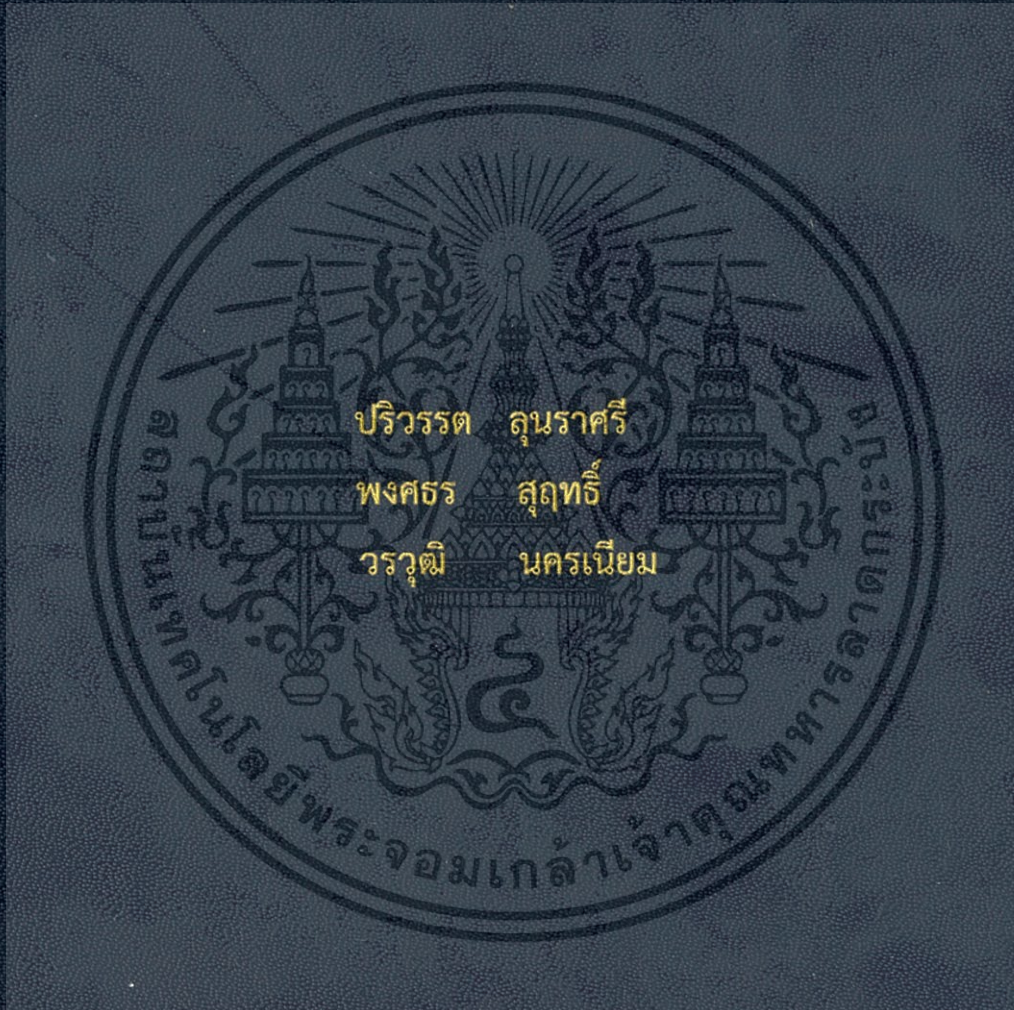


อิทธิพลของการอบแห้งรำข้าวอัดเม็ดด้วยวิธีการอบแห้งแบบอินฟราเรดสุญญากาศ
ต่อปริมาณและคุณภาพของน้ำมันรำข้าว

Effect of Vacuum – Infrared Drying of Rice Bran Pellet on Quantity
and Quality of Rice Bran Oil



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิศวกรรมเกษตร

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2557

อิทธิพลของการอบแห้งรำข้าวอัดเม็ดด้วยวิธีการอบแห้งแบบอินฟราเรดสุญญากาศต่อปริมาณ
และคุณภาพของน้ำมันรำข้าว

Effect of Vacuum-Infrared Drying of Rice Bran Pellet on Quantity and Quality of
Rice Bran Oil



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิศวกรรมเกษตร

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2557

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Effect of Vacuum-Infrared Drying of Rice Bran Pellet on Quantity and Quality of
Rice Bran Oil



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

ปริญญาานิพนธ์ปีการศึกษา 2557

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ใบรับรองปริญญาานิพนธ์

หัวข้อปริญญาานิพนธ์ อิทธิพลของการอบแห้งรำข้าวอัดเม็ดด้วยวิธีการอบแห้งแบบอินฟราเรด
สุญญากาศต่อปริมาณและคุณภาพของน้ำมันรำข้าว
Effect of Vacuum-Infrared Drying of Rice Bran Pellet on Quantity
and Quality of Rice Bran Oil

นักศึกษาผู้จัดทำ นายปวิวรรต ลุนราศรี รหัสนักศึกษา 54010795

นายพงศกร สุฤทธิ รหัสนักศึกษา 54010842



นายวรวิทย์ นครเนียม รหัสนักศึกษา 54011135

ปริญญา วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมเกษตร)

หลักสูตร วิศวกรรมเกษตร

สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล

ปีการศึกษา 2557

อาจารย์ผู้ควบคุมปริญญาานิพนธ์	ลายมือชื่อ
ดร.จิราพร ศรีภิญโญวณิชย์ จงยิ่งเจริญ	
อาจารย์ ภัทรชัย วิชัยยะ	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อปริญญานิพนธ์ อิทธิพลของการอบแห้งรำข้าวอัดเม็ดด้วยวิธีการอบแห้งแบบอินฟราเรด
สุญญากาศต่อปริมาณและคุณภาพของน้ำมันรำข้าว

นักศึกษาผู้จัดทำ นายปวิวรรต ลุนราศรี รหัสนักศึกษา 54010795
นายพงศกร สุฤทธิ รหัสนักศึกษา 54010842
นายวรุฒนิ นครเนียม รหัสนักศึกษา 54011135

อาจารย์ที่ปรึกษา ดร. จิราพร ศรีภิญโญวิชย์ จงยิ่งเจริญ

อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม อาจารย์ภัทรชัย วิชัยยะ

ปีการศึกษา 2557

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาอิทธิพลของการอบแห้งรำข้าวอัดเม็ดต่อคุณภาพของน้ำมันรำข้าวด้วยวิธีการอบแห้งแบบอินฟราเรดสุญญากาศ (vacuum-infrared drying, VIR) และหาสมการอบแห้งชั้นบางที่เหมาะสมสำหรับทำนายจลนพลศาสตร์การอบแห้งรำข้าวอัดเม็ด รวมถึงเปรียบเทียบพลังงานที่ใช้ในการอบแห้งรำข้าวอัดเม็ดระหว่างการอบแห้งแบบ VIR กับการอบแห้งแบบลมร้อน (hot-air drying, HA) รำข้าวอัดเม็ดที่มีความชื้นเริ่มต้นประมาณ 18%wb ถูกอบแห้งจนมีความชื้นสุดท้ายประมาณ 9%wb โดยกำลังไฟฟ้าของหลอดอินฟราเรด คือ 700, 1000, 1600 W และความดันสัมบูรณ์ของห้องอบแห้ง คือ 5 kPa จากการทดลอง กำลังไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นทำให้ระยะเวลาในการอบแห้งลดลงเป็น 40, 21, 14 นาที ตามลำดับ และอัตราการอบแห้งเฉลี่ยเพิ่มขึ้น 0.0022, 0.0044, 0.0068 g water/g dry matter·min ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับ การอบแห้งแบบ HA ที่อุณหภูมิ 50, 80, 110, 140 °C การอบแห้งแบบ VIR ให้ลักษณะการอบแห้งที่ดีกว่า เมื่อเปรียบเทียบค่าความเป็นกรดและปริมาณน้ำมันที่สกัดจากรำข้าวอัดเม็ดที่ผ่านการอบแห้งในสภาวะต่างๆ ปริมาณน้ำมันที่สกัดได้มีค่าอยู่ในช่วง 21-23% ในขณะที่ค่าความเป็นกรดของน้ำมันรำข้าวจากการอบแห้งรำข้าวอัดเม็ดด้วยวิธีการอบแห้งแบบ VIR ทุกสภาวะให้ผลใกล้เคียงกับวิธีการอบแห้งแบบ HA ที่อุณหภูมิ 50 และ 80 °C แต่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการอบแห้งเป็น 110 และ 140 °C ค่าความเป็นกรดมีค่าสูงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ แบบจำลองของ Henderson and Pabis สามารถทำนายการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนความชื้นตามเวลาในการอบแห้งสำหรับการอบแห้งรำข้าวอัดเม็ดทั้งแบบ VIR และ HA ได้ดีที่สุด พลังงานที่ใช้ในการอบแห้งแบบ VIR ที่กำลังไฟฟ้า 700-1600 W ใช้พลังงานทั้งหมด 1.17-3.18 MJ และพลังงานจำเพาะ 96.66-198.75 MJ/kg water ในขณะที่การอบแห้งแบบ HA ที่อุณหภูมิ 50-140 °C ใช้พลังงานทั้งหมด 1.52-2.03 MJ และพลังงานจำเพาะ 35.58-56.39 MJ/kg water

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis Title	Effect of Vacuum-Infrared Drying of Rice Bran Pellet on Quantity and Quality of Rice Bran Oil	
Authors	MR. Pariwat Lunrasri	54010795
	MR. Pongsakorn Surit	54010842
	MR. Worawut Nakornnium	54011135
Thesis Advisor	Jiraporn Sripinyowanich Jongyingcharoen, Ph.D.	
Co-advisor	MR. Patharachai Wichaiya	
Year	2014	

Abstract

The objective of this research was to investigate the effect of rice bran pellet (RBP) drying on quality of rice bran oil. The drying method were vacuum-infrared (VIR) drying and hot air (HA) drying. Suitable drying models for drying of RBP and energy consumption during drying were determined. RBP with an initial moisture content of 18%wb was dried to the final moisture content of 9%wb. For VIR drying, the infrared powers were 700, 1000, and 1600 W and absolute pressure in the drying chamber was 5 kPa. The decreased drying time of 40, 21 and 14 min and the increased average drying rate of VIR were observed when the infrared power increased. As compared to HA drying at 50, 80, 110 and 140 °C, VIR drying provided better results of drying characteristic of RBP drying. In term of quality of dried RBP, oil content was in the range of 21-23%. Acid values of rice bran oil obtained by VIR drying at all conditions were comparable to those obtained by HA drying at 50 and 80 °C, while high drying temperature of 110 and 140 °C significantly provided higher acid values. Henderson and Pabis model was the most suitable drying model for both VIR and HA drying of RBP. Total energy consumptions of VIR drying at 700-1600 W and Ha drying at 50-140 °C were 1.17-3.18 MJ and 1.52-2.03 MJ, respectively, of which specific energy consumptions were 96.66-198.75 MJ/kg water and 35.58-56.39 MJ/kg water, respectively.

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้ด้วย ความกรุณาจากอาจารย์ที่ปรึกษา ดร.จิราพร ศรีภิญโญวณิช จงยิ่งเจริญ ที่คอยให้คำแนะนำและความช่วยเหลือ รวมไปถึงอุปกรณ์ต่างๆ ตลอดจนให้ความรู้และประสบการณ์ที่ดีแก่ผู้วิจัยตลอดมา จนทำให้ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จ ลุล่วงไปด้วยดี

ขอขอบคุณ บริษัท ซีอีโอ อกริฟูด จำกัด จ.สิงห์บุรี ที่ให้การสนับสนุนการทดลอง วัสดุ อุปกรณ์และเอื้อเฟื้อสถานที่สำหรับการทำวิจัย

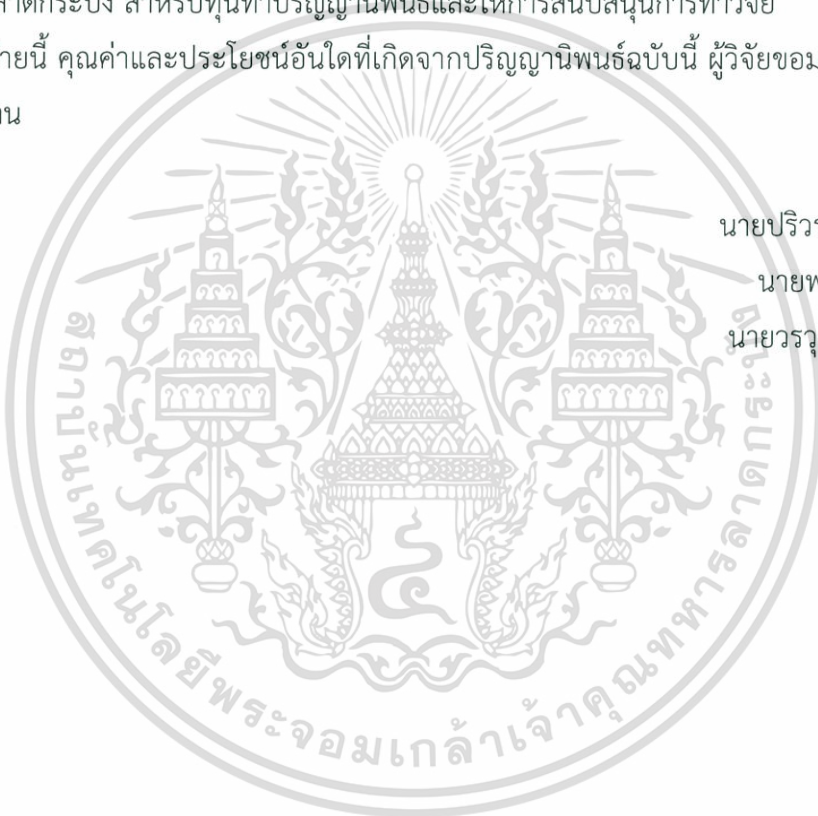
ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมเกษตร คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหารลาดกระบัง สำหรับทุนทำปริญญาานิพนธ์และให้การสนับสนุนการทำวิจัย

สุดท้ายนี้ คุณค่าและประโยชน์อันใดที่เกิดจากปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้วิจัยขอมอบให้แก่ผู้มี พระคุณทุกท่าน

นายปวิรรต ลุนราศรี

นายพงศกร สุฤทธิ

นายวรวิทย์ นครเนียม



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ช
สารบัญรูป	ซ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและที่มา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย	2
1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ	2
1.5 วิธีดำเนินงาน	3
บทที่ 2 ทฤษฎี และหลักการ	4
2.1 รำข้าว	4
2.1.1 คำจำกัดความและชนิดของรำข้าว	4
2.1.2 องค์ประกอบทางเคมีในรำข้าว	4
2.1.3 วิธีการตรวจสอบคุณภาพของรำข้าวละเอียด	5
2.2 น้ำมันรำข้าว	5
2.1.1 องค์ประกอบทางเคมีในน้ำมันรำข้าว	5
2.1.2 ประโยชน์ของน้ำมันรำข้าว	6
2.3 กระบวนการผลิตน้ำมันรำข้าว	6
2.3.1 วิธีการสกัดน้ำมันจากรำข้าว	8
2.3.2 วิธีการกรองน้ำมันรำข้าว	9
2.4 คุณภาพของน้ำมันรำข้าว	10
2.5 ทฤษฎีพื้นฐานการถ่ายเทความร้อน	12
2.6 การอบแห้งผลิตผลทางการเกษตรโดยใช้รังสีอินฟราเรด	13

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า	
2.6.1	ทฤษฎีรังสีอินฟราเรด	13
2.6.2	การถ่ายเทความร้อนระหว่างรังสีอินฟราเรดกับวัสดุเกษตร	15
2.6.3	การอบแห้งผลิตผลเกษตรด้วยรังสีอินฟราเรดโดยตรง	16
2.6.4	การอบแห้งผลิตผลเกษตรด้วยรังสีอินฟราเรดร่วมกับเทคนิคอื่น	17
2.7	งานวิจัยเกี่ยวกับการอบแห้งรำข้าว	18
2.8	งานวิจัยเกี่ยวกับรังสีอินฟราเรดที่มีผลต่อสาระสำคัญของผลผลิตทางการเกษตรระหว่างกระบวนการอบแห้ง	20
2.8.1	งานวิจัยเกี่ยวกับรังสีอินฟราเรดสุญญากาศในการรักษาสารคลอโรฟิลล์ในต้นหอมเวลล์	20
2.8.2	งานวิจัยเกี่ยวกับรังสีอินฟราเรดในการเพิ่มปริมาณสารเคมีในใบชาเขียว	20
บทที่ 3	การดำเนินงานวิจัย	21
3.1	ตัวอย่างที่ใช้ในการทดลอง	21
3.2	แผนการทดลอง	21
3.3	เครื่องอบแห้งแบบอินฟราเรดสุญญากาศ	23
3.4	การทดลองอบแห้ง	24
3.4.1	การอบแห้งแบบลมร้อน	24
3.4.2	การอบแห้งแบบอินฟราเรดสุญญากาศ	24
3.5	การวิเคราะห์ปริมาณความชื้น	25
3.6	การวิเคราะห์ข้อมูลคุณลักษณะการอบแห้ง	27
3.6.1	อัตราส่วนความชื้น	27
3.6.2	อัตราการอบแห้ง	27
3.7	การวัดอุณหภูมิของวัสดุขณะอบแห้ง	27
3.7.1	การวัดอุณหภูมิขณะอบแห้งแบบลมร้อน	27
3.7.2	การวัดอุณหภูมิขณะอบแห้งแบบอินฟราเรดสุญญากาศ	28
3.8	การสร้างแบบจำลองการอบแห้งรำข้าวอัดเม็ด	28
3.9	การวิเคราะห์คุณภาพ	29

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.9.1 การสกัดน้ำมันจากรำข้าวอัดเม็ด	29
3.9.2 ค่าความเป็นกรดในน้ำมัน	32
3.10 การวิเคราะห์ค่าพลังงานที่ใช้ในการอบแห้ง	33
3.11 การวิเคราะห์ข้อมูลเชิงสถิติ	34
บทที่ 4 ผลการทดลอง	35
4.1 การอบแห้งรำข้าวอัดเม็ดด้วยวิธีการอบแห้งแบบลมร้อน	35
4.1.1 เวลาที่ใช้ในการอบแห้ง อัตราการอบแห้งและอุณหภูมิสุดท้ายที่ผิวของรำข้าวอัดเม็ด	35
4.1.2 แบบจำลองการอบแห้งของการอบแห้งรำข้าวอัดเม็ดด้วยวิธีการอบแห้งแบบลมร้อน	37
4.2 การอบแห้งรำข้าวอัดเม็ดด้วยวิธีการอบแห้งแบบอินฟราเรดสุญญากาศ	40
4.2.1 เวลาที่ใช้ในการอบแห้ง อัตราการอบแห้งและอุณหภูมิสุดท้ายที่ผิวของรำข้าวอัดเม็ด	40
4.2.2 แบบจำลองการอบแห้งของการอบแห้งรำข้าวอัดเม็ดด้วยวิธีการอบแห้งแบบอินฟราเรดสุญญากาศ	42
4.3 การเปรียบเทียบลักษณะการอบแห้งของรำข้าวอัดเม็ดด้วยวิธีการอบแห้งแบบลมร้อนและการอบแห้งแบบอินฟราเรดสุญญากาศ	44
4.4 การเปรียบเทียบคุณภาพของน้ำมันจากรำข้าวอัดเม็ดที่อบแห้งด้วยวิธีการอบแห้งแบบลมร้อนและการอบแห้งแบบอินฟราเรดสุญญากาศ	45
4.5 การเปรียบเทียบพลังงานทั้งหมดและพลังงานจำเพาะที่ใช้ในการอบแห้งรำข้าวอัดเม็ดที่อบแห้งด้วยวิธีการอบแห้งแบบลมร้อนและการอบแห้งแบบอินฟราเรดสุญญากาศ	46
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง	48
เอกสารอ้างอิง	50

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

	หน้า	
ตารางที่ 2.1	องค์ประกอบทางเคมีของรำข้าว (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักแห้ง)	5
ตารางที่ 2.2	องค์ประกอบของน้ำมันรำข้าวดิบ	6
ตารางที่ 2.3	องค์ประกอบของกรดไขมันในน้ำมันรำข้าว	6
ตารางที่ 2.4	คุณสมบัติทางกายภาพและค่ามาตรฐานของน้ำมันรำข้าวดิบ-น้ำมันรำข้าวบริสุทธิ์	11
ตารางที่ 2.5	การอบรำข้าวโดยวิธีและสภาวะความร้อนต่างๆ เปรียบเทียบกับปริมาณความชื้นและปริมาณน้ำมันที่สกัดได้	19
ตารางที่ 2.6	คุณสมบัติทางเคมีของรำข้าวที่ทำให้ไขมันด้อยคุณภาพหลังจากผ่านการอบโดยวิธีต่างๆ	19
ตารางที่ 2.7	สารสำคัญในรำข้าวหลังจากผ่านการอบโดยวิธีต่างๆ	19
ตารางที่ 3.1	แสดงการสุมตัวอย่างของการอบแห้งข้าวเปลือกที่เวลาต่างๆของแต่ละอุณหภูมิ	24
ตารางที่ 3.2	แสดงการสุมตัวอย่างของการอบแห้งรำข้าวอัดเม็ดที่เวลาต่างๆของแต่ละกำลังไฟ	25
ตารางที่ 3.3	รูปแบบสมการอบแห้งแบบชั้นบาง	29
ตารางที่ 4.1	ระยะเวลาที่ใช้อบแห้ง DR เฉลี่ย และอุณหภูมิสุดท้ายที่ผิววัสดุที่ได้จากการอบแห้งแบบ HA ที่อุณหภูมิต่างๆ	35
ตารางที่ 4.2	ค่าคงที่และสัมประสิทธิ์ของแบบจำลองจากข้อมูลการอบแห้งรำข้าวอัดเม็ดด้วยวิธีการอบแห้งแบบ HA	36
ตารางที่ 4.3	เวลาที่ใช้อบแห้ง DR เฉลี่ย และอุณหภูมิสุดท้ายที่ผิววัสดุที่ได้จากการอบแห้งแบบ VIR ที่กำลังไฟฟ้าต่างๆ	41
ตารางที่ 4.4	ค่าคงที่และสัมประสิทธิ์แบบจำลองของการอบแห้งแบบลมร้อน	40
ตารางที่ 4.5	ระยะเวลาที่ใช้อบแห้ง DR เฉลี่ย และอุณหภูมิสุดท้ายที่ผิวรำข้าวอัดเม็ดจากวิธีการอบแห้งแบบ HA และการอบแห้งแบบ VIR	45
ตารางที่ 4.6	ค่าความเป็นกรดและปริมาณน้ำมันในรำข้าวอัดเม็ดที่อบแห้งด้วยวิธีการอบแห้งแบบ HA และ VIR	43

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

	หน้า	
รูปที่ 2.1	องค์ประกอบของเมล็ดข้าว	4
รูปที่ 2.2	รำหยาบ	4
รูปที่ 2.3	รำละเอียด	4
รูปที่ 2.4	แผนผังกระบวนการผลิตน้ำมันรำข้าว	7
รูปที่ 2.5	การสกัดด้วยตัวทำละลายระบบไอน้ำแรงสูง	8
รูปที่ 2.6	เครื่องสกัดแบบบีบเย็น	8
รูปที่ 2.7	ช่วงความยาวคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีคุณสมบัติเป็นรังสีความร้อน	13
รูปที่ 2.8	แสดงค่าอุณหภูมิที่ตำแหน่งความยาวคลื่นสูงสุดจากกับค่าพลังงานจากการแผ่รังสีอินฟราเรดของวัตถุดิบ	15
รูปที่ 2.9	ความสัมพันธ์ของการดูดซับคลื่นอินฟราเรดของน้ำในวัตถุ	16
รูปที่ 2.10	ตัวอย่างเครื่องอบแห้งที่ใช้อุปกรณ์กำเนิดรังสีอินฟราเรดให้ความร้อน	17
รูปที่ 2.11	ตัวอย่างเครื่องอบแห้งแบบผสมระหว่างการใช้อินฟราเรดกับเทคนิคอบแห้งต่างๆ	18
รูปที่ 2.12	ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสารคลอโรฟิลล์ต่อกำลังไฟฟ้า	20
รูปที่ 3.1	ตัวอย่างรำข้าวอัดเม็ดจากบริษัท ซีอีโอ อกริฟู๊ด จำกัด จ.สิงห์บุรี	21
รูปที่ 3.2	แผนการทดลองการอบแห้ง	22
รูปที่ 3.3	เครื่องอบแห้งแบบอินฟราเรดสุญญากาศและถาดอบแห้ง	23
รูปที่ 3.4	การเตรียมตัวอย่างรำข้าวอัดเม็ดก่อนเข้าตู้อบ	24
รูปที่ 3.5	การเตรียมตัวอย่างรำข้าวอัดเม็ดก่อนเข้าเครื่องอบแห้งแบบ VIR	25
รูปที่ 3.6	การเก็บข้อมูลน้ำหนักเปียก	25
รูปที่ 3.7	โถดูดความชื้นและการเก็บข้อมูลน้ำหนักตัวอย่างแห้งบนน้ำหนักของกระป๋องอลูมิเนียมแห้ง	26
รูปที่ 3.8	การวัดอุณหภูมิที่ผิวขณะทำการอบแห้งแบบ HA	28
รูปที่ 3.9	การวัดอุณหภูมิที่ผิวขณะทำการอบแห้งแบบ VIR	28
รูปที่ 3.10	แสดงกระบวนการสกัดน้ำมันเพื่อวิเคราะห์ปริมาณน้ำมัน	32
รูปที่ 3.11	กระบวนการวิเคราะห์ค่ากรดในน้ำมัน	33
รูปที่ 3.12	เครื่อง DIGITAL CLAMP METER และวิธีการวัดกระแสไฟฟ้าในระหว่างอบแห้ง	34
รูปที่ 4.1	ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาในการอบแห้งกับความชื้นของรำข้าวอัดเม็ดเมื่ออบแห้งแบบ HA ที่อุณหภูมิต่างๆ	36

	สารบัญรูป (ต่อ)	หน้า
รูปที่ 4.2	ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาในการอบแห้งกับอุณหภูมิที่ผิวรำข้าวอัดเม็ดเมื่ออบแห้งแบบ HA ที่อุณหภูมิต่างๆ	36
รูปที่ 4.3	ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาในการอบแห้งกับอัตราส่วนความชื้นของรำข้าวอัดเม็ดเมื่ออบแห้งแบบ HA ที่อุณหภูมิต่างๆ	37
รูปที่ 4.4	ความสัมพันธ์ระหว่าง k กับอุณหภูมิ (T)	38
รูปที่ 4.5	ความสัมพันธ์ระหว่าง a กับอุณหภูมิ (T)	39
รูปที่ 4.6	ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาในการอบแห้งกับอัตราส่วนความชื้นของรำข้าวอัดเม็ดเมื่ออบแห้งแบบ HA ที่อุณหภูมิต่างๆ: ข้อมูลแบบจุด คือ ข้อมูลจากการทดลอง และข้อมูลแบบเส้น คือ ข้อมูลจากการทำนายจากสมการทั่วไป	40
รูปที่ 4.7	ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาในการอบแห้งกับความชื้นของรำข้าวอัดเม็ดเมื่ออบแห้งแบบ VIR ที่กำลังไฟต่างๆ	41
รูปที่ 4.8	ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาในการอบแห้งกับอุณหภูมิที่ผิวรำข้าวอัดเม็ดเมื่ออบแห้งแบบ VIR ที่กำลังไฟต่างๆ	41
รูปที่ 4.9	ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาในการอบแห้งกับอัตราส่วนความชื้นของรำข้าวอัดเม็ดด้วยวิธีการอบแห้งแบบ VIR ที่กำลังไฟต่างๆ	42
รูปที่ 4.10	ความสัมพันธ์ระหว่าง k กับ กำลังไฟฟ้า (W)	43
รูปที่ 4.11	ความสัมพันธ์ระหว่าง a กับ กำลังไฟฟ้า (W)	43
รูปที่ 4.12	ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาในการอบแห้งกับอัตราส่วนความชื้นของรำข้าวอัดเม็ดเมื่ออบแห้งแบบ VIR ที่อุณหภูมิต่างๆ: ข้อมูลแบบจุด คือ ข้อมูลจากการทดลอง และข้อมูลแบบเส้น คือ ข้อมูลจากการทำนายจากสมการทั่วไป	44
รูปที่ 4.13	พลังงานรวมที่ใช้ในการอบแห้งที่ใช้ในการอบแห้งที่สภาวะต่างๆ	47
รูปที่ 4.14	พลังงานจำเพาะที่ใช้ในการอบแห้งที่สภาวะต่างๆ	47

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มา

รำข้าวเป็นผลพลอยได้จากกระบวนการสีข้าวที่มีคุณค่าทางโภชนาการสูง ในปัจจุบันมีการนำรำข้าวไปแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์หลายชนิด เช่น น้ำมันรำข้าว ขนมขบเคี้ยว อาหารสัตว์ เป็นต้น ในส่วนของน้ำมันรำข้าวจัดเป็นน้ำมันบริโภคที่มีราคาสูง เป็นกรดไขมันคุณภาพดี โดยมีปริมาณกรดไขมันไม่อิ่มตัวถึง 18% ซึ่งแยกเป็นกรดไขมันไม่อิ่มตัวเชิงเดี่ยว (monounsaturated fatty acid: MUFA) 45% และกรดไขมันไม่อิ่มตัวเชิงซ้อน (polyunsaturated fatty acid: PUFA) 37% นอกจากนี้ น้ำมันรำข้าวยังมีสารต้านอนุมูลอิสระที่เป็นประโยชน์ต่อร่างกายหลายชนิด เช่น วิตามินอี ในกลุ่มโทโคฟีรอล ประมาณ 19-40%, กลุ่มโทโคไตรอีนอล 51-81% และโอไรซานอล (oryzanol) ซึ่งโอไรซานอลสามารถต้านอนุมูลอิสระได้ดีกว่าวิตามินอีถึง 6 เท่า [1]

ในกระบวนการผลิตน้ำมันรำข้าว ในขั้นต้น รำข้าวต้องถูกบ้อนเข้าสู่กระบวนการอัดเม็ดด้วยไอน้ำ (steam cooking) ต่อด้วยกระบวนการอบแห้ง แล้วจึงสามารถนำรำข้าวอัดเม็ดที่ได้ไปสกัดด้วยตัวทำละลายเฮกเซน น้ำมันรำข้าวที่ผสมกับเฮกเซน เรียกว่า miscella ซึ่งต้องนำมากลั่นเอาตัวทำละลายออก จึงจะได้น้ำมันรำข้าว อย่างไรก็ตาม รำข้าวที่ผ่านกระบวนการอัดเม็ดด้วยไอน้ำจะมีความชื้นสูง ซึ่งเสี่ยงต่อความหืนของน้ำมัน โดยความหืนของน้ำมันเกิดจาก 1) ปฏิกิริยาออกซิเดชันของไขมันและน้ำมันกับออกซิเจนในอากาศทำให้น้ำมันมีกลิ่นและรสชาติผิดปกติ และ 2) ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสโดยมีเอนไซม์ไลเปสที่มีอยู่ในอาหารเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาทำให้เกิดการสลายของโมเลกุลไตรกลีเซอไรด์ได้เป็นกรดไขมันอิสระ ซึ่งกรดไขมันอิสระจะระเหยเป็น short chain fatty acid ทำให้เกิดกลิ่นหืน [2] ดังนั้น การลดความชื้นของรำข้าวอัดเม็ดถือเป็นกระบวนการที่สำคัญในการป้องกันการเสื่อมคุณภาพของรำข้าวและน้ำมันรำข้าว การอบแห้งรำข้าวอัดเม็ดตามปกติจากกระบวนการในโรงงานโดยอ้างอิงจาก บริษัท ซีอีโอ อกริฟูด จำกัด จังหวัดสิงห์บุรี จะใช้วิธีการอบแห้งแบบลมร้อนที่อุณหภูมิ 140 °C เป็นเวลา 30 นาที ซึ่งถือเป็นการอบแห้งที่อุณหภูมิสูงและใช้เวลานาน รวมถึงสิ้นเปลืองพลังงานในการอบแห้งมากด้วย งานวิจัยนี้จึงมีแนวคิดที่จะศึกษาแนวทางในการปรับปรุงกระบวนการอบแห้งรำข้าวอัดเม็ดโดยมุ่งเน้นที่การใช้รังสีอินฟราเรด

การใช้รังสีอินฟราเรดในการอบแห้งนั้นเป็นเทคโนโลยีที่กำลังได้รับความสนใจมากขึ้น ในการประยุกต์ใช้กับงานด้านอุตสาหกรรมเกษตร เนื่องจากการอบแห้งแบบอินฟราเรดนั้นจะทำให้วัสดุที่นำมาอบคงคุณสมบัติทางกายภาพได้ดีกว่าการอบแห้งด้วยการพาความร้อนเนื่องจาก รังสีอินฟราเรดสามารถแผ่รังสีทะลุเข้าไปในเนื้อวัสดุ ส่งผลให้โมเลกุลของน้ำในเนื้อวัสดุสั่นและเกิดความร้อนซึ่งจะทำให้อุณหภูมิในเนื้อวัสดุสูงกว่าอุณหภูมิที่ผิว ส่งผลให้ผิวภายนอกของวัสดุที่นำมาอบแห้งไม่เหี่ยวแห้งและยังคงสมบัติของผลิตภัณฑ์ไว้ใกล้เคียงกับวัตถุดิบตั้งต้น [3] นอกจากนี้การอบแห้งแบบอินฟราเรดอาจช่วยรักษาและเพิ่มปริมาณสารสำคัญที่มีอยู่ในน้ำมัน จากงานวิจัยของ S. Mongpraneet, et al. การอบแห้งต้นหอมเวสต์ ด้วยวิธีการอบแห้งแบบอินฟราเรดสุญญากาศทำให้ปริมาณสารคลอโรฟิลล์ในต้นหอมเพิ่มสูงขึ้น [4] อีกทั้ง เมื่ออบแห้งใบชาเขียวด้วยวิธีอินฟราเรดร่วมลมร้อน พบว่า ปริมาณสารสำคัญในใบชาเขียวอบแห้ง เช่น สารฟีนอล, ฟลาโวนอยด์, วิตามินซี เป็นต้น [5] งานวิจัยนี้จึงมีแนวคิดในการใช้รังสีอินฟราเรดไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อินฟราเรดในการอบแห้งรำข้าวอัดเม็ดเพื่อช่วยรักษาคุณภาพของน้ำมันรำข้าว โดยมีการนำเทคนิคการอบแห้งที่สภาวะสูญญากาศรวมด้วยเพื่อช่วยให้น้ำในเนื้อวัสดุระเหยได้ที่อุณหภูมิต่ำ และช่วยเพิ่มการถ่ายเทความร้อนจากเนื้อวัสดุ [3]

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นศึกษาอิทธิพลของวิธีการอบแห้งแบบอินฟราเรดสูญญากาศ (vacuum-infrared drying, VIR) ต่อคุณภาพของน้ำมันรำข้าวและปริมาณน้ำมันรำข้าว โดยเปรียบเทียบผลกับการอบแห้งแบบลมร้อน (hot air drying, HA) โดยมีสมมุติฐานว่าการอบแห้งแบบ VIR จะได้น้ำมันรำข้าวที่มีคุณภาพดีขึ้น งานวิจัยนี้ได้ดำเนินการศึกษาลักษณะการอบแห้งรำข้าวอัดเม็ดด้วยวิธีการอบแห้งแบบ VIR และ HA อีกทั้ง ยังศึกษาการสร้างแบบจำลองที่เหมาะสมสำหรับการอบแห้งรำข้าวอัดเม็ดทั้งการอบแห้งแบบ VIR และ HA และมีการเปรียบเทียบพลังงานที่ใช้ในระหว่างการอบแห้งแบบ VIR และ HA ด้วย

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาอิทธิพลของวิธีการอบแห้ง (วิธีการอบแห้งแบบ VIR และ HA) ต่อคุณภาพของรำข้าวและปริมาณน้ำมันรำข้าว

1.2.2 เพื่อสร้างแบบจำลองการอบแห้งสำหรับการอบแห้งรำข้าวอัดเม็ดด้วยวิธีการอบแห้งแบบ VIR และ HA

1.2.3 เพื่อเปรียบเทียบพลังงานที่ใช้ในการอบแห้งรำข้าวอัดเม็ดระหว่างวิธีการอบแห้ง VIR และ HA

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1.3.1 ตัวอย่างรำข้าวที่ใช้ในการศึกษา คือ รำข้าวอัดเม็ดจากบริษัท ซีอีโอ อกริฟูด จำกัด จ.สิงห์บุรี

1.3.2 เครื่องอบแห้งที่ใช้ในการทดลองเป็นเครื่องระดับห้องปฏิบัติการ

1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 ได้วิธีการและสภาวะในการอบแห้งที่เหมาะสมสำหรับการปรับปรุงคุณภาพของรำข้าวอัดเม็ดเพื่อสกัดน้ำมัน

1.4.2 ได้แบบจำลองการอบแห้งที่เหมาะสมสำหรับการอบแห้งรำข้าวด้วยวิธีการอบแห้งแบบ VIR และ HA

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.5 วิธีการดำเนินงาน

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.	พ.ค.
1. ศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องและจัดทำข้อเสนอโครงการ										
2. ดูกงานการผลิตรำข้าวอัดเม็ดและน้ำมันรำข้าวจากโรงงาน										
3. การทดลองอบแห้งแบบ HA พร้อมทั้งเก็บข้อมูล										
4. การทดลองอบแห้งแบบ VIR พร้อมทั้งเก็บข้อมูล										
5. นำข้อมูลมาวิเคราะห์ลักษณะการอบแห้งและสร้างแบบจำลองการอบแห้ง										
6. วิเคราะห์คุณภาพและปริมาณน้ำมันของตัวอย่างอบแห้ง										
7. สรุปและเขียนรายงาน										

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

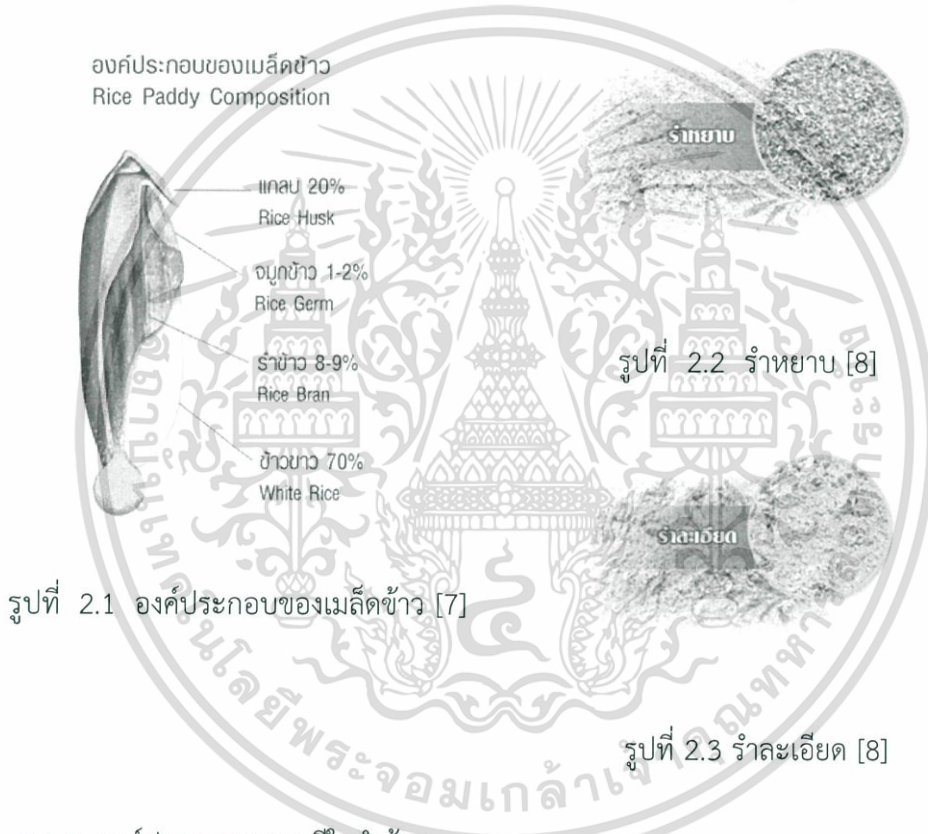
บทที่ 2

ทฤษฎีและหลักการ

2.1 รำข้าว

2.1.1 คำจำกัดความและชนิดของรำข้าว

รำข้าว มีลักษณะเป็นผงที่ได้จากการขัดข้าวกล้องให้เป็นข้าวสาร รำข้าวเป็นชั้นเยื่อหุ้มเมล็ดที่หุ้มข้าวขาวโดยในกระบวนการสีข้าวจะได้รำข้าวออกมาจาก 2 ขั้นตอน คือ การขัดเมล็ดข้าวกล้อง จะได้รำหยาบ (bran) และการขัดข้าวและขัดมัน จะได้รำละเอียด (polish) [6] ดังรูปที่ 2.1-2.3



2.1.2 องค์ประกอบทางเคมีในรำข้าว

รำข้าวมีองค์ประกอบพื้นฐานทางเคมีที่สำคัญดังแสดงในตารางที่ 2.1 โดยพบว่าในรำข้าวจะมีคาร์โบไฮเดรตเป็นองค์ประกอบหลัก 25-43% รองลงมาคือ ไขมัน 13-20% โปรตีน 12-14% เกล็ด 12% และกากใย 8-14% องค์ประกอบดังกล่าวทำให้รำข้าวถูกนำมาใช้เป็นวัตถุดิบในการสกัดน้ำมันรำข้าว และกากรำข้าวหลังจากสกัดน้ำมัน ซึ่งยังคงมีคาร์โบไฮเดรตและโปรตีนสูงอยู่ มักถูกนำไปผลิตเป็นอาหารสัตว์และผลิตเป็นโปรตีนเข้มข้นด้วย [9]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.1 องค์ประกอบทางเคมีของรำข้าว (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักแห้ง) [9]

ชนิดของรำข้าว	โปรตีน	ไขมัน	เถ้า	กากใย	คาร์โบไฮเดรต	ผู้วิจัย
รำข้าว	12.0	13.7	12.1	14.4	25.4	Connor [1976]
รำข้าว	14.1	20.9	12.8	8.4	43.5	Prakash [1991]
กากรำข้าว	18.3	5.4	11.2	8.6	31.6	Connor [1976]
กากรำข้าว	18.2	1.6	15.3	10.5	54.3	Prakash [1991]
กากรำข้าว	12.8	7.0	8.9	8.2	58.2	Youssef [1974]

2.1.3 วิธีการตรวจสอบคุณภาพของรำข้าวละเอียด

จากรายงานของการตรวจสอบคุณภาพวัตถุดิบอาหารสัตว์ [10] วิธีการตรวจสอบคุณภาพของรำข้าวละเอียดสามารถดำเนินการได้ 3 วิธีหลักๆ ได้แก่ วิธีการตรวจสอบโดยใช้ประสาทสัมผัส วิธีกล้องจุลทรรศน์ และวิธีตรวจสอบด้วยสารเคมีอย่างง่าย โดยรายละเอียดของการตรวจสอบมีดังนี้

การตรวจสอบโดยใช้ประสาทสัมผัส: รำละเอียดที่ดีควรมีลักษณะร่วน ไม่จับตัวเป็นก้อนที่เหนียวแน่น สามารถจับตัวได้เป็นแค้ก้อนหลวมๆ ในการตรวจสอบโดยใช้ประสาทสัมผัส รำละเอียดที่ดีไม่ควรจับตัวเป็นก้อนได้แม้ใช้มือบีบ สีรำละเอียดปกติมีสีเ็นอ่อนวล หากมีสีออกน้ำตาลอาจมีแกลบปนอยู่หรือถ้ารำละเอียดที่มีสีออกขาว อาจมีหินฝุ่นหรือมันเส้นบดละเอียดปนปลอมมาด้วย ส่วนรำสกัดน้ำมันสีจะซีดกว่ารำละเอียดเล็กน้อยและมองเห็นปลายข้าวและแกลบที่ติดมาได้ชัดเจน นอกจากนี้ รำละเอียดที่ดีมีกลิ่นหอม ไม่เหม็นอับหรือเหม็นหืน ถ้าชิมรำละเอียดที่เพิ่งสีมาใหม่ๆ จะมีรสหวานเล็กน้อย แต่ไม่ควรชิมเพราะในรำละเอียดโดยเฉพาะรำข้าวนาปรังอาจมียาฆ่าแมลงติดปนมาและเป็นอันตรายต่อสุขภาพของผู้ตรวจสอบได้ ส่วนรำสกัดน้ำมันใหม่ๆ ก็จะมีกลิ่นหอมอ่อนๆ แต่ถ้าเป็นรำสกัดน้ำมันที่ผลิตจากรำข้าวนี้่อาจมีกลิ่นเหม็นเปรี้ยวเล็กน้อย

การตรวจสอบโดยใช้กล้องจุลทรรศน์: เมื่อใช้กำลังขยายต่ำส่องดูจะมองเห็นเป็นผงละเอียดและชุ่มไปด้วยน้ำมัน ถ้าหากเพิ่มกำลังขยายมากจะเห็นเป็นแผ่นบางๆ ขนาดเล็ก หักงอไร้รูปทรงที่แน่นอน สีขาวนวลหรือบางชิ้นออกสีเขียวอ่อนเล็กน้อยโดยเฉพาะข้าวใหม่ต้นฤดูเก็บเกี่ยว แต่ถ้าเป็นรำข้าวที่มีความชื้นสูงและมีเชื้อราขึ้น ส่องดูจะเห็นสปอร์ของเชื้อราเป็นจุดสีดำขนาดเล็กกระจายอยู่ทั่วไปบนเยื่อหุ้มเมล็ด

การตรวจสอบสิ่งปนเปื้อนโดยสารเคมีอย่างง่าย: ได้ในการตรวจสอบหินฝุ่นที่อาจปนมากับรำสามารถใช้กรดเกลือเข้มข้น 50 % หรือคาร์บอนเตตระคลอไรด์เพื่อตรวจสอบได้ส่วนการตรวจสอบยาฆ่าแมลงหรือสารพิษ สามารถใช้สารคลอโรฟอร์มและคิวปริกคลอไรด์

2.2 น้ำมันรำข้าว

2.2.1 องค์ประกอบทางเคมีในน้ำมันรำข้าว

น้ำมันรำข้าวดิบ (crude rice bran oil) ประกอบด้วยไตรกลีเซอไรด์ ประมาณ 80% ของน้ำมัน [11] แสดงดังตารางที่ 2.2 ปริมาณของไตรกลีเซอไรด์ขึ้นอยู่กับปริมาณของการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสที่เกิดขึ้นก่อนขั้นตอนเสถียรภาพ (stabilization) น้ำมันรำข้าว มีกรดโอเลอิก เป็นองค์ประกอบสูงถึง 40-50% รองลงมา คือ กรดลิโนเลอิก มีประมาณ 20-42% ดังแสดงในตารางที่ 2.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.2 องค์ประกอบของน้ำมันรำข้าวดิบ [11]

องค์ประกอบ	ปริมาณ (%)
ไตรกลีเซอไรด์	80
ฟอสโฟลิพิด	2
ไกลโคลิพิด	1
สเตอรอล	5
แว็กซ์	2-5

ตารางที่ 2.3 องค์ประกอบของกรดไขมันในน้ำมันรำข้าว [11]

กรดไขมัน	จำนวนคาร์บอน:จำนวนพันธะคู่	ปริมาณ (%)
กรดไมริสติก	14:0	0.1-1.0
กรดปาล์มมิติก	16:0	12.0-18.0
กรดปาล์มมิโตเลอิก	16:1	0.2-0.6
กรดสเตียริก	18:0	1.0-3.0
กรดโอเลอิก	18:1	40.0-50.0
กรดนิโนเลอิก	18:2	20.0-42.0
กรดนิโนเลนิก	18:3	0.0-1.0
กรดอาราซิดิก	20:0	0.0-1.0

2.2.2 ประโยชน์ของน้ำมันรำข้าว

ในน้ำมันรำข้าวประกอบไปด้วยวิตามินอีธรรมชาติ แกมมาโอริซานอล (gamma-oryzanol) กลุ่มสารฟอสโฟลิพิด กลุ่มซาราไมด์ วิตามินบี-คอมเพล็กซ์ (vitamin B complex) โคเอนไซม์คิวเท็น (coenzyme Q10) ช่วยให้ผิวยืดหยุ่น เต่งตึง ลดจุดต่างด่างดำลดริ้วรอย ทั้งยังเป็นสารต่อต้านสารอนุมูลอิสระและช่วยชะลอวัย ลดคอเลสเตอรอลและไตรกลีเซอไรด์ ทั้งยังปกป้องและลดการตีบตันของหลอดเลือด และช่วยในเรื่องบำรุงประสาท เหน็บชา ช่วยระบบเมตาบอลิซึม มีแร่ธาตุ อาทิ แมกนีเซียม ฟอสฟอรัส สังกะสี ช่วยเพิ่มพลังงาน เพิ่มการเผาผลาญ เสริมสร้างการเจริญเติบโตของสมอง และยังเพิ่มการทำงานของระบบฮอร์โมน [12]

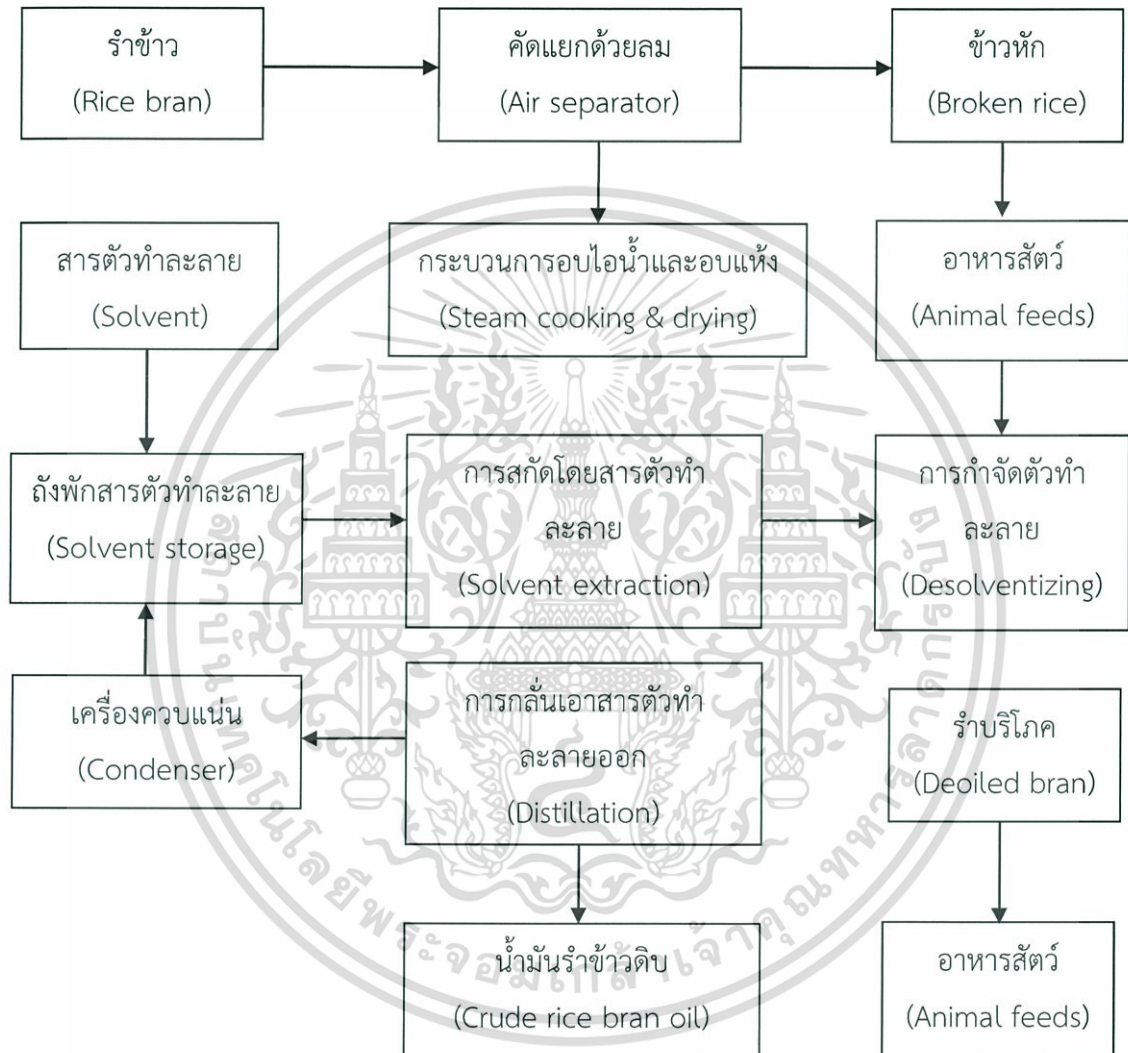
2.3 กระบวนการผลิตน้ำมันรำข้าว

ในรำข้าวมีน้ำมันเป็นองค์ประกอบอยู่น้อย ซึ่งทำให้การสกัดน้ำมันออกมาเป็นน้ำมันรำข้าวทำได้ยากกว่าการสกัดน้ำมันจากพืชชนิดอื่น จึงต้องใช้วิธีการที่ต่างกันเพราะต้องสกัดให้ได้น้ำมันออกมาจากรำข้าวให้ได้มากที่สุด ซึ่งในรำข้าวมีองค์ประกอบของน้ำมัน 17% ของน้ำหนักรำข้าว และเมื่อนำน้ำมันที่สกัดได้มากลั่นเป็นน้ำมันรำข้าวขาวบริสุทธิ์จะได้ปริมาณน้ำมันเพียง 12% ของน้ำหนักรำข้าวที่ใช้เป็นวัตถุดิบ

รูปที่ 2.4 แสดงกระบวนการผลิตน้ำมันรำข้าว กระบวนการสกัดเริ่มจากการเตรียมวัตถุดิบให้มีความเหมาะสมกับการสกัดตั้งแต่การคัดแยกวัตถุดิบและกระบวนการอบไอน้ำความร้อนสูงกว่า 100 °C อย่างไม่สม่ำเสมอ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เพื่อหยุดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของเอนไซม์ไลเปส (lipase) ในรำข้าวก่อน โดยรำข้าวจะถูกอัดเป็นเม็ดนำไปสกัดทำให้น้ำมันรำข้าวดิบที่สกัดได้มีคุณภาพสูง [13]

กระบวนการอบแห้ง เป็นกระบวนการอบด้วยความร้อนเพื่อลดความชื้น โดยขั้นตอนการอบแห้งนั้นสามารถทำได้หลายวิธี เช่น การอบด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิประมาณ 150 °C การอบโดยใช้รังสีอินฟราเรด ไมโครเวฟ เป็นต้น [14]



รูปที่ 2.4 แผนผังกระบวนการผลิตน้ำมันรำข้าว [13]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.1 วิธีการสกัดน้ำมันจากรำข้าว

การผลิตน้ำมันรำข้าว ทำได้หลายวิธี ดังต่อไปนี้

วิธีการกลั่นด้วยระบบไอน้ำแรงดันสูง: เป็นกระบวนการที่นิยมในการผลิตน้ำมันรำข้าวแบบอุตสาหกรรม เพราะจะทำให้ได้น้ำมันจำนวนมาก บีบได้เร็ว แต่ต้องใช้ความร้อนในการสกัดน้ำมันสูงถึง 230 – 240 °C ดังรูปที่ 2.5 ซึ่งความร้อนระดับนี้จะทำให้คุณสมบัติและคุณภาพของสารสำคัญบางอย่างในน้ำมันรำข้าวถูกทำลายไปเพราะความร้อน ดังนั้นจึงไม่เหมาะที่จะนำมาผลิตน้ำมันรำข้าวและจมูกข้าวที่เป็นผลิตภัณฑ์เสริมอาหาร [15]

การกลั่นด้วยระบบไอน้ำแรงสูง High Pressure Steam Refining System

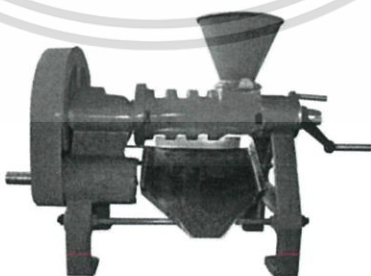


ใช้ความร้อน ประมาณ 230~240 องศา

รูปที่ 2.5 การสกัดด้วยตัวทำละลายระบบไอน้ำแรงสูง [15]

การกลั่นด้วยระบบไอน้ำแรงสูงมีข้อดีคือ สามารถผลิตได้จำนวนมาก ไม่จำเป็นต้องใช้รำใหม่ในการผลิต ส่วนข้อเสียคือ ทำให้สูญเสียธาตุอาหารสำคัญบางอย่างไปกับความร้อน

วิธีการสกัดแบบบีบเย็น: จะมีความร้อนระหว่างการบีบอัดด้วยแรงดันมากไม่เกิน 70°C วิธีนี้จะช่วยรักษาคุณภาพของสารอาหารและสารสำคัญในรำข้าวและจมูกข้าวให้อยู่อย่างครบถ้วนสมบูรณ์และจะได้น้ำมันที่มีคุณภาพดีที่สุด จึงเป็นวิธีที่เหมาะสมสำหรับการผลิตน้ำมันรำข้าวและจมูกข้าวที่ใช้เป็นผลิตภัณฑ์เสริมอาหาร และเนื่องจากการผลิตน้ำมันรำข้าวและจมูกข้าวด้วยวิธีการบีบเย็น จะทำได้ช้าและจะได้น้ำมันปริมาณน้อยต่อปริมาณรำข้าว จึงไม่นิยมที่จะผลิตในระดับอุตสาหกรรมอาหาร [15]



รูปที่ 2.6 เครื่องสกัดแบบบีบเย็น [15]

การสกัดแบบบีบเย็นมีข้อดี คือ ไม่มีการเติมสารเคมี และให้ความร้อนต่ำ จึงทำให้ได้น้ำมันรำข้าวและจมูกข้าวที่มีคุณภาพสูงมาก คุณค่าของอาหารในรำข้าวและจมูกข้าวยังมีอยู่อย่างครบถ้วนสมบูรณ์ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เหมาะแก่การเป็นผลิตภัณฑ์เสริมอาหารที่มีคุณภาพสูง ส่วนข้อเสีย คือ ผลิตได้ครั้งละน้อย ในกระบวนการผลิตต้องใช้รำในปริมาณมาก และเสียเวลาในการบีบมาก ไม่เหมาะที่จะใช้ในระดับอุตสาหกรรม

การสกัดด้วยตัวทำละลาย: เป็นวิธีที่ใช้กันอย่างกว้างขวางในอุตสาหกรรม เช่น การสกัดน้ำมันพืชเพื่อใช้ประกอบอาหาร การสกัดด้วยตัวทำละลายเป็นวิธีการแยกสารที่ใช้มากในชีวิตประจำวัน เป็นการแยกสารที่ต้องการออกจากส่วนต่างๆ ของพืช หรือจากของผสม และต้องเลือกตัวทำละลายที่เหมาะสมในการสกัดสารที่ต้องการ [16]

การเลือกตัวทำละลายที่นำมาใช้ในการสกัดมีหลักทั่วไป ดังนี้

1. ต้องละลายสารที่ต้องการสกัดได้ดี
2. ไม่ทำปฏิกิริยากับสารที่ต้องการสกัด
3. ถ้าต้องการแยกสี ตัวทำละลายจะต้องไม่มีสี ถ้าต้องการแยกกลิ่น ตัวทำละลายต้องไม่มีกลิ่น
4. ไม่มีพิษ มีจุดเดือดต่ำ และแยกตัวออกจากสารที่ต้องการสกัดได้ง่าย
5. ไม่ละลายปนเป็นเนื้อเดียวกับสารที่นำมาสกัด
6. มีราคาถูก

ตัวทำละลายที่นิยมใช้ในการสกัด ได้แก่ น้ำ เบนซิน อีเทอร์ โทลูอิน และเฮกเซน สำหรับการสกัดน้ำมันพืช นิยมใช้เฮกเซนในการสกัดน้ำมันพืช เมื่อใช้เฮกเซนสกัดน้ำมันออกจากพืชแล้วต้องนำสารละลายที่ได้ไปกลั่น เพื่อแยกเฮกเซนออกไปจากสารที่สกัดได้ ต่อจากนั้นจึงกำจัดสีและกลิ่นจนได้น้ำมันพืชบริสุทธิ์การสกัดด้วยตัวทำละลาย อาจสกัดด้วยเครื่องมือที่เรียกว่า ซอกซ์เลต (Soxhlet) เครื่องมือดังกล่าวนี้ใช้ตัวทำละลายปริมาณน้อย เพราะใช้วิธีการให้ตัวทำละลายหมุนเวียนผ่านสารที่ต้องการสกัดหลายๆ ครั้งต่อเนื่องกันไปจนสกัดสารออกมาได้เพียงพอ [16]

ประโยชน์ของการสกัดด้วยตัวทำละลาย

1. ใช้สกัดน้ำมันพืชจากเมล็ดพืช เช่น น้ำมันงา ถั่ว ปาล์ม นุ่น บัว เป็นต้น นิยมใช้เฮกเซนเป็นตัวทำละลาย (เฮกเซน มีสูตรทางเคมีคือ C_2H_{14} เป็นของเหลวใส ไม่มีสี มีจุดเดือด $69^{\circ}C$ ไอของเฮกเซนเป็นอันตรายต่อระบบหายใจ)
2. สกัดสารมีสีออกจากพืช
3. ใช้สกัดน้ำมันหอมระเหยออกจากพืช
4. ใช้สกัดยาออกจากสมุนไพร

2.3.2 วิธีการร่อนน้ำมันรำข้าว

น้ำมันรำข้าวที่ผ่านการบีบแล้วจะต้องผ่านกระบวนการกรองเอากากของรำข้าวออกจากน้ำมัน เพื่อให้ได้น้ำมันที่ใสสะอาด บริสุทธิ์ สามารถเก็บไว้ได้เป็นเวลานานโดยไม่เกิดกลิ่นหืน และยังคงคุณภาพของน้ำมันรำข้าวที่สมบูรณ์ วิธีการกรองสามารถทำได้หลายวิธี ดังต่อไปนี้ [15]

การกรองแบบแรงดัน: การกรองด้วยวิธีบีบอัด เพื่อแยกน้ำมันออกจากกากรำข้าว สามารถกรองได้อย่างรวดเร็ว แต่การบีบอัดจะทำให้ได้น้ำมันที่มีกากของรำข้าวติดออกมาด้วย ทำให้น้ำมันไม่บริสุทธิ์ จะทำให้น้ำมันมีกลิ่นหืน จากกากที่ตกค้างอยู่ในน้ำมัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การกรองด้วยกระดาษกรอง (filter paper): การกรองด้วยกระดาษกรองคือการปล่อยให้ไขมันไหลตามแรงโน้มถ่วงผ่านกระดาษกรอง แม้ว่าจะกรองได้ช้า แต่เป็นวิธีที่ทำให้ได้น้ำมันที่ใส สะอาด บริสุทธิ์ ไม่มีกากติดมากับน้ำมัน ได้น้ำมันที่มีคุณภาพสูงที่สุด

ประเภทและคุณภาพของกระดาษกรองที่นำมาใช้ในการกรองมีหลายระดับความถี่ที่มีหน่วยเป็นไมครอนตามประเภทของการใช้ เช่น

- ความถี่ 17 ไมครอน ใช้กรองกำจัดความขุ่นมาก มีความหนืดสูง สำหรับน้ำมันพืช สีทาบ้าน
- ความถี่ 10 ไมครอน ใช้กรองที่ความใสระดับหนึ่ง ความหนืดปานกลาง สำหรับกรอง ไวน์ สุราน้ำเชื่อม น้ำมัน
- ความถี่ 1.2 ไมครอน ใช้กรองความใส และการกำจัดยีสต์สำหรับ ไวน์ สุรา ผลไม้ สุรากลั่น น้ำผลไม้ เครื่องสำอาง ยา
- ความถี่ 0.3 ไมครอน ใช้กรองกำจัดเชื้อ (sterilizing) แคมเปญ เครื่องสำอาง ยาที่ต้องการความบริสุทธิ์สูง
- ความถี่ 0.2 ไมครอน ใช้กรองสิ่งที่ต้องการความบริสุทธิ์สูงสุด กำจัดแบคทีเรีย สำหรับยา ไวน์หวาน

การกรองด้วยแรงดูด (vacuum filter): เป็นการกรองด้วยกระดาษกรองและแรงดูด เพื่อให้การกรองได้เร็วขึ้น โดยใช้แรงดูดของอากาศช่วยทำให้การกรองได้รวดเร็วขึ้น โดยยังได้น้ำมันที่สะอาด เท่ากับการกรองด้วยกระดาษกรอง

การกรองแบบแรงเหวี่ยง (centrifugal filter): การกรองแบบการหมุนเหวี่ยงเพื่อแยกน้ำออกจากกาก เป็นวิธีการอีกแบบหนึ่งที่ใช้ในการกรองเพื่อความรวดเร็ว แต่ไม่ค่อยนิยมในระดับอุตสาหกรรม เพราะไม่สามารถแยกน้ำมันออกจากกากได้หมด

2.4 คุณภาพของน้ำมันรำข้าว

เมื่อรำข้าวมีความชื้นที่มาก จะทำให้เกิดปฏิกิริยาทางเคมีส่งผลให้เกิดการเสื่อมเสียของน้ำมันในรำข้าวหรือเกิดกลิ่นหืน กลิ่นหืน ซึ่งเป็นกลิ่นผิดปกติของไขมันหรือน้ำมัน เกิดจากปฏิกิริยาทางเคมี [17] ได้แก่ 1. *ปฏิกิริยาออกซิเดชันของลิพิด* หมายถึง การหืนเนื่องจากปฏิกิริยาออกซิเดชัน เป็นการหืนเนื่องจากปฏิกิริยาออกซิเดชันของไขมันและน้ำมันกับออกซิเจนในอากาศ ทำให้ไขมันหรือน้ำมันมีกลิ่นและรสชาติผิดปกติ 2. *ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส* หมายถึง การหืนเนื่องจากปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสโดยมีน้ำ และเอนไซม์ไลเปสหรือลิปอกซิเดสที่มีอยู่ในอาหาร เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ทำให้เกิดการสลายของโมเลกุลไตรกลีเซอไรด์ได้เป็นกรดไขมันอิสระ ซึ่งกรดไขมันอิสระที่ระเหยเป็น short chain fatty acid ได้จะให้กลิ่นหืน (ไลเปส เป็นเอนไซม์ ที่เร่งปฏิกิริยาการไฮโดรไลซ์โมเลกุลของไตรกลีเซอไรด์ ได้เป็นกรดไขมันอิสระ พบในระบบการย่อยอาหารของมนุษย์และสัตว์ ผลิตได้จากแบคทีเรีย)

ตารางที่ 2.4 แสดงคุณสมบัติทางกายภาพและค่ามาตรฐานของน้ำมัน ทั้งนี้ คุณภาพของน้ำมันรำข้าวสามารถวัดได้จากค่าต่างๆ ดังนี้

1. ค่าความเป็นกรด (acid value) เป็นค่าที่บ่งชี้คุณภาพของน้ำมันและไขมัน โดยเป็นค่าที่บ่งชี้ว่าไตรกลีเซอไรด์ มีความเป็นกรดเพิ่มขึ้น (ไตรกลีเซอไรด์เป็นส่วนประกอบหลักในไขมันและน้ำมัน ถูกย่อยสลายด้วยปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส โดยมีเอนไซม์ไลเปส และความร้อนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ได้ผลิตภัณฑ์คือกลีเซอรอลและกรดไขมันอิสระ) หากค่าความเป็นกรดสูง แสดงว่าน้ำมันเสื่อมคุณภาพ มีจุดเกิดออกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ควันต่ำลงและเป็นสาเหตุเริ่มต้นของการเกิดกลิ่นหืน นอกจากนี้ยังมีโอกาสที่จะเกิดปฏิกิริยาไลพิดออกซิเดชัน ซึ่งเป็นปฏิกิริยาลูกโซ่ ซึ่งทำให้เกิดการหืนอย่างต่อเนื่องและรวดเร็ว ค่าความเป็นกรดของไขมันหรือน้ำมัน คือ จำนวนมิลลิกรัมของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ ซึ่งทำปฏิกิริยาพอดีกับกรดไขมันอิสระ ซึ่งค่าที่ได้สามารถนำมาคำนวณเป็นเปอร์เซ็นต์กรดไขมันอิสระ [17]

2. กรดไขมันอิสระ หมายถึง กรดไขมันที่ไม่ได้รวมอยู่เป็นองค์ประกอบในโมเลกุลของไตรกลีเซอไรด์ การเกิดกรดไขมันอิสระในอาหาร เป็นดัชนีบ่งชี้คุณภาพของน้ำมันพืช ซึ่งเป็นต้นเหตุสำคัญของการเสื่อมเสียอาหาร คือการเกิดกลิ่นผิดปกติ ที่เรียกว่า กลิ่นหืน และทำให้ค่าความเป็นของน้ำมันสูงขึ้น [17]

3. ค่าเพอร์ออกไซด์ (peroxide value, P.V.) เป็นค่าที่ใช้การวัดอัตราการเกิดปฏิกิริยา lipid oxidation ซึ่งเป็นสาเหตุของการเกิดกลิ่นหืน เป็นค่าที่บ่งชี้ถึงการเสื่อมเสียของน้ำมันและไขมันรวมทั้งอาหารที่มีไขมันสูง [16]

4. ค่าไอโอดีน (iodine value, I.V. หรือ iodine number, I.N.) เป็นตัวบ่งชี้ว่าไขมันหรือน้ำมันมีกรดไขมันชนิดไม่อิ่มตัวเป็นส่วนประกอบอยู่ในโมเลกุลมากน้อยเพียงใด ถ้ามีค่า I.N. สูง แสดงว่ามีปริมาณกรดไขมันชนิดไม่อิ่มตัวเป็นส่วนประกอบมากและจะเกิดการหืน แบบ lipid oxidation ได้ง่าย [17]

5. ค่าซาฟอนิฟิเคชัน (saponification number หรือ saponification value, S.V.) คือจำนวนมิลลิกรัมของด่าง เช่น โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ ที่ใช้ในทำปฏิกิริยากับไตรกลีเซอไรด์ [17]

6. ค่าอันซาฟอนิฟิเคชันแมทเทอร์ (unsaponifiable matter) คือ องค์ประกอบของไขมันที่ไม่ถูกไฮโดรไลซด้วยด่าง [17]

ตารางที่ 2.4 คุณสมบัติทางกายภาพและค่ามาตรฐานของน้ำมันรำข้าวดิบ-น้ำมันรำข้าวบริสุทธิ์

ค่าต่างๆที่วัดได้	น้ำมันรำข้าวดิบ	น้ำมันรำข้าวบริสุทธิ์
ความชื้น (Moisture), %	0.5-1.0	0.1-0.15
ความหนาแน่น (Density)	0.913-0.920	0.913-0.920
ดัชนีหักเหแสง (Refractive index)	1.4672	1.4672
ความเป็นกรด (Acid value), mg KOH/g [14]	6	6
ซาฟอนิฟิเคชัน (Saponification value)	187	187
อันซาฟอนิฟิเคชันแมทเทอร์ (Unsaponifiable matter)	4.5-5.5	1.8-2.5
กรดไขมันอิสระ (Free fatty acids), %	5-15	0.15-0.2
โอริซานอล (Oryzanol)	2.0	1.5-1.8
ค่าไอโอดีน (Iodine value)	95-100	95-104
ค่าเพอร์ออกไซด์ (Peroxide value), mg Eqv/kg [17]	1	1

การวิเคราะห์คุณภาพของน้ำมันทำได้โดยการใช้เครื่องมือและอุปกรณ์ในการตรวจสอบ

1. เครื่องโครมาโทกราฟีของเหลวสมรรถนะสูง (high performance liquid chromatography (HPLC) เครื่องมือวัดสารประกอบทางเคมีในน้ำมันอย่างละเอียด [13]

2. เครื่องวัดความเข้มของแสง (spectrophotometer) เป็นเครื่องมือที่ใช้วัดปริมาณของ สารเคมีชีวโมเลกุล รวมถึงจุลชีพทั้งหลาย โดยใช้หลักการวัดปริมาณของแสงที่ตัวอย่างดูดกลืนเข้าไป [13]

เอกสารอ้างอิง: การค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. เครื่องวัดการทนต่อความหืนของน้ำมัน (rancimat) [13]
4. เครื่องตรวจสอบองค์ประกอบของกรดไขมันในน้ำมันพีซอย่างละเอียด (gas liquid chromatography) [13]

2.5 ทฤษฎีพื้นฐานการถ่ายเทความร้อน

โดยพื้นฐานแล้วการถ่ายเทความร้อนประกอบด้วย การนำความร้อน การพาความร้อน และการแผ่รังสี ความร้อน

การนำความร้อน คือ การถ่ายเทความร้อนโดยที่ตัวกลางไม่เคลื่อนที่ การนำความร้อนจึงเกิดขึ้นได้ใน สสารทุกสถานะทั้งของแข็ง ของเหลว หรือก๊าซ ความสามารถในการนำความร้อนของ สสารแต่ละชนิดจะมีค่าแตกต่างกัน พารามิเตอร์ที่ใช้อธิบายความสามารถดังกล่าวเรียกว่า ค่าสภาพ การนำความร้อน (thermal conductivity: k) วัสดุที่มีค่า k สูงจะนำความร้อนได้ดี ส่วนวัสดุที่มีค่า k ต่ำจะนำความร้อนได้น้อย พื้นฐานการนำความร้อนอธิบายได้ด้วย กฎการนำความร้อนของฟูริเยร์ (Fourier law of heat conduction) ที่ว่า “อัตราการถ่ายนำความร้อนแปรผันตรงกับเกรเดียนต์ของ อุณหภูมิและพื้นที่” [18]

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

ดังนั้น หากต้องการถ่ายเทความร้อนด้วยการนำให้ได้มาก ทำได้โดยเลือกวัสดุตัวกลางที่มีค่า สภาพการนำความร้อนสูงๆ หรือเพิ่มพื้นที่หน้าสัมผัสของการนำความร้อนให้มากขึ้น

การพาความร้อน เป็นการถ่ายเทความร้อนโดยที่ตัวกลางเคลื่อนที่หรือไหลไปด้วย การพาความร้อนจึงเกิดขึ้นเฉพาะกับของเหลวหรือก๊าซเท่านั้น ความสามารถในการพาความร้อนขึ้นอยู่กับค่า สัมประสิทธิ์การพาความร้อน (convection heat transfer coefficient: h) ค่าอุณหภูมิแวดล้อม และขนาดพื้นที่ผิวของวัตถุที่มีการพาความร้อน โดยทั่วไปค่า h ขึ้นอยู่กับหลายพารามิเตอร์ เช่น ความเร็วและสมบัติของตัวกลาง ซึ่งมักได้จากการทดลองเป็นรายกรณี ค่า h มากหมายถึงการพา ความร้อนได้ดี ในทางกลับกันค่า h น้อยหมายถึงพาความร้อนได้ไม่ดี พื้นฐานของการพาความร้อน อธิบายด้วย Newton's cooling law ดังนี้ [18]

$$q = hA_s (T - T_\infty) \quad (2.2)$$

ดังนั้น หากต้องการถ่ายเทความร้อนด้วยการพาให้ได้มาก ทำได้โดยเพิ่มค่า h อาจด้วยการติดตั้ง พัดลมช่วยเป่า หรือเพิ่มพื้นที่ผิวให้กับวัตถุที่ใช้ในการถ่ายเทความร้อน

การแผ่รังสีความร้อน เป็นการถ่ายเทความร้อนในรูปคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า จึงไม่อาศัยตัวกลางใน การส่งถ่ายความร้อน เช่น การแผ่รังสีความร้อนจากดวงอาทิตย์มายังโลก โดยทั่วไปวัตถุยิ่งมีอุณหภูมิ สูงจะยิ่งแผ่รังสีความร้อนได้มาก หลักการถ่ายเทความร้อนด้วยการแผ่รังสีอธิบายได้ด้วย Stefan-Boltzmann law ดังนี้ [18]

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

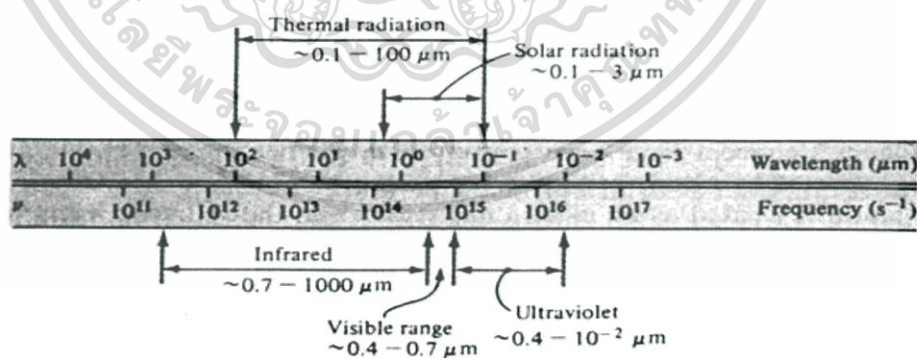
เมื่อ σ เป็นค่าคงที่ Stefan-Boltzmann ซึ่งเท่ากับ $5.6703 \cdot 10^{-8} \text{ (W/m}^2\text{K}^4)$ และ ϵ เป็นค่าสภาพการเปล่งรังสี (emissivity) โดย $\epsilon=1$ สำหรับวัตถุดำ และ $\epsilon=0$ สำหรับวัตถุขาว

2.6 การอบแห้งผลิตผลทางการเกษตรโดยใช้รังสีอินฟราเรด

2.6.1 ทฤษฎีรังสีอินฟราเรด

รังสีอินฟราเรด (infrared ray) ถูกค้นพบโดยบังเอิญโดย Sir William Herschel นักดาราศาสตร์ชาวอังกฤษในปี ค.ศ. 1800 ขณะทำการศึกษาเกี่ยวกับแสงจากดวงอาทิตย์ ซึ่งคุณสมบัติของรังสีอินฟราเรด เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (electromagnetic wave) ที่ส่งผ่านพลังงานออกมาจากวัตถุร้อนในรูปของการแผ่รังสีความร้อน (thermal radiation) ด้วยอุณหภูมิของตัววัตถุเองโดยไม่ต้องอาศัยตัวกลางหรือตัวนำในการส่งผ่านความร้อนไปยังวัตถุเย็น ตัวอย่างเช่นดวงอาทิตย์ที่แผ่รังสีความร้อนออกมาที่อุณหภูมิผิวประมาณ $5,487 \text{ }^\circ\text{C}$ โดยมีรังสีอินฟราเรดเป็นส่วนประกอบประมาณ 48% ของรังสีที่แผ่ออกมาทั้งหมด นอกจากนั้นยังประกอบด้วยรังสีที่มองไม่เห็นด้วยตาเปล่า คือ รังสีอัลตราไวโอเล็ต (ultraviolet ray, UV) และรังสีที่มองเห็นได้ด้วยตาเปล่า (visible ray) ซึ่งรวมเรียกว่า solar radiation โดยมีช่วงความยาวคลื่น (wave length, λ) อยู่ระหว่าง $0.1 \text{ }\mu\text{m}$ ถึง $3 \text{ }\mu\text{m}$ ซึ่งเป็นรังสีอินฟราเรดในช่วงความยาวคลื่นระหว่าง $0.1 \text{ }\mu\text{m}$ ถึง $0.4 \text{ }\mu\text{m}$ อย่างไรก็ดี การให้ความร้อนโดยรังสีอินฟราเรดนี้จะก่อให้เกิดปฏิกิริยาทางเคมีทางแสง (photochemical) เหมือนกับรังสีอัลตราไวโอเล็ต จึงไม่ทำให้เกิดการเผาไหม้โดยตรงกับผิวหนังร่างกายของคน [19]

อินฟราเรดเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีค่าความยาวคลื่นอยู่ระหว่าง $0.7\text{-}1000 \text{ }\mu\text{m}$ แต่ช่วงคลื่นที่มีคุณสมบัติในการแผ่รังสีความร้อนนั้นมีค่าความยาวคลื่นอยู่ระหว่าง $0.1\text{-}100 \text{ }\mu\text{m}$ โดยจำแนกได้เป็น 3 ช่วงคือ อินฟราเรดย่านใกล้ (near infrared มีช่วงความยาวคลื่น $0.7\text{-}3 \text{ }\mu\text{m}$) อินฟราเรดย่านกลาง (medium infrared มีช่วงความยาวคลื่น $3\text{-}25 \text{ }\mu\text{m}$) และอินฟราเรดย่านไกล (far infrared มีช่วงความยาวคลื่น $25\text{-}100 \text{ }\mu\text{m}$) [19]



รูปที่ 2.7 ช่วงความยาวคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีคุณสมบัติเป็นรังสีความร้อน [19]

วัตถุร้อนที่แผ่รังสีสมบูรณ์ (perfect radiator) จะเรียกว่าวัตถุดำ (black body) ซึ่งคุณสมบัติการแผ่รังสี (emissivity, ϵ) คือ $\epsilon = 1$ ตามกฎการแผ่รังสีความร้อนของเคอร์ชอฟฟ์ (Kirchhoff's law of thermal radiation) เมื่อเกิดการแลกเปลี่ยนความร้อนจากวัตถุร้อนที่แผ่รังสีความร้อนไปยังวัตถุที่เอกสาร์นเป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เย็นกว่านั้น จะมีการดูดซับพลังงานไว้ภายในวัสดุ (absorptivity, α) ซึ่งจะแปลงเป็นพลังงานความร้อน มีการส่งผ่าน (transmissivity, τ) และมีการสะท้อนกลับ (reflectivity, ρ) ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของวัตถุนั้นโดยพลังงานที่วัตถุได้รับการแผ่รังสีมาทั้งหมดสามารถเขียนเป็นความสัมพันธ์ได้เป็น $\alpha + \tau + \rho = 1$ หากวัตถุที่รับรังสีมีค่าดูดซับพลังงานเท่ากับค่าการแผ่รังสีของวัตถุร้อน โดยที่ไม่มีการสะท้อนกลับและส่งผ่านทะลุเนื้อวัตถุไป พลังงานที่วัตถุได้รับการแผ่รังสีมาทั้งหมดสามารถเขียนเป็นความสัมพันธ์ได้เป็น $\alpha = \epsilon = 1$ [19]

วัตถุดำนั้นเป็นวัตถุในอุดมคติ ($\epsilon = 1$) ซึ่งสำหรับวัตถุจริงนั้นคุณสมบัติการแผ่รังสีที่ปลดปล่อยออกมาจะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของวัตถุนั้น เช่น อุณหภูมิผิววัตถุร้อน สี มุมการแผ่รังสี ความหยาบมันเงาของผิว เป็นต้น ทำให้ค่าพลังงานที่ปลดปล่อยออกมามีค่าไม่ถึงหนึ่ง ($\epsilon < 1$) โดยพลังงานความร้อนจากการแผ่รังสีออกมา (thermal radiation power) สามารถคำนวณด้วยกฎของ สเตฟาน-โบลแมน (Stefan-Boltzmann law) ดังสมการที่ (2.4) [19]

$$Q = \epsilon \sigma A T^4 \quad (2.4)$$

โดย Q = พลังงานความร้อนจากการแผ่รังสี (watt, W หรือ J/s)

ϵ = ค่าความสามารถในการแผ่รังสีของวัตถุเทา (มีค่า 0= ถึง 1)

σ = ค่าคงที่ของ สเตฟาน-โบลแมน ($5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{ K}^4$)

A = พื้นที่ผิว (M^2)

T = อุณหภูมิสัมบูรณ์ (K, $^{\circ}\text{C} + 273$)

ส่วนวัตถุที่รับรังสีอินฟราเรดนั้น ปริมาณรังสีที่ถูกดูดซับด้วยวัตถุนั้น ความสามารถในการดูดซับรังสี (ϵ) จะถูกสมมติให้มีค่าเท่ากับความสามารถในการแผ่รังสีของวัตถุนั้น (ϵ) โดยที่เมื่อความยาวคลื่นของรังสีอินฟราเรดกำหนดโดยต้นกำเนิดรังสีอุณหภูมิที่สูงกว่าจะให้ความยาวคลื่นที่สั้นกว่าและการแทรกซึมลึกกว่า ปริมาณสุทธิของการถ่ายโอนความร้อนสู่วัตถุจึงเท่ากับอัตราการดูดซับลบจากอัตราการแผ่รังสีดังสมการที่ (2.5) [19]

$$Q = \epsilon \sigma A (T_1^4 - T_2^4) \quad (2.5)$$

โดย T_1 = อุณหภูมิของวัตถุที่แผ่รังสี (K)

T_2 = อุณหภูมิของวัตถุที่ดูดซับรังสี (K)

การปลดปล่อยพลังงานของวัตถุจากการแผ่รังสีต่อหน่วยพื้นที่ของวัตถุร้อนที่อุณหภูมิต่างๆ (Spectral Blackbody Emissive Power) มีความสัมพันธ์กับความยาวคลื่นของวัตถุร้อนนั้น ซึ่งหากกำหนดค่าความยาวคลื่นกับอุณหภูมิสัมบูรณ์ของวัตถุ จะสามารถสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความยาวคลื่นกับอุณหภูมิค่าต่างๆ ของวัตถุที่พลังงานจากการแผ่รังสีอินฟราเรดของวัตถุดำ

ซึ่งวัตถุร้อนจะแผ่รังสีออกมาให้เห็นเป็นช่วงความยาวคลื่นที่กว้างและมีจุดสูงสุด (Peak wavelength, λ_{max}) ของเส้นกราฟแสดงถึงตำแหน่งที่วัตถุปลดปล่อยพลังงานออกมาสูงสุดในขณะนั้น

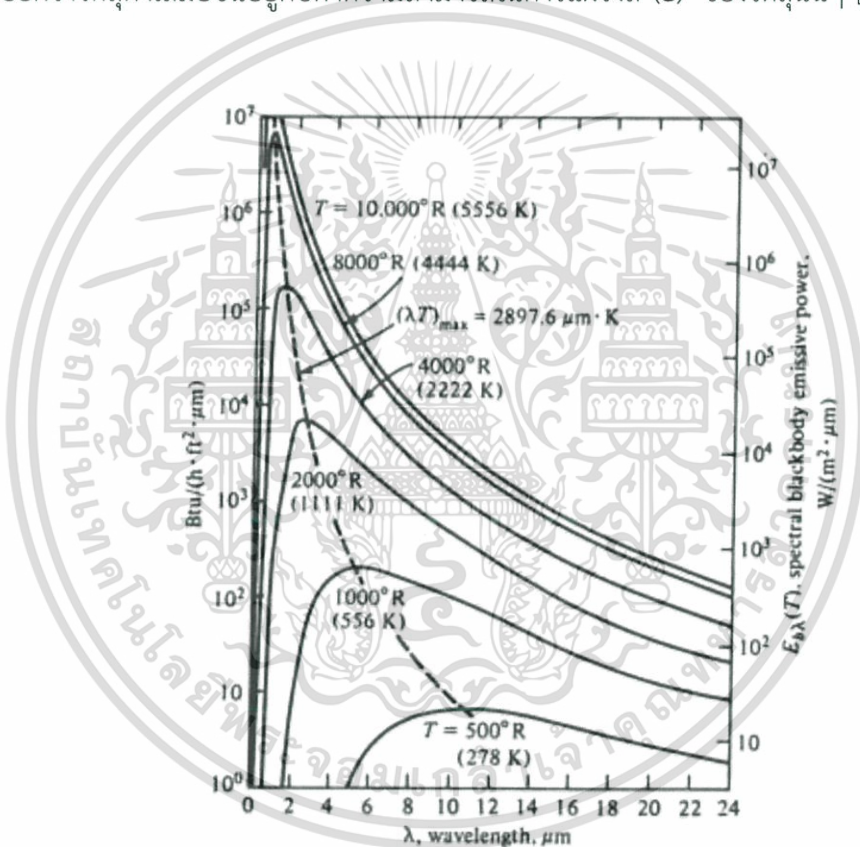
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งความยาวคลื่นสูงสุดจะสัมพันธ์กับค่าอุณหภูมิผิวของวัตถุร้อนนั้นในขณะแผ่รังสีและเป็นไปตามกฎของเวินน์ (Wien's Displacement Law) โดยคำนวณได้ดังสมการที่ (2.6) [19]

$$\lambda_{\max} T = 2897.6 \mu\text{m}\cdot\text{K} \quad (2.6)$$

โดย λ_{\max} = ความยาวคลื่นสูงสุดที่แผ่รังสี (μm)
 T = อุณหภูมิผิวของวัตถุที่แผ่รังสี (K)

ตัวอย่างเช่น วัตถุดำมีอุณหภูมิผิว 1000 K (727°C) จะมีค่าความยาวคลื่นสูงสุดที่แผ่รังสี 2.898 μm อย่างไรก็ตามความสัมพันธ์ดังกล่าวหากเป็นการแผ่รังสีของวัตถุจริงย่อมจะปลดปล่อยพลังงาน (Q) ออกมาได้น้อยกว่าวัตถุดำเสมอขึ้นอยู่กับค่าความสามารถในการแผ่รังสี (ϵ) ของวัตถุนั้นๆ [19]



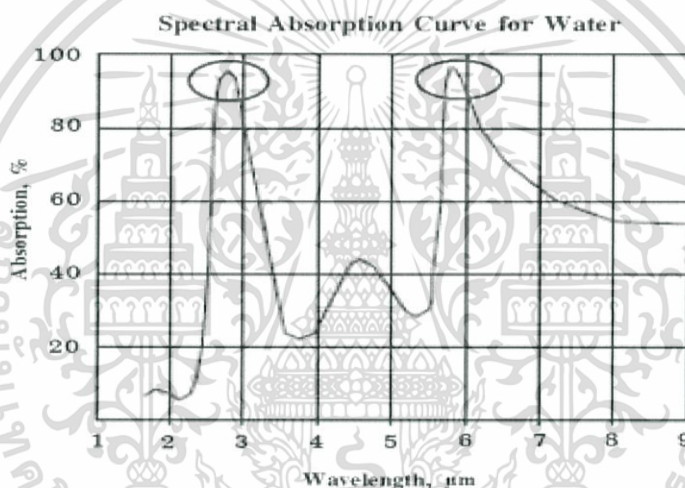
รูปที่ 2.8 แสดงค่าอุณหภูมิที่ตำแหน่งความยาวคลื่นสูงสุดจากกับค่าพลังงานจากการแผ่รังสีอินฟราเรดของวัตถุดำ [19]

2.6.2 การถ่ายเทความร้อนระหว่างรังสีอินฟราเรดกับวัสดุเกษตร

ในอุตสาหกรรมแปรรูปผลิตภัณฑ์เกษตร พบว่ามีการพัฒนาใช้รังสีอินฟราเรดอยู่ระดับหนึ่งอีกทั้งยังพบว่าสามารถใช้ได้ดีในอุตสาหกรรมการทำแห้งอาหารที่มีความชื้นต่ำ ส่วนวัสดุที่มีความหนา ยังคงพบว่ามีข้อจำกัดในการใช้งานอยู่ ซึ่งต้องมีการพัฒนาร่วมกับเทคนิคการอบแห้งอื่นๆ เช่น ร่วมกับการใช้คลื่นไมโครเวฟ หรือลมร้อน รังสีอินฟราเรดนั้นเหมาะสำหรับใช้ในการให้ความร้อนวัตถุโดยเฉพาะที่บริเวณผิว (surface drying) ดังนั้นวัตถุที่จะรับการถ่ายโอนความร้อนจากรังสีอินฟราเรดได้นั้น ควรเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มีลักษณะบาง มีค่าการสะท้อนรังสีต่ำ ผิวไม่มีลักษณะมันวาว มีคุณสมบัติการดูดซับสูง (high absorptivity) นอกจากนี้ อัตรากาการถ่ายโอนความร้อนของวัตถุยังขึ้นอยู่กับหลายปัจจัยได้แก่ ระดับการแผ่รังสีที่แสดงค่าเป็นอุณหภูมิของผิวหน้าวัตถุร้อนที่แตกต่างกัน และระดับความชื้นของรังสีซึ่งขึ้นอยู่กับระยะห่างระหว่างวัตถุร้อนกับวัตถุรับความร้อนซึ่งสำหรับวัสดุทางการเกษตรที่เป็นวัตถุชื้น (moist materials) นอกจากคุณสมบัติการดูดซับและส่งผ่านพลังงานของวัตถุแล้ว ต้องศึกษาคุณสมบัติในแง่ของความยาวคลื่นของวัตถุร้อน และความหนาของวัตถุที่รับพลังงานซึ่งจะเกี่ยวพันกับปริมาณน้ำในวัตถุด้วย [19]

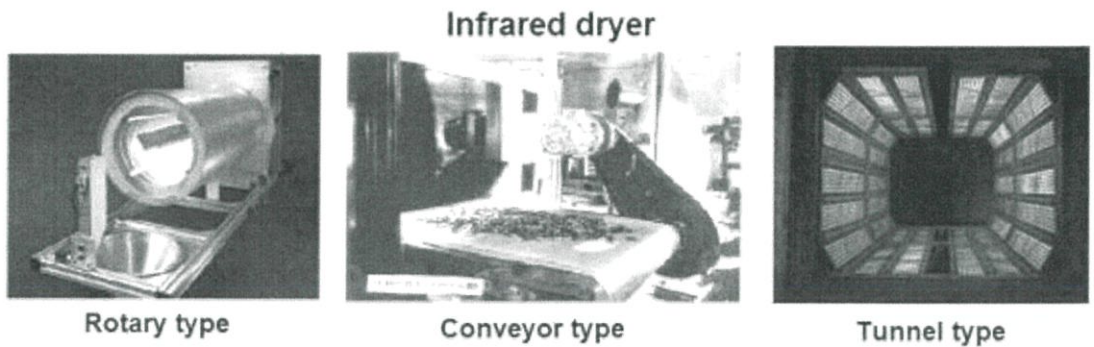
แต่โดยทั่วไปวัตถุชื้นส่วนมากจะมีค่าการดูดซับพลังงานต่ำหากค่าการส่งผ่านพลังงานมีค่าสูง โดยความสัมพันธ์ของการดูดซับคลื่นอินฟราเรดของน้ำในวัตถุมักจะพบว่ามีการส่งผ่านพลังงานสูงที่ความยาวคลื่นสูงถึงปานกลาง ซึ่งช่วงความยาวคลื่นที่เหมาะสมมีค่าประมาณใกล้เคียง 3 และ 6 μm ที่พบว่าน้ำมีการดูดซับพลังงานเกินกว่า 80% [19] ดังรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 ความสัมพันธ์ของการดูดซับคลื่นอินฟราเรดของน้ำในวัตถุ [19]

2.6.3 การอบแห้งผลิตภัณฑ์เกษตรด้วยรังสีอินฟราเรดโดยตรง

เครื่องอบแห้งที่ให้ความร้อนโดยการแผ่รังสีอินฟราเรดนั้นมีทั้งแบบเป็นกะ (batch type) และแบบต่อเนื่อง (continuous type) แต่จุดหลักในการออกแบบและสร้างเครื่องอบแห้งเหมือนกันคือต้องเกิดการแผ่รังสีตรงสู่วัตถุที่ต้องการให้ความร้อน ซึ่งมีการออกแบบใช้งานในหลายรูปแบบ เช่น แบบสายพานลำเลียง (conveyor type) แบบถังหมุน (rotary drum type) แบบรางเขย่า (vibrating tray type) แบบอุโมงค์ (tunnel type) เป็นต้น [19] โดยมีการแสดงตัวอย่างในรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 ตัวอย่างเครื่องอบแห้งที่ใช้อุปกรณ์กำเนิดรังสีอินฟราเรดให้ความร้อน [19]

การอบแห้งโดยใช้รังสีอินฟราเรดอาศัยหลักการที่คล้ายคลึงกับการตากวัสดุบนลานเพื่อรับการแผ่รังสีจากแสงอาทิตย์ วัสดุจะได้รับความร้อนที่บริเวณผิวเป็นส่วนใหญ่ (surface drying) ซึ่งแตกต่างจากการอบแห้งด้วยวิธีการอื่นๆ ดังนั้นการใช้รังสีอินฟราเรดจำเป็นต้องคำนึงถึงลักษณะการแผ่รังสีกระจายให้แก่วัสดุซึ่งขึ้นอยู่กับเงื่อนไขสำคัญ เช่น ระดับความเข้มของรังสี (radiant intensity) ระยะห่างระหว่างอุปกรณ์กำเนิดรังสีถึงผิววัสดุที่ต้องการให้ความร้อน ขนาดความหนาบางของวัสดุ และการเคลื่อนที่คลุกเคล้าไปมาภายในถังหมุนหรือแผ่นบางอยู่ภายในถาดของวัสดุในระหว่างการอบแห้ง เป็นต้น

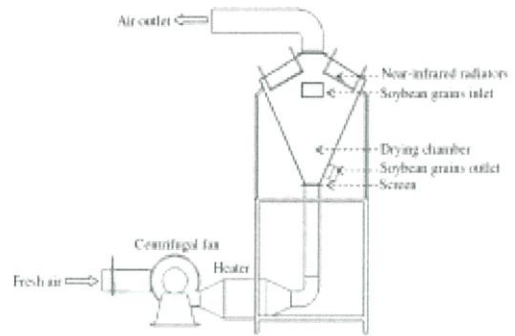
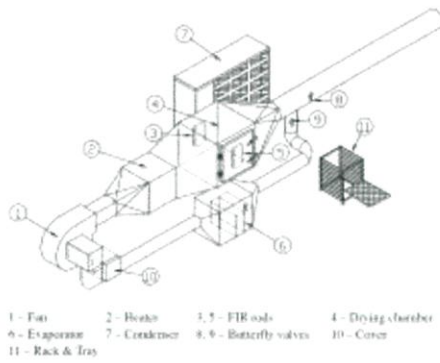
ในการออกแบบสร้างเครื่องอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดสำหรับผลิตผลเกษตรโดยตรงนั้นมีเงื่อนไขการออกแบบที่ต้องคำนึงถึง ได้แก่ ระดับความยาวคลื่นที่เลือกใช้ ระยะห่างระหว่างอุปกรณ์กำเนิดรังสีกับระนาบอบแห้ง ชนิดของผนังห้องอบที่ต้องคำนึงถึงคุณสมบัติในการสะท้อนรังสีคุณสมบัติของของวัสดุ เช่น ความชื้น มิติความหนา รวมทั้งชั้นความหนาของวัสดุในห้องอบ ทั้งนี้ จะเป็นการพิจารณาเพื่อเลือกเงื่อนไขการอบแห้งที่วัสดุจะได้รับปริมาณรังสีเท่าเทียมกันและเป็นเงื่อนไขที่วัสดุสามารถดูดซับพลังงานความร้อนไว้ได้มากซึ่งจะมีผลทำให้ระยะเวลาในการอบแห้งสั้น ในขณะที่ได้วัสดุที่มีคุณภาพตามความต้องการ [19]

2.6.4 การอบแห้งผลิตผลเกษตรด้วยรังสีอินฟราเรดร่วมกับเทคนิคอื่น

นอกเหนือจากการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดอบแห้งผลิตผลเกษตรโดยตรงแล้ว ยังมีการประยุกต์ใช้ร่วมกับเทคนิคการอบแห้งอื่นๆ ดังรูปที่ 2.11 ทั้งนี้เนื่องจากรังสีอินฟราเรดจะมีประสิทธิภาพสูงเฉพาะในลักษณะการอบแห้งชั้นบางโดยเฉพาะบริเวณผิวของผลิตผลเกษตรที่รับรังสีโดยตรง การใช้งานร่วมกับคลื่นไมโครเวฟซึ่งสามารถสั่นสะเทือนโมเลกุลน้ำภายในวัสดุได้จะทำให้วัสดุได้รับการถ่ายเทความร้อนอย่างทั่วถึง นอกจากนั้นการใช้ระบบสุญญากาศและลมร้อนร่วมกับรังสีอินฟราเรดก็พบว่าทำให้อัตราการแพร่ของความชื้นสูงขึ้นซึ่งจะทำให้สามารถย่นระยะเวลาที่ใช้ในการอบแห้งผลิตผลได้ผลเป็นอย่างดี [19]

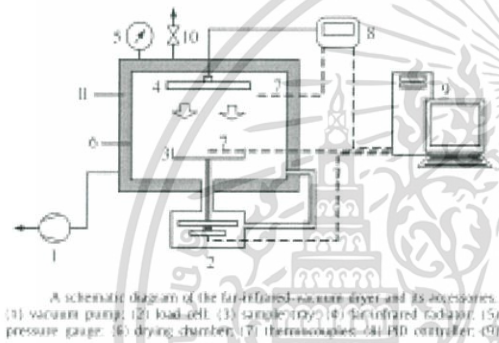
จุดเด่นของการใช้รังสีอินฟราเรดในการอบแห้งคืออุปกรณ์กำเนิดรังสีอินฟราเรดสามารถติดตั้งได้สะดวกกับทุกเทคนิคการอบแห้ง มีชนิดของอุปกรณ์ให้เลือกประยุกต์ใช้จำนวนมาก ซึ่งสามารถนำไปเสริมหรือร่วมกับเทคนิคการอบแห้งอื่นๆ เพื่อทำให้ได้เงื่อนไขการถ่ายเทความร้อนที่เหมาะสมกับวัสดุมากขึ้น นอกจากนั้นยังสามารถลดการใช้พลังงานลงได้อีกด้วย [19]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

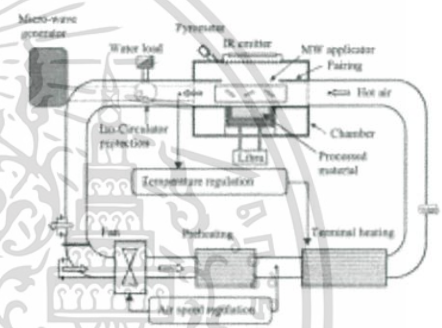


เครื่องอบแห้งแบบลมร้อนและแบบฮีตปั๊ม
ติดตั้งอุปกรณ์กำเนิดรังสีอินฟราเรดไกล

เครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไคซ์เบดติดตั้ง
อุปกรณ์กำเนิดรังสีอินฟราเรดใกล้



A schematic diagram of the far-infrared vacuum oven and its accessories:
(1) vacuum pump; (2) load cell; (3) sample tray; (4) far-infrared radiator; (5) pressure gauge; (6) drying chamber; (7) thermocouples; (8) PID controller; (9)



เครื่องอบแห้งสุญญากาศติดตั้ง
อุปกรณ์กำเนิดรังสีอินฟราเรดไกล

เครื่องอบแห้งแบบใช้รังสีอินฟราเรด
ร่วมกับคลื่นไมโครเวฟและลมร้อน

รูปที่ 2.11 ตัวอย่างเครื่องอบแห้งแบบผสมระหว่างการใช้รังสีอินฟราเรดกับเทคนิคอบแห้งต่างๆ [19]

2.7 งานวิจัยเกี่ยวกับการอบแห้งรำข้าว

งานวิจัยที่เกี่ยวกับการนำรำข้าวไปสกัดน้ำมัน ส่วนใหญ่จะต้องนำรำข้าวไปผ่านกระบวนการอบแห้งก่อน เนื่องจากความชื้นนั้นมีผลโดยตรงต่อคุณภาพน้ำมัน ซึ่งมีความเสี่ยงที่จะก่อให้เกิดความหืนในน้ำมัน จากงานวิจัยของ Thanonkaew, et al ซึ่งทำการการอบแห้งรำข้าวด้วยวิธีการอบแห้ง 4 วิธี ได้แก่ การอบแห้งแบบลมร้อน การคั่ว การอบแห้งโดยใช้ไอน้ำ การใช้คลื่นไมโครเวฟ โดยใช้สภาวะในการอบแห้งดังตารางที่ 2.5 มีการรายงาน ว่า ก่อนอบ รำข้าวมีความชื้น 14.56 g/100g bran และน้ำมัน 3.29 g/100g bran แต่เมื่อนำรำข้าวมาอบโดยวิธีและสภาวะความร้อนต่างๆ แล้ว วัดค่าความชื้น จะเห็นได้ว่าการอบโดยลมร้อนและไมโครเวฟจะมีค่าความชื้นเหลือน้อยที่สุดคือ 4.58 และ 4.05 g/100g bran ตามลำดับ ส่วนปริมาณน้ำมันที่สกัดได้จะมากเมื่อรำข้าวมีค่าความชื้นน้อย โดยการอบแบบลมร้อนและไมโครเวฟจะได้น้ำมัน 5.53 และ 4.81 g/100g bran ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางที่ 2.6 การอบแบบลมร้อนและไมโครเวฟทำให้ค่าความเป็นกรด กรดไขมันอิสระและค่าเพอร์ออกไซด์ในรำข้าวก่อนอบมีค่าต่ำลงเมื่อเทียบกับอบด้วยวิธีอื่นๆ ซึ่งแสดงว่าน้ำมันรำข้าวมีคุณภาพดีขึ้น ในขณะที่ปริมาณสาระสำคัญ ได้แก่ phenolic flavonoid และ gamma-oryzanol มีค่าเพิ่มขึ้นมีค่าเมื่อใช้การอบแห้งด้วยไมโครเวฟ ดังตารางที่ 2.7

จากงานวิจัยนี้สรุปได้ว่าการอบรำข้าวแบบลมร้อนและไมโครเวฟมีประสิทธิภาพมากที่สุดก่อนที่จะนำไปสกัดน้ำมัน [14]

ตารางที่ 2.5 การอบรำข้าวโดยวิธีและสภาวะความร้อนต่างๆ เปรียบเทียบกับปริมาณความชื้นและปริมาณน้ำมันที่สกัดได้

วิธีการอบ	สภาวะความร้อน	ปริมาณความชื้น (g/100g bran)	น้ำมันที่สกัดได้ (g/100g bran)
อบโดยใช้ลมร้อน	150 °C , 10 นาที	4.58	5.53
อบโดยการคั่ว	150 °C , 10 นาที	2.13	4.77
อบโดยใช้ไอน้ำ	130 °C , 60 นาที	11.41	3.41
อบโดยใช้คลื่นไมโครเวฟ	150 °C , 3 นาที Power 800 W Frequency 2450 MHz	4.05	4.81

ตารางที่ 2.6 คุณสมบัติทางเคมีของรำข้าวที่ทำให้ไขมันด้อยคุณภาพหลังจากผ่านการอบโดยวิธีต่างๆ

วิธีการอบ	ค่าความเป็นกรด (mg KOH/g oil)	กรดไขมันอิสระ (%)	ค่าเพอร์ออกไซด์ (mg Eqv/kg oil)
ก่อนอบ	11.11	5.58	18.85
อบโดยใช้ลมร้อน	6.98	3.51	12.13
อบโดยการคั่ว	7.56	3.80	15.18
อบโดยใช้ไอน้ำ	9.01	4.53	17.16
อบโดยใช้ไมโครเวฟ	6.30	3.17	11.72

ตารางที่ 2.7 สารสำคัญในรำข้าวหลังจากผ่านการอบโดยวิธีต่างๆ

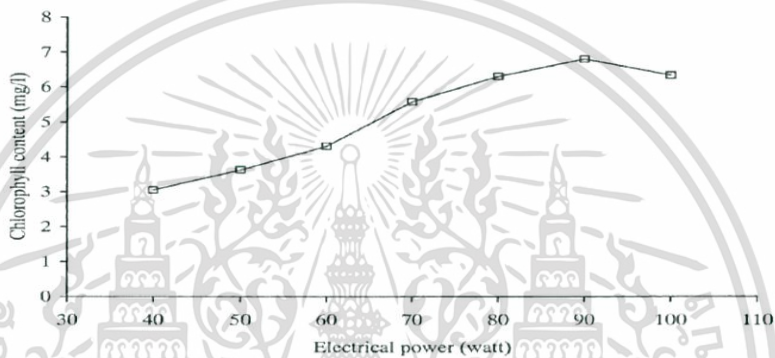
วิธีการอบ	Phenolic	Flavonoid	Gamma Oryzanol
ก่อนอบ	11.59	9.04	2.03
อบโดยใช้ลมร้อน	15.70	11.81	2.30
อบโดยการคั่ว	13.71	11.75	2.24
อบโดยใช้ไอน้ำ	13.65	10.01	2.16
อบโดยใช้ไมโครเวฟ	16.27	12.18	2.25

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.8 งานวิจัยเกี่ยวกับรังสีอินฟราเรดที่มีผลต่อสารสำคัญของผลผลิตทางการเกษตรระหว่างกระบวนการอบแห้ง

2.8.1 งานวิจัยเกี่ยวกับรังสีอินฟราเรดสุญญากาศในการรักษาสารคลอโรฟิลล์ในต้นหอมเวลล์

มีงานวิจัยที่เกี่ยวกับการรักษาสารคลอโรฟิลล์ในต้นหอมเวลล์ ในขณะที่กระบวนการอบด้วยรังสีอินฟราเรดแบบสุญญากาศ พบว่าระดับกำลังไฟฟ้ามีผลต่อปริมาณสารคลอโรฟิลล์ในต้นหอมและพบว่ารังสีอินฟราเรดมีอิทธิพลต่อความชื้นในวัสดุอุณหภูมิที่ผิวของวัสดุ และอัตราการอบแห้ง จากรูปที่ 2.12 แสดงให้เห็นว่าที่กำลังไฟ 90-100 W จะได้ปริมาณสารคลอโรฟิลล์ในต้น หอมเวลล์มากที่สุด และที่ กำลังไฟฟ้า 40-60 W นั้นจะได้ปริมาณสารคลอโรฟิลล์น้อยเกือบเท่าตัวของปริมาณสารคลอโรฟิลล์ที่ กำลังไฟฟ้า 90-100W [20]



รูปที่ 2.12 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสารคลอโรฟิลล์ต่อกำลังไฟฟ้า [20]

2.8.2 งานวิจัยเกี่ยวกับรังสีอินฟราเรดในการเพิ่มปริมาณสารเคมีในใบชาเขียว

จากงานวิจัยใบชาเขียวที่ผ่านการอบแห้งแบบอินฟราเรดผสมความร้อนพบว่าปริมาณสารเคมีในใบชาเขียวที่มีปริมาณเพิ่มขึ้น เช่น สารฟีนอล, ฟลาโวนอยด์, วิตามินซี เป็นต้น เมื่อเทียบกับการอบแห้งแบบปกติ(การอบลมร้อน การคั่ว) และการอบแห้งแบบอินฟราเรดยังส่งผลต่อคุณสมบัติอื่นๆที่สังเกตได้ง่าย เช่น รสชาติ กลิ่น [21]

- ปริมาณสารฟีนอลเพิ่มขึ้นจาก 116.30 เป็น 171.77 mg/g
- ปริมาณสารฟลาโวนอยด์เพิ่มขึ้นจาก 17.54 เป็น 24.76 mg/g
- ปริมาณกรดแอสคอร์บิกเพิ่มขึ้นจาก 3.07 เป็น 24.76 mg/g
- ปริมาณ Epicatechin gallate เพิ่มขึ้นจาก 2.41 เป็น 4.59 mg/mL
- ปริมาณ Epigallocatechin gallate เพิ่มขึ้นจาก 20.61 เป็น 28.54 mg/mL

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

การดำเนินงานวิจัย

3.1 ตัวอย่างที่ใช้ในการทดลอง

ตัวอย่างที่ใช้ในการทดลอง คือ รำข้าวอัดเม็ดจากบริษัท ซีอีโอ อกริฟูด จำกัด จ.สิงห์บุรี มีความชื้นเริ่มต้นประมาณ 16-18%wb ซึ่งเป็นรำข้าวที่ผ่านกระบวนการอัดเม็ดด้วยไอน้ำ ตัวอย่างถูกนำมาเก็บไว้ในตู้เย็นที่อุณหภูมิ 4-5 °C ดังแสดงในรูปที่ 3.1 เมื่อจะนำมาทำการทดลอง ให้นำตัวอย่างออกมาวางไว้ที่อุณหภูมิห้องก่อน แล้วจึงเริ่มการทดลอง

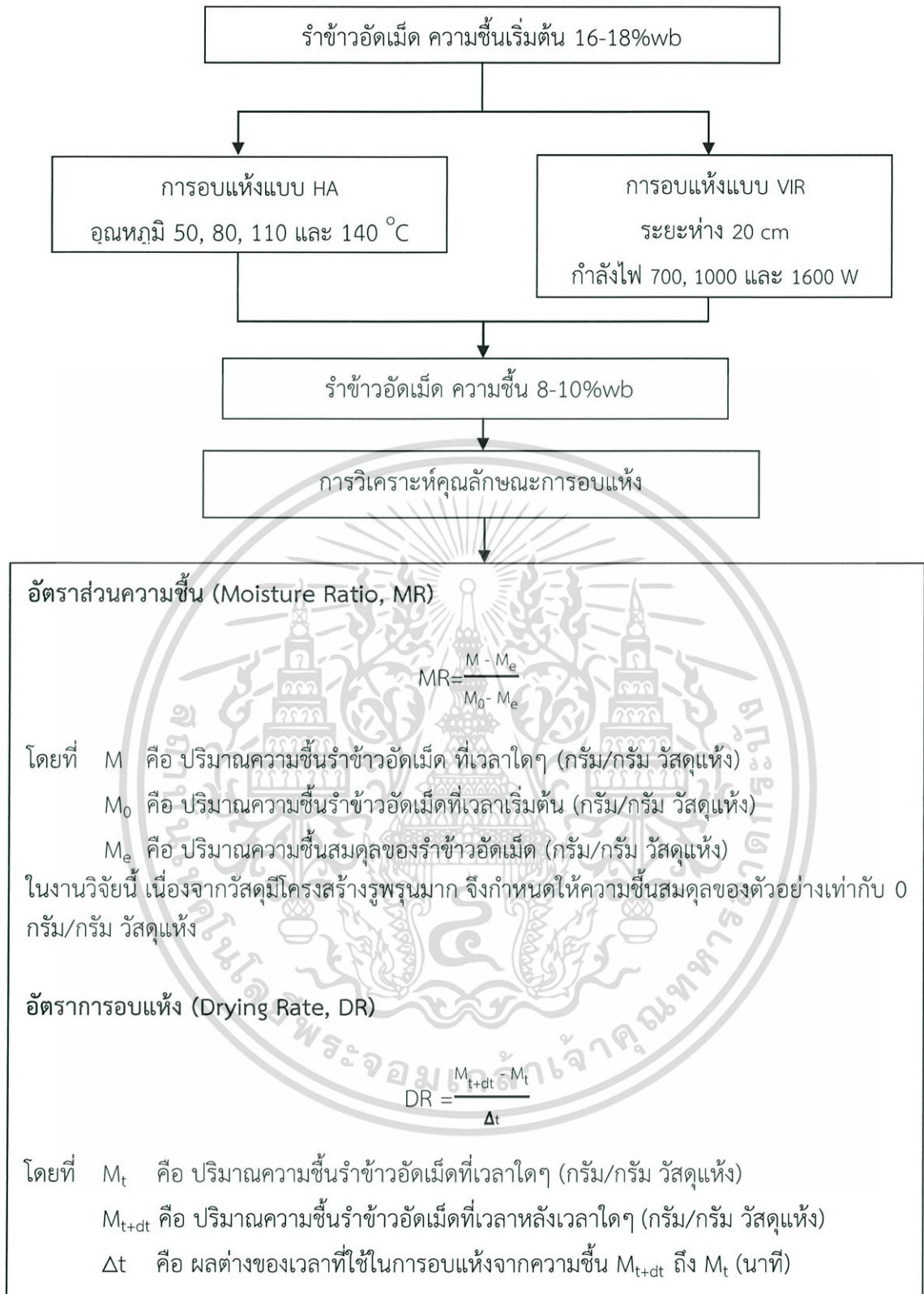


รูปที่ 3.1 ตัวอย่างรำข้าวอัดเม็ดจากบริษัท ซีอีโอ อกริฟูด จำกัด จ.สิงห์บุรี

3.2 แผนการทดลองการอบแห้งและวิเคราะห์คุณลักษณะการอบแห้ง

นำรำข้าวอัดเม็ดที่มีความชื้นเริ่มต้นประมาณ 16-18%wb มาทำการอบแห้งให้มีความชื้นสุดท้ายเป็น 8-10%wb อุณหภูมิ 50, 80, 110 และ 140 °C สำหรับการอบแห้งแบบลมร้อน (hot air drying, HA) และกำลังไฟ 700, 1000 และ 1600 W สำหรับการอบแห้งแบบอินฟราเรดสุญญากาศ (vacuum-infrared drying, VIR) โดยแผนการทดลองในการศึกษานี้คือ แผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ (CRD) ในระหว่างการอบแห้ง มีการศึกษาลักษณะการอบแห้งของรำข้าวอัดเม็ดจนมีความชื้นสุดท้ายที่ต้องการ รวมทั้งมีการศึกษาคุณภาพของรำข้าวอัดเม็ดอบแห้งและปริมาณน้ำมันรำข้าว โดยมุ่งเน้นที่การศึกษาอิทธิพลของวิธีการอบแห้งและอิทธิพลของสภาวะการอบแห้งในทุกการทดลองมีการทำซ้ำทั้งหมด 2 ครั้ง ทั้งนี้มีการแสดงแผนภาพการทดลองของการศึกษานี้ไว้ในรูปที่ 3.2

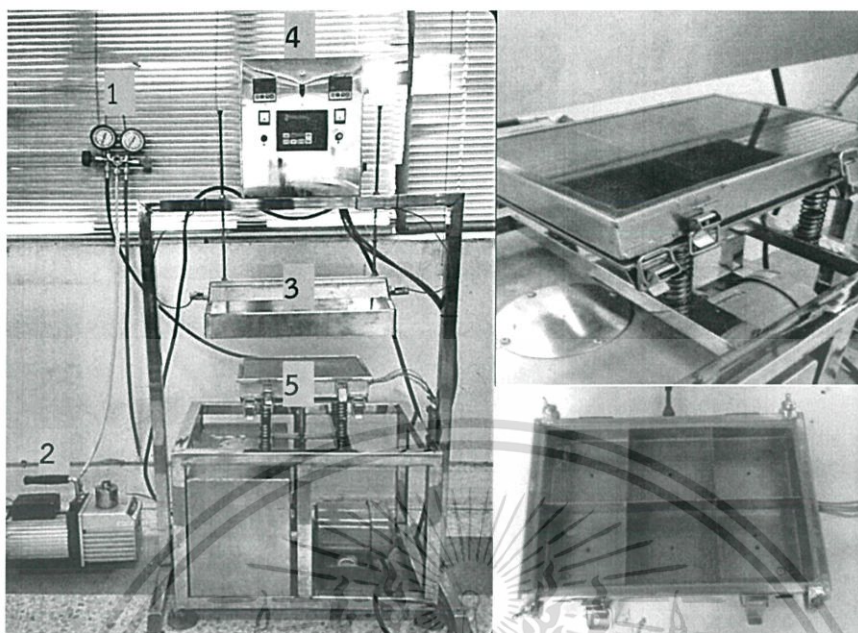
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.2 แผนการทดลองการอบแห้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 เครื่องอบแห้งแบบอินฟราเรดสุญญากาศ (VIR)



รูปที่ 3.3 เครื่องอบแห้งแบบอินฟราเรดสุญญากาศและถาดอบแห้ง

ส่วนประกอบของเครื่องอบแห้งแบบอินฟราเรดสุญญากาศร่วมกับเบดสัน

- (1) บารอมิเตอร์ตัววัดและปรับความดันบรรยากาศ
- (2) ปั๊มสุญญากาศ ทำให้เกิดภาวะสุญญากาศ และทำหน้าที่ดูดความชื้นออกจากห้องอบห้องอบ
- (3) หลอดรังสีอินฟราเรดเป็นแหล่งความร้อน สามารถปรับเปลี่ยนหลอดได้
- (4) ชุดควบคุม จะมีตัวปรับความถี่ในการสั่นและหน้าปัดแสดงค่าอุณหภูมิในห้องอบ
- (5) ห้องอบ จะมีลักษณะเป็นกล่องสี่เหลี่ยม เมื่อจะทำการอบให้ใส่วัตถุเล็กๆเข้าไปในห้องอบ โดยในห้องอบจะแบ่งเป็น 6 ช่อง แต่ละช่องจะมีเทอร์โมคัปเปิลคอยวัดอุณหภูมิที่ก้นถาด

หลักการทำงานของเครื่องอบแห้งอินฟราเรด

ในการทำงานของเครื่อง ห้องอบจะถูกแบ่งเป็น 6 ช่องจะได้รับความร้อนจากหลอดอินฟราเรด โดยสามารถปรับระยะความห่างของหลอดและถาดอบแห้งได้ และภายในห้องอบจะมีสถานะเป็นสุญญากาศโดยใช้ปั๊มสุญญากาศในการดูดความชื้นออกจากห้องอบ ในการกำหนดความดันเราจะใช้บารอมิเตอร์เป็นตัววัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4 การทดลองการอบแห้ง

3.4.1 การอบแห้งแบบลมร้อน

ทำการอบแห้งโดยวิธีการอบแห้งแบบ HA โดยใช้วัสดุประมาณ 420 g หรือเต็มถาดที่ใช้ในการอบแห้งมีความหนาของวัสดุเป็น 1 cm เกลี่ยให้เรียบเสมอกัน ดังแสดงในรูปที่ 3.3 แล้วนำเข้าตู้อบ โดยอุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้ง คือ 50, 80, 110 และ 140 °C ในการศึกษาคุณลักษณะในการอบแห้งทำการหาความชื้นของรำข้าวอัดเม็ดที่เปลี่ยนแปลงไปในระหว่างกระบวนการอบแห้งโดยสุ่มตัวอย่างของรำข้าวอัดเม็ดอบแห้งที่เวลาต่างๆสำหรับแต่ละอุณหภูมิอบแห้งดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 แสดงการสุ่มตัวอย่างของการอบแห้งข้าวเปลือกที่เวลาต่างๆของแต่ละอุณหภูมิ

อุณหภูมิ (°C)	เวลา (นาที)									
	0	15	30	45	60	90	120	150	180	210
50	0	15	30	45	60	90	120	150	180	210
80	0	10	20	30	40	50	60	70	80	
110	0	5	10	15	20	25	30	35	40	
140	0	5	10	15	20	25				



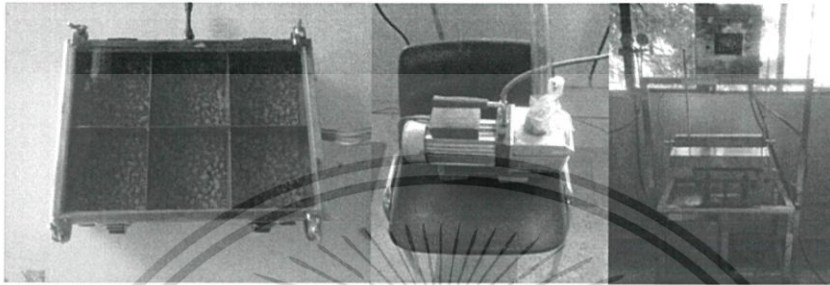
รูปที่ 3.4 การเตรียมตัวอย่างรำข้าวอัดเม็ดก่อนเข้าตู้อบ

3.4.2 การอบแห้งแบบอินฟราเรดสุญญากาศ

ทำการอบแห้งโดยวิธีการอบแห้งแบบ VIR โดยใช้วัสดุประมาณ 185 g หรือเต็มถาดอบแห้ง มีความหนาของวัสดุเป็น 0.5 เซนติเมตร เกลี่ยให้เรียบเสมอกัน แล้วนำเข้าเครื่องอบแห้งแบบอินฟราเรดสุญญากาศ โดยกำลังไฟที่ใช้ในการอบแห้ง คือ กำลังไฟ 700, 1000 และ 1600 W โดยตั้งระยะห่างระหว่างหลอดอินฟราเรดกับถาดอบอยู่ที่ 20 cm และต่อสายป้อนสุญญากาศ ดังแสดงในรูปที่ 3.4 ในการศึกษาคุณลักษณะในการอบแห้งทำการหาความชื้นของรำข้าวอัดเม็ดที่เปลี่ยนแปลงไปในระหว่างกระบวนการอบแห้งโดยสุ่มตัวอย่างของรำข้าวอัดเม็ดอบแห้งที่เวลาต่างๆ สำหรับแต่ละอุณหภูมิอบแห้ง เอกดังตัวร่างที่ 3.2 ที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.2 แสดงการสุ่มตัวอย่างของการอบแห้งรำข้าวอัดเม็ดที่เวลาต่างๆของแต่ละกำลังไฟ

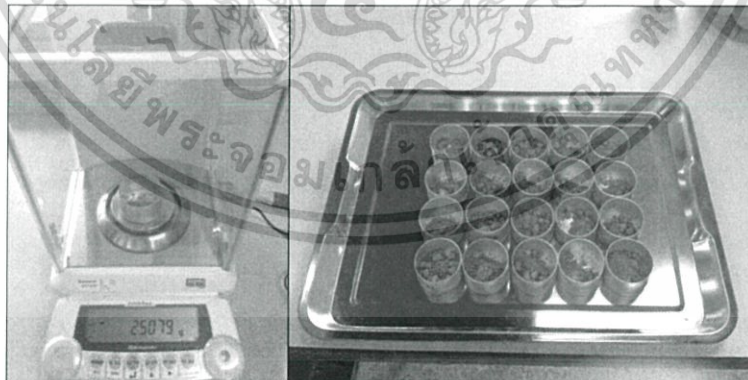
กำลังไฟ (W)	เวลา (นาที)								
	0	5	10	15	20	25	30	35	40
700	0	5	10	15	20	25	30	35	40
1000	0	3	6	9	12	15	18	21	
1600	0	2	4	6	8	10	12	14	



รูปที่ 3.5 การเตรียมตัวอย่างรำข้าวอัดเม็ดก่อนเข้าเครื่องอบแห้งแบบ VIR

3.5 การวิเคราะห์ปริมาณความชื้น

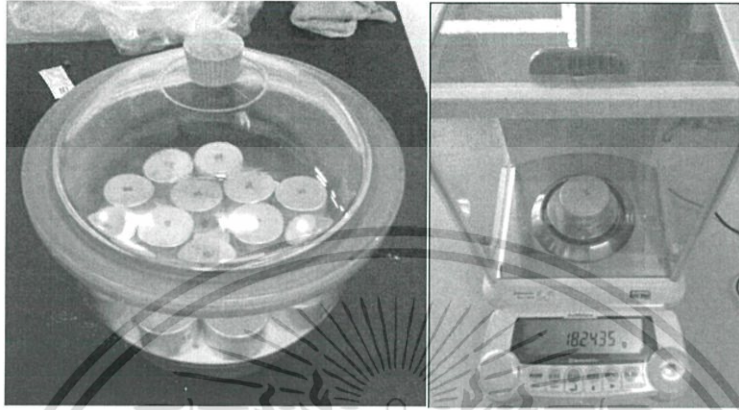
ชั่งตัวอย่างรำข้าวอัดเม็ด 1-3 กรัมใส่กระป๋องอลูมิเนียมวัดน้ำหนักตัวอย่างเปียกโดยทำซ้ำสองครั้งต่อตัวอย่าง ดังแสดงในรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 การเก็บข้อมูลน้ำหนักเปียก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นำตัวอย่างพร้อมกระป๋องอลูมิเนียมวัดความชื้นไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 105 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นนำตัวอย่างพร้อมกระป๋องอลูมิเนียมวัดความชื้นออกจากตู้อบ ใส่ในโถดูดความชื้นทิ้งไว้ 30 นาที แล้วชั่งน้ำหนักเป็นน้ำหนักตัวอย่างแห้งบวกน้ำหนักของกระป๋องอลูมิเนียมแห้ง จดค่าที่ได้ ดังแสดงในรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 โถดูดความชื้นและการเก็บข้อมูลน้ำหนักตัวอย่างแห้งบวกน้ำหนักของกระป๋องอลูมิเนียมแห้ง

นำค่าที่ได้มาคำนวณหาปริมาณความชื้นของแต่ละช่วงเวลาโดยจะนำมาคำนวณในสมการที่ (3.1) และ (3.2)

ปริมาณความชื้นฐานเปียก

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

ปริมาณความชื้นฐานแห้ง

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

โดยที่ M_w คือ ปริมาณน้ำ (กรัม)
 M_s คือ น้ำหนักตัวอย่างแห้ง (กรัม)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.6 การวิเคราะห์ข้อมูลคุณลักษณะการอบแห้ง

3.6.1 อัตราส่วนความชื้น (moisture ratio, MR)

หลังจากได้ความชื้นตามอุณหภูมิและที่ระยะต่างๆแล้วจึงนำมาคำนวณหาอัตราส่วนความชื้นในสมการที่ (3.3)

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

โดยที่ M คือ ปริมาณความชื้นรำข้าวอัดเม็ดที่เวลาใดๆ (กรัม / กรัมวัสดุแห้ง)

M_0 คือ ปริมาณความชื้นรำข้าวอัดเม็ดที่เวลาเริ่มต้น (กรัม / กรัมวัสดุแห้ง)

M_e คือ ปริมาณความชื้นสมดุลของรำข้าวอัดเม็ด (กรัม / กรัมวัสดุแห้ง)

ในงานวิจัยนี้ เนื่องจากวัสดุมีโครงสร้างรูพรุนมาก จึงกำหนดให้ความชื้นสมดุลของตัวอย่างเท่ากับ 0 กรัม / กรัมวัสดุแห้ง

3.6.2 อัตราการอบแห้ง (drying rate, DR)

เมื่อกำหนดหาอัตราส่วนความชื้นได้แล้วจึงนำมาคำนวณอัตราการอบแห้งในสมการที่ (3.4)

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

โดยที่ M_t คือ ปริมาณความชื้นรำข้าวอัดเม็ดที่เวลาใดๆ (กรัม/กรัม วัสดุแห้ง)

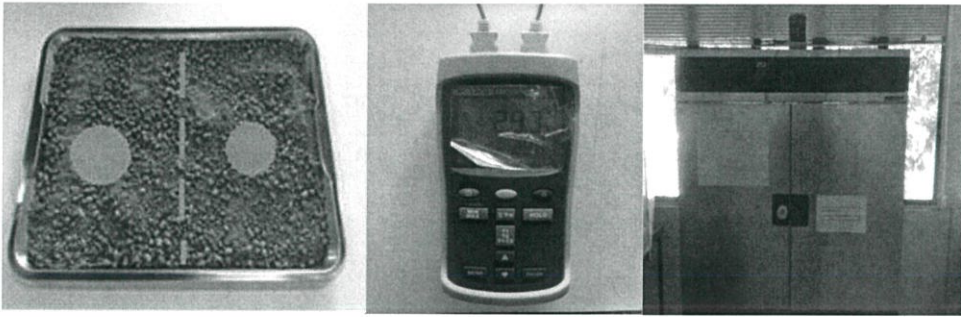
M_{t+dt} คือ ปริมาณความชื้นรำข้าวอัดเม็ดที่เวลาหลังเวลาใดๆ (กรัม/กรัม วัสดุแห้ง)

Δt คือ ผลต่างของเวลาที่ใช้ในการอบแห้งจากความชื้น M_{t+dt} ถึง M_t (นาที)

3.7 การวัดอุณหภูมิของวัสดุขณะอบแห้ง

3.7.1 การวัดอุณหภูมิขณะอบแห้งแบบลมร้อน

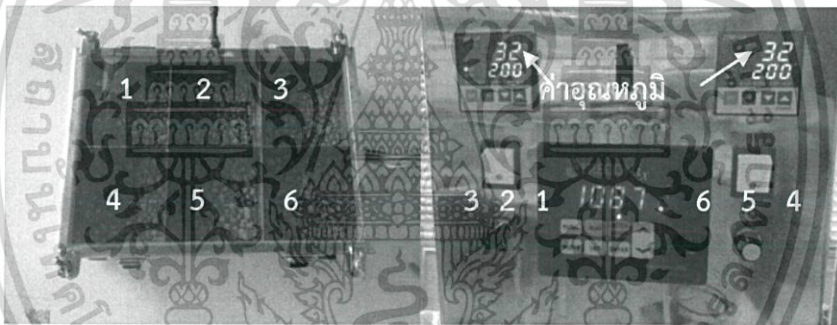
การวัดอุณหภูมิที่ผิวของวัสดุขณะกำลังอบแห้งแบบ HA ทำโดยใช้อุปกรณ์เทอร์โมคัปเปิล ต่อสายวัดอุณหภูมิสองสายเพื่อวัดอุณหภูมิสองจุดในภาตขณะอบแห้งโดยแบ่งภาตอบแห้งเป็น 2 ส่วนให้ปลายสายวัดอุณหภูมิอยู่จุดกึ่งกลางของแต่ละส่วนในภาตและให้ปลายสายวัดอุณหภูมิแตะที่ผิวของวัสดุ ดังแสดงในรูปที่ 3.8 ในขณะที่ทำการอบแห้งเพื่อเก็บค่าอุณหภูมิที่ผิววัสดุเปลี่ยนแปลงตามช่วงเวลาต่างๆ ตามตารางที่ 3.1



รูปที่ 3.8 การวัดอุณหภูมิที่ผิวขณะทำการอบแห้งแบบ HA

3.7.2 การวัดอุณหภูมิขณะอบแห้งแบบอินฟราเรดสุญญากาศ

การวัดอุณหภูมิที่ผิวของวัสดุขณะกำลังอบแห้งแบบ VIR สามารถทำการวัดได้ที่ตัวเครื่อง โดยจะมีเทอร์โมคัปเปิลติดตั้งอยู่ที่ถาดสามารถวัดอุณหภูมิที่ผิวในแต่ละช่องได้โดยการหมุนปุ่มเทอร์โมคัปเปิลตามเลขประจำช่อง ดังแสดงในรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.9 การวัดอุณหภูมิที่ผิวขณะทำการอบแห้งแบบ VIR

3.8 การสร้างแบบจำลองการอบแห้งรำข้าวอัดเม็ด

การวิเคราะห์หาสมการอบแห้งชั้นบางที่เหมาะสมของการอบแห้งรำข้าวอัดเม็ด ทำได้โดยนำค่าอัตราส่วนความชื้นที่เวลาใดๆ จากการทดลองมาเปรียบเทียบกับสมการอบแห้งชั้นบางที่ใช้สำหรับทำนายค่าความชื้น ซึ่งอยู่ในรูปสมการอบแห้งแบบกึ่งทฤษฎี (semi-theoretical drying equation) รูปแบบสมการพื้นฐานที่ใช้ทำนายการอบแห้งชั้นบางมีรายละเอียดดังแสดงไว้ใน ตารางที่ 3.3 ซึ่งการวิเคราะห์หาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของสมการอบแห้งชั้นบางใช้เทคนิคการวิเคราะห์ความถดถอยแบบไม่เชิงเส้น (nonlinear regression) ซึ่งมีดัชนีบ่งชี้ความสามารถในการทำนายของสมการ คือ ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (coefficient of determination, R^2) และค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (root mean square error, RMSE) [3]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.3 รูปแบบสมการออบแห้งแบบชั้นบาง

ชื่อสมการ	รูปแบบสมการ	อ้างอิง
Lewis	MR = exp(-kt)	Lui, 1997
Henderson and Pabis	MR = a exp(-kt)	Doymaz, 2004
Logarithmic	MR = a exp(-kt)+c	Togrul, 2002

โดยที่ค่า R^2 และ RMSE มีความสัมพันธ์ดังสมการ (3.5) และ (3.6)

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

โดยที่ y คือ อัตราส่วนความชื้นจากการทดลอง

\hat{y} คือ อัตราส่วนความชื้นจากการทำนายจากสมการ

\bar{y} คือ อัตราส่วนความชื้นเฉลี่ยจากการทดลอง

$$RMSE = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (MR_{prediction} - MR_{experiment})^2}{N} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (3.6)$$

โดยที่ N = จำนวนชุดข้อมูลทั้งหมด

3.9 การวิเคราะห์คุณภาพ

เมื่อได้รำข้าวอัดเม็ดออบแห้งที่มีความชื้น 8-10%wb จากการอบแห้งที่สภาวะต่างๆ แล้วจึงนำมาวิเคราะห์คุณภาพของน้ำมันรำข้าว โดยขั้นตอนแรกจะเป็นการหาปริมาณน้ำมัน จากนั้นนำน้ำมันที่สกัดได้ไปวิเคราะห์ค่าความเป็นกรดในน้ำมันโดยวิธีการวิเคราะห์อย่างละเอียดแสดงไว้ดังต่อไปนี้

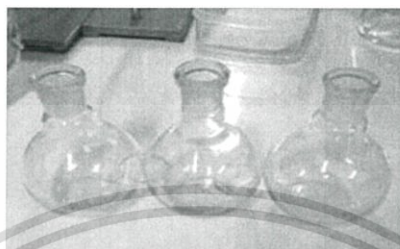
3.9.1 การสกัดน้ำมันจากรำข้าวอัดเม็ด

กระบวนการสกัดน้ำมันเพื่อวิเคราะห์ปริมาณน้ำมันแสดงอยู่ในรูปที่ 3.10 การหาปริมาณน้ำมันในตัวอย่างทำได้โดยเริ่มจากการชั่งน้ำหนัก boiling flask ก้นแบนขนาด 250 ml ที่บรรจุ glass Ball จำนวน 2 เม็ด แล้วจดบันทึกน้ำหนักที่ได้ จากนั้นตวงเฮกเซน 250 ml ใส่ลงไป เตรียมกระดาษกรองโดยการม้วนกระดาษกรองให้เป็นลักษณะกรวยแล้วพับด้านก้นเล็กน้อยแล้วชั่งตัวอย่างประมาณ 10 g ใส่ลงไป จากนั้นพับกระดาษกรองให้สนิทธระวังอย่าให้ตัวอย่างหก นำไปใส่ใน thimble แล้วปิดปาก thimble ด้วยสำลี นำ thimble ใส่ใน soxhlet จากนั้นเทเฮกเซน จาก boiling flask ลงไปประมาณ 1/3 ของ soxhlet ต่อ soxhlet เข้ากับ boiling flask และ condenser ให้ความร้อนเป็นเวลา 4 ชั่วโมง หลังจากนั้นนำไปเข้าสู่ตุลันเพื่อแยกเอาน้ำมันออกจากเฮกเซน พอกลั่นเสร็จนำไปเข้าสู่อบที่อุณหภูมิ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่ขึ้นต้นการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

105 °C เพื่อไล่ความชื้นและเฮกเซนที่อาจหลงเหลืออยู่ เมื่อครบเวลานำ boiling flask ที่มีน้ำมันอยู่ใน desiccator 15 นาที แล้วนำมาชั่งน้ำหนักและบันทึกน้ำหนักในทดลองการสกัดน้ำมันรำข้าวจากนั้นคำนวณปริมาณน้ำมันที่ได้ ดังสมการที่ (3.7)

ชั่งน้ำหนัก boiling flask ก้นแบนขนาด 250ml ที่บรรจุ glass balls จำนวน 2 เม็ด แล้วจดบันทึกน้ำหนักที่ได้



ใส่กระดาษกรองใน thimble โดยการม้วนกระดาษกรองให้เป็นลักษณะกรวย แล้วพับด้านกันเล็กน้อยแล้วชั่งตัวอย่าง 10 g ใส่ลงไป จากนั้นพับกระดาษกรองให้สนิทระวังอย่าให้ตัวอย่างหก ปิดปาก thimble ด้วยสำลี



ตวง hexane 250 ml โดยใส่ใน boiling flask ก้นแบน ขนาด 250 ml ในชั้น (1)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นำ thimble ใส่ใน soxhlet จากนั้นเท hexane ประมาณ 1/3 ของ soxhlet ต่อ soxhlet เช้ากับ boiling flask และ condenser ให้ความร้อนเป็นเวลานาน 4 ชั่วโมง



นำเข้าชุดกลั่น เพื่อแยก hexane ออก



นำตัวอย่างที่ได้ไปเข้าตู้อบที่อุณหภูมิ 105 °C เป็นเวลา 50 นาที เพื่อไล่ความชื้น และ hexane ที่เหลือ



เมื่อครบเวลานำ boiling flask ใส่ใน desiccator 15 นาที แล้วนำมาชั่งน้ำหนัก และบันทึกน้ำหนัก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การคำนวณหาค่าปริมาณน้ำมัน (3.7)

$$\text{ปริมาณน้ำมัน (\%)} = \frac{\text{น.น. boiling flask หลังกลั่นแยก Hexane} - \text{น.น. boiling flask เปล่า}}{\text{น้ำหนักตัวอย่าง}} * 100$$

รูปที่ 3.10 แสดงกระบวนการสกัดน้ำมันเพื่อวิเคราะห์ปริมาณน้ำมัน

3.9.2 ค่าความเป็นกรดในน้ำมัน

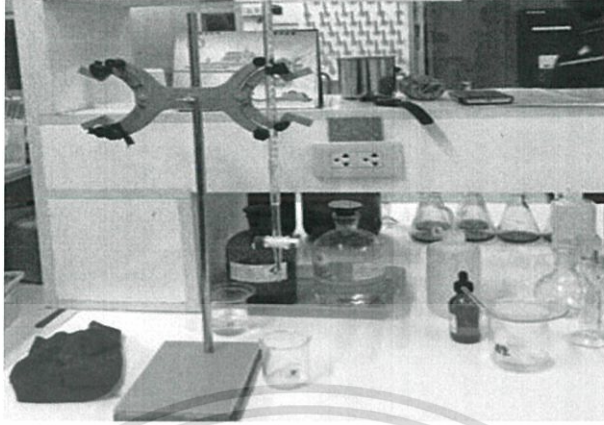
กระบวนการหาค่ากรดในน้ำมันแสดงอยู่ในรูปที่ 3.11 การหาค่ากรดในน้ำมันทำได้โดยการ หยด phenolphthalein 2-3 หยดลงไปน้ำมันบริสุทธิ์ที่ได้ผ่านกระบวนการสกัดน้ำมันและกลั่นออกมาแล้ว จากกระบวนการหาปริมาณน้ำมัน จากนั้นตวง buffer ที่มีสภาพเป็นกลาง 50 ml แล้วถ่ายลงใน boiling flask ที่มีน้ำมันอยู่ แกว่งเบาๆจนน้ำมันละลาย หลังจากนั้นทำการไตเตรทตัวอย่าง ด้วย KOH 0.1 N จนได้สีส้มอมชมพู เราสามารถคำนวณหาค่ากรดในน้ำมันจากสมการ (3.8) โดยมีการแสดงแผนภาพของการทดลองดังนี้ [22]

ชั่งตัวอย่างน้ำมัน 2 g ลงใน erlenmeyer flask ขนาด 250 ml บันทึกน้ำหนักตัวอย่าง หยด phenolphthalein 2-3 หยด ลงไปในตัวอย่างน้ำมัน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตวง buffer ที่มีสภาพเป็นกลาง 50 ml แล้วถ่ายลงใน boiling flask ข้อ (2) แก้ว เบาๆจนน้ำมันละลาย ทำการไตเตรตตัวอย่าง (3) ด้วย KOH 0.1 N จนได้สีส้มอมชมพู



การคำนวณหาค่า AV (3.8)

$$AV \text{ (mg KOH/g oil)} = \text{Factor ของ AV} * \frac{\text{จำนวน ml ของ KOH}}{\text{น้ำหนักของน้ำมันตัวอย่าง}}$$

$$\text{Factor ของ AV} = \text{ความเข้มข้น KOH} * 56.11$$

รูปที่ 3.11 กระบวนการวิเคราะห์ค่ากรดในน้ำมัน

3.10 การวิเคราะห์ค่าพลังงานที่ใช้ในการอบแห้ง

การวัดค่าพลังงานที่ใช้ในการอบแห้งทำได้โดยใช้เครื่อง DIGITAL CLAMP METER ในการวัดค่ากระแสไฟฟ้าที่ใช้ในระหว่างการอบแห้ง ดังแสดงในรูปที่ 3.12 คำนวณค่าพลังงานความร้อนทั้งหมดและพลังงานจำเพาะที่ใช้ในการอบแห้งจากสมการ (3.10) และ (3.11)

$$\text{ค่าพลังงานความร้อน (J)} = VI(\cos\phi) * \text{เวลาที่ใช้ออบแห้ง(วินาที)} \quad (3.10)$$

โดยที่ V = ความต่างศักย์ไฟฟ้า 220 โวลต์

I = ค่ากระแสไฟที่วัดได้

$\cos\phi$ = 0.94 (ค่าประสิทธิภาพ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าพลังงานจำเพาะที่ใช้ในการอบแห้ง (J/kg water)

$$= \frac{\text{ค่าพลังงานความร้อน (J)}}{\text{ปริมาณน้ำที่ระเหยออกจากวัสดุ (kg water)}} \quad (3.11)$$



รูปที่ 3.12 เครื่อง DIGITAL CLAMP METER และวิธีการวัดกระแสไฟฟ้าในระหว่างอบแห้ง

3.11 การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

ทำการทดสอบสมมติฐานหาค่าเฉลี่ย ด้วยวิธีการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียว (One - way ANNOVA) และทำการเปรียบเทียบเชิงพหุคูณ ด้วยวิธี Duncan's New Muntiple Rank Test ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการทดลอง

4.1 การอบแห้งรำข้าวอัดเม็ดด้วยวิธีการอบแห้งแบบลมร้อน

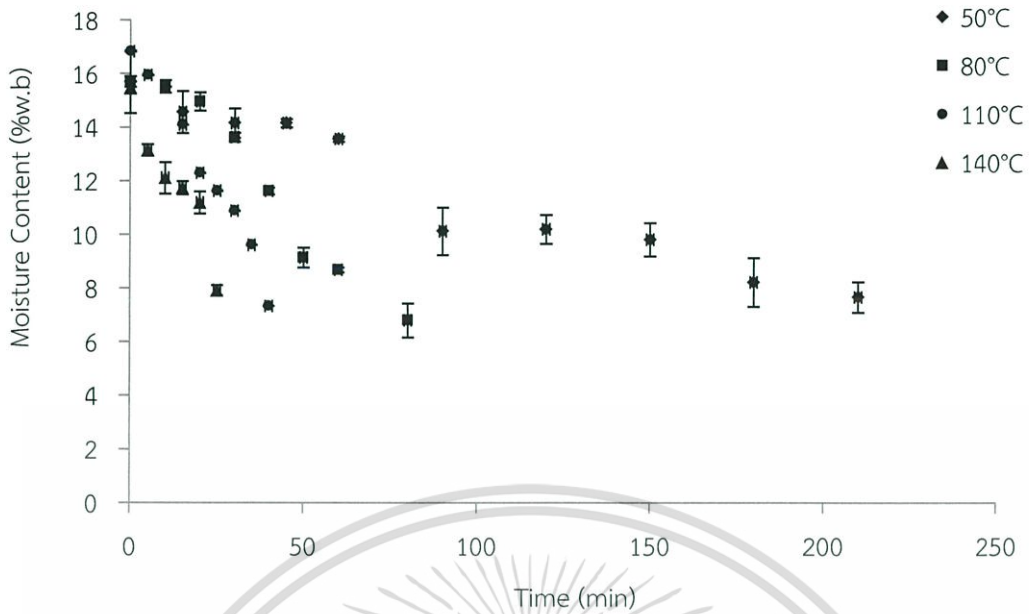
4.1.1 เวลาที่ใช้ในการอบแห้งอัตราการอบแห้ง และอุณหภูมิสุดท้ายที่ผิวรำข้าวอัดเม็ด

จากตารางที่ 4.1 และรูปที่ 4.1 อุณหภูมิในการอบแห้งแบบลมร้อน (hot air drying, HA) 50, 80, 110, 140 °C ใช้เวลาในการอบแห้ง 210, 80, 40, 25 นาที ตามลำดับ จึงได้รำข้าวอัดเม็ดที่มีความชื้นสุดท้ายที่ต้อง คือ 9%wb ซึ่งเห็นได้ว่าเวลาในการอบแห้งลดลง เมื่อเพิ่มอุณหภูมิมอบแห้ง ซึ่งสอดคล้องกับอัตราการอบแห้งเฉลี่ย (DR เฉลี่ย) ที่เพิ่มขึ้น เมื่อเพิ่มอุณหภูมิลมร้อนเช่นกัน โดยค่าค่าเฉลี่ย DR มีค่า 0.005, 0.0014, 0.0028, 0.0032 g water/g dry matter·min ตามลำดับ รูปที่ 4.2 แสดงการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิที่ผิวของรำข้าวอัดเม็ดตามเวลาในการอบแห้งที่เพิ่มขึ้น

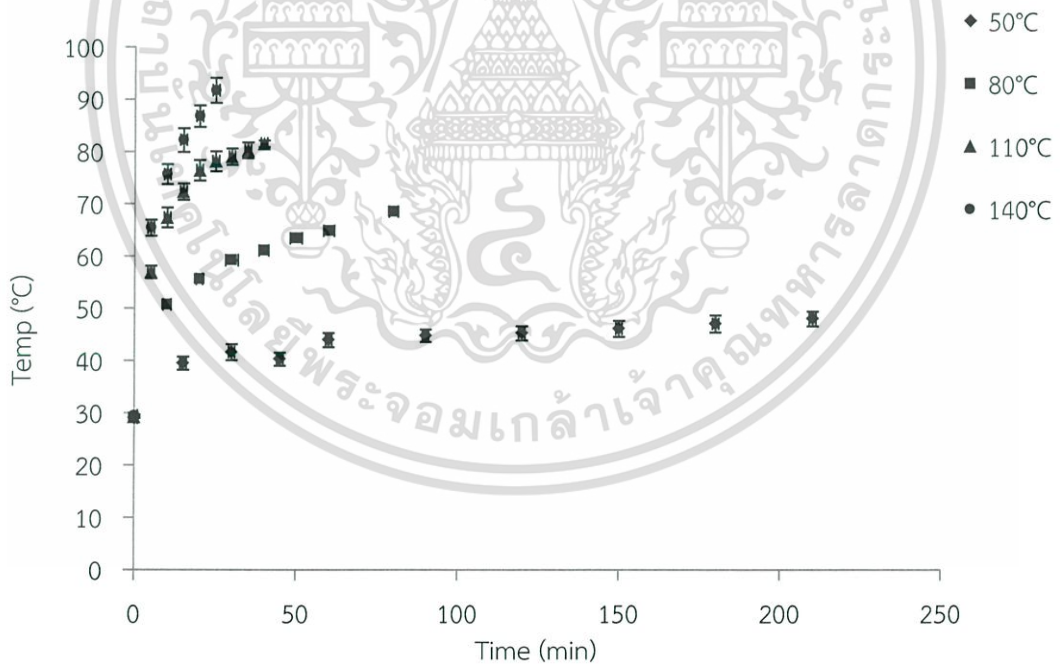
ตารางที่ 4.1 ระยะเวลาที่ใช้อบแห้ง DR เฉลี่ย และอุณหภูมิสุดท้ายที่ผิวรำข้าวอัดเม็ดเมื่ออบแห้งแบบ HA ที่อุณหภูมิต่างๆ

อุณหภูมิ (°C)	เวลา (นาที)	DR เฉลี่ย (g water/g dry matter·min)	อุณหภูมิสุดท้ายของตัวอย่าง (°C)
50	210	0.0005	48
80	80	0.0014	69
110	40	0.0028	82
140	25	0.0032	92

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

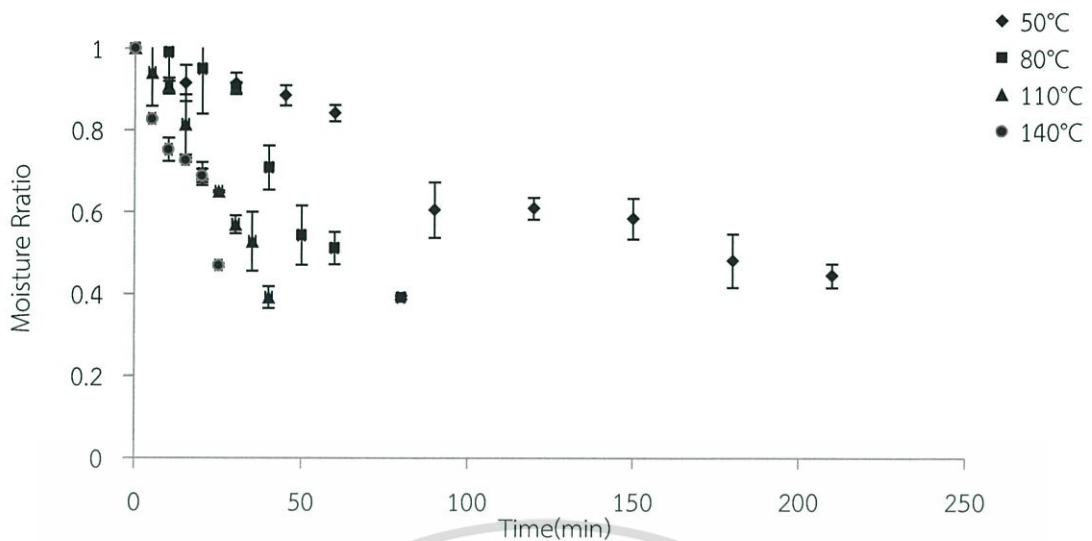


รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาในการอบแห้งกับความชื้นของรำข้าวอัดเม็ดเมื่ออบแห้งแบบ HA ที่อุณหภูมิต่างๆ



รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาในการอบแห้งกับอุณหภูมิที่ผิวรำข้าวอัดเม็ดเมื่ออบแห้งแบบ HA ที่อุณหภูมิต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาในการอบแห้งกับอัตราส่วนความชื้นของรำข้าวอัดเม็ดเมื่ออบแห้งแบบ HA ที่อุณหภูมิต่างๆ

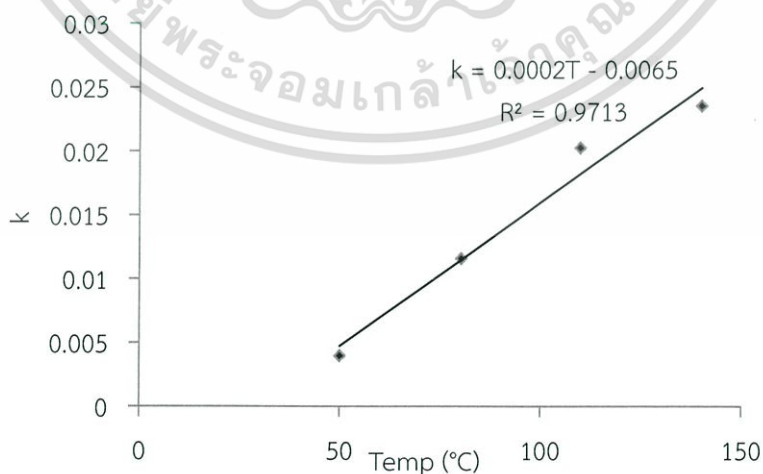
4.1.2 แบบจำลองการอบแห้งของการอบแห้งรำข้าวอัดเม็ดด้วยวิธีการอบแห้งแบบลมร้อน

ตารางที่ 4.2 แสดงค่าคงที่และสัมประสิทธิ์ของแบบจำลองการอบแห้งจากข้อมูลการอบแห้งรำข้าวอัดเม็ดด้วยวิธีการอบแห้งแบบ HA ที่อุณหภูมิต่างๆ จากการเปรียบเทียบค่า R^2 พบว่าค่า R^2 ของแบบจำลอง Henderson and Pabis มีค่าสูงสุด ในขณะที่ แบบจำลองนี้ให้ค่า RMSE ต่ำที่สุดด้วย ดังนั้น แบบจำลองของ Henderson and Pabis จึงถูกคัดเลือกเพื่อนำไปใช้ในการสร้างแบบจำลองทั่วไป

ตารางที่ 4.2 ค่าคงที่และสัมประสิทธิ์ของแบบจำลองจากข้อมูลการอบแห้งรำข้าวอัดเม็ดด้วยวิธีการอบแห้งแบบ HA

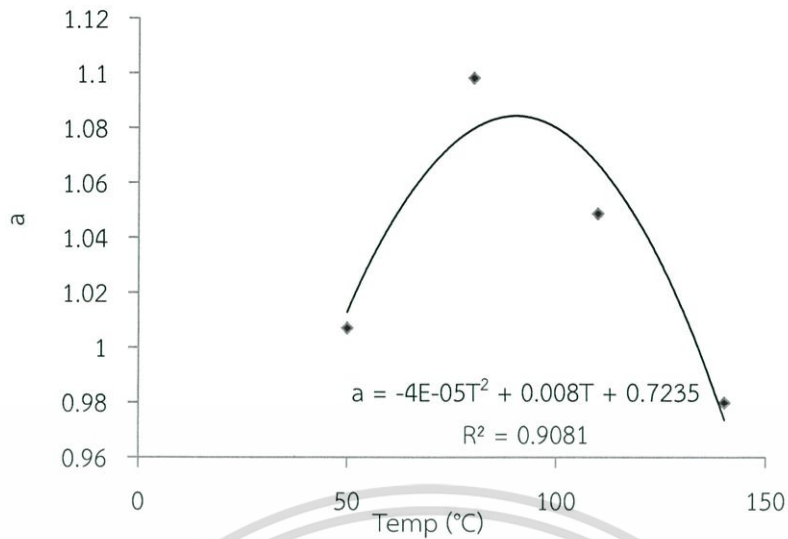
แบบจำลอง	อุณหภูมิ (°C)	ค่าคงที่และสัมประสิทธิ์			R ²	RMSE
		k	a	c		
Lewis	50	0.0039			0.9540	0.0414
	80	0.0095			0.8548	0.0866
	110	0.0184			0.9489	0.0442
	140	0.0248			0.8922	0.0521
Henderson	50	0.004	1.0069		0.9546	0.0411
	80	0.0116	1.0981		0.9008	0.0716
	110	0.0203	1.0486		0.963	0.0376
	140	0.0236	0.9797		0.8965	0.051
Logarithmic	50	0.0044	0.9413	0.0687	0.9545	0.0411
	80	0.00007	117.085	-116.016	0.9367	0.0572
	110	0.0002	90.3277	-89.3052	0.8551	0.0744
	140	0.0003	52.4098	-51.4444	0.8675	0.0578

เมื่อนำค่าคงที่ k มาสร้างความสัมพันธ์กับอุณหภูมิ (T) พบว่าความสัมพันธ์ที่ดีที่สุดคือแบบเชิงเส้นดังรูปที่ 4.4 และ เมื่อนำค่าคงที่ a มาสร้างความสัมพันธ์กับอุณหภูมิ พบว่าความสัมพันธ์ที่ดีที่สุดพอลิโนเมียลกำลังสอง ดังรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่าง k กับอุณหภูมิ (T)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่าง a กับ อุณหภูมิ (T)

ดังนั้นแบบจำลองทั่วไปสำหรับการอบแห้งรำข้าวอัดเม็ดด้วยวิธีการอบแห้งแบบลมร้อนที่อุณหภูมิ 50-140 °C คือ

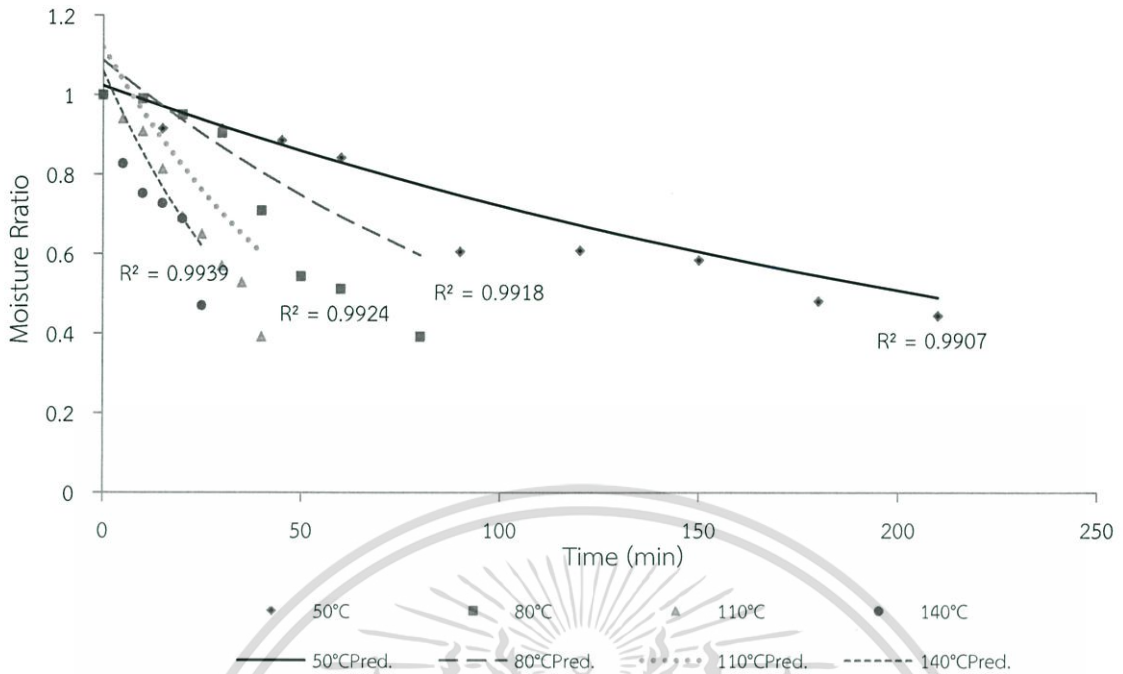
$$MR = (-0.00004T^2 + 0.008T + 0.7235) \text{EXP}(- (0.0002T - 0.0065)t) \quad (4.1)$$

โดยที่ MR = อัตราส่วนความชื้น

T = อุณหภูมิ

t = เวลา

จากรูปที่ 4.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง MR กับเวลา โดยข้อมูลแบบจุดแสดงข้อมูลจากการทดลอง และข้อมูลแบบเส้นแสดงข้อมูลจากการทำนายผลการเปรียบเทียบความสัมพันธ์พบว่า ค่า R^2 ของอุณหภูมิ 50, 80, 110, 140 °C มีค่า 0.9067, 0.8292, 0.6013, 0.6475 ตามลำดับ



รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาในการอบแห้งกับอัตราส่วนความชื้นของรำข้าวอัดเม็ดเมื่ออบแห้งแบบ HA ที่อุณหภูมิต่างๆ: ข้อมูลแบบจุด คือ ข้อมูลจากการทดลอง และข้อมูลแบบเส้น คือ ข้อมูลจากการทำนายจากสมการทั่วไป

4.2 การอบแห้งรำข้าวอัดเม็ดด้วยวิธีการอบแห้งแบบอินฟราเรดสุญญากาศ

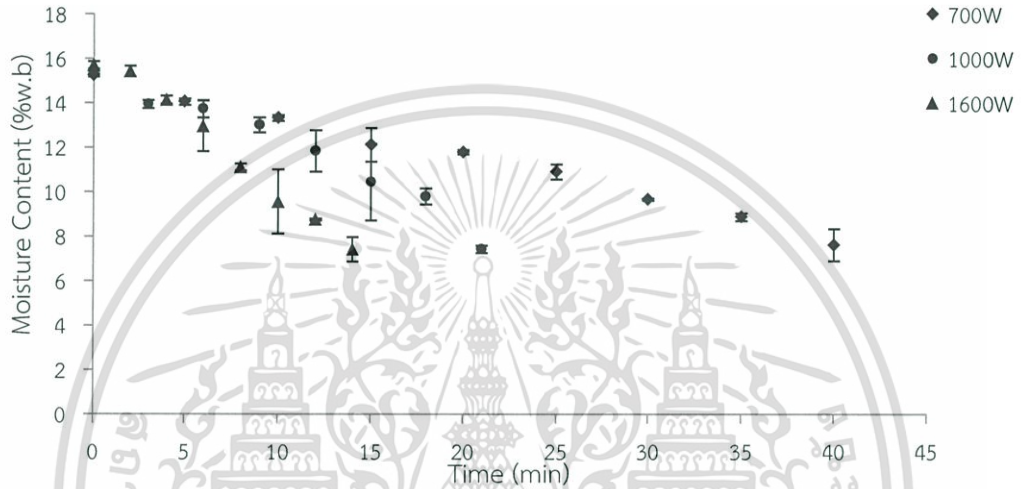
4.2.1 เวลาที่ใช้ในการอบแห้งอัตราการอบแห้ง และอุณหภูมิสุดท้ายที่ผิวของวัสดุ

จากตารางที่ 4.3 และรูปที่ 4.6 กำลังไฟฟ้าที่ใช้ในการอบแห้งแบบอินฟราเรดสุญญากาศ (vacuum-infrared drying, VIR) 700, 1000, 1600 W ใช้เวลาในการอบแห้ง 40, 21, 14 นาทีตามลำดับ จึงได้รำข้าวอัดเม็ดที่มีความชื้นสุดท้ายที่ต้องการ คือ 9% ซึ่งเห็นได้ว่าเวลาที่ใช้ในการอบแห้งลดลงเมื่อมีการเพิ่มกำลังไฟฟ้าที่ใช้ ซึ่งสอดคล้องกับ ค่าเฉลี่ยที่เพิ่มขึ้นเช่นกัน โดย DR เฉลี่ย คือ 0.0022, 0.0044, 0.0068 g water/g dry matter·min ตามลำดับ จากรูปที่ 4.7 แสดงการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิสุดท้ายที่ผิวของรำข้าวอัดเม็ดตามเวลาในการอบแห้งที่เพิ่มขึ้น พบว่าอุณหภูมิสุดท้ายที่ผิวของรำข้าวอัดเม็ดมีค่าใกล้เคียงกันอยู่ในช่วงประมาณ 50-60 °C

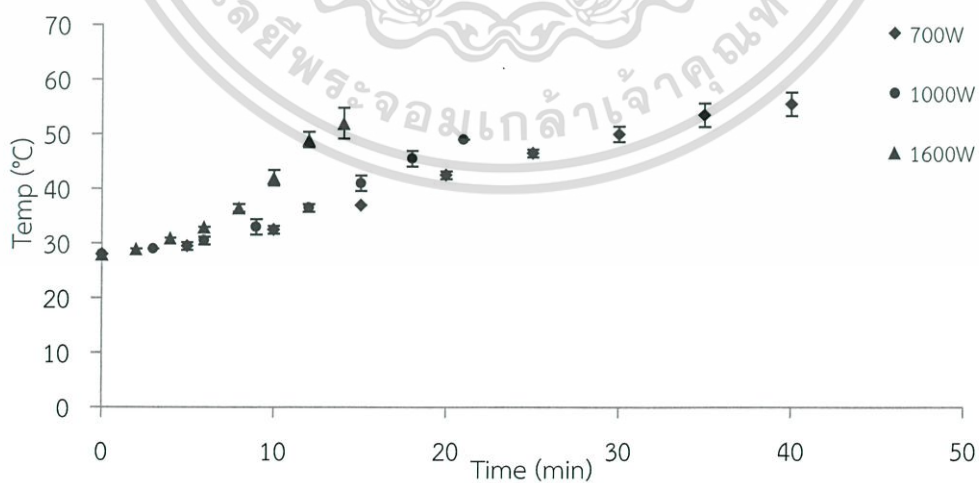
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.3 เวลาที่ใช้อบแห้ง DR เฉลี่ย และอุณหภูมิสุดท้ายที่ผิววัสดุที่ได้จากการอบแห้งแบบ VIR ที่กำลังไฟฟ้าต่างๆ

กำลังไฟฟ้า (W)	เวลา (นาที)	DR เฉลี่ย (g water/g dry matter·min)	อุณหภูมิสุดท้ายของตัวอย่าง (°C)
700	40	0.0022	56
1000	21	0.0044	49
1600	14	0.0068	52

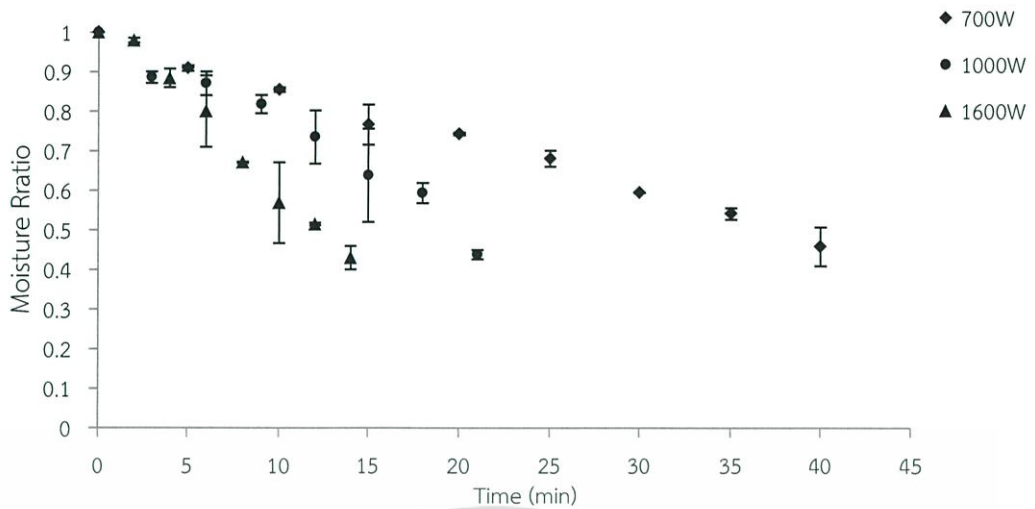


รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาในการอบแห้งกับความชื้นของรำข้าวอัดเม็ดเมื่ออบแห้งแบบ VIR ที่กำลังไฟฟ้าต่างๆ



รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาในการอบแห้งกับอุณหภูมิที่ผิวรำข้าวอัดเม็ดเมื่ออบแห้งแบบ VIR ที่กำลังไฟฟ้าต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาในการอบแห้งกับอัตราส่วนความชื้นของรำข้าวอัดเม็ดด้วยวิธีการอบแห้งแบบ VIR ที่กำลังไฟต่างๆ

4.2.2 แบบจำลองการอบแห้งของการอบแห้งรำข้าวอัดเม็ดด้วยวิธีการอบแห้งแบบอินฟราเรดสุญญากาศ

ตารางที่ 4.4 แสดงค่าคงที่และสัมประสิทธิ์ของแบบจำลองการอบแห้งจากข้อมูลการอบแห้งรำข้าวอัดเม็ดด้วยวิธีการอบแห้งแบบ VIR ที่กำลังไฟต่างๆ จากการเปรียบเทียบค่า R^2 พบว่า ค่า R^2 ของ Henderson and Pabis มีค่าสูงสุดในขณะที่ แบบจำลองนี้ให้ค่า RMSE ต่ำสุดด้วย ดังนั้นแบบจำลองของ Henderson and Pabis จึงถูกคัดเลือกเพื่อนำไปใช้ในการสร้างแบบจำลองทั่วไป

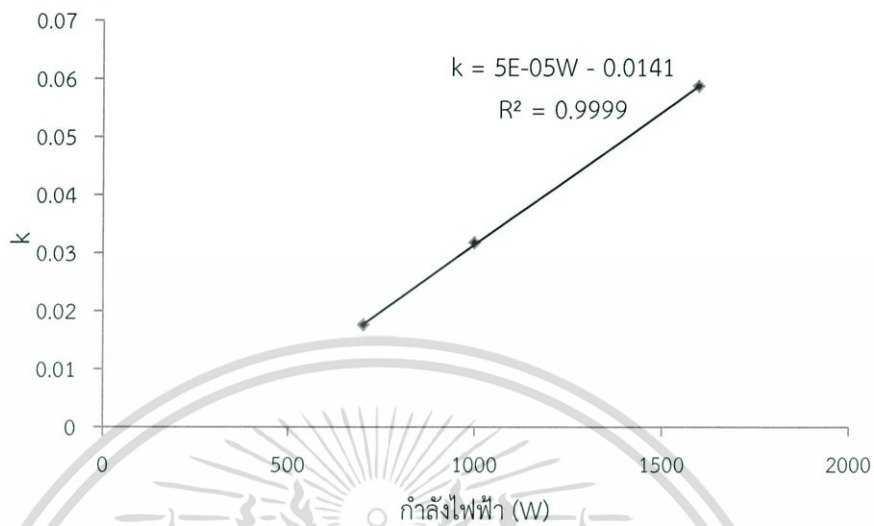
ตารางที่ 4.4 ค่าคงที่และสัมประสิทธิ์แบบจำลองจากข้อมูลการอบแห้งรำข้าวอัดเม็ดด้วยวิธีการอบแห้งแบบ VIR

แบบจำลอง	กำลังไฟ (W)	ค่าคงที่และสัมประสิทธิ์			R^2	RMSE
		k	a	c		
Lewis	700	0.0172			0.9827	0.022
	1000	0.0303			0.9341	0.0439
	1600	0.0514			0.9392	0.05
Henderson	700	0.0176	1.0089		0.9834	0.0216
	1000	0.0317	1.0201		0.9375	0.0428
	1600	0.0587	1.0657		0.9638	0.0386
Logarithmic	700	0.0005	27.6374	-26.6505	0.9811	0.023
	1000	0.0002	156.75	-155.745	0.7187	0.0908
	1600	0.0005	83.0797	-82.0402	0.9746	0.0323

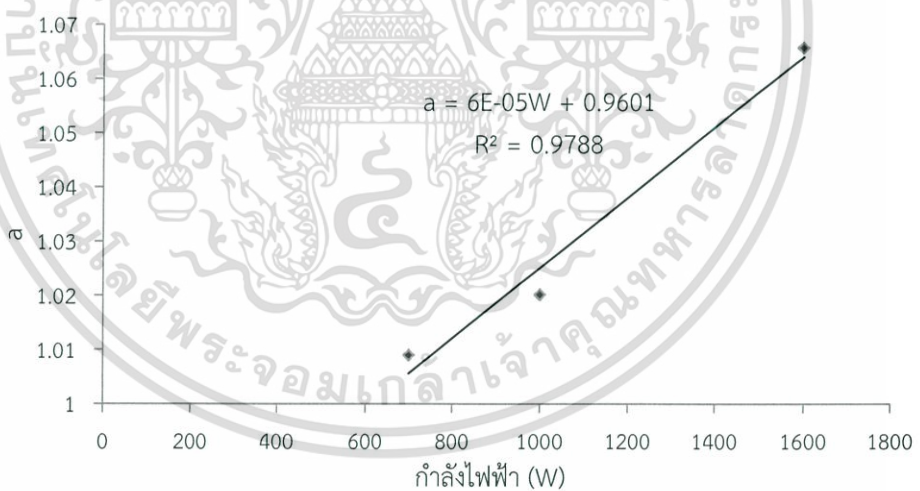
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับทำวิจัยเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่สามารถนำไปใช้เพื่อประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อนำค่าคงที่ k และ a มาสร้างความสัมพันธ์กับกำลังไฟฟ้า (W) พบว่าความสัมพันธ์ที่ดีที่สุด คือแบบเชิงเส้นดังรูปที่ 4.9 และ รูปที่ 4.10



รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่าง k กับ กำลังไฟฟ้า (W)



รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่าง a กับ กำลังไฟฟ้า (W)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แบบจำลองทั่วไปสำหรับการอบแห้งรำข้าวอัดเม็ดด้วยวิธีการอบแห้งแบบอินฟราเรดสุญญากาศที่ กำลังไฟ 700-1600 W คือ

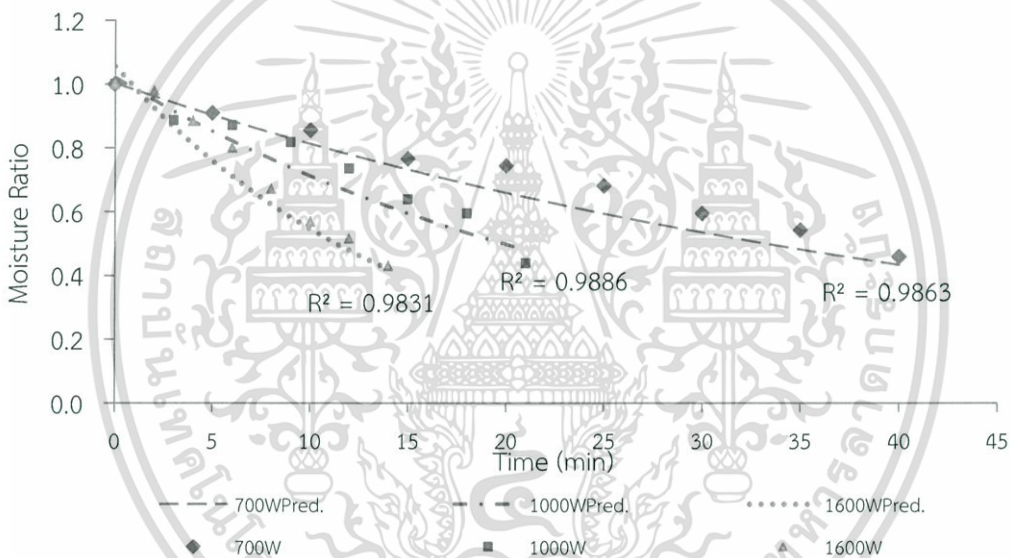
$$MR = (0.000006W + 0.9601) \text{EXP}(-(-0.00005W-0.0141)t)$$

โดยที่ MR = อัตราส่วนความชื้น

W = กำลังไฟ

t = เวลา

รูปที่ 4.12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง MR กับเวลา โดยข้อมูลแบบจุดแสดงข้อมูลจากการทดลอง และ ข้อมูลแบบเส้นแสดงข้อมูลจากการทำนาย ผลการเปรียบเทียบ ความสัมพันธ์ ค่า R^2 กำลังไฟ 700, 1000, 1600 W มีค่า 0.9000, 0.9045, 0.9279 ตามลำดับ



รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาในการอบแห้งกับอัตราส่วนความชื้นของรำข้าวอัดเม็ดเมื่ออบแห้งแบบ VIR ที่อุณหภูมิต่างๆ: ข้อมูลแบบจุด คือ ข้อมูลจากการทดลอง และข้อมูลแบบเส้น คือ ข้อมูลจากการทำนายจากสมการทั่วไป

4.3 การเปรียบเทียบลักษณะการอบแห้งของรำข้าวอัดเม็ดด้วยวิธีการอบแห้งแบบลมร้อนและการอบแห้งแบบอินฟราเรดสุญญากาศ

จากตารางที่ 4.5 สภาวะในการอบแห้งที่สูงที่สุดของการอบแห้งทั้งแบบ VIR กับ HA นั่นคือกำลังไฟ 1600 W และ อุณหภูมิอบแห้ง 140 °C ตามลำดับ ให้ DR เฉลี่ย มากที่สุดในแต่ละวิธีการอบแห้ง อย่างไรก็ตามหากเปรียบเทียบ DR เฉลี่ยสองค่านี้ คือ 0.0068 g water/g dry matter·min สำหรับการอบแห้งแบบ VIR 1600 W และ 0.0032 g water/g dry matter·min สำหรับการอบแห้งแบบ HA ที่ 140 °C เห็นได้อย่างชัดเจนว่าการอบแห้งแบบ VIR ให้ DR เฉลี่ย มากกว่าการอบแห้งแบบ HA เกินเอกร้อยกว่าสองเท่า ในขณะที่การเปรียบเทียบอุณหภูมิที่ผิวของรำข้าวอัดเม็ด จากกการอบแห้ง 2 สภาวะนี้ การรู้ค่าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อบแห้งแบบ VIR ที่ 1600 W รำข้าวอัดเม็ดมีอุณหภูมิเพียง 52 °C ซึ่งน้อยกว่าการอบแห้งแบบ HA ที่ 140 °C ซึ่งมีอุณหภูมิถึง 92 °C เห็นได้ว่า อุณหภูมิที่ผิวของรำข้าวอัดเม็ด ของการอบแห้งแบบ VIR มีค่าต่ำกว่า การอบแห้งแบบ HA อยู่ถึง 40 °C ซึ่งคุณภาพของรำข้าวอัดเม็ดที่ผ่านอุณหภูมิที่ต่ำกว่า อาจดีกว่ารำข้าวอัดเม็ดที่ผ่านอุณหภูมิที่สูงกว่า [23]

เมื่อเปรียบเทียบเวลาการอบแห้งที่เทียบกัน พบว่า การอบแห้งแบบ VIR 700 W และการอบแห้งแบบ HA ที่ 110 °C ใช้เวลาในการอบแห้งที่เท่ากัน คือ 40 นาที

ตารางที่ 4.5 ระยะเวลาที่ใช้อบแห้ง DR เฉลี่ย และอุณหภูมิสุดท้ายที่ผิวรำข้าวอัดเม็ดจากวิธีการอบแห้งแบบ HA และการอบแห้งแบบ VIR

วิธีการอบแห้ง	สภาวะอบแห้ง	เวลาในการอบแห้ง (นาที)	DR เฉลี่ย (g water/g dry matter·min)	อุณหภูมิสุดท้ายของตัวอย่าง (°C)
HA	50°C	210	0.0005	48
	80°C	80	0.0014	69
	110°C	40	0.0028	82
	140°C	25	0.0032	92
VIR	700 W	40	0.0022	56
	1000 W	21	0.0044	49
	1600 W	14	0.0068	52

4.4 การเปรียบเทียบคุณภาพของน้ำมันจากรำข้าวอัดเม็ดที่อบแห้งด้วยวิธีการอบแห้งแบบลมร้อนและการอบแห้งแบบอินฟราเรดสุญญากาศ

จากตารางที่ 4.6 เมื่อเปรียบเทียบค่าความเป็นกรดและปริมาณน้ำมันที่ได้ พบว่า ปริมาณน้ำมันที่ได้มีค่าใกล้เคียงกันอยู่ที่ 21-23% [24] ค่าความเป็นกรดของการอบแห้งแบบ VIR ทุกสภาวะมีค่าใกล้เคียงกับการอบแห้งแบบ HA ที่ 50, 80 °C ซึ่งเป็นไปตามมาตรฐานที่กำหนดไว้แสดงถึงคุณภาพของน้ำมันคือ ไม่เกิน 15 mg KOH/g [25] แต่ที่ อุณหภูมิ 110, 140°C จะมีค่าความเป็นกรดอยู่ที่ 14 mg KOH/g ค่าความเป็นกรดสูงแสดงว่าอาจเกิดการเสื่อมเสียคุณภาพน้ำมันง่ายขึ้น ซึ่งแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญจากค่าความเป็นกรดของตัวอย่างอื่น เมื่อเปรียบเทียบเวลาในการอบแห้งที่เท่ากัน ระหว่างวิธีการอบแห้ง 2 วิธี คือการอบแห้งแบบ VIR ที่ 700 W และการอบแห้งแบบ HA ที่ 110 °C คือ เวลา 40 นาที ค่าความเป็นกรดมีค่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ การอบแห้งแบบ VIR ยังสามารถรักษาระดับ ค่าความเป็นกรดได้ต่ำกว่าการอบแห้งแบบ HA

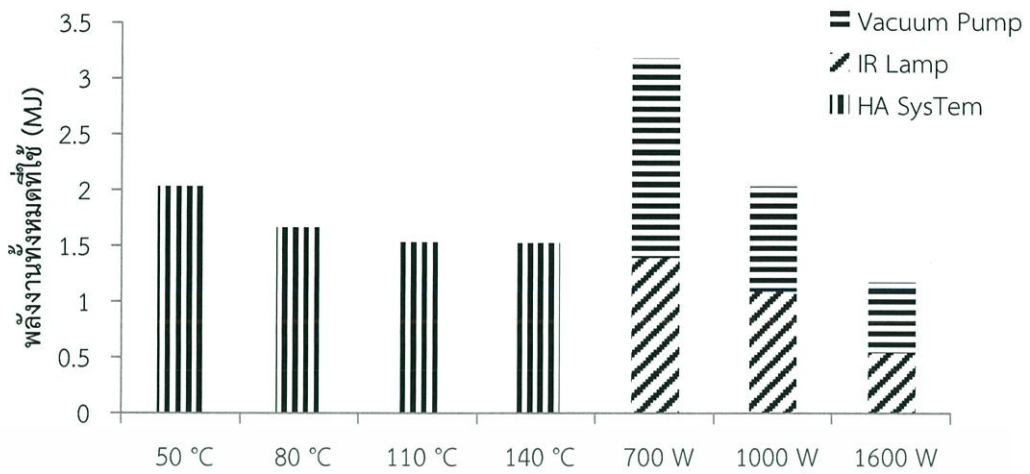
ตารางที่ 4.6 ค่าความเป็นกรดและปริมาณน้ำมันในรำข้าวอัดเม็ดที่อบแห้งด้วยวิธีการอบแห้งแบบ HA และ VIR

วิธีการอบแห้ง	สภาวะอบแห้ง	เวลาในการอบแห้ง (นาที)	ค่าความเป็นกรด (mg KOH/g)	ปริมาณน้ำมัน (%)
HA	50°C	210	8.27 ±0.06 ^c	23.59 ±0.35 ^a
	80°C	80	8.29 ±0.07 ^c	23.48 ±0.39 ^a
	110°C	40	14.75 ±0.19 ^a	21.86 ±0.12 ^d
	140°C	25	14.43 ±0.33 ^a	22.93 ±0.29 ^b
VIR	700 W	40	9.90 ±0.56 ^b	21.77 ±0.24 ^d
	1000 W	21	8.44 ±0.30 ^c	23.35 ±0.08 ^{ab}
	1600 W	14	9.42 ±0.24 ^b	22.41 ±0.38 ^c

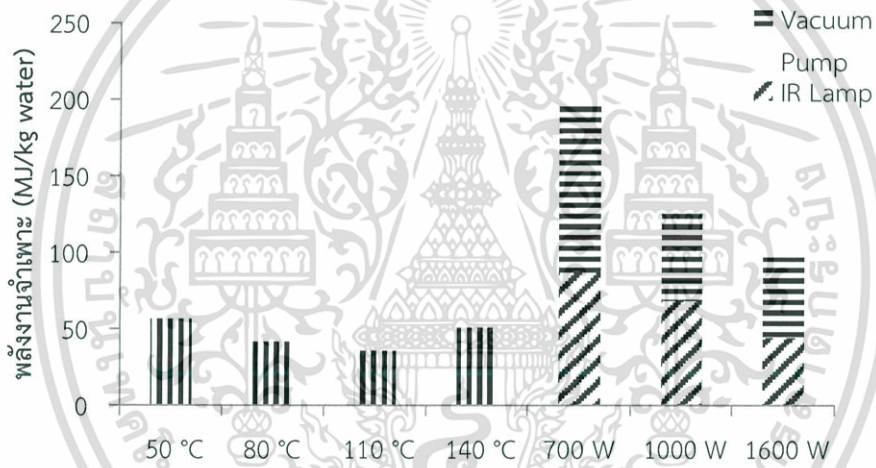
4.5 การเปรียบเทียบพลังงานทั้งหมดและพลังงานจำเพาะที่ใช้ในการอบแห้งรำข้าวอัดเม็ดที่อบแห้งด้วยวิธีการอบแห้งแบบลมร้อนและการอบแห้งแบบอินฟราเรดสุญญากาศ

จากรูปที่ 4.13 การอบแห้งแบบ VIR ที่กำลังไฟ 1600 W ใช้พลังงานทั้งหมด 1.17 MJ ซึ่งน้อยที่สุดแต่จากรูปที่ 4.14 การอบแห้งแบบ HA ที่อุณหภูมิ 110 °C ใช้พลังงานจำเพาะน้อยที่สุด คือ 35.58 MJ/kg water ซึ่งในการทดลองการอบแห้งแบบ VIR ใช้กำลังไฟ 1600 W ทำให้ใช้เวลาในการอบแห้งน้อยที่สุด ในขณะที่ระบบสุญญากาศก็จะใช้เวลาน้อยตามไปด้วย เช่นเดียวกับการอบแห้งแบบ HA ที่ 110 °C เป็นการให้พลังงานความร้อนในการอบแห้งที่เหมาะสมกับตัวอย่างรำข้าวอัดเม็ด เมื่อเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ใช้ในการอบแห้ง กับพลังงานจำเพาะ ของการอบแห้งแบบ HA ที่ 110 °C เทียบกับสภาวะอื่นๆ ของการอบแห้งแบบ HA ด้วยกันแล้ว การอบแห้งแบบ HA ที่ 110 °C มีความเหมาะสมที่จะใช้ในการอบแห้งรำข้าวอัดเม็ด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.13 พลังงานรวมที่ใช้ในการอบแห้งที่ใช้ในการอบแห้งที่สภาวะต่างๆ



รูปที่ 4.14 พลังงานจำเพาะที่ใช้ในการอบแห้งที่สภาวะต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สรุปผลการทดลอง

จากการศึกษาอิทธิพลของวิธีการอบแห้งแบบอินฟราเรดสุญญากาศ (vacuum-infrared drying, VIR) ต่อคุณภาพของน้ำมันรำข้าวและปริมาณน้ำมันรำข้าว โดยเปรียบเทียบกับวิธีการอบแห้งแบบลมร้อน (hot air drying, HA) สามารถสรุปผลการทดลองได้ดังนี้

1. การอบแห้งแบบ VIR ที่กำลังไฟฟ้า 700-1600 W ให้อัตราการอบแห้งเฉลี่ย (DR เฉลี่ย) 0.0022-0.0068 g water/g dry matter·min ใช้เวลาในการอบแห้ง 40-14 นาที อุณหภูมิสุดท้ายที่ผิว 49-56 °C ในขณะที่การอบแห้งแบบ HA ที่อุณหภูมิ 50-140 °C ให้ DR เฉลี่ย 0.0005-0.0032 g water/g dry matter·min ใช้เวลาในการอบแห้ง 210-25 นาที อุณหภูมิสุดท้ายที่ผิว 48-92 °C

2. แบบจำลองการอบแห้งที่เหมาะสมสำหรับการทำนายการอบแห้งรำข้าวอัดเม็ดทั้งวิธีการอบแห้งแบบ HA และ VIR คือ แบบจำลอง Henderson and Pabis โดยแบบจำลองทั่วไปสำหรับการอบแห้งรำข้าวอัดเม็ดด้วยวิธีการอบแห้งแบบ HA ที่อุณหภูมิ 50-140 °C คือ $MR = (-0.00004T^2 + 0.0080T + 0.7235) \text{EXP}(-0.0002T - 0.0065)t$ และแบบจำลองทั่วไปสำหรับการอบแห้งรำข้าวอัดเม็ดด้วยวิธีการอบแห้งแบบ VIR ที่กำลังไฟฟ้า 700-1600 W คือ $MR = (0.000006W + 0.9601) \text{EXP}(-0.00005W - 0.0141)t$

3. การอบแห้งแบบ VIR ที่กำลังไฟฟ้า 700-1600 W ให้ปริมาณน้ำมัน 21.77-23.35% และค่าความเป็นกรด 8.44-9.90 mg KOH/g ในขณะที่การอบแห้งแบบ HA ที่อุณหภูมิ 50-140 °C ให้ปริมาณน้ำมัน 21.86-23.59% และค่าความเป็นกรด 8.27-14.75 mg KOH/g

4. การอบแห้งแบบ VIR ที่กำลังไฟฟ้า 700-1600 W ใช้พลังงานทั้งหมด 1.17-3.18 MJ พลังงานจำเพาะ 96.66-198.75 MJ/kg water ในขณะที่การอบแห้งแบบ HA ที่อุณหภูมิ 50-140 °C ใช้พลังงานทั้งหมด 1.52-2.03 MJ พลังงานจำเพาะ 35.58-56.39 MJ/kg water

5. หากพิจารณาในด้านของลักษณะการอบแห้ง การอบแห้งแบบ VIR ดีกว่าการอบแห้งแบบ HA เนื่องจากให้ DR เฉลี่ยที่มากกว่า ใช้เวลาในการอบแห้งน้อยกว่า ให้อุณหภูมิที่ผิวของรำข้าวอัดเม็ดต่ำกว่า ในด้านของคุณภาพของน้ำมันรำข้าว ปริมาณน้ำมันที่ได้จากการอบแห้งสองวิธีมีค่าใกล้เคียงกัน หากอบแห้งรำข้าวอัดเม็ดแบบ HA ที่อุณหภูมิ 50 และ 80 °C ได้ค่าความเป็นกรดที่ไม่แตกต่างจากการอบแห้งแบบ VIR ในทุกสภาวะอบแห้ง ส่วนพลังงานที่ใช้ในการอบแห้ง การอบแห้งแบบ VIR ยังคงใช้พลังงานสูง โดยพลังงานส่วนใหญ่ใช้สำหรับการทำระบบสุญญากาศ

ข้อเสนอแนะ

1. ควรมีการหาค่าปริมาณของสารแกมมาอริซานอลเพิ่ม ซึ่งเป็นสารสำคัญที่มีประโยชน์ มักพบได้มากในรำข้าว
2. เนื่องจากการอบแห้งแบบอินฟราเรดควบคู่กับระบบสุญญากาศมีการใช้พลังงานในปริมาณที่มาก อันเนื่องมาจากปั๊มสุญญากาศ เราจึงควรศึกษาการอบแห้งแบบอินฟราเรดควบคู่กับระบบอื่นๆ เช่น การอบแห้งแบบอินฟราเรดควบคู่กับลมร้อน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

1. ประโยชน์ของน้ำมันรำข้าว.แหล่งที่มา
http://www.thaibio.com/index.php?route=news/news&news_id=86.
เข้าดูเมื่อ24/08/2557
2. <http://www.foodnetworksolution.com/wiki>. เข้าดูเมื่อ 27/08/2557
3. อ่ำไพศักดิ์ ทีบุญญา, ศักชัยจงจำ. วารสารวิทยาศาสตร์บูรพา. 15 (2553) 2 : 76-86.การอบแห้งซึ่งด้วยเทคนิค สูญญากาศร่วมกับอินฟราเรด. ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
4. S. Mongpraneet, T. Abe , T. Tsurusaki. Accelerated drying of welsh onion by far infrared radiation under vacuum conditions.
5. JI-HEE PARK, et al .EFFECT OF FAR-INFRARED HEATER ON THE PHYSICOCHEMICAL CHARACTERISTICS OF GREEN TEADURING PROCESSING.
6. สำนักวิจัยและพัฒนาข้าว กรมการข้าว.รำข้าวคืออะไร.แหล่งที่
<http://www.brrd.in.th/rkb/product>. เข้าดูเมื่อ 20/8/2557.
7. http://www.kingricebranoil.com/product_know1.php?lang=th เข้าดูเมื่อ 20/08/2557
8. <http://narapimon.com/product> เข้าดูเมื่อ 20/08/2557
9. กิตติมา ไตรรัตน์ศิริชัย และ สาโรจน์ รอดคิน.วันที่ 6 กรกฎาคม 2555.รำข้าว: จากอาหารหมูสู่อาหารเพื่อสุขภาพของคน. <http://www.mfu.ac.th/school/agro2012/events/298>. เข้าดูเมื่อ 20/08/2557.
10. สุกัญญา จัดตุพรพงษ์.2539.การตรวจสอบคุณภาพวัตถุดิบอาหารสัตว์.ศูนย์วิจัยและฝึกอบรมการเลี้ยงสุกรแห่งชาติ.มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน, นครปฐม .193หน้า.
www.dld.go.th/inform/krice.html. เข้าดูเมื่อ 20/08/2557

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

11. นางสาวจิตารัตน์ หน่อสุวรรณ. 2550. สมบัติของวิตามินอีที่สกัดจากดิสทิลเลตของน้ำมันรำข้าวโดยใช้เฮกเซนที่อุณหภูมิต่ำ.วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิตสาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหารบัณฑิตวิทยาลัยมหาวิทยาลัยเชียงใหม่.
12. ข้อมูลจากหนังสือ HEALTH Channel ฉบับเดือนพฤษภาคม 2251. แหล่งที่มา http://www.misterbuffet.com/article_wheatgerm.asp. เข้าดูเมื่อ 23/08/2557
13. กระบวนการสกัดน้ำมันรำข้าว. แหล่งที่มา http://www.thaiedibleoil.com/thai/product_process_01.php. เข้าดูเมื่อ 23/08/2557
14. Amonrat Thanonkaew, et al . Effect of stabilization of rice bran by domestic heating on mechanical extraction yield, quality, and antioxidant properties of cold-pressed rice bran oil (*Oryza sativa* L.).
15. วิธีการผลิตน้ำมันรำข้าว. แหล่งที่มา <http://www.patomsit.net/index.php?lay=show&ac=article&id=539236403>. เข้าดูเมื่อ 23/08/2557
16. การสกัดด้วยตัวทำละลาย.แหล่งที่มา <http://www.patomsit.net/index.php?lay=show&ac=article&id=539236403>. เข้าดูเมื่อ 23/08/2557
17. <http://www.foodnetworksolution.com/wiki>. เข้าดูเมื่อ 27/08/2557
18. การถ่ายเทความร้อน.แหล่งที่มา <http://eng.sut.ac.th/me/2014/>. เข้าดูเมื่อ31/08/2557
19. จักรมาส เลาหวณิช. 26 ธันวาคม 2554.การประยุกต์ใช้รังสีอินฟราเรดในการอบแห้งผลิตผลทางการเกษตร.คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสารคาม
20. S. Mongpraneet, T. Abe , T. Tsurusaki. Accelerated drying of welsh onion by far infrared radiation under vacuum conditions.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

21. JI-HEE PARK, et al .EFFECT OF FAR-INFRARED HEATER ON THE PHYSICOCHEMICAL CHARACTERISTICS OF GREEN TEADURING PROCESSING.

22. การวิเคราะห์หาค่าความเป็นกรด Acid Value(AV). เอกสารประกอบการศึกษา โดย บริษัท ซีอีโอ อากิฟูด จำกัด

23. ผลไม้อบแห้ง.

แหล่งที่มาhttp://www.arda.or.th/kasetinfo/north/processing/process_fruit_dry.html เข้าดูเมื่อ 3/05/2558

24. ทวีศักดิ์ วรรณาทิพยากรณ์, เทคโนโลยีที่ช่วยเพิ่มความได้เปรียบในการแข่งขัน (น้ำมันสำหรับใช้กับอาหาร)

25. <http://www.ceoriceoil.com>. เข้าดูเมื่อ 3/05/2558



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้