สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การศึกษาค่าพารามิเตอร์การอบแห้งเมล็ดงาขัด

STUDY ON PARAMETERS FOR PEELED SESAME DRYING

T049839

โดย

มนทิวา วิทยาโกมลเลิศ

วาสนา วงษ์เที่ยง

สุนิสา กุลพนาภินันท์

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมอาหาร

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2545

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เลขหมู่ .....
เลขทะเบียน 49839
วัน,เดือน,ปี - 2 เม.ย. 2547
b .....
i .....

ปริญญานิพนธ์ปีการศึกษา 2545

ภาควิชา วิศวกรรมอาหาร

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การศึกษาค่าพารามิเตอร์การอบแห้งเมล็ดงาขัด

ผู้จัดทำ

นางสาวมนทิวา วิทยาโกมลเลิศ

นางสาววาสนา วงษ์เที่ยง

นางสาวสุนิสา กุลพนาภินันท์

อาจารย์ที่ปรึกษา

(รองศาสตราจารย์สาทิป รัตนภาสกร)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การศึกษาหาค่าพารามิเตอร์ของการอบแห้งเมล็ดงาขัด

นางสาวมนทิวา วิทยาโกมลเลิศ
นางสาววาสนา วงษ์เที่ยง
นางสาวสุนิสา กุลพนาภินันท์

รองศาสตราจารย์สาทิป รัตนภาสกร อาจารย์ที่ปรึกษา
ปีการศึกษา 2545

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาหาความชื้นสมดุลของเมล็ดงาขัด ที่อุณหภูมิ 27, 35 และ 45 °C ที่ค่าความชื้นสัมพัทธ์ระหว่าง 10-90 %โดยวิธีสถิต ข้อมูลที่ได้นำมาศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิ การเกิด Hysteresis จึงมีการสร้างสมการแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แบบสมการของ Henderson และ Chung & Pfost และได้หาคุณสมบัติทางฟิสิกส์บางอย่างของเมล็ดงาขัด เช่น ความหนาแน่นปรากฏ เปอร์เซ็นต์ช่องว่างของอากาศ ความร้อนจำเพาะ อัตราการอบแห้ง ในช่วงความชื้นระหว่าง 4-99 % มาตรฐานแห้ง

จากผลการทดลองพบว่า

- ค่าความชื้นสมดุลของเมล็ดงาขัดที่อุณหภูมิต่ำจะมีค่าความชื้นสมดุลสูงกว่าที่อุณหภูมิสูง และอิทธิพลของฮีสเตอร์เรซีส มีความสำคัญต่อความชื้นสมดุล
- ความหนาแน่นปรากฏและความร้อนจำเพาะแปรตามความชื้นของเมล็ดงาขัด คือ เมื่อความชื้นเพิ่มขึ้น ความหนาแน่นปรากฏและความร้อนจำเพาะจะมีค่ามากขึ้นด้วยในลักษณะเชิงเส้น
- เปอร์เซ็นต์ช่องว่างของอากาศของเมล็ดงาขัดพบว่ามีความสัมพันธ์เป็นส่วนกลับกับความชื้น นั่นคือ เมื่อความชื้นเพิ่มขึ้นเปอร์เซ็นต์ช่องว่างของอากาศจะลดลงในลักษณะเชิงเส้น
- การอบแห้งชั้นบาง ได้ทำการศึกษาที่อุณหภูมิระหว่าง 50-70 °C จากการทดลองพบว่าอุณหภูมิมีอิทธิพลต่ออัตราการอบแห้ง แต่ในขณะที่ความเร็วลมมีผลน้อยมาก นั่นคืออัตราการอบแห้งชั้นบางจะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ส่วนความเร็วลมมีผลต่ออัตราการอบแห้งน้อยมาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

STUDY ON PARAMETERS FOR PEELED SESAME DRYING

Monthiwa Wittayakomollert
Wassana Wongtheng
Sunisa Kulpanapinunt

Assoc.Prof.Satip Rattanapasakorn advisor

2002

Abstract

In this study, the sorption isotherms of peeled sesame was determined at 27, 35 and 45 °C for a relative humidity between 10-90 % by using the static method. The effects of temperature, hysteresis and varieties on the sorption isotherms were investigated. The mathematical model based on the equation of Henderson and Chung & Pfost were developed to fit the experimental data. The physical properties such as bulk density, void fraction and specific heat for moisture contents between 4-99 % dry basic were determined.

The results showed that:

- sorption isotherms at low temperature were higher than at high temperature. The effect of hystersis on sorption isotherms was more significant than the effect of variety.
- bulk density and specific heat increased linearly with moisture content but void fraction decreased linearly with moisture content.
- thin-layer drying rates were determined as effected by drying air temperature between 50-70 °C and air flow rate between 0.25-0.50 m/s. Only air temperature has significant effect on drying rate.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
สารบัญ	ก
สารบัญตาราง	ง
สารบัญรูปภาพ	จ
สัญลักษณ์	ช
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 บทนำ	1
1.2 วัตถุประสงค์	1
1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ	3
2.1 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับงา	3
2.1.1 ลักษณะงา	3
2.1.2 ประโยชน์และคุณค่าทางโภชนาการของเมล็ดงา	3
2.1.3 ความสำคัญของงาต่อระบบเศรษฐกิจ	4
2.2 ความชื้น	5
2.1.1 วิธีการหาค่าความชื้น	5
2.3 ความชื้นสมดุล	6
2.4 วิธีการหาค่าความชื้นสมดุล	8
2.4.1 วิธีสถิต	8
2.4.2 วิธีจลน์	9
2.5 ฮีสเตอร์เรซีส	9
2.6 ความหนาแน่น	10
2.7 เปอร์เซ็นต์ช่องว่างอากาศ	10
2.8 กลไกการอบแห้ง	11
2.8.1 ช่วงการให้ความร้อนเบื้องต้นแก่วัสดุ	12
2.8.2 ช่วงอัตราการอบแห้งที่คงที่	12
2.8.3 ช่วงอัตราการอบแห้งลดลง	12
2.9 สมการการอบแห้ง	13
2.9.1 สมการการอบแห้งกึ่งทฤษฎี	13

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หน้า

2.9.2 สมการการอบแห้งแบบเอมไพริคเคิล 14
2.10 ความร้อนจำเพาะ 15
2.11 งานวิจัยที่มีผู้ทดลองลักษณะใกล้เคียงกัน 16
บทที่ 3 วัสดุและวิธีการทดลอง 18
3.1 การเตรียมตัวอย่าง 18
3.1.1 การเตรียมตัวอย่างที่ใช้สำหรับทดลองการดูดซับความชื้น 18
3.1.2 การเตรียมตัวอย่างที่ใช้สำหรับทดลองการคายความชื้น 18
3.1.3 การเตรียมตัวอย่างที่ใช้สำหรับทดลองความหนาแน่นรวมและเปอร์เซ็นต์ช่องว่างอากาศ 18
3.1.4 การเตรียมตัวอย่างที่ใช้สำหรับการหาอัตราการอบแห้ง 18
3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง 19
3.2.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมตัวอย่างทั้งหมด 19
3.2.2 การทดลองหาความหนาแน่น และ เปอร์เซ็นต์ช่องว่างในอากาศ 19
3.2.3 การทดลองหาความร้อนจำเพาะ 20
3.2.4 การทดลองหาอัตราการอบแห้ง 20
3.3 วิธีการทดลอง 21
3.3.1 หาความชื้นสมดุล 21
3.3.2 วิธีการทดลองหาความหนาแน่น 22
3.3.3 วิธีการทดลองหาเปอร์เซ็นต์ช่องว่างของอากาศ 23
3.3.4 วิธีการทดลองหาอัตราการอบแห้ง 24
3.3.5 วิธีการทดลองหาความร้อนจำเพาะ 26
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิเคราะห์ข้อมูล 28
4.1 ผลการทดลองหาความชื้นสมดุล 28
4.1.1 ผลการเปรียบเทียบสมการความชื้นสมดุล 28
4.1.2 อิทธิพลของอุณหภูมิ 31
4.1.3 อิทธิพลของความชื้นสมดุล 31
4.2 ผลการทดลองหาความหนาแน่นปรากฏ 34
4.3 ผลการทดลองหาเปอร์เซ็นต์ช่องว่าง 34
4.4 ผลการทดลองหาความร้อนจำเพาะ 35
4.5 ผลการทดลองอัตราการอบแห้งชั้นบาง 36

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หน้า

4.5.1 อิทธิพลของอุณหภูมิ 36
4.5.2 อิทธิพลของความเร็วลม 38
บทที่ 5 สรุปผลและข้อเสนอแนะ 45
สรุปผล 45
เอกสารอ้างอิง 46
ภาคผนวก ก 49
ภาคผนวก ข 51
ภาคผนวก ค 60
กิตติกรรมประกาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

	หน้า
ตาราง 4.1 ค่าสัมประสิทธิ์ของสมการ Single	41
ตารางที่ 4.2 ค่าสัมประสิทธิ์ของสมการPage (1949)	41
ตาราง ก.1 คุณลักษณะของงาขัด	50
ตาราง ก.2 ส่วนประกอบของเมล็ดงาดำ 100 กรัม	50
ตาราง ข.1 ข้อมูลจากการทดลองดูดซับความชื้นที่อุณหภูมิ 27 °C	52
ตาราง ข.2 ข้อมูลจากการทดลองคายความชื้นที่อุณหภูมิ 27 °C	52
ตาราง ข.3 ข้อมูลจากการทดลองดูดซับความชื้นที่อุณหภูมิ 35 °C	53
ตาราง ข.4 ข้อมูลจากการทดลองคายความชื้นที่อุณหภูมิ 35 °C	53
ตาราง ข.5 ข้อมูลจากการทดลองดูดซับความชื้นที่อุณหภูมิ 45 °C	54
ตาราง ข.6 ข้อมูลจากการทดลองคายความชื้นที่อุณหภูมิ 45 °C	54
ตาราง ข.7 ข้อมูลจากการทดลองหาความหนาแน่นรวมของเมล็ดงา	55
ตาราง ข.8 ข้อมูลจากการทดลองหาเปอร์เซ็นต์ช่องว่างของเมล็ดงา	55
ตาราง ข.9 ข้อมูลจากการทดลองหาความร้อนจำเพาะของเมล็ดงา	56
ตาราง ข.10 ข้อมูลจากการทดลองอัตราการอบแห้งชั้นบางที่ความเร็วลม 0.25 m/s	57
ตาราง ข.11 ข้อมูลจากการทดลองอัตราการอบแห้งชั้นบางที่ความเร็วลม 0.31 m/s	58
ตาราง ข.12 ข้อมูลจากการทดลองอัตราการอบแห้งชั้นบางที่ความเร็วลม 0.43 m/s	59
ตาราง ค.1 สารละลายเกลืออิ่มตัวที่ใช้ควบคุมความชื้นสัมพันธ์	61

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูปภาพ

หน้า

รูปที่ 2.1 ลักษณะของดอกและต้นงา 3

รูปที่ 2.2 ปรากฏการณ์ฮีสเตอร์เรซีส 10

รูปที่ 2.3 กราฟแสดงความชื้นที่เปลี่ยนไปเทียบกับเวลา 13

รูปที่ 2.4 กราฟแสดงอัตราการอบแห้ง 13

รูปที่ 3.1 ตู้อบไฟฟ้า 19

รูปที่ 3.2 เครื่องอบแห้ง 20

รูปที่ 4.1 การเปรียบเทียบสมการรูปแบบต่าง ๆ กับผลการทดลองความชื้นสมดุลของเมล็ดงาขัด 29

รูปที่ 4.2 การเปรียบเทียบสมการรูปแบบต่าง ๆ กับผลการทดลองความชื้นสมดุลแบบคายความชื้นของเมล็ดงาขัด 30

รูปที่ 4.3 การเปรียบเทียบสมการรูปแบบต่าง ๆ กับผลการทดลองความชื้นสมดุลแบบดูดความชื้นของเมล็ดงาขัด 30

รูปที่ 4.4 แสดงการคายความชื้นของเมล็ดงาขัดที่อุณหภูมิต่าง ๆ 31

รูปที่ 4.5 แสดงการดูดความชื้นของเมล็ดงาขัดที่อุณหภูมิต่าง ๆ 32

รูปที่ 4.6 ความชื้นสมดุลของเมล็ดงาที่อุณหภูมิ 27 °C 32

รูปที่ 4.7 ความชื้นสมดุลของเมล็ดงาที่อุณหภูมิ 35 °C 33

รูปที่ 4.8 ความชื้นสมดุลของเมล็ดงาที่อุณหภูมิ 45 °C 33

รูปที่ 4.9 ความหนาแน่นปรากฏของเมล็ดงาที่ความชื้นต่าง ๆ 34

รูปที่ 4.10 เปอร์เซ็นต์ช่องว่างของอากาศของเมล็ดงาที่ความชื้นต่าง ๆ 35

รูปที่ 4.11 ความร้อนจำเพาะของเมล็ดงาที่ความชื้นต่าง ๆ 36

รูปที่ 4.12 อัตราส่วนความชื้นของเมล็ดงาขัดที่ความเร็วลม 0.25 m/s 37

รูปที่ 4.13 อัตราส่วนความชื้นของเมล็ดงาขัดที่ความเร็วลม 0.31 m/s 37

รูปที่ 4.14 อัตราส่วนความชื้นของเมล็ดงาขัดที่ความเร็วลม 0.43 m/s 38

รูปที่ 4.15 อิทธิพลของความเร็วลมที่มีผลต่ออัตราการอบแห้งชั้นบางของเมล็ดงาขัดที่อุณหภูมิ 50 °C 39

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หน้า

รูปที่ 4.16 อิทธิพลของความเร็วลมที่มีผลต่ออัตราการอบแห้งชั้นบางของเมล็ดงาขัดที่อุณหภูมิ 60 °C 39

รูปที่ 4.17 อิทธิพลของความเร็วลมที่มีผลต่ออัตราการอบแห้งชั้นบางของเมล็ดงาขัดที่อุณหภูมิ 70 °C 40

รูปที่ 4.18 การเปรียบเทียบผลจากสมการรูปแบบ Singleและ Page (1949) กับผลการทดลองหาอัตราการอบแห้งชั้นบางของเมล็ดงาขัดที่อุณหภูมิ 50 °C และความเร็วลม 0.25 m/s 42

รูปที่ 4.19 การเปรียบเทียบผลจากสมการรูปแบบ Singleและ Page (1949) กับผลการทดลองหาอัตราการอบแห้งชั้นบางของเมล็ดงาขัดที่อุณหภูมิ 60 °C และความเร็วลม 0.25 m/s 43

รูปที่ 4.20 การเปรียบเทียบผลจากสมการรูปแบบ Singleและ Page (1949) กับผลการทดลองหาอัตราการอบแห้งชั้นบางของเมล็ดงาขัดที่อุณหภูมิ 60 °C และความเร็วลม 0.25 m/s 43

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1
บทนำ

1.1 บทนำ

งาเป็นผลผลิตทางการเกษตรที่เป็นที่รู้จักกันอย่างแพร่หลาย สามารถปลูกได้ทุกภาคของประเทศไทย และเป็นพืชที่ปลูกง่าย ทนทานต่อสภาพแห้งแล้งซึ่งเหมาะสมกับสภาพดินฟ้าอากาศของประเทศไทยเป็นอย่างยิ่ง ปัจจุบันความต้องการเมล็ดงานั้นเปิดกว้างทั้งในตลาดต่างประเทศและในประเทศ คาดว่าในอนาคตนั้นเมล็ดงามีแนวโน้มปริมาณการผลิตและการส่งออกเพิ่มมากขึ้นจึง เป็นการสร้างรายได้อย่างมากมายให้แก่ประเทศ เนื่องจากเมล็ดงามีคุณค่าทางโภชนาการมาก โดยเฉพาะกรดไขมันไม่อิ่มตัวมีถึง 85% ของปริมาณน้ำมันทั้งหมดในเมล็ดและมีสารที่ป้องกันการเหม็นหืน เป็นตัวที่ปรับปรุงรสชาติและกลิ่นของผลิตภัณฑ์ให้ดีขึ้น

เมล็ดงาดำเป็นเมล็ดงาที่นิยมบริโภค ดังนั้นการจัดการหลังการเก็บเกี่ยวเมล็ดงาดำนั้น จำเป็นต้องมีการลอกเปลือกเพื่อให้เมล็ดงาที่ได้นั้นขาวสะอาดถูกใจผู้บริโภค แต่ในการลอกเปลือกเมล็ดงาในแต่ละครั้งนั้น ต้องใช้น้ำเป็นตัวช่วยในการลอกเปลือก ส่งผลให้เมล็ดงาที่ได้หลังการลอกเปลือกมีความชื้นสูง ไม่เหมาะสมในการเก็บรักษาเพราะเชื้อราอาจเกิดขึ้นได้ จึงต้องนำเมล็ดงาที่ได้นั้นไปอบแห้ง เพื่อให้ความชื้นภายในเมล็ดเหลือประมาณ 8% มาตรฐานเปียก และยังคงคุณค่าและลักษณะภายนอกเหมือนเดิม

ในการอบแห้งเมล็ดงาหลังลอกเปลือกให้มีคุณภาพและราคาดีนั้น จำเป็นต้องมีการศึกษาถึงปัจจัยต่าง ๆ ที่มีอิทธิพลต่อความชื้น ขนาดและคุณภาพของเมล็ดงาในระหว่างการอบแห้งและหลังการอบแห้ง การศึกษาค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการอบแห้งเมล็ดงานี้ สามารถนำมาเป็นแนวทางในการออกแบบวิธีการและเครื่องมือที่ใช้อบแห้งเมล็ดงา รวมทั้งภาชนะบรรจุให้สะดวกและง่าย

1.2 วัตถุประสงค์

วัตถุประสงค์ทั่วไปเพื่อศึกษาสมบัติทางกายภาพและปัจจัยต่าง ๆ ที่มีอิทธิพลในการอบแห้งเมล็ดงาที่มีความชื้นสูงหลังการลอกเปลือก โดยมีวัตถุประสงค์หลักดังนี้

1.2.1 เพื่อหาความชื้นสมดุลของเมล็ดงาขัดที่อุณหภูมิ 27-45°C และความชื้นสัมพัทธ์ระหว่าง 10 – 100 % โดยวิธีทางสถิต ซึ่งจะใช้สารละลายเกลืออิ่มตัวหลาย ๆ ชนิดและสร้างสมการความสัมพันธ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.2.2 เพื่อหาความหนาแน่นรวม เปอร์เซ็นต์ช่องว่างอากาศที่อุณหภูมิและความชื้นต่าง ๆ และสมการความสัมพันธ์

1.2.3 เพื่อหาค่าความร้อนจำเพาะเมล็ดงาขัดที่อุณหภูมิและความชื้นต่าง ๆ และสมการความสัมพันธ์

1.2.4 เพื่อหาอัตราการอบแห้งที่ความเร็ว 0.25-0.43 m/s เพื่อคำนวณหาค่าคงที่ของการอบแห้งและนำมาสร้างสมการความสัมพันธ์

1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ข้อมูลค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการทดลองการอบแห้งเมล็ดงานี้ เป็นข้อมูลที่สำคัญในการอบแห้ง กล่าวคือข้อมูลนี้ได้หาความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นสมดุลกับความชื้นสัมพัทธ์ของเมล็ดงาที่อุณหภูมิต่าง ๆ ซึ่งความชื้นมีความสำคัญต่อเมล็ดงา เช่น ถ้าความชื้นมีค่าสูงมากก็จะทำให้เมล็ดงาเกิดเชื้อราขึ้นคุณภาพของเมล็ดงาก็จะเสียไป แต่ถ้าความชื้นต่ำก็จะทำให้เสียน้ำหนัก เพื่อทำนายความชื้นสมดุลที่อุณหภูมิต่าง ๆ ทำให้สามารถเลือกสภาพการเก็บที่เหมาะสม หาความหนาแน่นรวมเพื่อหาขนาดบรรจุ ทำให้สามารถเลือกภาชนะบรรจุที่เหมาะสมในการเก็บรักษา และข้อมูลค่าพารามิเตอร์อื่น ๆ ซึ่งมีความสำคัญมากในการออกแบบและควบคุมเครื่องอบแห้งเมล็ดงา และอาจจะใช้เป็นแนวทางในการหาความชื้นสมดุลและคุณสมบัติทางฟิสิกส์ของเมล็ดพืชต่าง ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2
ทฤษฎีและหลักการ

2.1 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับงา

2.1.1 ลักษณะงา

งาเป็นไม้ล้มลุก สูงประมาณ 30-100 ซม. ลำต้นเป็นเหลี่ยม มีร่องตามยาวของลำต้น มีขนปกคลุม ใบเป็นใบเดี่ยว เรียงตรงข้ามหรือสลับ ลักษณะใบเป็นรูปไข่ หรือรูปใบหอก กว้างประมาณ 2-5 ซม. ยาวประมาณ 6-10 ซม. ดอกเป็นดอกเดี่ยว ออกที่ซอกใบ กลีบดอกสีขาวหรือสีชมพู ผลเป็นผลแห้ง เมล็ดแบน รูปไข่ สีดำ น้ำตาลหรือสีขาว (กรมวิชาการเกษตร) ดังรูปที่ 2.1

รูปที่ 2.1 ลักษณะของดอกและต้นงา

2.1.2 ประโยชน์และคุณค่าทางโภชนาการของเมล็ดงา

เมล็ดงานอกจากจะใช้ประกอบอาหารบริโภคโดยตรงแล้ว ยังใช้สกัดน้ำมันเพื่อปรุงอาหาร ใช้เป็นเชื้อเพลิงจุดตะเกียง เป็นส่วนผสมของยา เครื่องสำอาง สบู่ น้ำหอม น้ำมันใส่ผมและอื่น ๆ ส่วนกากที่เหลือจากการสกัดน้ำมันสามารถใช้เป็นอาหารคนและสัตว์ได้ ดังนี้

2.1.2.1 เพื่อเป็นอาหาร

เมล็ดงาใช้ประกอบอาหารได้มากมายหลายชนิด เมล็ดงาที่คั่วหรืออบให้สุกจะมีกลิ่นหอมเฉพาะตัว ใช้โรยหน้าขนมปังหรือคุกกี้ต่าง ๆ ทำให้มีกลิ่นหอมน่ารับประทานนอกจากนี้ยังใช้เป็นส่วนประกอบของอาหารและขนมหลายชนิด เช่น กระยาสารท งาแผ่น ใช้โรยน้ำจิ้มต่าง ๆ เช่นน้ำจุ้มสุกี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ ห้ามนำไปใช้ในการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.2.2 ใช้สกัดน้ำมัน

น้ำมันที่สกัดจากเมล็ดงา เป็นน้ำมันพืชที่มีคุณภาพดีมาก ใช้เพื่อปรุงอาหารหรือเป็นส่วนประกอบของน้ำสลัด

2.1.2.3 กากงา

กากที่เหลือจากการสกัดน้ำมัน สามารถใช้เป็นอาหารของมนุษย์และสัตว์ได้เป็นอย่างดี เพราะมีปริมาณโปรตีนสูง และไขมันต่ำ โปรตีนในกากงาประกอบด้วย กรดอะมิโนที่จำเป็นต่อร่างกาย โดยเฉพาะมีกรดเมทโธโอนินสูง

2.1.2.4 เป็นสมุนไพรและยารักษาโรค

ในทางการแพทย์แผนปัจจุบัน ใช้น้ำมันงาเป็นส่วนผสมในยาลดปริมาณโคเลสเตอรอลในเลือด เพราะงามีกรดไขมันอิ่มตัวสูง ช่วยควบคุมระดับโคเลสเตอรอลไม่ให้มีมากเกินไป ป้องกันไม่ให้หลอดเลือดแข็งตัว ป้องกันโรคหัวใจและโรคเกี่ยวกับหลอดเลือกบางชนิด

2.1.2.5 อื่น ๆ

น้ำมันงาถูกนำไปใช้ในอุตสาหกรรมสิ่งพิมพ์ สี เครื่องสำอาง น้ำมันหล่อลื่น นอกจากนี้ยังมีการนำส่วนต่าง ๆ ของต้นงาไปใช้ประโยชน์ เช่น ในอูกันดาและแถวแอฟริกาตะวันตก ใช้ใบงาเป็นส่วนประกอบในการทำดอกไม้เพลิง คนอาฟริกันใช้ลำต้นและใบงาถูลำตัวของวัวและควายเพื่อให้เมือกหรือน้ำที่ไหลออกมาไปขังไล่แมลงพวก เทสซี่ฟลาย (tsetse fly) ที่เป็นพาหะนำโรคเหงาหลับ (sleeping sickness) ชาวพม่าใช้ขี้เถ้าของงาทำเป็นสบู่สำหรับซักเสื้อผ้า

2.1.3 ความสำคัญของงาต่อเศรษฐกิจ

งาเป็นพืชที่ปลูกง่าย มีการลงทุนน้อยและมีตลาดกว้าง เกษตรกรมักปลูกเป็นพืชเสริมรายได้ โดยมีการปลูกก่อนและหลังทำนา หรือหลังพืชไร่อื่น ๆ ที่เป็นหลัก ส่วนใหญ่เกษตรกจะปลูกโดยวิธีหว่านและไม่มีการดูแลรักษาที่ดี (จวงจันทร์ ดวงพัตรา, 2529)

ปัจจุบันนี้ความต้องการเมล็ดงาทั้งภายในและต่างประเทศมีปริมาณสูง ประเทศไทยผลิตงาได้ปีละประมาณ 30000 เมตริกตัน ผลผลิตประมาณร้อยละ 50 ส่งออกไปจำหน่ายยังต่างประเทศทำรายได้เข้าประเทศ ปีละไม่น้อยกว่า 200-300 ล้านบาท ตลาดส่งออกงาที่สำคัญของไทย ได้แก่ ไต้หวัน ญี่ปุ่น สิงคโปร์ มาเลเซีย และออสเตรเลีย

มาตรฐานในด้านคุณภาพเมล็ดงาดังนี้

1. เมล็ดงาควรเป็นสีเดียวกันมีขนาดเล็กเท่าเทียมกัน มีสิ่งเจือปนได้ไม่เกิน 5 เปอร์เซ็นต์
2. งาขาวควรมีความขาวระดับ 95-98 เปอร์เซ็นต์
3. งาดำควรมีลักษณะระดับเบิ้ล ฮัส (double husk)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. ความชื้นไม่เกิน 8 เปอร์เซ็นต์
5. เมล็ดที่นำมาสกัดน้ำมันควรมี acid value ไม่เกิน 3 หน่วย (unit)
6. ปราศจากสารอะฟลาทอกซิน (alflatoxin)

มาตรฐานอุตสาหกรรมเมล็ดงา มีดังนี้คือ

1. เมล็ดงา หมายถึง เมล็ดที่ได้จากพืช ที่มีชื่อทางพฤกษาศาสตร์ว่า ซีซามัม อินดิกัม ลินน์ (Sesamum indicum Linn.)

1.1 งาดำ หมายถึง เมล็ดงาที่เปลือกมีสีดำตามธรรมชาติ

1.2 งาขาว หมายถึง เมล็ดงาที่เปลือกมีสีขาว หรือสีขาวอมเหลือง หรือ สีขาวอมน้ำตาล ตามธรรมชาติ

2. งาขัด หมายถึง เมล็ดงาที่ขัดจนเหลือแต่เนื้อใน แล้วฟอกขาว

3.งาต่างชนิด หมายถึง งาดำ งาขาว งาขัด ชนิดใดชนิดหนึ่งหลายชนิดที่ปะปนอยู่ในเมล็ชนิดที่ระบุไว้ที่ฉลาก

4. สิ่งแปลกปลอม หมายถึง สิ่งที่ไม่ใช่ส่วนของเมล็ดงา เช่น กิ่ง ก้าน ใบ ฝัก ผง ดิน หิน ทราย

5. ชนิดของเมล็ดงาแบ่งออกเป็น 3 ชนิด คือ

1. งาดำ
2. งาขาว
3. งาขัด

คุณลักษณะที่ต้องการของเมล็ดงาต้องไม่มีกลิ่นอับ หืน และมีสีตามชนิดของเมล็ดงานั้นๆ การทดสอบให้ทำโดยการตรวจพินิจ

2.2 ความชื้น (Moisture content)

ความชื้นหรือ น้ำในเมล็ดพืชมี 2 ส่วน ส่วนแรกเป็นน้ำที่อยู่ในเซลล์ของเมล็ดพืช และส่วนที่สองคือน้ำที่อยู่รอบหรือระหว่างเซลล์เมล็ดพืช (สาทิป รัตนภาสกร, 2545) ทั้ง 2 ส่วนมีผลต่อความชื้นในอาหารโดยเฉพาะน้ำที่อยู่รอบเซลล์ เนื่องจากน้ำส่วนนี้มีผลต่อความปลอดภัยในการเก็บรักษาเมล็ดพืช ณ อุณหภูมิห้องได้

2.2.1 วิธีการหาค่าความชื้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การหาค่าความชื้นของเมล็ดพืช เช่น เมล็ดพืช มีอยู่หลายวิธี แต่ที่นิยมใช้มีอยู่ 2 วิธี คือ

การวัดค่าความชื้นสามารถวัดได้ตามมาตรฐานของ Association of Official Agricultural Chemists (AOAC) คือนำเอาเมล็ดพืชไปอบในตู้อบที่อุณหภูมิ 100 °C เป็นเวลา 72-96 ชั่วโมง ซึ่งน้ำหนักของเมล็ดพืชที่ผ่านการอบแห้ง ถือว่าเป็นน้ำหนักแห้ง (ค่านี้จะคงที่เสมอ) จากนั้นก็สามารถนำไปคำนวณหาค่าความชื้นได้จากสมการ

1) ความชื้นฐานแห้ง (Dry basis, db) คืออัตราส่วนของน้ำหนักที่อยู่ในเมล็ดพืชกับน้ำหนักแห้งของเมล็ดพืช ค่าน้ำหนักแห้งของเมล็ดพืชจะมีค่าคงที่เสมอ ดังนั้นในการคำนวณทางวิศวกรรมจะใช้ค่านี้ในการคำนวณ (สาทิป รัตนภาสกร, 2545)

2) ความชื้นฐานเปียก (Wet basis, wb) คืออัตราส่วนของน้ำหนักที่อยู่ในเมล็ดพืชกับน้ำหนักทั้งหมดของเมล็ดพืช โดยทั่วไปค่าความชื้นนี้มักแสดงเป็นเปอร์เซ็นต์และนิยมใช้ในทางการค้า ในการบอกค่าความชื้นของเมล็ดพืชนั้น ๆ (สาทิป รัตนภาสกร, 2545)

$$Md = \frac{(w - d)}{d} \qquad (2.2.1)$$

หรือ

$$Mw = \frac{(w - d)}{w} \qquad (2.2.2)$$

เมื่อ Md = ความชื้นมาตรฐานแห้ง, ทศนิยม

Mw = ความชื้นมาตรฐานเปียก, ทศนิยม

d = มวลของของแข็ง

w = มวลของของแข็งและน้ำ

(ข) การวัดความชื้นโดยใช้เครื่องวัดความชื้น

ซึ่งมีอยู่หลายแบบ โดยใช้หลักการต่าง ๆ กัน เช่น ใช้หลักการวัดการสะท้อนของคลื่นอินฟราเรด หรือใช้หลักการวัด Capacitance หรือใช้หลักการวัดความต้านทานไฟฟ้า เป็นต้น การวัดความชื้นโดยใช้เครื่องวัดนี้สามารถวัดได้รวดเร็ว แต่การวัดความชื้นแบบนี้จะต้องทำการสอบเทียบ กับ (Calibration) กับวิธีมาตรฐานด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น การใช้งานเพื่อการศึกษาต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3 ความชื้นสมดุล (Equilibrium Moisture Content, EMC)

เมื่อนำเมล็ดพืชไปเก็บภายใต้สภาวะอากาศคงที่เป็นระยะเวลานานพอ ซึ่งพบว่าความชื้นเมล็ดพืชจะมีค่าคงที่ ไม่ว่าความชื้นขณะก่อนเก็บจะมีค่าเท่าใดค่าความชื้นดังกล่าวเรียกว่าความชื้นสมดุล จากการศึกษาพบว่าความชื้นสมดุลของวัสดุชนิดใดชนิดหนึ่งที่เฉพาะเจาะจงจะขึ้นอยู่กับสภาพอากาศ คือ อุณหภูมิ และความชื้นสัมพัทธ์ ความชื้นสมดุลเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญ และจำเป็นต่อการวิเคราะห์การอบแห้ง และเก็บรักษาผลิตภัณฑ์เกษตรทั่ว ๆ ไป

เนื่องจากน้ำเป็นองค์ประกอบที่สำคัญในเมล็ดพืช และเป็นสาเหตุส่วนหนึ่งที่ทำให้เกิดการเน่าเสีย ถ้ามีน้ำมากเกินไป ดังนั้นในการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์ จึงจำเป็นต้องมีการอบแห้งเพื่อดึงน้ำออก การศึกษาถึงอัตราการอบแห้งจึงมีส่วนสำคัญในการที่จะออกแบบอุปกรณ์ที่เหมาะสมซึ่งจะช่วยให้สามารถเก็บรักษาผลิตภัณฑ์ไว้ได้นาน หรือเก็บไว้เพื่อรอการส่งออก โดยทั่วไปแล้วจะลดปริมาณน้ำออกจนให้เหลือต่ำกว่าร้อยละ 12-14 % ฐานเปียก (สาทิป รัตนภาสกร, 2545) ซึ่งการลดความชื้นลงหรือการอบแห้งนี้เองจะมีผลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงต่อผลิตภัณฑ์ เช่น เมล็ดหดตัว ปริมาตรมีการเปลี่ยนแปลง ความหนาแน่นปรากฏ สัดส่วนช่องว่างอากาศ และความร้อนจำเพาะเปลี่ยนไป ดังนั้น การศึกษาพารามิเตอร์เหล่านี้จึงเป็นสิ่งจำเป็นต่อการวิเคราะห์การอบแห้ง

ได้มีผู้คิดรูปแบบสมการความชื้นสมดุลต่าง ๆ ทั้งทางทฤษฎี สมการกึ่งทฤษฎี (Semi-Empirical) และสมการที่ได้จากการทดลอง (Empirical) สำหรับอธิบายความชื้นสมดุลของเมล็ดพืชตลอดช่วงความชื้นสัมพัทธ์ 0-100 % ที่อุณหภูมิต่าง ๆ ได้แก่ สมการทางทฤษฎีของ Kelvin (1871), Langmuir (1918), Brunauer, Emmette and Teller (BET) (1938) และ Harkins and Jura (ชอบ ลายทอง, 2530)

สมการทางทฤษฎีที่มีอยู่ในปัจจุบันยังไม่มีสมการใดที่สามารถอธิบายความชื้นสมดุลได้อย่างถูกต้องตลอดช่วงของความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศที่ต้องการพิจารณา สมการทางทฤษฎีที่จัดว่าสามารถใช้อธิบายความชื้นสมดุลได้ดีพอสมควรคือสมการของ Chung & Pfost (1967)

$$\ln(rh) = \frac{-A}{R_o T} \exp(-BMe) \qquad (2.3.1)$$

เมื่อ Me = ความชื้นสมดุล (จุดทศนิยมฐานแห้ง)

T = อุณหภูมิ

C, E, F = ค่าคงที่สมดุล

rh = ความชื้นสัมพัทธ์ (จุดทศนิยม)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมการทางทฤษฎีให้ผลได้จำกัดจึงได้มีการสร้างสมการกึ่งทฤษฎี (Semi Empirical) และสมการที่ได้จากการทดลองขึ้น สมการกึ่งทฤษฎีที่รู้จักกันดี คือสมการของ Henderson (1952)

$$1-rh=\exp\left(-KT\left(M_{eq}\right)^{N}\right) \qquad (2.3.2)$$

เมื่อ K, N = ค่าคงที่ของเมล็ดพืชแต่ละชนิด ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ

M_{eq} = ค่าความชื้นสมดุล(%)

rh = ความชื้นสัมพัทธ์ (จุดทศนิยม)

T = อุณหภูมิสัมบูรณ์

พบว่าสมาการ Chung & Pfost สามารถอธิบายค่าความสัมพันธ์ของความชื้นสมดุลกับความชื้นสัมพัทธ์ในช่วง 20-90% ได้ดีที่สุด ส่วนสมการของ Henderson มีความเหมาะสมสำหรับวัสดุพวกแป้ง (สาทิป รัตนภาสกร, 2545)

Hall and Rodriquez-Arias (1985) พบว่าสมการของ Henderson สามารถอธิบาย ความชื้นสมดุล ของข้าวโพดได้ดีจนถึงความชื้นสัมพัทธ์

Day and Nelson (1985) ได้ดัดแปลงสมการของ Henderson โดยการกระจาย k, n เป็น function ของอุณหภูมิ ซึ่งสมการที่พัฒนานี้สามารถใช้อธิบายความชื้นสมดุลของกระบวนการคายความชื้นของข้าวสาลีได้ดีจนถึงความชื้นสัมพัทธ์ 70%

นอกจากนี้ได้มีการพัฒนาสมการกึ่งทฤษฎีอีกหลายคน เช่น Strohman and Yoerger (1967), Chen (1969), Chen and Clayton (1971), Dunstan (1972), Zuritz (1979)

สมการที่ได้จากการทดลองที่พัฒนาขึ้นสำหรับเมล็ดพืชชนิดต่าง ๆ เช่น Haynes (1961), Bakker-Arkema (1974), Kachru and Matthes (1976) and Patranon R. (1980) ซึ่งสมการเหล่านี้ใช้ได้ดีในช่วงที่ทดลองเท่านั้น

2.4 วิธีการหาค่าความชื้นสมดุล

วิธีในการหาค่าความชื้นสมดุลมีอยู่ 2 วิธี ได้แก่ วิธีสถิตและวิธีจลน์ (ชอบ ลายทอง, 2530)

2.4.1 วิธีสถิต

วิธีสถิตเป็นวิธีที่ได้รับความนิยมอย่างแพร่หลายมาก่อน หลักการคือจะทำให้ความชื้นของเมล็ดพืชเข้าสู่สมดุลกับอากาศรอบๆ ซึ่งอยู่นิ่ง วิธีสถิตนี้แบ่งออกเป็น 2 แบบคือหาความชื้นของเมล็ดพืชในภาชนะปิด โดยควบคุมความชื้นสัมพัทธ์และอุณหภูมิให้คงที่ ซึ่งการควบคุมความชื้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัมพัทธ์ให้คงที่นี้จะใช้สารละลายเกลืออิ่มตัวหรือสารละลายกรด (ชอบ ลายทอง, 2530) และชั่งน้ำหนักของเมล็ดพืชจนกระทั่งน้ำหนักของเมล็ดพืชไม่เปลี่ยนแปลงซึ่งเมื่อน้ำหนักไม่เปลี่ยนแปลงก็แสดงว่าเมล็ดพืชเข้าสู่สมดุลแล้ว และความชื้นของเมล็ดพืชขณะนั้นก็คือความชื้นสมดุลนั่นเอง วิธีแบบนี้เป็นวิธีที่ยอมรับได้ แต่มีข้อเสียคือใช้เวลานานหลายวันหรือหลายอาทิตย์ในการทำให้เมล็ดพืชเข้าสู่สมดุลย์ และที่ความชื้นสัมพัทธ์สูงมากกว่า 80% อาจเกิดเชื้อราขึ้นที่ผิวของเมล็ดก่อนที่จะถึงจุดสมดุลทำให้ความชื้นสมดุลย์มีค่ามากกว่าความเป็นจริง

วิธีสถิตอีกแบบหนึ่งเป็นการวัดค่าความชื้นสัมพัทธ์ที่อยู่ในสมดุลกับเมล็ดพืชที่ทราบค่าความชื้นภายในภาชนะปิดที่ควบคุมอุณหภูมิให้คงที่ ซึ่งความชื้นสัมพัทธ์นี้สามารถวัดได้โดยใช้ไฮโกรมิเตอร์ เมื่อความชื้นสัมพัทธ์มีค่าคงที่ก็แสดงว่าเมล็ดพืชเข้าสู่สมดุลแล้ว วิธีแบบนี้ถ้าจำกัดปริมาณอากาศรอบ ๆ เมล็ดพืชให้น้อยที่สุดจะช่วยให้ ถึงจุดสมดุลในระยะเวลาที่รวดเร็วขึ้นกว่าแบบแรก

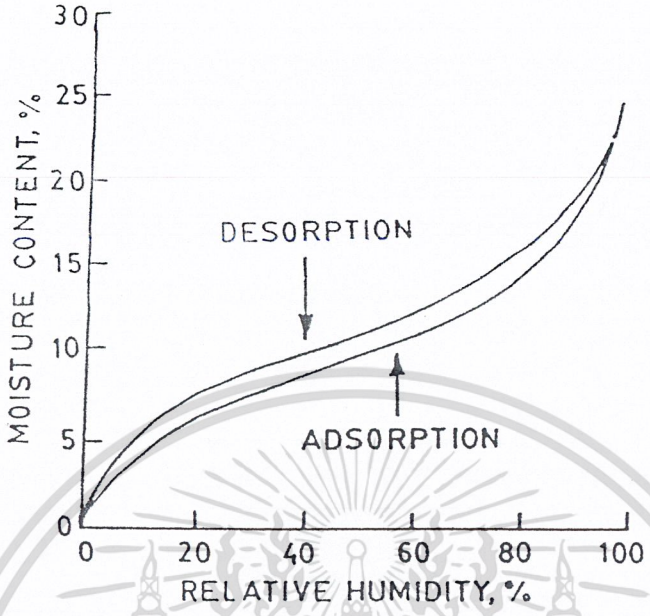
2.4.2 วิธีจลน์

วิธีจลน์เป็นวิธีที่ปรับปรุงมากจากวิธีสถิต มีลักษณะเหมือนกับวิธีสถิตต่างกันตรงที่ วิธีจลน์อากาศรอบ ๆ เมล็ดพืชจะมีการเคลื่อนที่ในขณะที่วิธีสถิตอากาศจะอยู่นิ่ง จึงทำให้วิธีจลน์เมล็ดพืชเข้าสู่สมดุลเร็วกว่าวิธีสถิตมาก คือใช้เวลาประมาณ 1-2 วันหรือน้อยกว่า แต่มีข้อเสียคือการควบคุมสภาวะของอากาศซึ่งเคลื่อนที่ให้มีอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์คงที่ มีความยุ่งยากและซับซ้อน

2.5 ฮีสเตอร์รีซีส

การที่เมล็ดพืชเข้าสู่ความชื้นสมดุลโดยการคายความชื้นหรือดูดความชื้นค่าความชื้นสมดุลอาจจะต่างกัน ปรากฏการณ์นี้เรียกว่า ฮีสเตอร์รีซีส โดยปกติค่าความชื้นสมดุลของเมล็ดพืชที่ได้จากกระบวนการคายความชื้นให้กับอากาศรอบ ๆ จะมีค่ามากกว่ากระบวนการดูดซับความชื้นจากอากาศรอบ ๆ ซึ่งสาเหตุทำให้เกิดปรากฏการณ์ฮีสเตอร์รีซีสนี้ปัจจุบันยังไม่เป็นที่ทราบแน่ชัด มีแต่เพียงสมมุติฐานที่ตั้งขึ้นมาว่า เมล็ดพืชเป็นวัสดุที่มีโครงสร้างภายในรูพรุน เมื่อเมล็ดพืชคายความชื้นให้กับอากาศรอบ ๆ ความชื้นที่มีอยู่ภายในเมล็ดพืชจะแพร่ออกมาที่ผิวได้น้อย น้ำจึงอยู่ภายในเมล็ดมาก ทำให้ความชื้นสูง และในขณะที่เมล็ดพืชดูดซับความชื้นจากอากาศรอบ ๆ ความชื้นจะแพร่เข้าไปในเมล็ดพืชได้น้อยเช่นกัน จึงทำให้ความชื้นมีค่าน้อยไปด้วย หรือมีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างภายในของรูพรุนระหว่างการคายหรือดูดความชื้น ดังรูปที่ 2.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.2 ปรากฏการณ์ฮีสเตอร์รีซิส

2.6 ความหนาแน่น (Bulk Density)

เนื่องจากความหนาแน่นของวัสดุมีค่าเท่ากับมวลต่อหน่วยปริมาตร ปริมาตรสามารถหาได้โดยใช้หลักการของการแทนที่ของเหลว และมวลใช้ชั่ง เครื่องมือที่ใช้หาความหนาแน่นรวมของวัสดุโดยตรงได้แก่ hectoliter (ปานมนัส พิมพ์เพ็ญ และสาทิป, 2538)

$$\text{ความหนาแน่นปรากฏ} = \frac{\text{มวลรวมของวัสดุ}}{\text{ปริมาตรของภาชนะบรรจุ}} \qquad (2.6.1)$$

ความหนาแน่นรวมเพิ่มขึ้นเมื่อความชื้นเพิ่มขึ้น (ปานมนัส พิมพ์เพ็ญ สาทิป, 2538)

2.7 เปอร์เซ็นต์ช่องว่างอากาศ (Polosity)

เปอร์เซ็นต์ช่องว่างอากาศหมายถึงค่าที่แสดงให้เห็นถึงปริมาณช่องว่างที่มีอยู่ในกองวัสดุปริมาณมวล เช่น เมล็ดพืช เมล็ดพืช เปอร์เซ็นต์ช่องว่างอากาศ มีค่าเท่ากับสัดส่วนของปริมาตรอากาศต่อปริมาตรรวม เขียนเป็นสมการได้ดังนี้ (ปานมนัส พิมพ์เพ็ญ สาทิป, 2538)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเอกสารนี้ทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\text{เปอร์เซ็นต์ช่องว่างอากาศ} = \frac{\text{ปริมาตรอากาศแทรกอยู่ตามรูพรุน}}{\text{ปริมาตรรวมของวัสดุ}} \times 100 \qquad (2.7.1)$$

ค่าเปอร์เซ็นต์ช่องว่างอากาศนี้จะเปลี่ยนแปลงตามรูปร่าง ขนาด และลักษณะผิวของวัสดุ ความสัมพันธ์ระหว่าง เปอร์เซ็นต์ช่องว่างอากาศ ความหนาแน่นรวม และความหนาแน่นเนื้อสามารถอธิบายได้ดังนี้

$$\text{เปอร์เซ็นต์ช่องว่างอากาศ} = \frac{\text{ปริมาตรอากาศแทรกอยู่ตามรูพรุน}}{\text{ปริมาตรรวมของวัสดุ}} \times 100$$

$$= \frac{\text{ปริมาตรรวมของวัสดุ} - \text{ปริมาตรวัสดุ}}{\text{ปริมาตรรวมของวัสดุ}} \times 100$$

$$= 1 - \frac{\text{ปริมาตรวัสดุ}}{\text{ปริมาตรรวม}} \qquad (2.7.2)$$

มวลของเนื้อวัสดุและมวลของปริมาตรรวมคือค่าเดียวกัน ดังนั้น

$$\text{เปอร์เซ็นต์ช่องว่างอากาศ} = 1 - \frac{\text{ความหนาแน่นรวม}}{\text{ความหนาแน่นเนื้อ}}$$

$$= 1 - \frac{\rho_b}{\rho_a}$$

$$= \frac{\rho_a - \rho_b}{\rho_a} \qquad (2.7.3)$$

เมื่อ ρ_a = ความหนาแน่นเนื้อ (kg/m^3)

ρ_b = ความหนาแน่นรวม (kg/m^3)

2.8 กลไกการอบแห้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระบวนการอบแห้งส่วนมากใช้อากาศเป็นตัวกลางในการถ่ายเทความร้อนจากอากาศไปยังผลิตภัณฑ์และการถ่ายเทมวลความชื้นจากผลิตภัณฑ์ไปยังอากาศ ความร้อนจากอากาศที่ผลิตภัณฑ์ได้รับส่วนใหญ่จะถูกใช้ในการระเหยในการระเหยน้ำจากผลิตภัณฑ์ อัตราการระเหยน้ำหรืออัตราการอบแห้งจะคงที่ในช่วงระยะเวลาหนึ่ง หลังจากนั้นจะลดลงโดยทั่วไปอัตราการอบแห้งของผลิตภัณฑ์หนึ่ง ๆ จะสัมพันธ์กับการอบแห้งในรูปของสมการอบแห้งชั้นบาง (รัชนี สุวรรณี และอังคณา, 2537)

การศึกษากลไกในการเปลี่ยนแปลงความชื้นกับเวลาที่ใช้ในการอบแห้งและอัตราการอบแห้งของวัสดุใดๆ สามารถดูได้จากกราฟแสดงลักษณะเฉพาะของการอบแห้งของวัสดุชนิดนั้นๆ (Drying Characteristic Curve) ซึ่งโดยทั่วไปแสดงเป็น 2 ลักษณะคือ

- กราฟแสดงความชื้นที่เปลี่ยนไปเทียบกับเวลา
- กราฟแสดงอัตราการอบแห้ง

กรณีแรกดูได้จาก รูปที่ 2.3 ส่วนอัตราการอบแห้งแสดงใน รูปที่ 2.4 จะเห็นได้ว่าสามารถแบ่งช่วงของการอบแห้งออกเป็น 3 ช่วง คือ

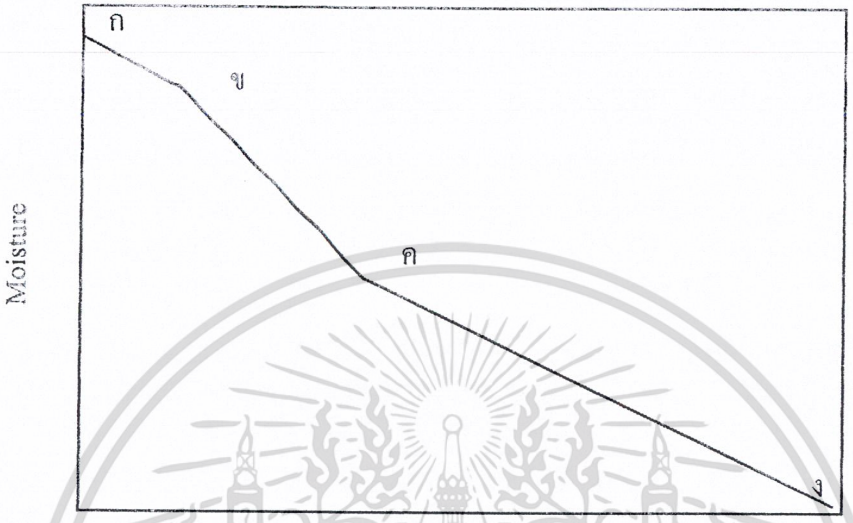
2.8.1 ช่วงการให้ความร้อนเบื้องต้นแก่วัสดุ ได้แก่ ช่วง กข ในกราฟช่วงนี้สภาพที่ผิวหน้าวัสดุจะเปียกชื้นมากทำให้อากาศร้อนได้สัมผัสกับผิวน้ำอย่างเต็มที่ อัตราการอบแห้งเริ่มมีค่าสูงมากขึ้นเนื่องจากอุณหภูมิของน้ำและวัสดุเริ่มสูงขึ้น ซึ่งตามทฤษฎีแล้วอุณหภูมิของวัสดุในช่วงนี้จะมีค่าใกล้เคียงหรือเท่ากับอุณหภูมิกระเปาะเปียกของอากาศร้อน

2.8.2 ช่วงอัตราการอบแห้งที่คงที่ ได้แก่ช่วง ขค ในกราฟช่วงนี้อุณหภูมิของวัสดุจะมีค่าคงที่ตลอด ซึ่งทำให้ความร้อนทั้งหมดที่วัสดุได้รับถูกใช้ไปในการระเหยความชื้นออกจากวัสดุเท่านั้น การกระจายความชื้นที่ผิวหน้าวัสดุจะมีค่าคงที่นั้น คืออัตราการเคลื่อนที่ของความชื้นภายในเนื้อวัสดุมาที่ผิวหน้าจะมีค่าเท่ากับอัตราการระเหยความชื้นจากผิวหน้าวัสดุออกไป ดังนั้นอัตราการอบแห้งวัสดุในช่วงนี้จึงมีค่าคงที่และขึ้นอยู่กับอัตราการถ่ายเทความร้อนที่ผิวหน้าวัสดุเท่านั้น

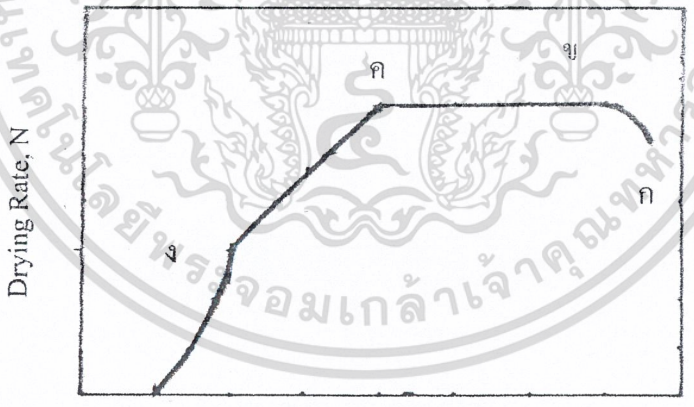
2.8.3 ช่วงอัตราการอบแห้งลดลง ได้แก่ช่วง คง ในกราฟช่วงนี้ความชื้นในรูปของน้ำที่ผิวของวัสดุจะระเหยหมดไปเนื่องจากอัตราการเคลื่อนที่ของความชื้นภายในเนื้อวัสดุมาที่ผิวหน้าวัสดุเพราะถูกควบคุมด้วยอัตราการแพร่ของน้ำจากภายในมาสู่ภายนอก ค่าความชื้นที่เริ่มเปลี่ยนจากช่วงอัตรการอบแห้งคงที่ไปเป็นช่วงอัตราการอบแห้งลดลง เรียกว่าความชื้นวิกฤติ X_c (Critical Moisture) และค่าความชื้นสุดท้ายที่ทำให้อัตราการอบแห้งเป็นศูนย์ เรียกว่า ความชื้นสมดุล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(Equilibrium Moisture) แสดงด้วยจุด ค และ ง ซึ่งค่านี้เป็นค่าความชื้นของวัสดุที่คงเหลืออยู่ได้ภายหลังป่านการอบแห้งภายใต้สภาวะอากาศคงที่หนึ่ง ๆ



รูปที่ 2.3 กราฟแสดงความชื้นที่เปลี่ยนไปเทียบกับเวลา



รูปที่ 2.4 กราฟแสดงอัตราการอบแห้ง

2.9 สมการการอบแห้ง

2.9.1 สมการการอบแห้งกึ่งทฤษฎี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Hukill (1947) ได้เสนอสมการที่เป็นพื้นฐานในการอบแห้งชั้นบาง (Analogy to Newton's law of cooling) ดังแสดงได้ดังนี้คือ

$$\frac{dM}{dt} = -K\left(M - M_{eq}\right) \tag{2.9.1}$$

เมื่อ K = ค่าคงที่ของการอบแห้ง

t = เวลาที่ใช้ในการอบแห้ง, h

M_{eq} = ความชื้นสมดุลมาตรฐานแห้ง, จุดทศนิยม

M = ความชื้นเฉลี่ยมาตรฐานแห้ง, จุดทศนิยม

อินทิเกรต สมการ (1) ได้ดังนี้

$$MR = \exp(-Kt) \tag{2.9.2}$$

$$MR = \frac{M - M_{eq}}{M_{in} - M_{eq}} \tag{2.9.3}$$

M_{in} = ความชื้นเริ่มต้นมาตรฐานแห้ง, จุดทศนิยม

MR = อัตราส่วนความชื้น, จุดทศนิยม

M = ความชื้นเฉลี่ยของวัสดุมาตรฐานแห้ง, จุดทศนิยม

2.9.2 สมการการอบแห้งแบบเอมไพริเคิล

ในการอบแห้งนั้นสมการ Single และสมการของ Page (1949) สามารถที่จะอธิบายอัตราการอบแห้งของเมล็ดพืชได้ดีดังสมการ (Bala, 1997)

สมการ Single

$$MR = ae^{-kt} \tag{2.9.4}$$

เมื่อ t = เวลาที่ใช้ในการอบแห้ง, (นาที)

a, k = ค่าคงที่ในการอบแห้งขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมการของ Page (1949)

$$MR = e^{-kt^{u}} \qquad (2.9.5)$$

เมื่อ t = เวลาที่ใช้ในการอบแห้ง, (นาที)

k, u = ค่าคงที่ในการอบแห้งขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ

2.10 ความร้อนจำเพาะ (Bala, 1997)

ปริมาณความร้อนที่ต้องการในการทำให้วัสดุที่มีมวลหนึ่งหน่วยมีอุณหภูมิสูงขึ้นหนึ่งองศา ค่าความร้อนจำเพาะมีค่าไม่คงที่แต่จะมีค่าแปรเปลี่ยนไปเล็กน้อยตามอุณหภูมิที่เปลี่ยนไป

จากกฎข้อที่หนึ่งของเทอร์โมไดนามิกส์

$$\Delta U = Q + W \qquad (2.10.1)$$

เนื่องจากไม่มี work, W และความร้อนสูญเสีย, Q

$$\because \quad \Delta U = 0$$

แต่ $$H = U + PV$$

$$\Delta H = \Delta U + P\Delta V + V\Delta P \qquad (2.10.2)$$

เนื่องจากว่า P และ V คงที่ ทำให้ $\Delta V = \Delta P = 0$

$$\because \quad \Delta H = \Delta U = 0$$

หรือ $$\sum \Delta H = 0 \qquad (2.10.3)$$

$$\Delta H_{\text{น้ำ}} + \Delta H_{\text{งา}} + \Delta H_{\text{แคลอรี่มิเตอร์}} = 0$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$m_w C_{pw}\left(T_{eq}-T_{wi}\right)+m_p C_p\left(T_{eq}-T_{pi}\right)+m_c C_c\left(T_{eq}-T_{wi}\right)=0 \qquad (2.10.4)$$

เมื่อ ΔU = พลังงานภายใน

Q = พลังงานความร้อนที่สูญเสียไป

W = งานที่เกิดขึ้นในระบบ

H = เอนธาลปี

V = ปริมาตร

m_w = มวลของน้ำ, kg

C_{pw} = ความร้อนจำเพาะของน้ำ, kJ/kg $^{\circ}$C

m_p = มวลของงาขัด

C_p = ความร้อนจำเพาะของงาขัด, kJ/kg $^{\circ}$C

m_c = มวลของแคลอรีมิเตอร์, kg

C_c = ความร้อนจำเพาะของแคลอรีมิเตอร์, kJ/kg $^{\circ}$C

T_{eq} = อุณหภูมิของน้ำขณะที่อยู่ในสมดุล, $^{\circ}$C

T_{wi} = อุณหภูมิเริ่มต้นของน้ำ, $^{\circ}$C

T_{pi} = อุณหภูมิเริ่มต้นของงาขัด, $^{\circ}$C

2.11 งานวิจัยที่มีผู้ทดลองลักษณะใกล้เคียงกัน

- ชอบ ลายทอง (2530) ได้ศึกษาหาความชื้นสมดุลของข้าวเปลือกเมล็ดยาวพันธุ์ กข 7 และพันธุ์ กข 23 ที่อุณหภูมิ 30,40 และ 50 C และความชื้นสัมพัทธ์ระหว่าง 10-90% โดยวิธีสถิต และจากข้อมูลที่ได้นี้ได้ทำการศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิ และพันธุ์ข้าวที่มีต่อความชื้นสมดุลและการเกิด hysteresis ได้สร้างสมการแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แบบสมการของ Henderson และ chung & pfost และหาค่าความหนาแน่นปรากฏ เปอร์เซ็นต์ช่องว่างของอากาศ และความร้อนจำเพาะในช่วงของความชื้นระหว่าง 6-23 % มาตรฐานแห้ง

- นิรชรา, สมชาติ และทิพาพร (2533) ได้ศึกษาถึงผลของอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงอัตราการเหลืองของข้าว พร้อมทั้งหาสมการเอมไพริเคิลแสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต่าง ๆ โดยใช้ตู้อบไฟฟ้าในการควบคุมอุณหภูมิ และเลือกใช้สารละลายเกลืออิ่มตัวเพื่อควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ต่าง ๆ แล้วจึงนำข้าวที่ได้จากการทดลองมาวิเคราะห์ ความชื้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ศิวะ อัจฉริยวิริยะ และสมชาย โสภณรณฤทธิ์ (2532) ได้ศึกษาหาพารามิเตอร์ในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการอบแห้งกล้วยน้ำว้าโดยการทดลองหาความชื้นสมดุลซึ่งอุณหภูมิระหว่าง 40-65 °C และความชื้นสัมพัทธ์ระหว่าง 10-90% โดยใช้สารละลายเกลืออิ่มตัวควบคุมความชื้นสัมพัทธ์อากาศและใช้ตู้อบควบคุมอุณหภูมิพบว่าที่ความชื้นสัมพัทธ์อากาศคงที่ ความชื้นสมดุลจะต่ำลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น และที่อุณหภูมิคงที่ ความชื้นสมดุลจะเพิ่มขึ้นเล็กน้อย

- สมชาติ โสภณรณฤทธิ์ และวารุณี เตีย (2532) ศึกษาหาพารามิเตอร์ที่จำเป็นสำหรับวิเคราะห์การอบแห้งข้าวโพด เช่น สมการอบแห้งชั้นบาง ความชื้นสมดุลความร้อนจำเพาะ ความหนาแน่นปรากฏ และสัดส่วนช่องว่างอากาศโดยทำการทดลอง และพัฒนาสมการทางคณิตศาสตร์ที่สามารถใช้อธิบายพารามิเตอร์ดังกล่าวได้อย่างเหมาะสมโดยพบว่าแบบจำลองของ Henderson และ Chung and pfost สามารถอธิบายความชื้นสมดุลได้ดี อุณหภูมิมีอิทธิพลต่อความชื้นสมดุลอย่างเด่นชัด ชนิดของความชื้นสมดุลที่มีต่อพันธุ์ข้าวโพดที่อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์คงที่หนึ่ง ๆ พบว่าการคายความชื้นให้ค่าความชื้นสมดุลสูงกว่าการดูดซับความชื้น

- ศิวะ อัจฉริยวิริยะ และสมชาติ โสภณรณฤทธิ์ (2533) ได้ทำการศึกษาพารามิเตอร์สำหรับวิเคราะห์การอบแห้งมะละกอแช่อิ่ม จากการทดลองหาความหนาแน่นและความร้อนจำเพาะพบว่าความหนาแน่นและความร้อนจำเพาะเพิ่มขึ้นในลักษณะเชิงเส้นเมื่อความชื้นเพิ่มขึ้น

-รัชนี, สุวรรณี และอังคณา ลีลาเลิศอำไพ (2537) ได้ศึกษาค่าพารามิเตอร์ในการออบแบบเครื่องอบแห้งพริกไทย ได้ศึกษาความหนาแน่นรวม หาความชื้นสมดุลที่อุณหภูมิ และความชื้นสัมพันธ์ของอากาศต่าง ๆ อัตราการอบแห้งที่อุณหภูมิ และความเร็วลมต่างๆ

- วิชัย เพชรดาษดา (2540) ศึกษา อิทธิพลของตัวแปร ที่มีผลต่อการอบแห้ง ต้นหอมสับและพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับทำนายอัตราการอบแห้งได้นำผลการเปรียบเทียบแบบจำลอง ที่นำมาใช้ทำนายอัตราการอบแห้ง ปรากฏว่า รูปแบบสมการของ Page สามารถทำนายได้ใกล้เคียงกับข้อมูลการทดลองว่าควรใช้อุณหภูมิในการอบแห้งไม่เกิน 75 °C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
49839

บทที่ 3
วัสดุและวิธีการทดลอง

3.1 การเตรียมตัวอย่าง (sample)

ในการทดลองครั้งนี้ใช้เมล็ดงาดำยี่ห้อไร่ทิพย์ จะต้องมีการเตรียมตัวอย่างสำหรับการทดลองก่อน เริ่มแรกจะนำเมล็ดงามาทำความสะอาดโดยล้างด้วยน้ำเพื่อชะล้างไม่ให้มีสิ่งเจือปนต่าง ๆ เช่น ทราย กรวด เปลือกของเมล็ดงา ออกให้หมด และลอกเปลือกเมล็ดงาดำออกด้วยเครื่องลอกเปลือกเมล็ดงา

3.1.1การเตรียมตัวอย่างที่ใช้สำหรับทดลองการดูดซับความชื้น

นำเมล็ดงาขัดจำนวน 3 กิโลกรัม แช่น้ำประมาณ 12 วันแล้วนำไปผึ่งลมประมาณ 2 ชั่วโมง แล้วจึงนำไปใส่กระป๋อง หรือ ขวดที่มีฝาปิด 3 กระป๋อง จากนั้นนำกระป๋องทั้ง 3 ไปใส่ไว้ในตู้ควบคุมอุณหภูมิที่ 5 $^{\circ}C$ ประมาณ 10 วันเขย่ากระป๋องทุกวัน เพื่อให้ความชื้นกระจายเข้าไปในเมล็ดได้อย่างทั่วถึง

3.1.2การเตรียมตัวอย่างที่ใช้สำหรับทดลองการคายความชื้น

นำเมล็ดงาขัดจำนวน 3 กิโลกรัม ไปหาความชื้น และนำไปใส่กระป๋อง หรือ ขวดที่มีฝาปิด 3 กระป๋อง จากนั้นนำไปวางไว้ในตู้ที่มีอุณหภูมิ 5 $^{\circ}C$ เป็นเวลา 10 วันเพื่อให้ความชื้นกระจายได้อย่างทั่วถึง

3.1.3การเตรียมตัวอย่างที่ใช้สำหรับทดลองความหนาแน่นรวมและเปอร์เซ็นต์ช่องว่างอากาศ

นำเมล็ดงาขัดแล้วจำนวน 5 กิโลกรัม ที่ได้จากการแช่น้ำประมาณ 12 วัน แล้วนำมาผึ่งลมเป็นเวลา 10 ชั่วโมง เพื่อให้ความชื้นภายในเมล็ดงาสมดุล

3.1.4การเตรียมตัวอย่างที่ใช้สำหรับการหาอัตราการอบแห้ง

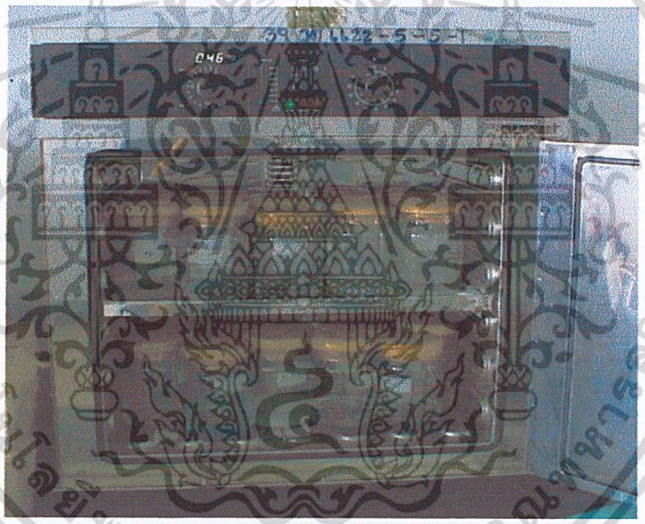
นำเมล็ดงาขัดจำนวน 5 กิโลกรัม ที่ได้จากการแช่น้ำประมาณ 12 วัน นำไปหาความชื้นตามวิธีมาตรฐาน แล้วจึงนำไปทดลองหาอัตราการอบแห้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

3.2.1อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองความชื้นสมดุล

1. เมล็ดงาขัดจำนวนหนึ่ง
2. กะละมัง หรือ ถังที่ใช้แช่เมล็ดงาขัด
3. กระป๋องตวง 1 ลิตร 3 กระป๋อง
4. ขวดที่มีฝาปิด 6 ขวด
5. ตู้อบไฟฟ้าที่สามารถควบคุมอุณหภูมิความเที่ยงตรง ± 1 °C และเวลาได้ดังรูป 3.1
6. เครื่องชั่งน้ำหนัก
7. สารละลายเกลือที่ความเข้มข้นต่าง ๆ



รูปที่ 3.1 ตู้อบไฟฟ้า

3.2.2 การทดลองหาความหนาแน่น และเปอร์เซ็นต์ช่องว่างในอากาศ

1. เมล็ดงาขัดตรียมไว้เพื่อใช้ในการทดลอง
2. กระป๋องตวง 1 ลิตร 3 กระป๋อง
3. ไม้ปาดหน้ากระป๋อง
4. ตู้อบไฟฟ้าที่สามารถควบคุมอุณหภูมิ และเวลาได้
5. เครื่องชั่งน้ำหนัก
6. น้ำมันพืช

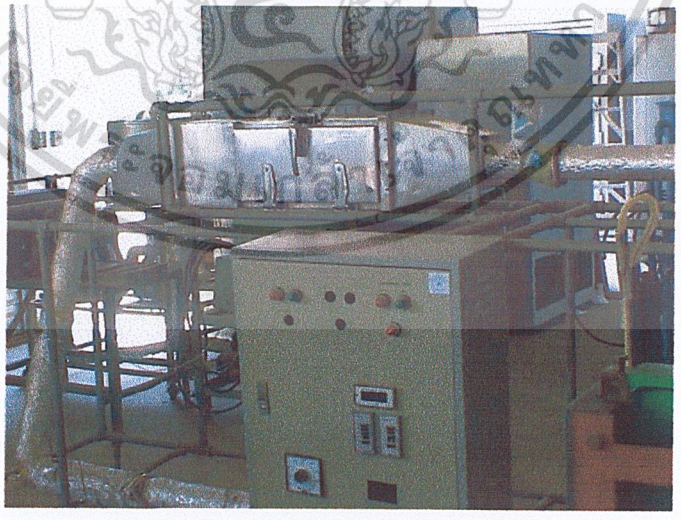
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.3 การทดลองหาความร้อนจำเพาะ

1. เมล็ดงาขัดที่เตรียมไว้เพื่อใช้ในการทดลอง
2. แคลอรีมิเตอร์
3. เทอร์โมมิเตอร์
4. น้ำกลั่น
5. ตาชั่ง
6. เตาไฟฟ้า
7. บีกเกอร์

3.2.4 การทดลองหาอัตราการอบแห้ง

1. เมล็ดงาขัดที่เตรียมไว้เพื่อใช้ในการทดลอง
2. เครื่องอบแห้ง ดังรูปที่ 3.2
3. เครื่องปรับรอบมอเตอร์
4. ตัวควบคุมอุณหภูมิของลมร้อน (Thermostat)
5. เครื่องชั่งน้ำหนัก
6. นาฬิกาจับเวลา



รูปที่ 3.2 เครื่องอบแห้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

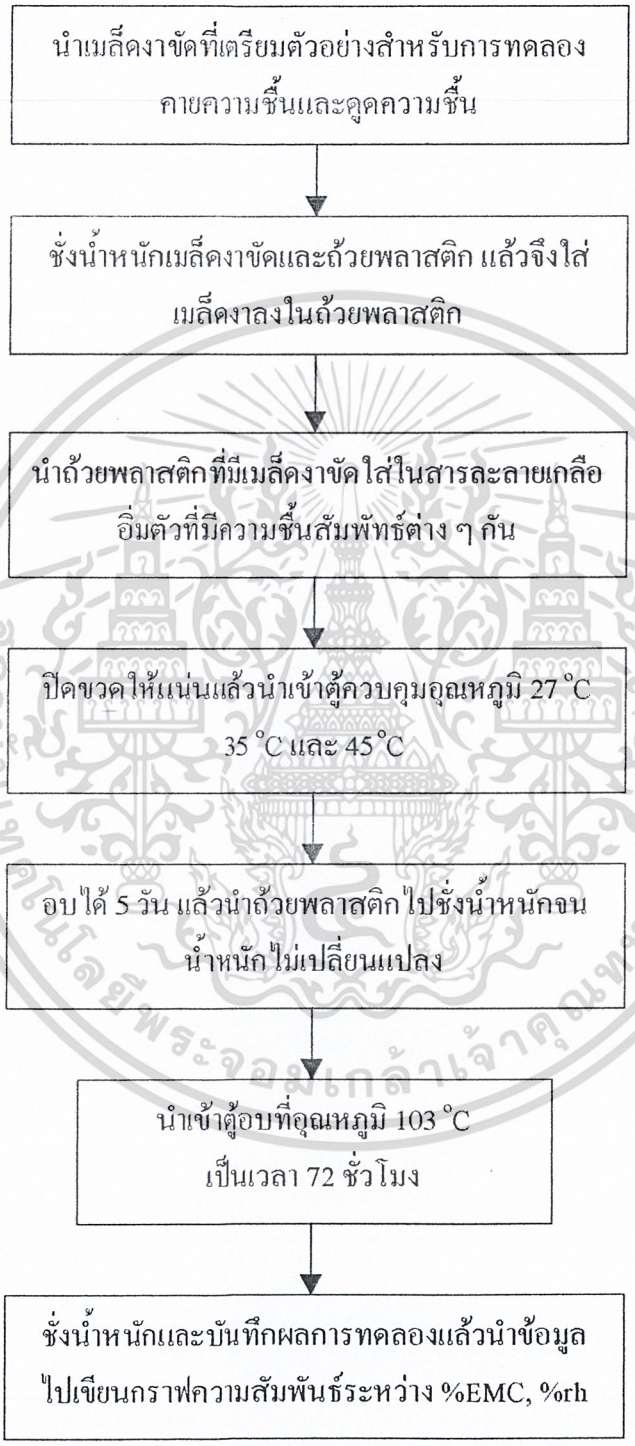
3.2 วิธีการทดลอง

3.3.1 หาความชื้นสมดุล

1. เตรียมตัวอย่างงาขัดที่ใช้สำหรับการทดลองการดูดซับความชื้น
2. ชั่งน้ำหนักถ้วยพลาสติก
3. นำเมล็ดงาขัดที่เตรียมได้ประมาณ 15-20 g มาใส่ในถ้วยพลาสติก (โดยน้ำหนักของตัวอย่างจะต้องมีค่ามากกว่าน้ำหนักของถ้วยพลาสติกอย่างน้อย 10 เท่า)
4. ชั่งน้ำหนักรวมอีกครั้งแล้วนำไปบรรจุลงในขวดปริมาตร หรือ กระป๋องที่มีสารละลายเกลืออิ่มตัวเพื่อควบคุม เปอร์เซ็นต์ความชื้นสัมพัทธ์ ดังภาคผนวก ค.
5. ปิดฝาขวดให้แน่น และถ้วยพลาสติกที่ใส่งาขัด ควรที่อยู่สูงจากสารละลายเกลืออิ่มตัวประมาณ 15-20 mm โดยใช้เชือกผูกถ้วยพลาสติกเพื่อไม่ให้ตัวอย่างหล่นลงไปในสารละลาย
6. ใส่ตู้อบไฟฟ้า ปรับให้มีอุณหภูมิ 25 °C เมื่ออบได้ 5 วัน ก็นำถ้วยพลาสติกแต่ละอันไปชั่งน้ำหนักอย่างรวดเร็ว ทำเช่นนี้ไปทุกวันจนกว่าน้ำหนักจะไม่เปลี่ยนแปลง
7. นำเมล็ดงาขัดที่สมดุลแล้วไปเข้าตู้อบไฟฟ้าที่ 103 °C 72 ชั่วโมง หลังจากนั้นนำมาชั่งน้ำหนักอย่างรวดเร็ว แล้วหาค่าความชื้นสมดุลจากสมการ 2.2.1
8. ทำการทดลองซ้ำแต่เปลี่ยนอุณหภูมิเป็น 35 และ 45 °C ตามลำดับ
9. บันทึกค่าที่ได้ลงตารางผลการทดลอง
10. เขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง %EMC, %rh และอุณหภูมิที่ทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สรุปขั้นตอนการทดลองหาความชื้นสมดุล



3.3.2 วิธีการทดลองหาความหนาแน่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. หาปริมาตรขวดที่ใช้ในการทดลองแต่ละขวด และน้ำหนักของขวดแต่ละขวด
2. นำเอาตัวอย่างของเมล็ดงาขัดที่มีความชื้น 11.2,20.50,26.28,10.60,66.99 และ 98.99%

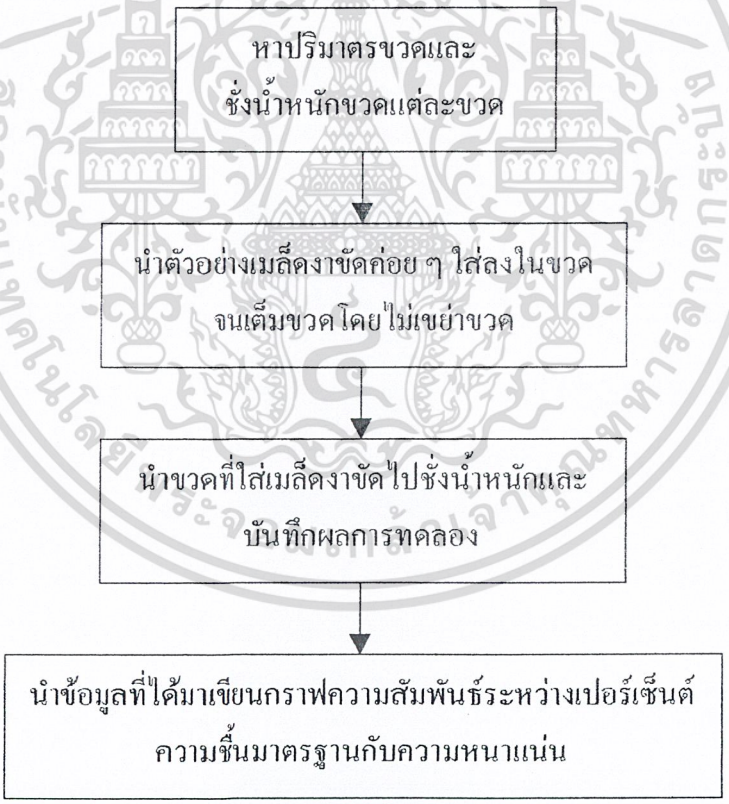
ไปใส่ในขวดแต่ละขวด ซึ่งวิธีใส่ตัวอย่างเข้าไปในขวดนี้จะต้องค่อย ๆ ใส่ทีละน้อย ๆ จนเต็มขวด โดยไม่มีการเขย่าขวด

3. นำเอาขวดที่มีตัวอย่างบรรจุอยู่จากข้อ (2) ไปชั่งน้ำหนักอีกครั้งหนึ่งบันทึกค่าที่ได้ไว้
4. คำนวณหาความหนาแน่นรวมของวัสดุปริมาณมวลจากสูตร

$$\text{ความหนาแน่น} = \frac{\text{มวลรวมของวัสดุ}}{\text{ปริมาตรของภาชนะบรรจุ}}$$

5. เขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง % ความชื้นมาตรฐาน กับ ความหนาแน่น

สรุปขั้นตอนการทดลองหาความหนาแน่นของเมล็ดงาขัด



3.3.3 วิธีการทดลองหาเปอร์เซ็นต์ช่องว่างของอากาศ

1. หาปริมาตรขวดที่ใช้ในการทดลองแต่ละอัน โดยการใส่น้ำให้เต็มแล้วนำเอาน้ำไปตวงหาปริมาตร บันทึกค่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. นำเอาตัวอย่างที่มีความชื้น 11.2,20.50,26.28,10.60,66.99 และ 98.99% ใส่ในขวด

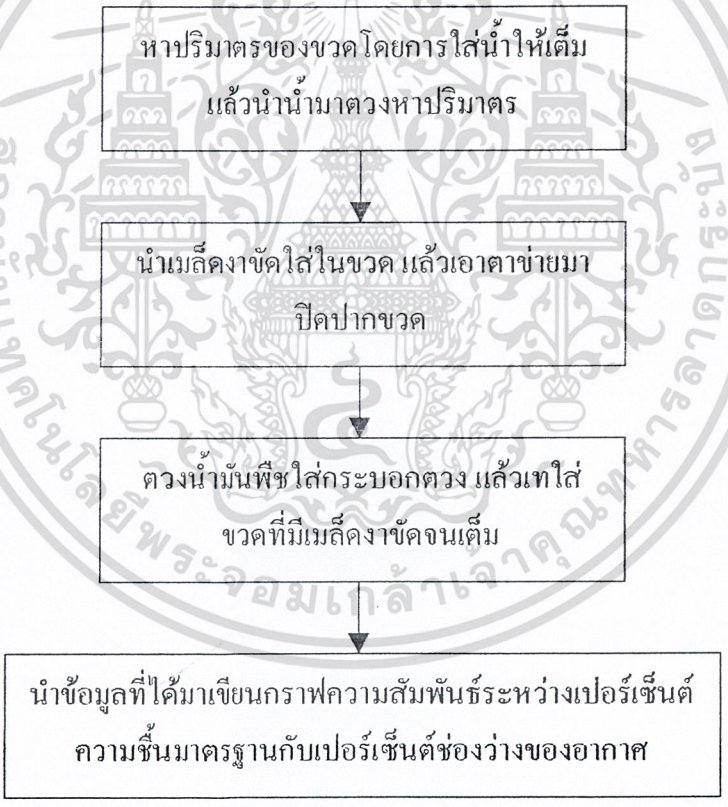
3. นำเอาตาข่ายมาครอบปากขวด แล้วใช้ยางรัดมัดให้แน่น

4. ตวงน้ำมันพืชใส่กระบอกตวง จากนั้นก็นำไปเทใส่ในขวดจากข้อ 3 อย่างช้า ๆ จนกระทั่งเต็ม บันทึกปริมาณน้ำมันพืชที่ใช้

5. เขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ความชื้นมาตรฐานกับเปอร์เซ็นต์ช่องว่างของอากาศ

$$\text{เปอร์เซ็นต์ช่องว่างอากาศ} = \frac{\text{ปริมาตรน้ำมันพืช}}{\text{ปริมาตรรวม}} \times 100$$

สรุปขั้นตอนการทดลองหาเปอร์เซ็นต์ช่องว่างของอากาศของเมล็ดงาขัด



3.3.4 วิธีการทดลองหาอัตราการอบแห้ง

1. เตรียมตัวอย่างงาขัดตามความชื้นที่ใช้ในการทดลอง
2. ชั่งน้ำหนักถ้วยพลาสติกที่ใส่งาขัด
3. นำไปวางบนถาดอบแห้งขนาด 20 × 20 cm
4. ควบคุมอุณหภูมิของลมร้อนให้ค่า 50 °C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. ปรับความเร็วลมที่ใช้ในการอบแห้งโดยวัดความเร็วลม 2 ด้าน (ด้านหน้าและด้านข้าง) ด้านละ 20 จุดตลอดพื้นที่หน้าตัดของถาดอบแห้ง จนกระทั่งมีค่าเฉลี่ยทั้ง 2 ด้านคือ 0.25, 0.31 และ 0.43 m/s ตามลำดับ

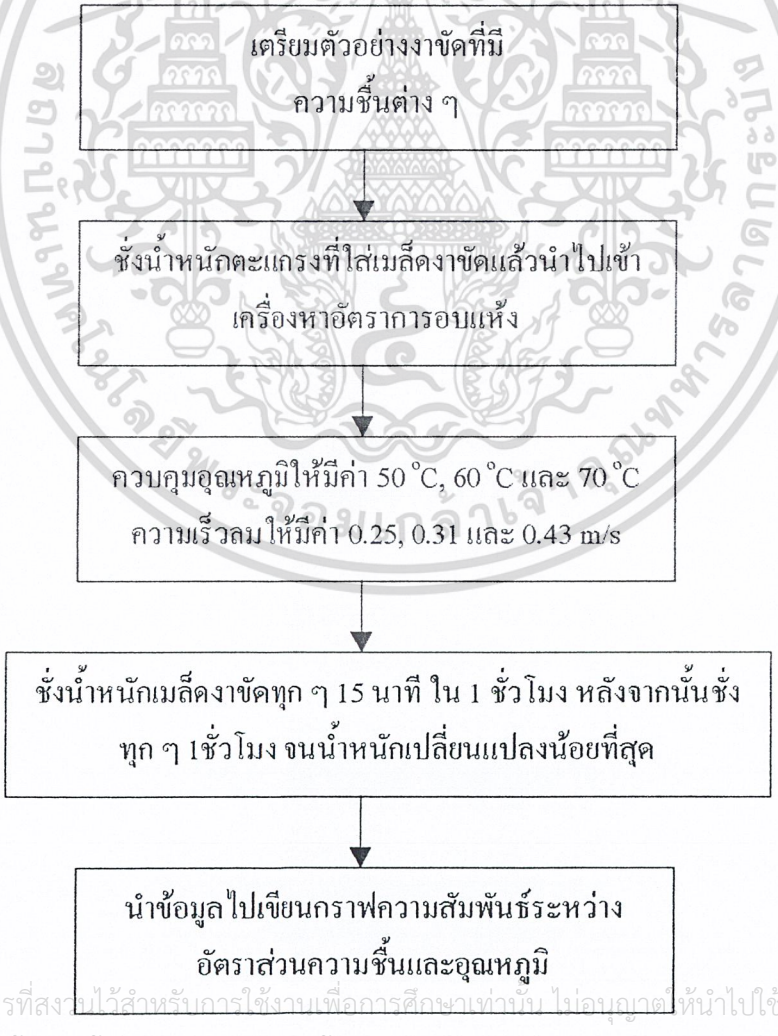
6. ชั่งน้ำหนักเมล็ดงาขัดทุก ๆ 15 นาที ใน 1 ชั่วโมง หลังจากนั้นชั่ง ทุก ๆ 1 ชั่วโมง โดยต้องรีบชั่งทันที จนน้ำหนักเปลี่ยนแปลงน้อยมากจึงหยุด บันทึกเวลาทุกครั้งที่ชั่งน้ำหนัก

7. ทำการทดลองซ้ำโดยเปลี่ยนค่าของอุณหภูมิเป็น 60 และ 70 °C ตามลำดับ

8. หาความชื้นตามมาตรฐานแห้ง (Md) และความชื้นมาตรฐานเปียก (Mw) เพื่อใช้ในการหาค่าอัตราส่วนความชื้น (MR)

9. นำข้อมูลไปเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นและอุณหภูมิ

สรุปขั้นตอนหาอัตราการอบแห้ง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.5 วิธีการทดลองหาความร้อนจำเพาะ

ขั้นตอนแรก เพื่อหาค่าความจุความร้อนของคาลอรีมิเตอร์ ($m_c c_c$)

1. ชั่งคาลอรีมิเตอร์, มวล m_c และเติมน้ำบริสุทธิ์ ซึ่งวัดอุณหภูมิได้ T_i ลงในคาลอรีมิเตอร์ ประมาณ 1/3 ของปริมาตรคาลอรีมิเตอร์ จากนั้นนำไปชั่งได้มวลรวม m_1
2. เติมน้ำร้อน ซึ่งวัดอุณหภูมิได้ 60 องศาเซลเซียส ลงในคาลอรีมิเตอร์ประมาณ 1/3 ของปริมาตรคาลอรีมิเตอร์และนำไปชั่งได้มวลรวม m_2
3. ใช้ก้านกวนให้ของเหลวในคาลอรีมิเตอร์ผสมกันอ่านค่าอุณหภูมิผสมจากเทอร์โมมิเตอร์ที่เสียบอยู่ในคาลอรีมิเตอร์ได้ T_{eq}
4. คำนวณหาค่าความจุความร้อนของคาลอรีมิเตอร์ จากสมการ (Bala B.K, 1997)

$$m_c c_c = \frac{(m_2 - m_1)c_{pw}(T_2 - T_{eq}) - (m_1 - m_c)c_{pw}(T_{eq} - T_i)}{T_{eq} - T_i} \quad (3.3.5.1)$$

เมื่อ c_c = ความจุความร้อนของคาลอรีมิเตอร์, J/kg.K

m_c = มวลของแคลอรีมิเตอร์, kg

m_1 = มวลรวมน้ำและคาลอรีมิเตอร์, kg

m_2 = มวลรวมน้ำร้อนและคาลอรีมิเตอร์, kg

T_2 = อุณหภูมิเมื่อเติมน้ำร้อนเท่ากับ 60 °C

T_i = อุณหภูมิเริ่มต้นของคาลอรีมิเตอร์, °C

T_{eq} = อุณหภูมิของน้ำขณะที่อยู่ในสมดุล, °C

(กำหนดให้ อุณหภูมิของน้ำ และคาลอรีมิเตอร์มีอุณหภูมิเท่ากัน)

C_{pw} = ความจุความร้อนของน้ำ = 4.187 J/g .K)

ขั้นตอนที่สอง

1. ชั่งตัวอย่างของเมล็ดงาขัดที่ความชื้น 99.55, 86.04, 71.79, 66.39, 62.52, 53.12, 44.68, 36.39, 25.52, 13.89 และ 4.8 % มาตรฐานแห้งต้องการหาความร้อนจำเพาะ ประมาณ 120 กรัม (m_p) และวัดอุณหภูมิ (T_{pi})
2. ชั่งน้ำกลั่นประมาณ 150 กรัม (m_w) และวัดอุณหภูมิ (T_{wi})
3. นำเอาน้ำกลั่นไปต้มบนเตาไฟฟ้าจนมีอุณหภูมิประมาณ 60 °C วัดอุณหภูมิ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. เทน้ำร้อนและตัวอย่างลงไปในถังของแคลอรีมิเตอร์แล้วปิดฝาให้แน่น ทิ้งไว้ประมาณ 3-5 นาที วัดอุณหภูมิ (T_{eq})

5. เขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความชื้น กับ ความร้อนจำเพาะ

$$C_p = \frac{m_w C_{pw}\left(T_{eq} - T_{wi}\right) + m_c C_c\left(T_{eq} - T_{wi}\right)}{m_p\left(T_{pi} - T_{eq}\right)}$$

เมื่อ C_{pw} = ความร้อนจำเพาะของน้ำ, kJ/kg °C

m_p = มวลของงาขัด

C_p = ความร้อนจำเพาะของงาขัด, kJ/kg °C

m_c = มวลของแคลอรีมิเตอร์, kg

C_c = ความร้อนจำเพาะของแคลอรีมิเตอร์, kJ/kg °C

T_{eq} = อุณหภูมิของน้ำขณะที่อยู่ในสมดุล, °C

T_w = อุณหภูมิเริ่มต้นของน้ำ, °C

T_{pi} = อุณหภูมิเริ่มต้นของงาขัด, °C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4
ผลการทดลองและวิเคราะห์ข้อมูล

4.1 ผลการทดลองหาความชื้นสมดุล

ในการทดลองหาความชื้นสมดุลของเมล็ดงาจะทดลองที่อุณหภูมิ 27, 35 และ 45 °C และความชื้นสัมพัทธ์ระหว่าง 10-90 % โดยใช้สารละลายเกลืออิ่มตัวเป็นตัวควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ ใช้ตู้อบไฟฟ้าเป็นตัวควบคุมอุณหภูมิ และในการทดลองนี้ได้หาความชื้นสมดุล (คายความชื้นและดูดความชื้น) รวมทั้งพิจารณาถึงอิทธิพลของอุณหภูมิอีกด้วยโดยได้นำข้อมูลการทดลองแบบคายความชื้นและแบบดูดความชื้นมาสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ผลการทดลองหาความชื้นสมดุลแสดงในภาคผนวก ข-1 ถึง ข-6

4.1.1 ผลการเปรียบเทียบสมการความชื้นสมดุล

ได้มีผู้คิดรูปแบบสมการความชื้นสมดุลต่าง ๆ ทั้งทางทฤษฎีและเอมไพริเคิลสำหรับอธิบายความชื้นสมดุลของเมล็ดพืชตลอดช่วงความชื้นสัมพัทธ์ 0-90 % ที่อุณหภูมิต่าง ๆ

สมการเอมไพริคเคิลที่น่าสนใจ และสามารถใช้อธิบายความชื้นสมดุลของเมล็ดพืชได้ค่อนข้างดีมาก คือ สมการของ Henderson, 1952 และสมการของ Chung & Pfost, 1967

เมื่อนำผลการทดลองมาหาความสัมพันธ์กับกราฟโดยใช้สมการรูปแบบต่าง ๆ ตามที่กล่าวมาข้างต้นจะสามารถหาค่าพารามิเตอร์ในสมการได้ ทำให้สมการสามารถใช้ทำนายการเปลี่ยนแปลงของความชื้นสมดุลของเมล็ดงาภายใต้สภาวะหลาย ๆ แบบได้จากการเปรียบเทียบผลที่ได้จากการทดลองและสมการความชื้นสมดุลแบบต่าง ๆ ดังรูปที่ 4.1-4.3 พบว่าแบบจำลองของ Henderson, 1952 สามารถอธิบายการทดลองได้ดีกว่าแบบจำลองของ Chung & Pfost, 1967 ได้แสดงให้เห็นถึงค่าคงที่ที่ได้จากการทดลองหาความชื้นสมดุลเมื่อใช้รูปแบบสมการของ Henderson, 1952 และ Chung & Pfost, 1967 ได้นำข้อมูลมาสร้างสมการทางคณิตศาสตร์ได้ดังนี้

- เมื่อไม่คิดอิทธิพลของ hysteresis

สมการของ Henderson

$$1-rh=\exp(-9.71E-4T(Meq^{2.017})) \qquad (4.1)$$

Coefficient of determination 0.961

สมการของ Chung & Pfost

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\ln(rh) = \frac{-3442.916}{R_0 T} \exp(-0.70148\,Meq) \quad (4.2)$$

Coefficient of determination 0.966

- เมื่อคิดอิทธิพลของ hysteresis

สมการของ Henderson

การคายความชื้น $1 - rh = \exp(-6.37E-4T(Meq^{2.215}))$ (4.3)

Coefficient of determination 0.977

การดูดความชื้น $1 - rh = \exp(-1.261E-3T(Meq^{1.933}))$ (4.4)

Coefficient of determination 0.96

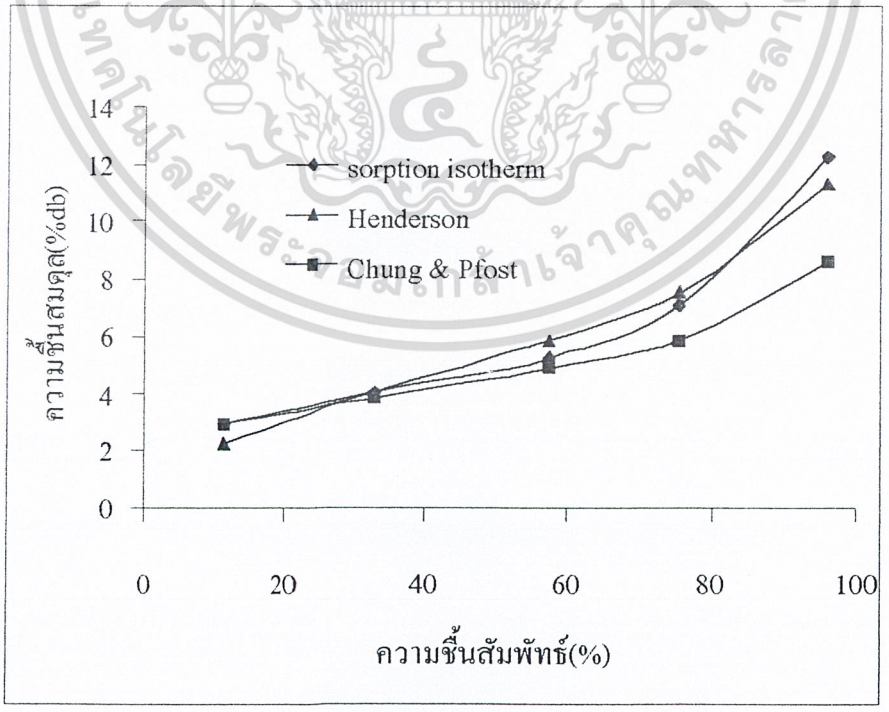
สมการของ Chung & Pfost

การคายความชื้น $\ln(rh) = \frac{-3008.77}{R_0 T} \exp(-0.6152\,Meq)$ (4.5)

Coefficient of determination 0.98

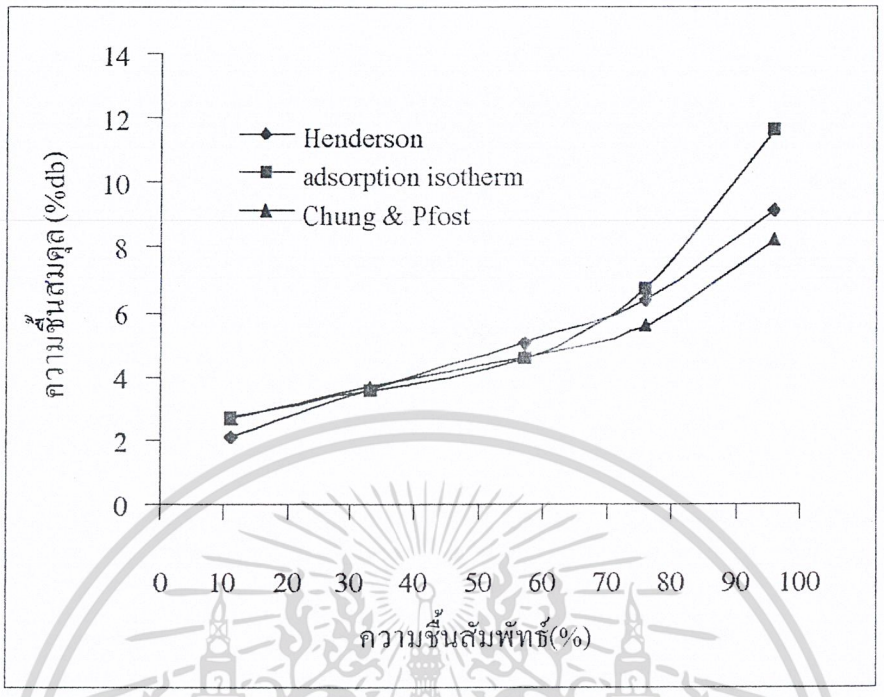
การดูดความชื้น $\ln(rh) = \frac{-4856.979}{R_0 T} \exp(-0.86098\,Meq)$ (4.6)

Coefficient of determination 0.984

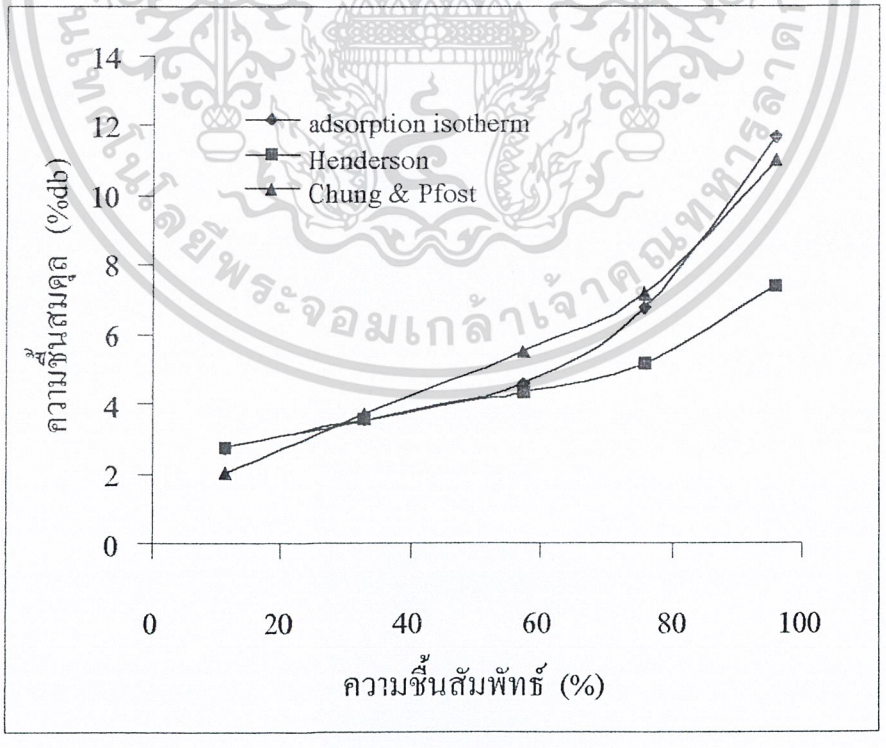


รูปที่ 4.1 การเปรียบเทียบสมการรูปแบบต่าง ๆ กับผลการทดลองความชื้นสมดุลของเมล็ดงาขัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.2 การเปรียบเทียบสมการรูปแบบต่าง ๆ กับผลการทดลองความชื้นสมดุลแบบคายความชื้นของเมล็ดงาขัด



รูปที่ 4.3 การเปรียบเทียบสมการรูปแบบต่าง ๆ กับผลการทดลองความชื้นสมดุลแบบดูดความชื้นของเมล็ดงาขัด

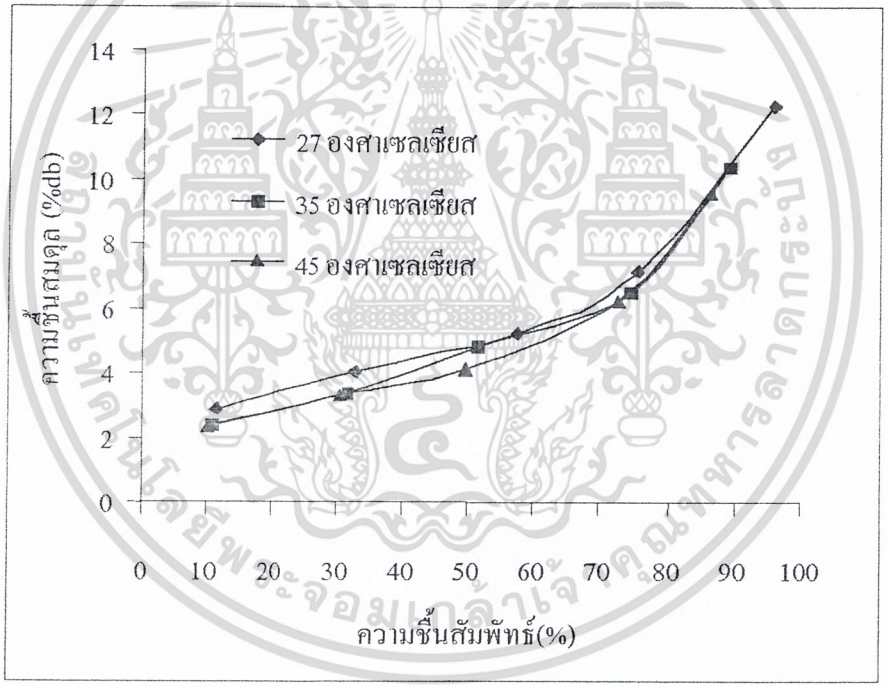
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งไม่อนุญาตให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.2 อิทธิพลของอุณหภูมิ

จากการศึกษาพบว่าอุณหภูมิมีอิทธิพลต่อความชื้นสมดุลอย่างเด่นชัด นั่นคือ ที่ความชื้นสัมพัทธ์คงที่ เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นค่าความชื้นสมดุลจะลดลงดังแสดงดังรูปที่ 4.4-4.5

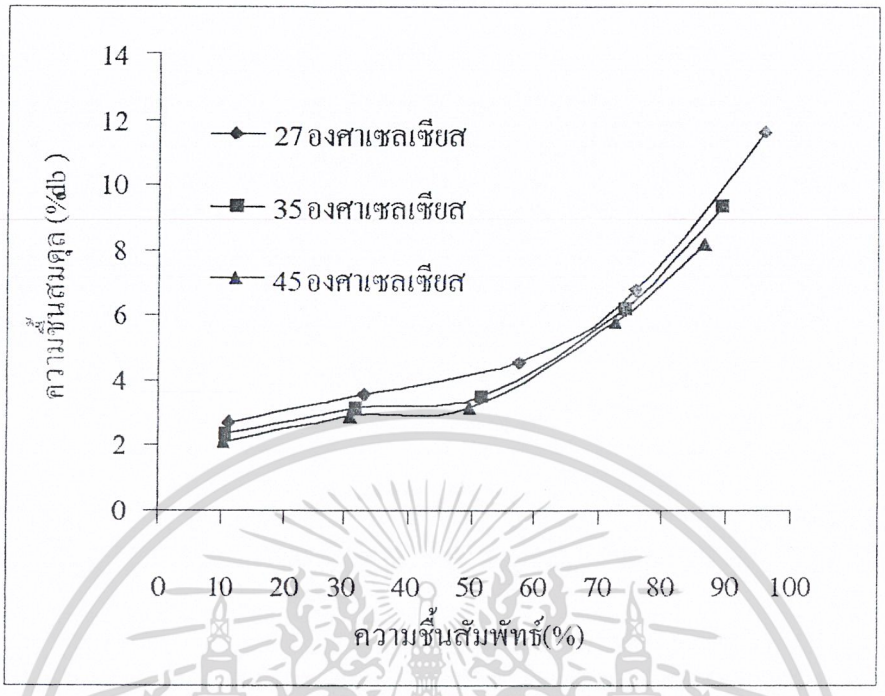
4.1.3 อิทธิพลของชนิดของความชื้นสมดุล

จากการศึกษาพบว่าอิทธิพลของชนิดของความชื้นสมดุลที่อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์คงที่หนึ่ง ๆ พบว่า การคายความชื้น (Desorption) ให้ค่าความชื้นสมดุลสูงกว่าการดูดความชื้น (Adsorption) แสดงดังรูปที่ 4.6-4.8

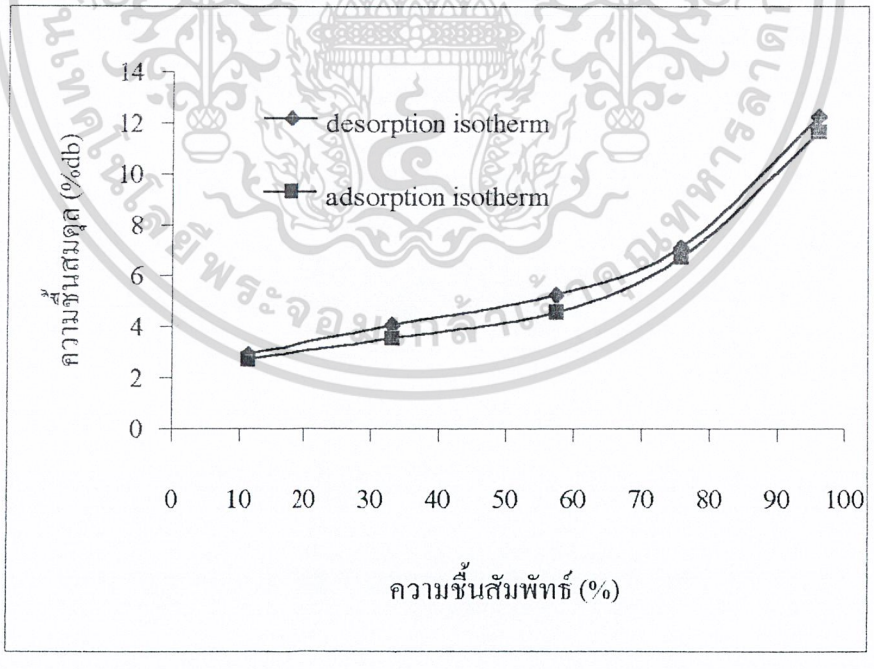


รูปที่ 4.4 แสดงการคายความชื้นที่อุณหภูมิต่าง ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

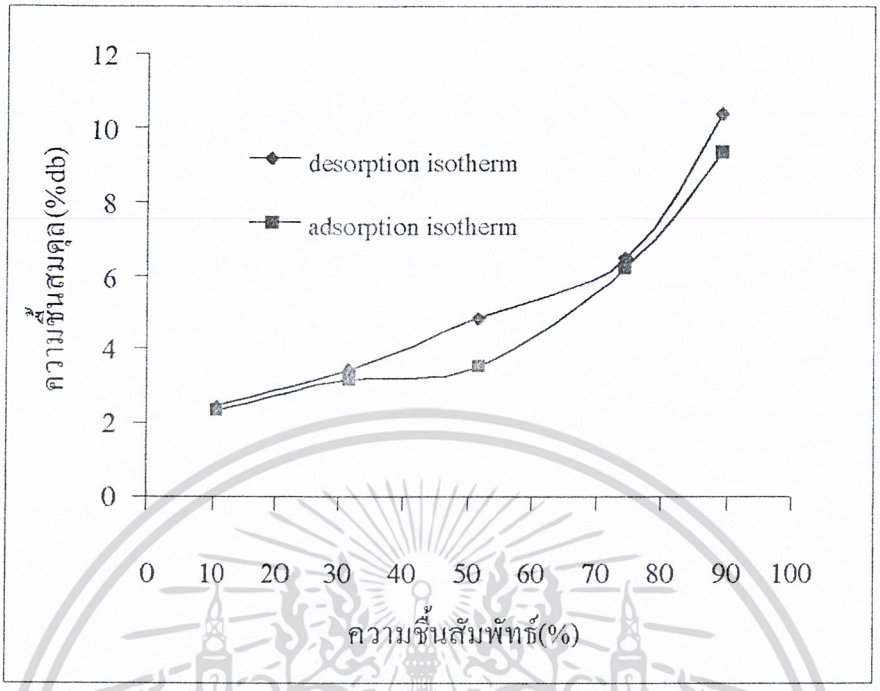


รูปที่ 4.5 แสดงการดูดความชื้นที่อุณหภูมิต่าง ๆ

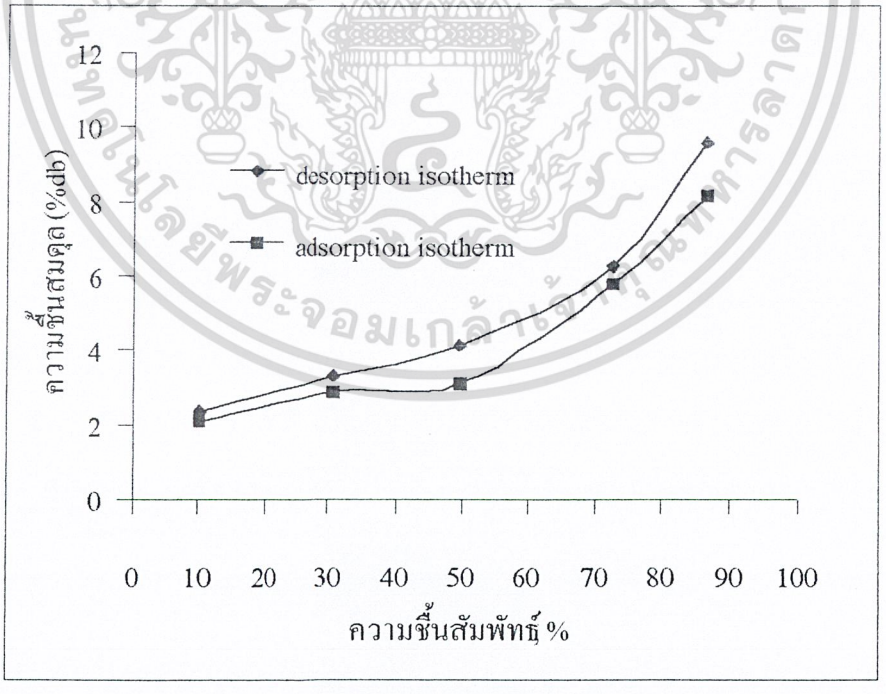


รูปที่ 4.6 ความชื้นสมดุลของเมล็ดงาขัดที่อุณหภูมิ 27 °C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.7 ความชื้นสมดุลของเมล็ดงาขัดที่อุณหภูมิ 35 °C



รูปที่ 4.8 ความชื้นสมดุลของเมล็ดงาขัดที่อุณหภูมิ 45 °C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

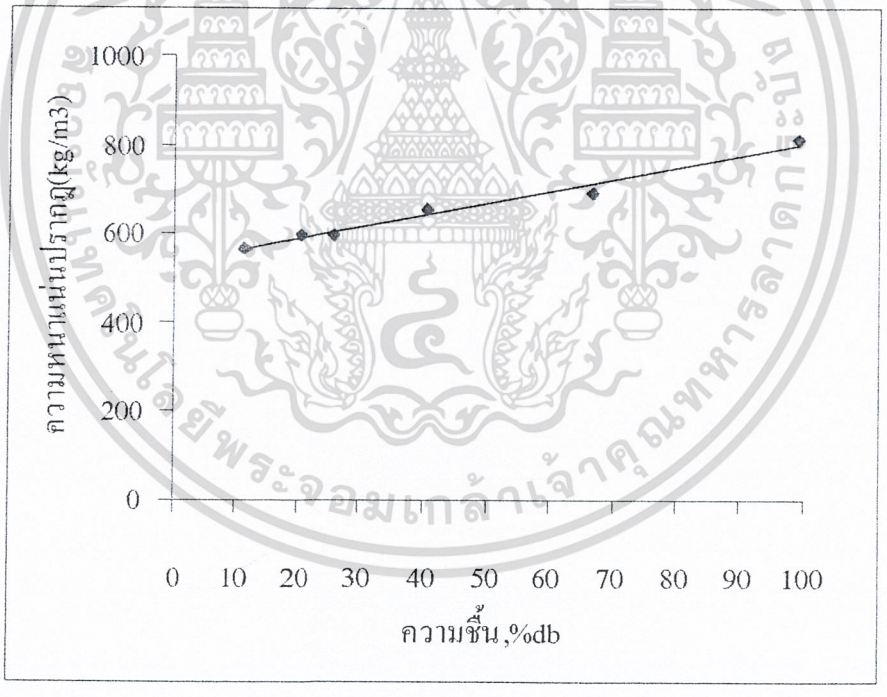
4.2 ผลการทดลองหาความหนาแน่นปรากฏ

จากผลการทดลองแสดงดังตาราง ข-7 พบว่าเมื่อความชื้นของเมล็ดงาขัดเพิ่มขึ้น ค่าความหนาแน่นปรากฏจะมีค่าเพิ่มขึ้นด้วย ดังรูป 4.9 จากการนำข้อมูลมาหาความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นปรากฏกับความชื้นของเมล็ดงาขัดได้ผลดังนี้

$$\rho = 2.6668M + 534.69 \qquad R^2 = 0.976 \qquad (4.7)$$

เมื่อ ρ คือความหนาแน่นปรากฏ, kg/m^3

M คือความชื้นเมล็ดงาขัด, %มาตรฐานแห้ง



รูปที่ 4.9 ความหนาแน่นปรากฏของเมล็ดงาขัดที่ความชื้นต่าง ๆ

4.3 ผลการทดลองหาเปอร์เซ็นต์ช่องว่าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

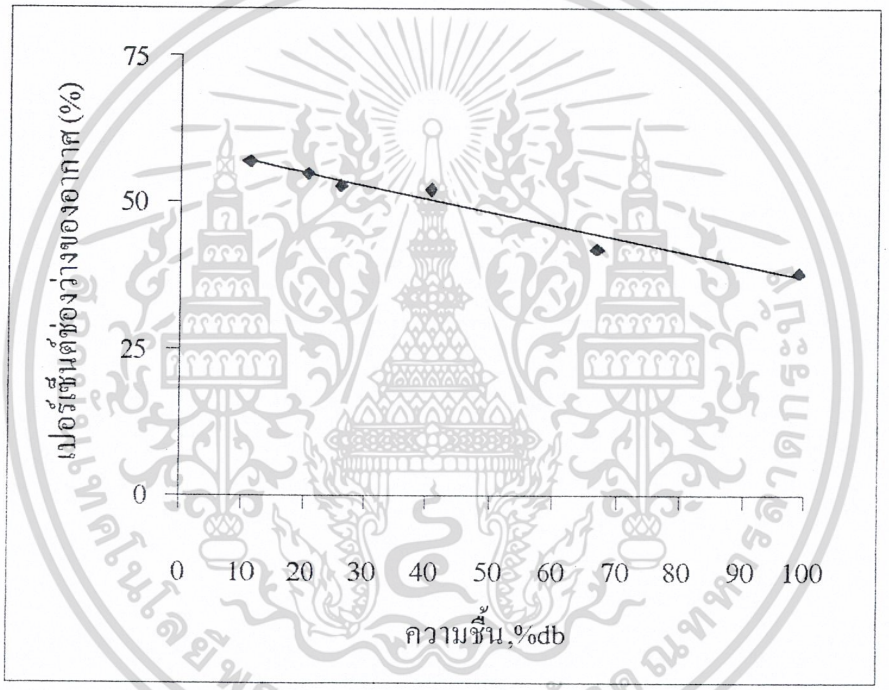
จากผลการทดลองแสดงดังตาราง ข-8 ซึ่งจะพบว่าเมื่อความชื้นของเมล็ดงาขัดมีค่าเพิ่มขึ้น

เปอร์เซ็นต์ช่องว่างของอากาศจะมีค่าลดลง ดังรูป 4.10 จากการนำข้อมูลมาหาความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ช่องว่างของอากาศกับความชื้นของเมล็ดงาขัดได้ผลดังนี้

$$VF = 59.492 - 0.2266M \quad R^2 = 0.964 \qquad (4.8)$$

เมื่อ VF คือเปอร์เซ็นต์ช่องว่างของอากาศ, %

M คือความชื้นเมล็ดงาขัด, %มาตรฐานแห้ง



รูปที่ 4.10 เปอร์เซ็นต์ช่องว่างของอากาศของเมล็ดงาขัดที่ความชื้นต่าง ๆ

4.4 ผลการทดลองหาความร้อนจำเพาะ

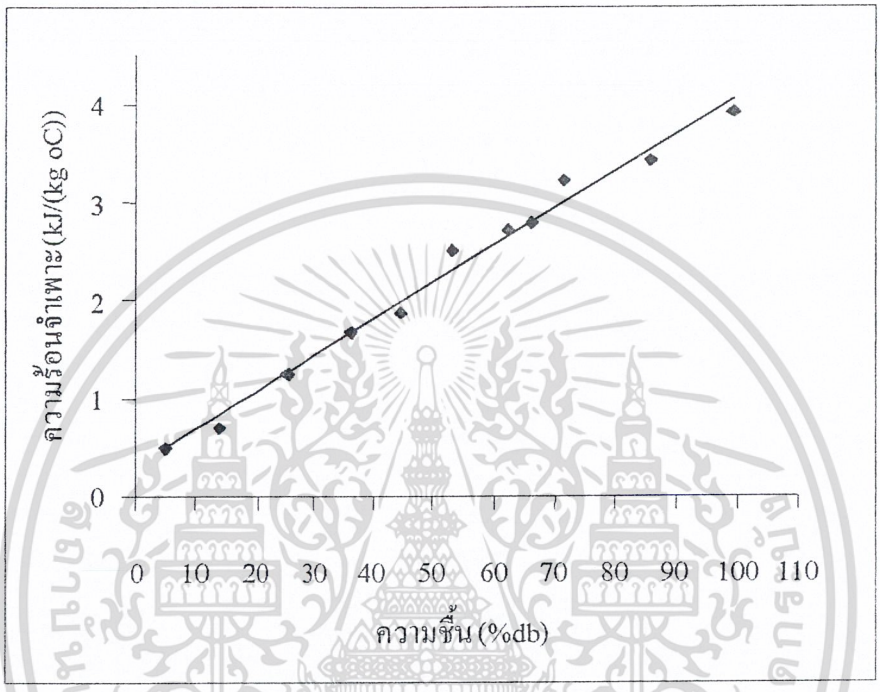
ผลการทดลองหาความร้อนจำเพาะของเมล็ดงาขัดแสดงดังตาราง ข-9 จากผลการทดลองพบว่าเมื่อความชื้นของเมล็ดงาขัดมีค่าเพิ่มขึ้น ความร้อนจำเพาะมีค่าเพิ่มขึ้นด้วย ดังรูป 4.11 จากการนำข้อมูลหาความสัมพันธ์ระหว่างความร้อนจำเพาะกับความชื้นของเมล็ดงาขัดได้ผลดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$Cp = 0.2977 + 0.0367M \quad R^2 = 0.9874 \qquad (4.9)$$

เมื่อ Cp คือความร้อนจำเพาะ, kJ/kg °C

M คือความชื้นเมล็ดงาขัด, %มาตรฐานแห้ง



รูปที่ 4.11 ความร้อนจำเพาะของเมล็ดงาขัดที่ความชื้นต่าง ๆ

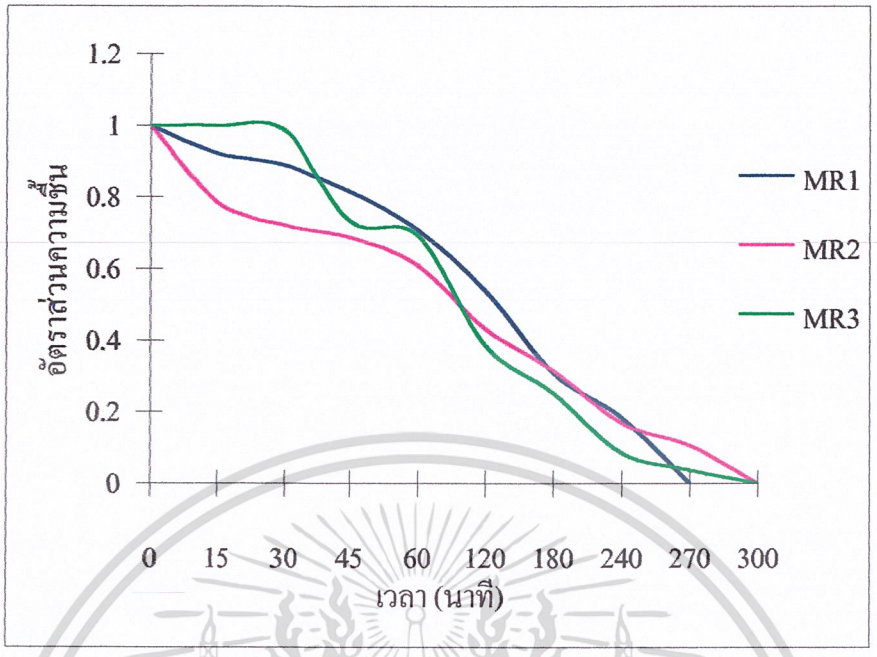
4.5 ผลการทดลองอัตราการอบแห้งชั้นบาง

ผลการทดลองหาอัตราการอบแห้งชั้นบางของเมล็ดงาขัด โดยศึกษาอุณหภูมิลมร้อน 50-70 °C และที่ความเร็วลมประมาณ 0.25-0.43 m/s จะได้ดังตารางที่ ข-10 ถึง ข-12 วิเคราะห์ได้ดังนี้

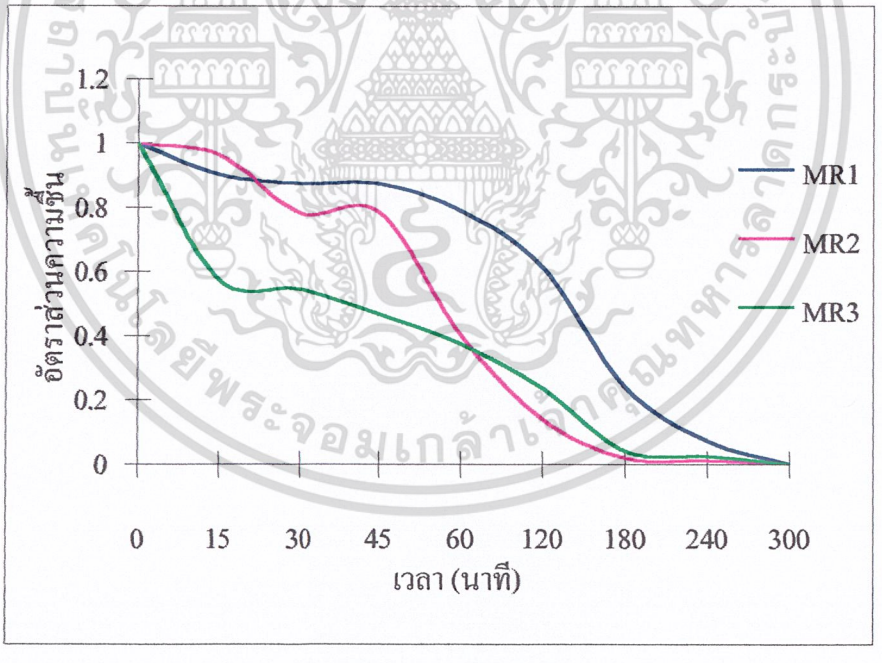
4.5.1 อิทธิพลของอุณหภูมิ

จากการทดลองพบว่า อุณหภูมิอิทธิพลต่อการอบแห้งชั้นบาง โดยพบว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น อัตราการอบแห้งชั้นบางจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ซึ่งอธิบายได้ว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นโมเลกุลของน้ำในชั้นเมล็ดงาขัดได้รับความร้อนมากขึ้นก็จะมีพลังงานในการเคลื่อนที่มากพอที่จะเอาชนะแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลได้ จึงทำให้น้ำเคลื่อนที่เร็วขึ้นทำให้อัตราการอบแห้งเป็นไปได้อย่างรวดเร็ว ดังรูปที่ 4.12- 4.14

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

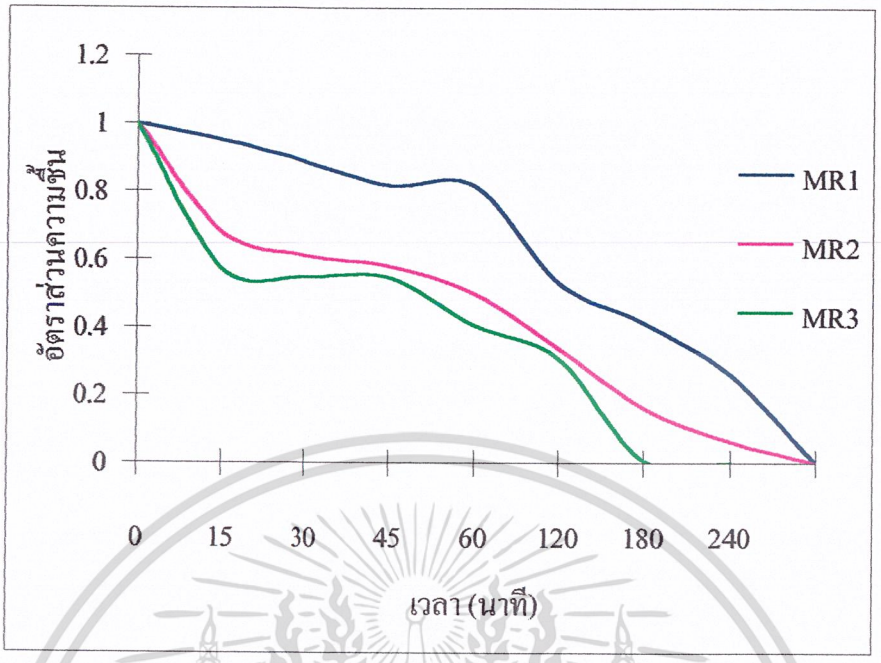


รูปที่ 4.12 อัตราส่วนความชื้นของเมล็ดงาขัดที่ความเร็วลม 0.25 m/s



รูปที่ 4.13 อัตราส่วนความชื้นของเมล็ดงาขัดที่ความเร็วลม 0.31 m/s

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.14 อัตราส่วนความชื้นของเมล็ดงาขัดที่ความเร็วลม 0.43 m/s

เมื่อ MR1 คืออัตราสวนความชื้นที่อุณหภูมิ 50 °C

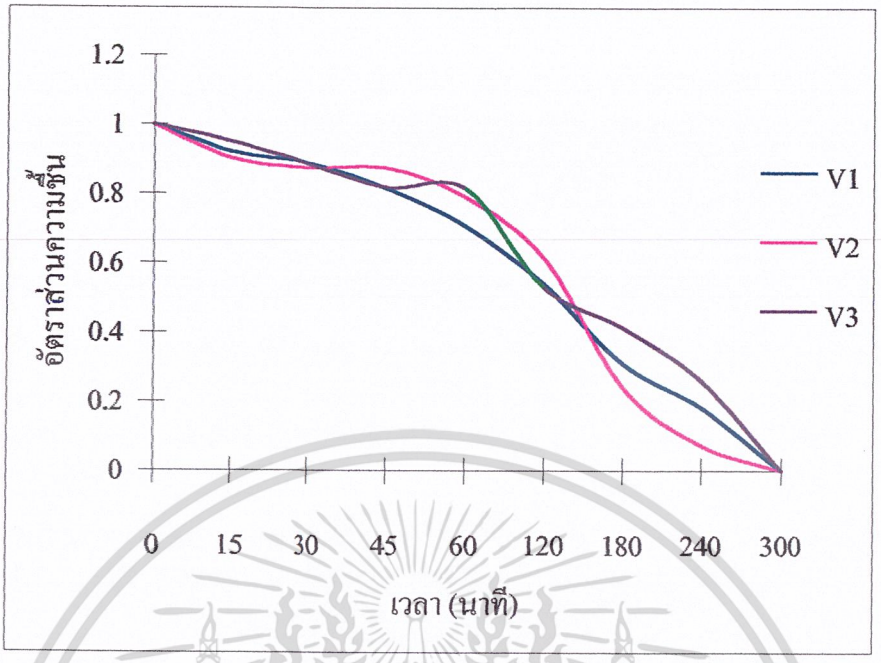
MR2 คืออัตราสวนความชื้นที่อุณหภูมิ 60 °C

MR3 คืออัตราสวนความชื้นที่อุณหภูมิ 70 °C

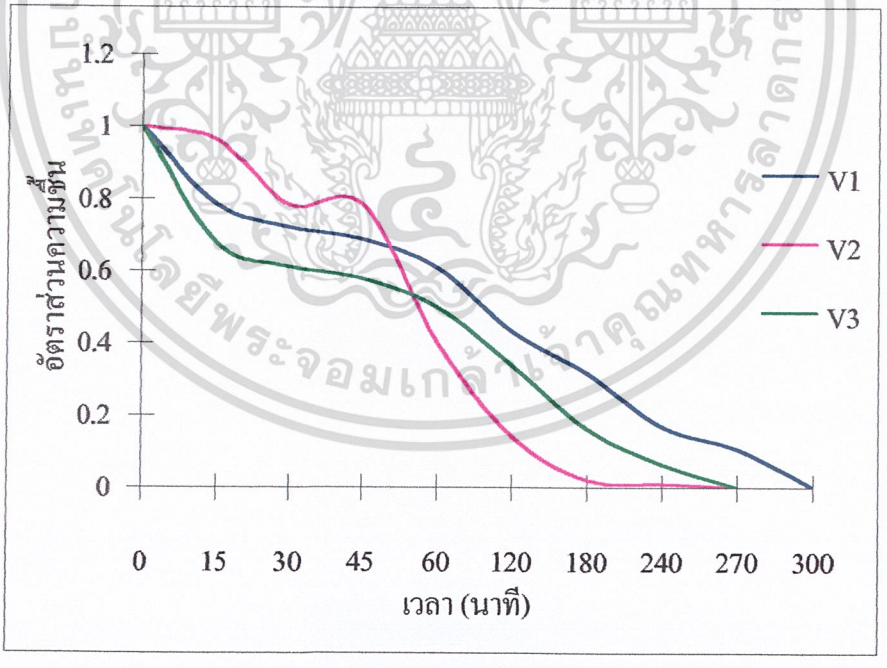
4.5.2 อิทธิพลของความเร็วลม

จากการทดลองพบว่า อิทธิพลของความเร็วลมมีน้อยมาก ซึ่งอธิบายได้ในช่วงอัตราการอบแห้งลดลง ความต้านทานภายในเมล็ดงาขัดต่อการเคลื่อนที่ของความชื้นจะมีมากกว่าความต้านทานภายนอก ดังนั้นอัตราการอบแห้งชั้นบางจึงไม่ขึ้นอยู่กับความเร็วลมดังรูปที่ 4.15- 4.17

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

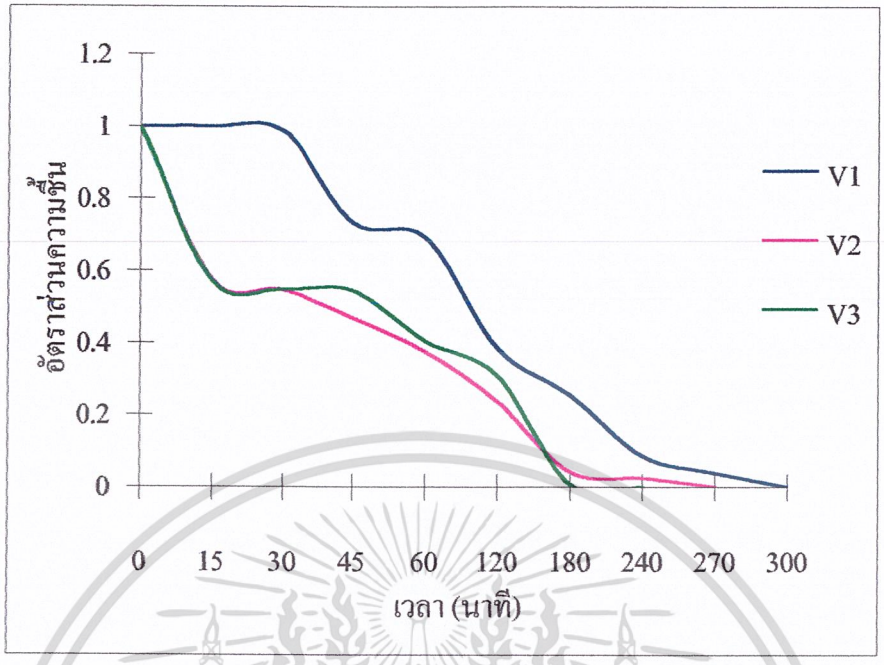


รูปที่ 4.15 อิทธิพลของความเร็วลมที่มีผลต่ออัตราการอบแห้งชั้นบางของเมล็ดงาขัดที่ อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.16 อิทธิพลของความเร็วลมที่มีผลต่ออัตราการอบแห้งชั้นบางของเมล็ดงาขัดที่ อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.17 อิทธิพลของความเร็วลมที่มีผลต่ออัตราการอบแห้งชั้นบางของเมล็ดงาขัดที่ อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส

เมื่อ V1 คือความเร็วลมที่ 0.25 m/s

V2 คือความเร็วลมที่ 0.31 m/s

V3 คือความเร็วลมที่ 0.43 m/s

จากการวิเคราะห์สมการ สมการ Single และ Page (1949) เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้น (MR) กับเวลาที่ใช้ในการอบแห้ง

สมการ Single $MR = a\exp(-kt)$

สมการ Page (1949) $MR = \exp(-kt^{u})$

เมื่อ MR คืออัตราส่วนความชื้น

t คือเวลาที่ใช้ในการอบแห้ง (นาที)

a,k,u คือค่าคงที่

ตารางที่ 4.1 และ 4.2 ได้แสดงให้เห็นค่าคงที่ได้จากการนำผลการทดลองไปพิจารณาในรูปแบบสมการของ Single และ Page (1949) ตามลำดับ

ตารางที่ 4.1 ค่าสัมประสิทธิ์ของสมการ Single ซึ่งสามารถใช้หาค่าพารามิเตอร์ของสมการอัตราการอบแห้ง โดยขึ้นอยู่กับเวลา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

V (m/s)	k_1	a_1	R^2_1	k_2	a_2	R^2_2	k_3	a_3	R^2_3
0.25	0.007	1.076161	0.9845	0.0074	0.963773	0.9755	0.0115	1.288399	0.9564
0.31	0.0102	1.265541	0.9046	0.0208	1.378919	0.9767	0.0151	0.909737	0.966
0.43	0.0056	1.051376	0.9889	0.0103	0.923116	0.9738	0.023	1.261561	0.8058

ตารางที่ 4.2 ค่าสัมประสิทธิ์ของสมการPage (1949) ซึ่งใช้หาค่าพารามิเตอร์ของสมการอัตราการอบแห้ง โดยขึ้นอยู่กับเวลา

V (m/s)	k_1	u_1	R^2_1	k_2	u_2	R^2_2	k_3	u_3	R^2_3
0.25	0.003075	1.1335	0.9821	0.024125	0.7676	0.9591	2.55E-06	2.613	0.8714
0.31	0.002351	1.1952	0.8922	0.000488	1.72	0.9623	0.055687	0.734	0.9128
0.43	0.002132	1.1697	0.9905	0.045854	0.7003	0.9313	0.046789	0.7682	0.7153

เมื่อ V คือความเร็วลม (m/s)

a,k,u คือค่าคงที่

subscript

1 คืออุณหภูมิ 50 °C

2 คืออุณหภูมิ 60 °C

3 คืออุณหภูมิ 70 °C

จากการนำเอาผลที่ได้จากการทดลองที่ความเร็วลม 0.25 m/s อุณหภูมิ 50, 60 และ 70 °C ไปเปรียบเทียบกับสมการ Single และ สมการของ Page (1949) ในรูปที่ 4.18 - 4.20 และแสดงได้ดังสมการที่ 4.10 – 4.15 ที่อุณหภูมิ 50 °C

สมการ Single $MR = 1.0761 \exp(-0.007t)$ $R^2 = 0.9845$ (4.10)

สมการ Page (1949) $MR = \exp(-0.003t^{1.1335})$ $R^2 = 0.9821$ (4.11)

- ที่อุณหภูมิ 60 °C

สมการ Single $MR = 0.9638 \exp(-0.0074t)$ $R^2 = 0.9755$ (4.12)

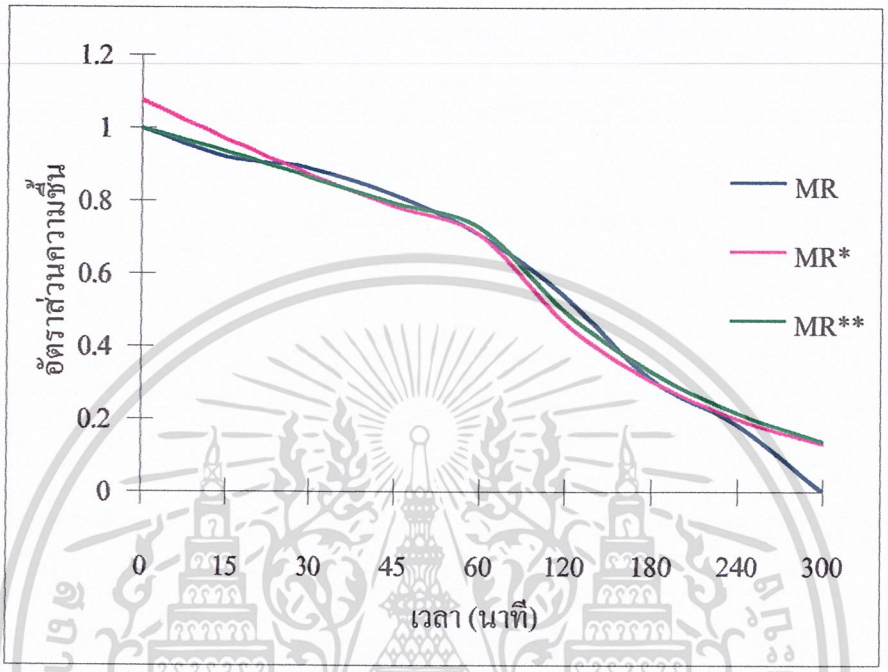
สมการ Page (1949) $MR = \exp(-0.0241t^{0.7676})$ $R^2 = 0.9591$ (4.13)

- ที่อุณหภูมิ 70 °C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

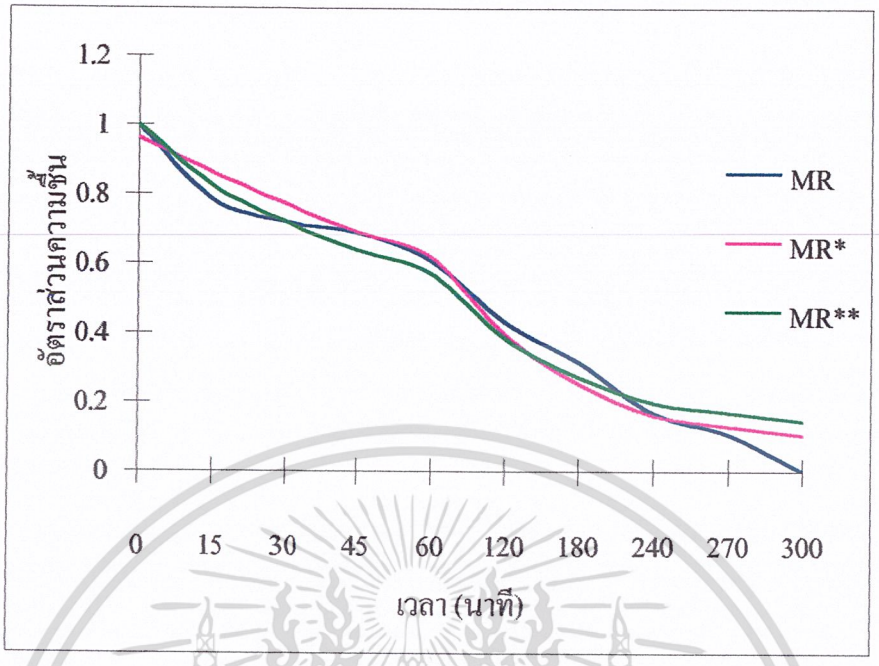
สมการ Single $MR = 1.2884 \exp(-0.0115t)$ $R^2 = 0.9564$ (4.14)

สมการ Page (1949) $MR = \exp(0.0000026t^{2.613})$ $R^2 = 0.8714$ (4.15)

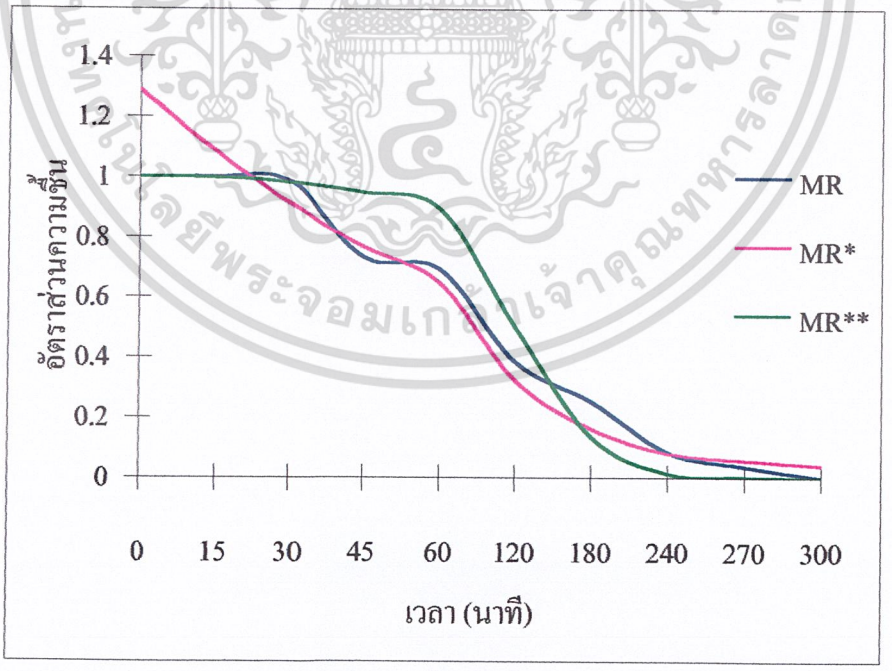


รูปที่ 4.18 การเปรียบเทียบผลจากสมการรูปแบบ Singleและ Page (1949) กับผลการทดลองหาอัตราการอบแห้งชั้นบางของเมล็ดงาขัดที่อุณหภูมิ 50 °C และความเร็วลม 0.25 m/s

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.19 การเปรียบเทียบผลจากสมการรูปแบบ Singleและ Page (1949) กับผลการทดลองหาอัตราการอบแห้งชั้นบางของเมล็ดงาขัดที่อุณหภูมิ 60 °C และความเร็วลม 0.25 m/s



รูปที่ 4.20 การเปรียบเทียบผลจากสมการรูปแบบ Singleและ Page (1949) กับผลการทดลองหาอัตราการอบแห้งชั้นบางของเมล็ดงาขัดที่อุณหภูมิ 60 °C และความเร็วลม 0.25 m/s

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ MR* คืออัตราส่วนความชื้นจากผลการทดลอง

MR** คืออัตราส่วนความชื้นจากสมการ Single

MR*** คืออัตราส่วนความชื้นจากสมการ Page (1949)

จะพบว่าทั้งสมการของ Single และ สมการของ Page (1949) นั้นอธิบายผลการทดลองได้ดี แต่ในช่วง 30 นาทีแรกควรใช้สมการ Page (1949) ส่วนในช่วงหลังนั้นสมการของ Single นั้นสามารถอธิบายผลการทดลองได้ดีกว่าสมการของ Page (1949)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5
สรุปผล

จากงานวิจัยนี้สามารถสรุปผลการทดลอง เพื่อใช้เป็นแนวทางในการศึกษาต่อไปได้ดังนี้

สรุปผล

1. จากสมการความชื้นสมดุลรูปแบบต่าง ๆ คือ สมการของ Henderson, 1952 และ Chung & Pfost ซึ่งสมการของ Chung & Pfost ซึ่งอธิบายผลการทดลองได้ดีกว่า
2. ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นสมดุลและความชื้นสัมพัทธ์ที่อุณหภูมิหนึ่ง ๆ ที่ได้จากการทดลองมีรูปเป็น sigmoid
3. อิทธิพลของอุณหภูมิในช่วง 27-45 °C ที่มีผลต่อความชื้นสมดุลเป็นไปอย่างชัดเจน
4. ความหนาแน่นปรากฏของเมล็ดงามีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อความชื้นเพิ่มขึ้นในลักษณะเชิงเส้น
5. เปอร์เซ็นต์ช่องว่างของอากาศของเมล็ดงามีค่าลดลง เมื่อความชื้นเพิ่มขึ้นในลักษณะเชิงเส้น
6. ความร้อนจำเพาะของเมล็ดงามีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อความชื้นเพิ่มขึ้นในลักษณะเชิงเส้น
7. ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นและเวลาที่ใช้ในการอบแห้งที่ได้จากการทดลองภายใต้สภาวะอากาศคงที่ พบว่ามีลักษณะลดลงแบบ exponential
8. ความเร็วลมร้อนในช่วง 0.25-0.43 m/s มีอิทธิพลต่อการหาอัตราการอบแห้งชั้นบางน้อยมาก
9. ที่อุณหภูมิ 50, 60 และ 70 องศาเซลเซียสทั้งสมการสมการ Single และสมการของ Page (1949) อธิบายผลการทดลองได้ดี พบว่าในช่วง 30 นาทีแรกควรใช้สมการของ Page (1949) ส่วนในช่วงหลังสมการของ Single อธิบายผลการทดลองได้ดีกว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

1. ชอบ ลายทอง 2530 "การศึกษาคุณสมบัติเชิงฟิสิกส์ความร้อนของข้าวเปลือก" วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาเทคโนโลยีพลังงาน สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี 147 หน้า
2. ปานมนัส ศิริสมบูรณ์ จิราภรณ์ เบญจประกายรัตน์ และมาฤดี ผ่องพิพัฒน์พงษ์ 2540 "บทปฏิบัติการสมบัติทางกายภาพและวิศวกรรมของชีววัสดุ" สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง หน้า 36-59
3. รัชนี ยืนยาว สุวรรณี มหณรงค์ชัย และอังคณา ลีลาเลิศอำไพ 2537 "การศึกษาค่าพารามิเตอร์ในการออกแบบเครื่องอบแห้งเมล็ดพริกไทย" วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตร์บัณฑิต สาขาวิศวกรรมเกษตร สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง 66 หน้า
4. สาทิป รัตนภาสกร 2545 "การอบแห้งและเก็บรักษาเมล็ดพืช" เอกสารคำสอน สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง หน้า 4-49
5. ศิวะ อัจฉริยวิริยะ และ สมชาติ โสภณรณฤทธิ์ 2532 "การศึกษาหาพารามิเตอร์ที่จำเป็นต้องใช้ในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการอบแห้งกล้วยน้ำว้า" วิศวกรรมสาร เล่มที่4 หน้า 80-85
6. ศิวะ อัจฉริยวิริยะ และสมชาติ โสภณรณฤทธิ์ 2533 "การศึกษาหาพารามิเตอร์สำหรับวิเคราะห์การอบแห้งมะละกอแช่อิ่ม" วิทยาสารเกษตรศาสตร์ ปีที่ 24 ฉบับที่ 2 เม.ย. - มิ.ย. หน้า 196 -207
7. อรุณี ผุดผ่อง 2531 "การศึกษาพารามิเตอร์ที่สำคัญสำหรับวิเคราะห์และออกแบบการอบแห้งเมล็ดข้าวโพด" ปริญญาวิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาเทคโนโลยีพลังงาน สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี 101 หน้า
8. AOAC.1990. Official methods of analysis.15th ed. Washington D.C.: Association of Official Analytcal Chemists, Inc.
9. Bala B.K., 1997, "Drying And Storage Of Cereal Grains" Science Pubilshers, Inc.U.S.A., p. 121-124
10. Brooker,D.B., F.W. Bakker-Arkema and C.W. Hall, 1973, "Drying cerealgrains", 2nd ed., TheAVI Publishing company, Inc, Westport, connecticut, U.S.A, 261p.
11. Chung, D.S. and H.B. Pfost, 1967a. Adsorption and desorption of water by cereal grains and

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

their products. Part I: Heat and free energy changes of adsorption and desorption. Trans. Am. Soc. Agril Engrs. 10(4): 549-551 and 555

12. Henderson, S.M., 1952. A basic concept of equilibrium moisture. Agril. Engng. p. 29-32
13. Mujumadar A.S. , 1987, "Handbook of industrial drying", New York and Basel, McGill University

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

- คุณลักษณะของงาขัด
- ส่วนประกอบของเมล็ดงาดำ 100 กรัม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลักษณะของเมล็ดงา

รายการ	คุณลักษณะ	เกณฑ์ที่กำหนด
1	ความชื้น ร้อยละไม่เกิน	6.0
2	น้ำมัน ร้อยละ โดยน้ำหนักไม่น้อยกว่า	-
3	สิ่งแปลกปลอม ร้อยละ โดยน้ำหนักไม่เกิน	0.5
4	งาต่างชนิด ร้อยละโดยน้ำหนักไม่เกิน	1.0

ที่มา : มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม เมล็ดงา มาตรฐานที่ มอก. 641-2539 กระทวงอุตสาหกรรม [นิรนาม, 2529]

ส่วนประกอบของเมล็ดงาดำ 100 กรัม

องค์ประกอบ	จำนวน	
น้ำ	2.2	กรัม
โปรตีน	20.6	กรัม
ไขมัน	51.9	กรัม
คาร์โบไฮเดรต	18.9	กรัม
ไฟเบอร์	15.7	กรัม
เถ้า	6.4	กรัม

สำนักงานอนามัย กระทรวงสาธารณสุข [นิรนาม, 2535]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข

ข้อมูลที่ได้จากการทดลองหา

- ความชื้นสมดุล
- ความหนาแน่นปรากฏ
- เปอร์เซ็นต์ช่องว่างของอากาศ
- ความร้อนจำเพาะ
- อัตราการอบแห้งชั้นบาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ข-1

ข้อมูลการทดลองหาความชื้นสมดุลของเมล็ดงาขัดแบบคายความชื้นที่อุณหภูมิ 27 °C

สารละลายเกลืออิ่มตัว	Water Activity (%RH)	น้ำหนักสมดุล (g)	น้ำหนักแห้งสุทธิ (g)	ความชื้นสมดุล (%db)
LiCl	11.3	18.9436	18.4061	2.9202
$MgCl_2.6H_2O$	33.1	19.2382	18.4883	4.0561
$MgNO_3.6H_2O$	57.4	18.7725	17.8359	5.2512
NaCl	75.7	19.3659	18.0781	7.1235
KNO_3	96.0	20.2234	18.0148	12.2599

ตาราง ข-2

ข้อมูลการทดลองหาความชื้นสมดุลของเมล็ดงาขัดแบบดูดความชื้นที่อุณหภูมิ 27 °C

สารละลายเกลืออิ่มตัว	Water Activity (%RH)	น้ำหนักสมดุล (g)	น้ำหนักแห้งสุทธิ (g)	ความชื้นสมดุล (%db)
LiCl	11.3	18.3103	17.8258	2.7176
$MgCl_2.6H_2O$	33.1	18.1186	17.4959	3.5591
$MgNO_3.6H_2O$	57.4	17.9663	17.1812	4.5697
NaCl	75.7	18.1527	17.0089	6.7248
KNO_3	96.0	18.1806	16.2865	11.6301

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ข-3

ข้อมูลการทดลองหาความชื้นสมดุลของเมล็ดงาขัดแบบคายความชื้นที่อุณหภูมิ 35 °C

สารละลายเกลืออิ่มตัว	Water Activity (%RH)	น้ำหนักสมดุล (g)	น้ำหนักแห้งสุทธิ (g)	ความชื้นสมดุล (%db)
LiCl	10.8	18.3103	17.8782	2.4168
$MgCl_2.6H_2O$	31.8	18.0355	17.4388	3.4215
$MgNO_3.6H_2O$	51.6	18.9625	18.0878	4.8361
NaCl	74.3	17.8528	16.7698	6.4581
KNO_3	89.3	18.2531	16.5359	10.3850

ตาราง ข-4

ข้อมูลการทดลองหาความชื้นสมดุลของเมล็ดงาขัดแบบดูดความชื้นที่อุณหภูมิ 35 °C

สารละลายเกลืออิ่มตัว	Water Activity (%RH)	น้ำหนักสมดุล (g)	น้ำหนักแห้งสุทธิ (g)	ความชื้นสมดุล (%db)
LiCl	10.8	16.9089	16.5253	2.3214
$MgCl_2.6H_2O$	31.8	10.2551	9.9444	3.1245
$MgNO_3.6H_2O$	51.6	19.1023	18.4525	3.5216
NaCl	74.3	18.1485	17.0865	6.2157
KNO_3	89.3	17.7595	16.2397	9.3587

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ข-5

ข้อมูลการทดลองหาความชื้นสมดุลของเมล็ดงาขัดแบบคายความชื้นที่อุณหภูมิ 45 °C

สารละลายเกลืออิ่มตัว	Water Activity (%RH)	น้ำหนักสมดุล (g)	น้ำหนักแห้งสุทธิ (g)	ความชื้นสมดุล (%db)
LiCl	10.3	17.0890	16.6943	2.3645
$MgCl_2.6H_2O$	30.8	9.7551	9.4420	3.3164
$MgNO_3.6H_2O$	49.7	18.9012	18.1556	4.1065
NaCl	72.6	18.2465	17.1729	6.2516
KNO_3	86.5	17.6995	16.1532	9.5727

ตาราง ข-6

ข้อมูลการทดลองหาความชื้นสมดุลของเมล็ดงาขัดแบบดูดความชื้นที่อุณหภูมิ 45 °C

สารละลายเกลืออิ่มตัว	Water Activity (%RH)	น้ำหนักสมดุล (g)	น้ำหนักแห้งสุทธิ (g)	ความชื้นสมดุล (%db)
LiCl	10.2829	18.1976	17.8236	2.0981
$MgCl_2.6H_2O$	30.8489	10.0324	9.7514	2.8816
$MgNO_3.6H_2O$	49.7273	17.5127	16.9840	3.1128
NaCl	72.6058	17.9924	17.0082	5.7865
KNO_3	86.4500	18.5830	17.1833	8.1456

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ข-7 ผลการทดลองหาความหนาแน่นปรากฏ

ความชื้น %db	ครั้งที่	น้ำหนักงาสุทธิ (g)	ปริมาตรขวด (ml)	ความหนาแน่นปรากฏ (kg/m^3)
11.20	1	19.88	50	398
	2	20.19	50	404
20.50	1	21.29	50	426
	2	21.89	50	438
26.28	1	21.53	50	431
	2	21.84	50	437
40.60	1	24.28	50	486
	2	24.69	50	494
66.99	1	25.93	50	519
	2	26.54	50	531
98.99	1	32.18	50	644
	2	32.49	50	650

ตาราง ข-8 ผลการทดลองหาเปอร์เซ็นต์ช่องว่างของอากาศของเมล็ดงา

รอบ	ครั้งที่	ปริมาตรน้ำมันพืช (ml)	ปริมาตรขวด (ml)	เปอร์เซ็นต์ช่องว่าง (%)
11.20	1	28.4	50	56.8
	2	28.6	50	57.2
20.50	1	27	50	54.0
	2	28	50	56.0
26.28	1	26	50	52.0
	2	26.8	50	53.6
40.60	1	25.5	50	51.0
	2	26.7	50	53.4
66.99	1	20	50	40.0
	2	22	50	44.0
98.99	1	18.7	50	37.4
	2	19.3	50	38.6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ข-9 ผลการทดลองหาความร้อนจำเพาะของเมล็ดงา

ความชื้น %db	น้ำหนักงา (g)	น้ำหนักน้ำ (g)	อุณหภูมิเมล็ดงา °C	อุณหภูมิน้ำ °C	อุณหภูมิผสม °C	ความร้อนจำเพาะ (kJ/kg °C)
99.55	35.6661	48.7162	22	67	41.6	3.9367
	34.2332	49.023	23.3	66.5	42.5	3.8747
86.04	35.5597	49.019	28.5	61.8	43.5	3.5565
	33.3882	49.001	27.1	61.7	43.3	3.2676
71.79	35.5597	49.019	25.7	63.8	43.5	3.0973
	35.3882	49.001	25.2	64.7	43.3	3.3526
66.39	35.0856	49.0768	23.5	57.6	40.5	2.3589
	35.6177	49.1039	23.9	59.6	40.4	3.2375
62.52	34.5525	49.1611	25.6	61.3	42.9	2.7493
	32.1543	49.1046	25	60.8	42.7	2.6845
53.12	33.3855	49.055	24.6	62	43	2.6407
	30.9653	49.0177	26	61.1	43.9	2.3666
44.68	35.6447	49.0645	23.1	63.3	44.2	1.7403
	35.4302	49.028	23.4	64.5	44.5	1.9940
36.39	35.5894	49.0313	27.5	61.1	45.2	1.6996
	35.5624	49.0348	28	62.4	46.2	1.6539
25.52	35.0593	49.968	25.5	61.5	45.9	1.0285
	35.6402	49.54	27.5	61.5	45.9	1.4571
13.89	35.0973	49.5673	24.6	59.8	45	0.7590
	35.2922	49.6234	24.5	61	45.9	0.6425
4.80	34.3876	48.9666	24.5	63.1	47.5	0.4400
	34.4865	49.0248	24.3	62.2	46.7	0.5251

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ข-10 ข้อมูลที่ได้จากการทดลองหาอัตราการอบแห้งที่ความเร็วลม 0.25 m/s

t	w1	mc1	mr1	w2	mc2	mr2	w3	mc3	mr3
0	200.00	157.72	1	200.00	150.05	1	200.00	127.21	1
15	186.75	146.12	0.92	192.40	119.36	0.79	188.65	127.13	1
30	182.60	141.38	0.89	186.85	110.17	0.72	174.85	125.46	0.99
45	176.70	130.58	0.82	180.40	105.59	0.69	169.05	94.31	0.73
60	171.50	114.61	0.71	172.15	94.26	0.61	162.25	89.21	0.69
120	149.45	134.32	0.54	143.15	69.05	0.43	122.55	51.49	0.39
180	135.75	56.12	0.31	119.10	52.34	0.32	104.30	35.04	0.25
240	122.75	37.51	0.18	103.05	31.43	0.17	91.00	14.35	0.09
270	-	-	-	94.35	22.49	0.11	85.55	8.42	0.04
300	110.56	10.50	0	91.75	7.29	0	85.05	3.73	0

mc = ความชื้นเมล็ดงาขัด (%มาตรฐานแห้ง)

mr = อัตราส่วนความชื้น

t = เวลาที่ใช้ในการอบแห้ง (นาที)

w = น้ำหนักเมล็ดงาขัด

subscript

1 = อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส

2 = อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส

3 = อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส

ตาราง ข-11 ข้อมูลที่ได้จากการทดลองหาอัตราการอบแห้งที่ความเร็วลม 0.31 m/s

t	w1	mc1	mr1	w2	mc2	mr2	w3	mc3	mr3
0	200.00	114.64	1	200.00	142.13	1	200.00	200.50	1
15	195.00	103.81	0.90	191.30	137.14	0.96	189.55	118.43	0.58
30	189.00	100.79	0.87	185.20	112.14	0.78	178.55	112.84	0.55
45	184.50	100.71	0.87	177.90	112.50	0.79	167.00	97.84	0.47
60	177.85	91.47	0.79	150.50	59.66	0.40	155.15	79.84	0.38
120	157.20	71.89	0.61	130.35	23.62	0.14	120.95	53.19	0.24
180	138.00	30.60	0.24	116.75	6.94	0.02	98.80	15.39	0.04
240	107.50	12.05	0.07	109.55	5.61	0.01	89.30	12.16	0.03
300	100.00	3.91	0	105.90	4.11	0	85.60	7.22	0

mc = ความชื้นเมล็ดงาขัด (%มาตรฐานแห้ง)

mr = อัตราส่วนความชื้น

t = เวลาที่ใช้ในการอบแห้ง (นาที)

w = น้ำหนักเมล็ดงาขัด

subscript

1 = อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส

2 = อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส

3 = อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส

ตาราง ข-12 ข้อมูลที่ได้จากการทดลองหาอัตราการอบแห้งที่ความเร็วลม 0.43 m/s

t	w1	mc1	mr1	w2	mc2	mr2	w3	mc3	mr3
0	200.00	137.33	1	200.00	163.70	1	200.00	229.10	1
15	193.05	130.55	0.95	189.70	111.52	0.68	178.45	134.70	0.57
30	187.00	121.88	0.89	182.15	100.62	0.61	172.30	129.23	0.55
45	181.35	112.55	0.82	173.45	95.30	0.58	167.80	128.88	0.55
60	175.75	112.28	0.82	165.90	82.31	0.50	140.85	97.84	0.41
120	151.10	73.13	0.53	139.90	56.16	0.34	113.45	76.48	0.31
180	126.95	57.19	0.41	123.70	27.77	0.16	96.65	10.16	0.01
240	114.55	36.30	0.26	112.85	11.63	0.06	90.45	8.48	0
300	112.10	0.79	0	105.25	1.26	0			

mc = ความชื้นเมล็ดงาขัด (%มาตรฐานแห้ง)

mr = อัตราส่วนความชื้น

t = เวลาที่ใช้ในการอบแห้ง (นาที)

w = น้ำหนักเมล็ดงาขัด

subscript

1 = อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส

2 = อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส

3 = อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส

ภาคผนวก ค

สารละลายเกลืออิ่มตัวที่ใช้ควบคุมความชื้นสัมพัทธ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค-1 สารละลายเกลืออิ่มตัวที่ใช้ควบคุมความชื้นสัมพัทธ์

salt	temperature		RH(%)
	(°C)	(°F)	
$BaCl_2.2H_2O$ (Barium chloride)	29.4	85	88.0
$CaCl_2$ (Calcium chloride)	-6.7	20	44.0
	0.0	32	41.0
	10.0	50	40.0
	21.0	70	35.0
$CaCl_2.6H_2O$ (Calcium sulfate)	5.0	41	39.8
	20.0	68	32.3
	24.4	76	31.0
$CaSO_4.5H_2O$ (Calcium sulfate)	20.0	68	98.0
$Ca(NO_3)_2.4H_2O$ (Calcium nitrate)	-6.7	20	64.0
	0.0	32	64.0
	10.0	50	59.0
	21.0	70	55.0
$Ca(NO_3)_2.4H_2O$ (Calcium nitrate)	20.0	68	53.6
	25.0	77	50.4
	30.0	86	46.6
	35.0	95	42.0
	37.8	100	38.9
KNO_2 (Potassium nitrate)	20.0	68	49.0
	25.0	77	48.2
	30.0	86	47.2
	37.8	100	45.9
KNO_3 (Potassium nitrate)	0.0	32	97.6
	10.0	50	95.5
	20.0	68	93.2
	30.0	86	90.7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค-1 ต่อ

salt	temperature		RH(%)
	(°C)	(°F)	
	40.0	104	87.9
	50.0	122	85.0
K_2CO_3 (Potassium carbonate)	20.0	68	86.6
	25.0	77	86.5
	30.0	86	86.3
	37.8	100	85.6
K_2CrO_4 (Potassium chronate)	20.0	68	86.6
	25.0	77	86.5
	30.0	86	86.3
	37.8	100	85.6
K_2SO_4 (Potassium salfate)	0.0	32	99.1
	10.0	50	97.9
	20.0	68	97.2
	30.0	86	96.6
	40.0	104	96.2
	50.0	122	95.8
KBr (Potassium bromide)	20.0	68	84.0
	100.0	212	69.2
$MaCl_2.6H_2O$ (Magnesium chloride)	0	32	35.0
	20.0	68	33.6
	30.0	86	32.8
	40.0	104	32.1
	50.0	122	85.0
$Mg(NO_3)_2$ (Magnesium nitrate)	22.8	73	53.5
	30.0	86	51.4
	37.8	100	49.0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค-1 ต่อ

salt	temperature		RH(%)
	(°C)	(°F)	
$Mg(NO_3)_2.6H_2O$ (Calcium nitrate)	0.0	32	60.6
	20.0	68	54.9
	30.0	86	52.0
	40.0	104	49.2
	50.0	122	46.3
NaBr (Sodium bromide)	20.0	68	59.2
	25.0	77	57.8
	30.0	86	56.3
	37.8	100	53.7
NaCl (Sodium chloride)	0.0	32	74.9
	20.0	68	75.5
	30.0	86	75.6
	4.0	104	75.4
	50.0	122	74.5
$K_2CO_3.2H_2O$ (Potassium carbonate)	18.9	66	44.0
	24.4	76	43.0
KCNS (Potassium thiocyanate)	20.0	68	47.6
	25.0	77	45.7
	30.0	86	43.8
	37.8	100	41.1
$LiCl.H_2O$ (Lithium chloride)	0.0	32	14.7
	20.0	68	12.4
	30.0	86	11.8
	40.0	104	11.6
	50.0	122	11.4
LiCl (Lithium chloride)	20.0	68	11.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค-1 ต่อ

salt	temperature		RH(%)
	(^{o}C)	(^{o}F)	
	25.0	77	11.2
	30.0	86	11.2
	37.8	100	11.2
$MgCl_2$ (Magmesium chloride)	22.8	73	32.9
	30.0	86	32.4
	37.8	100	31.9
$NaCl_2H_3O$ (Sodium acetate)	22.8	73	74.8
	30.0	86	71.4
	37.8	100	67.7
NH_4Cl (Ammonium chloride)	-6.7	20	82.0
	0.0	32	83.0
	10.0	50	81.0
	21.1	70	75.0
$NH_4H_2PO_4$ (Ammonium chloride)	20.0	68	93.2
	25.0	77	92.6
	30.0	86	92.0
	37.8	100	91.1
$(NH_4)_2SO_4$ (Ammonium sulfate)	0.0	32	83.7
	20.0	68	80.6
	30.0	86	80.0
	40.0	104	79.6
	50.0	122	79.1

Source: Washburn (1927), Thompson and Shedd (1954), Wink snd Sears (1950), Waxlet and Hasegawa (1954), Wink (1946)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

โครงงานนี้สำเร็จลุลวงไปด้วยดี เนื่องจากความร่วมมือของหลายฝ่ายด้วยกัน ขอขอบพระคุณส่วนช่วยเหลือโครงการดังนี้

- คณาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมอาหารทุกท่านที่ถ่ายทอดวิชาความรู้และให้คำปรึกษาเป็นอย่างดี
- เจ้าหน้าที่โรงปฏิบัติงานภาควิชาวิศวกรรมอาหาร (พี่แมน) และเจ้าหน้าที่ธุรการภาควิชาวิศวกรรมอาหาร (พี่บุญนำ) ที่ช่วยโครงงาน
- ขอขอบคุณเพื่อนนักศึกษาทุกคนที่เป็นกำลังใจให้โดยตลอด

สุดท้ายขอกราบขอบพระคุณรองศาสตราจารย์สาทิป รัตนภาสกร อาจารย์ที่ปรึกษาโครงงานซึ่งเป็นผู้ที่มีความสำคัญที่สุดในการให้คำปรึกษาและคอยติดตามผลงานด้วยความเอาใจใส่อย่างใกล้ชิดตลอดมา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้