อิทธิพลของอุณหภูมิในการอบรำข้าวด้วยลมร้อนต่อปริมาณและคุณภาพของน้ำมันรำข้าวที่สกัดได้

EFFECT OF HOT AIR TEMPERATURE ON RICE BRAN DRYING ON QUANTITY AND QUALITY OF EXTRACTED RICE BRAN OIL

พรรษกร จิรภิญโญ
พีรพัฒน์ วงษ์กัณหา
พีรภัทร อุไรเวศ

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิศวกรรมเกษตร
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2557

อิทธิพลของอุณหภูมิในการอบรำข้าวด้วยลมร้อนต่อปริมาณและคุณภาพของน้ำมันรำข้าวที่สกัดได้

EFFECT OF HOT AIR TEMPERATURE ON RICE BRAN DRYING ON QUANTITY AND QUALITY OF EXTRACTED RICE BRAN OIL

พรรษกร จิรภิญโญ
พีรพัฒน์ วงษ์กัณหา
พีรภัทร อุไรเวศ

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิศวกรรมเกษตร คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2557

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

EFFECT OF HOT AIR TEMPERATURE ON RICE BRAN DRYING ON QUANTITY AND QUALITY OF EXTRACTED RICE BRAN OIL

Passakorn Jirapinyo

Perapath Wongkanha

Peerapat Uraives

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
BACHELOR OF ENGINEERING IN AGRICULTURAL ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
ACADEMIC YEAR 2014

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญานิพนธ์ปีการศึกษา 2557

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ใบรับรองปริญญานิพนธ์

.....

หัวข้อปริญญานิพนธ์ อิทธิพลของอุณหภูมิในการอบรำข้าวด้วยลมร้อนต่อปริมาณและคุณภาพของน้ำมันรำข้าวที่สกัดได้

Effect of Hot Air Temperature on Rice Bran Drying on Quantity and Quality of Extracted Rice Bran Oil

นักศึกษาผู้จัดทำ

นายพรรษกร	จิรภิญโญ	รหัสนักศึกษา 54010880
นายพีรพัฒน์	วงษ์กัณหา	รหัสนักศึกษา 54010939
นายพีรภัทร	อุไรเวศ	รหัสนักศึกษา 54010941

ปริญญา วิศวกรรมศาสตร์บัณฑิต

หลักสูตร วิศวกรรมเกษตร

สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล

ปีการศึกษา 2557

อาจารย์ผู้ควบคุมปริญญานิพนธ์	ลายมือชื่อ
ผศ.ดร.ประสันต์ ชุ่มใจหาญ	
ดร.จิราพร ศรีภิญโญวณิชย์ จงยิ่งเจริญ	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อปริญญานิพนธ์ อิทธิพลของอุณหภูมิในการอบรำข้าวด้วยลมร้อนต่อปริมาณและคุณภาพของน้ำมันรำข้าวที่สกัดได้

นักศึกษาผู้จัดทำ นายพรรษกร จิรภิญโญ รหัสนักศึกษา 54010880
นายพีรพัฒน์ วงษ์กัณหา รหัสนักศึกษา 54010939
นายพีรภัทร อุไรเวศ รหัสนักศึกษา 54010941

ปีการศึกษา 2557

อาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร.ประสันต์ ชุ่มใจหาญ

อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ดร.จิราพร ศรีภิญโญวณิชย์ จงยิ่งเจริญ

บทคัดย่อ

รำข้าวมีคุณค่าทางอาหารมากมาย เช่น โปรตีน ไขมัน แร่ธาตุ และวิตามินต่างๆ รำข้าวที่จะใช้สกัดเป็นน้ำมันจะต้องมีอายุไม่เกิน 24 ชั่วโมงหลังจากกระบวนการสีข้าว เนื่องจากเอนไซม์ไลเปสจะทำปฏิกิริยากับรำข้าวทำให้เกิดกรดไขมันในรำข้าว ส่งผลให้น้ำมันมีคุณภาพต่ำเนื่องจากค่ากรดที่เพิ่มขึ้น การให้ความร้อนแก่รำข้าวด้วยลมร้อนจะช่วยยับยั้งกิจกรรมของเอนไซม์ไลเปส ทำให้ยับยั้งหรือลดค่ากรดในน้ำมันรำข้าว ดังนั้นงานวิจัยนี้มีจุดประสงค์เพื่อศึกษาคุณลักษณะการอบแห้ง, แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการอบแห้งรำข้าว และผลกระทบของการอบแห้งรำข้าวต่อการเปลี่ยนแปลงค่ากรดและปริมาณน้ำมันในรำข้าว

รำข้าวถูกนำมาอบแห้งในลักษณะชั้นบาง แล้วทำการอบที่อุณหภูมิ 105°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อหาความชื้นเริ่มต้นได้ 9.80±0.14%db จากนั้นนำรำข้าวไปอบด้วยตู้อบลมร้อนเพื่อหาคุณลักษณะการอบแห้งโดยใช้อุณหภูมิในการอบ 60, 90 และ 120°C ได้ความชื้นสมดุลที่ 4.38±0.1, 1.66±0.03 และ 0.72±0.09%db ตามลำดับ จากนั้นนำผลการศึกษาการอบแห้งไปสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ พบว่าสมการกึ่งทฤษฎี ของ *Logarithmic* มีความเหมาะสมในการทำนายอัตราการเปลี่ยนแปลงค่าความชื้นของรำข้าว สำหรับการศึกษาการเปลี่ยนแปลงของรำข้าวพบว่า เมื่อเพิ่มอุณหภูมิและเวลาในการอบจะช่วยลดค่ากรด และเพิ่มปริมาณน้ำมันที่สกัดได้ โดยการอบที่อุณหภูมิสูงจะใช้พลังงานน้อยกว่าอุณหภูมิต่ำ เนื่องจากใช้เวลาในการอบน้อยกว่าแต่สีของน้ำมันรำข้าวจะเข้มขึ้นตามอุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการอบ

คำสำคัญ: รำข้าว, การอบแห้งด้วยลมร้อน, ค่ากรด, ปริมาณน้ำมันที่สกัดได้, แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis Title	EFFECT OF HOT AIR TEMPERATURE ON RICE BRAN DRYING ON QUANTITY AND QUALITY OF EXTRACTED RICE BRAN OIL
Authors	Mr. Passakorn Jirapinyo 54010880 Mr. Perapath Wongkanha 54010939 Mr. Peerapat Uraives 54010941
Year	2014
Advisor	Asst.Prof.Dr.Prasan Choomjaihan
Co-Advisor	Dr.Jiraporn Sripinyowanich Jongyingcharoen

Abstract

Rice bran contains many nutrients those are good for mankind's health such as protein, fat, minerals and vitamins. Rice bran uses for oil extracting must be process within 24 hours after milling because lipase converts to be fatty acid which leads to reduce the oil quality. Drying rice bran can probably freeze the lipase activity and also can decrease acid value of rice bran oil. The purpose of this research was study on drying mathematical model and the effect of drying temperature on acid value, quality and quantity of extracted oil.

Rice bran was dried with thin layer at 105°C for 24 hours to find initial moisture content. The initial moisture content of white rice bran was 9.80%db. White rice bran was dried at 3 temperatures 60, 90 and 120°C, which the equilibrium moisture contents were 4.37, 1.66 and 0.72%db respectively. The result showed that the best fit mathematical model was *Logarithmic model*. Additionally, increasing of drying time and higher of drying temperature decreased the acid value, increased quantity of extracted rice bran oil and increased the darkness of extracted oil but the energy for dried rice bran at high temperature was lower than low temperature because dried at high temperature used less time than low temperature.

Keywords: rice bran, hot air drying, acid value, quantity of extracted oil, mathematical model

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์นี้สำเร็จได้ด้วยความกรุณาจากอาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร.ประสันต์ ชุ่มใจหาญ และ ดร. จิราพร ศรีภิญโญวณิชย์ จงยิ่งเจริญ ที่ให้ความช่วยเหลือ ให้คำชี้แนะ ช่วยแก้ตลอดจนให้ความรู้และประสบการณ์ที่ดีแก่ข้าพเจ้า ขอบพระคุณ CEO Agrifood Co., Ltd. จังหวัด สิงห์บุรี ที่เอื้อเฟื้อสถานที่ รวมถึงวัสดุอุปกรณ์ ในการทำวิจัย

ขอบพระคุณสำหรับทุนทำปริญญานิพนธ์ ประจำปีงบประมาณ 2557 ของสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้การสนับสนุนการวิจัย

สำหรับคุณงามความดีอันใดที่เกิดจากปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอมอบให้กับบิดามารดา ซึ่งเป็นที่รักและเคารพยิ่ง ตลอดจนครูอาจารย์ที่เคารพทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้และถ่ายทอดประสบการณ์ที่ดีให้แก่ข้าพเจ้า

พรรษกร จิรภิญโญ
พีรพัฒน์ วงษ์กัณหา
พีรภัทร อุไรเวศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

หน้า	
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญตาราง	VI
สารบัญภาพ	VII
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	1
1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
1.4 ขอบเขตของการวิจัย	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	3
2.1 ความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับรำข้าว	3
2.2 ความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับการอบแห้ง	12
2.3 ความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับตู้อบลมร้อน	18
2.4 การศึกษาจลนพลศาสตร์และหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์	21
บทที่ 3 อุปกรณ์และวิธีการ	24
3.1 วิธีการดำเนินงาน	24
3.2 การศึกษาจลนพลศาสตรและการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์	29
3.3 การวิเคราะห์ค่ากรด	32
3.4 การหาปริมาณน้ำมันที่สกัดได้	35

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์	39
4.1 ผลการศึกษาคุณลักษณะการอบแห้งทางกายภาพเบื้องต้นของรำข้าว	39
4.2 ผลการศึกษาหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เหมาะสมในการทำนายค่าความชื้นที่เปลี่ยนแปลงในระหว่างการอบแห้ง	41
4.3 ผลการศึกษาค่ากรดของรำข้าว	43
4.4 ผลการศึกษาปริมาณน้ำมันรำข้าวที่สกัดได้	44
4.5 พลังงานที่ใช้ในการอบแห้งด้วยลมร้อน	45
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	47
5.1 สรุปผลการทดลอง	47
5.2 ข้อเสนอแนะ	48
เอกสารอ้างอิง	49
ภาคผนวก	51
ภาคผนวก ก ข้อมูลความชื้น	52
ภาคผนวก ข ข้อมูลค่ากรดของน้ำมันรำข้าว	56
ภาคผนวก ค ข้อมูลปริมาณของน้ำมันรำข้าว	59
ภาคผนวก ง ข้อมูลพลังงานสะสมในการอบด้วยลมร้อน	62
ภาคผนวก จ สีของน้ำมันรำข้าว	68
ภาคผนวก ฉ การวิเคราะห์ทางสถิต	78

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 องค์ประกอบทางเคมีของรำข้าว	4
2.2 รูปแบบสมการของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์การอบแห้ง แบบต่างๆ	22
3.1 รูปแบบสมการของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์การอบแห้ง แบบต่างๆ	30
4.1 คาพารามิเตอร์และการวิเคราะหทางสถิติของแบบจำลองการอบแหงดวยลมรอนของรำข้าว	42

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
2.1 ขั้นตอนการสกัดน้ำมันรำข้าว	6
2.2 การกลั่นด้วยระบบไอน้ำแรงสูง	8
2.3 เครื่องสกัดแบบบีบเย็น	9
2.4 แสดงกราฟอัตราการอบแห้งซึ่งเป็นกราฟระหว่างอัตราการอบแห้งและความชื้น	14
2.5 แสดงเฟสไดอะแกรมของน้ำและวิธีการอบแห้งแบบต่างๆ	17
2.6 ตู้อบลมร้อนขนาดและแบบต่างๆ	19
3.1 แผนภูมิขั้นตอนการทดลอง	25
3.2 แผนผังแสดงการคำนวณความชื้นเริ่มต้น	27
3.3 แผนผังแสดงการคำนวณความชื้นสมดุลดวยวิธีเชิงพลวัต	28
3.4 ตู้อบลมร้อน	29
3.5 ชุดอุปกรณ์สำหรับกลั่นแยกเฮกเซนออกจากน้ำมัน	33
3.6 สารเคมีที่ใช้ในการหาค่ากรด	34
3.7 สารละลายที่ถึงจุดยุติ	34
3.8 ตัวอย่างรำข้าว 10 กรัม	35
3.9 thimble	36
3.10 ขวดวัดปริมาตร (boiling flask) และ เม็ดบอล (glass ball)	36
3.11 ชุดอุปกรณ์สำหรับการสกัดน้ำมัน	37
3.12 ปริมาณน้ำมันที่สกัดได้	37

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่ หน้า

4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับเวลาในการอบแห้งรำข้าวด้วยตู้อบลมร้อน และค่าคงที่แบบจำลองการอบแห้ง *logarithmic* ของรำข้าว 40

4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากรดกับเวลาที่อุณหภูมิ 60 90 และ 120 องศาเซลเซียส 43

4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำมันกับเวลาที่อุณหภูมิ 60 90 และ 120 องศาเซลเซียส 44

4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานกับเวลาที่อุณหภูมิ 60 90 และ 120 องศาเซลเซียสของรำข้าว เพื่อหาค่ากรด 45

4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานกับเวลาที่อุณหภูมิ 60 90 และ 120 องศาเซลเซียสของรำข้าว เพื่อหาปริมาณน้ำมันที่สกัดได้ 46

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา

ปัจจุบันคนส่วนใหญ่หันมาใส่ใจในการดูแลสุขภาพมากขึ้นในการบริโภคสิ่งที่มีประโยชน์ต่อร่างกาย ไม่ว่าจะเป็นอาหารเสริมชนิดต่างๆ ผักปลอดสารพิษ เนื้อสัตว์ที่มีคุณภาพ เครื่องปรุงต่างๆที่มีประโยชน์ต่อสุขภาพ รวมถึงน้ำมันที่ใช้ในการประกอบอาหารต้องมีประโยชน์ต่อร่างกาย สำหรับรำข้าวนั้นส่วนใหญ่จะนำไปผลิตเป็นอาหารเสริมและน้ำมันสำหรับประกอบอาหารเพราะรำข้าวมีสารอาหารที่มีประโยชน์ต่อสุขภาพเช่น วิตามินอีที่ช่วยให้ผิวพรรณสดใส [1] และโอไรซานอลซึ่งมีความสามารถในการลดระดับคอเลสเตอรอลและไตรกลีเซอไรด์ [2]

การผลิตน้ำมันรำข้าวให้ได้คุณภาพที่ดีนั้นจะต้องใช้รำข้าวที่ผ่านการสีจากข้าวเปลือกไม่เกิน 24 ชั่วโมงก่อนการผลิตเนื่องจากหลังการสีข้าวคุณภาพของน้ำมันรำข้าวที่ได้จะต่ำลงและมีกลิ่นเหม็นหืน เนื่องจากเอนไซม์ไลเปสทำปฏิกิริยาออกซิเดชันกับรำข้าว [3] นอกจากนี้ยังมีปัญหาเกี่ยวกับมอดที่มีในรำข้าวซึ่งส่งผลให้รำข้าวเสื่อมสภาพไวมากขึ้น วิธีการแก้ไขสามารถทำได้ด้วยการใช้ความร้อนเพื่อยับยั้งการทำปฏิกิริยาไลเปส การให้ความร้อน ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของกระบวนการทำแห้ง ดังนั้นจึงน่าจะมีความเป็นไปได้ว่าการอบแห้งรำข้าวก่อนกระบวนการผลิตน้ำมันจะทำให้สามารถเพิ่มระยะเวลาในการเก็บรักษารำข้าวก่อนการผลิตน้ำมันเพราะความร้อนจากการอบนั้นจะไปยับยั้งปฏิกิริยาออกซิเดชันของเอนไซม์ไลเปสและกำจัดมอด[4]ได้อีกด้วย การอบแห้งสามารถทำได้หลายวิธีเช่น การอบแห้งโดยใช้ไมโครเวฟ การอบแห้งโดยใช้รังสีอินฟราเรด วิธีที่นิยมในการอบแห้งวัสดุทางการเกษตรคือการอบแห้งด้วยลมร้อนเพราะสามารถปฏิบัติและควบคุมได้ง่ายรวมถึงเป็นที่นิยมในอุตสาหกรรม ซึ่งในงานวิจัยนี้จะทำการศึกษาอิทธิพลของการอบ รำข้าวด้วยลมร้อนที่สภาวะอุณหภูมิต่างๆเพื่อเปรียบเทียบคุณภาพของน้ำมันที่สกัดได้การอบแห้ง

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.2.1 ศึกษาคุณลักษณะการอบด้วยลมร้อน (ค่าความชื้นเริ่มต้น ค่าความชื้นสมดุล และค่าความชื้นสุดท้าย) ของรำข้าวที่อุณหภูมิต่างๆ

1.2.2 ศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิและเวลาในการอบด้วยลมร้อนต่อการเปลี่ยนแปลงคุณภาพของสารอาหารต่างๆได้แก่ ค่าความเป็นกรด และปริมาณน้ำมันที่สกัดได้ เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการอบด้วยลมร้อน

1.2.3 ศึกษาหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการจำลองการถ่ายเทความร้อนและมวลสารระหว่างการอบด้วยลมร้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

หลังจากการทดลองผู้ทำงานวิจัยคาดว่าจะได้ประโยชน์ โดยผู้ประกอบการสามารถนำสภาวะและวิธีการอบด้วยลมร้อนที่เหมาะสมในการอบรำข้าวด้วยลมร้อนเป็นแนวทางในการจัดการรำข้าวก่อนกระบวนการผลิตน้ำมันรำข้าว

1.4 ขอบเขตการทำวิจัย

การวิจัยนี้อยู่ในช่วงระหว่างหลังการสีข้าวถึงก่อนการสกัดน้ำมันรำข้าว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในการศึกษาการอบแห้งรำข้าวด้วยลมร้อน ผู้วิจัยได้รวบรวมเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ได้แก่ ลักษณะทางกายภาพและทางเคมีของรำข้าว ความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับน้ำมันรำข้าว ความรู้พื้นฐานการอบแห้ง ความรู้เกี่ยวกับตู้อบลมร้อน วิธีการหาความชื้น และการศึกษาจลนพลศาสตร์และหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยรายละเอียดเพิ่มเติมของการรวบรวมความรู้และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องมีดังนี้

2.1 ความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับรำข้าว [5]

รำข้าวคือ ส่วนที่ได้จากขั้นตอนการขัดข้าวกล้องให้เป็นข้าวสาร ซึ่งประกอบด้วยชั้นเยื่อหุ้มเมล็ดและคัพภะ เป็นส่วนใหญ่ ได้มาจากกระบวนการสีข้าว โดยทั่วไปจะแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ รำหยาบ ซึ่งได้จากการขัดผิวเมล็ดข้าวกล้อง และรำละเอียด ได้จากการขัดขาวและขัดมัน รำข้าวมีคุณค่าทางอาหารประกอบด้วย โปรตีน ไขมัน ใยอาหาร เถ้า วิตามิน และเกลือแร่ต่างๆ

ปัจจุบันมีการนำรำข้าวมาใช้ประโยชน์ เช่น น้ำมันรำข้าว เป็นน้ำมันสำหรับบริโภคที่มีคุณภาพดี จัดเป็นน้ำมันบริโภคที่มีคุณภาพ มีกรดไขมันชนิดไม่อิ่มตัว 77% เป็นกรดไขมันที่จำเป็น 31.7% เป็นแหล่งของวิตามินอี มีสมบัติเป็นสารกันหืน ช่วยเร่งการเจริญเติบโตรวมทั้งช่วยให้ระบบการหมุนเวียนของเลือดดีขึ้น น้ำมันรำข้าว เมื่อนำมาปรับปรุงคุณสมบัติด้วยกระบวนการเคมีฟิสิกส์ สามารถผลิตเป็นกะทิแปลงไขมัน ผลิตสบู่และเนยขาวอเนกประสงค์ได้

2.1.1 องค์ประกอบพื้นฐานทางเคมีของรำข้าว [6]

รำข้าวมีองค์ประกอบพื้นฐานทางเคมีที่สำคัญดังแสดงในตารางที่ 1 โดยพบว่าในรำข้าวไขมันเต็ม จะมีคาร์โบไฮเดรตเป็นองค์ประกอบหลัก (ร้อยละ 25-43) รองลงมาคือ ไขมัน (ร้อยละ 13-20) โปรตีน (ร้อยละ 12-14) เถ้า (ร้อยละ 12) และกากใย (ร้อยละ 8-14) และเมื่อสกัดไขมันออกแล้วองค์ประกอบหลักซึ่งมีมากเป็นอันดับที่ 2 ในรำข้าวสกัดไขมันรอง จากคาร์โบไฮเดรตคือ โปรตีน (ร้อยละ 13-18) จากองค์ประกอบดังกล่าวทำให้รำข้าวมักจะถูกนำมาใช้เป็นวัตถุดิบในการสกัดเป็นน้ำมันรำข้าว หรือถูกนำไปผลิตเป็นอาหารสัตว์ และในบางครั้งก็มีการผลิตโปรตีนเข้มข้นจากกากรำข้าวที่เหลือจากการสกัดน้ำมันได้อีกด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.1 แสดงองค์ประกอบทางเคมีของรำข้าว (ร้อยละโดยน้ำหนักแห้ง)

ชนิดของรำข้าว	โปรตีน	ไขมัน	เถ้า	กากใย	คาร์โบไฮเดรต
ไขมันเต็ม[a]	12.0	13.7	12.1	14.4	25.4
ไขมันเต็ม[b]	14.1	20.9	12.8	8.4	43.5
สกัดน้ำมันออก[a]	18.3	5.4	11.2	8.6	31.6
สกัดน้ำมันออก[b]	18.2	1.6	15.3	10.5	54.3
สกัดน้ำมันออก[c]	12.8	7.0	8.9	8.2	58.2

ที่มา: [a] Connor (1976) [b] Prakash (1991) และ [c] Youssef (1974)

2.1.2 น้ำมันรำข้าว [3]

น้ำมันรำข้าวคือ น้ำมันพืชที่ผลิตจากน้ำมันรำข้าวดิบ ซึ่งสกัดจากรำข้าว มีสารต้านอนุมูลอิสระ เช่น วิตามินอี ในกลุ่มโทโคฟีรอลประมาณ 19-40% และกลุ่มโทโคไตรอีนอล 51-81% และโอรีซานอล (Oryzanol) ซึ่งสามารถต้านอนุมูลอิสระได้ดีกว่าวิตามินอีถึง 6 เท่า มีกรดไขมันอิ่มตัว 18% กรดไขมันไม่อิ่มตัวเชิงเดี่ยว (Monounsaturated Fatty Acid : MUFA) 45% กรดไขมันไม่อิ่มตัวเชิงซ้อน (Polyunsaturated Fatty Acid : PUFA) 37% น้ำมันรำข้าวเหมาะสำหรับผู้ที่ต้องการลดคอเลสเตอรอลที่ไม่ดี (LDL-C)

2.1.3 ส่วนประกอบของน้ำมันรำข้าว [7]

กรดไขมันไลโนเลนิค (Linolenic acid) หรือ โอเมก้า 3 (Omega 3) ช่วยบำรุงสมอง ป้องกันภาวะ เสื่อมของสมองและความจำซึ่งเป็นกรดไขมันที่จำเป็นโดยมีอยู่ประมาณ 33 %

กรดไขมันไลโนเลอิค (Linoleic acid) หรือโอเมก้า 6 (Omega 6) ช่วยให้ผิวหนังสดใส และช่วยระบบสืบพันธุ์ให้ทำงานเป็นปกติ ซึ่งเป็นกรดไขมันที่จำเป็น โดยมีอยู่ประมาณ 33 % ช่วยรักษาอาการผิดปกติของ ชาย หญิง วัยเจริญพันธุ์ และสตรีวัยทอง

โทคอล (Tocols) วิตามินอีธรรมชาติ ในรูปของโทโคเฟอรอล (Tocopherol) และโทโคไทรอีนอล (Tocotrienol) มีประโยชน์ในการสร้างและซ่อมแซมเซลล์ต่างๆ ของร่างกายและยังช่วยยับยั้งการเกิดอนุมูลอิสระ(Oxidation) ทำให้ร่างกายมีภูมิคุ้มกันต่อโรคต่างๆ ซึ่งเป็นสาเหตุสำคัญของการเกิดโรคมะเร็ง

สารออไรซ่าเซราไมด์ (OryzaCeramide) เป็นส่วนประกอบที่สำคัญของชั้นใต้ผิวหนัง ช่วยทำให้ผิวหนังมีความยืดหยุ่น การเสริมเซราไมด์ให้เพียงพอทั้งโดยการรับประทานหรือการให้ทางผิวหนังใน รูปการทาครีมหรือโลชั่น จะช่วยรักษาผิวพรรณให้สดชื่นเปล่งปลั่งปราศจากริ้วรอยเหี่ยวย่นก่อนวัยอันควร นอกจากนี้เซราไมด์ยังมีคุณสมบัติเป็นไวท์เทนเนอร์ (Whitener) ซึ่งสามารถยับยั้งการสังเคราะห์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมลานิน (Melanin) อันเป็นสาเหตุให้เกิดฝ้า กระ จุดด่างดำบนผิวพรรณได้ดี และยังเป็นมอยส์เจอไรเซอร์ (Moisturizer) ให้ความชุ่มชื้นแก่ผิวอีกด้วย ช่วยบำรุงผิวพรรณให้นุ่มนวลอ่อนเยาว์ ลบเลือนริ้วรอย ด่างดำ เหี่ยวย่น ฝ้าและกระ

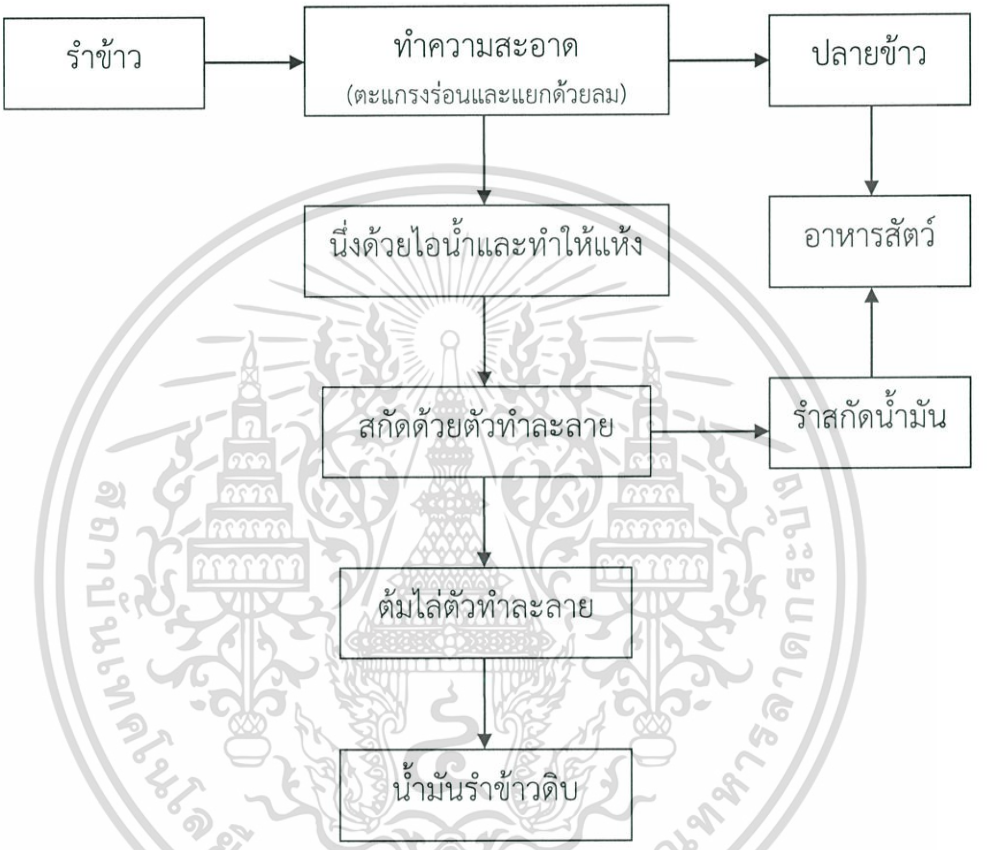
สารแกมม่า-ออไรซานอล (Gamma-Oryzanol) ช่วยลดระดับไขมัน คอเลสเตอรอลและไตรกลีเซอไรด์ (Triglyceride) ใน เส้นเลือด ทำให้ลดการตีบตันของหลอดเลือด เพิ่มการไหลเวียนของโลหิตและยังมีฤทธิ์ในการลดความเครียด ทำให้อวัยวะ สำคัญต่างๆ เช่น ตับ ไต หัวใจ สมอง ตับอ่อน และอื่นๆ มีเลือดไปเลี้ยงมากขึ้นและที่เสื่อมสภาพก็กลับฟื้นตัว และทำงานได้อีกครั้ง ช่วยลดอัตราการเสี่ยงต่อการเป็นโรคหัวใจ, โรคตับ, โรคไต, โรคเบาหวาน,โรคความดันโลหิตสูงและโรคความจำเสื่อมเป็นต้นนอกจากนี้ยังเป็นสารต้านอนุมูลอิสระ(Oxidation) และยังป้องกันแสงยูวีได้

สารฟอสโฟไลปิด (Phospholipids) เช่น เลซิติน (Lecithin), เซฟฟาลิน (Cephalin), ไลโซเลซิติน (Lysolecithin) ซึ่งมีส่วนสำคัญในการนำไปสร้างและซ่อมแซมส่วนที่สึกหรอของเซลล์ประสาทสมอง และช่วยป้องกันเซลล์ประสาทจากสารที่เป็นพิษและอนุมูลอิสระต่างๆ ช่วยลดการเครียดและช่วยเสริมสร้างในด้านความจำ ช่วยลดระดับของ แอล ดี แอล (LDL) คอเลสเตอรอล ซึ่งก่อให้เกิดโทษต่อร่างกาย ช่วยเพิ่มระดับของ เอช ดี แอล (HDL) คอเลสเตอรอล ซึ่งมีประโยชน์ต่อร่างกาย ช่วยลดระดับไขมันไตรกรีเซอไรด์ (Triglyceride) ในเส้นเลือด มีผลให้ความดันโลหิตลดลงและช่วยลดระดับน้ำตาลในเลือด

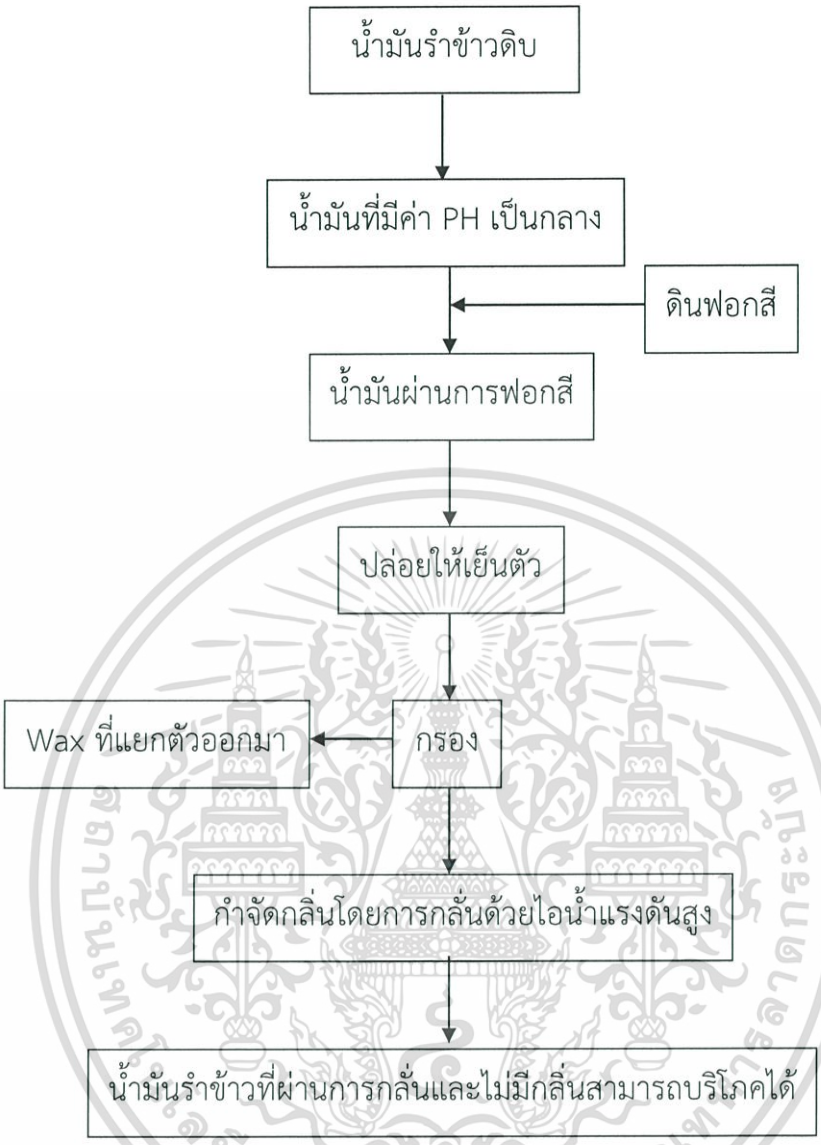
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.4 ขั้นตอนการสกัดน้ำมันรำข้าว [8]

ขั้นการสกัดน้ำมันรำข้าวมีขั้นตอนตามรูปภาพดังนี้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

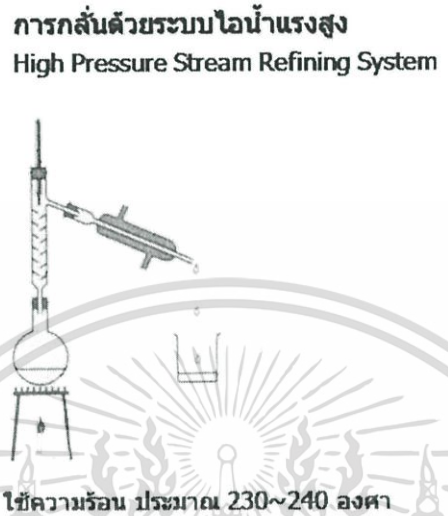


ภาพที่ 2.1 ขั้นตอนการสกัดน้ำมันรำข้าว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.5 วิธีการสกัดน้ำมันรำข้าว [8]

1. วิธีการกลั่นด้วยระบบไอน้ำแรงดันสูง (High Pressure Stream Refining System at 230 ~ 240 degree) ดังแสดงในรูปที่ 2.2



ภาพที่ 2.2 การกลั่นด้วยระบบไอน้ำแรงสูง

การกลั่นน้ำมันรำข้าว ถือเป็นกระบวนการที่นิยมในการผลิตน้ำมันรำข้าวแบบอุตสาหกรรม เพราะจะทำให้ได้น้ำมันจำนวนมาก บีบได้เร็ว แต่ต้องใช้ความร้อนในการสกัดน้ำมันสูงถึง 230 ~ 240 องศาเซลเซียส ซึ่งความร้อนระดับนี้จะทำให้คุณสมบัติ และคุณภาพของสารสำคัญบางอย่างในน้ำมันรำข้าว ถูกทำลายไปเพราะความร้อน ดังนั้นจึงไม่เหมาะที่จะนำมาผลิตน้ำมันรำข้าวและจมูกข้าว ที่เป็นผลิตภัณฑ์เสริมอาหาร

ข้อดี-ข้อเสีย ของการกลั่นด้วยระบบไอน้ำแรงสูง

ข้อดี: ผลิตได้จำนวนมาก ผลิตในระดับอุตสาหกรรมได้ ไม่ต้องใช้รำใหม่ในการผลิต รำที่มีสิ่งปลอมปนก็สามารถนำมาผลิตได้ เหมาะแก่การผลิตน้ำมันเพื่อใช้ในอุตสาหกรรมอาหาร หรือน้ำมันใช้ในการปรุงอาหาร

ข้อเสีย: การผ่านกระบวนการทางเคมี และความร้อนสูง ทำให้สูญเสียธาตุอาหารสำคัญบางอย่างไปกับความร้อน ทำให้คุณภาพและคุณค่าทางอาหารของน้ำมันน้อยมาก ไม่เหมาะที่จะนำมาเป็นผลิตภัณฑ์เสริมอาหาร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. วิธีการสกัดแบบบีบเย็น (Screw Press Cold Process at 40 ~ 70 degree) ดังแสดงในรูปที่ 2.3

การบีบเย็นจะมีความร้อนระหว่างการบีบอัดด้วยแรงดัน มากไม่เกิน 70 องศาเซลเซียส วิธีนี้จะช่วยรักษาคุณภาพของสารอาหาร และสารสำคัญในรำข้าวและจมูกข้าว อยู่อย่างครบถ้วนสมบูรณ์ และจะได้น้ามันที่มีคุณภาพดีที่สุด จึงเป็นวิธีที่เหมาะสำหรับการผลิตน้ำมันรำข้าวและจมูกข้าวที่ใช้เป็นผลิตภัณฑ์เสริมอาหารและเนื่องจาก การผลิตน้ำมันรำข้าวและจมูกข้าว ด้วยวิธีการบีบเย็น จะทำได้ช้าและจะได้น้ำมันปริมาณน้อย ต่อปริมาณรำข้าว จึงไม่นิยมที่จะผลิตในระดับอุตสาหกรรมอาหาร

ภาพที่ 2.3 เครื่องสกัดแบบบีบเย็น

ข้อดี-ข้อเสีย ของการสกัดแบบบีบเย็น

ข้อดี: ไม่มีการเติมสารเคมี ไม่มีความร้อน จึงทำให้ได้น้ำมันรำข้าวและจมูกข้าว ที่มีคุณภาพสูงมากคุณค่าของอาหารในรำข้าวและจมูกข้าวยังมีอยู่อย่างครบถ้วนสมบูรณ์เหมาะแก่การเป็นผลิตภัณฑ์เสริมอาหารที่มีคุณภาพสูง

ข้อเสีย: ผลิตได้ครั้งละน้อย ต้องใช้รำใหม่ ในกระบวนการผลิตต้องใช้รำในปริมาณมาก ละเสียเวลาในการบีบมาก ไม่เหมาะที่จะใช้ในระดับอุตสาหกรรมอาหาร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.6 วิธีการกรองน้ำมันรำข้าว [8]

น้ำมันรำข้าวที่ผ่านการบีบแล้วจะต้องผ่านกระบวนการกรองเอากากของรำข้าวออกจากน้ำมัน เพื่อให้ได้น้ำมันที่ใสสะอาด บริสุทธิ์ สามารถเก็บไว้ได้เป็นเวลานาน โดยไม่เกิดกลิ่นหืน และจังคงคุณภาพของน้ำมันรำข้าว ที่สมบูรณ์

วิธีการกรองสามารถทำให้ได้หลายวิธีดังต่อไปนี้

1. การกรองแบบแรงดัน (Filter Press)

การกรองด้วยวิธีบีบอัด เพื่อแยกน้ำมันออกจากกากรำข้าว สามารถกรองได้อย่างรวดเร็ว แต่การบีบอัดจะทำให้ได้น้ำมันที่มีกากของรำข้าวติดออกมาด้วย ทำให้นำมันไม่บริสุทธิ์ จะทำให้น้ำมันมีกลิ่นหืน จากกากที่ตกค้างอยู่ในน้ำมัน

2. การกรองด้วยกระดาษกรอง (Filter Paper)

การกรองด้วยกระดาษกรองคือการปล่อยให้น้ำมันไหลตามแรงโน้มถ่วง ผ่านกระดาษกรอง แม้ว่าจะกรองได้ช้า แต่เป็นวิธีที่ทำให้ได้น้ำมันที่ใส สะอาด บริสุทธิ์ ไม่มีกากติดมากับน้ำมัน ได้น้ำมันที่มีคุณภาพสูงที่สุด

3. การกรองด้วยแรงดูด (Vacuum Filter)

เป็นการกรองด้วยกระดาษกรอง และแรงดูด เพื่อทำให้ เร็วขึ้น โดยใช้แรงดูดของอากาศช่วยทำให้การกรองได้รวดเร็วขึ้น โดยยังได้น้ำมันที่สะอาดเท่ากับการกรองด้วยกระดาษกรอง

4. การกรองแบบแรงเหวี่ยง (Centrifugal Filter)

การกรองแบบการหมุนเหวี่ยง เพื่อแยกน้ำออกจากกาก เป็นวิธีการอีกแบบหนึ่งที่ใช้ในการกรองเพื่อความ รวดเร็ว แต่ไม่ค่อยนิยมในระดับอุตสาหกรรม เพราะไม่สามารถแยกน้ำมันออกจากกากได้หมด

2.1.7 คุณภาพของน้ำมันรำข้าว [4]

เมื่อรำข้าวมีความชื้นที่มาก จะทำให้เกิดปฏิกิริยาทางเคมีส่งผลให้เกิดการเสื่อมเสียของน้ำมันในรำข้าวหรือเกิดกลิ่นหืน (rancidity) กลิ่นหืนซึ่งเป็นกลิ่นผิดปกติของไขมันหรือน้ำมันเกิดจากปฏิกิริยาทางเคมี

1. ปฏิกิริยาออกซิเดชันของลิพิด (lipid oxidation หรือ oxidative rancidity) หมายถึง การหืนเนื่องจากปฏิกิริยาออกซิเดชัน (oxidation)เป็นการหืนเนื่องจากปฏิกิริยาออกซิเดชันของไขมันและน้ำมันกับออกซิเจนในอากาศ ทำให้ไขมันหรือน้ำมันมีกลิ่นและรสชาติผิดปกติ

2. ปฏิกิริยาไฮโดรลิซิสของลิพิด (lipolysis หรือ hydrolytic rancidity) หมายถึง การหืนเนื่องจากปฏิกิริยาไฮโดรลิซิสโดยมีน้ำ และเอนไซม์ไลเพส (lypase) หรือ ลิพอกซิเดส (lipoxidase) ที่มีอยู่ในอาหาร เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ทำให้เกิดการสลายของโมเลกุลไตรกลีเซอไรด์ (triglyceride) ได้เป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กรดไขมันอิสระ (free fatty acid) ซึ่งกรดไขมันอิสระที่ระเหยเป็น short chain fatty acid ได้จะให้กลิ่นหืน(ไลเพสเป็นเอนไซม์ ที่เร่งปฏิกิริยาการไฮโดรไลซ์โมเลกุลของไตรกลีเซอไรด์ ได้เป็นกรดไขมันอิสระพบในระบบการย่อยอาหารของมนุษย์และสัตว์ ผลิตได้จากแบคทีเรีย)

2.1.8 คุณภาพของน้ำมันรำข้าวสามารถวัดได้จากค่าต่างๆดังนี้ [4]

1. ค่าความเป็นกรด (acid value) เป็นค่าที่บ่งชี้คุณภาพของน้ำมันและไขมัน โดยเป็นค่าที่บ่งชี้ว่าไตรกลีเซอไรด์ มีความเป็นกรดเพิ่มขึ้น (ไตรกลีเซอไรด์เป็นส่วนประกอบหลักในไขมันและน้ำมัน ถูกย่อยสลายด้วยปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (hydrolysis) โดยมีเอนไซม์ไลเปส และความร้อนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ได้ผลิตผล คือกลีเซอรอล และกรดไขมันอิสระ) หากค่าความเป็นกรดสูง แสดงว่าน้ำมันเสื่อมคุณภาพ มีจุดเกิดควัน (smoke point) ต่ำลง และเป็นสาเหตุเริ่มต้นของการเกิดกลิ่นหืน (rancidity) นอกจากนี้ยัง มีโอกาสที่จะเกิดปฏิกิริยาลิพิดออกซิเดชัน (lipid oxidation) ซึ่งเป็นปฏิกิริยาลูกโซ่ ซึ่งทำให้เกิดการหืนอย่างต่อเนื่องและรวดเร็ว ค่าความเป็นกรดของไขมันหรือน้ำมัน คือจำนวนมิลลิกรัมของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ ซึ่งทำปฏิกิริยาพอดีกับกรดไขมันอิสระ (free fatty acid) ซึ่งค่าที่ได้สามารถนำมาคำนวณเป็นเปอร์เซ็นต์กรดไขมันอิสระ[12]

2. กรดไขมันอิสระ (free fatty acid) หมายถึงกรดไขมัน (fatty acid) ที่ไม่ได้รวมอยู่เป็นองค์ประกอบในโมเลกุลของไตรกลีเซอไรด์ การเกิดกรดไขมันอิสระในอาหาร เป็นดัชนีบ่งชี้คุณภาพของน้ำมันพืช (vegetable oil) ไขมันและน้ำมันทอดซ้ำ รวมทั้งอาหารที่มีไขมันสูง ปริมาณกรดไขมันอิสระเป็นต้นเหตุสำคัญของการเสื่อมเสียอาหาร คือการเกิดกลิ่นผิดปกติ (off flavour) ที่เรียกว่า กลิ่นหืน (rancidity) และทำให้ค่าความเป็นกรด (acid value, AV) ของน้ำมันสูงขึ้น

3. ค่าเพอร์ออกไซด์ (peroxide value ; P.V.) เป็นค่าที่ใช้การวัดอัตราการเกิดปฏิกิริยา lipid oxidation ซึ่งเป็นสาเหตุของการเกิดกลิ่นหืน (rancidity) เป็นค่าที่บ่งชี้ถึงการเสื่อมเสียของน้ำมันและไขมันรวมทั้งอาหารที่มีไขมันสูง

4. ค่าไอโอดีน Iodine value (I.V.) หรือ Iodine number (I.N.) เป็นตัวบ่งชี้ว่าไขมันหรือน้ำมัน มีกรดไขมันชนิดไม่อิ่มตัวเป็นส่วนประกอบอยู่ในโมเลกุลมากน้อยเพียงใด ถ้ามีค่า I.N. สูง แสดงว่ามีปริมาณกรดไขมันชนิดไม่อิ่มตัวเป็นส่วนประกอบมาก และจะเกิดการหืน (rancidity) แบบ lipid oxidation ได้ง่าย

5. ค่าซาพอนนิฟิเคชัน (saponification number หรือ saponification value, S.V.) คือ จำนวนมิลลิกรัมของด่าง เช่น โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ ที่ใช้ในทำปฏิกิริยากับไตรกลีเซอไรด์ (triglyceride)

6. ค่าอันซาพอนนิฟิเคชั่นแมทเทอร์ (Unsaponifiable matter) คือ องค์ประกอบของไขมันที่ไม่ถูกไฮโดรไลซ์ด้วยด่าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2 ความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับการอบแห้ง

2.2.1 ทฤษฎีการอบแห้ง [9]

การทำแห้งเป็นกระบวนการแปรรูปเพื่อเก็บรักษาอาหารโดยการใช้ความร้อนภายใต้สภาวะควบคุมเพื่อกำจัดน้ำส่วนใหญ่ที่มีอยู่ในอาหารโดยการระเหยการระเหิดการสกัดน้ำออกด้วยตัวทำละลายที่เหมาะสมหรือใช้กระบวนการออสโมติคด้วยน้ำตาลหรือเกลือมีวัตถุประสงค์เพื่อยืดอายุการเก็บรักษาของอาหารโดยการลดค่า Water Activity ปริมาณน้ำในผลิตผลเกษตรส่วนมากจะอยู่ในรูปของน้ำอิสระซึ่งมีผลยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อจุลินทรีย์และการทำงานของเอนไซม์และเป็นสาเหตุสำคัญของการเสื่อมคุณภาพของผลิตผลเกษตรนอกจากนั้นการลดน้ำหนักและปริมาตรของอาหารยังช่วยลดค่าใช้จ่ายและเพิ่มความสะดวกในการเก็บรักษาขนส่งการแสดงปริมาณความชื้น (Moisture Content) หรือน้ำที่อยู่ภายในผลิตผลเกษตรสามารถบอกในรูปของอัตราส่วนหรือเปอร์เซ็นต์ตามมาตรฐานเปียก (Wet Basis) และมาตรฐานแห้ง (Dry basis) โดยนำค่าที่ได้จากการทดลองไปวิเคราะห์ผล

2.2.2 ปัจจัยที่มีผลต่อการทำแห้ง

การทำแห้งคือการเคลื่อนย้ายน้ำออกจากอาหารโดยปัจจัยใดๆที่มีผลต่อการเคลื่อนย้ายนี้จึงมีผลต่ออัตราของการทำแห้งได้แก่

1. คุณสมบัติของอาหารอาหารเนื้อโปร่งมีการเคลื่อนที่ของน้ำภายในอาหารแบบผ่านช่องแคบซึ่งเร็วกว่าการแพร่ในอาหารเนื้อแน่นดังนั้นอาหารเนื้อโปร่งจึงแห้งได้เร็วกว่าอาหารเนื้อแน่นอาหารที่มีน้ำตาลสูงจะเหนียวกีดขวางการเคลื่อนที่ของน้ำจึงทำให้แห้งได้ช้ากว่าอาหารที่มีการลวกนวดคลึงทำให้เซลล์แตกจึงแห้งได้เร็วขึ้น

2. ขนาดและรูปร่างขนาดและรูปร่างมีผลต่อพื้นผิวต่อน้ำหนักเช่นรูปร่างเหมือนกันขนาดเล็กจะมีพื้นที่ผิวต่อน้ำหนักมากกว่าขนาดใหญ่จึงทำให้แห้งเร็วกว่าแต่ทั้งนี้ต้องคำนึงถึงพื้นที่ผิวสัมผัสกับอากาศที่จะเกิดการเคลื่อนย้ายไอน้ำออกไปถ้าชิ้นเล็กมากทับถมกันการระเหยเกิดได้เฉพาะที่ผิวสัมผัสกับอากาศจึงทำให้การทำแห้งเกิดได้ช้าทั้งๆที่พื้นที่ต่อหน่วยน้ำหนักมาก

3. อุณหภูมิของอากาศร้อนถ้าอากาศมีความชื้นคงที่การเพิ่มอุณหภูมิเป็นการเพิ่มความสามารถในการรับไอน้ำจึงมีผลต่อการทำแห้งในช่วงอัตราการทำแห้งคงที่และอุณหภูมิที่สูงขึ้นทำให้การแพร่กระจายของน้ำดีขึ้นจึงมีผลต่อการอบในช่วงการทำแห้งลดลงด้วย

4. ความเร็วของลมร้อนลมร้อนทำหน้าที่ในการเคลื่อนย้ายไอน้ำออกไปด้วยเมื่อความเร็วลมเพิ่มขึ้นจึงเคลื่อนย้ายได้ดีขึ้นการเคลื่อนย้ายเกิดขึ้นเต็มที่ที่ความเร็ว 244 เมตรต่อนาทีนอกจากนั้นความเร็วลมทำให้เกิดกระแสปั่นป่วนของอากาศในเตาอากาศจึงสัมผัสอาหารได้ดีขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.3 หลักการอบแห้ง [10]

1. กระบวนการทำแห้ง

การทำแห้ง (drying) คือการลดความชื้นของอาหารจนถึงระดับที่สามารถระงับการเจริญเติบโตของเชื้อจุลินทรีย์ได้คือมีค่าวอเตอร์แอกทิวิตี (water activity, aw) ต่ำกว่า 0.70 ทำให้เก็บอาหารไว้ได้นาน อาหารแห้งแต่ละชนิดจะมีความชื้นในระดับปลอดภัยที่ไม่เท่ากันเช่นผลไม้แช่อิ่มเก็บได้ที่ความชื้น 15-20% แต่ถ้าเป็นเมล็ดธัญพืชเก็บที่ความชื้นนี้จะเกิดราได้

ในการทำแห้งจะต้องมีการให้พลังงานแก่อาหารทำให้น้ำในอาหารเปลี่ยนสถานะเป็นไอแล้วเคลื่อนย้ายออกจากอาหารแสงอาทิตย์เป็นพลังงานความร้อนจากธรรมชาติและกระแสลมที่พัดผ่านอาหารทำให้เกิดการเคลื่อนย้ายไอน้ำเนื่องจากพลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์ให้อุณหภูมิไม่ได้สูงนักและกระแสลมธรรมชาติไม่สูงพอทำให้การตากแห้งต้องใช้เวลานานดังนั้นจึงมีการพัฒนาเครื่องอบที่มีการให้พลังงานความร้อนในปริมาณที่ควบคุมได้และมีอุปกรณ์ในการเคลื่อนย้ายไอน้ำออกจากผิวอาหารการถ่ายเทความร้อนและมวลสารเกิดได้เร็วอาหารจึงแห้งได้เร็วขึ้นการถ่ายเทความร้อนและมวลสารระหว่างการอบแห้งทำได้หลายวิธีคือ

1) การให้กระแสลมเคลื่อนที่ผ่านอาหารกระแสลมร้อนทำหน้าที่ให้ความร้อนและเคลื่อนย้ายไอน้ำการถ่ายเทความร้อนแบบนี้เป็นแบบพาความร้อน (convection)

2) การแผ่อาหารเป็นชั้นบางๆบนพื้นผิวที่ให้ความร้อนอาหารได้รับความร้อนแบบการนำความร้อน (conduction) ทำให้ความร้อนกระจายตัวออกไปสู่บรรยากาศเหนืออาหารอาหารที่ร้อนจัดทำให้ไอน้ำกระจายตัวได้ดีอาหารจึงแห้งในเวลาสั้นๆอาจมีระบบดูดอากาศออกจากผิวอาหารซึ่งทำให้สามารถลดความชื้นได้ต่ำลงอีกหรือไม่ต้องใช้อุณหภูมิอาหารที่สูงนัก

3) การให้ความร้อนแก่อาหารในเครื่องอบด้วยการนำความร้อนหรือการแผ่รังสีร่วมกับการดูดอากาศที่มีไอน้ำออกไปควบแน่นข้างนอก

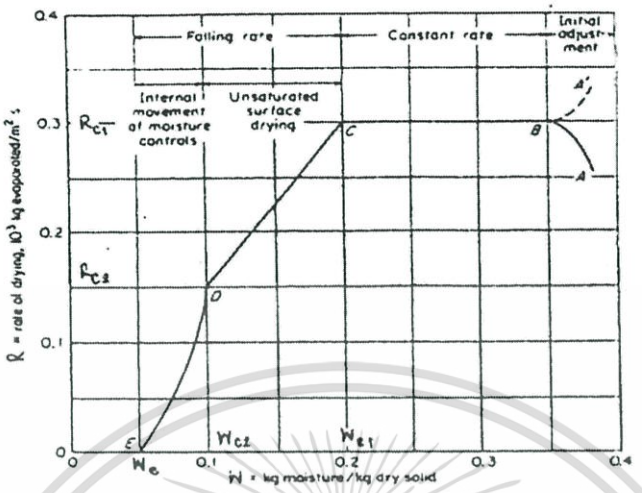
4) การปรับสภาพความดันและอุณหภูมิให้น้ำในอาหารเป็นของแข็งที่ระดับต่ำกว่าจุดร่วมสามสถานะ (triple point) แล้วให้พลังงานความร้อนหรือลดความดันลงอีกทำให้เกิดการระเหิดน้ำเกิดการเปลี่ยนสถานะจากของแข็งกลายเป็นไอโดยตรงวิธีการนี้เรียกว่าการทำแห้งด้วยการแช่เยือกแข็ง (freeze drying)

การทำแห้งอีกแบบหนึ่งไม่เกี่ยวกับพลังงานความร้อนแต่เป็นการให้ความดันออสโมติกลดปริมาณน้ำจากชิ้นอาหารได้แก่การทำผลไม้แช่อิ่มเมื่อแช่ชิ้นผลไม้ในน้ำเชื่อมน้ำในอาหารจะเคลื่อนย้ายออกมาที่น้ำเชื่อมข้างนอกและน้ำตาลเคลื่อนที่เข้าไปในชิ้นผลไม้จนความเข้มข้นของน้ำตาลภายในและภายนอกผลไม้เท่ากันแต่วิธีนี้ยังคงเหลือน้ำในชิ้นผลไม้อีกมากจึงนิยมนำไปทำแห้งต่อ

2. กลไกการอบแห้งเมื่ออากาศหรือลมร้อนพัดผ่านหน้าอาหารที่เปียกความร้อนจะถูกถ่ายเทไปยังผิวของอาหารทำให้ความชื้นที่ผิวของอาหารระเหยออกมาด้วยความร้อนแฝงของการเกิดไอไอน้ำจะแพร่ผ่านฟิล์มอากาศและถูกพัดพาไปโดยลมร้อนที่เคลื่อนที่สภาวะดังกล่าวจะทำให้ความดันไอที่ผิวหน้าของอาหารต่ำกว่าความดันไอด้านในอาหารเป็นผลให้เกิดความแตกต่างของความดันไอน้ำอาหาร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชั้นด้านในจะมีความดันไอสูงและค่อยๆลดต่ำลงเมื่อชั้นอาหารเข้าใกล้อากาศแห้งความแตกต่างนี้ทำให้เกิดแรงดันเพื่อไล่น้ำออกจากอาหาร



ภาพที่ 2.4 แสดงกราฟอัตราอบแห้งซึ่งเป็นกราฟระหว่างอัตราการอบแห้ง (Drying Rate) และความชื้น
ที่มา : *www.agro.cmu.ac.th/e_books*

จากภาพที่ 2.4 สามารถแบ่งช่วงกราฟอัตราการอบแห้งเป็น 3 ช่วงได้แก่

1. ช่วงการปรับสภาวะเบื้องต้น (Initial Adjustment Period) เป็นช่วงที่ความชื้นที่มีอยู่ในอาหารปรับตัวเพื่อมีอุณหภูมิเท่ากับลมร้อนอัตราการอบแห้งจะต่ำและจะค่อยๆเพิ่มขึ้นจนกระทั่งถึงช่วงที่อัตราการอบแห้งคงที่จากรูปที่ 2.1คือช่วง AB ซึ่งถือว่าเป็นช่วงสั้นๆสามารถตัดทิ้งได้เมื่อคำนวณเวลาที่ใช้ในการอบแห้ง (Drying Time) ส่วนช่วง A´B เป็นกรณีที่บริเวณผิวหน้าของแข็งมีอุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิที่จะเริ่มเกิดการระเหยในตอนแรกจะสูงและค่อยๆลดลงจนคงที่

2. ช่วงอัตราการอบแห้งคงที่ (Constant Rate Period) เป็นช่วงที่น้ำในอาหารระเหยเป็นไออย่างต่อเนื่องคล้ายกับการระเหยของน้ำโดยทั่วไป

3. ช่วงอัตราการอบแห้งลดลง (Falling Rate Period) เป็นช่วงที่ความชื้นในอาหารเหลือน้อยจนแพร่ไปยังผิวหน้าอาหารอย่างไม่ต่อเนื่องทำให้ชั้นของเหลวที่ปกคลุมอยู่ไม่สม่ำเสมออัตราการอบแห้งจึงลดลงและเมื่อเวลาผ่านไปนานขึ้นความชื้นจะลดลงเรื่อยๆจนถึงความชื้นสมดุลซึ่งน้ำในอาหารไม่สามารถระเหยออกมาได้อีก

2.2.4 วิธีการหาความชื้น

ความชื้นเป็นตัวบอกปริมาณน้ำที่มีอยู่ในผลผลิตเมื่อเทียบกับมวลของผลผลิตซึ่งโดยทั่วไปจะบอกได้ 2 แบบด้วยกันคือเมื่อเทียบกับมวลของผลผลิตชื้นก็จะเรียกว่าความชื้นในฐานเปียกเป็นความชื้นที่นิยมบอกในทางการค้าหรือการซื้อขายผลผลิตทางการเกษตรของเกษตรกรและเมื่อเทียบกับมวลของผลผลิตแห้งก็จะเรียกว่าความชื้นในฐานแห้งซึ่งเป็นความชื้นที่นิยมใช้ในเอกสารวิชาการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนื่องจากว่าน้ำหนักแห้งจะมีค่าคงที่เสมอไม่เปลี่ยนไปตามระยะเวลาการอบแห้งดังนั้นจึงง่ายในการอ้างอิงซึ่งความชื้นทั้งสองมาตรฐานนี้สามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

ความชื้นฐานเปียก (wet basis)

$$MC_{wb} = \frac{mass\ of\ water}{mass\ of\ sample}$$

ความชื้นฐานแห้ง (dry basis)

$$MC_{db} = \frac{mass\ of\ water}{mass\ of\ dry\ solids}$$

เมื่อ MC_{wb} คือ ความชื้นฐานเปียก

MC_{db} คือ ความชื้นฐานแห้ง

หรือ

$$MC = \frac{W_1 - W_2}{W_2} \times 100\%$$

เมื่อ MC = ความชื้น (เปอร์เซ็นต์ฐานแห้ง)

W_1 = น้ำหนักของตัวอย่างก่อนอบแห้ง (กิโลกรัม)

W_2 = น้ำหนักของตัวอย่างหลังอบแห้ง (กิโลกรัม)

สำหรับหน่วยของความชื้นนั้นโดยทั่วไปทางการค่านิยมบอกเป็นเปอร์เซ็นต์ ซึ่งสามารถเปลี่ยนได้โดยการคูณด้วย 100 และตัวอย่างด้านท้ายเปอร์เซ็นต์d.b. หมายถึงฐานแห้ง และ เปอร์เซ็นต์w.b. หมายถึงฐานเปียก บางครั้งมีความจำเป็นที่จะต้องเปลี่ยนความชื้นจากฐานหนึ่งสู่อีกมาตรฐานหนึ่ง ซึ่งสามารถทำได้โดยใช้สมการซึ่งได้จากการแก้สมการสองสมการข้างต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$MC_{wb} = \frac{MC_{db}}{MC_{db} + 1}$$

$$MC_{db} = \frac{MC_{wb}}{1 - MC_{wb}}$$

เมื่อ M_f คือ ความชื้นสุดท้าย (ฐานเปียก)

W_i คือ น้ำหนักผลผลิตเริ่มต้นก่อนอบ (กรัม)

W_w คือ น้ำหนักน้ำที่ต้องการเอาออกจากผลผลิต (กรัม)

M_i คือ ความชื้นเริ่มต้น (ฐานเปียก)

W_f คือ น้ำหนักผลผลิตสุดท้ายหลังอบ (กรัม)

กรณีใช้น้ำหนักผลิตภัณฑ์แห้งที่ต้องการเป็นฐาน สมการที่ใช้ในการคำนวณ ได้แก่

$$W_w = \frac{(M_i - M_f)W_f}{100 - M_f}$$

อัตราส่วนความชื้น

$$MR = \frac{M - M_e}{M_i - M_e}$$

เมื่อ M คือ ปริมาณความชื้นของผลิตภัณฑ์ ณ เวลาใดๆ

M_e คือ ความชื้นสมดุลของผลิตภัณฑ์

M_i คือ ค่าความชื้นเริ่มต้น

MR คืออัตราส่วนความชื้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความชื้นสมดุลเปอร์เซ็นต์ (ฐานเปียก)

$$M_e = \frac{SolidMe - SolidMi}{Sample}$$

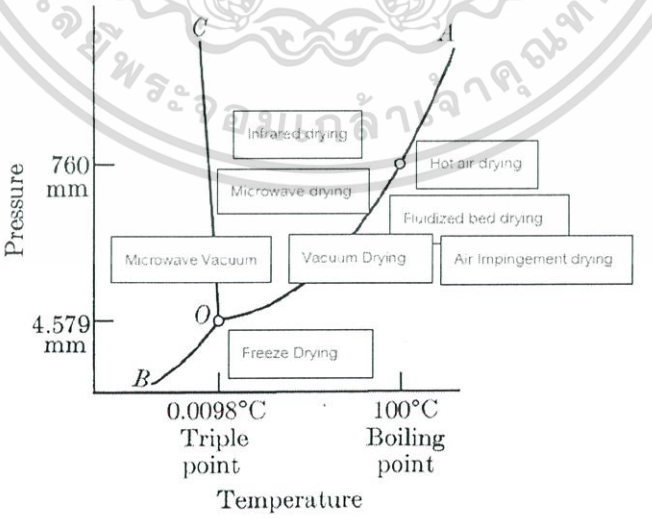
เมื่อ Solid M_e = น้ำหนักของตัวอย่างที่เหลือจากการอบแห้งด้วยวิธีการหาความชื้นสมดุล

Solid M_i = น้ำหนักของตัวอย่างที่เหลือจากการอบแห้งด้วยวิธีการหาความชื้นเริ่มต้น

Sample = น้ำหนักของตัวอย่างที่ใช้ในการทดลอง

2.2.5 วิธีการอบแห้งโดยลมร้อน (Hot Air Drying) [11]

การอบแห้งด้วยลมร้อนนี้เป็นวิธีการอบแห้งที่นิยมใช้กันมากที่สุดเนื่องจากมีความสะดวกต่อการปฏิบัติและง่ายต่อการควบคุมซึ่งหลักการของวิธีการอบแห้งด้วยวิธีนี้จะอาศัยคุณสมบัติและความสามารถในการถ่ายเทมวลของอากาศร้อนที่ใช้เป็นตัวกลางอัตราการอบแห้งจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและความดันในการดูดซึมความชื้นของอากาศและคุณสมบัติของอาหารอบแห้งวิธีการอบแห้งด้วยลมร้อนนี้ได้รับความนิยมมากในระดับอุตสาหกรรมเช่นเครื่องอบแห้งแบบถาดหรือตู้อบ (Hot Air Oven) เครื่องอบแห้งแบบอุโมงค์ (Tunnel Drying) เครื่องอบแห้งระบบสายพาน (Belt or Conveyor Drying)



ภาพที่ 2.5 แสดงเฟสไดอะแกรมของน้ำและวิธีการอบแห้งแบบต่างๆ
ที่มา: www.foodfocusthailand.com

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เฟสไดอะแกรมแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันและอุณหภูมิซึ่งจุดร่วมสามเป็นจุดที่แยกสถานะของน้ำออกเป็น 3 สถานะ (แสดงในภาพที่ 2.5) ซึ่งประกอบไปด้วยของแข็งของเหลวและไอโดยให้เส้น OA อยู่ระหว่างของเหลวและไอเส้น OC จะอยู่ระหว่างของแข็งและของเหลวเส้น OB อยู่ระหว่างของแข็งและไอภาพดังกล่าวแสดงความสามารถในการลดความชื้นของเครื่องอบแห้งแต่ละชนิดในช่วงความดันและอุณหภูมิที่แตกต่างกัน

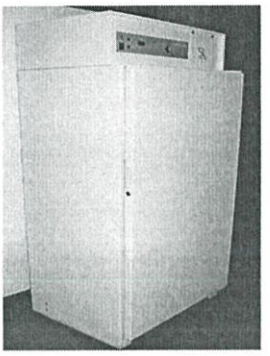
2.3 ความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับตู้อบลมร้อน [12]

ตู้อบลมร้อนเป็นเครื่องมือพื้นฐานใช้สำหรับการอบวัสดุและอุปกรณ์ต่างๆให้แห้งใช้อบฆ่าทำลายเชื้อโรคใช้อบ เพาะเชื้อจุลชีพใช้เผา ตัวอย่างให้เป็นเถ้า (ashing) ใช้หาความชื้นในตัวอย่างใช้เผากากกัมมันตรังสีฯลฯ

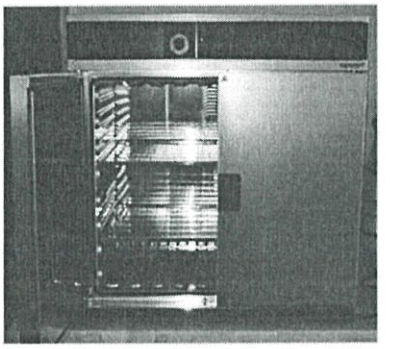
ความร้อนจากแหล่งกำเนิดความร้อนถูกถ่ายเทให้วัตถุโดยกระบวนการนำความร้อน (conduction) การพาความร้อน (convection) และการแผ่รังสี (radiation) ความร้อนที่ถูกควบคุมอย่าง เหมาะสมด้วยตัวไวความร้อนและระบบควบคุมอุณหภูมิทำให้วัตถุเกิดการเปลี่ยนแปลงสถานะจากของแข็งเป็นของเหลวจากของเหลวเป็นไอหรือจากของแข็งเป็นไอ

ตู้อบลมร้อนมีหลายแบบ มีชื่อเรียกแตกต่างกันตามอุณหภูมิใช้งานของตู้อบลมร้อน โดยเรียกตู้อบที่ให้อุณหภูมิได้ สูงถึง 3,000 °C. ว่า “ตู้เผา” (furnace) เรียกตู้อบที่ให้อุณหภูมิสูงสุด ประมาณ 300 °C. ว่า “ตู้อบแห้ง” (drying oven) หรือ “ตู้อบฆ่าเชื้อ” (sterilizing oven) และเรียกตู้อบที่ มีอุณหภูมิสูงสุดประมาณ 100 °C. ว่า “ตู้เพาะเชื้อ” (incubating oven) แต่ตู้อบลมร้อนบางชนิดมีช่วงอุณหภูมิการใช้งานกว้างจึงอาจเป็นทั้งตู้อบแห้งและตู้เพาะเชื้อตู้อบลมร้อนมีองค์ประกอบหลักที่คล้ายกันจะแตกต่างกันในส่วนของการออกแบบและวัสดุ ตัวอย่างตู้อบลมร้อนแสดงอยู่ในรูปที่ 2.6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

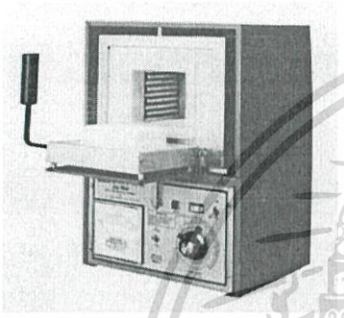


(a)

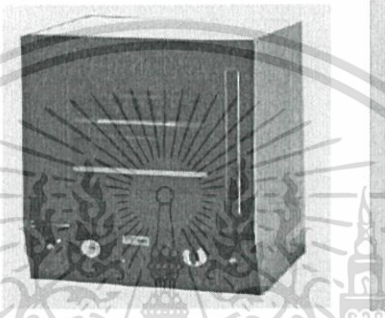


(b)

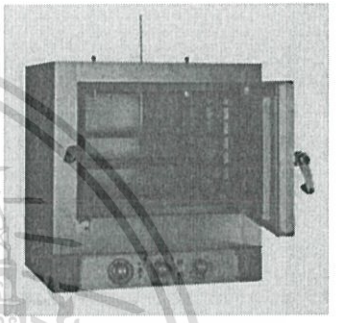
(c)



(f)



(d)



(e)

ภาพที่ 2.6 รูปตู้อบลมร้อนแบบอบแห้งขนาดใหญ่(a) ขนาดกลาง(b) ตู้เผา(c, d) แบบอบแห้งร่วมกับระบบสุญญากาศ(e) และตู้เพาะเชื้อ(f)

2.3.1 ส่วนประกอบต่างๆในตู้อบลมร้อน [13]

1. ผนังตู้อบโดยทั่วไปจะออกแบบให้มีการกระจายความร้อนภายในได้ดีและป้องกันการสูญเสียความร้อนจากภายในสู่ภายนอกวัสดุที่ใช้ส่วนใหญ่เป็นโลหะที่ไม่เป็นสนิมไม่เปลี่ยนรูปร่างและทำความสะอาดง่ายตัวอย่างเช่นเหล็กกล้าไร้สนิมหรือเหล็กพ่นสีกันสนิม

2. ตัวกำเนิดความร้อนการสร้างความร้อนไม่เกิน 1,000 °C. นิยมใช้แท่งความร้อนหรือลวดความต้านทาน (resistance wire) ที่ทำจากโลหะผสมระหว่างนิเกิลกับโครเมียม(นิโครม) เนื่องจากมี ความทนทานต่อการเกิดปฏิกิริยาเคมีกับสารเคมีหลายๆชนิดตัวอย่างเช่นคลอรีน (chlorine) โบรมีน (bromine) ไอโอดีน(iodine) และฟลูออรีน (fluorine) ฯลฯ

3. ช่องระบายอากาศ (air damper) ส่วนใหญ่ติดตั้งที่ด้านบนของตู้อบมีส่วนน้อยติดตั้งไว้ที่ ด้านหลังตู้อบมีหน้าที่ระบายควันไอน้ำหรือไอสารเคมีออกจากตู้อบทั้งนี้เพื่อลดการสูญเสียความร้อน ช่องระบายอากาศส่วนใหญ่ปรับขนาดของรูระบายได้ เพื่อให้ไอน้ำระบายออกได้อย่างเหมาะสมโดยที่สูญเสียความร้อนออกทางช่องระบายอากาศน้อยที่สุด ระบบถ่ายเทความร้อนที่นิยมใช้มีอยู่ 2 แบบคือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1 การพาความร้อนโดยอาศัยแรงโน้มถ่วง (gravity convection) ทำงานโดยอาศัยความ แตกต่างของน้ำหนักของอากาศที่ร้อนและเย็นทำให้เกิดการถ่ายเทความร้อนอย่างช้าๆ

3.2 การพาความร้อนโดยใช้พัดลม (mechanical convection) นิยมใช้มอเตอร์หมุนพัดลมชนิดเหนี่ยวนำ (induction motor) มอเตอร์ดังกล่าวจะทำหน้าที่หมุนพัดลมซึ่งอาจถูกติดไว้ที่ส่วนล่างของตู้อบเพื่อเสริมการพาความร้อนในแนวดิ่ง

4. ตัวไวความร้อน (temperature sensor) มีหน้าที่ป้อนสัญญาณให้วงจรหรือระบบควบคุม อุณหภูมิหรือป้อนสัญญาณให้ระบบอ่านค่าอุณหภูมิตัวไวความร้อนที่นิยมใช้มีหลายชนิด เช่น เทอร์มอคับเปิล(thermocouple) เทอร์มิสเตอร์(thermistor) สารกึ่งตัวนำ(semiconductor) โลหะบริสุทธิ์

5. ตัวควบคุมอุณหภูมิ (temperature controller) แบ่งเป็น2 แบบคือแบบกล (mechanical type) ที่อาศัยการเคลื่อนที่ของกลไกและแบบอิเล็กทรอนิกส์ (solid state type)

5.1 แบบกลทำงานโดยการตัด (OFF) หรือต่อ (ON) กระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับตัวกำเนิด ความร้อนโดยการเคลื่อนที่ของหน้าสัมผัสของสวิทช์ไฟฟ้าซึ่งถูกควบคุมโดยตัวไวความร้อน

5.2 แบบอิเล็กทรอนิกส์มีอยู่หลายชนิดตัวอย่างเช่น

5.2.1 แบบเปิดปิด (ON/OFF) ทำงานโดยการรับสัญญาณจากตัวไวความร้อนแล้วตัดหรือต่อวงจรไฟฟ้าของตัวกำเนิดความร้อนด้วยอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์บางชนิด

5.2.2 แบบสัดส่วน (proportional control) เป็นตัวควบคุมอุณหภูมิที่นิยมใช้อย่างแพร่หลายเนื่องจากมีความไวสูงและตอบสนองต่อการควบคุมอุณหภูมิได้เร็ว

6. ประตูตู้อบปกติจะมีประตู 1 บานแต่ถ้าต้องการรักษาอุณหภูมิภายในให้คงที่มากๆ ตัวอย่างเช่นตู้เพาะเชื้ออาจมีประตูกระจกชั้นในเพิ่มขึ้นอีก 1 บานเพื่อทำให้สามารถมองเห็นวัตถุภายในโดยไม่จำเป็นต้องเปิดประตูตู้อบบ่อยๆ

7. ชั้นวางอาจทำด้วยเหล็กกล้าไร้สนิมเหล็กชุบนิเกิลหรือเหล็กชุบพลาสติกแต่ควรเป็นชนิดที่ปรับระดับได้เพื่อความสะดวกในการใช้งาน

8. นาฬิกาตั้งเวลามีทั้งชนิดที่เดินด้วยลานหรือใช้กระแสไฟฟ้ามีช่วงการตั้งเวลาสูงสุดได้แตกต่างกันตามวัตถุประสงค์ของการใช้งาน

9. สวิทช์ตัดการทำงานเมื่ออุณหภูมิสูงเกิน (overheating cut-off switch) มีความจำเป็นมาก เนื่องจากเป็นระบบปลอดภัยเพื่อป้องกันการเกิดอัคคีภัยหรือไฟไหม้วัตถุภายในตู้อบเพราะระบบควบคุมอุณหภูมิอาจเสียที่เวลาใดเวลาหนึ่งได้เสมอปกติจะปรับไว้ที่อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิใช้งาน 5-20 °C.

10. ช่องดูดอากาศออกพบในตู้อบลมร้อนชนิดใช้สุญญากาศช่วยทำให้การระเหยของของเหลวเร็วขึ้น

11. ช่องเติมอากาศพบในตู้อบชนิดพิเศษบางแบบอาจเติมแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์หรือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แก๊สไนโตรเจนเข้าในตู้อบตามวัตถุประสงค์ของงานนั้นๆ

12. อุปกรณ์หมุนเวียนอากาศภายใน (stirring device) เป็นพัดลมหมุนเวียนอากาศภายในตู้อบโดยไม่ได้ดูดเอาอากาศภายนอกเข้ามาร่วมหมุนเวียนด้วยพบเฉพาะในตู้อบที่มีขนาดใหญ่มาก เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนของตู้อบ

2.4 การศึกษาจลนพลศาสตร์และหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ [14]

2.4.1 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการอบแห้ง

สุเนตรและฤทธิชัย (2554) ได้อธิบายแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการออกแบบวิธีการอบแห้งให้เหมาะสมกับผลิตภัณฑ์ จำเป็นต้องคำนึงถึงปัจจัยต่าง ๆ ที่มีความเกี่ยวข้อง ทั้งในด้านวิธีการอบแห้ง แหล่งพลังงานที่ใช้ผลกระทบต่อคุณภาพผลิตภัณฑ์ ดังนั้นการทดลองเพื่อหาค่าสภาวะการอบแห้ง แบบจำลองทางคณิตศาสตร์การอบแห่งเป็นเครื่องมือที่สำคัญอย่างยิ่งในการออกแบบระบบการอบแห้งแบบต่างๆ เนื่องจากสามารถบอกถึงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเปลี่ยนแปลงมวลสารและความร้อนที่เกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการอบแห้งตลอดจนการหาสภาวการอบแห้งที่เหมาะสมของกระบวนการอบแห้งแบบต่างๆ ได้ดี ปัจจุบันแบบจำลองทางคณิตศาสตร์การอบแห้งจะถูกนำไปใช้ในการจำลองสภาวะการอบแห้งและการศึกษาผลกระทบของปัจจัยด้านต่าง ๆ ในกระบวนการอบแห้งตลอดจนการทดสอบและเปรียบเทียบเงื่อนไขการอบแห้งแบบต่างๆ เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมของการอบแห้งแทนการทดลองจริง ดังนั้นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์การอบแห้ง ซึ่งมีความสะดวกและประหยัดค่าใช้จ่ายในการทดสอบเงื่อนไขในการอบแห้งจากการสำรวจเอกสารของรายงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง พบว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์การอบแห้งด้วยระบบการอบแห้งด้วยอินฟราเรดที่นิยมใช้ในการศึกษา สำหรับการอบแห้งผลผลิตทางการเกษตร มักจะเลือกใช้แบบจำลองสมการกึ่งทฤษฎี (Semi – Theoretical Model) อาทิเช่นแบบจำลองของ Newton, Page, Henderson and Pabis, และ Logarithmic

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.2 รูปแบบสมการของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์การอบแห้งแบบต่าง ๆ

ชื่อแบบจำลอง	รูปแบบสมการ	เอกสารอ้างอิง
Newton	$MR = exp(-kt)$	Kaleemullah and Kailappan [15](2005), Waewsak, Chindaruksa and Punlek [16](2006), Dadali, Apar and Özbek [17](2007)
Page	$MR = exp(-kt^n)$	McMinn, [18](2006), Kingly and Singh [19](2007), Vega, Fito, Andrés and Lemus [20](2007), Assawarachan et al. [21](2013)
Henderson and Pabis	$MR = a * exp(-kt^n)$	Kingly and Singh [19](2007), Vega, Fito, Andrés and Lemus [20](2007),Assawarachan et al. [21](2013)
Logarithmic	$MR = a * exp(-kt^n) + c$	McMinn, [17](2006), Wu and Hu (2007) [22], Evin (2012), Assawarachan et al. [21](2013)

หมายเหตุ เมื่อ k, n, a, b คือค่าพารามิเตอร์ในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์การอบแห้ง

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

เมื่อ D_{eff} คือ สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผล (เมตร^2/วินาที)

L คือ ความหนาของตัวอย่าง (เมตร)

t คือ เวลาในการอบแห้ง (วินาที)

สามารถคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลจากค่าความชันของกราฟเส้นตรงซึ่งเป็นความสัมพันธ์ระหว่างln (MR) และเวลาในการอบแห้ง (t)

$$Slope = \frac{\pi^2 \cdot D_{eff}}{4L^2}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การวิเคราะห์ความแม่นยำของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยวิธีทางสถิติในการวิเคราะห์ความแม่นยำของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะอาศัยวิธีการทางสถิติ เพื่อวิเคราะห์บอกความแม่นยำของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยค่า Chi-square (χ^2) ค่า R^2และค่า RMSE เป็นค่าที่นิยมใช้เปรียบเทียบความแม่นยำสามารถคำนวณได้ดังสมการต่อไปนี้

1. Chi-square (χ^2)

$$\chi^2 = \frac{\sum_{i=1}^{n}(MR_{exp,i} - MR_{pre,i})^2}{N - z}$$

2. R^2 (Coefficient of Determination)

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n}(MR_{pre,i} - MR_{exp,i})^2}{\sum_{i=1}^{n}(MR_{pred} - MR_{pred,i})^2}$$

3. RMSE (Root Mean Square Error)

$$RMSE = \left[\frac{1}{N}\sum_{i=0}^{n}(MR_{exp,i} - MR_{pre,i})^2\right]^{\frac{1}{2}}$$

โดยที่ $MR_{exp,i}$ = อัตราส่วนความชื้นไม่มีหน่วยจากการทดลอง

$MR_{pre,I}$ = อัตราส่วนความชื้นไม่มีหน่วยจากการทำนาย

N = จำนวนค่าสังเกต

z = ค่าคงที่จากแบบจำลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

อุปกรณ์และวิธีการ

การศึกษานี้เป็นการทดลองการอบแห้งรำข้าวด้วยวิธีการอบแห้งด้วยลมร้อน ซึ่งรำข้าวขาวที่ใช้ในการทดลองจะผ่านกระบวนการอบโดยทำการควบคุมอุณหภูมิการอบแห้งไว้ที่ 60, 90 และ 120 องศาเซลเซียส ตามลำดับ จากนั้นทำการวาดความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นกับเวลาในการอบแห้งที่สภาวะต่างๆ และศึกษาจลนพลศาสตรและการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ จากนั้นนำรำข้าวที่ผ่านการอบแห้งมาวิเคราะห์ค่าความเป็นกรดโดยใช้น้ำมันที่สกัดได้มาทำการไตเตรท และหาปริมาณน้ำมันที่สกัดได้อย่างละเอียดโดยการใช้อุปกรณ์สกัดแบบซ็อกเล็ต (Soxhlet extractor)

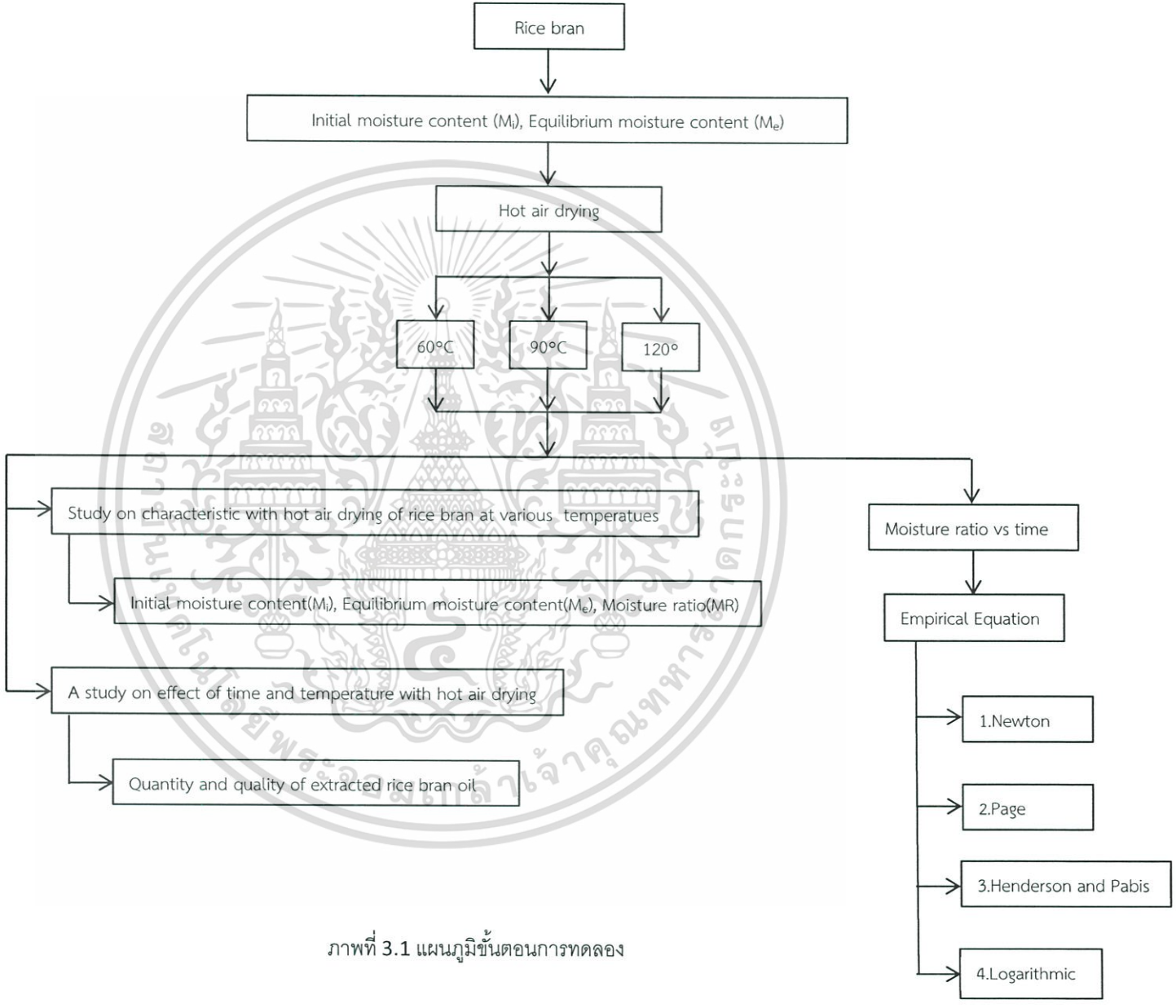
3.1 วิธีการดำเนินงาน

เพื่อให้บรรลุวัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้ จึงได้แบ่งวิธีการดำเนินงานออกเป็น 3 ส่วน คือ วางแผนการทดลอง ศึกษาการทดลอง สรุปผลการทดลอง โดยที่รายละเอียดของแต่ละขั้นตอนแสดงดังต่อไปนี้

3.1.1 การวางแผนการทดลอง

แผนการทดลองได้แสดงในรูปแบบแผนภูมิดังภาพที่ 3.1 ซึ่งจะแสดงให้เห็นว่า การศึกษานี้จะนำรำข้าวมาอบด้วยตู้อบลมร้อน ด้วยอุณหภูมิและเวลาต่างๆ จากนั้นนำไปอธิบายพฤติกรรมการอบแห้งด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ รวมถึงการวิเคราะห์ค่าความเป็นกรด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 3.1 แผนภูมิขั้นตอนการทดลอง

3.1.2 การเตรียมตัวอย่างและการหาอัตราอบแห้ง

เริ่มจากการนำรำข้าวที่ได้จากกระบวนการขัดขาวของการสีข้าว จากนั้นนำใส่ในถาดเป็นชั้นบางและนำไปทดสอบที่อุณหภูมิ 60, 90 และ 120 องศาเซลเซียส โดยการอบแห้งลมร้อนด้วยเครื่องอบลมร้อน เพื่อนำข้อมูลที่ได้ไปวิเคราะห์ หาอัตราส่วนความชื้น(MR) ของรำข้าว โดยนำตัวอย่างออกมาใส่จานแก้วจากนั้นชั่งน้ำหนัก และทำ 3 ซ้ำ จนกระทั่งความชื้นลดลงจนถึงจุดสมดุล อัตราการอบแห้งของรำข้าวแต่ละอุณหภูมิได้จากการคำนวณ

3.1.3 การศึกษาหาความชื้น

การศึกษาหาความชื้นเปนการวิเคราะหคุณสมบัติทางกายภาพของรำข้าวขั้นตอนแรกซึ่งแบงออกเปน 2 การวิเคราะหคือ การวิเคราะหปริมาณความชื้นเริ่มตน (Initial Moisture Content, Mi) และการวิเคราะหปริมาณความชื้นสมดุล (Equilibrium Moisture Content, Me)เพื่อนำขอมูลดังกลาวไปใชในการวิเคราะหสมดุลมวลและสมดุลความรอนในระหวางการอบแหง ซึ่งเปนขอมูลที่สำคัญในการออกแบบและกำหนดคาพารามิเตอรตาง ๆ ในการทดลอง ดังแสดงตอไปนี้

1.) การวิเคราะหปริมาณความชื้นเริ่มตน (Initial Moisture Content, Mi)

การวิเคราะห์ปริมาณความชื้นเริ่มต้นของรำข้าวใช้วิธีการของ AOAC (2005) [28] คือ นำรำข้าวไปอบแห้งด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมงซึ่งขั้นตอนการวิเคราะหนี้สามารถแสดงในรูปของแผนภูมิการทดลองตามภาพที่ 3.2

2.) การวิเคราะหปริมาณความชื้นสมดุล (Equilibrium Moisture Content, Me)

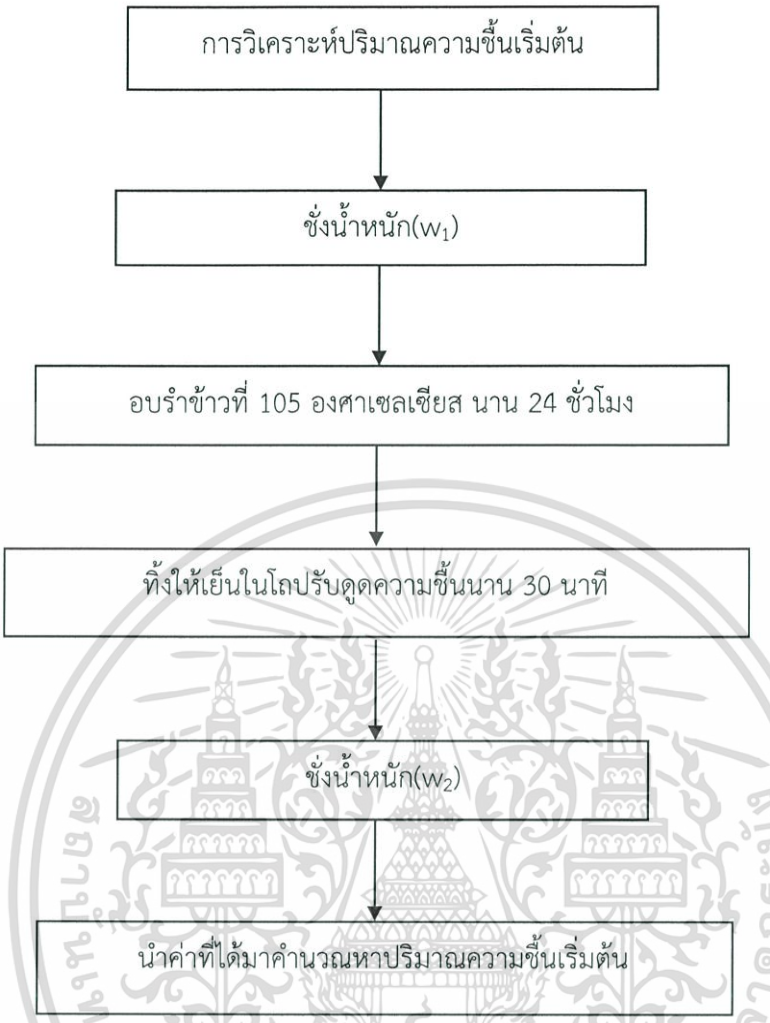
การวิเคราะหความชื้นสมดุลของขมิ้นชันอบแหง สามารถแบงวิธีการเขาสูสมดุลตามการเคลื่อนที่ของอากาศได2 วิธีดังนี้

- วิธีเชิงสถิต (Isopiestic Method) เปนวิธีการวัดความชื้นสมดุลที่วัสดุเขาสูจุดสมดุลกับสภาพแวดลอมโดยปราศจากการกอกวนดานพลศาสตรของอากาศหรือวัสดุ โดยนิยมนำสารเคมีที่มีความสามารถในการดูดซับความชื้นสวนเกินมาใชได้แกสารละลายเกลืออิ่มตัวหรือสารละลายกรด

- วิธีเชิงพลวัต (Dynamic Method) เปนการปลอยใหวัสดุทางการเกษตรสัมผัสกับอากาศแวดลอม โดยทำใหอากาศหรือผลิตภัณฑเคลื่อนไหว วิธีนี้วัสดุจะเขาสูสมดุลกับสิ่งแวดลอมอยางรวดเร็ว จึงเหมาะสมกับวัสดุที่ความชื้นสูง

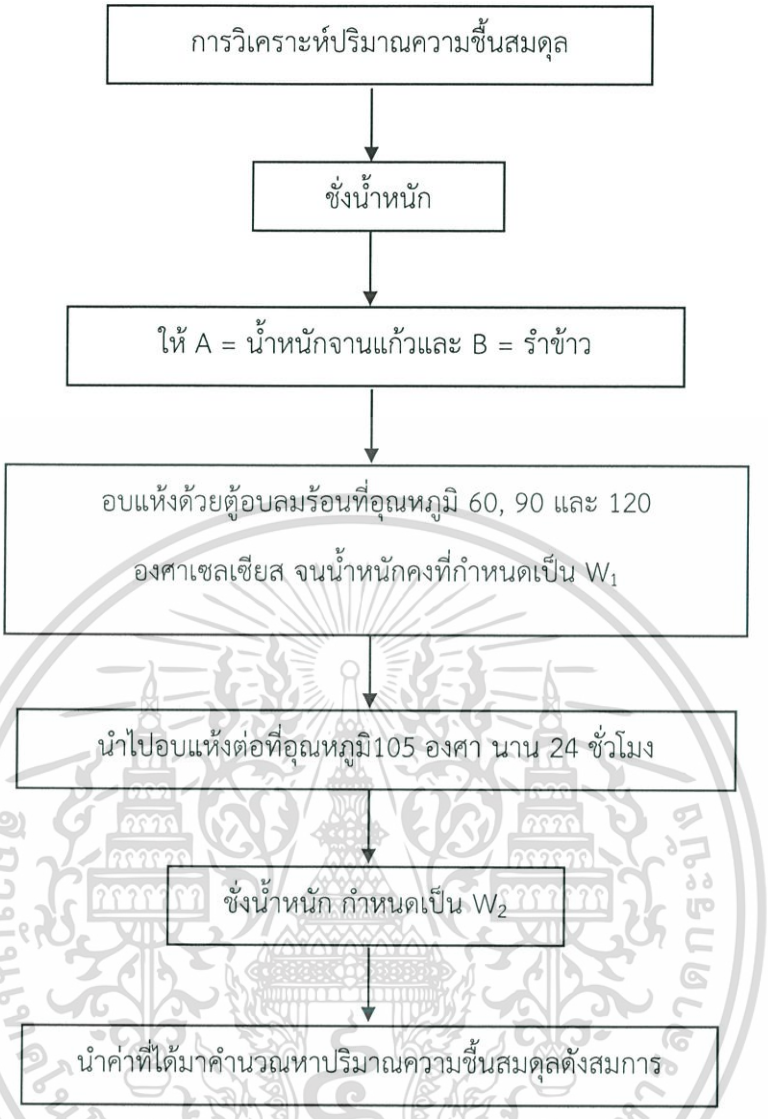
นำรำข้าวไปอบแหงดวยลมรอนที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เปนเวลา 24ชั่วโมง ซึ่งขั้นตอนการวิเคราะหนี้สามารถแสดงในรูปของแผนภูมิการทดลองตามภาพที่ 3.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 3.2 แผนผังแสดงการคำนวณความชื้นเริ่มตน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

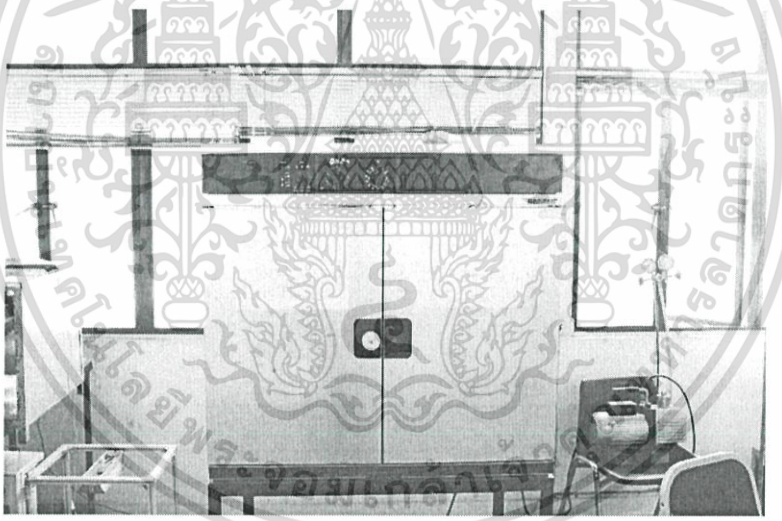


ภาพที่ 3.3 แผนผังแสดงการคำนวณความชื้นสมดุลดวยวิธีเชิงพลวัต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 การศึกษาจลนพลศาสตรและการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

การศึกษาจลนพลศาสตรและการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตรของการอบแหงเปนองคประกอบหนึ่งที่สำคัญตอการทำนาย และการวางแผนการอบรำข้าวแหงดวยลมรอน (ภาพที่3.4) งานวิจัยนี้จึงไดออกแบบการอบแหงรำข้าวที่ระดับอุณหภูมิ 60, 90 และ 120 องศาเซลเซียส สำหรับการอบแหงดวย
ลมรอนชั่งน้ำหนักทุกๆ 16 นาทีขึ้นอยู่กับอุณหภูมิจนกระทั่งความชื้นลดลงจนถึงจุดสมดุลเพื่อนำขอมูลน้ำหนักดังกลาวไปวิเคราะหหาอัตราสวนความชื้น(MR)ของรำข้าว อัตราความชื้นการอบแหงของรำข้าวที่แตละอุณหภูมิที่ไดจากการคำนวณโดยสมการ (Eq 3.1) ลำดับขั้นตอนการศึกษาในหัวขอนี้จึงประกอบไปดวย การศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตรของการอบแหง การหาอัตราส่วนความชื้น และการสรางแบบจำลองทางคณิตศาสตรสำหรับการทำนายกระบวนการอบแหงของรำข้าว โดยมีรายละเอียดดังตอไปนี้



ภาพที่ 3.4 ตู้อบลมร้อน

3.2.1 การศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตรของการอบแหง

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการออกแบบวิธีการอบแห้งให้เหมาะสมกับผลิตภัณฑ์จำเป็นต้องคำนึงถึงปัจจัยต่างๆที่มีความเกี่ยวข้องทั้งในด้านวิธีการอบแห้งแหล่งพลังงานที่ใช้ผลกระทบต่อคุณภาพผลิตภัณฑ์ดังนั้นการทดลองเพื่อหาค่าสภาวะการอบแห้งแบบจำลองทางคณิตศาสตร์การอบแห้งเป็นเครื่องมือที่สำคัญอย่างยิ่งในการออกแบบระบบการอบแห้งแบบต่าง ๆ เนื่องจากสามารถบอกถึงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเปลี่ยนแปลงมวลสารและความร้อนที่เกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการอบแห้งตลอดจนการหาสภาวะการณ์อบแห้งที่เหมาะสมของกระบวนการอบแห้งแบบต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ได้ดีปัจจุบันแบบจำลองทางคณิตศาสตร์การอบแห้งจะถูกนำไปใช้ในการจำลองสภาวะการอบแห้งและการศึกษาผลกระทบของปัจจัยด้านต่างๆในกระบวนการอบแห้งตลอดจนการทดสอบและเปรียบเทียบเงื่อนไขการอบแห้งแบบต่างๆเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมของการอบแห้งแทนการทดลองจริงดังนั้นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์การอบแห้งซึ่งมีความสะดวกและประหยัดค่าใช้จ่ายในการทดสอบเงื่อนไขในการอบแห้ง

จากการศึกษาเอกสารของรายงานวิจัยที่เกี่ยวข้องพบว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์การอบแห้งที่นิยมใช้ในการศึกษา สำหรับการอบแห้งผลผลิตทางการเกษตร มักจะเลือกใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สมการกึ่งทฤษฎี (Semi – Theoretical Model) อาทิเช่นแบบจำลองของ Newton, Henderson and Pabis, Page, Logarithmic และแบบจำลองอื่นๆ. ซึ่งรูปแบบความสัมพันธ์ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ทำการคัดเลือกแสดงในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 รูปแบบสมการของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์การอบแห้ง แบบต่าง ๆ

ชื่อแบบจำลอง	รูปแบบสมการ	เอกสารอ้างอิง
Newton	$MR = exp(-kt)$	Kaleemullah and Kailappan [20](2005),Waewsak,Chindaruksa and Punlek[21] (2006), Dadali, Apar and Özbek[10](2007)
Page	$MR = exp(-kt^n)$	McMinn,[23](2006), Kingly and Singh[24](2007), Vega, Fito, Andrés and Lemus [25](2007), Assawarachan et al.[26](2013)
Henderson and Pabis	$MR = a * exp(-kt^n)$	Kingly and Singh[24](2007), Vega, Fito, Andrés and Lemus[25](2007),Assawarachan et al.[26](2013)
Logarithmic	$MR = a * exp(-kt^n) + c$	McMinn,[23](2006), Wu and Hu [27](2007), Assawarachan et al. [26](2013)

เมื่อ k, n, a, b คือค่าพารามิเตอร์ในแบบจาลองทางคณิตศาสตร์การอบแห้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.2 การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการทำนายกระบวนการอบแห้งของรำข้าว

สมการถดถอยแบบไม่ใช่เชิงเส้น(Non-linearRegression)ใช้ในการประเมินข้อมูลและสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของรำข้าวโดยใช้วิธีการอบแห้งด้วยลมร้อน อัตราส่วนความชื้น(*MR*) ของรำข้าวในระหว่างกระบวนการอบแห้งด้วยลมร้อน สามารถหาได้จากสมการดังต่อไปนี้

อัตราส่วนความชื้น

$$MR = \frac{M - M_e}{M_i - M_e} \qquad \text{(Eq 3.1)}$$

เมื่อ MR คือ อัตราส่วนความชื้น (ไร้หน่วย)
M_e คือ ความชื้นสมดุล เปอร์เซ็นต์ (ฐานเปียก)
M_i คือ ความชื้นเริ่มต้น เปอร์เซ็นต์ (ฐานเปียก)
M_t คือ ความชื้น ณ เวลาใดๆ เปอร์เซ็นต์ (ฐานเปียก)

การทดลองเพื่อหาแบบจำลองที่เหมาะสมที่สุดสำหรับอธิบายพฤติกรรมของการอบแห้งรำข้าว โดยจะใช้แบบจำลองของ Newton, Page, Henderson and Pabis และ Logarithmic ใช้ในการพิจารณา รูปแบบสมการของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ทั้ง 4 แบบจำลอง แสดงในตารางที่ 3.1

ในการพิจารณาหาแบบจำลองที่ดีสุดในการอธิบายพฤติกรรมการอบแห้งของขมิ้นชันจะใช้การเปรียบเทียบทางสถิติ ด้วยโปรแกรม SPSS และใช้ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2), Chi-Square (χ^2) และ Root mean square error (*RMSE*) ช่วยในการเปรียบเทียบเทียบความแม่นยำของแบบจำลอง โดยมีสมการดังต่อไปนี้

- สัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2)

เป็นค่าที่บ่งบอกถึงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต้นและตัวแปรตามว่ามีความสัมพันธ์กันมากน้อยเพียงใด ซึ่งหากมีค่ามากจะแสดงว่าตัวแปรต้นสามารถอธิบายตัวแปรตามได้ดี

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{N}(MR_{pre,i} - MR_{exp,i})^2}{\sum_{i=1}^{N}(\overline{MR}_{pred} - MR_{pred,i})^2} \qquad \text{(Eq 3.2)}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- Chi-Square X^2

เป็นค่าสถิติที่ใช้ทดสอบสมมติฐานทางสถิติว่าตัวแปรต้นและตัวแปรตามมีความสอดคล้องกัน ซึ่งหากมีค่าน้อยหรือเข้าใกล้ศูนย์แสดงว่าตัวแปรต้นและตัวแปรตามมีความสอดคล้องกัน

$$\chi^2 = \frac{\sum_{i=1}^{N}(MR_{exp,i} - MR_{pre,i})^2}{N-z} \quad \text{(Eq 3.3)}$$

- Root mean square error (*RMSE*)

เป็นค่าที่วัดความแตกต่างระหว่างข้อมูลที่ได้จากการทดลองกับค่าที่ได้จากการทำนาย ซึ่งหากมีค่าน้อยจะแสดงว่าแบบจำลองทำนายค่าได้ใกล้เคียงกับข้อมูลการทดลอง

$$RMSE = \left[\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}(MR_{exp,i} - MR_{pre,i})^2\right]^{1/2} \quad \text{(Eq 3.4)}$$

เมื่อ $MR_{exp,i}$ คือ ค่าจากการทดลอง
N คือ จำนวนค่าสังเกต
$MR_{pre,i}$ คือ ค่าที่ได้จากการทำนาย
Z คือ ค่าคงที่จากแบบจำลอง

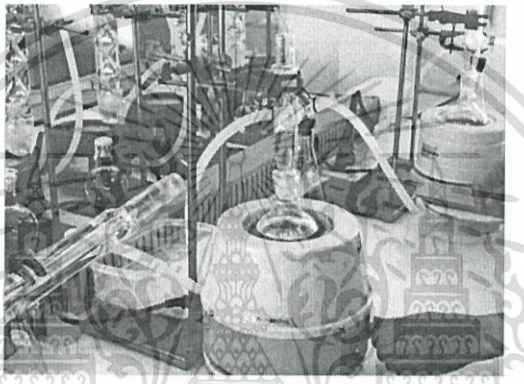
3.3 การวิเคราะห์ค่ากรด

ตามมาตรฐานของอุตสาหกรรมการผลิตน้ำมันรำข้าว ค่าความเป็นกรดของน้ำมันจะต้องมีค่าน้อยกว่า 15 สำหรับคุณภาพของน้ำมันที่ใช้ทำอาหาร ซึ่งการทดลองนี้จะทำการอบรำข้าวที่อุณหภูมิและเวลาต่างๆ เพื่อดูแนวโน้มของค่ากรดหลังจากการให้ความร้อน โดยในการทดลองนี้เป็นการวิเคราะห์ค่ากรดของน้ำมันรำข้าวโดยแบ่งเป็น 3 ส่วน คือการเตรียมน้ำมันรำข้าวสำหรับวิเคราะห์ค่ากรด, การเตรียมสารเคมีเพื่อทำการไตเตรท, การวิเคราะห์ค่ากรดของน้ำมันที่สกัดได้ และการคำนวณหาค่ากรดของน้ำมันที่สกัดได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.1 การเตรียมน้ำมันรำข้าวสำหรับวิเคราะห์ค่ากรด

อบแห้งรำข้าวที่เวลาและอุณหภูมิต่างๆ จากนั้นชั่งน้ำหนักรำข้าวที่ต้องการวิเคราะห์ค่ากรด 30 กรัม ใส่ลงในบีกเกอร์ขนาด 250 มิลลิลิตร ตวงเฮกเซน 130 มิลลิลิตร ใส่ลงในบีกเกอร์ที่มีรำข้าว คนให้เข้ากันแล้วทิ้งไว้ให้น้ำมันแยกชั้น จะสังเกตเห็นว่ามีของเหลวสีเหลืองแยกชั้นออกจากเฮกเซนและรำข้าว จากนั้นกรองของเหลวทั้งหมดออกจากรำข้าวตัวอย่างโดยเทลงในขวดวัดปริมาตร (boiling flask) ที่มี glass ball และทำการชั่งน้ำหนักแล้ว จากนั้นนำขวดวัดปริมาตรไปเข้าชุดกลั่นเพื่อแยกเฮกเซนออกจากน้ำมัน จากนั้นนำน้ำมันตัวอย่างที่ได้มาไล่ความร้อนและเฮกเซนออกโดยใช้ลมเป่า ตั้งให้เย็นจากนั้นนำไปชั่งน้ำหนักและบันทึกน้ำหนักของตัวอย่างน้ำมัน

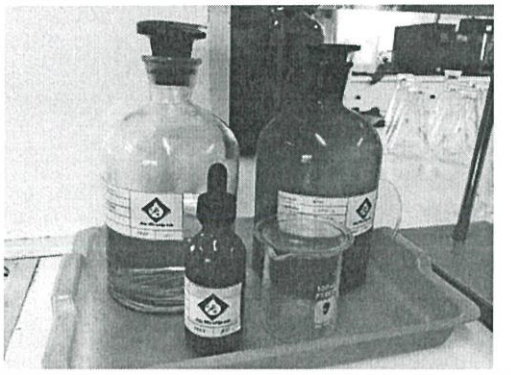


ภาพที่ 3.5 ชุดอุปกรณ์สำหรับกลั่นแยกเฮกเซนออกจากน้ำมัน

3.3.2 การเตรียมสารเคมีเพื่อทำการไตเตรท

สารเคมีที่ใช้ในการวิเคราะห์ค่ากรดประกอบไปด้วย อินดิเคเตอร์ (indicator) ได้แก่ KOH 0.1 N และ สารละลายบัฟเฟอร์ (buffer) ที่มีสภาพเป็นกลาง โดยวิธีการวิธีการเตรียมสารละลายบัฟเฟอร์เริ่มจากหยด Phenolphthalein 1% จำนวน 2-3 หยด ลงในบัฟเฟอร์ จากนั้นหยดสารละลาย KOH 0.1 N ทีละหยดแล้วใช้แท่งแก้วคนจนสารละลายเปลี่ยนเป็นสีชมพู จากนั้นตวงสารละลายสีชมพูที่ได้ 50 มิลลิลิตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 3.6 สารเคมีที่ใช้ในการหาค่ากรด

3.3.3 การวิเคราะห์ค่ากรดของน้ำมันที่สกัดได้

การวิเคราะห์ค่ากรดของน้ำมันที่สกัดได้เริ่มจากหยด Phenolpthalein 2-3 หยดลงในน้ำมันตัวอย่างในขวดวัดปริมาตร จากนั้นนำสารละลายบัฟเฟอร์ 50 มิลลิลิตร เทลงในขวดวัดปริมาตร แกว่งเบาๆจนน้ำมันละลาย จากนั้นทำการไตเตรทด้วย KOH จนถึงจุดยุติหรือได้สีส้มอมชมพู

ภาพที่ 3.7 สารละลายที่ถึงจุดยุติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.4 การคำนวณหาค่ากรดของน้ำมันที่สกัดได้

การคำนวณหาค่ากรดของน้ำมันใช้สูตรการคำนวณดังสมการ

$$AV(mg\,KOH/g) = \frac{factor\,AV \times ml\,KOH}{m} \qquad \text{(Eq 3.5)}$$

เมื่อ AV = ค่าความเป็นกรด

$factor\,AV$ =ความเข้มข้น $KOH \times 56.11$

m = น้ำหนักของน้ำมันตัวอย่าง

3.4 การหาปริมาณน้ำมันที่สกัดได้

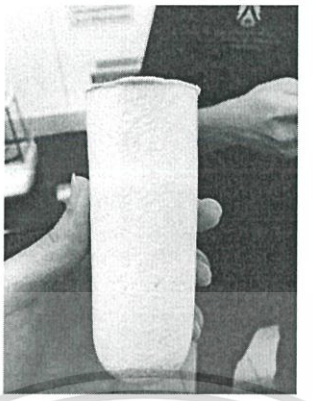
การหาปริมาณน้ำมันเริ่มต้นจากการเตรียมรำข้าว 10 กรัม จากนั้นอบด้วยตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิและเวลาต่างกันจากนั้นจึงนำเข้าสู่การทดลองหาปริมาณน้ำมัน ในการทดลองใช้เฮกเซนเป็นตัวทำละลายเนื่องจากเป็นวิธีที่เป็นมาตรฐาน และใช้ในระบบอุตสาหกรรม โดยเฮกเซนใช้ร่วมกับชุดอุปกรณ์ซ็อกเล็ท(soxlhet extractor) เพื่อสกัดน้ำมัน โดยใช้เวลาสกัด 4 ชั่วโมง จากนั้นจะทำการแยกเฮกเซนออกจากน้ำมัน จากนั้นนำไปเข้าตู้อบเป็นเวลา 50 นาทีเพื่อระเหยเฮกเซนออกจนหมด จากนั้นจะทำการชั่งน้ำหนักเพื่อหาปริมาณน้ำมันที่สกัดได้

1.) อบรำข้าวตัวอย่างละ 10 กรัม ที่อุณหภูมิและเวลาต่างๆ

ภาพที่ 3.8 ตัวอย่างรำข้าว 10 กรัม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.) พับกระดาษกรองให้เป็นลักษณะกรวยแล้วพับด้านก้นเล็กน้อย จากนั้นใส่รำข้าวตัวอย่างลงในกรวย จากนั้นพับปิดให้สนิท ใส่ลงใน thimble และปิดปาก thimble ด้วยสำลี



ภาพที่ 3.9 thimble

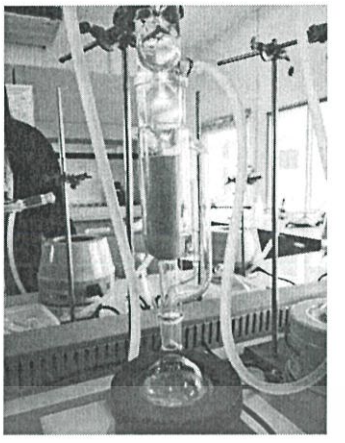
3.) ชั่งน้ำหนักขวดวัดปริมาตร (boiling flask) ขนาด 250 มิลลิลิตร ที่บรรจุ glass ball 2 เม็ด และบันทึกน้ำหนัก

ภาพที่ 3.10 ขวดวัดปริมาตร (boiling flask) และ glass ball

4.) ตวงเฮกเซน 250 มิลลิลิตร ใส่ในขวดวัดปริมาตรขนาด 250 มิลลิลิตร ที่ชั่งน้ำหนักแล้ว

5.) นำ thimble ใส่ในซ็อกเล็ท จากนั้นเทเฮกเซนประมาณ 1/3 ของซ็อกเล็ท ต่อซ็อกเล็ทเข้ากับขวดวัดปริมาตร อุปกรณ์ให้ความร้อน และอุปกรณ์ควบแน่น จากนั้นให้ความร้อนประมาณ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 3.11 ชุดอุปกรณ์สำหรับการสกัดน้ำมัน

6.) เมื่อครบ 4 ชั่วโมง นำขวดวัดปริมาตรไปเข้าชุดกลั่น เพื่อแยกเฮกเซนออกจากน้ำมัน ซึ่งเวลาที่ใช้ขึ้นอยู่กับปริมาณน้ำมันที่สกัดได้

7.) นำขวดวัดปริมาตรที่มีตัวอย่างน้ำมันที่สกัดได้ไปเข้าตู้อบ ที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 50 นาที เพื่อไล่ความชื้นและเฮกเซนที่เหลือ

8.) เมื่อครบ 50 นาที นำขวดวัดปริมาตรใส่ในโถดูดความชื้น 15 นาที จากนั้นนำมาชั่งน้ำหนักและบันทึกน้ำหนัก

ภาพที่ 3.12 ปริมาณน้ำมันที่สกัดได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

9.) คำนวณหาปริมาณน้ำมันที่สกัดได้จากสูตร

$$\%yield = \frac{m_2 - m_1}{m_b} \times 100 \qquad \text{(Eq 3.6)}$$

เมื่อ $\%yield$ = ปริมาณน้ำมันที่สกัดได้

m_1 = น้ำหนักขวดวัดปริมาตรหลังอบไล่ความชื้นและเฮกเซน

m_2 = น้ำหนักขวดวัดปริมาตรเปล่า

m_b = น้ำหนักรำข้าวตัวอย่าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการทดลอง

จากการศึกษาทดลองครั้งนี้มีจุดมุ่งหมายเพื่อศึกษากระบวนการอบแห้งรำข้าว ซึ่งสามารถนำไปสกัดเป็นน้ำมันรำข้าว และยังนำไปทำเป็นอาหารเสริมที่มีประโยชน์ต่อร่างกาย ดังนั้นการศึกษาคุณลักษณะการอบแห้ง เพื่อหาวิธีการอบแหงที่เหมาะสมตลอดจนสภาวะการอบแหงที่มีประสิทธิภาพ จึงเปนที่มาของงานวิจัยนี้ โดยศึกษาคุณลักษณะการอบแห้งเบื้องตนของรำข้าว เช่น คาความชื้นเริ่มต้น คาความชื้นสมดุลที่สภาวะการอบแหงแบบตางๆ จากนั้นนำคาพารามิเตอรของคุณลักษณะการอบแหงรำข้าวหาอัตราการส่วนความชื้นโดยขอมูลที่ไดจากการศึกษาในสวนที่สองนี้จะถูกนำไปศึกษาการจลน์ศาสตร์และสร้างสมการ การเปลี่ยนแปลงคุณภาพของน้ำมันรำข้าวคือ ค่าความเป็นกรด และหาปริมาณน้ำมันที่สกัดได้ที่สภาวะต่างๆ รวมถึงพลังงานที่ใช้เพื่อนำมาวิเคราะห์หาอุณหภูมิและเวลาที่เหมาะสมในการอบแห้งรำข้าว โดยมีรายละเอียดดังนี้

4.1 ผลการศึกษาคุณลักษณะการอบแหงทางกายภาพเบื้องตนของรำข้าว

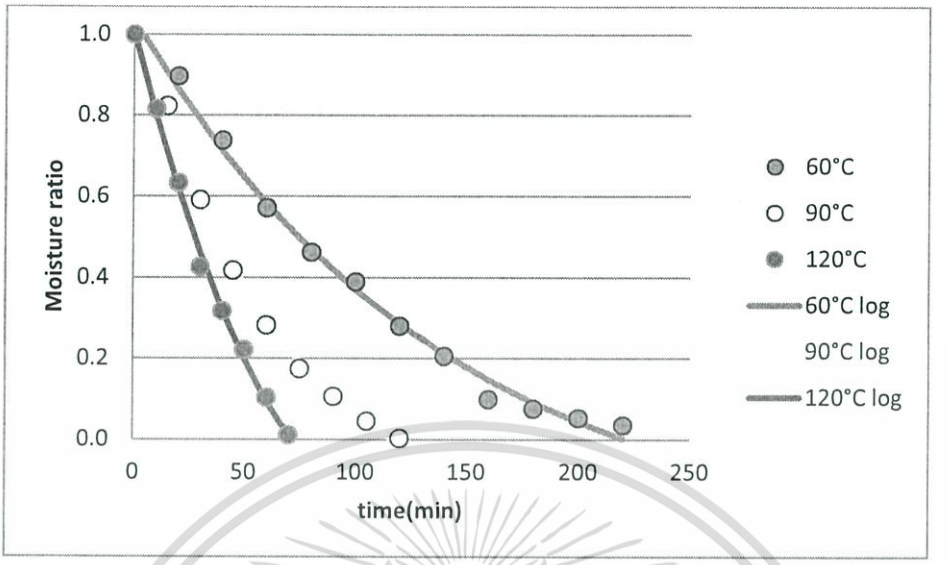
การศึกษาคุณลักษณะการอบแหงทางกายภาพเบื้องตนของรำข้าวไดมีการแบงเปน 2 ขั้นตอน คือ การศึกษาหาคาความชื้นเริ่มตนและคาความชื้นสมดุล และการศึกษาการเปลี่ยนแปลงอัตราสวนความชื้นในระหวางการอบแหงด้วยตู้อบลมร้อน โดยมีรายละเอียดดังตอไปนี้

4.1.1 คาความชื้นเริ่มตน และคาความชื้นสมดุลของรำข้าวขาวที่สภาวะการอบแห้งด้วยตู้อบลมร้อน

การวิเคราะหคุณลักษณะการอบแหงทางกายภาพเบื้องตนของรำข้าวขาว จะทำการศึกษาหาคาความชื้น โดยการนำรำข้าวขาวมาอบแหงดวยลมรอนที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เปนเวลา 24 ชั่วโมง โดยวิธีการดังกลาวเปนวิธีปรับสภาพสมดุลความชื้นของวัสดุทางการเกษตร ทำการทดลองหาคาความชื้นเริ่มตนจำนวน 15 ตัวอยาง จากผลการทดลองพบวาความชื้นเริ่มตนของรำข้าวเฉลี่ยมีคาเทากับ 9.80±0.14เปอรเซ็นตความชื้น (ฐานแห้ง) และความชื้นสมดุลของรำข้าวที่อบแหงดวยลมรอนที่อุณหภูมิ 60, 90 และ 120 องศาเซลเซียส มีคาความชื้นสมดุลเทากับ 4.38±0.1, 1.66±0.03 และ 0.72±0.09%db เปอรเซ็นตความชื้น (ฐานแห้ง) ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การศึกษาการเปลี่ยนแปลงอัตราสวนความชื้นในระหวางการอบแหงด้วยตู้อบลมร้อนของรำข้าว



ภาพที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับเวลาในการอบแห้งและค่าคงที่ของแบบจำลองการอบแห้ง *Logarithmic* ของรำข้าว

จากภาพที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับเวลาในการอบแห้งรำข้าวด้วยตู้อบลมร้อนซึ่งมีลักษณะของความสัมพันธ์เป็นแบบเอ็กโพเนนเชียลและจากการเปรียบเทียบการอบแหงดวยสภาวะตางๆ การอบแหงที่ระดับอุณหภูมิ 60, 90 และ 120 องศาเซลเซียส ทุกสภาวะการทดลอง พบวาปัจจัยของอุณหภูมิอบแหงมีผลตออัตราการอบแหงและการอบแหงที่อุณหภูมิอบแหงสูงจะมีอัตราการอบแห้งสูงกวาการอบแหงที่อุณหภูมิอบแหงต่ำ ดังนั้นระยะเวลาในการอบแหงที่อุณหภูมิอบแหงสูงจะใชระยะเวลาในการอบแหงสั้นกวาการอบแหงในชวงอุณหภูมิต่ำโดยสังเกตจากกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราสวนความชื้นกับเวลาในการอบแหงของรำข้าวขาว ที่ระดับอุณหภูมิ 60, 90 และ 120 องศาเซลเซียส ชวงแรกจะมีความชันสูงเมื่อระยะเวลาในการอบแหงเพิ่มขึ้นกราฟจะมีความชันลดลงตามลำดับ จนถึงความชื้นสุดทายที่ตองการอบแหงและในขณะเดียวกันที่ระดับอุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียสพบวากราฟมีคาความชันสูงสุดในการอบแหง และที่ระดับอุณหภูมิ 60 และ 90 องศาเซลเซียสพบวากราฟมีคาความชันลดลงตามระดับอุณหภูมิที่ต่ำลงมา ตามลำดับซึ่ง หมายความว่า ที่อุณหภูมิสูงจะมีประสิทธิภาพในการอบแห้งสูงกว่าที่อุณหภูมิในการอบแห้งต่ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 ผลการศึกษาหาแบบจำลองทางคณิตศาสตรที่เหมาะสมในการทำนายคาความชื้นที่เปลี่ยนแปลงในระหวางการอบแหง

แบบจำลองทางคณิตศาสตรในการอบแหงในรูปแบบของสมการเอมพิริคัล เชน แบบจำลองของ Newton, Page , Logarithmic และ Henderson and Pabis ในการวิเคราะหหาคาพารามิเตอรตางๆ ของแบบจำลองทางคณิตศาสตรในการอบแหงของรำข้าวด้วยตู้อบลมร้อนใชเทคนิคการวิเคราะหแบบสมการถดถอยที่ไมเชิงเสน (Nonlinear regression) โดยใชคาสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2)และค่า *RMSE* (Root Mean Square Error) เปนพารามิเตอรทางสถิติที่ชวยในการวิเคราะหการเปรียบเทียบเพื่อหาคาความแมนยำในการทำนายคาความชื้นที่เปลี่ยนแปลงไปในระหวางการอบแหงแบบจำลองที่มีความแมนยำและเหมาะสมในการทำนาย จะใหคา (R^2) สูง แสดงถึงคุณภาพของรูปแบบสมการที่มีความเหมาะสมในการทำนายโดย และค่า *RMSE* (Root Mean Square Error) เป็นพารามิเตอร์ทางสถิติที่ใช้บ่งบอกความผิดพลาดในการทำนายค่าของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ซึ่งควรจะมีค่าต่ำ จะแสดงค่าพารามิเตอร์ และการวิเคราะหทางสถิติของแบบจำลองการอบแหงดวยลมรอนของรำข้าว ดังตารางที่ 4.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 คาพารามิเตอร์และการวิเคราะหทางสถิติของแบบจำลองการอบแหงดวยลมรอนของรำข้าว

แบบจำลองการอบแห้ง	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	ค่าคงที่แบบจำลองการอบแห้ง			พารามิเตอร์วิเคราะห์ทางสถิติ	
					R^2	RMSE
Newton	60°C	k=0.0106			0.9893	0.0581
	90°C	k=0.0211			0.9903	0.0539
	120°C	k=0.0299			0.9869	0.0659
Page	60°C	k=0.0017	n=1.3909		0.9985	0.0199
	90°C	k=0.0046	n=1.3795		0.9993	0.0130
	120°C	k=0.0067	n=1.4159		0.9964	0.0332
Henderson and Pabis	60°C	k=0.0115	a=1.0786		0.9906	0.0499
	90°C	k=0.0223	a=1.0612		0.9910	0.0482
	120°C	k=0.0316	a=1.0582		0.9876	0.0612
Logarithmic	60°C	k=0.0071	a=1.3086	c=-0.2734	0.9976	0.0250
	90°C	k=0.0144	a=1.2619	c=-0.2362	0.9986	0.0190
	120°C	k=0.0133	a=1.6635	c=-0.6563	0.9990	0.0170

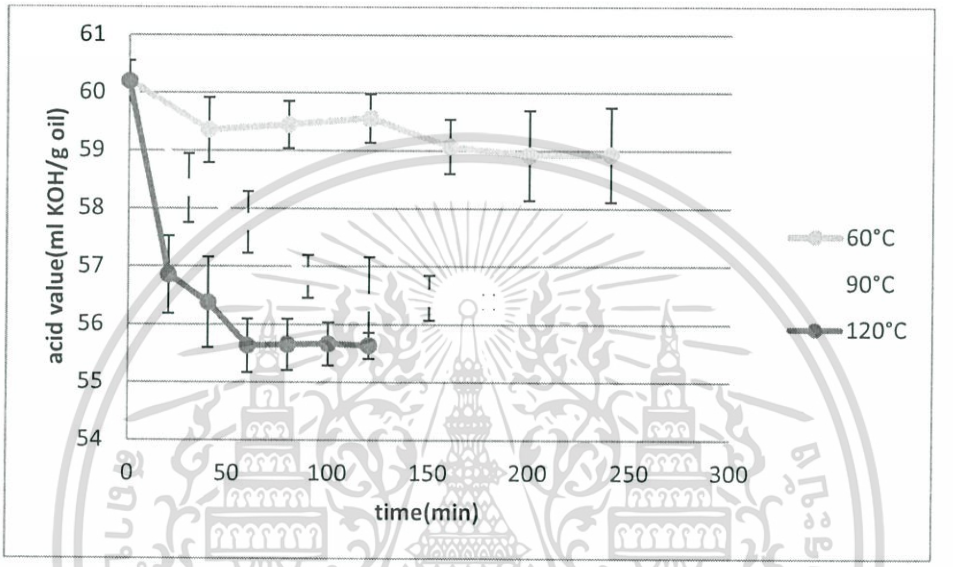
หมายเหตุ เมื่อ k คือ อัตราการอบแหง, n คือ คาดัชนีการอบแหง, a และ c คือ คาคงที่การอบแหง

ดังนั้น จากตาราง 4.1 จะแสดงให้เห็นว่าในการอบแหงรำข้าวด้วยลมรอน แบบจำลองของ Logarithmic เปนแบบจำลองทางคณิตศาสตรที่มีประสิทธิภาพสูงสำหรับใชในการทำนายอัตราการเปลี่ยนแปลงความชื้นของรำข้าวในระหวางการอบแหง เนื่องจากมีคาสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) สูงสุดจึงมีค่าความแมนยำในการทำนายสูง และมีคาความผิดพลาด *RMSE* (Root Mean Square Error) ต่ำกว่าแบบจำลองแบบต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 ผลการศึกษาค่ากรดของรำข้าว

จากผลการศึกษาค่ากรดของรำข้าวขาวที่ผ่านการอบแห้งด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิ 60, 90 และ 120 องศาเซลเซียสโดยใช้สารละลาย เฮกเซนเป็นตัวทำละลายหลังจากนั้นเข้าสู่กระบวนการกรองและกลั่นเพื่อแยกเฮกเซนออกจากน้ำมัน การหาค่ากรดนั้นจะใช้วิธีการไตเตรทโดยใช้ KOH เป็นอินดิเคเตอร์และทำการไตเตรทจนถึงจุดยุติจากนั้นนำไปหาค่ากรดโดยใช้สมการ 3.5



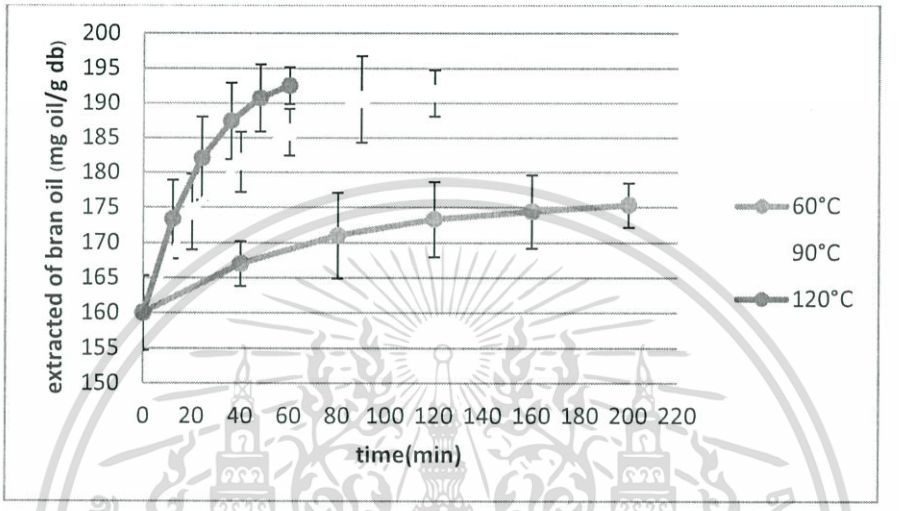
ภาพที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากรดกับเวลาที่อุณหภูมิ 60, 90 และ 120 องศาเซลเซียส ของรำข้าว

เมื่อนำค่ากรดของรำข้าวขาวที่เริ่มคงที่ที่อุณหภูมิ 60, 90, 120 องศาเซลเซียส และไม่ผ่านการอบมีค่าเฉลี่ยของค่ากรดเท่ากับ 59.36±0.78, 56.83±0.37, 55.63±0.46 และ 60.19±0.35 ml KoH/g oil ตามลำดับ โดยผลทางสถิติจากการวิเคราะห์ด้วยวิธี One-way ANOVA ดังที่แสดงในภาคผนวกได้ 60.19±0.35a 59.36±0.78b 56.83±0.37c 55.63±0.46d สรุปได้ว่า ค่าเฉลี่ยของค่ากรดของการอบทุกอุณหภูมิอุณหภูมิ มีความแตกต่างทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95 %

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4 ผลการศึกษาปริมาณน้ำมันรำข้าวที่สกัดได้

จากผลการศึกษาปริมาณน้ำมันของรำข้าวขาวที่ผ่านการอบแห้งด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิ 60, 90 และ 120 องศาเซลเซียสโดยใช้สารละลาย เฮกเซนเป็นตัวทำละลายร่วมกับชุดอุปกรณ์ซ็อกเล็ท (Soxlhet Extractor) และนำมากลั่นเพื่อแยกเฮกเซนออกจากน้ำมัน



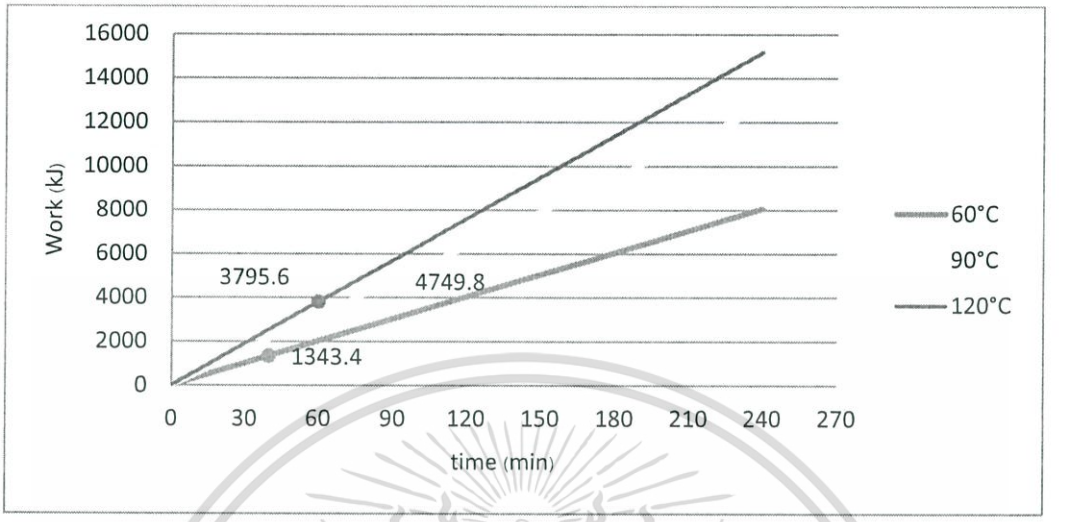
ภาพที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำมันกับเวลาที่อุณหภูมิ 60, 90 และ 120 องศาเซลเซียส ของรำข้าว

เมื่อนำปริมาณน้ำมันของรำข้าวขาวที่ค่ากรดเริ่มคงที่พบว่าที่อุณหภูมิ 60, 90, 120 องศาเซลเซียสและไม่ผ่านการอบมีค่าเฉลี่ยของปริมาณน้ำมันเท่ากับ 167.00±56, 185.80±3.36, 187.40±5.33 และ 160.00±5.29 mg oil/g db ตามลำดับ โดยผลทางสถิติจากการวิเคราะห์ด้วยวิธี One-way ANOVA ดังที่แสดงในภาคผนวกได้ 187.40±5.33a 185.80±3.36a 167.00±56b 160.00±5.29b สรุปได้ว่า ค่าเฉลี่ยของปริมาณน้ำมันที่อุณหภูมิ 90 และ 120 ไม่มีความแตกต่างทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95 %

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.5 พลังงานที่ใช้ในการอบแห้งด้วยลมร้อน

4.5.1พลังงานที่ใช้ในการอบแห้งด้วยลมร้อนเพื่อหาค่ากรด

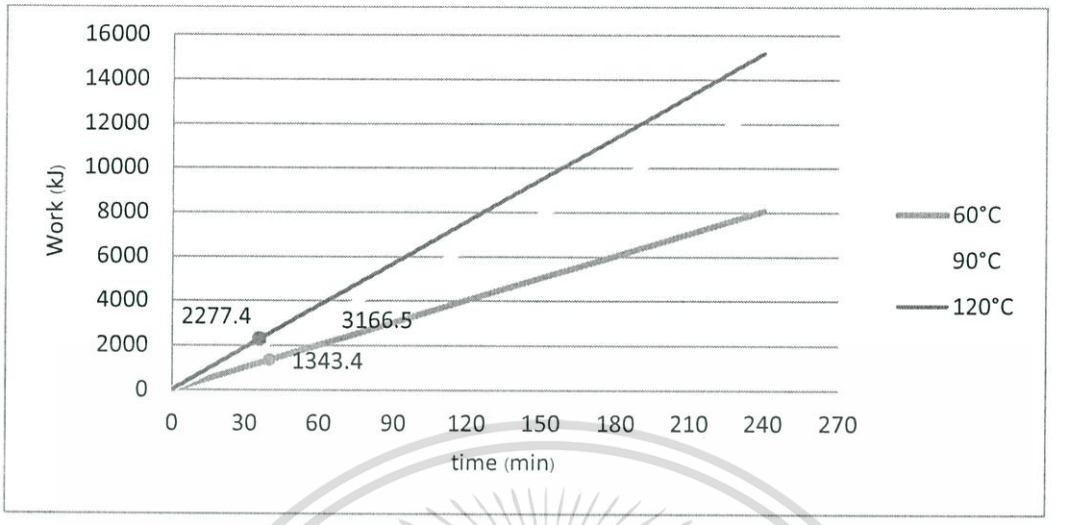


ภาพที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานกับเวลาที่ใช้ในการอบแห้งที่อุณหภูมิต่างๆเพื่อหาค่ากรด

จากภาพที่ 4.4 พบว่าพลังงานที่ใช้สำหรับการหาค่ากรดมีค่าเท่ากับ 1343.4, 4749.8 และ 3795.6 สำหรับอุณหภูมิ 60, 90 และ 120 องศาเซลเซียส โดยที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียสใช้พลังงานและเวลาในการอบแห้งมากที่สุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.5.2 พลังงานที่ใช้ในการอบแห้งด้วยลมร้อนเพื่อหาปริมาณน้ำมันที่สกัดได้



ภาพที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานกับเวลาที่ใช้ในการอบแห้งที่อุณหภูมิต่างๆเพื่อหาปริมาณที่สกัดได้

จากภาพที่ 4.5 พบว่าพลังงานที่ใช้สำหรับการหาค่ากรดมีค่าเท่ากับ 1343.4, 3166.5 และ 3795.6 สำหรับอุณหภูมิ 60, 90 และ 120 องศาเซลเซียส โดยที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียสใช้พลังงานและเวลาในการอบแห้งมากที่สุด ในขณะที่อุณหภูมิ 60 และ 120 องศาเซลเซียสใช้เวลาใกล้เคียงกันแต่ 120 องศาเซลเซียสใช้พลังงานในการอบแห้งมากกว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

ผลการศึกษาอิทธิพลของวิธีการอบแห้ง และสภาวะการอบแห้งแบบต่างๆ ต่อการเปลี่ยนแปลงคุณลักษณะทางกายภาพของรำข้าวด้วยวิธีการอบแห้งด้วยลมร้อน ที่อุณหภูมิ 60, 90, และ 120 องศาเซลเซียส โดยผลการทดลองทั้งหมดแบ่งออกเป็น 4 ส่วนด้วยกันคือ ผลการศึกษาคุณลักษณะทางกายภาพเบื้องต้นของรำข้าว ผลการศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เหมาะสมในการทำนายค่าความชื้นที่เปลี่ยนแปลงในระหว่างการอบแห้ง ผลการเปลี่ยนแปลงค่ากรดของรำข้าวที่สภาวะต่างๆ ผลการศึกษาปริมาณน้ำมันที่สกัดได้

5.1 สรุปผลการทดลอง

คุณลักษณะการอบแห้งเบื้องต้นของรำข้าวนึ่งมีความชื้นเริ่มต้นเฉลี่ยเปอรเซ็นตความชื้น (ฐานแห้ง) และความชื้นสมดุลของรำข้าวนึ่งที่อบแหงดวยลมรอนที่อุณหภูมิ 60, 90 และ 120 องศาเซลเซียส มีคาความชื้นสมดุลเทากับ 4.38±0.1, 1.66±0.03 และ 0.72±0.09%db เปอรเซ็นตความชื้น (ฐานแห้ง) สำหรับผลกระทบของวิธีการอบแห้งและสภาวะการอบแห้งต่อการเปลี่ยนแปลงความชื้นของรำข้าวของการอบแห้งด้วยลมร้อน พบว่าการอบแห้งด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส ใช้เวลาในการอบแห้งรำข้าวเร็วกว่าที่อุณหภูมิ 60 และ 90

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สมการกึ่งทฤษฎี ที่สามารถอธิบายถึงพฤติกรรมการอบแห้งขมิ้นชันแผ่นที่เหมาะสมที่สุดคือ แบบจำลองของ *Logarithmic* มีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจที่ระดับ 0.99 ซึ่งเป็นช่วงที่ดีที่สุดจากแบบจำลองทั้งหมด

ค่ากรดของรำข้าวเริ่มคงที่โดยไม่มีความแตกต่างทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ที่เวลา 40, 90 และ 60 นาทีสำหรับอุณหภูมิ 60, 90 และ 120 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ค่าเฉลี่ยของค่ากรดของการอบทุกอุณหภูมิอุณหภูมิ มีความแตกต่างทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % โดยการอบที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียสมีค่ากรดต่ำที่สุด

ปริมาณน้ำมันของรำข้าวเริ่มคงที่โดยไม่มีความแตกต่างทางสถิติ ที่เวลา 40, 60 และ 36 นาทีสำหรับอุณหภูมิ 60, 90 และ 120 องศาเซลเซียส ตามลำดับ โดยค่าเฉลี่ยของปริมาณน้ำมันที่อุณหภูมิ 90 และ 120 ให้ค่าปริมาณน้ำมันมากที่สุด โดยไม่มีความแตกต่างทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95 %

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ควรมีการศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับผลกระทบด้วยการอบลมแห้งต่อคุณภาพน้ำมันต่างๆ เช่น ค่ากรดไขมันอิสระค่า, เพอร์ออกไซด์, ค่าไอโอดีน และผลกระทบต่อคุณค่าทางอาหารอื่นๆ ของน้ำมันรำข้าว เช่น วิตามินและสารต้านอนุมูลอิสระบางชนิด

2. ควรศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับการอบรำข้าวด้วยวิธีอื่นๆ และนำมาเปรียบเทียบผลที่ได้ เพื่อหาวิธีการอบที่ทำให้ได้คุณภาพของรำข้าวมากที่สุด

3. ควรศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับปัจจัยต่างๆที่อาจส่งผลกระทบต่อปริมาณและคุณภาพของน้ำมันรำข้าว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

[1] Saunders, R.M. (1990). The properties of rice bran as a food stuff. *Cereal Food World*. 35(7), 632–662.

[2] Pizzorno, L., Pizzorno, J. and Murray, M. 2002, *Natural Medicine Instructions for Patients*, Churchill Livingstone, New York, p. 213.

[3] นัยนา บุญทวียุวัฒน์ และเรวดี จงสุวัฒน์. 2545. น้ำมันรำข้าว ทางเลือกเพื่อสุขภาพของคนไทย . กรุงเทพมหานคร :โอเดียนสโตร์,. หน้า 23

[4] Bramley P.M., Elmadfa I., Kelly F.J., Manios Y., Roxborough H.E., Schuch W., Sheehy P.J.A., and Wagner K.H., Review Vitamin E, Journal of the Science of Food and Agriculture, 80, p.913 (2000).

[5] สำนักวิจัยและพัฒนาข้าว กรมการข้าว.รำข้าวคืออะไร.แหล่งที่มา http://www.brrd.in.th. เข้าดูเมื่อ 20/8/2557.

[6] กิตติมา ไตรรัตนศิริชัย และ สาโรจน์ รอดคืน.วันที่ 6 กรกฎาคม 2555.รำข้าว: จากอาหารหมูสู่อาหาร เพื่อสุขภาพของคน. http://www.mfu.ac.th/school/agro2012/events/298. เข้าดูเมื่อ 20/08/2557.

[7] นางสาวธิดารัตน์ หน่อสุวรรณ. 2550. สมบัติของวิตามินอีที่สกัดจากดิสทิลเลตของน้ำมันรำข้าวโดยใช้เฮกเซนที่อุณหภูมิต่ำ วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิตสาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร บัณฑิตวิทยาลัยมหาวิทยาลัยเชียงใหม่.

[8] วิธีการผลิตน้ำมันรำข้าว. แหล่งที่มาhttp://www.patomsit.net/. เข้าดูเมื่อ 23/08/2557

[9] สมชาติโสภณรณฤทธิ์ (2540). การอบแห้งเมล็ดพืชและอาหารบางประเภท, กรุงเทพฯ: โครงกส่งเสริมการสร้างตำราสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

[10] สุคนธ์ชื่น ศรีงาม. (2549). วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีอาหาร. พิมพ์ครั้งที่ 5. กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

[11] Vassanacharoen P, Pattanapo W, Lucke W, and Vearasilp S. 2007 ControlSitiphilusoryzae (L.)by Radio Frequency Heat Treatment as Alternative Phytosanitary Process Milled Rice. Tropentag. 2007 University of Kassel-Witzenhausen and University of Gottingen. p.1-4.

[12] ตู้อบลมร้อน. แหล่งที่มา http://www.home.kku.ac.th/chuare/12/hotairoven.pdf. เข้าดูเมื่อ 1/09/2557

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

[13] สุคนธ์ชื่น ศรีงาม. 2549. วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีอาหาร. พิมพ์ครั้งที่ 5. กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

[14] สุเนตร สืบค้า และฤทธิชัย อัศวราชันย์. 2554. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับวัสดุพรุน. วารสารสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย 17(1): 59-66

[15] Kaleemullah, S. and Kailappan, R. 2005. Modelling of thinlayer drying kinetics of red chillies. Journal of Food Engineering 76: 531-537.

[16] Waewsak, J., Chindaruksa, S. and Punlek, C. 2006. A mathematical modeling study of hot air drying for some agricultural products. Journal of Science and Technology. 11(1): 14-20

[17] Dadali, G., Apar, D.K. and Özbek, B. 2007. Microwave drying kinetics of okra. Drying Technology. 25(5): 917-924.

[18] McMinn, W.A.M. 2006. Thin-layer modeling of the convective, microwave, microwave-convective and microwave vacuum drying of lactose powder. Journal of Food Engineering. 72: 113-123.

[19] Kingsly, A.R.P. and Singh, D.B. 2007. Drying kinetics of pomegranate arils. Journal of Food Engineering 79: 741-744.

[20] Vega, A., Fito, P., Andrés, A. and Lemus, R. 2007. Mathematical modeling of hot-air drying kinetics of red bell pepper (var. Lamuyo). Journal of Food Engineering. 79: 1460-1466.

[21] Assawarachan, R., Nookong, M., Chailungka N and Amornlerdpison, D. 2013. Effects of microwave power on the drying characteristics, color and phenolic content of Spirogyra sp. Journal of Food, Agriculture & Environment. 11(1): 15-18.

[22] Wu, J. and Hu, X. 2007. Mathematical modeling on hot air drying of thin layer apple pomace. Food Research International. 40: 39–44.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

ข้อมูลค่าความชื้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.1 ข้อมูลค่าความชื้นของน้ำมันรำข้าว อบด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิ 60°C

เวลา (นาที)	ความชื้น (g water/g solid)	อัตราส่วนความชื้น
0	9.67	1
20	9.22	0.91
40	8.67	0.81
60	7.92	0.67
80	7.32	0.56
100	6.58	0.42
120	6.09	0.32
140	5.41	0.19
160	4.89	0.10
180	4.39	0
200	4.38	0
220	4.37	0
240	4.39	0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.2 ข้อมูลค่าความชื้นของน้ำมันรำข้าว อบด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิ 90°C

เวลา (นาที)	ความชื้น (g water/g solid)	อัตราส่วนความชื้น
0	9.77	1
15	8.33	0.82
30	6.45	0.59
45	5.04	0.42
60	3.95	0.28
75	3.07	0.18
90	2.52	0.11
105	2.02	0.05
120	1.68	0
135	1.69	0.01
150	1.63	0
165	1.65	0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.3 ข้อมูลค่าความชื้นของน้ำมันรำข้าว อบด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิ 120°C

เวลา (นาที)	ความชื้น (g water/g solid)	อัตรส่วนความชื้น
0	9.95	1
10	8.24	0.82
20	6.56	0.63
30	4.65	0.43
40	3.65	0.32
50	2.76	0.22
60	1.67	0.11
70	0.67	0
80	0.65	0
90	0.68	0
100	0.67	0
110	0.66	0
120	0.71	0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข

ข้อมูลค่ากรดของน้ำมันรำข้าว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.1 ข้อมูลค่ากรดของน้ำมันรำข้าว อบด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิ 60°C

เวลา (นาที)	ค่ากรด (ml KOH/g oil)		
	การทดลองครั้งที่ 1	การทดลองครั้งที่ 2	การทดลองครั้งที่ 3
40	58.88	59.98	59.21
80	59.58	59.77	58.99
120	59.56	59.14	59.98
160	58.74	58.86	59.61
200	59.65	59.01	58.10
240	58.58	58.35	59.86

ตารางที่ ข.2 ข้อมูลค่ากรดของน้ำมันรำข้าว อบด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิ 90°C

เวลา (นาที)	ค่ากรด (ml KOH/g oil)		
	การทดลองครั้งที่ 1	การทดลองครั้งที่ 2	การทดลองครั้งที่ 3
30	57.91	59.03	58.11
60	59.21	58.27	57.81
90	56.47	57.21	56.81
120	55.51	56.61	57.02
150	56.25	56.23	56.91
180	56.52	56.29	56.39

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.3 ข้อมูลค่ากรดของน้ำมันรำข้าว อบด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิ 120°C

เวลา (นาที)	ค่ากรด (ml KOH/g oil)		
	การทดลองครั้งที่ 1	การทดลองครั้งที่ 2	การทดลองครั้งที่ 3
20	56.27	57.58	56.72
40	55.90	57.28	55.97
60	55.91	55.89	55.10
80	56.05	55.73	55.17
100	55.97	55.25	55.78
120	55.70	55.82	55.38

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ค

ข้อมูลปริมาณของน้ำมันรำข้าว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค.1 ข้อมูลปริมาณของน้ำมันรำข้าว อบด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิ 60°C

เวลา (นาที)	ปริมาณของน้ำมันรำข้าว (mg oil/g db)		
	การทดลองครั้งที่ 1	การทดลองครั้งที่ 2	การทดลองครั้งที่ 3
0	166.0	156.0	158.0
40	168.0	172.0	161.0
80	171.0	177.0	165.0
120	179.0	172.9	168.0
160	172.5	170.8	179.9
200	175.2	172.7	178.0

ตารางที่ ค.2 ข้อมูลปริมาณของน้ำมันรำข้าว อบด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิ 90°C

เวลา (นาที)	ปริมาณของน้ำมันรำข้าว (mg oil/g db)		
	การทดลองครั้งที่ 1	การทดลองครั้งที่ 2	การทดลองครั้งที่ 3
0	166.0	156.0	158.0
20	171.6	180.6	171.0
40	180.3	177.9	186.3
60	187.0	188.4	182.0
90	196.9	184.5	190.1
120	190.8	188.4	195.0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค.3 ข้อมูลปริมาณของน้ำมันรำข้าว อบด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิ 120°C

เวลา (นาที)	ปริมาณของน้ำมันรำข้าว (mg oil/g db)		
	การทดลองครั้งที่ 1	การทดลองครั้งที่ 2	การทดลองครั้งที่ 3
0	166.0	156.0	158.0
12	171.4	171.6	177.0
24	179.0	178.0	189.0
36	182.7	186.3	193.2
48	184.7	193.5	193.9
60	190.3	191.1	196.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ง

ข้อมูลพลังงานสะสมในการอบด้วยลมร้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าพลังงานไฟฟ้าหาได้จากสูตร

$$P = IVCOS\varphi$$

โดย P = พลังงานไฟฟ้า (J)

I = กระแสไฟฟ้า (A)

V = ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า (V)

$COS\varphi = 0.94$

$$\text{จำนวนหน่วย(ยูนิต)ใน } 1 \text{ วัน} = \frac{\text{กำลังไฟฟ้า(วัตต์)} \times \text{จำนวนเครื่องใช้ไฟฟ้า}}{1000} \times \text{จำนวนชั่วโมงที่ใช้งานในหนึ่งวัน}$$

ตารางที่ ง.1 ข้อมูลพลังงานสะสมในการอบด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิ 60°C

เวลา (นาที)	พลังงานสะสม (kJ)
0	0
10	335.8
20	671.7
30	1007.5
40	1343.4
50	1679.2
60	2015.1
70	2350.9
80	2686.7
90	3022.6
100	3358.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

110	3684.3
120	4030.1
130	4366.0
140	4701.8
150	5037.6
160	5373.5
170	5709.3
180	6045.2
190	6381.0
200	6716.9
210	7052.7
220	7388.6
230	7724.4
240	8060.2

ตารางที่ ง.2 ข้อมูลพลังงานสะสมในการอบด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิ 90°C

เวลา (นาที)	พลังงานสะสม (kJ)
0	0
10	527.8
20	1055.5
30	1583.3
40	2111.0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

50	2638.8
60	3166.5
70	3694.3
80	4222.0
90	4749.8
100	5277.5
110	5805.3
120	6333.0
130	6860.8
140	7388.6
150	7916.3
160	8444.1
170	8971.8
180	9499.6
190	10027.3
200	10555.1
210	11082.8
220	11610.6
230	12138.3
240	12666.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ง.3 ข้อมูลพลังงานสะสมในการอบด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิ 120°C

เวลา (นาที)	พลังงานสะสม (kJ)
0	0
10	632.6
20	1265.2
30	2277.4
40	2530.4
50	3163.0
60	3795.6
70	4428.2
80	5060.8
90	5693.4
100	6326.0
110	6958.6
120	7591.2
130	8223.8
140	8856.4
150	9489.0
160	10121.6
170	10754.2
180	11386.8
190	12019.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

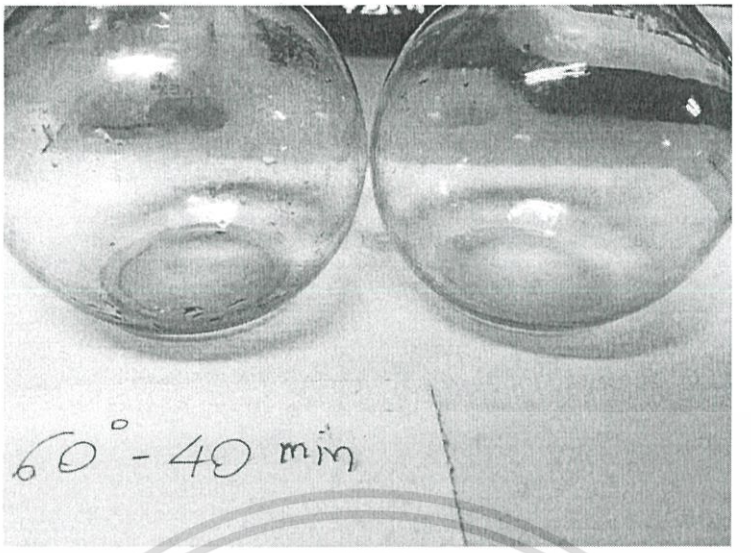
200	12652.0
210	13284.6
220	13917.2
230	14549.8
240	15182.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

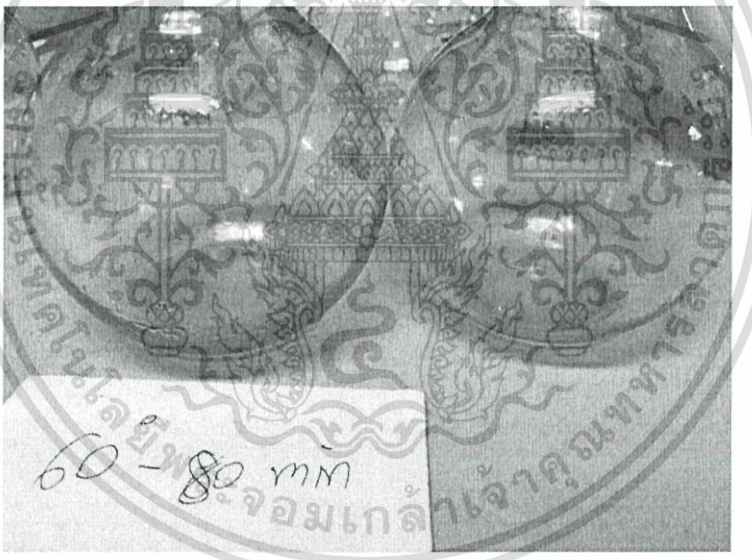
ภาคผนวก จ

สีของน้ำมันรำข้าว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ จ.1 อบแห้งด้วยลมร้อน 60°C ที่เวลา 40 นาที



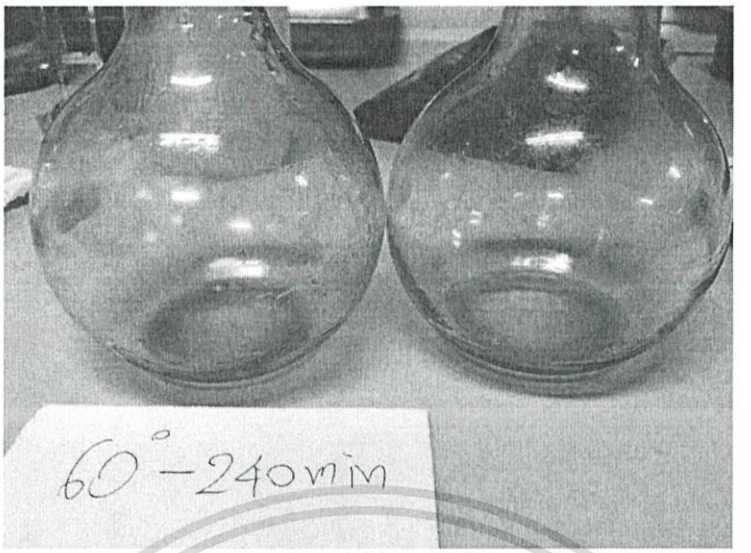
ภาพที่ จ.2 อบแห้งด้วยลมร้อน 60°C ที่เวลา 80 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพที่ จ.3 อบแห้งด้วยลมร้อน 60°C ที่เวลา 120 นาที

ภาพที่ จ.4 อบแห้งด้วยลมร้อน 60°C ที่เวลา 160 นาที

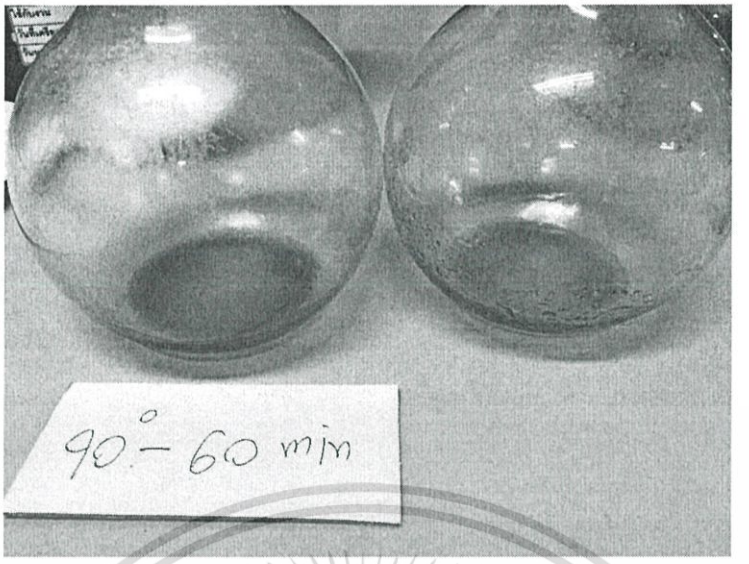
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ จ.5 อบแห้งด้วยลมร้อน 60°C ที่เวลา 240 นาที

ภาพที่ จ.6 อบแห้งด้วยลมร้อน 90°C ที่เวลา 30 นาที

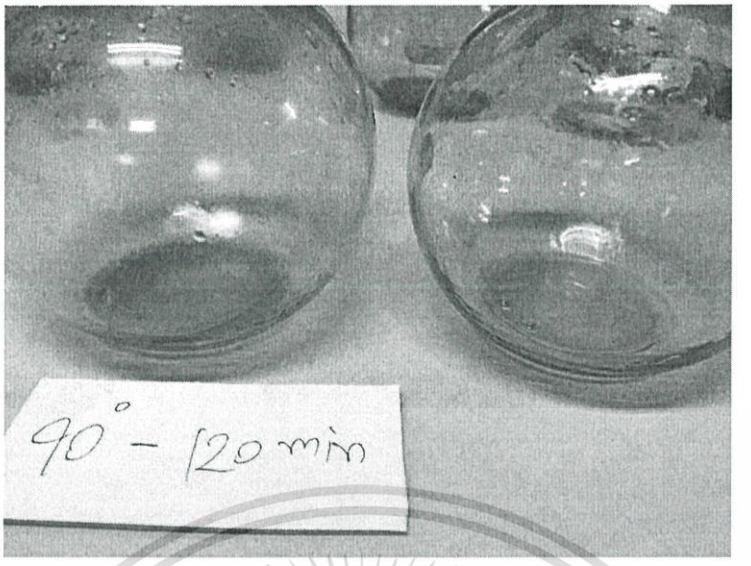
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ จ.7 อบแห้งด้วยลมร้อน 90°C ที่เวลา 60 นาที

ภาพที่ จ.8 อบแห้งด้วยลมร้อน 90°C ที่เวลา 90 นาที

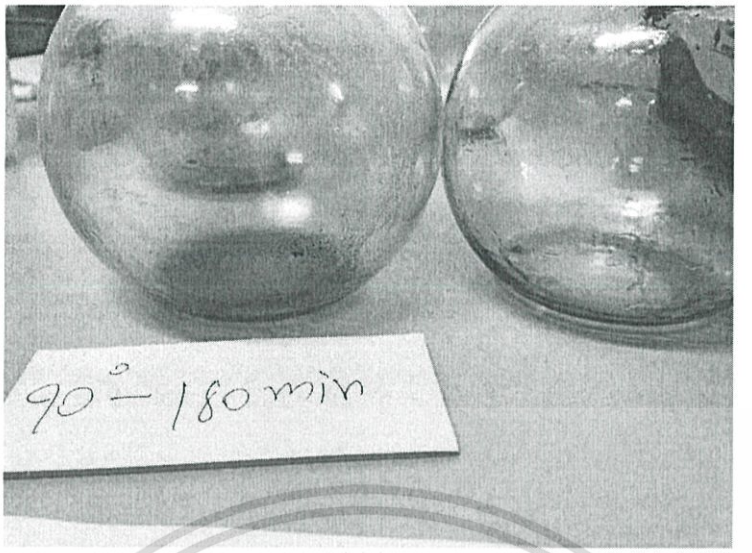
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ จ.9 อบแห้งด้วยลมร้อน 90°C ที่เวลา 120 นาที

ภาพที่ จ.10 อบแห้งด้วยลมร้อน 90°C ที่เวลา 150 นาที

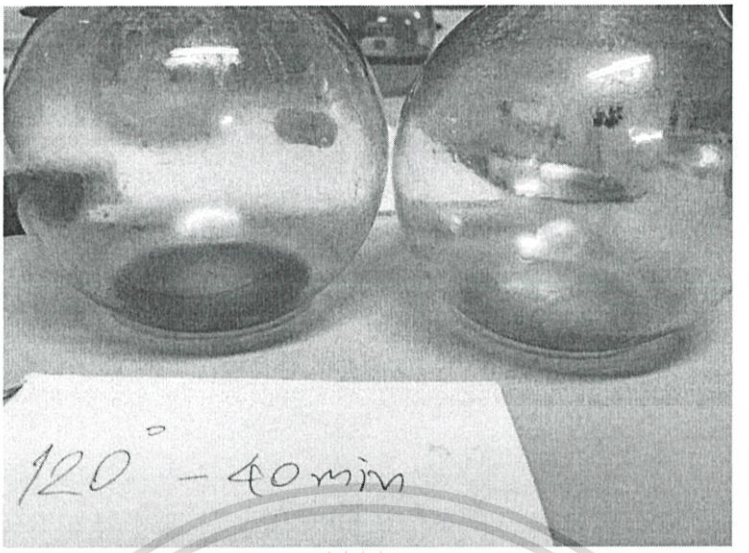
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ จ.11 อบแห้งด้วยลมร้อน 90°C ที่เวลา 180 นาที

ภาพที่ จ.12 อบแห้งด้วยลมร้อน 120°C ที่เวลา 20 นาที

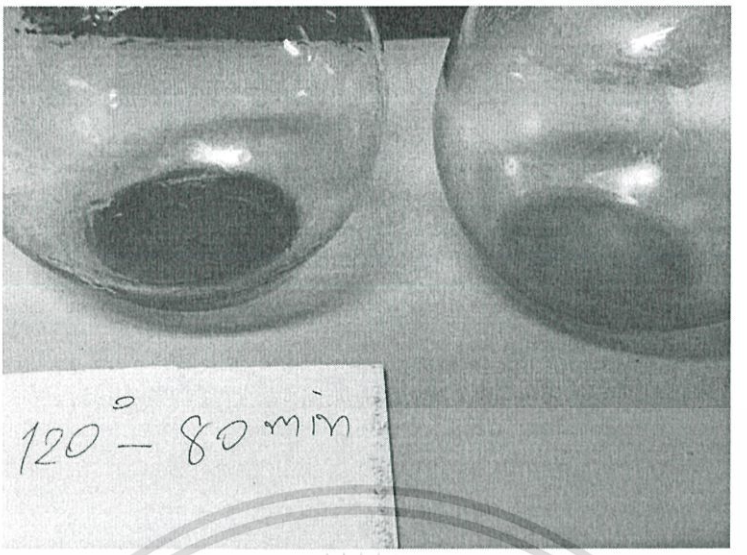
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ จ.13 อบแห้งด้วยลมร้อน 120°C ที่เวลา 40 นาที

ภาพที่ จ.14 อบแห้งด้วยลมร้อน 120°C ที่เวลา 60 นาที

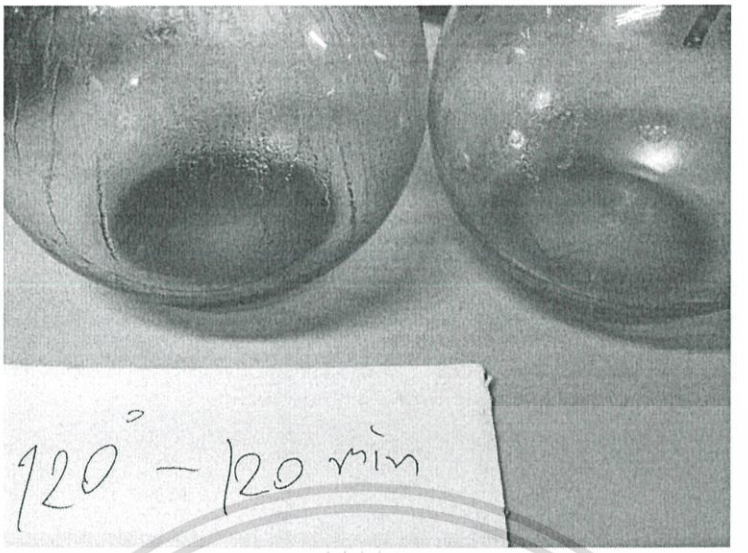
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ จ.15 อบแห้งด้วยลมร้อน 120°C ที่เวลา 80 นาที

ภาพที่ จ.16 อบแห้งด้วยลมร้อน 120°C ที่เวลา 100 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ จ.17 อบแห้งด้วยลมร้อน 120°C ที่เวลา 120 นาที

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ฉ

การวิเคราะห์ทางสถิติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Multiple Comparisons

LSD

Dependent Varieble	(I) temp	(J) temp	Mean Difference (I-J)	Significant
Oil	Unheated	60	-7.00000	.123
		90	-25.80000*	.000
		120	-27.40000*	.000
	60	Unheated	7.00000	.123
		90	-18.80000*	.002
		120	-20.40000*	.001
	90	Unheated	25.80000*	.000
		60	18.80000*	.002
		120	-1.60000	.704
	120	Unheated	27.40000*	.000
		60	20.40000*	.001
		90	1.60000	.704
Acid	Unheated	60	.83333	.092
		90	3.81000*	.000
		120	4.55667*	.000
	60	Unheated	-.83333	.092
		90	2.97667*	.000
		120	3.72333*	.000
	90	Unheated	-3.81000*	.000
		60	-2.97667*	.000
		120	.74667	.125
	120	Unheated	-4.55667*	.000
		60	-3.72333*	.000
		90	-.74667	.125

*The mean difference is significant at the 0.05 level.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้