research was to study on germinated brown rice (GBR) drying using hot air-assisted infrared drying (HA-IR) and compare this drying technique with conventional hot air drying (HA). HA-IR drying was conducted at a hot air temperature of 45°C and powers of infrared lamp of 700, 1,000 and 1,600 W while HA drying was conducted at 40, 60, 80 and 100°C. During drying, GBR with an initial moisture content of 30-35%wb was dried to reach the final moisture content of 10-13%wb. The results showed that HA-IR drying at 700, 1,000 and 1,600 W took 25, 18 and 16 min and provided maximum drying rate of 0.0147 ± 0.0004 , 0.0159 ± 0.0013 and 0.0250 ± 0.0034 g/g dry matter•min, respectively. For HA drying at 40, 60, 80 and 100°C, the drying times were 420, 180, 120 and 80 min and the maximum drying rate were 0.0009 ± 0.0001 , 0.0031 ± 0.0001 , 0.0044 ± 0.0001 and 0.0048 ± 0.0005 g/g dry matter•min, respectively. The most suitable drying models for GBR drying were Page models for both HA-IR and HA drying. In terms of energy consumption, Specific energies were 12.59, 9.72 and 14.23 kJ/kg water for HA-IR drying at 700, 1,000 and 1,600 W respectively, while HA drying used at 40, 60, 80 and 100°C the specific energy of 66.68, 68.47, 65.32 and 63.43 kJ/kg water, respectively. From quality evaluation, HA-IR-dried GBR had higher water absorbability than HA-dried GBR. When cooking, the highest hardness and stickiness of 40.60 and 12.07 N were obtained from normal brown rice. The hardness and stickiness of GBR were in the ranges of 20.71-30.36 and 8.47-10.15 N, respectively. HA-IR-dried GBR had GABA content in the range of 16.68-16.77 mg/100g, which was significantly than HA-dried GBR of which the GABA content was 15.32-16.16 mg/100g. However, the standard GBR rice still had the highest GABA content of 17.75 mg/100g.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้คงไม่อาจสำเร็จได้ด้วยดี หากไม่ได้รับความช่วยเหลือ และร่วมมือจากหลาย ๆ ฝ่ายด้วยกัน บุคคลแรกที่ต้องกล่าวถึงเพราะเป็นส่วนสำคัญที่ทำให้วิทยานิพนธ์นี้เสร็จลงได้ก็คือ ดร.จิราพร ศรีภิญโญวณิชย์ จงยิ่งเจริญ อาจารย์ที่ปรึกษาที่ให้ความเอาใจใส่ แนะนำ และช่วยเหลือเสมอมา ซึ่งต้องขอขอบพระคุณเป็นอย่างมาก

และต้องขอขอบพระคุณบุคคลสำคัญที่สุดที่ทำให้ข้าพเจ้ามีวันนี้ ก็คือ บิดา มารดา อันเป็นที่เคารพรักยิ่ง ซึ่งได้เลี้ยงดูผู้เขียนมาเป็นอย่างดี พร้อมทั้งให้โอกาสในการศึกษาอย่างเต็มที่ และยังให้กำลังใจ เอาใจใส่เสมอมา ในทุก ๆ ด้านอันหาที่เปรียบมิได้ ข้าพเจ้าขอระลึกในพระคุณอันสุดประมาณ และขอกราบขอบพระคุณมา ณ ที่นี้



นพรัตน์ พิษทองกลาง
นราธร แก้วคง
อิสระ อธิกมาสกุล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้าที่
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญตาราง	VI
สารบัญรูป	VII
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ที่มาและความสำคัญ	1
1.2 วัตถุประสงค์	2
1.3 ขอบเขตการศึกษา	2
1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ	2
1.5 ขั้นตอนการดำเนินงาน	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 ขี้วกล่องงอก	4
2.2 กระบวนการผลิตขี้วกล่องงอกจากขี้วกล่อง	4
2.3 กลไกการเกิดสารสำคัญในขี้วกล่องงอกและคุณประโยชน์ของขี้วกล่องงอก	5
2.4 ทฤษฎีรังสีอินฟราเรด	7
2.5 ทฤษฎีการอบแห้ง	8
2.6 การอบแห้งขี้วกล่องงอก	9
2.7 การอบแห้งวัสดุทางการเกษตรด้วยรังสีอินฟราเรด	10
บทที่ 3 การดำเนินงานวิจัย	13
3.1 ตัวอย่างที่ใช้ในการทดลอง	13
3.1.1 ตัวอย่างขี้วกล่อง	13
3.1.2 การเตรียมตัวอย่างขี้วกล่องงอก	13
3.2 การทดลองการอบแห้ง	15
3.3 การวิเคราะห์ปริมาณความชื้นของขี้วกล่องงอกและการวิเคราะห์ข้อมูลการอบแห้ง	16
3.4 การสร้างแบบจำลองการอบแห้ง	17
3.5 การวิเคราะห์คุณภาพของขี้วกล่องงอกอบแห้ง	18
3.5.1 เวลาที่เหมาะสมสำหรับการหุง	18
3.5.2 การดูดซับน้ำของขี้วกล่องงอก	19
3.5.3 การวิเคราะห์ปริมาณสารกาบา	19
3.5.4 การเตรียมขี้วกล่องงอกหุงสุก	19
3.5.5 การวิเคราะห์ความแข็งและความเหนียวของขี้วกล่องงอก	19
3.6 การวิเคราะห์พลังงานที่ใช้ในการอบแห้ง	20
3.7 การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ	20

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้าที่
บทที่ 4 ผลการทดลอง	21
4.1 ลักษณะการอบแห้งของข้าวกล้องงอกด้วยวิธีการอบแห้งแบบลมร้อน	21
4.2 ลักษณะการอบแห้งของข้าวกล้องงอกด้วยวิธีการอบแห้งแบบอินฟราเรดร่วมกับลมร้อน	24
4.3 การเปรียบเทียบลักษณะการอบแห้งของข้าวกล้องงอกด้วยวิธีการอบแห้งแบบลมร้อนและวิธีการอบแห้งแบบอินฟราเรดร่วมกับลมร้อน	27
4.4 การเปรียบเทียบคุณภาพของข้าวกล้องงอกที่อบแห้งด้วยวิธีการอบแห้งแบบลมร้อนและวิธีการอบแห้งแบบอินฟราเรดร่วมกับลมร้อน	28
4.4.1 เวลาที่เหมาะสมสำหรับการหุงข้าวและปริมาณการดูดซับน้ำของข้าวกล้องงอก	28
4.4.2 ปริมาณสารกาบาของข้าวกล้องงอก	29
4.4.3 ความแข็งและความเหนียวของข้าวกล้องงอกหุงสุก	30
4.5 แบบจำลองการอบแห้งของการอบแห้งของข้าวกล้องงอกด้วยวิธีการอบแห้งแบบลมร้อนและวิธีการอบแห้งแบบอินฟราเรดร่วมกับลมร้อน	31
4.6 พลังงานที่ใช้ในการอบแห้งข้าวกล้องงอกด้วยวิธีการอบแห้งแบบลมร้อนและวิธีการอบแห้งแบบอินฟราเรดร่วมกับลมร้อน	34
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง	36
เอกสารอ้างอิง	37
ภาคผนวก	38

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

	หน้าที่	
ตารางที่ 2.1	ปริมาณสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพของข้าวกล้องและข้าวกล้องงอกพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 ที่ผ่านการอบแห้งแบบถาดด้วยอุณหภูมิและเวลาต่างๆ	9
ตารางที่ 2.2	ปริมาณสารสำคัญในใบชาเขียวที่ผ่านกระบวนการทดลอง 4 กระบวนการ	10
ตารางที่ 3.1	แบบจำลองการอบแห้งที่ใช้ในการศึกษานี้	18
ตารางที่ 4.1	ระยะเวลาที่เหมาะสมในการอบแห้งและอัตราการอบแห้งสูงสุดของแต่ละอุณหภูมิอบแห้งที่ใช้ในการอบแห้งข้าวกล้องงอกด้วยวิธีการอบแห้งแบบ HA	21
ตารางที่ 4.2	ระยะเวลาที่เหมาะสมในการอบแห้งและอัตราการอบแห้งสูงสุดของแต่ละอุณหภูมิอบแห้งที่ใช้ในการอบแห้งข้าวกล้องงอกด้วยวิธีการอบแห้งแบบ HA-IR	24
ตารางที่ 4.3	ระยะเวลาที่เหมาะสมในการอบแห้งอัตราการอบแห้งสูงสุดและอุณหภูมิสุดท้ายของข้าวกล้องงอระหว่างการอบแห้งแบบ HA และการอบแห้งแบบ HA-IR ที่สภาวะต่างๆ	27
ตารางที่ 4.4	เวลาที่เหมาะสมสำหรับการหุงข้าวและปริมาณการดูดซับน้ำของตัวอย่างข้าว	28
ตารางที่ 4.5	ปริมาณสารคาบาในข้าวกล้องงอกที่สภาวะการอบแห้งและข้าวกล้องงอกที่ไม่ผ่านกระบวนการอบและข้าวกล้องธรรมดาที่ไม่ผ่านการเพาะ	29
ตารางที่ 4.6	ความแข็งและความเหนียวของข้าวกล้องงอกหุงสุกที่สภาวะต่างๆ	30
ตารางที่ 4.7	ค่าคงที่และสัมประสิทธิ์และ R^2 และ RMSE ของแบบจำลองการอบแห้งที่ใช้ในการทำนายข้อมูลการอบแห้งด้วยวิธีการอบแห้งแบบลมร้อนและวิธีการอบแห้งแบบอินฟราเรดร่วมกับลมร้อน	32
ตารางที่ ก.1	ระยะเวลาในการดำเนินงานวิจัยในแต่ละขั้นตอนขั้นตอนการดำเนินงาน	39

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

	หน้าที่	
รูปที่ 2.1	ข้าวกล้องงอก	4
รูปที่ 2.2	การเปลี่ยนแปลงของยอดอ่อนของข้าวกล้องงอกที่ผ่านการเพาะงอกที่เวลาต่างๆ	5
รูปที่ 2.3	ส่วนประกอบของข้าวกล้อง	5
รูปที่ 2.4	โครงสร้างโมเลกุลของสารกาบาแบบ 2 มิติ และ 3 มิติ	6
รูปที่ 2.5	ช่วงความยาวคลื่นของรังสี	7
รูปที่ 2.6	แผนผังการทดลองอบแห้งใบชาเขียว	10
รูปที่ 2.7	เส้นโค้งการอบแห้งขนุนด้วย (ก) รังสีอินฟราเรดอย่างเดียว และ (ข) รังสีอินฟราเรดร่วมกับลมร้อน	11
รูปที่ 2.8	เส้นโค้งการอบแห้งใบเตยด้วย (ก) รังสีอินฟราเรด 1,000 W ร่วมกับลมร้อน (ข) รังสีอินฟราเรด 500 W ร่วมกับลมร้อนและ (ค) ลมร้อนอย่างเดียว	12
รูปที่ 3.1	ขั้นตอนการเพาะงอกข้าวกล้อง	14
รูปที่ 3.2	การทดลองการอบแห้ง	15
รูปที่ 3.3	เมล็ดข้าวกล้องงอกที่กดด้วยแผ่นกระจกใส	18
รูปที่ 3.4	การหุงข้าวกล้องงอกในปิกเกอร์	19
รูปที่ 3.5	การตั้งค่าสำหรับการทดสอบความแข็งและความเหนียวด้วยวิธีการทดสอบแบบ back extrusion	20
รูปที่ 4.1	ความสัมพันธ์ของความชื้นกับเวลาอบแห้งจากการอบแห้งข้าวกล้องงอกด้วยวิธีการอบแห้งแบบ HA ที่อุณหภูมิต่างๆ	22
รูปที่ 4.2	เส้นโค้งการอบแห้งข้าวกล้องงอกด้วยวิธีการอบแห้งแบบ HA ที่อุณหภูมิต่างๆ	22
รูปที่ 4.3	ความสัมพันธ์ของอุณหภูมิวัสดุกับเวลาอบแห้งจากการอบแห้งข้าวกล้องงอกด้วยวิธีการอบแห้งแบบ HA	23
รูปที่ 4.4	ความสัมพันธ์ของความชื้นกับเวลาอบแห้งจากการอบแห้งข้าวกล้องงอกด้วยวิธีการอบแห้งแบบ HA-IR ที่กำลังไฟฟ้าต่างๆ	25
รูปที่ 4.5	เส้นโค้งการอบแห้งข้าวกล้องงอกด้วยวิธีการอบแห้งแบบ HA-IR ที่กำลังไฟฟ้าต่างๆ	25
รูปที่ 4.6	ความสัมพันธ์ของอุณหภูมิวัสดุกับเวลาอบแห้งจากการอบแห้งแบบ HA-IR ที่กำลังไฟฟ้าต่างๆ	26
รูปที่ 4.7	เส้นโค้งการอบแห้งจากข้อมูลการทดลอง (จุดข้อมูล) และจากข้อมูลการทำนายจากแบบจำลอง Page (เส้นกราฟ) สำหรับการอบแห้งข้าวกล้องงอกด้วยวิธีการการอบแห้งแบบ HA	33
รูปที่ 4.8	เส้นโค้งการอบแห้งจากข้อมูลการทดลอง (จุดข้อมูล) และจากข้อมูลการทำนายจากแบบจำลอง Page (เส้นกราฟ) สำหรับการอบแห้งข้าวกล้องงอกด้วยวิธีการการอบแห้งแบบ HA-IR	33
รูปที่ 4.9	กราฟแท่งเปรียบเทียบพลังงานที่ใช้ในการอบแห้งทั้งหมดที่สภาวะต่างๆ	34
รูปที่ 4.10	กราฟแท่งเปรียบเทียบพลังงานจำเพาะที่ใช้ในการอบแห้งที่สภาวะต่างๆ	35
รูปที่ ข.1	เครื่องทดสอบความแข็งและความเหนียวของข้าวหุงสุก (Texture Analyzer)	40

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ ข.2 ขั้นตอนการใช้โปรแกรมทดสอบความแข็ง (Texture exponent)

หน้าที่

41



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.1 ที่มาและความสำคัญ

ข้าวเป็นผลผลิตทางการเกษตรที่มีความสำคัญและมีคุณประโยชน์ต่อชีวิตและความเป็นอยู่ของมนุษย์นับแต่อดีตถึงปัจจุบัน ในปัจจุบันผู้คนเลือกที่จะบริโภคอาหารเพื่อสุขภาพ มีความตื่นตัวต่อการรับประทานอาหารและการดำเนินชีวิตที่ดีมากขึ้น ข้าวกล้องงอกจึงเป็นผลิตภัณฑ์ทางเลือกที่ตอบสนองความต้องการของผู้บริโภค ข้าวกล้องงอกมีสารสำคัญ คือ สารกาบา (gamma-amino butyric acid, GABA) สารกาบาเป็นกรดอะมิโนที่ผลิตจากกระบวนการ decarboxylation ของกรดกลูตามิก (glutamic acid) มีบทบาทสำคัญในการทำหน้าที่เป็นสารสื่อประสาท (neurotransmitter) ในระบบประสาทส่วนกลาง ถือเป็นสารสื่อประสาทประเภทสารยับยั้ง (inhibitor) โดยทำหน้าที่รักษาสมดุลในสมอง ซึ่งช่วยให้สมองเกิดการผ่อนคลายและนอนหลับสบาย อีกทั้งยังทำหน้าที่ช่วยกระตุ้นต่อมไร้ท่อ (anterior pituitary) ซึ่งทำหน้าที่ผลิตฮอร์โมนที่ช่วยในการเจริญเติบโต (HGH) ทำให้เกิดการสร้างเนื้อเยื่อ ทำให้กล้ามเนื้อเกิดความกระชับ และเกิดสารไลโปโทรปิก (lipotropic) ซึ่งเป็นสารป้องกันการสะสมไขมัน ข้าวกล้องงอกยังให้ปริมาณสารอาหารอื่นๆ สูง เช่น ฟอสฟอรัส แคลเซียม ทองแดง เป็นต้น ในด้านของคุณภาพการรับประทาน ข้าวกล้องงอกที่หุงสุกมีเนื้อสัมผัสที่อ่อนนุ่มอร่อยกว่าข้าวกล้องธรรมดา [1]

กระบวนการเพาะข้าวกล้องงอกประกอบด้วยขั้นตอนหลักๆ คือ การแช่ การบ่ม และการอบแห้ง ซึ่งวิธีการอบแห้งที่ใช้กันตามปกติ คือ วิธีการอบแห้งแบบลมร้อน ทั้งนี้มีงานวิจัยบางงานรายงานผลว่าการอบแห้งแบบลมร้อนทำให้ปริมาณสารกาบาในข้าวกล้องงอกลดลงจากข้าวกล้องงอกก่อนอบแห้งมีปริมาณสารกาบา 22.1 g เมื่ออบแห้งแล้วปริมาณสารกาบาเหลือเพียง 8.1 g [2] ในขณะที่งานวิจัยเกี่ยวกับการอบแห้งวัสดุทางการเกษตรด้วยรังสีอินฟราเรด มีผลการวิจัยยืนยันว่ารังสีอินฟราเรดสามารถช่วยรักษาสารสำคัญในวัสดุอบแห้งได้ จากงานวิจัยเกี่ยวกับการอบแห้งชาเขียวโดยใช้รังสีอินฟราเรดพบว่าปริมาณสารฟีนอลิก (TPC) เพิ่มขึ้นจาก 116.30 mg/g เป็น 171.77 mg/g เมื่อผ่านการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด [3]

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงสนใจใช้เทคนิคการอบแห้งแบบอินฟราเรดร่วมกับลมร้อน (hot air-infrared drying, HA-IR) ในการอบแห้งข้าวกล้องงอก โดยมีสมมุติฐานว่าวิธีการอบแห้งดังกล่าวทำให้สูญเสียปริมาณสารกาบาน้อยที่สุด โดยทำการเปรียบเทียบผลการทดลองกับวิธีการอบแห้งที่ใช้ตามปกติ คือ วิธีการอบแห้งแบบลมร้อน (hot air drying, HA) นอกจากนี้ ยังมีการเปรียบเทียบข้อมูลเชิงคุณภาพในด้านอื่นๆ รวมถึงพลังงานที่ใช้ในการอบแห้งด้วย อีกทั้งงานวิจัยนี้ยังแสดงแบบจำลองการอบแห้งสำหรับการอบแห้งข้าวกล้องงอกด้วยวิธีการอบแห้งแบบ HA-IR และ HA ด้วย

1.2 วัตถุประสงค์

- 1.2.1 เพื่อศึกษาอิทธิพลของวิธีการอบแห้งและสภาวะในการอบแห้งต่อปริมาณสารกาบาและคุณภาพของข้าวกล้องงอก
- 1.2.2 เพื่อสร้างแบบจำลองการอบแห้งข้าวกล้องงอกด้วยเทคนิคการอบแห้งแบบ HA-IR และ HA
- 1.2.3 เพื่อเปรียบเทียบพลังงานที่ใช้ในการอบแห้งข้าวกล้องงอกด้วยวิธีการอบแห้งแบบ HA-IR และ HA

1.3 ขอบเขตการศึกษา

- 1.3.1 ตัวอย่างที่ศึกษาคือ ข้าวกล้องพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105
- 1.3.2 เครื่องอบแห้งที่ใช้ในการทดลองเป็นเครื่องขนาดห้องปฏิบัติการ

1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.4.1 ได้ทราบถึงอิทธิพลของการอบแห้งแบบ HA-IR และ HA ต่อปริมาณสารกาบา และคุณภาพของข้าวกล้องงอก
- 1.4.2 ได้แบบจำลองการอบแห้งข้าวกล้องงอกด้วยเทคนิคการอบแห้งแบบ HA-IR และ HA

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.5 ขั้นตอนการดำเนินงาน

- 1.5.1 ทำการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้อง โดยมุ่งเน้นงานวิจัยเกี่ยวกับการผลิตและการอบแห้ง ข้าวกล้องงอกและงานวิจัยเกี่ยวกับการอบแห้งวัสดุด้วยวิธีการอบแห้งแบบอินฟราเรด ร่วมกับลมร้อนและจัดทำข้อเสนอโครงการ
- 1.5.2 ทำการทดลองเบื้องต้น โดยการทดลองผลิตข้าวกล้องงอกตามสภาวะที่เหมาะสมที่ได้เคยมีผู้ศึกษามาก่อน นั่นคือ การแช่อุณหภูมิ 35°C เป็นเวลา 4 ชั่วโมงและการบ่มที่อุณหภูมิ 35°C เป็นเวลา 20 ชั่วโมง
- 1.5.3 ทำการทดลองอบแห้งข้าวกล้องงอกด้วยวิธีการอบแห้งแบบ HA ลักษณะการอบแห้งโดยใช้อุณหภูมิของลมร้อน คือ 40, 60, 80 และ 100°C และเก็บข้อมูล
- 1.5.4 ทำการทดลองอบแห้งข้าวกล้องงอกด้วยวิธีการอบแห้งแบบ HA-IR ลักษณะการอบแห้งโดยใช้อุณหภูมิ 45°C และกำลังของหลอดรังสีอินฟราเรด คือ 700, 1,000 และ 1,600 W และเก็บข้อมูลลักษณะการอบแห้ง
- 1.5.5 นำข้อมูลมาวิเคราะห์และสร้างแบบจำลองการอบแห้งเพื่อหาแบบจำลองการอบแห้งที่เหมาะสม โดยแบบจำลองที่นำมาใช้ในการศึกษานี้ คือ Lewis, Page, Henderson and Pabis และ Logarithmic
- 1.5.6 วิเคราะห์คุณภาพของข้าวกล้องงอกในด้านการหุงสุกและการรับประทาน โดยค่าคุณภาพที่ทำการวิเคราะห์ประกอบด้วย เวลาที่เหมาะสมสำหรับการหุงข้าวกล้องงอก ปริมาณการดูดซับน้ำของข้าวกล้องงอก ความแข็งและความเหนียวของข้าวหุงสุก และวิเคราะห์ปริมาณสารกาบา
- 1.5.7 สรุปผลการทดลองและเขียนรายงานการวิจัย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ข้าวกล้องงอก

ข้าวกล้องงอก (รูปที่ 2.1) คือ ข้าวกล้องที่ผ่านกระบวนการเพาะงอกจนมียอดอ่อนงอกออกมา ประมาณ 1-2 mm ในกระบวนการเพาะงอกข้าวกล้องโดยปกติแล้วจะนำข้าวกล้องที่ผ่านการสีมาแล้วไม่เกิน 2 สัปดาห์มาแช่น้ำ โดยการควบคุมอุณหภูมิ ควบคุมความชื้น ควบคุมการไหลเวียนของน้ำ ควบคุมความดัน และควบคุมความเป็นกรดต่าง เป็นระยะเวลา 48-72 ชั่วโมง ส่งผลให้ข้าวกล้องงอกมีสารอาหารเพิ่มขึ้น โดยเฉพาะสารกาบา [1]



รูปที่ 2.1 ข้าวกล้องงอก [1]

2.2 กระบวนการผลิตข้าวกล้องงอกจากข้าวกล้อง

กระบวนการทั่วไปสำหรับการผลิตข้าวกล้องงอกโดยใช้วัตถุดิบตั้งต้นจากข้าวกล้องประกอบไปด้วยขั้นตอนดังต่อไปนี้

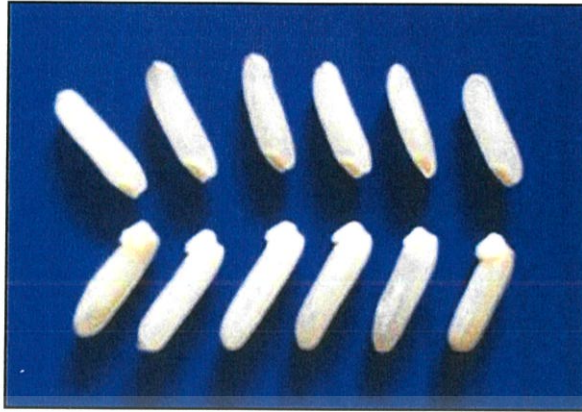
(1) นำข้าวกล้องที่ได้จากการกะเทาะเปลือกด้วยเครื่องสีข้าวแบบลูกกลิ้ง คัดแยกสิ่งแปลกปลอม เมล็ดที่หัดออก แล้วนำมาล้างน้ำสะอาด 2 ครั้ง

(2) นำข้าวกล้องแช่ลงในภาชนะพลาสติก โดยให้น้ำท่วมสูงกว่าข้าวกล้องประมาณ 2 นิ้ว ที่อุณหภูมิ 35°C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง

(3) นำข้าวกล้องงอกที่ผ่านการแช่น้ำมาห่อด้วยผ้าขาวบางเพื่อรักษาความชื้น แล้วนำเข้าตู้ตูบ่มที่อุณหภูมิ 35°C เป็นเวลา 20 ชั่วโมง โดยทำความสะอาดผ้าขาวบางทุกๆ 4 ชั่วโมง เพื่อความสะอาด จากนั้นข้าวกล้องจะมียอดอ่อนยาวประมาณ 1-2 mm รูปที่ 2.2 แสดงยอดอ่อนของข้าวกล้องที่ระยะเวลาในการเพาะงอกต่างๆ

(4) นำข้าวกล้องที่บ่มเสร็จแล้ว มาทำการอบแห้งลดความชื้น เพื่อยืดระยะเวลาการเก็บรักษาให้นาน โดยความชื้นของข้าวกล้องงอกควรประมาณ 10-13% [4]

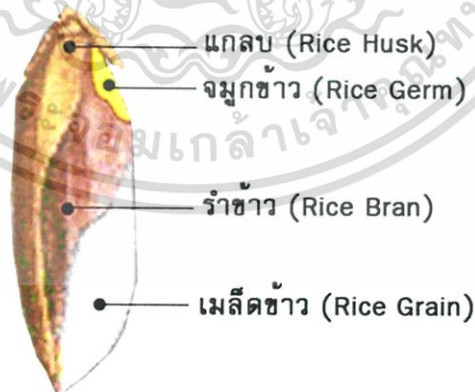
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.2 การเปลี่ยนแปลงของยอดอ่อนของข้าวกล้องงอกที่ผ่านการเพาะงอกที่เวลาต่างๆ [4]

2.3 กลไกการเกิดสารสำคัญในข้าวกล้องงอกและคุณประโยชน์ของข้าวกล้องงอก

เมล็ดข้าวประกอบด้วยเปลือกหุ้มเมล็ดหรือแกลบ (hull หรือ husk) จมูกข้าวหรือคัพพะ (germ หรือ embryo) รำข้าว (เยื่อหุ้มเมล็ด, bran) และเมล็ดข้าวขาวหรือเมล็ดข้าวสาร (grain) ดังรูปที่ 2.3 สารอาหารในเมล็ดข้าวประกอบด้วยคาร์โบไฮเดรตเป็นส่วนประกอบหลัก โดยมีโปรตีน วิตามินบี วิตามินอีและแร่ธาตุที่แยกไปอยู่ในส่วนต่างๆ ของเมล็ดข้าว นอกจากนี้ ยังพบสารอาหารประเภทไขมันซึ่งพบได้ในรำข้าวเป็นส่วนใหญ่ [5]



รูปที่ 2.3 ส่วนประกอบของข้าวกล้อง [5]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้าวเมื่ออยู่ในสภาวะที่มีการเจริญเติบโตจะมีการเปลี่ยนแปลงทางชีวเคมี การเปลี่ยนแปลงจะเริ่มขึ้นเมื่อน้ำได้แทรกเข้าไปในเมล็ดข้าว โดยจะกระตุ้นให้เอนไซม์ภายในเมล็ดข้าวเกิดการทํางาน เมื่อเมล็ดข้าวเริ่มงอก (malting) สารอาหารที่ถูกเก็บไว้ในเมล็ดข้าวก็จะถูกย่อยสลายไปตามกระบวนการทางชีวเคมีจนเกิดเป็นสารประเภทคาร์โบไฮเดรตที่มีโมเลกุลเล็กกลอง (oligosaccharides) และน้ำตาลรีดิวซ์ (reducing sugar) นอกจากนี้ โปรตีนภายในเมล็ดข้าวก็จะถูกย่อยให้เกิดเป็นกรดอะมิโนและเปปไทด์ รวมทั้งยังพบการสะสมสารเคมีสำคัญต่าง ๆ เช่น แกมมาออริซานอล (gamma-orazynol) โทโคฟีรอล (tocopherol) โทโค ไตรีนอล (tocotrienol) และโดยเฉพาะสารกาบา (gamma-amino butyric, GABA) [4]

สารกาบา (รูปที่ 2.4) เป็นกรดอะมิโนที่ผลิตจากกระบวนการ decarboxylation ของกรดกลูตามิก (glutamic acid) กรดนี้จะมีบทบาทสำคัญในการทำหน้าที่เป็นสารสื่อประสาท (neurotransmitter) ในระบบประสาทส่วนกลาง นอกจากนี้ สารกาบายังถือเป็นสารสื่อประสาทประเภทสารยับยั้ง (inhibitor) โดยจะทำหน้าที่รักษาสมดุลในสมองที่ได้รับการกระตุ้นซึ่งช่วยทำให้สมองเกิดการผ่อนคลายและนอนหลับสบาย อีกทั้งยังทำหน้าที่ช่วยกระตุ้นต่อมไร้ท่อ (anterior pituitary) ซึ่งทำหน้าที่ผลิตฮอร์โมนที่ช่วยในการเจริญเติบโต (HGH) ทำให้เกิดการสร้างเนื้อเยื่อ ทำให้กล้ามเนื้อเกิดความกระชับและเกิดสารไลโปโทรปิก (lipotropic) ซึ่งเป็นสารป้องกันการสะสมไขมัน ในปัจจุบันมีการนำสารกาบามาใช้ในวงการแพทย์ เพื่อการรักษาโรคเกี่ยวกับระบบประสาทต่างๆ หลายโรค เช่น โรควิตกกังวล โรคนอนไม่หลับ โรคซึมเศร้า [6]



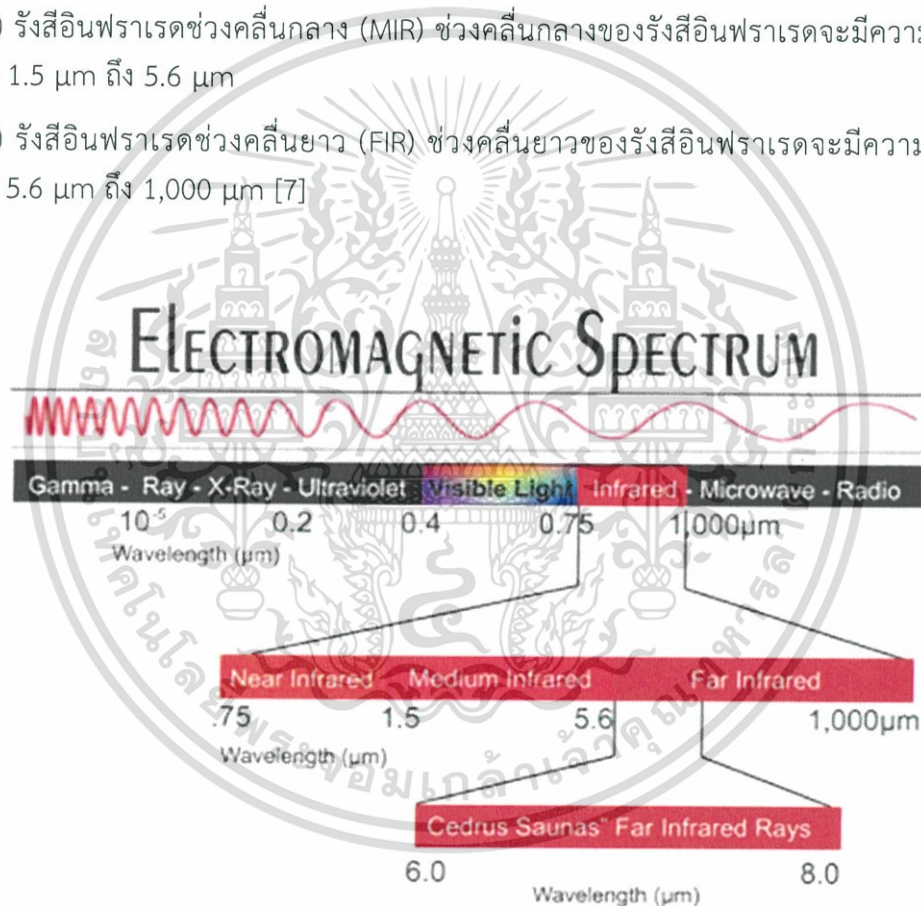
รูปที่ 2.4 โครงสร้างโมเลกุลของสารกาบาแบบ 2 มิติ และ 3 มิติ [6]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4 ทฤษฎีรังสีอินฟราเรด

รังสีอินฟราเรดหรือรังสีใต้แดง เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดหนึ่ง ถูกค้นพบโดยนักวิทยาศาสตร์ชาวอังกฤษ คือ Sir William Herschel ในปี ค.ศ. 1800 รังสีอินฟราเรดมีความถี่อยู่ระหว่าง 1011-1014 Hz และมีความยาวคลื่นระหว่าง 0.75 μm ถึง 1000 μm ดังรูป 2.5 สสารทุกชนิดที่มีอุณหภูมิอยู่ระหว่าง 200°C ถึง 4,000°C จะปล่อยรังสีอินฟราเรดออกมาจากตัวมันเองเสมอคุณสมบัติของรังสีอินฟราเรดขึ้นอยู่กับความถี่ นั่นคือยิ่งความถี่สูงมากขึ้น พลังงานก็สูงขึ้นด้วย ซึ่งความยาวคลื่นของรังสีอินฟราเรดมีการแบ่งออกเป็น 3 ช่วง ได้แก่

- (1) รังสีอินฟราเรดช่วงคลื่นสั้น (NIR) ช่วงคลื่นสั้นของรังสีอินฟราเรดจะมีความยาวคลื่นประมาณ 0.7 μm ถึง 1.5 μm
- (2) รังสีอินฟราเรดช่วงคลื่นกลาง (MIR) ช่วงคลื่นกลางของรังสีอินฟราเรดจะมีความยาวคลื่นประมาณ 1.5 μm ถึง 5.6 μm
- (3) รังสีอินฟราเรดช่วงคลื่นยาว (FIR) ช่วงคลื่นยาวของรังสีอินฟราเรดจะมีความยาวคลื่นประมาณ 5.6 μm ถึง 1,000 μm [7]



รูปที่ 2.5 ช่วงความยาวคลื่นของรังสี [7]

รังสีอินฟราเรดมีข้อดีหลายประการ ได้แก่ สามารถทำความร้อนและลดความร้อนได้อย่างรวดเร็ว โดยส่วนใหญ่ตู้อบไฟฟ้าที่ใช้รังสีอินฟราเรดสามารถทำความร้อนให้ผลิตภัณฑ์ได้ในเวลาไม่กี่วินาที ตู้มีขนาดเล็ก เนื่องจากให้ความร้อนที่รวดเร็ว ทำให้ต้องการพื้นที่วางในตู้น้อยลง และยังมีความสะดวก ไม่มีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม และยังใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5 ทฤษฎีการอบแห้ง

การอบแห้ง คือการถ่ายเทความร้อนไปยังวัตถุที่มีความชื้นเพื่อให้น้ำระเหยออกจากวัตถุ การอบแห้งส่วนมากจะใช้อากาศเป็นตัวกลางในการถ่ายเทความร้อนไปสู่วัตถุและเป็นตัวช่วยพาความชื้นออกไปจากวัตถุ เมื่อน้ำวัตถุเข้าไปอบแห้งจะเกิดการถ่ายเทความร้อนและเมื่อมีอุณหภูมิแตกต่างกันระหว่างแหล่งกำเนิดความร้อนและตัววัตถุ ทำให้เกิดการเคลื่อนย้ายของน้ำในอาหารในระหว่างการอบแห้งเมื่อวัสดุได้รับความร้อนน้ำที่อยู่ในวัสดุก็จะเคลื่อนตัวมาที่ผิวหน้าของวัตถุจากนั้นก็ระเหยกลายเป็นไอไปสู่บรรยากาศ โดยการถ่ายเทความร้อนมี 3 ชนิด คือ การนำความร้อน การพาความร้อน และการแผ่รังสีความร้อน ในการอบแห้งอาจใช้หลายวิธีรวมกันได้ [8]

(1) การนำความร้อน เป็นการถ่ายเทความร้อนโดยที่ตัวกลางไม่เคลื่อนที่ การนำความร้อนเป็นปรากฏการณ์ระดับอนุภาคของสสาร เมื่อได้รับความร้อนจะเกิดการสั่นและส่งต่อพลังงานกัน การนำความร้อนจึงเกิดขึ้นได้ในสสารทุกสถานะทั้งของแข็ง ของเหลว หรือก๊าซ ความสามารถในการนำความร้อนของสสารแต่ละชนิดจะมีค่าแตกต่างกัน พารามิเตอร์ที่ใช้อธิบายความสามารถดังกล่าวเรียกว่าค่าสภาพการนำความร้อน (Thermal conductivity, k) วัสดุที่มีค่า k สูงจะนำความร้อนได้ดี อาทิ เหล็ก ทองแดง อลูมิเนียม จึงนิยมนำเอามาใช้ทำภาชนะหุงต้มหรืออุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน ส่วนวัสดุที่มีค่า k ต่ำจะนำความร้อนได้น้อย อาทิ ใยแก้ว ยิปซัม จึงนิยมนำมาใช้ทำฉนวนกันความร้อน การถ่ายนำความร้อนสามารถหาได้จากสมการที่ 2.1 [9]

$$q = -kA \frac{dT}{dx} \quad (2.1)$$

โดยที่ k = ค่าสภาพการนำความร้อน (W/m.K)
 A = พื้นที่หน้าตัดขวาง (m^2)
 $\frac{dT}{dx}$ = อัตราการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในทิศทาง x (K/m)

(2) การพาความร้อน เป็นการถ่ายเทความร้อนโดยที่ตัวกลางเคลื่อนที่หรือไหลไปด้วย การพาความร้อนจึงเกิดขึ้นเฉพาะกับของเหลวหรือก๊าซเท่านั้น ความสามารถในการพาความร้อนขึ้นอยู่กับค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน (Convection heat transfer coefficient, h) ค่าอุณหภูมิแวดล้อมและขนาดพื้นที่ผิวของวัตถุที่มีการพาความร้อน โดยทั่วไปค่า h ขึ้นอยู่กับหลายพารามิเตอร์ อาทิ เร็วและสมบัติของตัวกลาง ซึ่งมักได้จากการทดลองเป็นรายกรณี ค่า h มากหมายถึงการพาความร้อนได้ดี ในทางกลับกันค่า h น้อยหมายถึงพาความร้อนได้ไม่ดี การพาความร้อนสามารถหาได้จากสมการที่ 2.2 [9]

$$q = hA(T_s - T_\infty) \quad (2.2)$$

โดยที่ h = สัมประสิทธิ์การพาความร้อน (W/ m^2 .K)
 T_s = อุณหภูมิพื้นผิวของผนังแข็ง
 T_∞ = อุณหภูมิของตัวกลางในการพาความร้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานภายในเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(3) การแผ่รังสีความร้อน เป็นการถ่ายเทความร้อนในรูปคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจึงไม่อาศัยตัวกลางในการส่งถ่ายความร้อน มักใช้การอบแห้งแบบรังสีและการอบแห้งแบบสุญญากาศ การแผ่รังสีความร้อนจะทำให้การแลกเปลี่ยนอุณหภูมิเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วมากขึ้นเมื่ออุณหภูมิมีความแตกต่างกันสูง โดยทั่วไปวัตถุยิ่งมีอุณหภูมิสูงจะยิ่งแผ่รังสีความร้อนได้มาก การถ่ายเทความร้อนด้วยการแผ่รังสีสามารถหาได้จากสมการที่ 2.3 [9]

$$q = \epsilon\sigma AT^4 \quad (2.3)$$

โดยที่ ϵ = ค่าสภาพการเปล่งรังสี โดย $\epsilon = 1$ สำหรับวัตถุดำ
 σ = ค่าคงที่ Stefan-Boltzmann ซึ่งเท่ากับ $5.6703 \times 10^{-8} \text{ (W/m}^2 \cdot \text{K}^4)$
 A = พื้นที่ผิวของวัตถุที่แผ่รังสี (m^2)
 T = อุณหภูมิสัมบูรณ์ของวัตถุ (K)

2.6 การอบแห้งข้าวกล้องงอก

จากการศึกษาอิทธิพลของการอบแห้งข้าวกล้องงอก พันธุ์ข้าวดอกมะลิ 105 ด้วยวิธีการอบแห้งแบบถาดตั้งตารางที่ 2.1 [10] พบว่าอุณหภูมิมีผลต่อปริมาณสารกาบา และ γ -tocopherol ในขณะที่เวลาในการอบแห้งไม่มีผลต่อสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพ และไม่มีอิทธิพลร่วมของอุณหภูมิแวดล้อมด้วย โดยผลการทดลองสรุปว่าข้าวกล้องงอกที่อบแห้งที่อุณหภูมิ 40°C เป็นเวลา 14 ชั่วโมง มีปริมาณสารกาบา 15.93 mg/100g และ γ -tocopherol $123.27 \text{ }\mu\text{g/100 g}$ ซึ่งสูงกว่าข้าวกล้องที่ผ่านสภาวะการอบแห้งอื่นๆ อย่างมีนัยสำคัญ

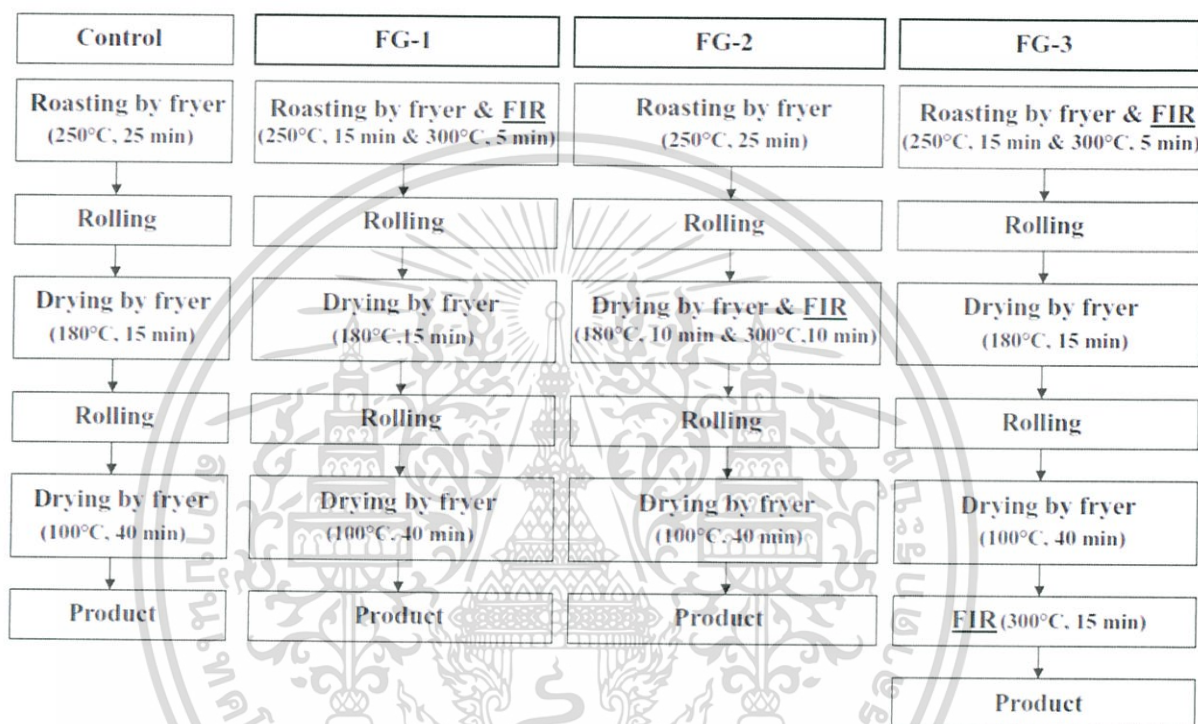
ตารางที่ 2.1 ปริมาณสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพของข้าวกล้องและข้าวกล้องงอกพันธุ์ข้าวดอกมะลิ 105 ที่ผ่านการอบแห้งแบบถาดด้วยอุณหภูมิและเวลาต่างๆ [10]

อุณหภูมิ ($^\circ\text{C}$)	เวลา (ชั่วโมง)	สารกาบา (mg/100g)	γ -tocopherol ($\mu\text{g/100g}$)
40 $^\circ\text{C}$	10	12.15 \pm 2.37	116.71 \pm 0.05
	12	15.52 \pm 3.08	110.21 \pm 0.12
	14	15.83 \pm 1.19 ^a	123.27 \pm 0.09 ^a
50 $^\circ\text{C}$	10	12.03 \pm 0.29	112.61 \pm 0.02
	12	12.01 \pm 2.45	92.73 \pm 0.05
	14	10.22 \pm 0.59 ^b	91.34 \pm 0.001 ^b
60 $^\circ\text{C}$	10	9.58 \pm 0.13	104.32 \pm 0.07
	12	8.51 \pm 1.74	99.04 \pm 0.03
	14	7.11 \pm 0.04 ^c	109.24 \pm 0.10 ^{ab}
ข้าวกล้อง		0.53 \pm 0.09	104.28 \pm 0.08

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.7 การอบแห้งวัสดุทางการเกษตรด้วยรังสีอินฟราเรด

จากงานวิจัยเรื่องอิทธิพลของความร้อนจากรังสีอินฟราเรดต่อสารสำคัญในใบชาเขียว โดยแบ่งตัวอย่างควบคุมเป็นตัวอย่างที่ใช้ในการทดลองเป็น 4 กลุ่มทดลอง และมีกระบวนการทดลองดังรูปที่ 2.6 และเมื่อนำตัวอย่างแต่ละตัวอย่างมาวิเคราะห์หาสารสำคัญดังตารางที่ 2.2 ได้แก่ สารต้านอนุมูลอิสระ (DPPH RSA), สารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด (TPC), สารประกอบฟลาโวนอยด์ (TFC) และกรดแอสคอร์บิก (AAC) จะเห็นได้ว่าตัวอย่าง FG-3 ซึ่งผ่านการให้ความร้อนด้วยรังสีอินฟราเรดในกระบวนการมากที่สุดจะมีค่าของสารสำคัญเพิ่มขึ้นมากที่สุด [11]



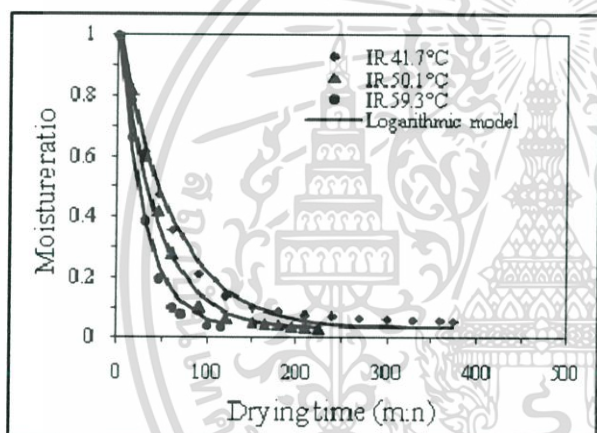
รูปที่ 2.6 แผนผังการทดลองอบแห้งใบชาเขียว [11]

ตารางที่ 2.2 ปริมาณสารสำคัญในใบชาเขียวที่ผ่านกระบวนการทดลอง 4 กระบวนการ [11]

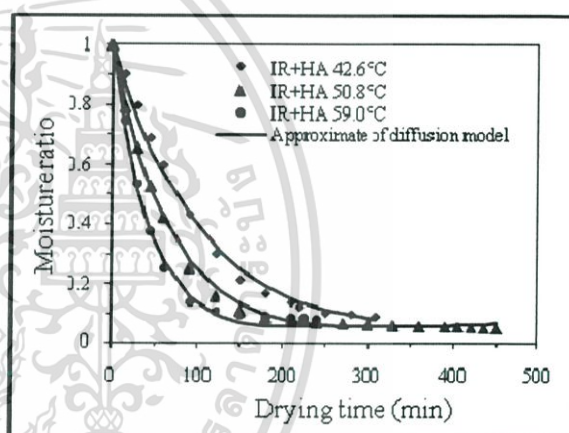
Processing method	Control	FG-1	FG-2	FG-3
DPPH RSA (%)	65.55 ^c	70.07 ^b	67.07 ^c	75.73 ^a
TPC (mg/g)	116.30 ^d	128.89 ^c	135.56 ^b	171.77 ^a
TFC (mg/g)	17.54 ^d	22.25 ^b	20.87 ^c	24.76 ^a
AAC (mg/g)	3.07 ^b	3.25 ^b	3.25 ^b	4.20 ^a

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากงานวิจัยเรื่อง การอบแห้งขนุนด้วยพลังงานความร้อนร่วมของรังสีอินฟราเรดและลมร้อน เพื่อศึกษาปัจจัยของสภาวะในการอบแห้งและคุณภาพของขนุนแห้งสายพันธุ์ทองประเสริฐด้วยสภาวะการทดลองอบแห้งที่แตกต่างกัน ได้แก่ การอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด การอบแห้งแบบรังสีอินฟราเรดร่วมกับลมร้อนและการอบแห้งด้วยลมร้อนอย่างเดียว โดยในทุกการทดลองที่อบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดจะใช้กำลังเท่ากับ 1,000 W สำหรับกรณีที่ใช้ลมร้อนจะใช้ความเร็วของอากาศเท่ากับ 1.1 m/s และทุกสภาวะของการอบแห้ง มีการทดลองอบแห้งขนุนในช่วงอุณหภูมิ 40-60°C โดยมีค่าความชื้นเริ่มต้นของขนุนอยู่ในช่วง 300-400%db และอบแห้งจนค่าความชื้นสุดท้ายของขนุนอยู่ในช่วง 12-19%db จากผลการทดลอง พบว่า อัตราการอบแห้งขนุนขึ้นอยู่กับอุณหภูมิอบแห้งอย่างมาก เมื่ออุณหภูมิในการอบแห้งสูงขึ้น อัตราการอบแห้งก็สูงขึ้นด้วย เมื่อพิจารณาแหล่งพลังงานที่ใช้ พบว่า การอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดมีอัตราการอบแห้งสูงกว่าการอบแห้งด้วยอินฟราเรดร่วมกับลมร้อน และการอบแห้งแบบลมร้อนอย่างเดียว นอกจากนี้ พบว่าการอบแห้งด้วยอุณหภูมิอบแห้งสูงจะมีความสิ้นเปลืองพลังงานต่ำกว่าการอบแห้งด้วยอุณหภูมิต่ำ [12] โดยเส้นโค้งการอบแห้งแสดงอยู่ในรูปที่ 2.7



(ก) อบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดอย่างเดียว

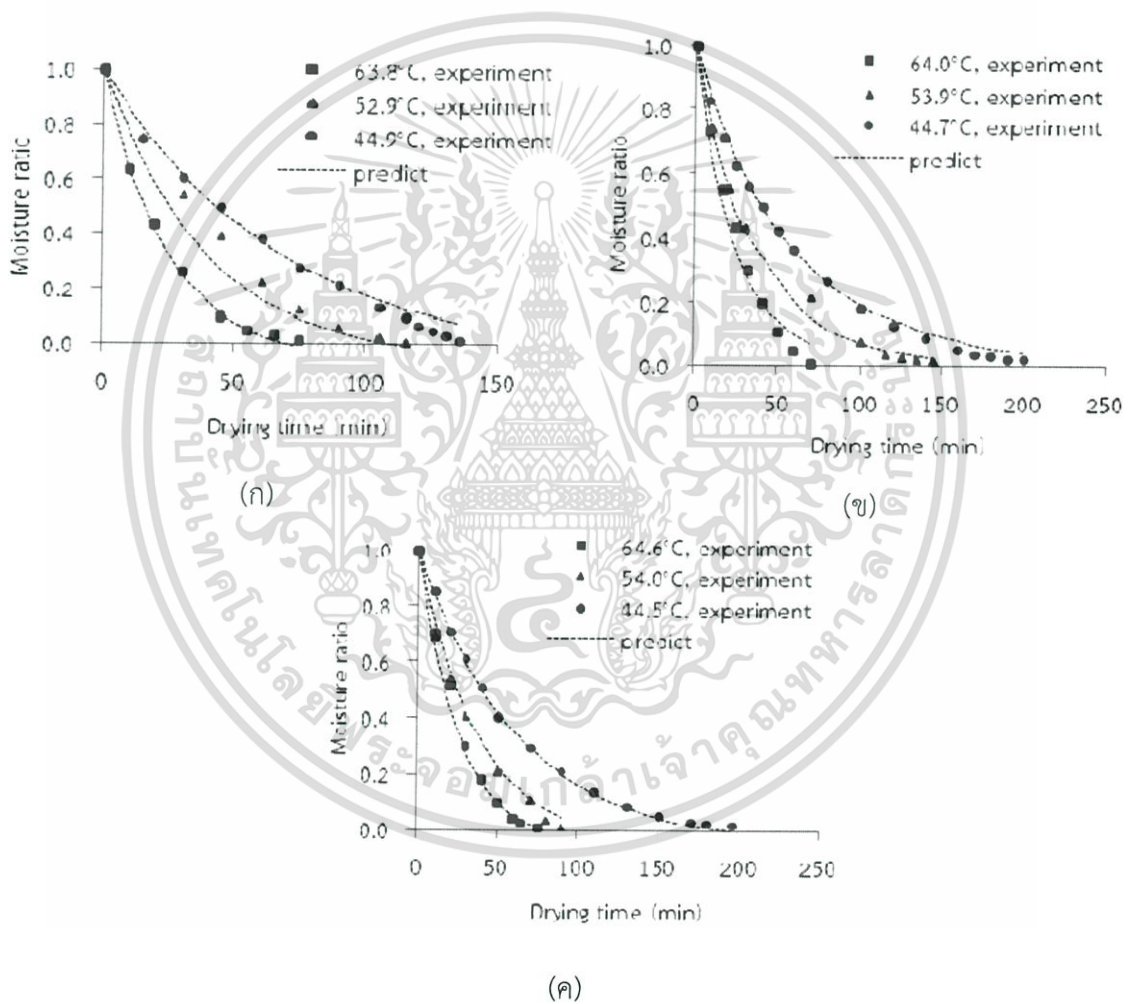


(ข) อบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดร่วมกับลมร้อน

รูปที่ 2.7 เส้นโค้งการอบแห้งขนุนด้วย (ก) รังสีอินฟราเรดอย่างเดียว และ (ข) รังสีอินฟราเรดร่วมกับลมร้อน [12]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากงานวิจัยเรื่องการอบแห้งใบเตยด้วยรังสีอินฟราเรดร่วมกับลมร้อน เพื่อศึกษาปัจจัยการอบแห้งใบเตยเพื่อใช้ทำชาด้วยรังสีอินฟราเรดร่วมกับลมร้อน โดยใช้กำลังรังสีอินฟราเรด 500W ร่วมกับลมร้อนและ 1,000W ร่วมกับลมร้อนเปรียบเทียบกับ การอบแห้งด้วยลมร้อนอย่างเดียว ซึ่งจะพิจารณาคุณภาพของใบเตยหลังการอบแห้งและความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะที่ใช้ในการอบแห้ง การทดลองอบแห้งในช่วงอุณหภูมิ 45-65°C กำลังรังสีอินฟราเรด 500 และ 1,000W ลมร้อนมีความเร็วของอากาศเท่ากับ 1.1 m/s ความชื้นเริ่มต้นและความชื้นสุดท้ายของใบเตยอยู่ในช่วง 400-600%db และ 8-12%db ตามลำดับ จากผลการทดลอง พบว่าอัตราการอบแห้งจะสูงขึ้นเมื่ออุณหภูมิอบแห้งสูงขึ้นขณะที่ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะลดลงเมื่อเพิ่มอุณหภูมิที่ใช้ออบแห้ง [13] โดยเส้นโค้งการอบแห้งแสดงอยู่ในรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 เส้นโค้งการอบแห้งใบเตยด้วย (ก) รังสีอินฟราเรด 1,000 W ร่วมกับลมร้อน (ข) รังสีอินฟราเรด 500 W ร่วมกับลมร้อน และ (ค) ลมร้อนอย่างเดียว [13]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

การดำเนินงานวิจัย

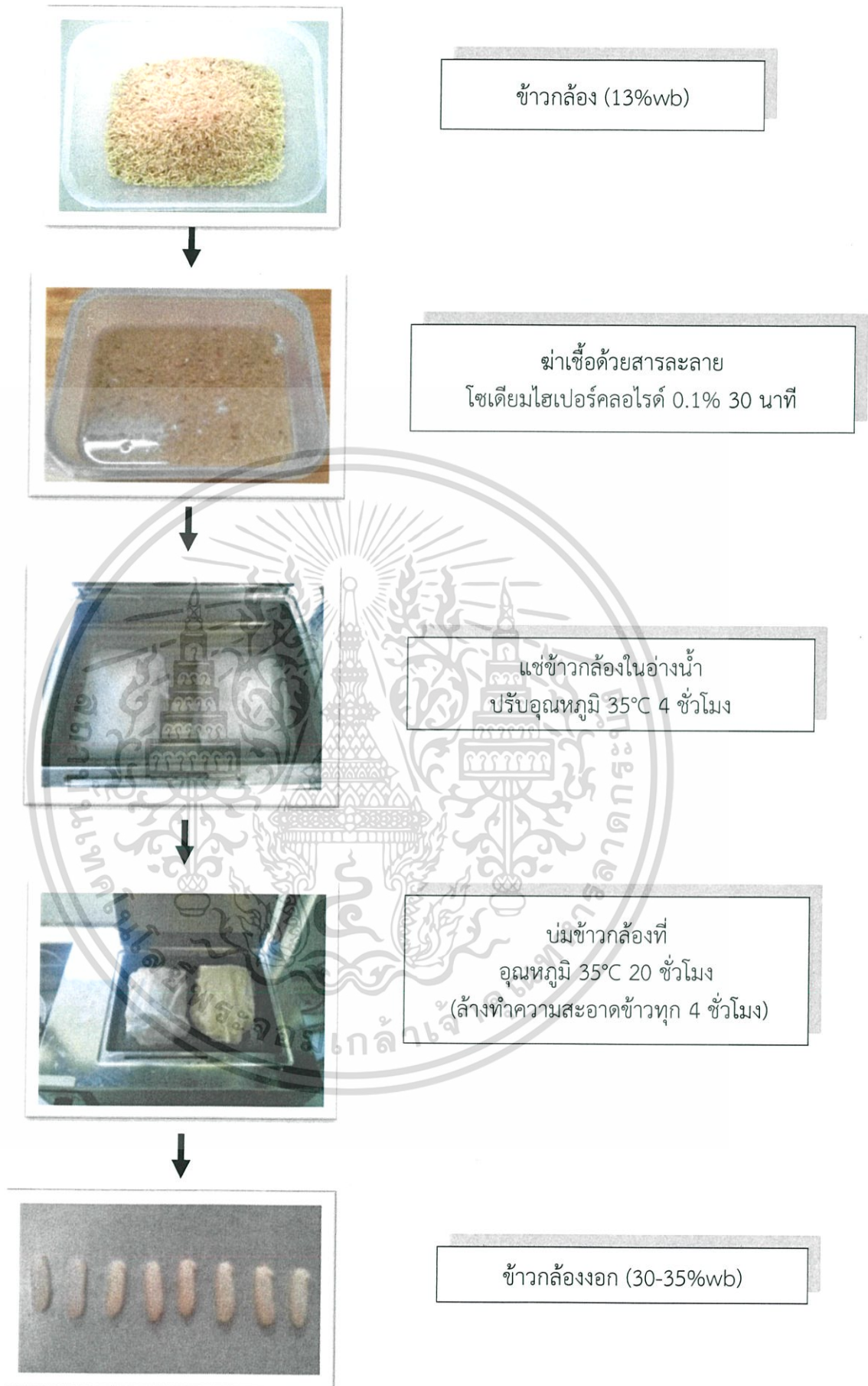
3.1 ตัวอย่างที่ใช้ในการทดลอง

3.1.1 ตัวอย่างข้าวกล้อง

ข้าวกล้องที่ใช้ในการทดลอง คือ ข้าวกล้องพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 จาก จ.สุรินทร์ ประเทศไทย ในการเก็บรักษาตัวอย่างก่อนการทดลอง ทำการบรรจุตัวอย่างในถุงสุญญากาศและเก็บที่อุณหภูมิ 3-4°C และเมื่อนำตัวอย่างมาใช้ในการทดลอง จะทำการทิ้งตัวอย่างไว้ที่อุณหภูมิห้อง เพื่อให้อุณหภูมิข้าวกล้องเท่ากับอุณหภูมิห้องก่อน จึงค่อยนำมาเริ่มการทดลอง

3.1.2 การเตรียมตัวอย่างข้าวกล้องงอก

นำข้าวกล้อง 500 g แช่ในสารละลายโซเดียมไฮโปคลอไรต์ (sodium hypochlorite) ความเข้มข้น 0.1% เป็นเวลา 30 นาที เพื่อป้องกันการเกิดเชื้อในระหว่างกระบวนการเพาะงอก หลังจากนั้นล้างด้วยน้ำสะอาดและห่อด้วยผ้าขาวบาง ทำการแช่ในอ่างน้ำปรับอุณหภูมิที่ 35°C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง หลังจากนั้น ขั้นตอนการบ่มนำข้าวกล้องที่ห่อในผ้าขาวบางจากขั้นตอนการแช่ขึ้นจากน้ำ วางบนตะแกรงให้อยู่เหนือน้ำในอ่างน้ำปรับอุณหภูมิที่ 35°C ทำการบ่มเป็นเวลา 20 ชั่วโมง โดยล้างข้าวกล้องที่ต้องบ่มไว้ทุกๆ 4 ชั่วโมง เพื่อไม่ให้เกิดการหมัก ขั้นตอนการเพาะงอกข้าวกล้องแสดงอยู่ในรูปที่ 3.1

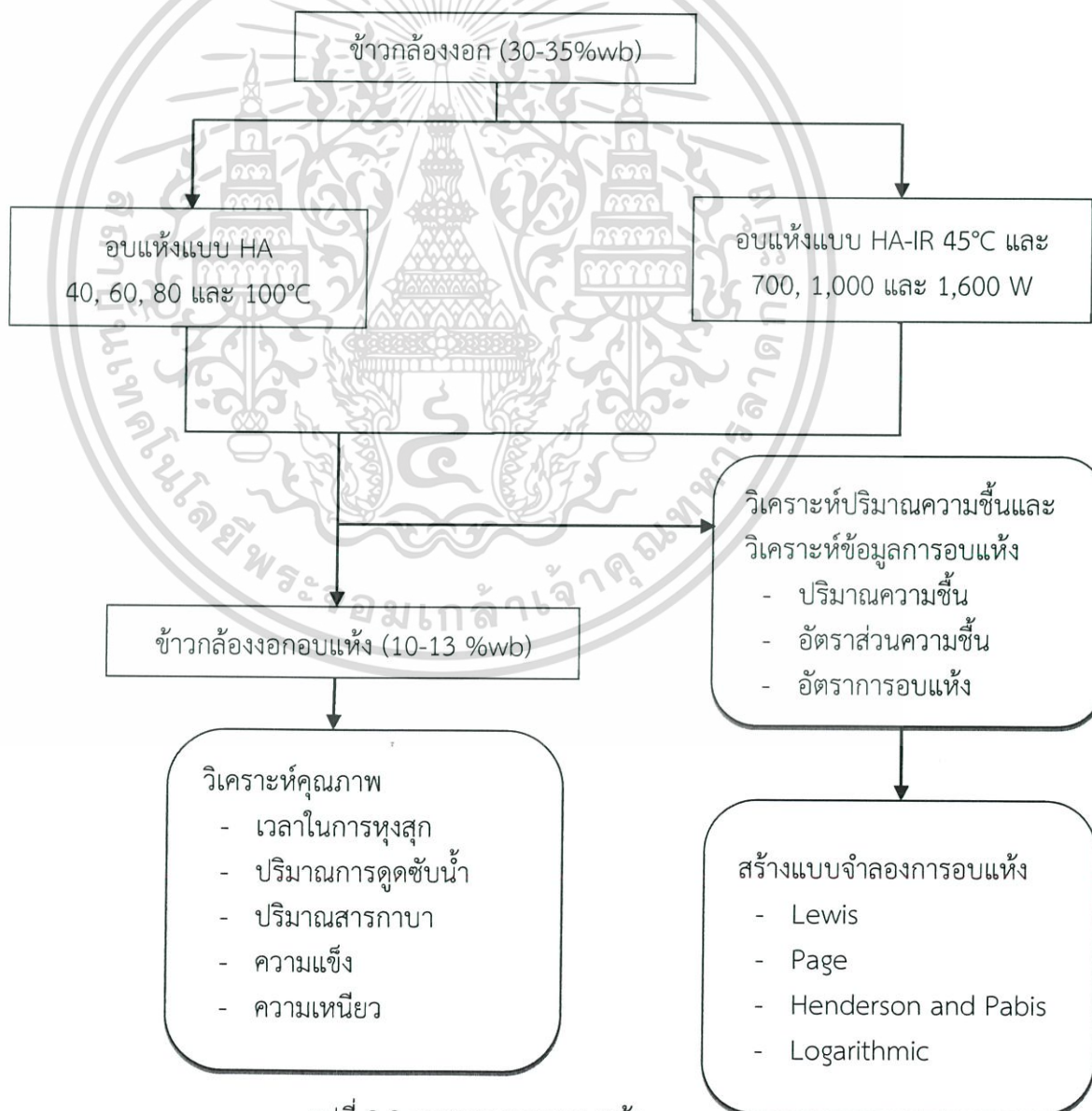


รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการเพาะงอกข้าวกล้อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 การทดลองการอบแห้ง

นำตัวอย่างข้าวกล้องงอกพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 ที่มีความชื้นอยู่ในช่วง 30-35%wb มาอบแห้ง ให้มีความชื้นสุดท้ายเป็น 10-13%wb ด้วยวิธีการอบแห้งแบบอินฟราเรดร่วมกับลมร้อน (hot air-assisted infrared drying, HA-IR) เปรียบเทียบกับวิธีการอบแห้งแบบลมร้อน (hot air drying, HA) โดยความหนาของชั้นข้าวบนถาดอบแห้ง คือ 5 mm สำหรับการอบแห้งแบบ HA-IR ใช้กำลังไฟฟ้า 700, 1,000 และ 1,600 W ที่อุณหภูมิลมร้อน 45°C และการอบแห้งแบบ HA ใช้อุณหภูมิในการอบแห้ง 40, 60, 80 และ 100°C ในระหว่างการอบแห้ง สุ่มเก็บตัวอย่างแต่ละช่วงเวลาเพื่อนำมาวิเคราะห์ปริมาณความชื้นที่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลาในการอบแห้งและใช้ข้อมูลดังกล่าวในการคำนวณหาอัตราส่วนความชื้น อัตราการอบแห้ง และวิเคราะห์หาเวลาที่ใช้ในการอบแห้งจนได้ความชื้นสุดท้ายของข้าวกล้องงอกที่ต้องการ ในส่วนของผลิตภัณฑ์ข้าวกล้องงอกที่ได้จากกระบวนการอบแห้ง นำไปวิเคราะห์คุณภาพในการหุงและการรับประทาน ได้แก่ เวลาในการหุงสุก ปริมาณการดูดซับน้ำ ความแข็งและความเหนียว และปริมาณสารกาบา แผนผังการทดลองแสดงอยู่ในรูปที่ 3.2



รูปที่ 3:2 การทดลองการอบแห้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 การวิเคราะห์ปริมาณความชื้นของข้าวกล้องงอกและการวิเคราะห์ข้อมูลการอบแห้ง

นำตัวอย่างข้าว 3-5 g ใส่ในกระป๋องอลูมิเนียมสำหรับวิเคราะห์ความชื้น (moisture can) ปิดฝาซึ่งน้ำหนัก และบันทึกค่าน้ำหนักเป็นน้ำหนักตัวอย่างที่มีความชื้นแล้วนำ moisture can เปิดฝาและอบที่อุณหภูมิ 105°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วจึงนำไปไปชั่งน้ำหนักได้เป็นน้ำหนักตัวอย่างแห้งนำไปคำนวณหาปริมาณความชื้น (moisture content, MC), อัตราส่วนความชื้น (moisture ratio, MR) และอัตราการอบแห้ง (drying rate, DR) ตามสมการที่ (3.1) ถึง (3.4) ตามลำดับ

สำหรับปริมาณความชื้นสมดุล (M_e) จากการอบแห้งตัวอย่างที่สภาวะทดลองจนไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงของความชื้นพบว่าที่อุณหภูมิ 40 และ 60°C ข้าวกล้องงอกมีปริมาณของความชื้นสมดุลเป็น 0.0875 และ 0.0485 g water/g dry matter ตามลำดับ ในการอบแห้งแบบ HA ที่อุณหภูมิสูงและการอบแห้งแบบ HA-IR ทุกสภาวะ กำหนดให้ M_e มีค่าเป็น 0 g water/g dry matter

ปริมาณความชื้น (MC)

ความชื้นฐานเปียก

$$\%MC_{wb} = \frac{M_w}{M_w + M_s} \times 100 \quad (3.1)$$

ความชื้นฐานแห้ง

$$\%MC_{wb} = \frac{M_w}{M_s} \times 100 \quad (3.2)$$

เมื่อ M_w = ปริมาณน้ำ (g)

M_s = น้ำหนักตัวอย่างแห้ง (g)

อัตราส่วนความชื้น (MR)

$$MR = \frac{M - M_e}{M_0 - M_e} \quad (3.3)$$

เมื่อ M = ความชื้นของวัสดุ ณ เวลาใด (g water/g dry matter)

M_e = ความชื้นสมดุลของวัสดุ (g water/g dry matter)

M_0 = ความชื้นเริ่มต้นของวัสดุ (g water/g dry matter)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อัตราการอบแห้ง (DR)

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

- เมื่อ M_{t+dt} = ความชื้นของวัสดุที่เวลา $t+dt$ (g water/g dry matter)
 M_t = ความชื้นของวัสดุที่เวลา t (g water/g dry matter)
 dt = ผลต่างของเวลาที่ทำการอบแห้งระหว่างความชื้น M_t ถึง M_{t+dt} (นาที)

3.4 การสร้างแบบจำลองการอบแห้ง

นำข้อมูลอัตราส่วนความชื้นที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาการอบแห้งไปวิเคราะห์เพื่อหาแบบจำลองการอบแห้งที่เหมาะสม โดยแบบจำลองการอบแห้งที่ใช้ในการศึกษานี้แสดงอยู่ในตารางที่ 3.1 ดัชนีชี้วัดแบบจำลองการอบแห้งที่เหมาะสม คือ ค่ารากที่สองของค่าเฉลี่ยผลรวมความคลาดเคลื่อนทั้งหมด (Root mean Squared Error, RMSE) และค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (coefficient of determination, R^2) ดังสมการที่ 3.5 และ 3.6

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2} \quad (3.5)$$

- เมื่อ y_i = อัตราส่วนความชื้นจากการทดลอง
 \bar{y} = อัตราส่วนความชื้นจากการทดลองเฉลี่ย
 \hat{y}_i = อัตราส่วนความชื้นที่ทำนายจากแบบจำลองการอบแห้ง
 N = จำนวนของข้อมูล

$$RMSE = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (MR_{pre,i} - MR_{exp,i})^2 \right]^{1/2} \quad (3.6)$$

- เมื่อ $MR_{pre,i}$ = อัตราส่วนความชื้นที่ทำนายแบบจำลองการอบแห้ง
 $MR_{exp,i}$ = อัตราส่วนความชื้นจากการทดลอง
 N = จำนวนของข้อมูล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.1 แบบจำลองการอบแห้งที่ใช้ในการศึกษานี้

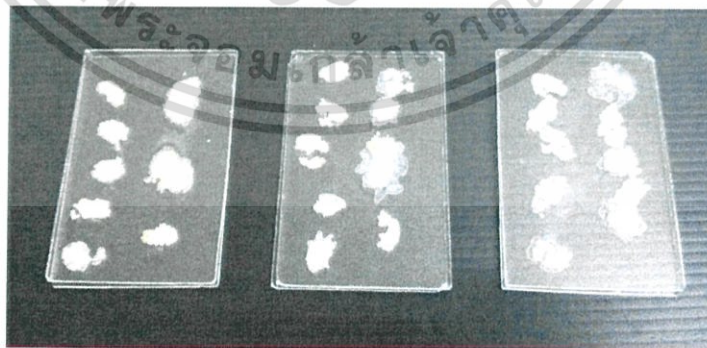
แบบจำลองที่	ชื่อแบบจำลอง	แบบจำลอง
1	Lewis	$MR = \exp(-kt)$
2	Page	$MR = \exp(-kt^n)$
3	Henderson and Pabis	$MR = a \exp(-kt)$
4	Logarithmic	$MR = a \exp(-kt) + c$

3.5 การวิเคราะห์คุณภาพของข้าวกล้องงอกอบแห้ง

ในการวิเคราะห์คุณภาพของข้าวกล้องงอกอบแห้งมีจำนวนตัวอย่างทั้งหมด 8 ตัวอย่าง โดยแบ่งเป็นตัวอย่างข้าวกล้องงอกที่อบแห้งแบบ HA-IR ที่กำลังไฟฟ้า 700, 1,000 และ 1,600 W ที่อุณหภูมิร้อน 45°C 3 ตัวอย่าง ตัวอย่างข้าวกล้องงอกที่อบแห้งแบบ HA ที่อุณหภูมิ 40, 60, 80 และ 100°C 4 ตัวอย่าง และตัวอย่างข้าวกล้องงอกที่แช่แช่เป็นตัวอย่างควบคุม 1 ตัวอย่าง การวิเคราะห์คุณภาพประกอบด้วยรายละเอียดดังต่อไปนี้

3.5.1 เวลาที่เหมาะสมสำหรับการหุง

ต้มข้าวกล้องงอก 10 g ในปีกเกอร์ 250 ml ที่มีน้ำอยู่ 150 ml หลังจากต้ม 10 นาที สุ่มตัวอย่างข้าว 10 เมล็ดในทุกๆ 1 นาที วางเมล็ดข้าวบนแผ่นกระดาษสีและกดด้วยแผ่นกระดาษสีอีกแผ่น (รูปที่ 3.3) และตรวจสอบดูความสุกของข้าวกล้องงอกจากไตของข้าวกล้องงอกซึ่งบ่งชี้ว่าข้าวยังไม่สุก หาก 9 ใน 10 เมล็ดไม่มีไตให้ถือว่าเป็นเวลาที่น้อยที่สุดในการหุงข้าวกล้องงอกและบวกอีก 2 นาที เป็นเวลาที่เหมาะสมสำหรับการหุงข้าว



รูปที่ 3.3 เมล็ดข้าวกล้องงอกที่กดด้วยแผ่นกระดาษสีเพื่อทดสอบความสุก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.5.2 การดูดซับน้ำของข้าวกล้องงอก

นำข้าวกล้องงอก 2 g ใส่หลอดทดลองขนาด 70 ml แล้วเติมน้ำ 20 ml อุดปากหลอดทดลองด้วยสำลี แช่ในอ่างน้ำปรับอุณหภูมิที่ 95°C ใช้เวลาเท่ากับเวลาที่เหมาะสมสำหรับการหุงข้าวและนำมาแช่ในอ่างที่ใส่น้ำแข็ง 20 นาที หลังจากนั้นคว่ำหลอดทดลองลงและตั้งทิ้งไว้เป็นเวลา 45 นาที ชั่งน้ำหนักข้าวและคำนวณหาปริมาณน้ำที่ข้าวกล้องงอกดูดซับไว้โดยเทียบกับน้ำหนักข้าวเริ่มต้น

3.5.3 การวิเคราะห์ปริมาณสารกาบา

ในการวิเคราะห์หาปริมาณสารกาบาได้ส่งตัวอย่างข้าวกล้องงอกไปที่ สถาบันค้นคว้าและพัฒนาผลิตภัณฑ์อาหาร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

3.5.4 การเตรียมข้าวกล้องงอกหุงสุก

นำข้าวกล้องงอก 25 g ใส่บีกเกอร์ 100 ml แล้วเติมน้ำด้วยอัตราส่วนของน้ำต่อข้าว 1.5 ใส่บีกเกอร์ในหม้อหุงข้าวที่มีน้ำอยู่ 400 ml กดปุ่มเริ่มหุงข้าวและรอจนเริ่มเห็นไอออกจากหม้อหุงข้าว เริ่มจับเวลาเท่ากับเวลาที่เหมาะสมในการหุงข้าว เมื่อครบเวลากดปุ่มปิดแล้วปล่อยให้ข้าวอยู่ในหม้อหุงข้าว 10 นาที และนำออกมาทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง 45 นาที เพื่อนำไปใช้ทดสอบความแข็ง และความเหนียว

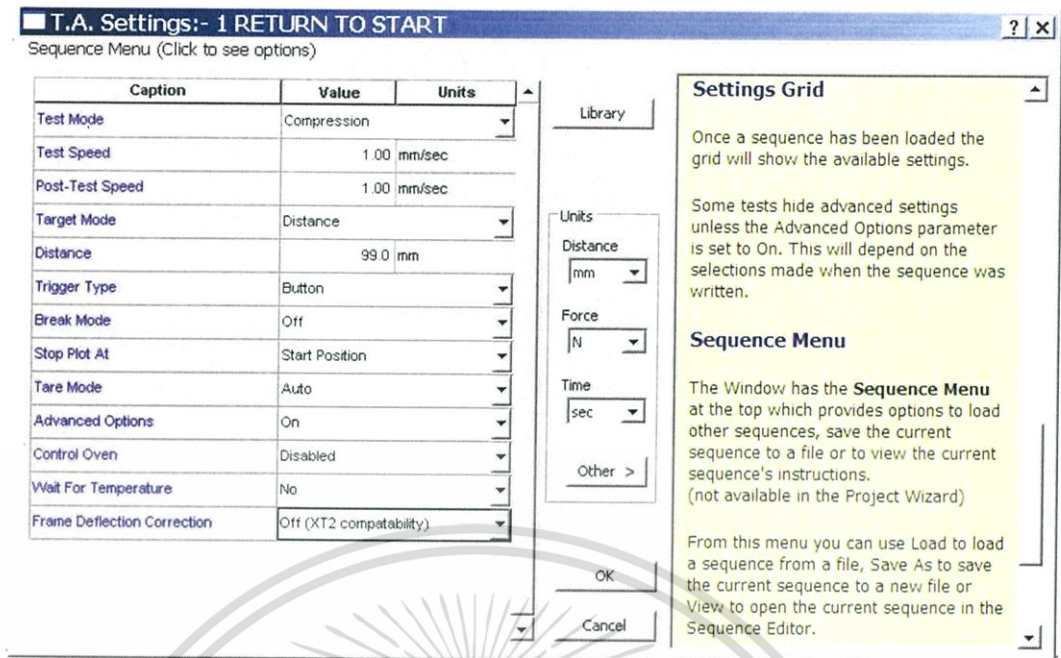


รูปที่ 3.4 การหุงข้าวกล้องงอกในบีกเกอร์

3.5.5 การวิเคราะห์ความแข็งและความเหนียวของข้าวหุงสุก

ในการทดสอบความแข็งและความเหนียว วัดโดยใช้เครื่อง Texture Analyzer ด้วยวิธี back extrusion โดยใช้หัวกดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12.70 mm และใช้กระบอกบรรจุข้าวสูง 70 mm เส้นผ่านศูนย์กลาง 15 mm ระยะที่ทำการกด คือ 99 mm ด้วยความเร็ว 1 mm/sec เมื่อติดตั้งอุปกรณ์และกำหนดค่าตั้งที่กล่าวมาข้างต้นเสร็จสิ้น (รูปที่ 3.5 แสดงการตั้งค่าโปรแกรม Texture Analyzer สำหรับการวิเคราะห์ความแข็งและความเหนียวด้วยวิธี back extrusion) ซึ่งข้าวตัวอย่างละ 4 g ใส่ลงในกระบอกกดข้าว จากนั้นเริ่มทำการกดข้าว เมื่อเครื่องทำงานเสร็จอ่านค่าและวิเคราะห์ผล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.5 การตั้งค่าสำหรับการทดสอบความแข็งแรงและความเหนียวด้วยวิธีการทดสอบแบบ back extrusion

3.6 การวิเคราะห์พลังงานที่ใช้ในการอบแห้ง

ทำการวิเคราะห์พลังงานที่ใช้ในการอบแห้งของแต่ละสภาวะเพื่อหาพลังงานทั้งหมดที่ใช้ในการอบแห้งและพลังงานจำเพาะ โดยหาจากสมการ (3.7), (3.8) และ (3.9) ดังนี้

$$P = VI \cos\theta \quad (3.7)$$

$$\text{พลังงานไฟฟ้าทั้งหมด} = P \times \text{เวลาที่ใช้ในการอบแห้ง} \quad (3.8)$$

$$\text{พลังงานจำเพาะ} = \text{พลังงานไฟฟ้าทั้งหมด} / \text{ปริมาณน้ำที่ระเหยออกในกระบวนการอบแห้ง} \quad (3.9)$$

เมื่อ P = กำลังทางไฟฟ้า (W)

V = โวลต์ (V)

I = กระแสไฟฟ้า (A)

$\cos\theta$ = 0.94 มุมทางไฟฟ้า

3.7 การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

ทำการวิเคราะห์ข้อมูลการทดลองด้วยวิธีการทดลองสมมุติฐานของค่าเฉลี่ยแบบการวิเคราะห์ความแปรปรวนหนึ่งทาง (one-way ANOVA) และเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างแต่ละสิ่งทดลองโดยวิธี Duncan's New Multiple Range Test ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการทดลอง

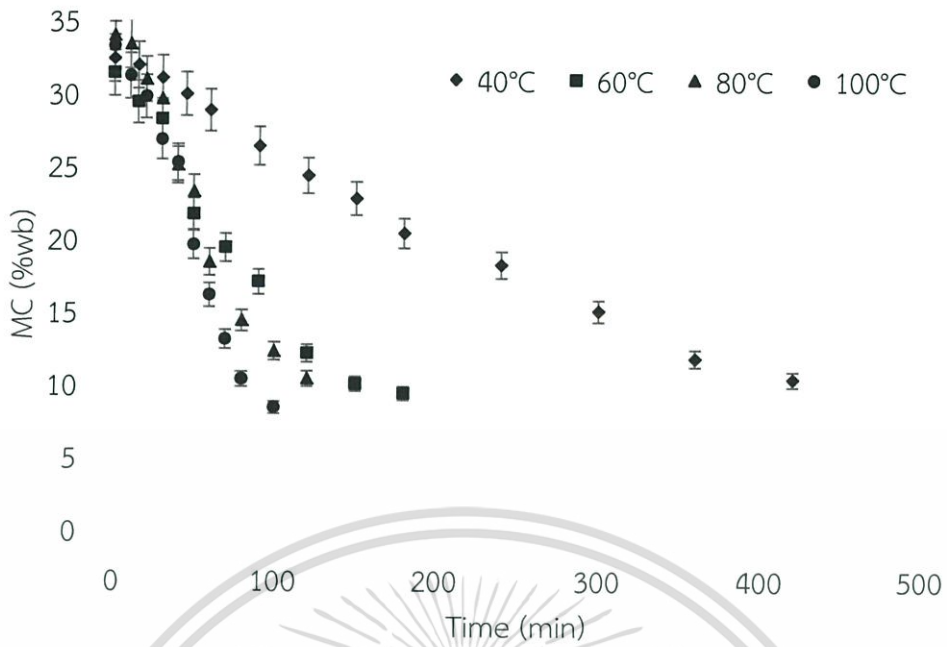
4.1 ลักษณะการอบแห้งของข้าวกล้องงอกด้วยวิธีการอบแห้งแบบลมร้อน

ระยะเวลาที่เหมาะสมในการอบแห้งและอัตราการอบแห้งสูงสุดที่อุณหภูมิต่างๆ ของการอบแห้งแบบลมร้อน (hot air drying, HA) สำหรับการอบแห้งข้าวกล้องงอก แสดงอยู่ในตารางที่ 4.1 จากการทดลอง ระยะเวลาในการอบแห้ง คือ 420, 180, 120, และ 80 นาที และอัตราการอบแห้งสูงสุดมีค่าเป็น 0.0009, 0.0031, 0.0044 และ 0.0048 g/g dry matter•min สำหรับอุณหภูมิในการอบแห้ง 40, 60, 80 และ 100°C ตามลำดับ รูปที่ 4.1 แสดงการลดลงของความชื้นกับเวลาในการอบแห้ง และรูปที่ 4.2 แสดงเส้นโค้งการอบแห้งข้าวกล้องงอกด้วยวิธีการอบแห้งแบบ HA จะเห็นได้ว่าในช่วงแรกของการอบแห้ง ความชื้นลดลงอย่างรวดเร็วเนื่องจากข้าวกล้องงอกมีความชื้นอยู่มากและเมื่ออบแห้งไประยะหนึ่งการลดความชื้นเกิดขึ้นในอัตราที่ช้าลง แนวโน้มของการเปลี่ยนแปลงความชื้นของข้าวกล้องงอกที่อบแห้งที่อุณหภูมิ 60, 80 และ 100°C ค่อนข้างใกล้เคียงกัน ในขณะที่การอบแห้งที่อุณหภูมิ 40°C ทำให้แนวโน้มของการลดความชื้นของข้าวกล้องงอกน้อยกว่าที่อุณหภูมิอื่นๆ อย่างชัดเจน ซึ่งสอดคล้องกับอัตราการอบแห้งสูงสุดที่แสดงไว้ข้างต้นเช่นกัน รูปที่ 4.3 แสดงความสัมพันธ์ของอุณหภูมิจากเวลาอบแห้งจากการอบแห้งข้าวกล้องงอกด้วยวิธีการอบแห้งแบบ HA ข้าวกล้องงอกมีแนวโน้มที่จะมีอุณหภูมิต่ำกว่าของวัสดุใกล้เคียงกับอุณหภูมิลมร้อนที่ใช้ในการอบแห้ง เมื่อทำการอบแห้งจนถึงระยะเวลาที่ต้องการเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ ยกเว้นที่อุณหภูมิ 80°C ซึ่งอุณหภูมิของข้าวกล้องงอกยังต่ำกว่าอุณหภูมิลมร้อนอยู่ประมาณ 15°C เมื่อสิ้นสุดการอบแห้งจนได้ผลิตภัณฑ์

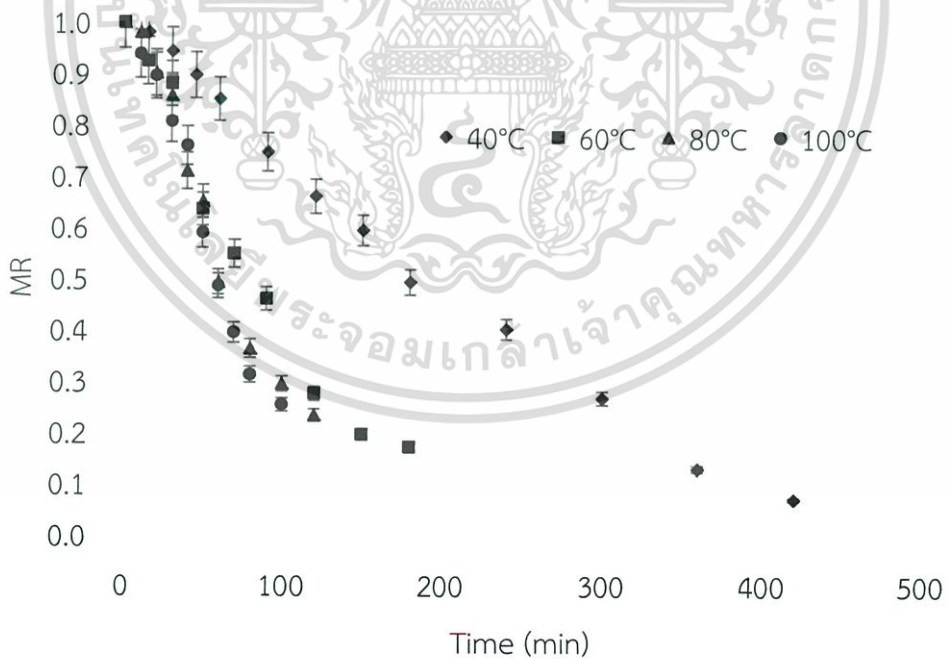
ตารางที่ 4.1 ระยะเวลาที่เหมาะสมในการอบแห้งและอัตราการอบแห้งสูงสุดของแต่ละอุณหภูมิอบแห้งที่ใช้ในการอบแห้งข้าวกล้องงอกด้วยวิธีการอบแห้งแบบ HA

อุณหภูมิ (°C)	ระยะเวลาในการอบแห้ง (นาที)	อัตราการอบแห้งสูงสุด (g/g dry matter•min)
40	420	0.0009±0.0001
60	180	0.0031±0.0001
80	120	0.0044±0.0001
100	80	0.0048±0.0005

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

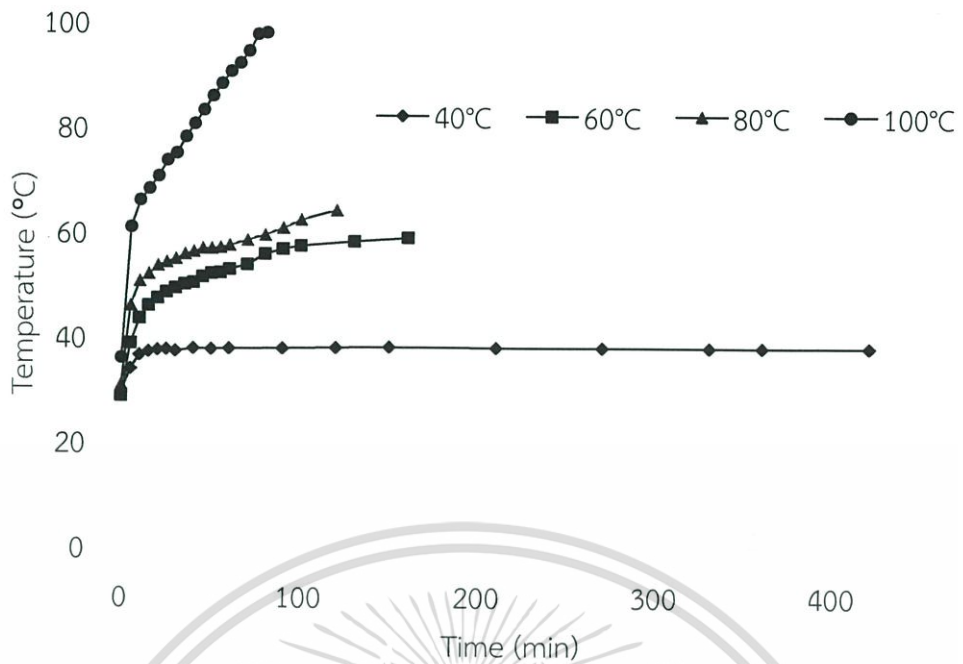


รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ของความชื้นกับเวลาอบแห้งจากการอบแห้งข้าวกล้องงอกด้วยวิธีการอบแห้งแบบ HA ที่อุณหภูมิต่างๆ



รูปที่ 4.2 เส้นโค้งการอบแห้งข้าวกล้องงอกด้วยวิธีการอบแห้งแบบ HA ที่อุณหภูมิต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ของอุณหภูมิข้าวกล้องงอกกับเวลาอบแห้งจากการอบแห้งข้าวกล้องงอกด้วยวิธีการอบแห้งแบบ HA

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

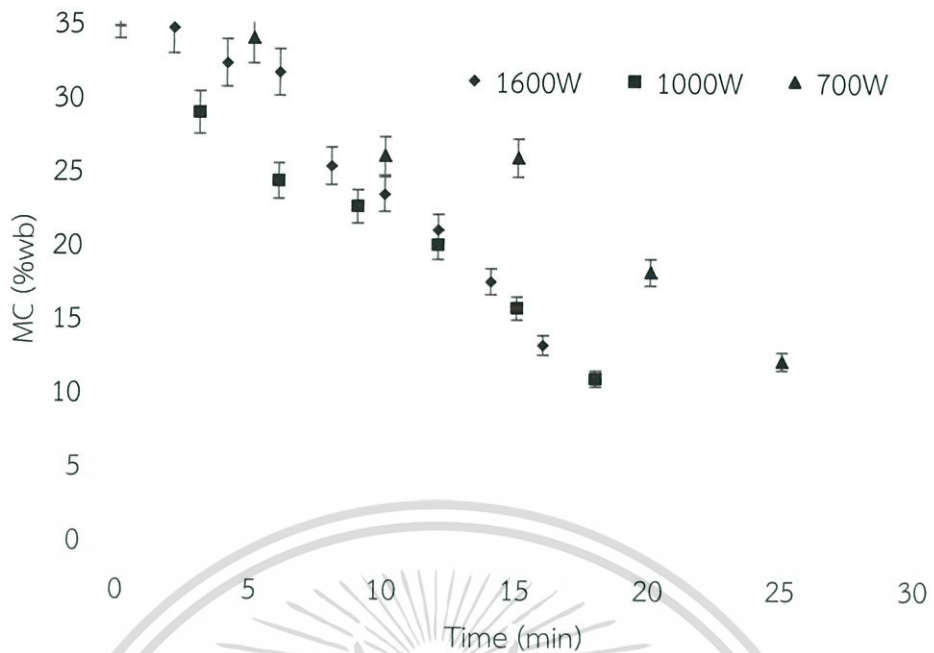
4.2 ลักษณะการอบแห้งของข้าวกล้องงอกด้วยวิธีการอบแห้งแบบอินฟราเรดร่วมกับลมร้อน

จากการอบแห้งข้าวกล้องงอกด้วยวิธีการอบแห้งแบบอินฟราเรดร่วมกับร้อน (hot air-assisted infrared, HA-IR) ที่อุณหภูมิลมร้อน 45°C และกำลังไฟฟ้า 700, 1,000 และ 1,600 W ระยะเวลาที่เหมาะสมในการอบแห้งและอัตราการอบแห้งสูงสุดที่กำลังไฟฟ้าต่างๆ ของการอบแห้งแบบ HA-IR สำหรับการอบแห้งข้าวกล้องงอก แสดงอยู่ในตารางที่ 4.2 จากการทดลอง ระยะเวลาในการอบแห้ง คือ 25, 18 และ 16 นาที และอัตราการอบแห้งสูงสุดมีค่าเป็น 0.0147, 0.0159 และ 0.0250 g/g dry matter•min เมื่อใช้กำลังไฟฟ้าของหลอดอินฟราเรดเป็น 700, 1,000 และ 1,600 W ตามลำดับ โดยรูปที่ 4.4 แสดงการลดลงของความชื้นกับเวลาในการอบแห้ง และรูปที่ 4.5 แสดงเส้นโค้งการอบแห้งข้าวกล้องงอกด้วยวิธีการอบแห้งแบบ HA-IR จากรูปที่ 4.6 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ของอุณหภูมิข้าวกล้องงอกกับเวลาอบแห้งจากการอบแห้งแบบ HA-IR ที่กำลังไฟฟ้าต่างๆ พบว่า แนวโน้มของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของข้าวกล้องงอกในระหว่างการอบแห้งที่กำลังไฟฟ้าต่างๆ ค่อนข้างใกล้เคียงกัน เมื่อใช้เวลาในการอบแห้งมากที่สุด คือ การอบแห้งที่กำลังไฟฟ้า 700 W จึงมีอุณหภูมิสุดท้ายของข้าวกล้องงอกสูงที่สุด ในขณะที่การอบแห้งที่กำลังไฟฟ้า 1,600 W ใช้เวลาในการอบแห้งน้อยที่สุด จึงมีอุณหภูมิสุดท้ายของข้าวกล้องงอกต่ำที่สุด

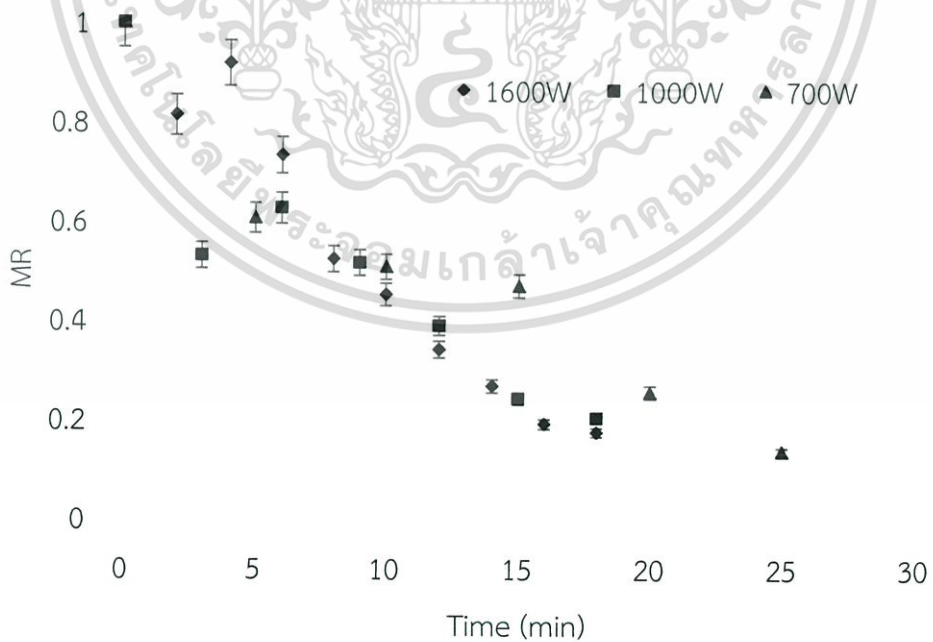
ตารางที่ 4.2 ระยะเวลาที่เหมาะสมในการอบแห้งและอัตราการอบแห้งสูงสุดของแต่ละอุณหภูมิอบแห้งที่ใช้ในการอบแห้งข้าวกล้องงอกด้วยวิธีการอบแห้งแบบ HA-IR

กำลังไฟฟ้าของหลอดอินฟราเรด (W)	ระยะเวลาที่เหมาะสมในการอบแห้ง (นาที)	อัตราการอบแห้งสูงสุด (g/g dry matter•min)
700	25	0.0147±0.0004
1,000	18	0.0159±0.0013
1,600	16	0.0250±0.0034

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

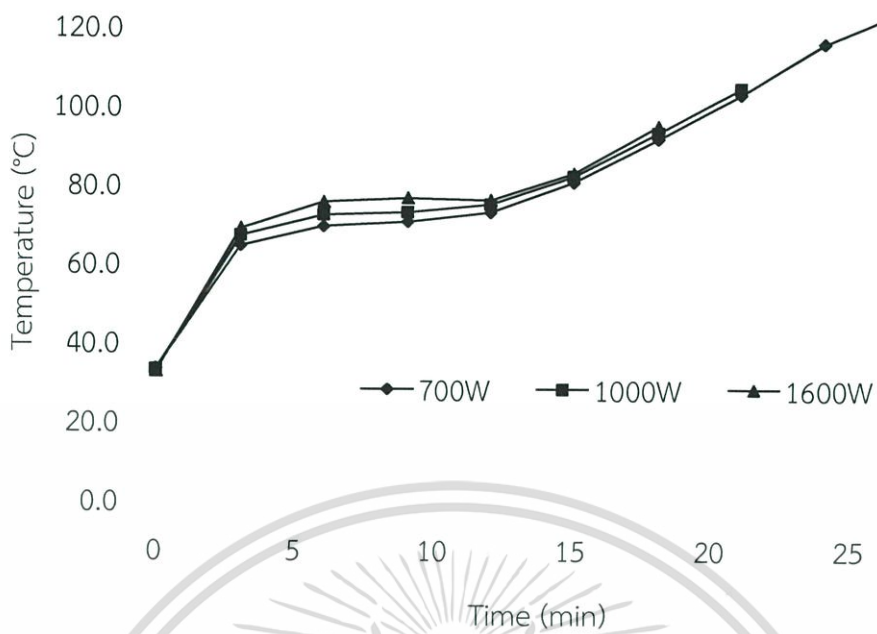


รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ของความชื้นกับเวลาอบแห้งจากการอบแห้งข้าวกล้องงอกด้วยวิธีการอบแห้งแบบ HA-IR ที่กำลังไฟฟ้าต่างๆ



รูปที่ 4.5 เส้นโค้งการอบแห้งข้าวกล้องงอกด้วยวิธีการอบแห้งแบบ HA-IR ที่กำลังไฟฟ้าต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ของอุณหภูมิข้าวกล้องงอกกับเวลาอบแห้งจากการอบแห้งแบบ HA-IR ที่กำลังไฟฟ้าต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 การเปรียบเทียบลักษณะการอบแห้งของข้าวกล้องงอกด้วยวิธีการอบแห้งแบบลมร้อนและวิธีการอบแห้งแบบอินฟราเรดร่วมกับลมร้อน

เมื่อเปรียบเทียบการอบแห้งแบบ HA และการอบแห้งแบบ HA-IR การอบแห้งแบบ HA มีอัตราการอบแห้งต่ำกว่าการอบแห้งแบบ HA-IR อย่างมาก ดังตารางที่ 4.3 อัตราการอบแห้งสูงสุดจากการอบแห้งแบบ HA และ HA-IR มีค่าอยู่ในช่วง 0.0009-0.0048 g/g dry matter•min และ 0.0147-0.0250 g/g dry matter•min ตามลำดับ จึงส่งผลให้ระยะเวลาที่เหมาะสมในการอบแห้งแบบ HA ใช้เวลาในการอบแห้งนานกว่าการอบแห้งแบบ HA-IR ระยะเวลาในการอบแห้งที่ใช้เวลาน้อยที่สุดของการอบแห้งแบบ HA และ HA-IR คือ 80 นาที ที่อุณหภูมิอบแห้ง 100°C และ 16 นาที ที่กำลังไฟฟ้า 1,600 W ตามลำดับ โดยอุณหภูมิสุดท้ายของวัสดุของการอบแห้งแบบ HA ที่อุณหภูมิอบแห้ง 100°C คือ 98.0°C และการอบแห้งแบบ HA-IR ที่กำลังไฟฟ้า 1,600 W มีอุณหภูมิสุดท้ายของวัสดุ คือ 94.9°C ซึ่งมีอุณหภูมิสุดท้ายของวัสดุน้อยสุดในกลุ่มของสภาวะการอบแห้งแบบ HA-IR

ตารางที่ 4.3 ระยะเวลาที่เหมาะสมในการอบแห้ง อัตราการอบแห้งสูงสุด และอุณหภูมิสุดท้ายของข้าวกล้องงอกระหว่างการอบแห้งแบบ HA และการอบแห้งแบบ HA-IR ที่สภาวะต่างๆ

วิธีการอบแห้ง	สภาวะการอบแห้ง	ระยะเวลาที่เหมาะสมในการอบแห้ง (นาที)	อัตราการอบแห้งสูงสุด (g/g dry matter•min)	อุณหภูมิสุดท้ายของวัสดุ (°C)
HA	40°C	420	0.0009±0.0001	38.0
	60°C	180	0.0031±0.0001	58.9
	80°C	120	0.0044±0.0001	64.2
	100°C	80	0.0048±0.0005	98.0
HA-IR	700 W	25	0.0147±0.0004	124.8
	1,000 W	18	0.0159±0.0013	104.5
	1,600 W	16	0.0250±0.0034	94.9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4 การเปรียบเทียบคุณภาพของข้าวกล้องงอกที่อบแห้งด้วยวิธีการอบแห้งแบบลมร้อนและวิธีการอบแห้งแบบอินฟราเรดร่วมกับลมร้อน

4.4.1 เวลาที่เหมาะสมสำหรับการหุงข้าวและปริมาณการดูดซับน้ำของข้าวกล้องงอก

จากการทดลองพบว่า เวลาที่เหมาะสมสำหรับการหุงข้าว คือ 20 นาที เท่ากันในทุกสภาวะของการอบแห้ง แต่ปริมาณการดูดซับน้ำของข้าวกล้องงอกมีความแตกต่างกัน ดังที่แสดงอยู่ในตารางที่ 4.4 โดยการอบแห้งแบบอินฟราเรดร่วมกับลมร้อน (HA-IR) มีค่าปริมาณการดูดซับน้ำของข้าวกล้องงอกมากกว่า เมื่อเทียบกับการอบแห้งแบบลมร้อน (HA) เนื่องจากการอบแห้งแบบ HA-IR ทำให้อุณหภูมิภายในข้าวกล้องงอกสูงและทำให้เมล็ดข้าวกล้องงอกเกิดการพองตัวและเพิ่มความเป็นรูพรุน จึงทำให้สามารถดูดซับน้ำได้มากกว่าการอบแห้งแบบ HA

ตารางที่ 4.4 เวลาที่เหมาะสมสำหรับการหุงข้าวและปริมาณการดูดซับน้ำของตัวอย่างข้าว

วิธีการอบแห้ง	สภาวะ	เวลาที่เหมาะสมสำหรับการหุงข้าว (นาที)	การดูดซับน้ำของข้าวกล้องงอก (g)
HA	40°C	20	9.15±1.3808 ^a
	60°C	20	10.21±1.9382 ^a
	80°C	20	10.31±0.8863 ^a
	100°C	20	10.63±1.2153 ^a
HA-IR	700 W	20	15.60±0.4057 ^b
	1,000 W	20	14.84±1.9243 ^b
	1,600 W	20	15.13±0.3758 ^b
ตัวอย่างควบคุม*	-	20	8.69±0.1453 ^a

*ตัวอย่างควบคุม คือ ข้าวกล้องปกติที่ไม่ผ่านกระบวนการเพาะงอกและอบแห้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4.2 ปริมาณสารกาบาของข้าวกล้องงอก

จากตารางที่ 4.5 ข้าวกล้องงอกมาตรฐานมีปริมาณสารกาบามากที่สุด คือ 17.75 mg/100g ในขณะที่ตัวอย่างควบคุมมีปริมาณสารกาบาเพียง 1.18 mg/100g ซึ่งมีค่าน้อยที่สุด จากการนำข้าวกล้องงอกมาทำการอบแห้ง โดยวิธีการอบแห้งแบบ HA-IR และ HA พบว่า ข้าวกล้องงอกที่ผ่านการอบแห้งแบบ HA-IR ในทุกสภาวะมีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติและมีค่ามากกว่าข้าวกล้องงอกที่ผ่านการอบแห้งแบบ HA ในทุกสภาวะอย่างมีนัยสำคัญ เมื่อเทียบในสิ่งทดลองของการศึกษานี้ ข้าวกล้องงอกที่มีปริมาณสารกาบาน้อยสุด คือ ข้าวกล้องงอกที่ผ่านการอบแห้งแบบ HA ที่อุณหภูมิ 100°C และข้าวกล้องงอกที่มีปริมาณสารกาบามากที่สุด คือ ข้าวกล้องงอกที่ผ่านการอบแห้งแบบ HA-IR ที่กำลังไฟฟ้า 1,600 W หากเทียบกับผลปริมาณสารกาบาจากงานวิจัย การอบแห้งข้าวกล้องงอกพันธุ์ข้าวดอกมะลิ 105 ด้วยวิธีการอบแห้งแบบถาด [10] พบว่า ข้าวกล้องงอกจากการศึกษานี้มีปริมาณสารกาบาส่งกว่า

ตารางที่ 4.5 ปริมาณสารกาบาในข้าวกล้องงอกที่สภาวะการอบแห้งและข้าวกล้องงอกที่ไม่ผ่านการอบแห้งและข้าวกล้องงอกธรรมดาที่ไม่ผ่านการเพาะงอก

วิธีการอบแห้ง	สภาวะการอบแห้ง	ปริมาณสารกาบา (mg/100g)
HA	40°C	16.16 ^c
	60°C	15.84 ^c
	80°C	16.02 ^c
	100°C	15.32 ^d
HA-IR	700 W	16.68 ^b
	1,000 W	16.76 ^b
	1,600 W	16.77 ^b
ข้าวกล้องงอกมาตรฐาน*	-	17.75 ^a
ตัวอย่างควบคุม**	-	1.18 ^d

*ข้าวกล้องงอกมาตรฐาน คือ ข้าวกล้องงอกที่ผ่านการอบแห้งแบบแช่เยือกแข็งที่อุณหภูมิ 40°C ซึ่งถือว่าเป็นสภาวะที่ไม่ทำลายสารสำคัญในตัวอย่าง

**ตัวอย่างควบคุม คือ ข้าวกล้องงอกปกติที่ไม่ผ่านการอบแห้งและอบแห้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4.3 ความแข็งแรงและความเหนียวของข้าวกล้องงอกหุงสุก

จากตารางที่ 4.6 ตัวอย่างควบคุมมีความแข็งแรงมากกว่าข้าวกล้องงอกหุงสุกโดยมีค่าความแข็งแรงเป็น 40.61 N สภาวะอุณหภูมิ 40°C ของการอบแห้งแบบ HA และกำลังไฟฟ้า 700 W ของการอบแห้งแบบ HA-IR ให้ข้าวกล้องงอกหุงสุกที่มีความแข็งแรงไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ โดยถือเป็นความแข็งแรงที่มีค่ารองลงมาจากตัวอย่างควบคุม ในขณะที่ ข้าวกล้องงอกที่อบแห้งแบบ HA ที่อุณหภูมิ 60, 80 และ 100°C มีความแข็งแรงอยู่ในกลุ่มต่ำที่สุด โดยมีค่าเพียงครึ่งหนึ่งของตัวอย่างควบคุมโดยประมาณ

สำหรับความเหนียวของตัวอย่างข้าวกล้องงอกหุงสุก ข้าวกล้องงอตัวอย่างควบคุมมีความเหนียวไม่แตกต่างจาก ข้าวกล้องงอกที่อบแห้งแบบ HA ที่อุณหภูมิ 40°C อย่างมีนัยสำคัญ โดยกลุ่มที่มีความเหนียวรองลงมาได้แก่ ข้าวกล้องงอกที่อบแห้งแบบ HA-IR ที่ทุกสภาวะการอบแห้ง ในทำนองเดียวกัน ข้าวกล้องงอกที่อบแห้งแบบ HA ที่อุณหภูมิ 80 และ 100°C มีความเหนียวต่ำที่สุด

ตารางที่ 4.6 ความแข็งแรงและความเหนียวของข้าวกล้องงอกหุงสุกที่สภาวะต่างๆ

วิธีการอบแห้ง	สภาวะการอบแห้ง	ความแข็งแรง (N)	ความเหนียว (N)
HA	40°C	30.36 ^{bc}	11.83 ^a
	60°C	22.71 ^e	9.77 ^{bc}
	80°C	23.15 ^e	8.73 ^c
	100°C	20.71 ^f	8.47 ^c
HA-IR	700 W	30.83 ^b	9.59 ^{bc}
	1,000 W	28.79 ^{cd}	9.72 ^{bc}
	1,600 W	27.57 ^d	10.15 ^b
ตัวอย่างควบคุม*	-	40.61 ^a	12.07 ^a

*ตัวอย่างควบคุม คือ ข้าวกล้องงอกปกติที่ไม่ผ่านกระบวนการเพาะงอกและอบแห้ง

4.5 แบบจำลองการอบแห้งของการอบแห้งของข้าวกล้องงอกด้วยวิธีการอบแห้งแบบลมร้อนและวิธีการอบแห้งแบบอินฟราเรดร่วมกับลมร้อน

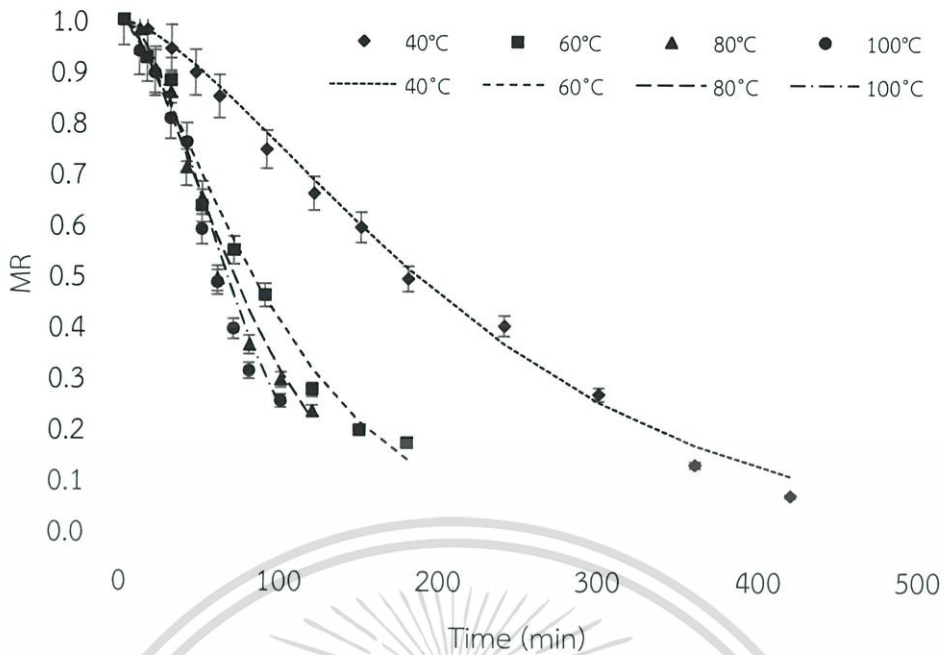
เมื่อนำข้อมูลอัตราส่วนความชื้นที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาการอบแห้งไปวิเคราะห์เพื่อหาแบบจำลองการอบแห้งที่เหมาะสม โดยใช้ค่ารากที่สองของค่าเฉลี่ยผลรวมความคลาดเคลื่อนทั้งหมด (Root mean Squared Error, RMSE) และค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (coefficient of determination, R^2) เป็นดัชนีชี้วัดแบบจำลองการอบแห้งที่เหมาะสม โดยได้ค่า R^2 และ RMSE ดังตารางที่ 4.7 พบว่าแบบจำลอง Page ให้ค่า R^2 สูงที่สุดและให้ค่า RMSE ต่ำที่สุดทั้งข้อมูลการอบแห้งข้าวกล้องงอกด้วยวิธีการอบแห้งแบบ HA และวิธีการอบแห้งแบบ HA-IR ในทุกสภาวะการอบแห้ง ดังนั้นจึงสรุปได้ว่า แบบจำลอง Page เป็นแบบจำลองที่เหมาะสมสำหรับการอบแห้งข้าวกล้องงอกด้วยวิธีการอบแห้งแบบ HA ที่อุณหภูมิ 40-100°C และวิธีการอบแห้งแบบ HA-IR ที่อุณหภูมิ 45°C และกำลังไฟฟ้า 700-1,600 W รูปที่ 4.7 และ 4.8 แสดงการเปรียบเทียบเส้นโค้งการอบแห้งระหว่างข้อมูลจากการทดลอง (จุดข้อมูล) กับข้อมูลจากการทำนายจากแบบจำลอง Page (เส้นกราฟ) สำหรับการอบแห้งข้าวกล้องงอกด้วยวิธีการอบแห้งแบบ HA และ HA-IR ตามลำดับ



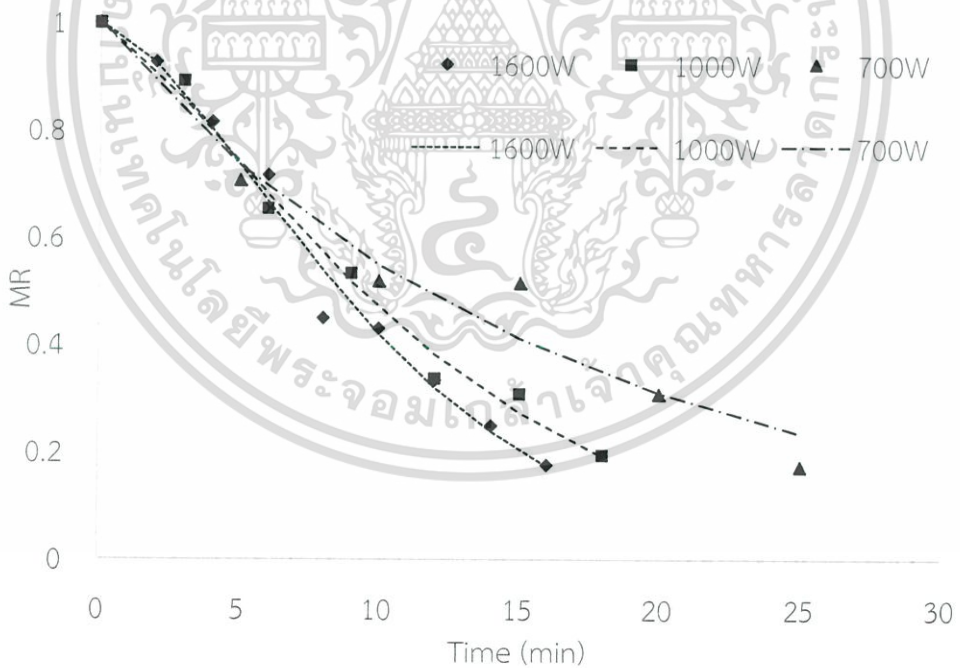
ตารางที่ 4.7 ค่าคงที่และสัมประสิทธิ์และ R^2 และ RMSE ของแบบจำลองการอบแห้งที่ใช้ในการทำนายข้อมูลการอบแห้งด้วยวิธีการอบแห้งแบบลมร้อนและวิธีการอบแห้งแบบอินฟราเรดร่วมกับลมร้อน

วิธีการอบแห้ง	สภาวะการอบแห้ง	แบบจำลอง	ค่าคงที่และสัมประสิทธิ์				R^2	RMSE
			k	n	a	c		
HA	HA 40°C	Lewis	0.0039				0.9580	0.0620
	HA 60°C		0.0089				0.9680	0.0533
	HA 80°C		0.0095				0.9370	0.0650
	HA 100°C		0.0108				0.9060	0.0792
	HA 40°C	Page	0.0004	1.4193			0.9960	0.0195
	HA 60°C		0.0021	1.3173			0.9910	0.0278
	HA 80°C		0.0015	1.4456			0.9840	0.0338
	HA 100°C		0.0005	1.7281			0.9890	0.0348
	HA 40°C	Henderson and Pabis	0.0043		1.0742		0.9730	0.0491
	HA 60°C		0.0097		1.0676		0.9790	0.0430
	HA 80°C		0.0109		1.0848		0.9610	0.0509
	HA 100°C		0.0124		1.0907		0.9320	0.0673
	HA 40°C	Logarithmic	0.0016		2.0042	-0.9768	0.9960	0.0166
	HA 60°C		0.0067		1.2932	-0.2482	0.9850	0.0363
	HA 80°C		0.0052		1.7518	-0.6966	0.9730	0.0430
	HA 100°C		-0.0004		-22.322	23.361	0.9720	0.0597
HA-IR	HA-IR 700 W	Lewis	0.0618				0.9190	0.0740
	HA-IR 1,000 W		0.0881				0.8880	0.0823
	HA-IR 1,600 W		0.0865				0.9210	0.0889
	HA-IR 700 W	Page	0.1217	0.7501			0.9380	0.0645
	HA-IR 1,000 W		0.1909	0.6721			0.9270	0.0662
	HA-IR 1,600 W		0.0256	1.5210			0.9580	0.0617
	HA-IR 700 W	Henderson and Pabis	0.0579		0.9513		0.9260	0.0705
	HA-IR 1,000 W		0.0795		0.9257		0.9060	0.0754
	HA-IR 1,600 W		0.0939		1.0709		0.9230	0.0836
	HA-IR 700 W	Logarithmic	0.0600		0.9355	0.0176	0.9260	0.0705
	HA-IR 1,000 W		0.0965		0.8495	0.0873	0.9070	0.0749
	HA-IR 1,600 W		0.0328		2.0565	-1.0341	0.9480	0.0685

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่ขึ้นด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.7 เส้นโค้งการอบแห้งจากข้อมูลการทดลอง (จุดข้อมูล) และจากข้อมูลการทำนายจากแบบจำลอง Page (เส้นกราฟ) สำหรับการอบแห้งข้าวกล้องงอกด้วยวิธีการการอบแห้งแบบ HA

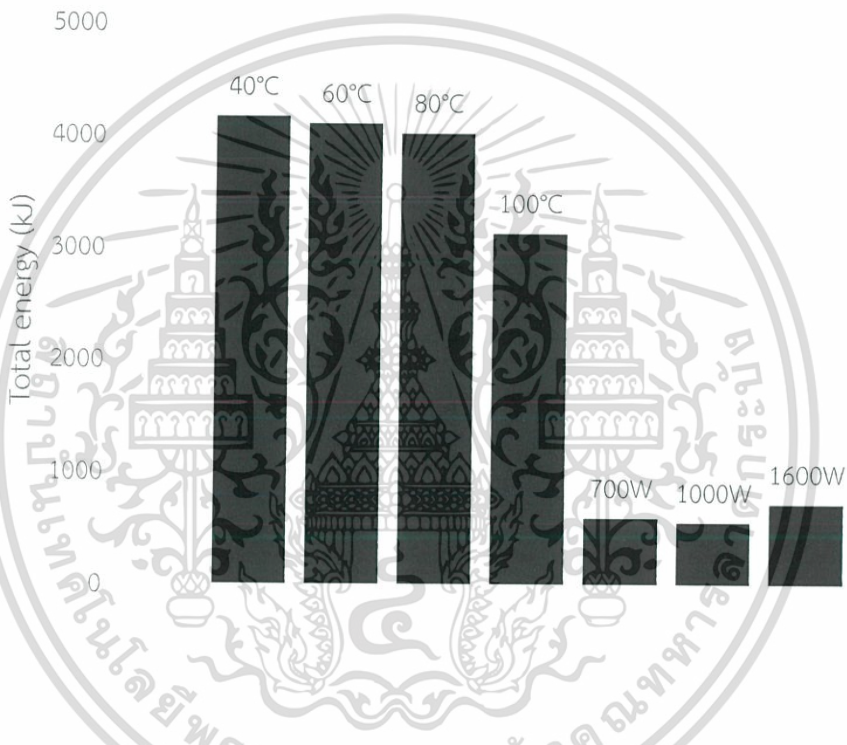


รูปที่ 4.8 เส้นโค้งการอบแห้งจากข้อมูลการทดลอง (จุดข้อมูล) และจากข้อมูลการทำนายจากแบบจำลอง Page (เส้นกราฟ) สำหรับการอบแห้งข้าวกล้องงอกด้วยวิธีการการอบแห้งแบบ HA-IR

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

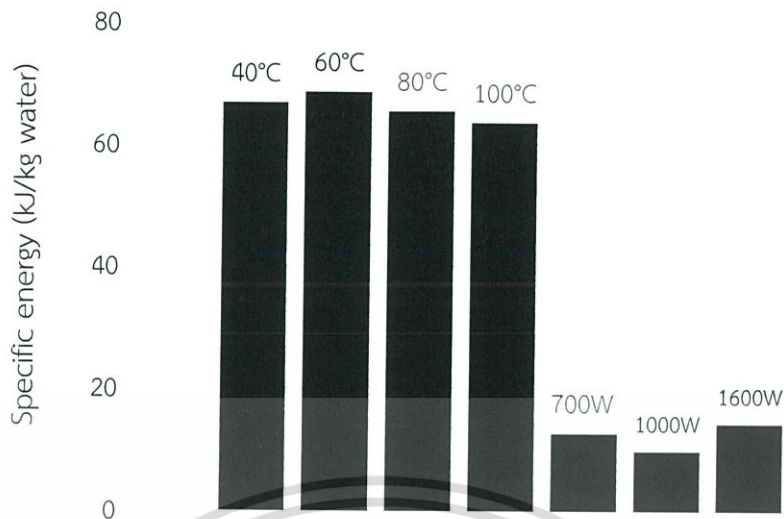
4.6 พลังงานที่ใช้ในการอบแห้งข้าวกล้องงอกด้วยวิธีการอบแห้งแบบลมร้อนและวิธีการอบแห้งแบบอินฟราเรดร่วมกับลมร้อน

จากการวัดพลังงานทั้งหมดที่ใช้ในการอบแห้งและพลังงานจำเพาะ เพื่อเปรียบเทียบวิธีการอบแห้งระหว่างการอบแห้งแบบลมร้อน (HA) และการอบแห้งแบบอินฟราเรดร่วมกับลมร้อน (HA-IR) การอบแห้งแบบ HA-IR มีการใช้พลังงานทั้งหมดในการอบแห้งอยู่ในช่วง 547-710 kJ และพลังงานจำเพาะอยู่ในช่วง 63.43-66.68 kJ/kg water ซึ่งใช้พลังงานน้อยกว่าการอบแห้งแบบ HA อย่างเห็นได้ชัดและน้อยกว่าการอบแห้งแบบ HA 3-4 เท่าโดยประมาณ ดังรูปที่ 4.9 และ รูปที่ 4.10



รูปที่ 4.9 กราฟแท่งเปรียบเทียบพลังงานที่ใช้ในการอบแห้งทั้งหมดที่สภาวะต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.10 กราฟแท่งเปรียบเทียบพลังงานจำเพาะที่ใช้ในการอบแห้งที่สภาวะต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง

จากการศึกษาการอบแห้งข้าวกล้องงอกด้วยวิธีการอบแห้งแบบอินฟราเรดร่วมกับลมร้อน (hot air-assisted infrared drying, HA-IR) โดยใช้อุณหภูมิลมร้อน 45°C และกำลังไฟฟ้าของหลอดรังสีอินฟราเรด 700, 1,000 และ 1,600 W เพื่อเปรียบเทียบกับวิธีการอบแห้งแบบลมร้อน (hot air drying, HA) โดยใช้อุณหภูมิมอบแห้ง 40, 60, 80 และ 100°C ทำการอบแห้งข้าวกล้องงอกที่มีความชื้นเริ่มต้น 30-35%wb จนมีความชื้นสุดท้ายเป็น 10-13%wb และได้ผลสรุปของการทดลองดังนี้

1. การอบแห้งแบบ HA-IR ให้อัตราการอบแห้งสูงสุดในการอบแห้งข้าวกล้องงอกอยู่ในช่วง 0.0147-0.0250 g/g dry matter•min ใช้เวลาในการอบแห้งอยู่ในช่วง 16-25 นาที ซึ่งแสดงลักษณะการอบแห้งที่ดีกว่าการอบแห้งแบบ HA อย่างชัดเจน โดยการอบแห้งแบบ HA ให้อัตราการอบแห้งสูงสุดอยู่ในช่วง 0.0009-0.0048 g/g dry matter•min และใช้เวลาในการอบแห้งอยู่ในช่วง 80-420 นาที
2. แบบจำลองที่เหมาะสมสำหรับการทำนายความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับเวลาในการอบแห้งทั้งแบบ HA-IR และ HA คือ แบบจำลองของ Page
3. การอบแห้งแบบ HA-IR ใช้พลังงานในการอบน้อยกว่าเมื่อเทียบกับการอบแห้งแบบ HA โดยพลังงานจำเพาะที่ใช้ในการอบแห้งแบบ HA-IR อยู่ในช่วง 9.72-14.23 kJ/kg water ในขณะที่การอบแห้งแบบ HA ใช้พลังงานจำเพาะอยู่ในช่วง 63.43-66.68 kJ/kg water
4. ข้าวกล้องงอกที่อบแห้งแบบ HA-IR มีความสามารถในการดูดซับน้ำดีกว่าข้าวกล้องงอกที่อบแห้งแบบ HA ส่วนเวลาที่ใช้ในการหุงสุกใช้เวลาเท่ากันในทุกตัวอย่าง คือ 20 นาที
5. การอบแห้งแบบ HA-IR มีปริมาณสารภามากกว่าเมื่อเทียบกับการอบแห้งแบบ HA โดยปริมาณสารภามากกว่าของการอบแห้งแบบ HA-IR มีค่าอยู่ในช่วง 16.68-16.77 mg/100g ในขณะที่การอบแห้งแบบ HA มีปริมาณสารภามากกว่าอยู่ในช่วง 15.32-16.16 mg/100g
6. ความแข็งและความเหนียวของข้าวกล้องที่ไม่ผ่านการเพาะงอกมีค่ามากที่สุด คือ 40.61 N และ 12.07 N ตามลำดับ ในขณะที่ข้าวกล้องงอกที่ผ่านการอบแห้งมีความแข็งและความเหนียวน้อยกว่าข้าวกล้องที่ไม่ผ่านการเพาะงอกโดยมีค่าอยู่ในช่วง 20.71-30.36 N และ 8.47-10.15 N ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- [1] ข้าวกล้องงอก “GABA rice”. วันที่ค้นข้อมูล 27 สิงหาคม 2557. [Online].
เข้าถึงได้จาก : <http://chusana.wordpress.com/ข้าวกล้องงอก>.
- [2] S. Sootjarit, W.Jittanit and V.Surojanametakul. 2011. EFFECTS OF DRYING METHOD ON THE NUTRITIONAL AND PHYSICAL QUALITY OF PRE-GERMINATED RICE. American Society of Agricultural and Biological Engineers. 2011(54/4), 1423-1430.
- [3] JI-HEE PARK, *et al.*, 2007. EFFECT OF FAR-INFRARED HEATER ON THE PHYSICOCHEMICAL CHARACTERISTICS OF GREEN TEA DURING PROCESSING. Journal of Food Biochemistry. 2009(33), 149-162.
- [4] จุฬาลักษณ์ แก้วประสิทธิ์. 2553. สารพัดประโยชน์จากข้าวกล้องงอก. [Online].
เข้าถึงได้จาก : <http://www.gotoknow.org/posts/361681>.
- [5] มหัทธกรย์แห่งน้ำมันรำข้าวและจมูกข้าว. วันที่ค้นข้อมูล 25 เมษายน พ.ศ. 2558. [Online].
เข้าถึงได้จาก : <http://webboard.news.sanook.com/forum/?topic=3352305>
- [6] สาร GABA คืออะไร. วันที่ค้นข้อมูล 25 เมษายน พ.ศ. 2558. [Online].
เข้าถึงได้จาก : http://www.kingpop1.com/Data_rice.html.
- [7] รังสีอินฟราเรด. วันที่ค้นข้อมูล 27 สิงหาคม 2557. [Online].
เข้าถึงได้จาก : http://www.cssckmutt.in.th/cssc/cssc_classroom/Solarenergy./Assignment/SolEn54/SolEn54_Doc/5_Infrared.pdf.
- [8] การถ่ายเทความร้อน. วันที่ค้นข้อมูล 30 เมษายน พ.ศ. 2558. [Online].
เข้าถึงได้จาก : <http://th.wikipedia.org/wiki/การถ่ายเทความร้อน>.
- [9] การถ่ายเทความร้อน. วันที่ค้นข้อมูล 1 พฤษภาคม พ.ศ. 2558. [Online].
เข้าถึงได้จาก : http://eng.sut.ac.th/me/2014/subject_mechanicalblue.php?page=HeatTransfer.
- [10] เทวีกา กิรติบุรณะ, วรณช ศรีเจษฎารักษ์. อิทธิพลของอุณหภูมิและเวลาในการอบแห้งต่อคุณภาพข้าวกล้องงอก. 2555. ภาควิชาเทคโนโลยีอาหาร คณะเทคโนโลยีมหาวิทยาลัยขอนแก่น.
- [11] JI-HEE PARK, JUNG-MIN LEE, YONG-JIN CHO, CHONG-TAI KIM, CHUL-JIN KIM, KI-CHANG NAM and SEUNG-CHEOL LEE1, 2007. Department of Food Science and Biotechnology Kyungnam University Masan 631-701, Republic of Korea.
- [12] สุภวรรณ ฐิระวณิชย์กุล, สากีนานา ลาแมปะ และ ยุทธนา ฐิระวณิชย์กุล. 2555. การอบแห้งขนุนด้วยพลังงานความร้อนร่วมของรังสีอินฟราเรด/ไมโครเวฟ และลมร้อน. สถานวิจัยเทคโนโลยีพลังงาน คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- [13] นุสรานาดี, ยุทธนา ฐิระวณิชย์กุล และ สุภวรรณ ฐิระวณิชย์กุล. 2555. การอบแห้งใบเตยด้วยรังสีอินฟราเรดร่วมกับลมร้อน. สถานวิจัยเทคโนโลยีพลังงาน คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

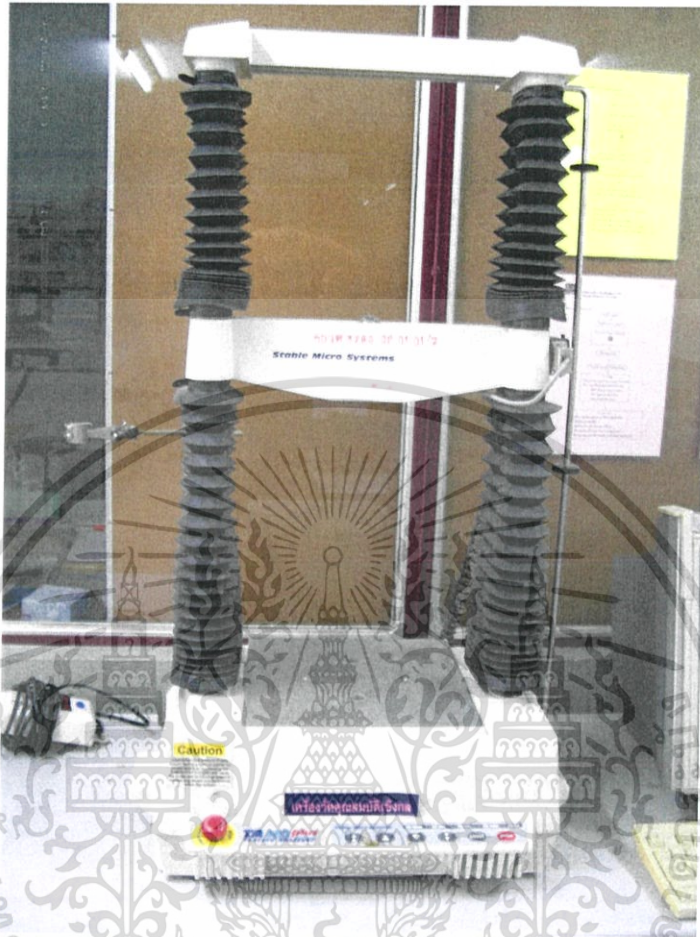
ภาคผนวก ก

ตารางที่ ก.1 ระยะเวลาในการดำเนินงานวิจัยในแต่ละขั้นตอนขั้นตอนการดำเนินงาน

ขั้นตอนดำเนินงาน	ปี / เดือน								
	พ.ศ.2557					พ.ศ.2558			
	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.
1.ศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องและจัดทำข้อเสนอโครงการ	↔								
2.ทดลองผลิตข้าวกล้องงอก		↔							
3.ทดลองอบแห้งข้าวกล้องงอกด้วยวิธีการอบแห้งแบบลมร้อนและเก็บข้อมูลลักษณะการอบแห้ง			↔						
4.ทดลองอบแห้งข้าวกล้องงอกด้วยวิธีการอบแห้งแบบอินฟราเรดร่วมกับลมร้อนและเก็บข้อมูลลักษณะการอบแห้ง				↔					
5.วิเคราะห์ข้อมูลลักษณะการอบแห้งพร้อมทั้งสร้างแบบจำลองการอบแห้ง						↔			
6.วิเคราะห์คุณภาพของข้าวกล้องงอก							↔		
7.สรุปผลการทดลอง และเขียนรายงานการวิจัย								↔	

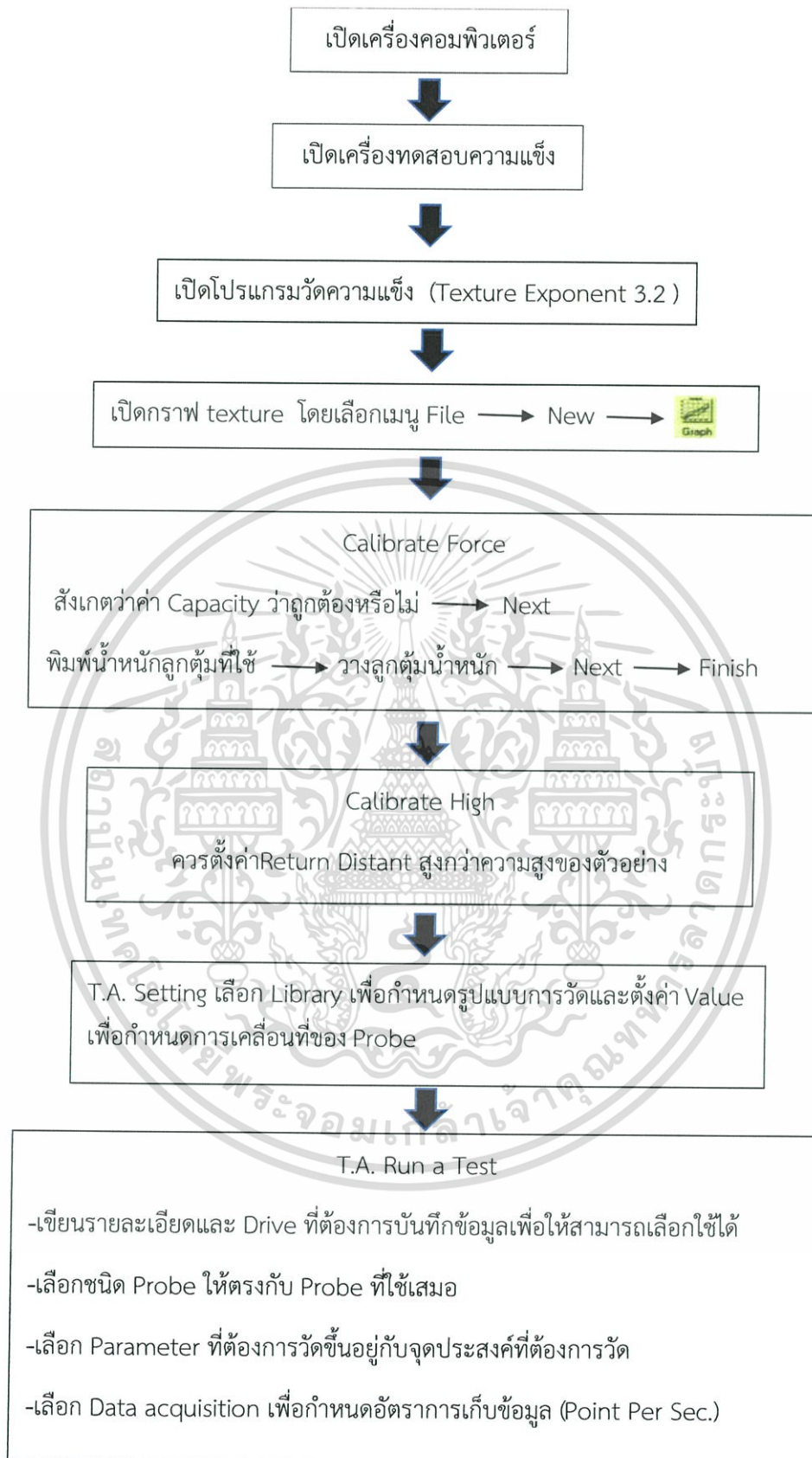
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข



รูปที่ ข.1 เครื่องทดสอบความแข็งและความเหนียวของข้าวหุงสุก (Texture Analyzer)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ข.2 ขั้นตอนการใช้โปรแกรมทดสอบความแข็ง (Texture exponent)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้