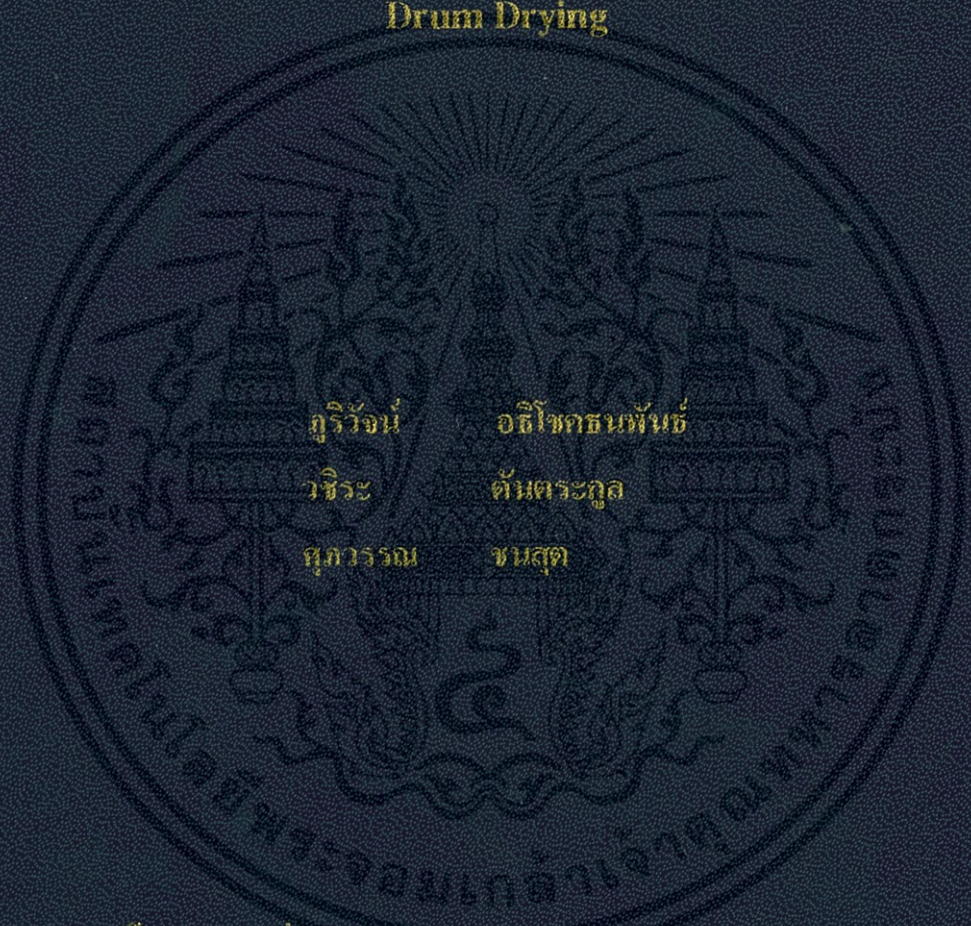


อิทธิพลของปัจจัยกระบวนการผลิตต่อคุณภาพของโจ๊กข้าวกล้องงอก
กึ่งสำเร็จรูปและแบบจำลองความร้อนของการอบแห้งแบบลูกกลิ้ง
Effects of Processing Parameters on the Quality of Instant
Germinated Brown Rice Porridge and Thermal Modeling of
Drum Drying



กฤษวิวัฒน์ อธิโชคธนพันธ์
วชิระ ตันตระกูล
ศุภวารณ ขนสุด

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมอาหาร

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2556

อิทธิพลของปัจจัยกระบวนการผลิตต่อคุณภาพของโจ๊กข้าวกล้องงอก
กึ่งสำเร็จรูปและแบบจำลองความร้อนของการอบแห้งแบบลูกกลิ้ง

**Effects of Processing Parameters on the Quality of Instant
Germinated Brown Rice Porridge and Thermal Modeling of
Drum Drying**



ภุริวัจน์ อธิโชคชนพันธ์
วชิระ ตันตระกูล
ศุภวรรณ ชนสุต

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา

วิศวกรรมศาสตร์บัณฑิต

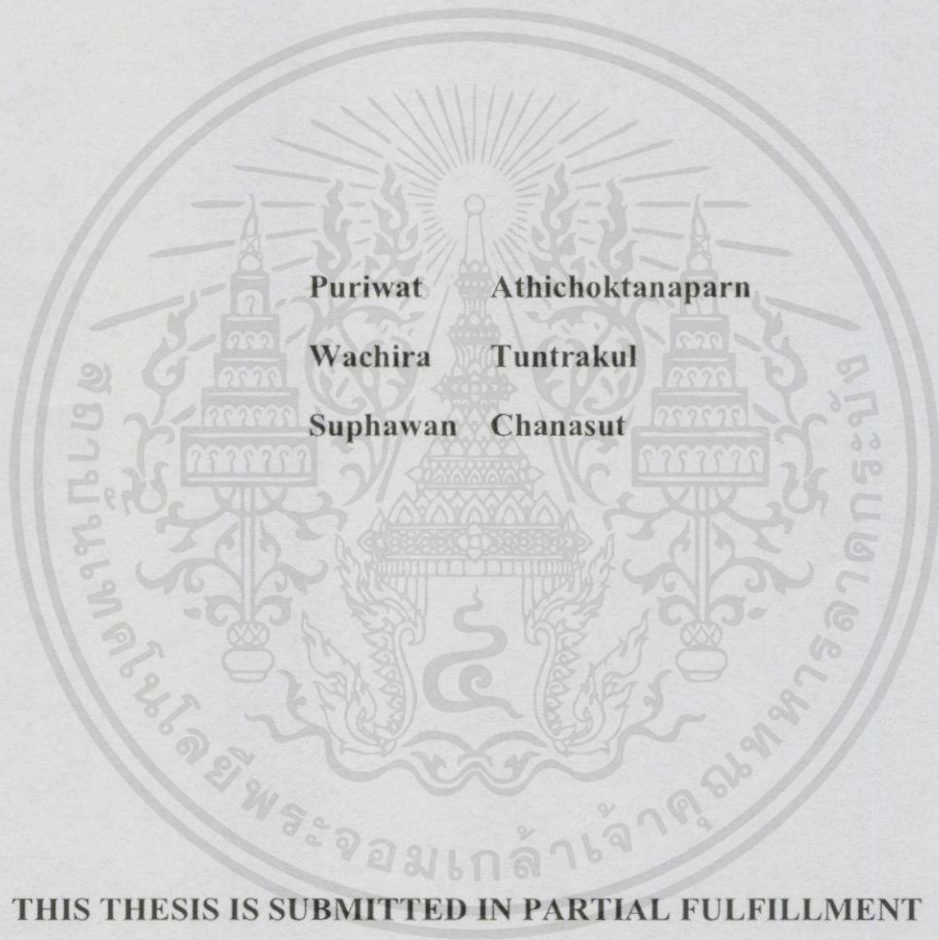
สาขาวิชาวิศวกรรมอาหาร

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ **ปีการศึกษา 2556** นั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**Effects of Processing Parameters on the Quality of
Instant Germinated Brown Rice Porridge and
Thermal Modeling of Drum Drying**



**Puriwat Athichoktanaparn
Wachira Tuntrakul
Suphawan Chanasut**

**THIS THESIS IS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
BACHELOR OF ENGINEERING IN FOOD ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING**

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ACADEMIC YEAR 2013
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแบบลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญานิพนธ์ปีการศึกษา 2556

สาขาวิชาวิศวกรรมอาหาร

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง อิทธิพลของปัจจัยกระบวนการผลิตต่อคุณภาพของโจ๊กข้าวกล้องงอกกึ่งสำเร็จรูปและ
แบบจำลองความร้อนของการอบแห้งแบบลูกกลิ้ง

Effects of Processing Parameters on the Quality of Instant Germinated Brown Rice
Porridge and Thermal Modeling of Drum Drying

นักศึกษาผู้ทำโครงการ

- | | | |
|------------------|--------------|-----------------------|
| 1. นายภูริวัจน์ | อิทธิชนพันธ์ | รหัสนักศึกษา 53011284 |
| 2. นายวชิระ | ตันตระกูล | รหัสนักศึกษา 53011388 |
| 3. นางสาวศุภวรรณ | ชนสุด | รหัสนักศึกษา 53011606 |



(ดร.เอกพงษ์ ชีวีตโสภณ)

อาจารย์ที่ปรึกษา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการ	อิทธิพลของปัจจัยกระบวนการผลิตต่อคุณภาพของโจ๊กข้าวกล้องงอกกึ่งสำเร็จรูปและแบบจำลองความร้อนของการอบแห้งแบบลูกกลิ้ง		
นักศึกษา	นายภูริวัจน์	อธิโชคธนพันธ์	รหัสนักศึกษา 53011284
	นายวชิระ	ตันตระกูล	รหัสนักศึกษา 53011388
	นางสาวศุภวรรณ	ชนสุด	รหัสนักศึกษา 53011606
อาจารย์ที่ปรึกษา	ดร.เอกพงษ์	ชีวิตโสภณ	
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต		
สาขาวิชา	วิศวกรรมอาหาร		
ปีการศึกษา	2556		

บทคัดย่อ

วัตถุประสงค์หลักของงานวิจัยนี้คือการศึกษาอิทธิพลของปัจจัยกระบวนการผลิตโจ๊กข้าวกล้องงอกกึ่งสำเร็จรูปต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ และการสร้างแบบจำลองคณิตศาสตร์สำหรับการกระจายตัวของอุณหภูมิในตัวอย่างระหว่างการอบแห้งแบบลูกกลิ้ง กระบวนการผลิตโจ๊กข้าวกล้องงอกกึ่งสำเร็จรูปประกอบด้วยขั้นตอนที่สำคัญ 3 ขั้นตอน ได้แก่ 1) การเตรียมปลายข้าวกล้องงอกโดยใช้ข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 2) การต้มสุกโดยใช้อัตราส่วนข้าวต่อน้ำเป็น 1:8 1:10 และ 1:12 น้ำหนัก/น้ำหนัก และ 3) การอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบลูกกลิ้งที่ 120 130 และ 140 องศาเซลเซียส จนได้ความชื้นฐานเปียกสุดท้ายของตัวอย่างประมาณ 3-5 เปอร์เซ็นต์ และวิเคราะห์คุณภาพของตัวอย่าง ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนข้าวต่อน้ำของการต้มและอุณหภูมิของการอบแห้งแบบลูกกลิ้งมีอิทธิพลอย่างมีนัยสำคัญต่อคุณภาพของตัวอย่าง ($p < 0.05$) ตัวอย่างมีค่าความขาว ความหนืด และการคืนรูปลดลงเมื่อเพิ่มสัดส่วนน้ำของการต้ม แต่ค่าความหนาแน่นเพิ่มขึ้น การเพิ่มอุณหภูมิของการอบแห้งทำให้ค่าความขาว และความหนืดลดลง ในขณะเดียวกันค่าความหนาแน่นและการคืนรูปเพิ่มขึ้น การทดสอบทางประสาทสัมผัสพบว่าปริมาณน้ำของการต้มและการอบแห้งไม่มีอิทธิพลต่อคะแนนการทดสอบความชอบ ซึ่งตัวอย่างที่ต้มด้วยอัตราส่วนข้าวต่อน้ำ 1:12 และอบแห้งที่ 120 องศาเซลเซียส มีค่าคะแนนความชอบรวมมากที่สุด ทำการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิในตัวอย่างระหว่างการอบแห้งแบบลูกกลิ้งโดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยวิธี Finite Difference แบบ Implicit ตัวอย่างมีค่าความร้อนจำเพาะเป็น 3.932 ± 0.029 กิโลจูล/(กิโลกรัม.องศาเซลเซียส) และค่าการนำความร้อนเป็น 0.644 ± 0.005 วัตต์/(เมตร.องศาเซลเซียส) ผลลัพธ์ของแบบจำลองแสดงให้เห็นว่าค่าอุณหภูมิผิวของตัวอย่างที่ได้จากการวัดโดยใช้เทอร์โมคัปเปิลกับค่าที่ได้จากแบบจำลองมีค่ารากที่สองของค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยอยู่ในช่วงระหว่าง 1.64-3.48 แสดงว่าแบบจำลองให้ผลการประมาณค่าอุณหภูมิของตัวอย่างในระหว่างการอบแห้งได้แม่นยำเมื่อเปรียบเทียบกับการใช้เครื่องมือวัด

ไม่อาจรู้ใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คำสำคัญ: โจ๊กข้าวกล้องงอกกึ่งสำเร็จรูป, การอบแห้งแบบลูกกลิ้ง, แบบจำลองความร้อน, คุณภาพ

Project Title	Effects of Processing Parameters on the Quality of Instant Germinated Brown Rice Porridge and Thermal Modeling of Drum Drying		
Students	Mr.Puriwat	Athichoktanaparn	53011284
	Mr.Wachira	Tuntrakul	53011388
	Ms.Suphawan	Chanasut	53011606
Project Advisor	Dr.Ekkapong	Cheevitsopon	
Degree	Bachelor of Engineering		
Program	Food Engineering		
Acedemic Year	2013		

ABSTRACT

The main objective of this research was to study the effects processing parameters on the quality of instant germinated brown rice porridge (IGP) and thermal modeling of drum drying. IGP processing comprises three necessary operations: 1) Germination of broken brown rice (KDML105) 2) Cooking with water to rice ratio (1:8 1:10 and 1:12 w/w) and 3) Drying using a drum dryer (120 130 and 140 °C) until the moisture content was approximately 3-5% w.b. The product quality was analyzed. The studied results revealed that the changes in rice to water ratio and drying temperature significantly affected the quality of IGP ($p < 0.05$). Whiteness, viscosity and rehydration decreased with increasing water amount of cooking, whereas density increased. An increase in drying temperature resulted in the decrease of whiteness and viscosity, nevertheless density and rehydration increased. The score of sensory test indicated that the rice to water ratio and drying temperature were no significant effect on the sensory test ($p < 0.05$). The sample obtained from a rice to water ratio of 1:12 and drying temperature of 120 °C had the highest overall acceptance score. The temperature distribution in sample during drum drying was modeled by the finite difference implicit form. The sample had a specific heat of 3.932 ± 0.029 kJ/(kg.°C) and thermal conductivity of 0.644 ± 0.005 W/(m. °C). The statistical result of models shows that the values of root mean square error (RMSE) were 1.64-3.48. Thus, this model was an accurate model for prediction the temperature changes in sample during drum drying as compared to a thermocouple.

Keyword: Instant Germinated Brown Rice Porridge, Drum Drying, Thermal Modeling,

Quality

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้ประสบความสำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี จากคำแนะนำ คำปรึกษา และความเอาใจใส่เป็นอย่างดีจาก ดร.เอกพงษ์ ชีวีตโสภณ ซึ่งเป็นอาจารย์ผู้ควบคุมปริญญาานิพนธ์ คณะวิจัยรัฐศึกษา ซึ่ง และขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอบพระคุณคณาจารย์ในสาขาวิชาวิศวกรรมอาหารทุกคนที่ให้ความรู้ความเข้าใจในเนื้อหาวิชาตั้งแต่เริ่มเข้าศึกษา เพื่อนำความรู้ที่ได้มาใช้ในการทำปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้

ขอบพระคุณ คุณอำนาจ คุณตะคุ ที่ให้คำแนะนำปรึกษา ตลอดจนช่วยเหลือในการทดลองการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบลูกกลิ้ง

ขอบพระคุณ คุณวราภรณ์ มาไพศาลทรัพย์ และคุณบุญนำ ผลโพธิ์ ที่จัดเตรียมอุปกรณ์การทดลองโครงการ

ขอบคุณเพื่อนๆ ทุกคนในสาขาวิชาวิศวกรรมอาหารและสาขาวิชาอื่นๆ ที่ให้กำลังใจในการทำงานจนสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอกราบขอบพระคุณนางสาวพิมพ์กุล อธิโชชนพันธ์ และนางสาวศจี แซ่มชื่นชมกุล มารดา และยายของนายภูริวัจน์ อธิโชชนพันธ์ และเครือญาติ ผู้ที่ให้ชีวิต การศึกษา และอนาคตที่ดี ตลอดจนให้คำปรึกษา ความช่วยเหลือในด้านต่างๆ แรงผลักดัน และกำลังใจในการทำปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้ให้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณนายเรืองศักดิ์ ต้นตระกูล และนางอิงอร ต้นตระกูล บิดาและมารดาของนายวชิระ ต้นตระกูล ที่สนับสนุนในทุกๆ ด้าน เป็นทั้งผู้ให้กำเนิด กำลังใจและให้อาาคตที่ดี

ขอขอบพระคุณนายสุเมท ชนสุด และนางโสพิศ ชนสุด บิดาและมารดาของนางสาวศุภวรรณ ชนสุด ผู้ให้กำเนิด เลี้ยงดู และให้การการสั่งสอนที่ดี ขอขอบคุณทุกกำลังใจและความช่วยเหลือทั้งจากบิดามารดา เครือญาติ และเพื่อนๆ ที่เป็นแรงผลักดันให้การทำปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

คุณค่า และประโยชน์จากปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้ คณะผู้วิจัยขอมอบให้แก่ผู้มีพระคุณทุกคน

นายภูริวัจน์ อธิโชชนพันธ์

นายวชิระ ต้นตระกูล

นางสาวศุภวรรณ ชนสุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญรูปภาพ	VI
สารบัญตาราง	VIII
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมา และความสำคัญ	1
1.2 วัตถุประสงค์	2
1.3 ขอบเขตงานวิจัย	2
1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ	2
บทที่ 2 ตรวจสอบเอกสาร	3
2.1 ขั้ว	3
2.2 ผลิตภัณฑ์โจ๊ก	8
2.3 องค์ประกอบ และคุณค่าทางโภชนาการของข้าว	10
2.4 พื้นฐานเกี่ยวกับการอบแห้ง	12
2.5 การอบแห้งแบบลูกกลิ้ง	19
2.6 การอบแห้งวิธีอื่นๆ	21
2.7 สมการทางคณิตศาสตร์การถ่ายเทความร้อนในกระบวนการอบแห้งแบบลูกกลิ้ง	23
2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการผลิตโจ๊กกึ่งสำเร็จรูป และแบบจำลองทางความร้อน	27
บทที่ 3 วิธีการทดลอง	30
3.1 การศึกษาปัจจัยของกระบวนการผลิตโจ๊กข้าวกลิ้งกึ่งสำเร็จรูปต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์	30
3.2 แผนการทดลอง	33
3.3 การวิเคราะห์คุณภาพผลิตภัณฑ์	33
3.4 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการกระจายอุณหภูมิ	38
3.5 การวิเคราะห์ทางสถิติ	45
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์	47
4.1 อธิธิพลของสัดส่วนน้ำของการต้มและอุณหภูมิของการอบแห้งต่อค่าความชื้นของตัวอย่าง	47

4.2	อิทธิพลของสัดส่วนน้ำของการต้มและอุณหภูมิของการอบแห้งต่อค่าความหนาแน่นของตัวอย่าง	50
4.3	อิทธิพลของสัดส่วนน้ำของการต้มและอุณหภูมิของลูกกลิ้งต่อค่าความหนืดของตัวอย่าง	52
4.4	อิทธิพลของสัดส่วนน้ำของการต้มและอุณหภูมิของลูกกลิ้งต่อค่าการคืนรูปของตัวอย่าง	53
4.5	อิทธิพลของสัดส่วนน้ำของการต้มและอุณหภูมิของการอบแห้งต่อค่า Pasting Property ของตัวอย่าง	54
4.6	การประเมินทางประสาทสัมผัสของตัวอย่าง	56
4.7	อิทธิพลของสัดส่วนน้ำของการต้มและอุณหภูมิของการอบแห้งต่อค่าความชื้นของตัวอย่าง	58
4.8	อิทธิพลของสัดส่วนน้ำของการต้มและอุณหภูมิของการอบแห้งต่อค่าวอเตอร์แอกทีวิตีของตัวอย่าง	58
4.9	การหาสภาวะที่เหมาะสมของกระบวนการผลิตโจ๊กข้าวกลิ้งออกกึ่งสำเร็จรูป	59
4.10	การทวนสอบแบบจำลองคณิตศาสตร์สำหรับการกระจายตัวของอุณหภูมิของตัวอย่างระหว่างการอบแห้งแบบลูกกลิ้ง	60
บทที่ 5	สรุปผลการทดลอง และข้อเสนอแนะ	69
5.1	สรุปผลการทดลอง	69
5.2	ข้อเสนอแนะ	70
บรรณานุกรม		71
ภาคผนวก ก.	ตารางแสดงข้อมูลที่ได้จากการทดลอง	74
ภาคผนวก ข.	โปรแกรมสำหรับการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการกระจายตัวของอุณหภูมิของตัวอย่างระหว่างการอบแห้งแบบลูกกลิ้ง	84

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

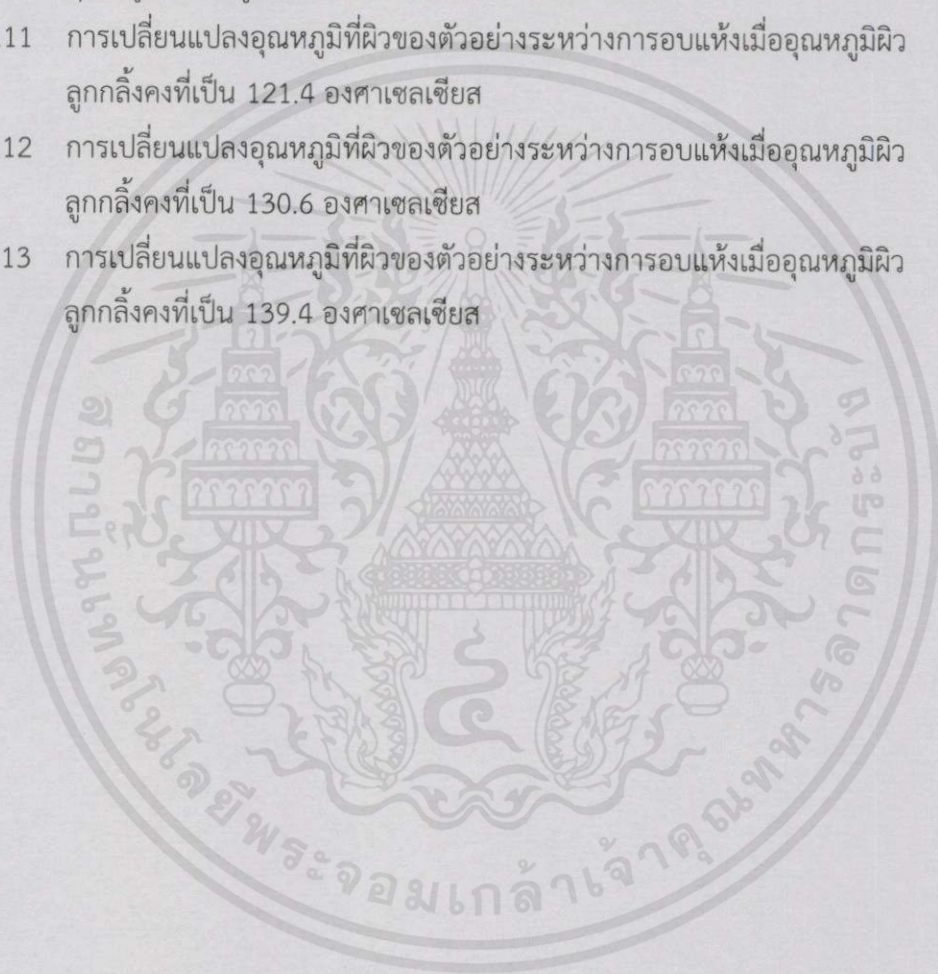
สารบัญรูปภาพ

		หน้า
รูปที่ 2.1	ภาพตัดขวางแสดงส่วนประกอบของเมล็ดข้าว	3
รูปที่ 2.2	กระบวนการผลิตข้าวกล้อง ข้าวขาว และปริมาณผลผลิต	6
รูปที่ 2.3	กระบวนการผลิตข้าวกล้องงอก	8
รูปที่ 2.4	แสดงการแพร่กระจายความชื้นในอนุภาคของแข็ง	13
รูปที่ 2.5	ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการอบแห้ง กับปริมาณความชื้น	14
รูปที่ 2.6	โครงสร้างทั่วไปของเครื่องทำแห้งแบบลูกกลิ้ง	20
รูปที่ 3.1	กระบวนการผลิตโจ๊กข้าวกล้องงอกกึ่งสำเร็จรูป	30
รูปที่ 3.2	กระบวนการผลิตข้าวกล้องงอก	31
รูปที่ 3.3	อบแห้งด้วยตู้อบลมร้อนแบบถาด	32
รูปที่ 3.4	การต้มสุก	32
รูปที่ 3.5	เครื่องอบแห้งแบบลูกกลิ้ง	33
รูปที่ 3.6	เครื่องวัดค่าสี	34
รูปที่ 3.7	การวัดความหนาแน่น	34
รูปที่ 3.8	เครื่อง Brookfield-Programmable Viscometer	35
รูปที่ 3.9	เครื่องวัดความหนืด	36
รูปที่ 3.10	อุปกรณ์สำหรับทดสอบการคืนรูป	36
รูปที่ 3.11	เครื่อง AquaLab Series 3	37
รูปที่ 3.12	การกำหนด Node ของอุณหภูมิที่กระจายตัวในตัวอย่าง	38
รูปที่ 3.13	การทดสอบหาค่าความร้อนจำเพาะ	41
รูปที่ 3.14	แผนผังการทำงานของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์การถ่ายเทความร้อน	44
รูปที่ 3.15	โปรแกรม Simulation แบบจำลองทำคณิตศาสตร์	45
รูปที่ 4.1	แสดงอิทธิพลของสัดส่วนน้ำของการต้มและอุณหภูมิของการอบแห้งต่อค่าความ ขาวของตัวอย่าง	48
รูปที่ 4.2	แสดงอิทธิพลของสัดส่วนน้ำของการต้มและอุณหภูมิของการอบแห้งต่อค่าความ หนาแน่นของตัวอย่าง	51
รูปที่ 4.3	แสดงอิทธิพลของสัดส่วนน้ำและอุณหภูมิของการอบแห้งต่อค่าความหนืดของ ตัวอย่าง	52
รูปที่ 4.4	แสดงอิทธิพลของสัดส่วนน้ำและอุณหภูมิของการอบแห้งต่อค่าการคืนรูปของ ตัวอย่าง	54
รูปที่ 4.5	กราฟแสดงสภาวะที่เหมาะสมของกระบวนการอบแห้งโจ๊กข้าวกล้องงอกโดยใช้ เครื่องอบแห้งแบบลูกกลิ้ง	60

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่าในรูปแบบใดก็ตามโดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของลิขสิทธิ์

รูปที่ 4.6	การถ่ายเทความร้อนรูปแบบต่างๆ ผ่านผิวของลูกกลิ้งและตัวอย่าง	62
รูปที่ 4.7	ตำแหน่งของการวัดอุณหภูมิบนผิวลูกกลิ้ง	62
รูปที่ 4.8	ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิในแต่ละ Node เทียบกับเวลา และเวลาที่อุณหภูมิผิวของลูกกลิ้งคงที่เป็น 121.4 องศาเซลเซียส	64
รูปที่ 4.9	ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิในแต่ละ Node เทียบกับเวลา และเวลาที่อุณหภูมิผิวของลูกกลิ้งคงที่เป็น 130.6 องศาเซลเซียส	65
รูปที่ 4.10	ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิในแต่ละ Node เทียบกับเวลา และเวลาที่อุณหภูมิผิวของลูกกลิ้งคงที่เป็น 139.4 องศาเซลเซียส	65
รูปที่ 4.11	การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่ผิวของตัวอย่างระหว่างการอบแห้งเมื่ออุณหภูมิผิวลูกกลิ้งคงที่เป็น 121.4 องศาเซลเซียส	66
รูปที่ 4.12	การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่ผิวของตัวอย่างระหว่างการอบแห้งเมื่ออุณหภูมิผิวลูกกลิ้งคงที่เป็น 130.6 องศาเซลเซียส	67
รูปที่ 4.13	การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่ผิวของตัวอย่างระหว่างการอบแห้งเมื่ออุณหภูมิผิวลูกกลิ้งคงที่เป็น 139.4 องศาเซลเซียส	68



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

		หน้า
ตารางที่ 2.1	คุณลักษณะทางเคมีของโจ๊กกึ่งสำเร็จรูป	9
ตารางที่ 2.2	ตารางเปรียบเทียบสารอาหารระหว่างข้าวกล้องและข้าวขาว	11
ตารางที่ 3.1	สมการการกระจายอุณหภูมิของผลิตภัณฑ์	40
ตารางที่ 4.1	อิทธิพลของสัดส่วนน้ำของการต้มและอุณหภูมิของการอบแห้งต่อค่าความขาวของตัวอย่าง	49
ตารางที่ 4.2	อิทธิพลของสัดส่วนน้ำของการต้มและอุณหภูมิของการอบแห้งต่อค่าความหนาแน่น ความหนืด และการคินรูปของตัวอย่าง	51
ตารางที่ 4.3	ค่าสัมประสิทธิ์และค่าคงที่ของสมการถดถอยของความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำของการต้มและอุณหภูมิของการอบแห้งต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์	53
ตารางที่ 4.4	อิทธิพลของสัดส่วนน้ำของการต้มและอุณหภูมิของลูกกลิ้งต่อค่า Pasting Property ของตัวอย่าง	55
ตารางที่ 4.5	อิทธิพลของสัดส่วนข้าวต่อน้ำและอุณหภูมิของลูกกลิ้งต่อการทดสอบทางประสาทสัมผัสของตัวอย่าง	57
ตารางที่ 4.6	อิทธิพลของสัดส่วนข้าวต่อน้ำและอุณหภูมิของลูกกลิ้งต่อค่าความชื้นและค่าวอเตอร์แอกทีวิตีของตัวอย่าง	58
ตารางที่ 4.7	ขอบเขตในการหาสภาวะที่เหมาะสมของกระบวนการอบแห้งโจ๊กข้าวกล้องงอกโดยใช้เครื่องอบแห้งแบบลูกกลิ้ง	59
ตารางที่ 4.8	ตัวแปรสำหรับการสร้างแบบจำลองคณิตศาสตร์ของการกระจายตัวของอุณหภูมิในตัวอย่งระหว่างการอบแห้งแบบลูกกลิ้ง	61
ตารางที่ 4.9	การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่ผิวของตัวอย่างในระหว่างการอบแห้งเมื่ออุณหภูมิผิวของลูกกลิ้งคงที่เป็น 121.4 องศาเซลเซียส	63
ตารางที่ 4.10	การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่ผิวของตัวอย่างในระหว่างการอบแห้งเมื่ออุณหภูมิผิวของลูกกลิ้งคงที่เป็น 130.6 องศาเซลเซียส	63
ตารางที่ 4.11	การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่ผิวของตัวอย่างในระหว่างการอบแห้งเมื่ออุณหภูมิผิวของลูกกลิ้งคงที่เป็น 139.4 องศาเซลเซียส	63
ตารางที่ 4.12	อุณหภูมิที่ผิวของตัวอย่างจากแบบจำลองเมื่ออุณหภูมิผิวของลูกกลิ้งคงที่เป็น 121.4 130.6 และ 139.4 องศาเซลเซียส	66

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

การดำเนินชีวิตของคนเมืองในปัจจุบันอยู่ในสภาวะการแข่งขันทางด้านธุรกิจ และอุตสาหกรรมสูง ส่งผลให้คนต้องทำงานแข่งกับเวลา การดำเนินชีวิตในด้านต่างๆ รวมไปถึงการประกอบอาหารในตอนเช้าอย่างเร่งรีบ ซึ่งอาหารเช้าเป็นมื้อที่สำคัญ จึงควรเลือกอาหารที่ดีและมีคุณภาพ ผลิตภัณฑ์โจ๊กกึ่งสำเร็จรูปจึงเข้ามามีบทบาทในชีวิตประจำวันมากขึ้นสำหรับผู้ที่มีเวลาจำกัด จัดเป็นผลิตภัณฑ์ที่น่าสนใจและมีศักยภาพการขยายตัวสูง

วัตถุดิบหลักที่ใช้ทำการผลิตโจ๊กในประเทศไทยคือข้าวขาวซึ่งมีการผสมเนื้อสัตว์ ผัก และเครื่องปรุงรสอื่นๆ เพื่อเพิ่มรสชาติและคุณค่าทางโภชนาการ (โสธยา, 2555) ในปัจจุบันข้าวกล้องได้รับความนิยมมาก ข้าวกล้องคือข้าวที่ผ่านกรรมวิธีการสีเพียงครั้งเดียวเพื่อให้เปลือกหุ้มเมล็ดหลุดออก และมีวิตามินที่มีประโยชน์แก่ร่างกายที่อยู่ในเมล็ดข้าวมากกว่าข้าวขาว นอกจากนั้นจมูกข้าวและเยื่อหุ้มเมล็ดข้าวเป็นแหล่งอุดมไปด้วยกรดอะมิโนต่างๆ และวิตามินหลายชนิดโดยเฉพาะสารกาบา (Gamma Amino Butyric Acid, GABA) ซึ่งมีความสำคัญในการทำหน้าที่ของสารสื่อประสาท (Neurotransmitter) ในระบบประสาทส่วนกลาง เป็นสารสื่อประสาทประเภทสารยับยั้ง (Inhibitor) โดยจะทำหน้าที่รักษาสมดุลในสมอง ช่วยทำให้สมองผ่อนคลายและนอนหลับสบาย อีกทั้งยังทำหน้าที่ช่วยกระตุ้นต่อมไร้ท่อ (Anterior Pituitary) ซึ่งทำหน้าที่ผลิตฮอร์โมนที่ช่วยในการเจริญเติบโต (Human Growth Hormone, HGH) ทำให้เกิดการสร้างเนื้อเยื่อ ทำให้กล้ามเนื้อกระชับและเกิดสาร Lipotropic ป้องกันการสะสมไขมัน ดังนั้นข้าวกล้องที่ผ่านกระบวนการงอก (Germinated Brown Rice) ทำให้มีสารอาหารเพิ่มขึ้น

โจ๊กกึ่งสำเร็จรูปเป็นผลิตภัณฑ์ประเภทอบแห้งมีลักษณะเด่นคืออายุการเก็บรักษาเพิ่มขึ้น และสะดวกต่อการบรรจุและขนส่ง การศึกษาคุณสมบัติต่างๆ ของโจ๊กกึ่งสำเร็จรูปได้แก่ ค่าความชื้น Water Activity (a_w) ความหนาแน่น การคืนรูป ความหนืด สี นับเป็นปัจจัยที่สำคัญต่อกระบวนการแปรรูป (โสธยา, 2554) นอกจากนั้นการยอมรับทางประสาทสัมผัสของผู้บริโภคเป็นอีกปัจจัยในการผลิต การทำโจ๊กข้าวกล้องงอกประกอบด้วย 3 กระบวนการได้แก่ การเตรียมข้าวกล้องงอก การทำสุก และการอบแห้ง หลังจากการอบแห้งความชื้นสุดท้ายของผลิตภัณฑ์ต้องไม่เกิน 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก (มาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน, 2547) กระบวนการอบแห้งของการผลิตโจ๊กกึ่งสำเร็จรูปนิยมใช้การอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบลูกกลิ้ง ซึ่งเหมาะกับอาหารที่มีลักษณะเหลว อาหารที่ป้อนเข้าเครื่องจะมีลักษณะเป็นแผ่นฟิล์มบางและแห้งติดอยู่บนผิวของลูกกลิ้ง ได้ผลิตภัณฑ์อบแห้งเป็นแผ่นบางหรือเป็นเกล็ดหรือเป็นผง ซึ่งในกระบวนการอบแห้งนั้นความร้อนที่ผิวของเครื่องอบแห้งแบบ

ลูกกลิ้งและอัตราส่วนข้าวต่อน้ำที่ใช้ต้มโจ๊กมีอิทธิพลต่อคุณภาพผลิตภัณฑ์หลังการอบแห้ง (โสธยา, 2554)

ในระหว่างกระบวนการอบแห้งเกิดการถ่ายเทความร้อนของผลิตภัณฑ์ อาศัยหลักการนำความร้อนจากผิวของลูกกลิ้งผ่านบริเวณผิวด้านล่างของผลิตภัณฑ์ ถ่ายเทความร้อนสู่ผิวด้านบนของผลิตภัณฑ์ และมีการสูญเสียความร้อนจากการพาความร้อนของสิ่งแวดล้อมบริเวณผิวด้านบนของผลิตภัณฑ์ แบบจำลองทางคณิตศาสตร์จึงถูกสร้างเพื่อใช้ทำนายการกระจายอุณหภูมิภายในผลิตภัณฑ์ ระหว่างการอบแห้งด้วยลูกกลิ้งโดยมีพื้นฐานมาจากกฎทรงพลังงาน (Conservation of Energy) แก๊สมการหาการกระจายอุณหภูมิแต่ละตำแหน่งด้วยวิธี Finite Difference แบบ Implicit Method ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงเป็นการศึกษาอิทธิพลของปัจจัยกระบวนการผลิตต่อคุณภาพของโจ๊กข้าวกล้องงอกที่สำเร็จรูปได้แก่ ค่าความขาว ความหนืด ความหนาแน่น การคืนรูป และสร้างแบบจำลองความร้อนของการอบแห้งแบบลูกกลิ้ง

1.2 วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาปัจจัยของกระบวนการผลิตโจ๊กข้าวกล้องงอกที่สำเร็จรูปต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์
2. เพื่อสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการกระจายตัวอุณหภูมิของโจ๊กข้าวกล้องงอกในระหว่างการอบแห้งแบบลูกกลิ้ง

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1. การผลิตข้าวกล้องงอกโดยใช้วิธีการแช่น้ำ และการบ่ม
2. วิธีการทำสุกโดยการต้มด้วยสัดส่วนข้าวต่อน้ำเป็น 1:8 1:10 และ 1:12 โดยน้ำหนัก
3. การอบแห้งโจ๊กข้าวกล้องงอกด้วยเครื่องอบแห้งแบบลูกกลิ้งที่อุณหภูมิผิวเป็น 120 130 และ 140 องศาเซลเซียส โดยมีแหล่งให้ความร้อนเป็นไอน้ำ
4. สร้างแบบจำลองคณิตศาสตร์ของกระบวนการอบแห้งโจ๊กข้าวกล้องงอกโดยใช้กฎทรงพลังงาน แก๊สมการหาการกระจายอุณหภูมิในตัวอย่างแต่ละตำแหน่งด้วยวิธี Finite-Difference แบบ Implicit Method ในระหว่างการอบแห้งแบบลูกกลิ้ง

1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

1. องค์ความรู้ของปัจจัยกระบวนการผลิตต่อคุณภาพของโจ๊กข้าวกล้องงอกที่สำเร็จรูป และการปฏิบัติที่สภาวะเหมาะสมของกระบวนการการผลิต
 2. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับอธิบายการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในโจ๊กข้าวกล้องงอกระหว่างการอบแห้งด้วยลูกกลิ้งที่มีความถูกต้องและแม่นยำ
- ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ตรวจสอบเอกสาร

2.1 ข้าว

2.1.1 คำจำกัดความของข้าว (สมาคมผู้ส่งออกข้าวไทย, 2540)

- 1) ข้าว (Rice) หมายถึงข้าวเจ้าและข้าวเหนียว (*Oryza sativa* L.)
- 2) ข้าวเปลือก (Paddy) หมายถึง ข้าวที่ไม่ผ่านการกะเทาะเอาเปลือกออก
- 3) ข้าวกล้อง (Cargo Rice, Loonzain Rice, Brown Rice, Husked Rice) หมายถึงข้าวที่ผ่านการกะเทาะเปลือกออกเท่านั้น
- 4) ข้าวขาว (White Rice) หมายถึงข้าวที่ได้จากการนำข้าวกล้องไปขัดเอารำออก
- 5) ข้าวเต็มเมล็ด (Whole Kernels) หมายถึงเมล็ดข้าวที่อยู่ในสภาพเต็มเมล็ด ไม่มีส่วนใดหักและให้รวมถึงเมล็ดข้าวที่มีความยาวตั้งแต่ 9 ส่วนขึ้นไป
- 6) ข้าวหัก (Broken) หมายถึงเมล็ดข้าวหักที่มีความยาวตั้งแต่ 2.5 ส่วนขึ้นไปแต่ไม่ถึงความยาวของต้นข้าว และให้รวมถึงเมล็ดข้าวแตกเป็นซีกที่มีเนื้อที่เหลืออยู่ตั้งแต่ร้อยละ 80 ของเมล็ด

2.1.2 ลักษณะของพืช

ข้าวเป็นพืชล้มลุกอยู่รวมกันเป็นกอมี 5-15 ต้น ลำต้นมีข้อชัดเจน ใบเดี่ยวออกสลับกัน ใบสีเขียวรูปร่างแบน ยาวเรียว ปลายแหลม ดอกขนาดเล็กออกเป็นช่อใหญ่และยาว ขนาดและรายละเอียดจะแตกต่างกันตามสายพันธุ์ของข้าว ปลูกโดยใช้เมล็ด ปลูกได้ทั่วทุกภาคของประเทศไทย (ณรงค์, 2538)

2.1.3 โครงสร้างของเมล็ดข้าว



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
รูปที่ 2.1 ภาพตัดขวางแสดงส่วนประกอบของเมล็ดข้าว
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเป็นอนุ และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
ดัดแปลงจาก: Matz, 1991

เมล็ดข้าวประกอบด้วย 2 ส่วน คือ

1. ส่วนที่ห่อหุ้ม เรียกว่า แกลบ (Hull หรือ Husk)
2. ข้าวกล้อง (Caryopsis หรือ Brown Rice)

2.1.4 ข้าวหอมดอกมะลิ 105

ประเทศไทยมีข้าวหอมมากมายหลายพันธุ์ แต่พันธุ์ข้าวหอมของไทยที่มีชื่อเสียงในตลาดโลก และตลาดภายในประเทศ ได้แก่ พันธุ์ข้าวขาวหอมมะลิ 105 หรือข้าวหอมมะลิ ที่ต่างประเทศรู้จักในชื่อ Jasmine Rice มีถิ่นกำเนิดที่แหลมประดู่ อ.พนัสนิคม ติดกับ อ.แปลงยาว จ.ชลบุรี นายจรูญ ตันทวุฒ ได้นำมาปลูกตั้งแต่ปี พ.ศ.2488 และแบ่งเมล็ดบางส่วนไปปลูกที่ท่าทองกลาง อ.บางคล้า จ.ฉะเชิงเทรา เนื่องจากเป็นข้าวหอมที่ขายได้ราคาสูง จนกระทั่งปี พ.ศ.2493 กรมการข้าว (ในสมัยนั้น) ได้รื้อฟื้นการเก็บรวบรวมพันธุ์ข้าวมาคัดพันธุ์ใหม่ พันธุ์ข้าวดอกมะลิเป็นพันธุ์หนึ่งที่ถูกเก็บรวบรวมปลูก คัดเลือกพันธุ์ให้บริสุทธิ์และประเมินผลผลิต รวงข้าวดอกมะลิที่เก็บมาจาก อ.บางคล้าโดยนายสุนทร สีหะเนิน ได้ถูกส่งไปปลูกคัดพันธุ์ที่สถานีทดลองข้าวโคกสำโรง จ.ลพบุรี ในปี พ.ศ. 2498 จำนวน 199 รวง และรวงที่ 105 เป็นสายพันธุ์เดียวที่ผ่านการคัดเลือกทดสอบผลผลิต และส่งเสริมให้ชาวนาใช้เป็นพันธุ์ปลูกในปี พ.ศ.2502 เป็นต้นมา ข้าวดอกมะลิ 105 หรือที่เรียกกันทั่วไปว่า “ข้าวหอมมะลิ” มีชื่อแท้จริงว่าข้าวดอกมะลิ 4-2-105 (เลข 4 คือหมายเลขประจำท้องถิ่นที่เก็บรวบรวม เลข 2 คือหมายเลขประจำพันธุ์ของข้าวดอกมะลิที่เก็บรวบรวมจาก อ.บางคล้า และ 105 คือรวงหรือสายพันธุ์ที่ 105 ของข้าวดอกมะลิดังกล่าว) เป็นข้าวไวต่อช่วงแสง ออกดอกประมาณวันที่ 20-25 ตุลาคม ต้นสูง 140-150 เซนติเมตร ฟางอ่อนใบสีเขียวยาวและค่อนข้างแคบ ปลูกได้เฉพาะฤดูนาปี เก็บเกี่ยวประมาณ กลางเดือนพฤศจิกายน ผลผลิตเก็บเกี่ยวจากแปลงทดลองเฉลี่ยประมาณ 510 กิโลกรัม/ไร่ น้ำหนักข้าวเปลือก 1,000 เมล็ด ประมาณ 27.7 กรัม ระยะพักตัวของเมล็ดประมาณ 8 สัปดาห์ ข้าวเปลือกมีสีฟางเมล็ดเรียวยาว ปลายเมล็ดโค้งเล็กน้อย ข้าวกล้องใส มีความเลี่ยนมัน จมูกเล็ก (ส่วนที่เป็นคัพภะ) เป็นลักษณะที่ดีของข้าวสาร เป็นข้าวมีอะไมโลสต่ำ (12-16 เปอร์เซ็นต์) เมล็ดข้าวกล้องยาว 7.4 มิลลิเมตร ข้าวที่หุงสุกมีลักษณะเหนียว นุ่ม มีกลิ่นหอมเป็นที่นิยมของผู้บริโภค พันธุ์ข้าวดอกมะลิ 105 มีข้อดีตรงที่เจริญเติบโตได้ในที่นาดอนทั่วไป ทนต่อสภาพแห้งแล้ง ทนดินเปรี้ยวและดินเค็มได้ดี ด้านทานไส้เดือนฝอยรากปม แต่ไม่ต้านทานโรคและแมลงศัตรูข้าว

2.1.5 ข้าวกล้อง

ข้าวกล้องหมายถึงข้าวที่ได้จากการสีข้าวเปลือกเจ้า ข้าวเปลือกเหนียว เพื่อเอาเปลือกออกเท่านั้น ทั้งที่เป็นเมล็ดข้าว ต้นข้าว ข้าวหักใหญ่ ข้าวหักและปลายข้าว หรือข้าวได้จากการนำข้าวเปลือกมากะเทาะให้เปลือกออกเท่านั้น ข้าวที่ได้จะมีสีขาวขุ่น บ้างมีสีน้ำตาลปนแดง มากน้อยขึ้นอยู่กับพันธุ์ข้าว ข้าวกล้องถือว่าเป็นอาหารที่มีความสมดุล เนื่องจากมีวิตามินหลายอย่างที่ไม่ได้ถูกขัดออกไป วิตามินเหล่านี้เป็นประโยชน์ต่อร่างกายมากโดยเฉพาะวิตามินบีทั้งหลาย ป้องกันโรคเหน็บชา โรคอ่อนเพลีย และยังมีธาตุเหล็กที่ช่วยป้องกันโรคโลหิตจาง มีไฟเบอร์ช่วยในการขับถ่ายอีกด้วย ทั้งยังมีสารอาหารที่จำเป็นต่อร่างกายรวม 20 ชนิด เช่น วิตามินบี 1 วิตามินบี 2 ธาตุเหล็ก ฟอสฟอรัส

แคลเซียม ทองแดง ไชมัน โปรตีน คาร์โบไฮเดรต เป็นต้น แต่เมื่อเทคโนโลยีสมัยใหม่ถูกนำมาใช้ในการ
 ขัดสีข้าว คนไทยจึงเปลี่ยนจากการรับประทานข้าวกล้องมาเป็นข้าวที่ผ่านการขัดสีจนขาวเรื่อยมา โดย
 การนำมาหุงรับประทานกับอาหารคาวหลายชนิด บ้างก็นำมาแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆ มากมาย

2.1.6 ส่วนประกอบของข้าวกล้อง (Matz, 1991)

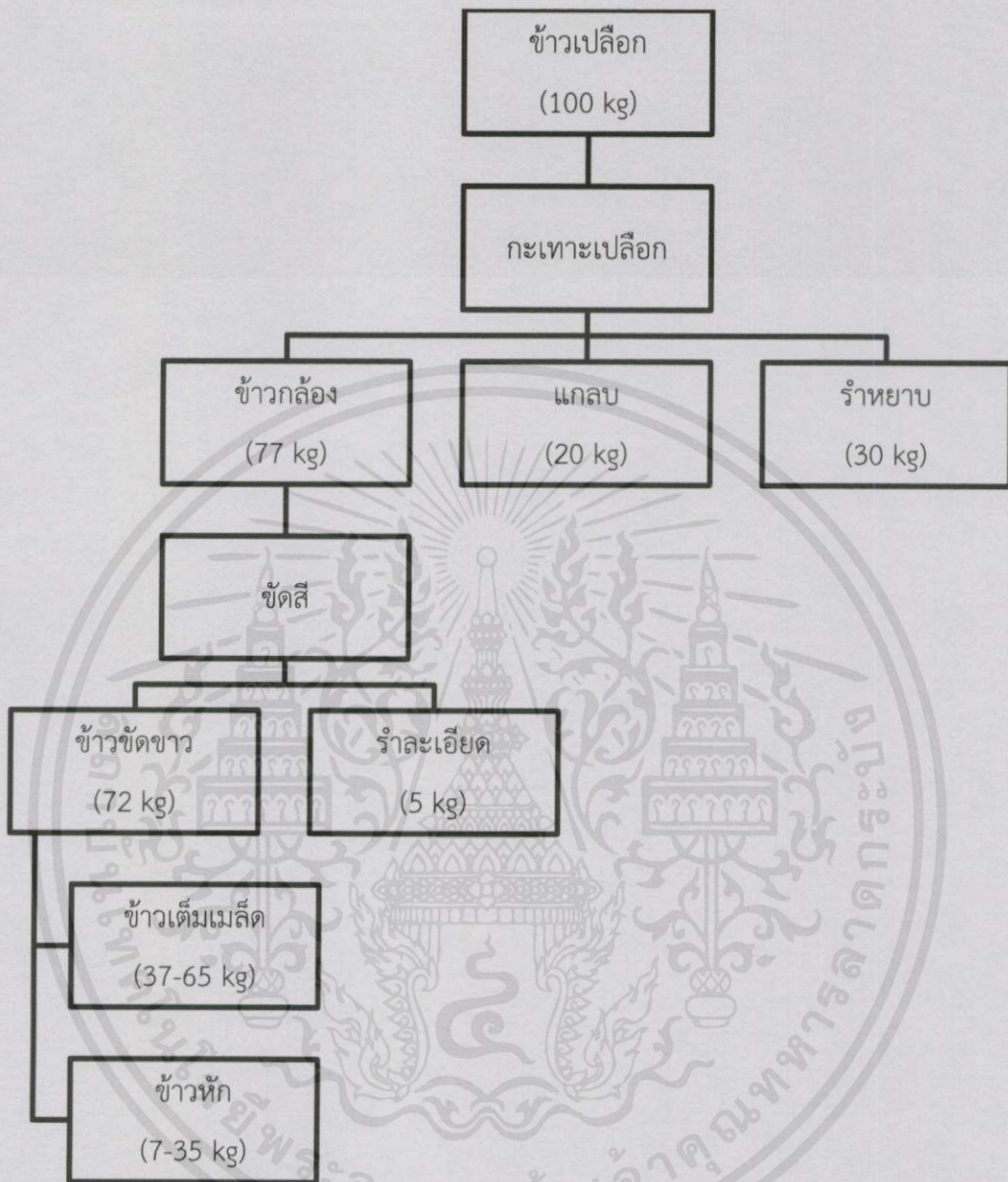
ข้าวกล้องถูกห่อหุ้มด้วย Caryopsis Coat ซึ่งประกอบด้วยส่วนต่างๆ ดังนี้

- 1) เยื่อหุ้มผล (Pericarp)
- 2) เยื่อหุ้มเมล็ด (Seed Coat) อยู่ถัดจากเยื่อหุ้มผลเข้าไป
- 3) เยื่อนิวเซลลาร์ (Nucellar Layer)
- 4) เยื่อออลูโรน (Aleurone Layer) ห่อหุ้มส่วนที่เป็นแป้ง (Starchy Endosperm) และเชื้อพันธุ์ (Embryo) เยื่อออลูโรนมีโปรตีนสูง
- 5) เอ็มบริโอ (Embryo หรือ Germ) มีขนาดเล็กเมื่อเทียบกับขนาดเมล็ดข้าวกล้อง และอยู่บน
 ด้านข้างของท้องเมล็ดข้าวกล้อง ภายในเอ็มบริโอเป็นใบอ่อนและรากอ่อนที่ถูกเชื่อมติดกันโดยลำต้นที่
 สั้นมากๆ เอ็มบริโออยู่ติดกับเอนโดสเปิร์มโดยใบเลี้ยง
- 6) ส่วนที่เป็นแป้ง (Starchy Endosperm) เป็นส่วนที่ใหญ่กว่าส่วนที่เป็นเนื้อเยื่ออื่นๆ ทั้งหมดมาก
 ประกอบด้วยแป้งเป็นส่วนใหญ่และมีโปรตีนอยู่บ้าง

ในเมล็ดข้าวที่ยังไม่ผ่านการกะเทาะเปลือกจะมีส่วนของกลีบอยู่ 18-28 เปอร์เซ็นต์ ส่วนของ
 ข้าวกล้อง 72-82 เปอร์เซ็นต์ ส่วนของเยื่อหุ้มผล 1-2 เปอร์เซ็นต์ เยื่อนิวเซลลาร์และเยื่อหุ้มเมล็ด 4-6
 เปอร์เซ็นต์ เอ็มบริโอ 2-3 เปอร์เซ็นต์ และส่วนที่เป็นแป้ง 89-94 เปอร์เซ็นต์ ประมาณ 6-10
 เปอร์เซ็นต์ ของข้าวกล้องถูกเอาออกไปขณะทำการขัดสี ผลิตภัณฑ์ที่เป็นผลพลอยได้ ได้แก่ รำข้าว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.7 กระบวนการผลิตข้าวกล้อง ข้าวขาว และปริมาณผลผลิต (สายสนม, 2541)



รูปที่ 2.2 กระบวนการผลิตข้าวกล้อง ข้าวขาว และปริมาณผลผลิต

เมื่อพิจารณากระบวนการผลิตและปริมาณผลผลิตของข้าวกล้องและข้าวขาว จะเห็นว่าข้าวกล้องให้ผลผลิตมากกว่า ไม่ต้องใช้พลังงานขั้นการขัดสีและลดการสูญเสียรำละเอียดและข้าวหัก

2.1.8 ข้าวกล้องงอก

ข้าวกล้องงอกคือข้าวกล้องที่นำมาผ่านกระบวนการงอกโดยการนำข้าวกล้องที่ผ่านการกะเทาะเปลือกไม่นานเกิน 2 สัปดาห์ แช่น้ำที่มีการควบคุมอุณหภูมิ การไหลเวียนน้ำ ความดัน และไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมี เกิดตะกอนเน่าเสีย และต้องอย่างเช่นของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำใบใช้ ความเป็นกรดต่างเป็นเวลา 48-72 ชั่วโมง น้ำจะไปกระตุ้นเอนไซม์ในเมล็ดข้าวกล้องทำให้เกิดการย่อยสลายของสารอาหารในเมล็ดข้าวได้เป็นสารที่มีโมเลกุลขนาดเล็กลง เช่น โอลิโกแซคคาไรด์ กลูโคส

และพรีคโดตจากคาร์โบไฮเดรต กรดอะมิโนและเปปไทด์จากโปรตีน รวมทั้งยังพบการสะสมสารเคมีสำคัญต่างๆ เช่น แกมมาออริซานอล โทโคฟีรอล โทโคไตรอินอล โดยเฉพาะสารแกมมาอะมิโนบิวทริกแอซิดหรือที่รู้จักกันว่าสารกาบา ซึ่งพบว่าข้าวกล้องงอกมีสารกาบามากกว่าข้าวกล้องปกติถึง 15 เท่า คือมีปริมาณสารกาบาโดยเฉลี่ย 15-20 มิลลิกรัม ต่อข้าวกล้องงอก 100 กรัม

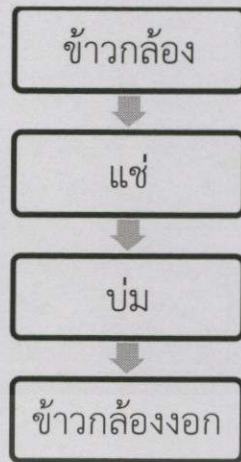
สารกาบาเกิดจากกระบวนการตีคาร์บอกซิเดชันกรดกลูตามิก ซึ่งมีความสำคัญในการทำหน้าที่ของสารสื่อประสาท (Neurotransmitter) ในระบบประสาทส่วนกลาง และสารกาบายังเป็นสารสื่อประสาทประเภทสารยับยั้ง (Inhibitor) โดยจะทำหน้าที่รักษาสมดุลในสมองที่ได้รับการกระตุ้น ช่วยทำให้สมองผ่อนคลายและนอนหลับสบาย อีกทั้งยังทำหน้าที่ช่วยกระตุ้นต่อมไร้ท่อ (Anterior Pituitary) ซึ่งทำหน้าที่ผลิตฮอร์โมนที่ช่วยในการเจริญเติบโต (Human Growth Hormone, HGH) ทำให้เกิดการสร้างเนื้อเยื่อ ทำให้กล้ามเนื้อกระชับ และเกิดสารไลโปโทรปิก (Lipotropic) ป้องกันการสะสมไขมัน

ดารุณี และคณะ (2552) ทำการทดลองโดยการนำข้าวเปลือกพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 ไปสีเป็นข้าวกล้อง จากนั้นนำข้าวกล้องมาแช่น้ำเป็นระยะเวลา 12-48 ชั่วโมง ที่ระดับ pH 4-8 ที่อุณหภูมิห้องเพื่อให้ข้าวมีความชื้นไม่ต่ำกว่า 30 เปอร์เซ็นต์ จนข้าวกล้องมีรากงอกยาวประมาณ 0.5-1.0 มิลลิเมตร

นฤปดี และคณะ (2552) ทำการทดลองโดยการนำข้าวเปลือกพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 มาแกะเปลือกด้วยเครื่องแกะเปลือกได้ข้าวกล้องหอมมะลิ 105 และแช่น้ำที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 36 ชั่วโมง โดยมีการเปลี่ยนน้ำทุกๆ 4 ชั่วโมง ข้าวกล้องภายหลังการแช่น้ำจะเกิดการงอกบริเวณจุกข้าวขนาดเล็กยาวประมาณ 0.5-2 มิลลิเมตร

Cheevitsopon and Noomhorm (2011) นำข้าวกล้องจำนวน 500 กรัม แช่ในอ่างควบคุมอุณหภูมิที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง จากนั้นนำไปเพาะงอกโดยการบ่มที่อุณหภูมิที่ 35 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ 90 เปอร์เซ็นต์ เป็นเวลา 20 ชั่วโมง โดยมีการเปลี่ยนน้ำทุกๆ 5 ชั่วโมง ข้าวกล้องภายหลังการบ่มจะเกิดการงอกบริเวณจุกข้าวเป็นตุ่มเล็กๆ ได้เป็นข้าวกล้องงอก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.3 กระบวนการผลิตข้าวกล้องงอก

2.2 ผลิตภัณฑ์โจ๊ก

โสธยา และคณะ (2554) ศึกษาการนำข้าวหอมมะลิที่เตรียมได้มาแปรรูปเป็นโจ๊กข้าวหอมมะลิตามวิธีการของ Hellands et al., (2002) โดยนำข้าวและน้ำในอัตราส่วน 1:4 1:6 1:8 และ 1:10 (น้ำหนัก/น้ำหนัก) มาต้มโดยการให้ความร้อนในอ่างน้ำ (Water Bath) อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 90 นาที โดยมีการคนในขณะต้มให้ความร้อน หลังจากนั้นที่ 3 และ 10 หลังจากนั้นคนตัวอย่างทุก 10 นาที จนครบ 90 นาที

โสธยา และคณะ (2554) ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตโจ๊กผสมฟักทองโดยผลการประเมินคุณภาพทางด้านประสาทสัมผัสพบว่าอัตราส่วนข้าวต่อน้ำที่ใช้ในการเตรียมโจ๊กข้าวเป็น 1:10 (น้ำหนัก/น้ำหนัก) และอัตราส่วนโจ๊กข้าวต่อฟักทองที่เหมาะสมในการเตรียมโจ๊กผสมฟักทองได้แก่ 60:40 (น้ำหนัก/น้ำหนัก) ตามลำดับ

ศุภย์ทางด่วนข้อมูลการเกษตร (2553) กล่าวถึงการผลิตโจ๊กโดยเตรียมข้าวหอมมะลิต่อนจำนวน 2 กิโลกรัม ข้าวกล้องจำนวนครึ่งกิโลกรัม ข้าวเหนียวจำนวน 200-300 กรัม ล้างข้าวหอมมะลิต่อน ข้าวกล้อง และข้าวเหนียวเพื่อทำความสะอาด ใส่ลงในหม้อเบอร์ 42 ปริมาณครึ่งหม้อ ตั้งไฟแล้วใส่ข้าวหอมมะลิต่อน ข้าวกล้อง ลงไปในหม้อ จากนั้นใส่ข้าวเหนียว (การใส่ข้าวเหนียวขณะต้มโจ๊กช่วยให้โจ๊กเหนียวข้น ไม่คืนตัวเหลวเป็นน้ำเร็วจนเกินไป ส่งผลให้โจ๊กที่ได้มารับประทาน) ทำการคนให้ส่วนผสมเข้ากัน หมั่นคนข้าวในหม้อ ระวังอย่าให้ติดก้นหม้อ ตั้งบนไฟประมาณ 1 ชั่วโมง หรือสังเกตจากความยุ่ยของเนื้อข้าวและความเหนียวข้นของโจ๊ก

Manohar et al., (1998) กล่าวถึงการต้มโจ๊กโดยใช้ข้าวสาเลีต่อน้ำในอัตราส่วน 1:10 (น้ำหนัก/น้ำหนัก) ใช้เวลาต้ม 18 นาที จะได้เป็นโจ๊กที่สมบูรณ์

2.2.1 โจ๊กกึ่งสำเร็จรูป

มาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน (2547) ได้ให้คำนิยามของโจ๊กกึ่งสำเร็จรูปว่าเป็นผลิตภัณฑ์ที่ทำจากข้าวซึ่งทำให้สุกเป็นบางส่วน มีลักษณะเป็นเม็ดเล็กๆ ผสมกับเนื้อสัตว์ที่ทำให้สุกและแห้งพร้อม

ด้วยเครื่องปรุงแต่งกลิ่นรสอื่นๆ โดยรักษาคุณภาพและกลิ่นรสเดิมของส่วนประกอบไว้ได้ และทำให้สุก
รับประทานได้ในระยะเวลาสั้น

คุณลักษณะที่ต้องการของโจ๊กกึ่งสำเร็จรูป ได้แก่

- 1) คุณลักษณะทางกายภาพ โจ๊กกึ่งสำเร็จรูปต้องมีสีและกลิ่นตามธรรมชาติของส่วนประกอบที่ใช้ และ
ต้องไม่มีกลิ่นหืน เมื่อนำมาเติมน้ำตามส่วนที่แฉังไว้แล้วจะต้องสุกรับประทานได้หลังจากต้มต่อไปอีก
เป็นเวลาไม่เกิน 10 นาที
- 2) คุณลักษณะทางเคมี ให้เป็นไปตามกำหนดในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 คุณลักษณะทางเคมีของโจ๊กกึ่งสำเร็จรูป

รายการ	เกณฑ์ที่กำหนด	วิเคราะห์ตามวิธี
ความชื้นไม่เกินร้อยละของน้ำหนัก	ไม่เกิน 10 เปอร์เซ็นต์	AOAC (1975) ข้อ 14.125 หรือ 14.126
ที่มา : มาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน (2547)		
3) คุณลักษณะทางจุลชีววิทยา โจ๊กกึ่งสำเร็จรูปยอมให้มีจุลินทรีย์ได้ไม่เกินเกณฑ์ที่กำหนด ดังนี้		
- จำนวนจุลินทรีย์ทั้งหมด (Total Plate Count) ต่อกรัมของตัวอย่าง		1×10^5
- จำนวนรา (Mold) ต่อกรัมของตัวอย่าง		100
- จำนวนอีโคไล (E.coli) ต่อกรัมของตัวอย่าง (MPN)		น้อยกว่า 3
- คลอสทริเดียม เวลชีโอ (Clostridium welchii) ใน 0.01 กรัมของตัวอย่าง		ต้องไม่พบ
- สะตาฟีโลคอคคัส ออเรียส (Staphylococcus aureus) ใน 0.01 กรัมของตัวอย่าง		ต้องไม่พบ
- จำนวนซัลโมเนลลา (Salmonella) ใน 25 กรัม ของตัวอย่าง		ต้องไม่พบ

จรัสพรรณ (2544) ได้ศึกษาพัฒนาการผลิตโจ๊กข้าวกล้องกึ่งสำเร็จรูปจากข้าวกล้องหอมมะลิ
ที่ผสมกับส่วนผสมอื่นๆ พบว่าผู้บริโภคต้องการให้มีถั่วเขียว ถั่วแดง ลูกเดือย แครอท และผักทอง
หั่นเป็นสี่เหลี่ยมลูกเต๋ารวมเป็นส่วนผสม บรรจุผลิตภัณฑ์ในถ้วยพลาสติก และต้องใช้เวลาในการ
คั้นรูปด้วยน้ำร้อนไม่เกิน 5 นาที

สมโภชน์ และคณะ (2548) ได้ศึกษากรรมวิธีการผลิตโจ๊กข้าวกล้องหอมมะลิกึ่งสำเร็จรูป
พบว่ากระบวนการผลิตที่เหมาะสมคือการนำข้าวมาหุงแบบไม่แช่น้ำที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส
เป็นเวลา 30 นาที โดยใช้อัตราส่วนข้าวต่อน้ำเป็น 1:1.25 (น้ำหนัก/น้ำหนัก) นำไปผ่านกระบวนการทำ
แห้งด้วยเครื่องทำแห้งแบบลูกกลิ้งที่อุณหภูมิ 140 องศาเซลเซียส ระยะห่างระหว่างลูกกลิ้งเป็น 1.02
มิลลิเมตร ความเร็วรอบ 0.5 รอบ/นาที จะทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีลักษณะเป็นแผ่นเกล็ดสีขาวและ
เหมาะสมต่อการนำไปทำเป็นผลิตภัณฑ์โจ๊กกึ่งสำเร็จรูป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
อรอนงค์ (2550) กล่าวว่าผลิตภัณฑ์โจ๊กกึ่งสำเร็จรูปที่ผลิตและจำหน่ายในประเทศไทยส่วนใหญ่
ไม่ว่าจะรสใดก็ตามก็ยังมีที่ต้นกำเนิดมาจากแป้งและแป้งอเนกประสงค์ของเอกสารที่กล่าวไปใช้
ใหญ่มักจะใช้ข้าวเจ้า เช่น ข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 เป็นองค์ประกอบหลักของผลิตภัณฑ์เนื่องจาก

ข้าวพันธุ์ข้าวดอกมะลิ 105 มีคุณภาพการหุงเป็นที่นิยมของคนไทย ข้าวที่ผ่านการหุงมีลักษณะนุ่มเหนียว เรียงตัวเป็นเมล็ด ไม่แฉะ และมีกลิ่นหอมเฉพาะ

2.3 องค์ประกอบ และคุณค่าทางโภชนาการของข้าว

2.3.1 องค์ประกอบของข้าว

- 1) คาร์โบไฮเดรต ข้าวทุกชนิดมีคาร์โบไฮเดรตเป็นส่วนประกอบร้อยละ 70-80 ซึ่งเป็นแป้งเกือบทั้งหมด มีน้ำตาลซูโครส และเดกซ์ทรินเล็กน้อย เมื่อคาร์โบไฮเดรตถูกเผาผลาญจะให้พลังงานแก่ร่างกาย ซึ่งถ้ามีมากเกินไปความต้องการของร่างกายจะถูกเปลี่ยนไปสะสมในรูปของไขมัน
- 2) โปรตีน ธัญพืชส่วนมากจะมีโปรตีนไม่มากคือข้าวเจ้ามีร้อยละ 7-8 ข้าวสาลีมีร้อยละ 11-12 โปรตีนจากพืชเป็นโปรตีนที่ไม่สมบูรณ์เพราะมีกรดอะมิโนชนิดจำเป็นไม่เพียงพอ จึงควรรับประทานโปรตีนจากอาหารชั้นดีจำพวกเนื้อสัตว์ ไข่ นม และถั่วต่างๆ
- 3) ไขมัน ข้าวกล้องมีปริมาณไขมันสูงกว่าข้าวขาวเพราะข้าวกล้องยังมีส่วนของรำข้าวอยู่ แต่เมื่อเทียบกับอาหารชนิดอื่นๆ ข้าวไม่ใช่แหล่งที่อุดมด้วยสารอาหารจำพวกไขมัน แต่ไขมันในข้าวกล้องเป็นไขมันชนิดที่ดีเพราะไม่มีโคเรสเตอรอลเหมือนไขมันจากสัตว์
- 4) โยอาหาร ข้าวกล้องมีใยอาหารสูงกว่าข้าวขาว โยอาหารมีประโยชน์ต่อระบบขับถ่ายโดยมีสมบัติอุ้มน้ำจึงช่วยเพิ่มเนื้ออุจจาระ และทำให้อุจจาระนิ่ม ถ่ายง่าย นอกจากนี้การรับประทานข้าวกล้องจะช่วยให้อิ่มเร็ว และอิ่มนาน เพราะใยอาหารจะเข้าไปแทนที่ในกระเพาะและต้องใช้เวลาในการย่อยนานกว่า จึงทำให้อยู่ท้องไม่ค่อยหิว ข้าวกล้องจึงเหมาะกับผู้ที่ต้องการควบคุมน้ำหนักด้วย
- 5) วิตามินและแร่ธาตุ ข้าวกล้องมีวิตามินและแร่ธาตุสูงกว่าข้าวขาวที่เห็นชัดเจนคือ ไทอะมีน ไนอะซิน ฟอสฟอรัส และโปแทสเซียม

2.3.2 คุณค่าทางโภชนาการในข้าวกล้อง

ถึงแม้ข้าวกล้องจะมีสีสันทึมนำรับประทาน เมื่อหุงแล้วไม่นุ่มเท่าข้าวขาว แต่ข้าวกล้องมีคุณค่าทางสารอาหารที่เป็นประโยชน์มากมายต่อร่างกายเนื่องจากข้าวกล้องเป็นข้าวที่ผ่านการขัดสีเพียงครั้งเดียว จึงยังมีจมูกข้าวและเยื่อหุ้มเมล็ดซึ่งอุดมไปด้วยโปรตีนซึ่งมีประโยชน์ช่วยซ่อมแซมส่วนที่สึกหรอของร่างกาย รวมทั้งวิตามินและเกลือแร่ต่างๆ ซึ่งนอกจากจะช่วยเสริมสร้างและฟื้นฟูให้วัยยะส่วนต่างๆ ของร่างกายทำงานอย่างมีประสิทธิภาพแล้ว ยังช่วยป้องกันโรคต่างๆ เช่น โรคไขมันในเส้นเลือดสูง โรคเบาหวาน โรคภูมิแพ้ โรคไตวาย เป็นต้น นอกจากนี้ข้าวกล้องยังมีเส้นใยอาหารซึ่งช่วยในการทำงานของระบบขับถ่ายและป้องกันมะเร็งลำไส้อีกด้วย ตารางที่ 2.2 แสดงให้เห็นถึงคุณค่าทางอาหารของข้าวกล้องเมื่อเทียบกับข้าวขาว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.2 ตารางเปรียบเทียบสารอาหารระหว่างข้าวกล้องและข้าวขาว

สารอาหาร	หน่วย	ข้าวกล้อง	ข้าวขาว	ดีกว่า (%)
วิตามินบีรวม	-	-	-	-
บี 1 (Thiamien)	Mg	0.34	0.07	385
บี 2 (Riboflavin)	Mg	0.05	0.03	66
ไนอาซิน (Niacin)	Mg	0.62	0.11	463
กรดเพทโทเรนิค (Peatothernic acid)	Mg	1.5	0.22	581
กรดโฟลิก (Folic acid)	Mg	20	3.6	455
เกลือแร่	-	-	-	-
เหล็ก	Mg	1.6	0.8	100
แคลเซียม	Mg	32	24	33
แมกนีเซียม	Mg	52	14	271
แมงกานีส	Mg	1.5	0.9	63
สังกะสี	Mg	1.9	1.5	27
โคบอลท์	Mg	4.2	0.9	376
ทองแดง	Mg	360	230	57
ซิลิเนียม	Mg	38.8	31.8	22
ไอโอดีน	Mg	2.2	2	10
โปรตีน	G	7.6	6.5	19

2.3.3 ผลดีของการรับประทานข้าวกล้องเป็นประจำ

การบริโภคข้าวกล้องเป็นประจำ บริโภคอาหารเพียงพอและถูกหลักโภชนาการพบว่าสามารถแก้ไขโรคต่างๆ ได้ดังนี้ (ศรีนวล, 2529)

1) โรคเหน็บชา เกิดจากการขาดวิตามินบี 1 โรคเหน็บชาแบ่งเป็นชนิดแห้งและชนิดเปียก ชนิดแห้งจะไม่มีอาการบวม ส่วนชนิดเปียกจะมีอาการบวมและหัวใจโต ส่วนอาการอื่นๆ เช่น อ่อนเพลีย เบื่ออาหาร ท้องผูก มีอาการทางประสาทและกล้ามเนื้อคือ กล้ามเนื้อไม่ทำงาน หัวใจทำงานผิดปกติ หอบเหนื่อยง่าย ถ้าเป็นมากหัวใจอาจวาย แก้ไขโดยการกินอาหารวิตามินบีสูงซึ่งในข้าวกล้องมีมากกว่าข้าวขาวร้อยละ 35.8

2) โรคปากนกกระจอก เพราะขาดวิตามินบี 2 ผู้ป่วยจะมีอาการเป็นแผลที่มุมปาก ริมฝีปากบวม ร่างกายอ่อนเพลีย เบื่ออาหาร ตาสู้แสงไม่ได้ ในชนบทมีเด็กเป็นโรคปากนกกระจอกร้อยละ 60 ในข้าวกล้องมีวิตามินบี 2 มากกว่าข้าวขาวร้อยละ 66 สามารถรักษาโรคนี้ได้

3) โรคโลหิตจาง เพราะขาดธาตุเหล็ก เป็นทั้งในเด็กและผู้ใหญ่และยังพบว่าการขาดวิตามินและโปรตีนเป็นสาเหตุของโรคนี้ด้วย ผู้ป่วยจะมีอาการอ่อนเพลีย หงุดหงิด หน้ามืด เป็นลมง่าย เบื่ออาหาร

ผิวซีด หัวใจมักโต ถ้าเป็นมากอาจดับโต การแก้ไขสามารถทำได้โดยรับประทานอาหารที่มีธาตุเหล็ก และโปรตีนสูง ซึ่งในข้าวกล้องมีเป็น 2 เท่าของข้าวขาว

4) โรคนี้ในกระเพาะปัสสาวะ เกิดจากการได้รับโปรตีนและฟอสฟอรัสไม่เพียงพอ ทำให้เกิดนิ่วในกระเพาะปัสสาวะ อาการคือปัสสาวะขัดและปวดเจ็บเวลาถ่ายปัสสาวะ ปัสสาวะขุ่น การมีเลือดออกมาด้วย ในข้าวกล้องมีฟอสฟอรัสมากกว่าข้าวขาว 4 เท่า การรับประทานข้าวกล้องจึงสามารถป้องกันโรคนี้ได้

5) โรคท้องผูก เพราะข้าวขาวมีเส้นใยน้อยกว่าข้าวกล้อง มีผลมาจากการขัดสีข้าว ในข้าวกล้องมีเส้นใยมากกว่าข้าวขาว 5 เท่า

6) โรคระบบทางประสาทบางชนิดและโรคปลายประสาทอักเสบ เพราะขาดวิตามินบีรวม

7) อารมณ์เสื่อง่าย หงุดหงิด เพราะขาดวิตามินบีรวมซึ่งเป็นวิตามินที่เสริมสร้างระบบประสาทของร่างกาย ถ้าระบบประสาทของเราไม่ดีทำให้เราควบคุมอารมณ์ได้ไม่ดีนัก

8) เบื่ออาหาร เพราะขาดวิตามินบีรวม ซึ่งข้าวกล้องมีมากกว่าข้าวขาว

9) ขาดโปรตีน ข้าวกล้องมีโปรตีนร้อยละ 7-12 (เด็กประมาณร้อยละ 40-60 เป็นโรคขาดโปรตีนและพลังงาน)

10) โรคผิวหนังบางชนิด เพราะขาดวิตามินบี

11) อ่อนเพลียรู้สึกเหนื่อยกว่าปกติ เนื่องจากขาดวิตามินบี

12) โรคช้ำ เนื่องจากขาดวิตามินบี 6 ซึ่งมีมากในข้าวกล้อง

2.4. พื้นฐานเกี่ยวกับการอบแห้ง

การอบแห้งคือกระบวนการลดความชื้น ซึ่งส่วนใหญ่ใช้การถ่ายเทความร้อนไปยังวัสดุที่ขึ้นเพื่อลดความชื้นออกด้วยการระเหย โดยใช้ความร้อนที่ได้รับเป็นความร้อนแฝงของการระเหย เนื่องจากกระบวนการอบแห้งอาหารเกี่ยวข้องกับทั้งการถ่ายเทมวล และการถ่ายเทความร้อน มวลที่ถ่ายเทระหว่างการทำให้แห้งอาหารส่วนใหญ่คือน้ำที่มีอยู่ในอาหาร โดยทั่วไปแล้ววัตถุประสงค์หลักของการทำให้แห้งก็เพื่อยืดอายุการเก็บรักษาของผลิตภัณฑ์ เนื่องจากการอบแห้งเป็นกระบวนการลดความชื้นในผลิตภัณฑ์ ซึ่งมีผลให้จุลินทรีย์ที่ทำให้ผลิตภัณฑ์เน่าเสียไม่สามารถเจริญเติบโตได้นอกจากนี้ปฏิกิริยาเคมี เช่น ปฏิกิริยาออกซิเดชัน ยังมีอัตราการเกิดปฏิกิริยา (Rate of Reaction) ที่ต่ำลงมากเมื่อปริมาณความชื้นในผลิตภัณฑ์มีค่าลดลง การอบแห้งยังช่วยลดค่าใช้จ่ายในการขนส่งและการเก็บรักษา และในบางกรณีการผลิตไม่อาจเกิดขึ้นได้หากไม่มีการอบแห้งเช่น การผลิตนมผง และกาแฟสำเร็จรูป

กระบวนการอบแห้งเป็นกระบวนการที่ซับซ้อน เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของกระบวนการถ่ายเทความร้อนและมวลสารไปกับเวลาที่ใช้ในการอบแห้งนอกจากนี้การเปลี่ยนแปลงต่างๆ ของวัสดุไม่ว่าจะไม่ว่าจะเป็นการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ ทางเคมี หรือทางชีวเคมี ล้วนมีผลกระทบต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ รวมทั้งกลับไปมีผลต่อกลไกการถ่ายเทความร้อนและมวลสารอีกด้วย ในส่วนของการ

เปลี่ยนแปลงทางกายภาพวัสดุอาจเกิดการหดตัว (Shrinkage) การพองตัว (Puffing) การตกผลึก (Crystallization) หรือการหลอมตัว (Melting) ส่วนการเปลี่ยนแปลงทางเคมีนั้นอาจมีทั้งการเปลี่ยนแปลงที่ต้องการและไม่ต้องการซึ่งอาจนำไปสู่การเปลี่ยนแปลงทางสี เนื้อสัมผัส (Texture) กลิ่น รส และคุณภาพอื่นๆ ของวัสดุได้ (สั๊กมน, 2555)

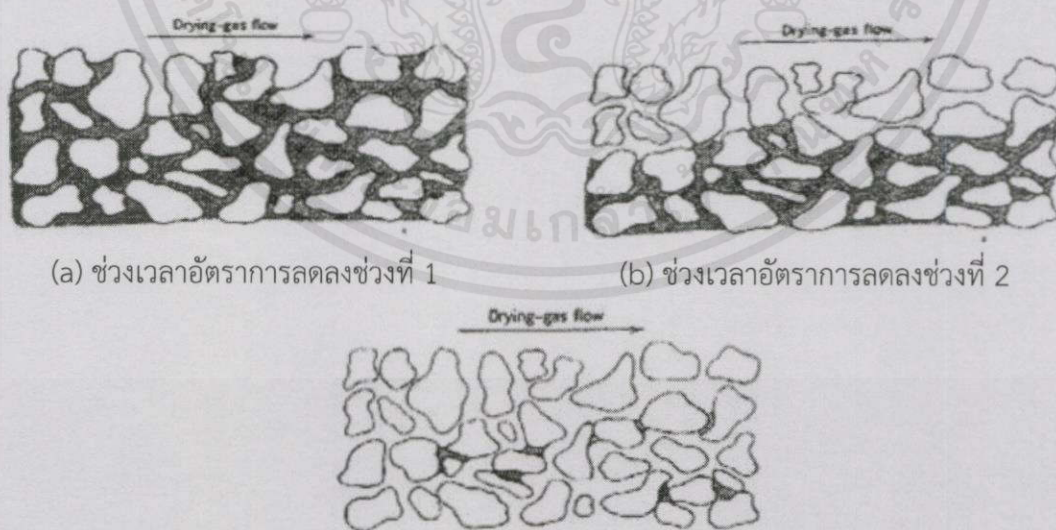
2.4.1. หลักการการทำแห้ง (สมบัติ, 2529)

การอบแห้งอาหารต่างๆ ไปอาศัยหลักการที่ว่า ปริมาณน้ำหรือความชื้นที่มีในอาหารสูงจะทำให้อาหารเน่าเสียง่ายทั้งเนื่องจากจุลินทรีย์และจากปฏิกิริยาทางเคมี ดังนั้นการดึงออกจากอาหารให้มีความชื้นลดลงจนพอเหมาะแก่อาหารแต่ละชนิดแล้วจะทำให้อาหารนั้นสามารถเก็บรักษาได้นานขึ้น ทั้งนี้หลักการของการอบแห้งอาหารจะเกี่ยวเนื่องกับจุดประสงค์ของการอบแห้ง ซึ่งในอาหารทั่วไปจะมีจุดประสงค์หลักอยู่ 2 ประการ คือ

- 1) เพื่อต้องการลดปริมาณน้ำเพื่อป้องกันการเน่าเสียของอาหารเนื่องจากจุลินทรีย์ จากการศึกษาพบว่าปริมาณความชื้นในอาหารที่จะป้องกันการเสื่อมเสียของอาหารเนื่องจากจุลินทรีย์โดยทั่วไปจะดึงน้ำออกเหลือต่ำกว่าร้อยละ 10 หรือมี a_w ต่ำกว่า 0.6
- 2) เพื่อต้องการลดน้ำหนักของอาหารในการขนส่ง เนื่องจากการขนส่งผลิตภัณฑ์บางชนิดในสภาพสดจะกินเนื้อที่และการดูแลรักษาลำบาก

2.4.2. กลไกการทำแห้ง

เมื่ออากาศร้อนหรือลมร้อนพัดผ่านผิวหน้าอาหารที่เปียก ความร้อนจะถูกถ่ายเทไปยังผิวของอาหาร และน้ำในอาหารจะระเหยออกมาด้วยความร้อนแฝงของการเกิดไอ ไอน้ำจะแพร่ผ่านอากาศและถูกพัดพาไปโดยลมร้อนที่เคลื่อนที่ กลไกการทำแห้งแสดงในรูปที่ 2.4



(a) ช่วงเวลาอัตราการลดลงช่วงที่ 1

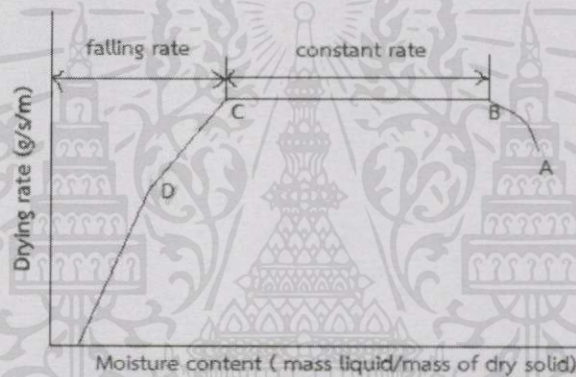
(b) ช่วงเวลาอัตราการลดลงช่วงที่ 2

(c) ช่วงเวลาสิ้นสุดการอบแห้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับภาควิชาวิศวกรรมอาหาร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
รูปที่ 2.4 แสดงการแพร่กระจายความชื้นในอนุภาคของแข็ง (Foust et.al., 1980)

จากสภาวะดังกล่าวจะทำให้ความดันไอที่ผิวหน้าของอาหารต่ำกว่าความดันไอด้านในของอาหาร เป็นผลให้เกิดความแตกต่างของความดันไอขึ้น อาหารชั้นด้านในจะมีความดันไอสูงและค่อยๆ ลดต่ำลงเมื่อชั้นอาหารเข้าใกล้อากาศแห้ง ความแตกต่างนี้ทำให้เกิดแรงดันเพื่อไล่น้ำออกจากอาหาร น้ำจะเคลื่อนที่ไปยังผิวหน้าด้วยกลไกดังต่อไปนี้

- 1) การเคลื่อนที่ของเหลวโดยแรงคาปิลลารี (Capillary Force) เป็นการเคลื่อนที่ในอาหารที่มีเซลโลโปรง มีช่องว่างระหว่างเซลล์ต่อเนื่องกันเป็นทางแคบๆ เกิดแรงดันของน้ำขึ้นมาตามท่อ การเคลื่อนที่สะดวก รวดเร็ว แต่จะหยุดเมื่อน้ำในทางแคบๆ นั้นขาดตอนลง
- 2) การแพร่ของของเหลว ซึ่งเกิดจากความแตกต่างของความเข้มข้นของตัวทำละลายในอาหารส่วนต่างๆ
- 3) การแพร่ของของเหลวซึ่งถูกดูดซับโดยผิวหน้าของของแข็งในอาหาร
- 4) ความแตกต่างของความดันไอทำให้เกิดการแพร่ของไอน้ำในช่องอากาศของอาหาร



รูปที่ 2.5 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการอบแห้ง กับปริมาณความชื้น

ลักษณะของการอบแห้ง (รูปที่ 2.5) ได้แก่

1) ช่วงการปรับสภาวะเบื้องต้น (Initial Adjustment Period, AB) เป็นช่วงเริ่มต้นที่อาหารที่ใช้ในการอบแห้งมีความชื้นเริ่มต้น (A) ของอาหารยังสูงอยู่ ผิวของอาหารจะมีลักษณะเปียกชื้นมาก เกิดการถ่ายเทความร้อนระหว่างตัวกลางลมนร้อนกับอาหารทำให้อุณหภูมิพื้นผิวอาหารมีค่าใกล้เคียงกับอุณหภูมิเกาะเปียก (Wet Bulb Temperature) ของกระแสลมร้อนที่ใช้เป็นตัวกลาง อัตราการทำแห้งค่อยๆ เพิ่มขึ้นจนถึงช่วงอัตราทำแห้งคงที่ (Constant Rate)

2) ช่วงอัตราการแห้งคงที่ (Constant Rate Period, BC) เป็นช่วงที่น้ำภายในวัสดุเคลื่อนที่มาที่ผิวหน้า พลังงานความร้อนที่วัสดุได้รับจะใช้ในการระเหยน้ำออกจากวัสดุอย่างต่อเนื่อง ความชื้นเฉลี่ยของวัสดุจะลดลงเป็นสัดส่วนกับเวลาในการอบแห้ง จุดสุดท้ายของช่วงการอบแห้งความเร็วคงที่

ไม่ช้า อัตราเร็วในการอบแห้งจะเริ่มลดลง ความชื้นของวัสดุ ณ เวลานั้นเรียกว่า ความชื้นวิกฤต (Critical Moisture Content)

3) ช่วงอัตราการอบแห้งลดลง (Falling Rate Period, CD และ DE) เป็นช่วงที่ความชื้นในอาหารเหลือน้อยจนแพร่ไปยังผิวหน้าอาหารอย่างต่อเนื่อง ผิวหน้าของอาหารเริ่มแห้งทำให้อุณหภูมิตั้งผิวของอาหารสูงขึ้นเรื่อยๆ อัตราการอบแห้งจะลดลง ความชื้นจะลดลงเรื่อยๆ จนถึงค่าความชื้นสมดุล (Equilibrium Moisture Content) ซึ่งเป็นความชื้นที่ต่ำสุดภายใต้สภาวะที่ใช้อยู่ในขณะนั้น ที่ความชื้นนี้อัตราการอบแห้งเป็นศูนย์ น้ำในอาหารไม่สามารถระเหยออกมาได้อีก

2.4.3 ความชื้น

ความชื้นเป็นตัวบอกปริมาณของน้ำที่มีอยู่ในวัสดุเมื่อเทียบกับมวลของวัสดุขึ้นหรือแห้ง ความชื้นในวัสดุสามารถแสดงได้เป็น 2 แบบ คือ

ความชื้นฐานเปียก (M_w) คือ อัตราส่วนของน้ำหนักน้ำที่อยู่ในวัสดุกับน้ำหนักทั้งหมดของวัสดุ โดยทั่วไปมักแสดงเป็นเปอร์เซ็นต์ และนิยมใช้ในการการค้าในการบอกค่าความชื้นของวัสดุนั้นๆ

$$M_w = \frac{w_i - w_f}{w_i} \times 100 \quad (2.1)$$

ความชื้นฐานแห้ง (M_d) คือ อัตราส่วนของน้ำหนักน้ำที่อยู่ในวัสดุกับน้ำหนักแห้งของวัสดุ ค่าน้ำหนักแห้งของวัสดุจะมีค่าคงที่หรือเกือบคงที่ระหว่างการอบแห้ง ที่ว่าเกือบคงที่นี้เพราะผลผลิตทางการเกษตรเป็นสิ่งมีชีวิต มีการหายใจ ดังนั้นจึงมีการเผาผลาญของสารอาหารทำให้มวลแห้งลดลงซึ่งส่วนใหญ่แล้วจะลดลงเพียงเล็กน้อย ดังนั้นจึงนิยมใช้ในการวิเคราะห์กระบวนการอบแห้งทางทฤษฎี เพราะช่วยให้การคำนวณสะดวกขึ้น

$$M_d = \frac{w_i - w_f}{w_f} \times 100 \quad (2.2)$$

เมื่อ

w_i คือ น้ำหนักเริ่มต้น (กรัม)

w_f คือ น้ำหนักสุดท้าย (กรัม)

2.4.4 วอเตอร์แอกทีวิตี (Water Activity, a_w) (ศูนย์เครือข่ายข้อมูลอาหารครบวงจร, 2557)

วอเตอร์แอกทีวิตีเป็นค่าที่แสดงระดับพลังงานของน้ำ (มีค่าตั้งแต่ 0 ถึง 1) มีความสำคัญต่ออายุการเก็บรักษา การเสื่อมเสีย และความปลอดภัยของอาหาร สามารถแบ่งอาหารตามค่าวอเตอร์แอกทีวิตีออกเป็น 3 ประเภทดังนี้

1) อาหารสด (Fresh food) เป็นอาหารที่เน่าเสียง่าย (Perishable Food) มีค่าวอเตอร์แอกทีวิตีมากกว่า 0.85 เช่น เนื้อสัตว์ ผัก ผลไม้ อาหารทะเล

2) อาหารกึ่งแห้ง (Intermediate Moisture Food) หมายถึงอาหารที่มีวอเตอร์แอกทีวิตีระหว่าง 0.6-0.85 เช่น นมข้นหวาน ผลไม้แช่อิ่ม กุ้งปรุงรส

3) อาหารแห้ง (Dried Food) หมายถึงอาหารที่มีวอเตอร์แอกทีวิตี้น้อยกว่า 0.6 เช่น นมผง ผักผลไม้อบแห้ง กุ้งแห้ง น้ำผลไม้ผง เก๊กฮวยผงขงต้ม กระจายผงขงต้ม หมูหยอง

2.4.5 อิทธิพลของการอบแห้งต่อปัจจัยต่างๆ ของอาหาร

1) อิทธิพลต่อคุณค่าทางโภชนาการด้านปริมาณ ในระหว่างการอบแห้ง น้ำในอาหารจะระเหยออกไปหรือความชื้นในอาหารลดลง ดังนั้นปริมาณอาหารที่มีอยู่ในอาหารเมื่อเทียบกับน้ำหนักจะมีความเข้มข้นของสารอาหารเพิ่มขึ้น

2) อิทธิพลของการทำแห้งต่อคุณภาพของโปรตีน โดยลักษณะธรรมชาติของโปรตีนแล้ว ถ้าได้รับความร้อนสูงนานๆ จะทำให้โปรตีนเกิดการเปลี่ยนแปลงจากสภาพธรรมชาติ (Denature) ดังนั้นคุณค่าทางอาหารด้านการใช้ประโยชน์หรือคุณภาพของโปรตีนจะเหลือน้อยลงหรือมากขึ้นทั้งนี้ขึ้นอยู่กับกรรมวิธีการทำแห้ง

3) อิทธิพลการทำแห้งต่อไขมัน ไขมันที่มีในอาหารต่างๆ ไปจะทำให้อาหารเหม็นหืน โดยเฉพาะอย่างยิ่งภายใต้อุณหภูมิสูง ทั้งนี้อาจทำแห้งโดยใช้อุณหภูมิต่ำหรือภายใต้สภาพสุญญากาศ หรืออาจใช้สารเคมีบางชนิดป้องกันการเกิดปฏิกิริยาออกซิเจน (Oxidation) สารประเภทนี้เรียกว่าสารป้องกันการออกซิไดซ์ (Antioxidant) เช่น Butylated Hydroxy Toluene (BHT) เป็นต้น

4) อิทธิพลการทำแห้งต่อคาร์โบไฮเดรต แป้งและน้ำตาลที่มีอาหารจะเกิดการเปลี่ยนแปลงที่สำคัญ คือเมื่อได้รับความร้อนสูงในช่วงระดับความเข้มข้นที่เหมาะสมจะเกิดปฏิกิริยาสีน้ำตาล (Browning Reaction) เช่นปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลที่เกี่ยวข้องกับเอนไซม์ในผลไม้จะทำให้ผลไม้เปลี่ยนเป็นสีน้ำตาลในขณะที่ทำแห้ง หรือการเกิดปฏิกิริยาการเกิดคาราเมลซึ่งเกิดจากปฏิกิริยาของน้ำตาลรีดิวซ์กับกรดอินทรีย์ ปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลนี้พบในอาหารที่มีความชื้นร้อยละ 1-30

5) อิทธิพลของการทำแห้งต่อเชื้อจุลินทรีย์ ความชื้นที่มีในอาหารสูงจะทำให้เชื้อที่มีอยู่เข้าไปเจริญเติบโตได้ดี ดังนั้นการเลือกเก็บอาหารในสภาพสดหรือแห้งไม่พอจึงมีโอกาสเน่าเสียเนื่องจากจุลินทรีย์ได้ง่าย สภาพแวดล้อมที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของเชื้อจุลินทรีย์แต่ละประเภทแตกต่างกัน เช่น แบคทีเรียและยีสต์เจริญได้ที่ความชื้นร้อยละ 30 ส่วนเชื้อราสามารถเจริญเติบโตและมีความชื้นร้อยละ 12 ดังนั้นอาหารแห้งที่ลดความชื้นจนเหลือร้อยละ 10 สามารถเก็บรักษาได้นานหากบรรจุในภาชนะที่ดีหรือเก็บในที่ที่มีความชื้นสัมพัทธ์ต่ำ

2.4.6 การเปลี่ยนแปลงสมบัติเชิงกายภาพของผลิตภัณฑ์อบแห้ง

1) สี กลิ่น และรสชาติ

วิล (2546) ศึกษาเรื่องกลิ่นและรสชาติในระหว่างการอบแห้งความร้อน การอบแห้งจะทำให้สารให้กลิ่นระเหยออกไปด้วย ดังนั้นการสูญเสียการให้กลิ่นจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิที่ใช้ ความเข้มข้นของแข็งทั้งหมดในอาหาร ความดันไอของสารที่ระเหยได้ และความสามารถในการละลาย หากเป็นสารที่ระเหยได้ง่ายจะสูญเสียตั้งแต่เริ่มต้นอบ ส่วนช่วงหลังของการอบจะมีการสูญเสียเพียงเล็กน้อยเท่านั้น ดังนั้นการควบคุมภาวะที่ใช้ในการอบแห้งจะช่วยลดการสูญเสียกลิ่นและรสชาติของอาหารได้ สีในการทำแห้งทำให้เกิดการเปลี่ยนสีผิวของอาหารและเปลี่ยนการสะท้อนแสงของสี มีการเปลี่ยนแปลงทาง

เคมีของสารแคโรทีนอยด์และคลอโรฟิลล์ ซึ่งเกิดจากความร้อนและการออกซิเดชันระหว่างการอบแห้ง ยิ่งการอบแห้งใช้เวลานานและอุณหภูมิสูงยิ่งเกิดได้ง่าย และอาจเกิดสีน้ำตาลระหว่างการเก็บรักษาหากยังมีปฏิกิริยาของเอนไซม์เหลืออยู่ สามารถป้องกันการทำงานของเอนไซม์ได้โดยการนำไปลวก การเกิดปฏิกิริยาเปลี่ยนเป็นสีน้ำตาลขึ้นอยู่กับ a_w และอุณหภูมิที่ใช้ระหว่างการเก็บรักษา ยิ่งเก็บรักษาไว้ที่อุณหภูมิสูงยิ่งมีสีคล้ำโดยเฉพาะเมื่ออาหารมีความชื้นมากกว่าร้อยละ 4-5 และอุณหภูมิสูงกว่า 38 องศาเซลเซียส

2) ลักษณะเนื้อสัมผัส

นิธิยา (2544) ศึกษาการเปลี่ยนแปลงลักษณะเนื้อสัมผัสภายหลังการอบแห้งจะมีผลต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ การเปลี่ยนแปลงลักษณะเนื้อสัมผัสอาจเกิดขึ้นเมื่อสตาร์ชเกิดเจลาติไนเซชันหรือเกิดการเกิดผลึกของเซลลูโลส การเคลื่อนย้ายของโมเลกุลน้ำในอาหารระหว่างการอบแห้งทำให้อาหารเหี่ยวและมีปริมาตรลดลง อุณหภูมิและอัตราการอบแห้งจะมีผลต่อลักษณะเนื้อสัมผัสของอาหาร การอบแห้งอย่างรวดเร็วที่อุณหภูมิสูงทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงลักษณะเนื้อสัมผัสมากกว่าการใช้อุณหภูมิต่ำ น้ำจะเคลื่อนย้ายระหว่างการอบแห้งและตัวทำละลายโดยเคลื่อนย้ายจากด้านในออกมาด้านนอก กลไกและอัตราการเคลื่อนย้ายของตัวถูกละลายแต่ละชนิดขึ้นอยู่กับชนิดของอาหารและสภาวะที่ใช้ในการอบแห้ง เมื่อน้ำระเหยออกไปทำให้ตัวถูกละลายมีความเข้มข้นที่ผิวมากขึ้น ถ้าอากาศมีอุณหภูมิสูงจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมีและทางกายภาพที่ซับซ้อนที่ผิว และผิววนอกของอาหารจะแข็งขึ้นเรียกว่าการเกิดเปลือกแข็ง ซึ่งจะลดอัตราการแห้งของส่วนที่อยู่ด้านในชั้นอาหาร ผลิตภัณฑ์อาหารอบแห้งที่ได้จะมีผิววนอกแห้งและภายในยังชื้นอยู่ ทำให้ความชื้นระหว่างผิววนอกและด้านในของอาหารมีความแตกต่างกันสูง สำหรับอาหารผงลักษณะเนื้อสัมผัสวัดด้วยความหนาแน่นรวมซึ่งขึ้นอยู่กับส่วนประกอบของอาหาร วิธีการทำแห้งที่ใช้ และขนาดอนุภาคของผลิตภัณฑ์ที่ได้ อาหารที่มีไขมันต่ำจะเกิดลักษณะเป็นผงลื่นไหลกว่าพวกที่มีไขมันสูง เช่น นมผง เมื่อนำไปแช่น้ำให้คินตัวจะเกิดความสามารถในการเปียก (Wettability) ความสามารถในการจม (Sinkability) ความสามารถในการกระจาย (Dispersibility) และความสามารถในการละลาย (Solubility) ตามลำดับ อาหารที่จัดเป็นผงละลายทันที (Instant) จะเกิดลักษณะทั้ง 4 อย่างในเวลาไม่กี่วินาที และอาหารที่เป็นผงขนาดเล็กๆ จะเก็บรักษาได้นานกว่าอาหารที่มีผงขนาดใหญ่เพราะอาหารที่เป็นผงขนาดใหญ่มีอากาศเข้าไปแทรกตัวอยู่มาก

3) การหดตัว

การหดตัวเนื่องจากเซลล์เนื้อเยื่อสัตว์และพืชของสิ่งมีชีวิตมีคุณสมบัติของความเต่งตึง ซึ่งหมายความว่าของเหลวที่อยู่ภายในแต่ละเซลล์จะทำให้เซลล์พองออกจนมีโครงสร้างเหนียวแน่นคล้ายลูกบอลลูกหนึ่งเซลล์จะมีลักษณะอยู่ภายใต้แรงตึงผิวในขณะที่ของภายในเซลล์จะถูกแรงอัด โครงสร้างของผนังเซลล์มีลักษณะแข็งแรงและยืดหยุ่น แต่เมื่อเนื้อเยื่อเซลล์ได้ผ่านกระบวนการ เช่น การอบแห้ง โครงสร้างอาหารเกิดการเปลี่ยนแปลงทันทีเนื่องจากการเคลื่อนที่ของของเหลว การกระจายตัวใหม่ของตัวถูกละลาย และการหดตัว เมื่อเป็นเช่นนี้ทำให้ลักษณะการเคลื่อนที่หรือการ

ส่งผ่านมวลก็จะเปลี่ยนไประหว่างกระบวนการอบแห้ง ฉะนั้นถ้าหากสามารถรักษาก่อนอาหารให้มีความชื้นทั้งผิวนอกและข้างในไม่แตกต่างกันมากจะพบว่าการหดตัวจะเกิดขึ้นน้อยมาก แต่หากอุณหภูมิที่เริ่มต้นสูงมากจะทำให้ผิวนอกแห้งและมีลักษณะแข็งในขณะที่ภายในยังนิ่มอยู่ การหดตัวก็จะเกิดขึ้นและภายในก่อนอาหารจะมีลักษณะเป็นโพรง

4) ความสามารถในการดูดกลืนน้ำกลับของผลิตภัณฑ์

ไพบูลล์ (2532) ศึกษาความสามารถในการดูดกลืนน้ำกลับของผลิตภัณฑ์อบแห้งที่มีปัจจัยคุณภาพของอาหารแห้งที่สำคัญ ได้แก่ ลักษณะเนื้อสัมผัสและความสามารถในการคืนตัว ลักษณะเนื้อสัมผัสที่เหนียว ลักษณะเป็นเส้นใยทำให้การคืนตัวเกิดขึ้นอย่างช้าๆ หรือไม่สมบูรณ์ การดูดกลืนน้ำไม่ใช่ปฏิกิริยาย้อนกลับของการทำแห้งแต่เป็นการเปลี่ยนแปลงด้านลักษณะเนื้อสัมผัส การเคลื่อนที่ของตัวทำละลายและการสูญเสียการระเหยสามารถเกิดแบบย้อนกลับไปเหมือนเดิมได้ ความร้อนลดระดับการดูดกลืนน้ำของแป้งและความยืดหยุ่นของผนังเซลล์ทำให้โปรตีนจับตัวกันและลดความสามารถในการอมน้ำ อาจใช้อัตราเร็วและระดับการดูดกลืนน้ำเป็นตัวชี้วัดคุณภาพของอาหารได้ สถานะการทำแห้งที่เหมาะสมจะทำให้อาหารเกิดความเสียหายน้อยกว่าและดูดกลืนน้ำได้เร็วกว่าอาหารที่ทำแห้งที่สถานะที่ไม่เหมาะสม เช่น กรณีการสูญเสียความนุ่มของเนื้ออบแห้งอาจเนื่องมาจากการจับตัวของโปรตีนในกล้ามเนื้อ ได้มีการศึกษาแสดงให้เห็นว่าถ้าเก็บเนื้อเยื่อพืชหรือสัตว์ไว้ที่อุณหภูมิสูงเป็นระยะเวลาหนึ่งการเปลี่ยนแปลงแบบไม่คืนตัวจะเกิดขึ้นเสมอแม้อุณหภูมินั้นจะไม่สูงพอที่จะทำให้อาหารเกิดสีน้ำตาลหรือไหม้ก็ตาม ความยืดหยุ่นของผนังเซลล์และความสามารถในการพองตัวของแป้งเป็นปัจจัยสำคัญต่อการคืนตัว แต่ปัจจัยทั้งสองลดลงเมื่ออาหารโดนกับความร้อน เช่น เนื้ออบแห้งสามารถดูดซับน้ำได้เพียงส่วนหนึ่งของน้ำเริ่มต้นเท่านั้น และถึงแม้ว่าสามารถดูดซับน้ำได้จนน้ำหนักเท่าเดิมก็ไม่ได้หมายความว่าเนื้อนั้นจะมีโครงสร้างเหมือนเดิม ผลิตภัณฑ์หลังคืนตัวจะไม่มีลักษณะฉ่ำและมีลักษณะเนื้อร่วนกว่าเนื้อสด และตัวอย่างการแช่เยือกแข็งและการละลายก่อนการอบแห้งอาจช่วยปรับปรุงคุณสมบัติการคืนตัวของผักแห้งได้ ทั้งนี้เป็นที่เข้าใจว่าการแช่เยือกแข็งจะทำให้เกิดรูช่องว่างอันเนื่องจากผลึกน้ำแข็ง แม้ว่าคุณสมบัติการดูดซับน้ำของผักอาจดีขึ้นแต่ความสามารถในการจับตัวของสารในอาหารกับน้ำอาจไม่ดีขึ้น การทำอาหารแห้งแบบแช่เยือกแข็งเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีคุณสมบัติการคืนตัวได้ดีเพราะสามารถคืนตัวได้อย่างรวดเร็วและมีลักษณะใกล้เคียงกับของเดิมมากที่สุด

2.4.7 ปัจจัยที่มีผลต่อการทำแห้ง

ในการทำแห้งอาหารทั่วไปมีปัจจัยหลายประการที่ทำให้การอบแห้งนั้นเกิดได้เร็วหรือช้า ปัจจัยต่างๆ ดังนี้

1) ลักษณะธรรมชาติของอาหาร อาหารที่มีลักษณะเป็นรูพรุนมากหรือที่มีพื้นที่ผิวมากจะมีอัตราการ

อบแห้งเร็ว การที่สวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

2) ขนาดและรูปร่างของอาหาร ส่วนใหญ่จะคำนึงถึงความหนาของอาหารโดยที่อัตราการอบแห้งจะเป็นสัดส่วนผกผันกับความหนาของอาหาร

3) ปริมาณและการจัดเรียงอาหาร การใส่อาหารมากเกินไปจะทำให้การอบแห้งทำได้ไม่ทั่วถึง โดยเฉพาะชิ้นอาหารที่อยู่ช่วงกลางของเครื่องอบ น้ำจะระเหยออกได้ไม่ดีและความร้อนเข้าไปไม่ถึง นอกจากนี้การจัดเรียงชิ้นอาหารที่ทำให้ความชื้นออกไปไม่สะดวกจะทำให้อัตราการอบแห้งช้ามาก

4) ความสัมพันธ์ของอุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ และความเร็วมวล อุณหภูมิอากาศสูง ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศต่ำ และความเร็วมวลสูงจะทำให้ความชื้นระเหยออกจากอาหารได้เร็ว

ความดันเกี่ยวกับการระเหยของน้ำเนื่องจากในที่มีความดันต่ำน้ำจะเดือดในอุณหภูมิต่ำลง ดังนั้นการทำแห้งภายใต้ความดันสูงจะทำให้อัตราการอบแห้งเร็วขึ้น

2.5 การอบแห้งแบบลูกกลิ้ง

วิล (2546) กล่าวว่าทำให้ความร้อนลูกกลิ้งที่ทำจากโลหะเหล็กทรงกระบอกกลวงซึ่งหมุนอย่างช้าๆ โดยใช้ไอน้ำความดันสูงที่อุณหภูมิ 120 ถึง 170 องศาเซลเซียส อาหารจะแผ่เป็นชั้นบางอย่างสม่ำเสมอบนผิวของลูกกลิ้ง อาหารแห้งจะหลุดออกโดยใช้ใบมีดซึ่งสัมผัสกับผิวของลูกกลิ้งอย่างสม่ำเสมอก่อนที่ลูกกลิ้งจะหมุนครบ 1 รอบ (ภายใน 20-30 วินาที) เครื่องอบแห้งนี้อาจประกอบด้วยลูกกลิ้งหนึ่งหรือสองลูกก็ได้ โดยจะนิยมใช้ลูกกลิ้งเดี่ยวมากกว่าเพราะมีความยืดหยุ่นในการใช้มากกว่าแบบลูกกลิ้งคู่เนื่องจากมีพื้นที่ผิวของลูกกลิ้งที่ใช้ในการอบแห้งสูงกว่า ดูแลรักษาง่าย ไม่เกิดความเสียหายเนื่องจากวัตถุโลหะหล่นลงมาระหว่างลูกกลิ้ง

เครื่องอบแห้งแบบลูกกลิ้งให้อัตราการอบแห้งประสิทธิภาพการใช้พลังงานสูง เหมาะสำหรับอาหารเหลวที่มีขนาดอนุภาคใหญ่เกินกว่าจะใช้เครื่องอบแห้งแบบฉีดพ่นฝอย อย่างไรก็ตามต้องใช้เงินลงทุนสูงและอาหารที่ไวต่อความร้อนอาจเกิดความเสียหายได้ มีการใช้เครื่องอบแห้งแบบลูกกลิ้งในการอบแห้งอาหารชนิดต่างๆ ได้แก่ มันฝรั่งแผ่น ผลิตภัณฑ์ที่ทำให้สุกแล้วจากธัญพืช กากน้ำตาล ซุปแห้ง เนื้อผลไม้บางชนิด โจ๊ก ไชผง และโปรตีนหางนม

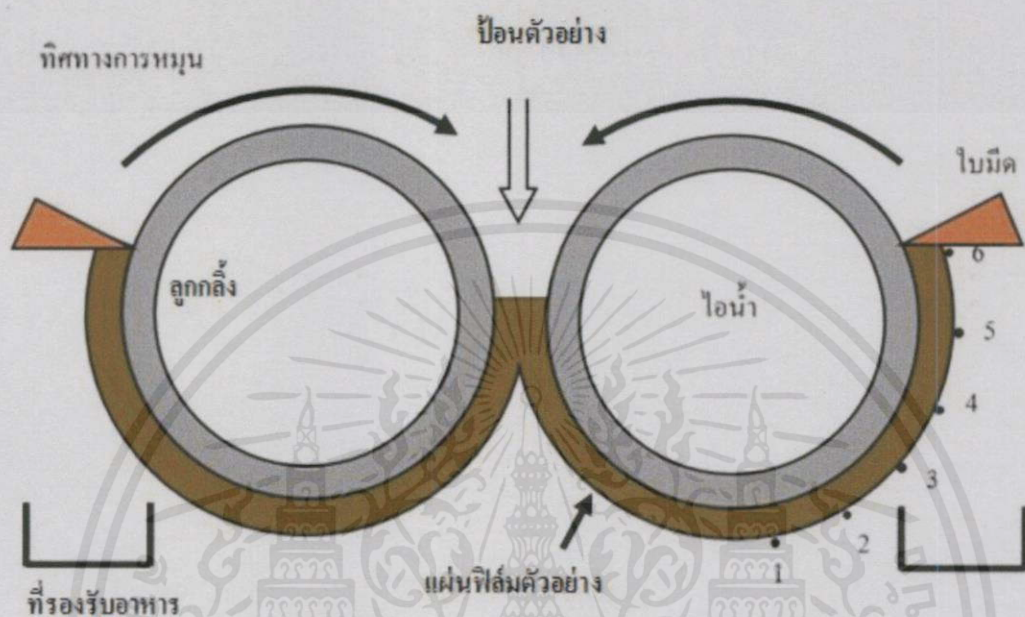
2.5.1 นิยามของการอบแห้งแบบลูกกลิ้ง

โดยทั่วไปเครื่องอบแห้งแบบลูกกลิ้งเป็นเครื่องอบแห้งซึ่งเหมาะสำหรับการอบแห้งวัสดุที่มีลักษณะของเหลวข้นหนืดหรือของเหลวข้นแข็ง (Paste) การอบแห้งกระทำโดยการป้อนของเหลวลงบนผิวของลูกกลิ้งซึ่งหมุนรอบตัวเองอย่างช้าๆ โดยมีให้ความร้อนกับลูกกลิ้งดังกล่าวด้วยวิธีการต่างๆ เช่น อาจป้อนไอน้ำหรือน้ำมันร้อนเข้าไปในลูกกลิ้ง หรืออาจติดตั้งขดลวดไฟฟ้าให้ความร้อนภายในลูกกลิ้ง ด้วยลักษณะดังกล่าวของเหลวจะเกาะตัวกันเป็นชั้นแผ่นฟิล์มบางๆ เคลือบผิวลูกกลิ้งและถูกหลุดออกจากผิวด้วยใบมีด (Blade) ดังนั้นผลิตภัณฑ์ที่ได้จะมีลักษณะเป็นเกล็ด (Flake) ซึ่งแตกต่างจากการอบแห้งแบบพ่นฝอยซึ่งให้ผลิตภัณฑ์อยู่ในรูปของอนุภาค ในกรณีที่ใช้งานเครื่องอบแห้งประเภทนี้ในการผลิตอาหารผงบางชนิด เช่น กล้วยผง ควรระลึกไว้เสมอว่าลักษณะผงที่ได้จากการบดเกล็ดอาหารที่ได้จากเครื่องอบแห้งแบบลูกกลิ้งจะมีความแตกต่างเป็นอย่างมากเมื่อเทียบกับ

ไม่ว่าจะเครื่องพ่นฝอยอีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการอบแห้งเครื่องอบแห้งแบบลูกกลิ้งต้องคำนึงถึงปัจจัยสำคัญต่างๆ ดังต่อไปนี้ 1) อุณหภูมิของไอน้ำ 2) ความเร็วในการหมุนของลูกกลิ้ง 3) ความหนาของชั้นฟิล์มวัสดุที่เคลือบผิวลูกกลิ้ง 4) สมบัติของวัสดุที่ต้องการอบแห้ง เช่น ความเข้มข้นและสมบัติทางกระแสวิทยา

2.5.2 โครงสร้างทั่วไปของอุปกรณ์ทำแห้งแบบลูกกลิ้ง



รูปที่ 2.6 โครงสร้างทั่วไปของเครื่องทำแห้งแบบลูกกลิ้ง

โครงสร้างทั่วไปของอุปกรณ์ทำแห้งแบบลูกกลิ้ง (รูปที่ 2.6) ได้แก่

1) ลูกกลิ้ง (Roller) ในส่วนนี้จะเป็นอุปกรณ์ที่มีการหมุนต่อเนื่องตลอดเวลาและเป็นส่วนที่สัมผัสกับอาหาร ดังนั้นในการเลือกใช้วัสดุดิบในการขึ้นรูปจะต้องคำนึงถึงความปลอดภัยในการใช้งานเป็นหลัก จารบีก็ต้องเป็นผลิตภัณฑ์หล่อลื่นเกรดพิเศษสำหรับการใช้งานกับเครื่องจักรในสายการผลิตอาหาร โลหะขึ้นรูปก็ต้องเกรดพิเศษสำหรับการใช้งานกับเครื่องจักรในสายการผลิตอาหาร นอกจากนั้นผิวของวัสดุที่ใช้ทำผิวลูกกลิ้งจะต้องมีค่าการนำความร้อนที่ดี ไม่เป็นฉนวนความร้อนเสียเอง มีความแข็งทนทานต่อการขีดข่วน

2) ใบมีด (Blade) ใบมีดในอุปกรณ์ทำแห้งชนิดนี้เป็นแกนเหล็กที่มีความคมที่ยึดด้วยน็อต สามารถปรับระยะห่างระหว่างใบมีดกับผิวลูกกลิ้งได้ โดยระยะห่างระหว่างใบมีดกับผิวลูกกลิ้งจะเป็นตัวกำหนดความหนาของแผ่นอาหารแห้ง

3) ระบบการให้ความร้อนเพื่อทำให้น้ำในส่วนที่สัมผัสกับผิวลูกกลิ้งร้อนได้ระเหยออกไป วิธีการให้ความร้อนคือการอัดไอน้ำเข้าไปในลูกกลิ้งผ่านท่อหุ้มฉนวน ไอน้ำจะไหลภายในท่อลูกกลิ้งและต้องมีทางออกของไอน้ำเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการถ่ายเทความร้อน ไม่เช่นนั้นหลังจากไอน้ำเข้าไป

แลกเปลี่ยนความร้อนแล้วก็กลั่นตัวลงมากลายเป็นคอนเดนเสทซึ่งเป็นกลางทำให้ถ่ายเทความร้อนได้ไม่ดีเมื่อเทียบกับไอน้ำ

4) ระบบรองรับอาหาร อาหารแห้งที่โดนไอน้ำออกไปแล้วมักจะดูน้ำในอากาศกลับเสมอ ดังนั้นในการออกแบบระบบรองรับผลิตภัณฑ์ควรจะเป็นระบบปิดครอบ อาจจะทำเป็นแผงกันต่อจากใบมีดเพื่อรักษาความชื้นสุดท้ายไว้ และวัสดุที่ใช้ทำระบบรองรับอาหารในส่วนนี้จะต้องไม่ทำปฏิกิริยากับผลิตภัณฑ์หรือเร่งให้เกิดปฏิกิริยา

2.5.3. ประเภทของเครื่องอบแห้งแบบลูกกลิ้ง

1) เครื่องอบแห้งแบบลูกกลิ้งเดี่ยว (Single Drum Dry) ประกอบด้วยลูกกลิ้งที่ได้รับความร้อน 1 ชุด ส่วนใหญ่เป็นแบบที่ทำงานที่ความดันบรรยากาศ

2) เครื่องอบแห้งแบบลูกกลิ้งคู่ (Double Drum Dry) ประกอบด้วยลูกกลิ้งที่ได้รับความร้อน 2 ชุด หมุนเข้าหากัน สามารถปรับให้ชิดห่างได้

3) เครื่องอบแห้งแบบลูกกลิ้งแฝด (Twin Drum Dry) คล้ายกับเครื่องอบแห้งแบบลูกกลิ้งคู่แต่การหมุนหมุนออกจากกัน ช่องห่างระหว่างลูกกลิ้งจะไม่มีผลต่อความหนาของแผ่นฟิล์ม

2.5.4 ข้อดีของเครื่องอบแห้งแบบลูกกลิ้ง

ประโยชน์ของอุปกรณ์ชนิดนี้คือทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีความสม่ำเสมอเนื่องจากการที่ความหนาของชั้นฟิล์มอาหารมีความสม่ำเสมอทำให้การควบคุมกระบวนการง่ายขึ้นโดยไม่ต้องไปปรับอุปกรณ์บ่อยๆ

2.5.5 ข้อเสียของเครื่องอบแห้งแบบลูกกลิ้ง

เมื่อเป็นการสัมผัสผิวร้อนเพียงด้านเดียว จำเป็นที่ความหนาของอาหารที่ป้อนเข้าไม่มากเกินไปเพราะจะทำให้ผิวอาหารด้านที่สัมผัสผิวร้อนไหม้ ส่วนผิวนอกจะยังไม่แห้งพอซึ่งจะทำให้เกิดชั้นฟิล์มที่กั้นไม่ให้ความชื้นจากผิวในระเหยออกสู่ผิวนอกได้ ไม่เหมาะกับอาหารที่มีปริมาณน้ำหรือตัวละลายมากเกินไป

2.6 การอบแห้งวิธีอื่นๆ

2.6.1 การอบแห้งแบบตู้หรือห้องอบ (Cabinet Drying)

สมบัติ (2529) กล่าวถึงการอบแห้งแบบตู้หรือห้องว่าอาศัยหลักการถ่ายเทความร้อนแบบการพาความร้อน (Air Convection) โดยการทำให้อากาศร้อนไหลผ่านอากาศภายในตู้หรือห้องแล้วพาน้ำที่ระเหยจากอาหารออกไป ลมร้อนที่ได้อาจจะได้จากกระแสไฟฟ้าผ่านขดลวดทำให้ร้อนแล้วใช้พัดลมเป่าขดลวดที่ร้อนนั้นผ่านไปยังอาหารที่ต้องการทำให้แห้งโดยตรงเรียกว่าการผลิตอากาศร้อนทางตรง (Direct Heating) หรืออีกทางหนึ่งลมร้อนอาจได้จากเครื่องถ่ายเทความร้อน (Heat Exchanger) โดยใช้ไอน้ำ (Steam) ผ่านท่อภายในเครื่องถ่ายเทความร้อนแล้วไอร้อนจะถูกเป่าโดยพัดลมไปสัมผัสกับอาหารอีกทอดหนึ่งเรียกว่าการผลิตอากาศร้อนทางอ้อม (Indirect Heating) ส่วนประกอบที่สำคัญของเครื่องอบแห้งแบบตู้หรือห้องที่สำคัญคือ ตู้หรือห้องอบ (Drying Chamber)

ลักษณะเป็นห้องสี่เหลี่ยมผืนผ้า ถ้าเป็นตู้ส่วนมากภายในจะมีชั้นสำหรับวางถาดของอาหารที่จะอบแห้งหรือถ้าอาหารมีลักษณะเป็นชิ้น เช่น เนื้อหรือปลา อาจจะมีตะขอแขวนชิ้นส่วนของอาหารไว้ในตู้ ถ้าเป็นห้องอบซึ่งภายในกว้างพอจะใช้รถเข็นใส่อาหารซึ่งมีลักษณะเป็นชั้นๆ เข้าไปอบได้นอกจากตู้หรือห้องอบแห้งแบบนี้จะประกอบด้วยส่วนอื่นๆ ดังนี้ แหล่งให้ความร้อน (Heater) พัดลม (Fan) ตัวกรองอากาศ (Fan Screen of Filter) แผงกั้นอากาศ (Baffle)

ลักษณะการทำงานของเครื่องอบแห้งแบบตู้หรือห้องอบจะมีลักษณะทำเป็นกะ เมื่อใส่อาหารที่ต้องการไว้ในถาดหรือแขวนไว้และให้ความร้อนแก่อาหารจนแห้ง ก็จะนำออกจากตู้อบแล้วใส่อาหารชุดใหม่เข้าไป การควบคุมความชื้นของอาหารที่อบแห้งสามารถสังเกตได้จากการตั้งระยะเวลาของการอบแห้ง (Drying Time) และปริมาณความชื้นสัมพัทธ์ในตู้อบทำให้ทราบได้ว่าอาหารมีความชื้นที่ต้องการหรือไม่

2.6.2 การทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง (Freeze Drying)

จิตพัท (2541) กล่าวว่า การทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งเป็นเทคโนโลยีที่พัฒนาขึ้นจากการทำแห้งโดยทั่วไป หลักการคือการนำเอาเนื้อออกจากอาหารในสถานะที่น้ำเป็นของแข็งให้กลายเป็นไอซึ่งก็คือการระเหิด การระเหิดของน้ำจะเกิดขึ้นเมื่อความดันไอและอุณหภูมิต่ำ สำหรับน้ำบริสุทธิ์ การระเหิดจะเกิดขึ้นที่จุดที่อุณหภูมิและความดันไอที่ผิวหน้าของน้ำแข็งมีค่าต่ำกว่าจุดวิกฤตของก๊าซของเหลว และของแข็ง การทำแห้งโดยนำอาหารมาแช่เยือกแข็งที่อุณหภูมิต่ำกว่าจุดเยือกแข็งของสารละลายในอาหารนั้น จากนั้นนำอาหารไปไว้ในสถานะความดันต่ำ น้ำแข็งในเนื้ออาหารจะเกิดการระเหิดอย่างต่อเนื่องจนกระทั่งน้ำแข็งในอาหารเกือบทั้งหมดถูกถ่ายเทออกไปทำให้อาหารแห้ง การระเหิดของน้ำจะต้องใช้ความร้อนจำนวนหนึ่งเรียกว่าความร้อนแฝงของการระเหิด ซึ่งของน้ำมีค่าเท่ากับ 675.6 แคลอรี/กรัม น้ำในผลิตภัณฑ์จะระเหิดออกไปโดยไม่กลายเป็นของเหลวทำให้การเคลื่อนที่ของสารละลายต่างๆ ในผลิตภัณฑ์เกิดน้อย โครงสร้างของผลิตภัณฑ์จะยังคงอยู่ในรูปเดิมโดยไม่มีกรหดตัว ในกระบวนการทำแห้งอุณหภูมิที่ใช้จะไม่สูงมากนักซึ่งจะทำให้เกิดการคงรักษาทางด้านสี กลิ่น รสชาติ และคุณค่าทางอาหารได้ดี

Karel et al.; (1974) ศึกษากระบวนการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งเพื่อนำมาใช้ในอุตสาหกรรมอาหารเพิ่มมากขึ้น ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการดังกล่าวมีคุณสมบัติที่ดีกว่ากรรมวิธีการอบแห้งแบบอื่นๆ หลายประการ เช่น ผลิตภัณฑ์มีการเปลี่ยนแปลงด้านโครงสร้างหรือการหดตัวน้อย การคินตัวรวดเร็ว ส่วนสี กลิ่น รสชาติ และเนื้อสัมผัสของผลิตภัณฑ์หลังการคินตัวมีลักษณะใกล้เคียงกับการปรุงปกติ และสูญเสียคุณค่าทางโภชนาการน้อยมาก

2.6.3 เครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอย (Spray Dryer)

เครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอยเป็นเครื่องอบแห้งที่มีการใช้งานอย่างแพร่หลายมากที่สุดสำหรับของเหลวข้นหนืด สารละลาย หรือสารแขวนลอยให้กลายเป็นผลิตภัณฑ์ที่อยู่ในรูปของอนุภาคชนิดต่างๆ โดยมีการใช้งานทั้งในอุตสาหกรรมอาหาร เกษตร ชีวภาพ เคมี ยา และเหมืองแร่ มีกำลังอบตั้งแต่ 2-3 กิโลกรัม/ชั่วโมง ไปจนถึง 50 ตัน/ชั่วโมง

การทำงานของเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอยเริ่มจากการทำของเหลวให้เป็นฝอยโดยหัวฉีด (Atomizer) ซึ่งมีลักษณะแตกต่างกันไปได้หลายรูปแบบ จากนั้นละอองหรือฝอยของของเหลวจะเกิดการแลกเปลี่ยนความร้อนและมวลสารกับอากาศร้อนที่ไหลอยู่ในห้องอบแห้ง โดยลักษณะการไหลของอากาศร้อนในห้องอบแห้งเมื่อเทียบกับทิศทางการเคลื่อนที่ของฝอยของเหลวนั้นอาจเป็นได้หลายรูปแบบ เช่น การไหลตามกันสวนทางกัน หรือมีการไหลทั้ง 2 ลักษณะเกิดขึ้นพร้อมกันภายในห้องอบแห้งก็ได้

2.6.4 เครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไดซ์เบด (Fluidized Bed Dryers)

เป็นเครื่องอบแห้งที่นิยมใช้มากที่สุดอีกประเภทหนึ่งสำหรับวัสดุอนุภาคที่เป็นเม็ดของแข็ง โดยมีหลักพื้นฐานในการทำให้วัสดุลอยตัวอยู่ในห้องอบแห้งโดยอาศัยการเป่าตัวกลางการอบแห้ง เช่น อากาศร้อน เข้าไปทางด้านล่างของห้องอบแห้งและให้ไหลผ่านวัสดุ จนกระทั่งวัสดุลอยตัวขึ้นและมีพฤติกรรมคล้ายของไหลเรียกว่าฟลูอิดไดซ์เซชัน

- 1) จุดเด่นของเครื่องอบแห้งชนิดนี้คือสามารถอบแห้งวัสดุได้ไวเนื่องจากมีการสัมผัสระหว่างตัวกลางที่ใช้ในการอบแห้งกับวัสดุทำให้เกิดการถ่ายเทความร้อนและมวลสารระหว่างตัวกลางการอบแห้งและวัสดุได้อย่างรวดเร็ว ใช้พื้นที่ในการติดตั้งค่อนข้างน้อย และมีค่าใช้จ่ายค่อนข้างต่ำเมื่อเทียบกับเครื่องอบแห้งชนิดอื่น
- 2) ข้อเสียของเครื่องอบแห้งชนิดนี้คือต้องใช้พลังงานอย่างมากในการเดินพัดลมเพื่อจ่ายอากาศให้เพียงพอในการที่จะทำให้เบดของอนุภาคเกิดฟลูอิดไดซ์เซชันได้อย่างต่อเนื่องและสม่ำเสมอ การใช้อากาศในปริมาณมากก็จะส่งผลให้อุปกรณ์ที่ต้องใช้ในการดักฝุ่นหรือทำความสะอาดมีขนาดใหญ่และราคาแพงตามไปด้วย และไม่สามารถทำการอบแห้งวัสดุที่เกิดการแตกหักหรือเกาะติดกันได้ง่ายจึงอาจจะต้องนำไปอบแห้งในวิธีอื่นๆ

2.7 สมการทางคณิตศาสตร์การถ่ายเทความร้อนในกระบวนการอบแห้งแบบลูกกลิ้ง

สมการทางคณิตศาสตร์การถ่ายเทความร้อนในกระบวนการอบแห้งแบบลูกกลิ้งคือสมการที่ใช้แสดงถึงลักษณะการถ่ายเทความร้อนของผลิตภัณฑ์ในกระบวนการอบแห้งแบบลูกกลิ้งโดยใช้กฎทรงพลังงาน (Conservation of Energy) และแก้สมการหาการกระจายอุณหภูมิแต่ละตำแหน่งด้วยวิธี Finite-Difference แบบ Implicit Method และสามารถแบ่งสมการในการถ่ายเทความร้อนได้ 3 รูปแบบดังนี้

- 1) การถ่ายเทความร้อนบริเวณผิวด้านล่างของผลิตภัณฑ์

การถ่ายเทความร้อนบริเวณผิวล่างของผลิตภัณฑ์ ตำแหน่งนี้สัมผัสกับแผ่นให้ความร้อน โดยตรงทำให้เกิดการถ่ายเทความร้อนอย่างรวดเร็ว ส่งผลให้อุณหภูมิบริเวณดังกล่าวมีค่าเท่ากับอุณหภูมิของแผ่นส่งผ่านความร้อน

เอกสารนี้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2) การถ่ายเทความร้อนภายในผลิตภัณฑ์

การถ่ายเทความร้อนภายในผลิตภัณฑ์เป็นการถ่ายเทความร้อนมาจากผิวด้านล่างของผลิตภัณฑ์และความร้อนภายในผิวผลิตภัณฑ์ ซึ่งภายในมีการสูญเสียความร้อนเนื่องจากความร้อนที่ใช้ในการระเหยน้ำออกจากผลิตภัณฑ์ แสดงดังสมการที่ 2.3

$$\text{จากกฎทรงพลังงาน : } \dot{E}_{in} + \dot{E}_g - \dot{E}_{out} = \frac{dE_{st}}{dt}$$

$$\dot{E}_{in} = q_{cond,z}$$

$$\dot{E}_g = 0$$

$$\dot{E}_{out} = q_{evp} + q_{cond,z+\Delta z}$$

$$\frac{dE_{st}}{dt} = \rho V c_p \frac{\partial T}{\partial t}$$

แทนค่าลงในกฎทรงพลังงาน

$$q_{cond,z} - (q_{evp} + q_{cond,z+\Delta z}) = \rho V c_p \frac{\partial T}{\partial t}$$

ให้

$$q_{cond,z+\Delta z} = q_{cond,z} + \left(\frac{\partial q_{cond,z}}{\partial z} \right) (\Delta z)$$

$$q_{cond,z} - \left(q_{evp} + q_{cond,z} + \left(\frac{\partial q_{cond,z}}{\partial z} \right) (\Delta z) \right) = \rho V c_p \frac{\partial T}{\partial t}$$

$$-q_{evp} - \left(\frac{\partial q_{cond,z}}{\partial z} \right) (\Delta z) = \rho V c_p \frac{\partial T}{\partial t}$$

ให้

$$q_{cond,z} = (-k)(\Delta x)(\Delta y) \left(\frac{\partial t}{\partial z} \right)$$

$$-q_{evp} - \frac{(-k)(\Delta x)(\Delta y)}{\partial z} \left(\frac{\partial t}{\partial z} \right) (\Delta z) = \rho V c_p \frac{\partial T}{\partial t}$$

$$(k)(\Delta x)(\Delta y)(\Delta z) \left(\frac{\partial^2 t}{\partial z^2} \right) - q_{evp} = \rho V c_p \frac{\partial T}{\partial t}$$

เมื่อ

$$\left. \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} \right|_n \approx \frac{T_{n+1} + T_{n-1} - 2T_n}{(\Delta z)^2} \text{ และ } \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{T_n^{p+1} - T_n^p}{\Delta t}$$

ได้

$$(k) \left(\frac{T_{n+1} + T_{n-1} - 2T_n}{(\Delta z)^2} \right) (V) - q_{evp} = \rho V c_p \left(\frac{T_n^{p+1} - T_n^p}{\Delta t} \right)$$

นำ

$$\left(\frac{\Delta t}{\rho c_p V} \right) \text{ คูณตลอดสมการ}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีให้คิดค่าลิขสิทธิ์หากมีการนำเอกสารนี้ไปใช้

นำ

$$\left(\frac{k}{k} \right) \text{ คูณในพจน์ } q_{evp}$$

$$(k) \left(\frac{T_{n+1} + T_{n-1} - 2T_n}{(\Delta z)^2} \right) \left(\frac{\Delta t}{\rho c_p V} \right) (V) - q_{\text{evp}} \left(\frac{\Delta t}{\rho c_p V} \right) \left(\frac{k}{k} \right) = T_n^{p+1} - T_n^p$$

ให้ $\alpha = \frac{k}{\rho c_p}$ และ $F_0 = \frac{\alpha \Delta t}{(\Delta z)^2}$

ได้ $F_0(T_{n+1} + T_{n-1} - 2T_n) - q_{\text{evp}} \left(\frac{\alpha \Delta t}{kV} \right) = T_n^{p+1} - T_n^p$

จัดสมการตามวิธี Implicit (Implicit Method)

โดยที่ T_n^p คือ อุณหภูมิที่จุดอ้างอิง ณ เวลาปัจจุบัน

T_n^{p+1} คือ อุณหภูมิที่จุดอ้างอิง ณ เวลาใหม่

ได้ $F_0(T_{n+1}^{p+1} + T_{n-1}^{p+1} - 2T_n^{p+1}) - T_n^{p+1} = -T_n^p + q_{\text{evp}} \left(\frac{\alpha \Delta t}{kV} \right)$

จัดรูปสมการ $-F_0 T_{n+1}^{p+1} + (1+2F_0)T_n^{p+1} - F_0 T_{n-1}^{p+1} = T_n^p - q_{\text{evp}} \left(\frac{\alpha \Delta t}{kV} \right)$ (2.3)

3) การถ่ายเทความร้อนบริเวณผิวด้านบนของผลิตภัณฑ์

การถ่ายเทความร้อนบริเวณผิวด้านบนของผลิตภัณฑ์เป็นการถ่ายเทความร้อนมาจากภายในผลิตภัณฑ์ ซึ่งบริเวณด้านบนผิวมีการสูญเสียความร้อนเนื่องจากการพาความร้อนของสิ่งแวดล้อม การแผ่รังสีความร้อนสู่สิ่งแวดล้อม และความร้อนที่ใช้ในการระเหยน้ำออกจากผลิตภัณฑ์ แสดงดังสมการที่ 2.4

จากกฎทรงพลังงาน :

$$\begin{aligned} \dot{E}_{\text{in}} + \dot{E}_g - \dot{E}_{\text{out}} &= \frac{dE_{\text{st}}}{dt} \\ \dot{E}_{\text{in}} &= q_{\text{cond},z} \\ \dot{E}_g &= 0 \\ \dot{E}_{\text{out}} &= q_{\text{evp}} + q_{\text{conv}} + q_{\text{rad}} \\ \frac{dE_{\text{st}}}{dt} &= \rho \frac{V}{2} c_p \frac{\partial T}{\partial t} \end{aligned}$$

แทนค่าลงในกฎทรงพลังงาน

$$q_{\text{cond},z} - (q_{\text{evp}} + q_{\text{conv}} + q_{\text{rad}}) = \rho \frac{V}{2} c_p \frac{\partial T}{\partial t}$$

ให้ $q_{\text{cond},z} = (-k)(\Delta x)(\Delta y) \left(\frac{\partial T}{\partial z} \right)$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 $-q_{\text{evp}} - (-k)(\Delta x)(\Delta y) \left(\frac{\partial T}{\partial z} \right) (\Delta z) = \rho V c_p \frac{\partial T}{\partial t}$
 ไม่ว่าจะพิมพ์ที่ไหน อีกทั้งห้ามมิให้คิดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$(-k)(\Delta x)(\Delta y) \left(\frac{\partial T}{\partial z} \right) - q_{\text{evp}} - q_{\text{conv}} - q_{\text{rad}} = \rho \frac{V}{2} c_p \frac{\partial T}{\partial t}$$

นำ (2) คูณตลอดทั้งสมการ

$$2(-k)(\Delta x)(\Delta y) \left(\frac{\partial T}{\partial z} \right) - 2q_{\text{evp}} - 2q_{\text{conv}} - 2q_{\text{rad}} = \rho V c_p \frac{\partial T}{\partial t}$$

เมื่อ $\frac{\partial T}{\partial z} \Big|_n \approx \frac{T_n - T_{n-1}}{\Delta z}$ และ $\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{T_n^{p+1} - T_n^p}{\Delta t}$

ได้ $2(-k) \left(\frac{T_n - T_{n-1}}{\Delta z} \right) (A) - 2q_{\text{evp}} - 2q_{\text{conv}} - 2q_{\text{rad}} = \rho V c_p \left(\frac{T_n^{p+1} - T_n^p}{\Delta t} \right)$

นำ $\left(\frac{\Delta t}{\rho c_p V} \right)$ คูณตลอดสมการ

$$\left(\frac{2(k)(T_n - T_{n-1})\Delta t}{\rho c_p (\Delta z)^2} \right) - 2q_{\text{evp}} \left(\frac{\Delta t}{\rho c_p V} \right) - 2q_{\text{conv}} \left(\frac{\Delta t}{\rho c_p V} \right) - 2q_{\text{rad}} \left(\frac{\Delta t}{\rho c_p V} \right) = T_n^{p+1} - T_n^p$$

นำ $\left(\frac{k}{k} \right)$ คูณในพจน์ q_{evp} q_{conv} และ q_{rad}

$$\left(\frac{2(k)(T_n - T_{n-1})\Delta t}{\rho c_p (\Delta z)^2} \right) - 2 \left(\frac{\Delta t}{\rho c_p V} \right) \left(\frac{k}{k} \right) (q_{\text{evp}} + q_{\text{conv}} + q_{\text{rad}}) = T_n^{p+1} - T_n^p$$

ให้ $\alpha = \frac{k}{\rho c_p}$ และ $F_0 = \frac{\alpha \Delta t}{(\Delta z)^2}$

ได้ $-2F_0(T_n - T_{n-1}) - 2 \left(\frac{\alpha \Delta t}{kV} \right) (q_{\text{evp}} + q_{\text{conv}} + q_{\text{rad}}) = T_n^{p+1} - T_n^p$

จัดสมการตามวิธี Implicit (Implicit Method)

โดยที่ T_n^p คือ อุณหภูมิที่จุดอ้างอิง ณ เวลาปัจจุบัน

T_n^{p+1} คือ อุณหภูมิที่จุดอ้างอิง ณ เวลาใหม่

ได้ $-2F_0(T_n^{p+1} - T_{n-1}^{p+1}) - T_n^{p+1} = -T_n^p + 2 \left(\frac{\alpha \Delta t}{kV} \right) (q_{\text{evp}} + q_{\text{conv}} + q_{\text{rad}})$

จัดรูปสมการ

$$-2F_0 T_{n-1}^{p+1} + (1+2F_0) T_n^{p+1} = T_n^p - 2 \left(\frac{\alpha \Delta t}{kV} \right) (q_{\text{evp}} + q_{\text{conv}} + q_{\text{rad}}) \quad (2.4)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการผลิตโฉกึ่งสำเร็จรูป และแบบจำลองทางความร้อน

จตุติ และคณะ (2555) ศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการถ่ายเทความร้อนในระหว่างกระบวนการให้ความร้อนแบบสัมผัส การสร้างแบบจำลองโดยใช้กฎทรงพลังงาน และแก้สมการหาการกระจายอุณหภูมิแต่ละตำแหน่งด้วยวิธี Finite-Difference แบบ Implicit Method ของแพนเค้ก สามารถแบ่งการถ่ายเทความร้อนได้ 2 ช่วง คือช่วงให้ความร้อนแก่แพนเค้กเพื่อเพิ่มอุณหภูมิของผลิตภัณฑ์ให้สูงขึ้นซึ่งเกิดขึ้นในช่วงที่แพนเค้กมีอุณหภูมิต่ำกว่า 100 องศาเซลเซียส โดยช่วงนี้อัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิมิค่าสูง และเมื่อแพนเค้กมีอุณหภูมิสูงกว่า 100 องศาเซลเซียส เกิดช่วงการระเหยของน้ำภายในแพนเค้กโดยใช้อุณหภูมิที่แผ่นสัมผัสความร้อนที่ 145 และ 165 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 20 นาที ซึ่งอัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิของแพนเค้กสูงขึ้นอย่างรวดเร็วซึ่งมีระยะเวลาสั้นกว่าช่วงระเหยน้ำและจะยิ่งสั้นมากเมื่อตำแหน่งที่วัดอุณหภูมิอยู่ใกล้กับแผ่นส่งผ่านความร้อน

Nalesnik (2007) ได้ศึกษาผลกระทบการอบแห้งของคุณสมบัติของเวย์โปรตีน จากการทดลองการอบแห้งเวย์โปรตีนผ่านเครื่องอัดผ่านเกลียวโดยกำหนดอุณหภูมิเป็น 40 และ 70 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 30 60 90 120 และ 210 นาที จากนั้นนำไปศึกษาค่าต่างๆ พบว่าผลของสีหลังจากการอบแห้งที่ 40 และ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 210 นาที ไม่มีการเปลี่ยนแปลงไปจากเดิม โดยรวมแล้วค่าที่ได้มีค่าใกล้เคียงกับก่อนอบ นั่นคือมีค่าความสว่าง (L) และค่าของสีเหลือง (b) มาก เมื่อพิจารณาสมบัติด้านเนื้อสัมผัสที่อุณหภูมิอบแห้งเป็น 70 องศาเซลเซียส พบว่าระยะเวลาที่อบ 210 นาที จะมีความแห้งและหยาบมากขึ้น มีรูพรุนเห็นได้อย่างชัดเจน

Luangmalawat et al., (2008) ศึกษาผลของอุณหภูมิในการทำแห้งโดยการดูลักษณะของข้าวหุงสุกโดยการอบแห้งแบบใช้ลมร้อน อุณหภูมิในการอบแห้งคือ 50 60 80 100 และ 120 องศาเซลเซียส ผลการทดลองพบว่าสีของข้าวหอมมะลิที่อุณหภูมิการอบแห้งที่สูงขึ้นจะเปลี่ยนสีข้าวเป็นสีเหลืองซึ่งเมื่อหลังการอบแห้งแล้วสีที่ดีควรเป็นสีขาว ดังนั้นการอบแห้งข้าวควรทำที่อุณหภูมิต่ำกว่า 100 องศาเซลเซียส เนื่องจากสีไม่เปลี่ยนไปจากเดิมมากนัก และยังอุณหภูมิสูงก็จะทำให้เกิดการหดตัวได้มากกว่า อีกทั้งตัวอย่างมีขนาดรูพรุนสูงการคั้นตัวจึงทำได้มากกว่าที่อุณหภูมิต่ำ

Roonprasang (2008) ศึกษาการวิเคราะห์ความร้อนของส่วนการอบแห้งแบบหลายกระบอกกับตัวแปรทางเรขาคณิต เป็นกระบวนการผลิตกระดาษ ในส่วนของการหาการกระจายตัวของอุณหภูมิแบ่งออกเป็นสองส่วนคือผิวตัวกระบอกอบแห้งซึ่งมีคุณสมบัติทางกายภาพและความร้อนคงที่ และผิวของผลิตภัณฑ์ซึ่งมีคุณสมบัติทางกายภาพและความร้อนไม่คงที่ หาค่าจากสมการการทดลองโดยวิเคราะห์โดยการนำความร้อน 1 มิติ การถ่ายเทความร้อนของผลิตภัณฑ์ขึ้นอยู่กับเวลาและอุณหภูมิ และแก้สมการหาการกระจายอุณหภูมิแต่ละตำแหน่งด้วยวิธี Finite-Difference แบบ Implicit Method

Singh et al., (2008) ศึกษาผลของอุณหภูมิการอบแห้งที่มีต่ออัตราการอบแห้งและการคั้นตัวของกระฉับโดยใช้อุณหภูมิการอบแห้งระดับต่างๆ ได้แก่ 50 60 70 และ 80 องศาเซลเซียส

อบแห้งจนตัวอย่างมีความชื้นลดลง โดยพบว่าการเพิ่มอุณหภูมิการอบแห้งส่งผลให้กระจัดมีการคืบตัวลดลง จากการศึกษาความสามารถในการดูดกลืนน้ำกลับของผลิตภัณฑ์อบแห้งโดยการแช่น้ำที่อุณหภูมิต่างๆ ได้แก่ 25 40 และ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 นาที พบว่ากระจัดที่แช่น้ำที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส มีอัตราการคืบตัวสูงกว่ากรณีการแช่น้ำที่อุณหภูมิ 40 และ 25 องศาเซลเซียส ตามลำดับ โดยการใช้อุณหภูมิสูงส่งผลให้มีสัมประสิทธิ์การแพร่กระจายความร้อนสูงทำให้ตัวอย่างมีความสามารถในการดูดกลืนน้ำอาจส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงสีของผลิตภัณฑ์ได้

Tarhan (2010) ศึกษาคุณภาพและพลังงานเมื่ออบแห้งสัระแหนโดยเครื่องอบแห้งแบบลูกกลิ้งจากการทดลองโดยตั้งค่าอุณหภูมิเป็น 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ให้อากาศแห้งคงที่โดยได้ผลเกี่ยวกับสีของผลิตภัณฑ์ดังนี้ พบว่าก่อนอบค่า L a b จะมีค่าใกล้เคียงกัน นั่นคือค่าความสว่าง ค่าความเป็นสีเหลือง และแดงมีค่าใกล้เคียงกัน แต่เมื่อหล้งอบพบว่าค่า L a b นั้นลดลงซึ่งส่งผลให้ความสว่าง ค่าสีแดง และเหลืองลดลง ทำให้สีของผลิตภัณฑ์หมอง

Rhim et al., (2011) ศึกษาผลกระทบบอุณหภูมิของการอบแห้งแบบแช่แข็งต่อการคืบตัวและลักษณะการดูดซึมน้ำของโจ๊ก ได้ทำการทดลองโดยการแปรรูปข้าวเป็นเวลา 15 นาที และฆ่าเชื้อที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส จากนั้นทำให้อุณหภูมิลดลงที่อุณหภูมิตั้งเป็นระยะเวลา 1 ชั่วโมง แล้วนำไปอบแห้งแบบแช่แข็งโดยให้อุณหภูมิต่างกัน -5 -20 -40 และ -70 องศาเซลเซียส โดยให้ความดันเป็น 0.3 ทอร์ เป็นระยะเวลา 2 วัน ผลที่ได้พบว่าการดูดน้ำกลับที่อุณหภูมิ -5 องศาเซลเซียส จะมีการดูดน้ำกลับเร็วที่สุด ลักษณะผลึกมีรูพรุนอย่างเห็นได้ชัดเจน แต่ที่อุณหภูมิเป็น -40 องศาเซลเซียส จะไม่เหมาะสมกับการอบแห้งของโจ๊กเพราะลักษณะของผลึกไม่เหมาะสมกับอาหารลักษณะนี้

โสรยา และคณะ (2554) ได้ศึกษาผลของอุณหภูมิตอบแห้งที่มีผลต่อสมบัติเชิงกายภาพและลักษณะการไหลของโจ๊กผสมฟักทองกิ่งสำเร็จรูปโดยเครื่องอบแห้งแบบลูกกลิ้ง โดยใช้ข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 บดให้มีขนาด 0.5 มิลลิเมตร ความชื้นฐานเปียกเริ่มต้น 8-10 เปอร์เซ็นต์ แบ่งเป็นถุงละ 300 กรัม ที่อุณหภูมิ -4 องศาเซลเซียส อัตราส่วนข้าวต่อน้ำ 4 ระดับ 1:4 1:6 1:8 และ 1:10 (น้ำหนัก/น้ำหนัก) ต้มที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 90 นาที คนที่ระยะเวลา 3 นาที และ 10 นาที หลังจากนั้นคนทุก 10 นาที จนครบ 90 นาที และอบแห้งแบบลูกกลิ้งที่อุณหภูมิ 125 130 และ 135 องศาเซลเซียส ก่อนอบมีความชื้นฐานแห้ง 904.45 เปอร์เซ็นต์ หลังจากอบแห้งความชื้นฐานเปียกลดลงเหลือ 8.75 7.14 และ 5.87 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ จากผลการทดลองพบว่าอุณหภูมิการอบแห้งส่งผลต่อการวัดค่าสี ความหนืด และการดูดน้ำกลับอย่างมีนัยสำคัญ การเพิ่มอุณหภูมิจะทำให้ความสว่าง ค่าความหนืดลดลงแต่ค่าความเป็นสีแดงจะเพิ่มขึ้น

Jittanit et al., (2012) ศึกษาคุณภาพของโจ๊กกิ่งสำเร็จรูปและพลังงานที่นำไปใช้ในการอบแห้งอาหารโดยเครื่องอบแห้งแบบลูกกลิ้ง โดยต้มข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 กับน้ำในอัตราส่วน 1:6 โดยน้ำหนัก แล้ววางให้อุณหภูมิลดลงก่อนเข้าเครื่องอบแห้งแบบลูกกลิ้งเป็นเวลา 1 ชั่วโมง ความชื้นฐานเปียกวัดได้มีค่า 1.5 และ 1.8 เปอร์เซ็นต์ การดูดน้ำกลับที่อุณหภูมิ 140 องศาเซลเซียส จะดูดน้ำกลับได้ดีกว่าที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส ค่าของสีที่อุณหภูมิ 120 และ 140 องศา

เซลเซียสไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ค่าความชื้นหลังจากทำแห้งที่อุณหภูมิ 140 องศาเซลเซียส มีค่าต่ำกว่าอบแห้งที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส เล็กน้อย การคักรูปที่อุณหภูมิ 140 องศาเซลเซียส จะคักรวดได้เร็วกว่าที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส ค่าความหนืดของสองอุณหภูมินี้ไม่แตกต่างกัน ต้นทุนสำหรับการทำแห้งประมาณ 24.84 และ 35.82 บาท/กิโลกรัม ที่อุณหภูมิ 120 และ 140 องศาเซลเซียส ตามลำดับ

Guine (2012) ศึกษาผลกระทบต่อการอบแห้งของเนื้อสัมผัสและสีของฟักทองจากการทดลอง กำหนดอุณหภูมิตั้งแต่ -47 ถึง -50 องศาเซลเซียส ความดัน 5 มิลลิทอร์ ทำการอบแห้งแบบแช่แข็ง โดยเปรียบเทียบกับวิธีการอบแห้งแบบลมร้อนที่อุณหภูมิ 30 50 และ 70 องศาเซลเซียส พบว่าการอบแห้งแบบแช่แข็งจะให้ค่าแนวโน้มที่ดี ค่าความแข็งลดลง 90 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งให้ค่าดีกว่าการอบแห้งแบบลมร้อนที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส แต่จะมีค่าความแข็งน้อยกว่าที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เมื่อพิจารณาลักษณะด้านการเกาะตัวของเนื้อสัมผัสพบว่าการอบแห้งแบบแช่แข็งนั้นจะให้ค่าอยู่ในช่วงกลาง นั่นคือเป็นค่าที่บ่งบอกว่าไม่มีการเปลี่ยนแปลงไปจากเดิม เมื่อพิจารณาค่าการคักรวด พบว่าการอบแห้งแบบแช่แข็งให้ค่าการคักรวดที่ดีกว่าการอบแห้งแบบลมร้อน และเมื่อพิจารณาด้านสี พบว่าผลที่ได้จากการอบแห้งแบบแช่แข็งมีค่าของมุมและความเข้มของสีความสว่างเพิ่มขึ้นเมื่อลดอุณหภูมิลง

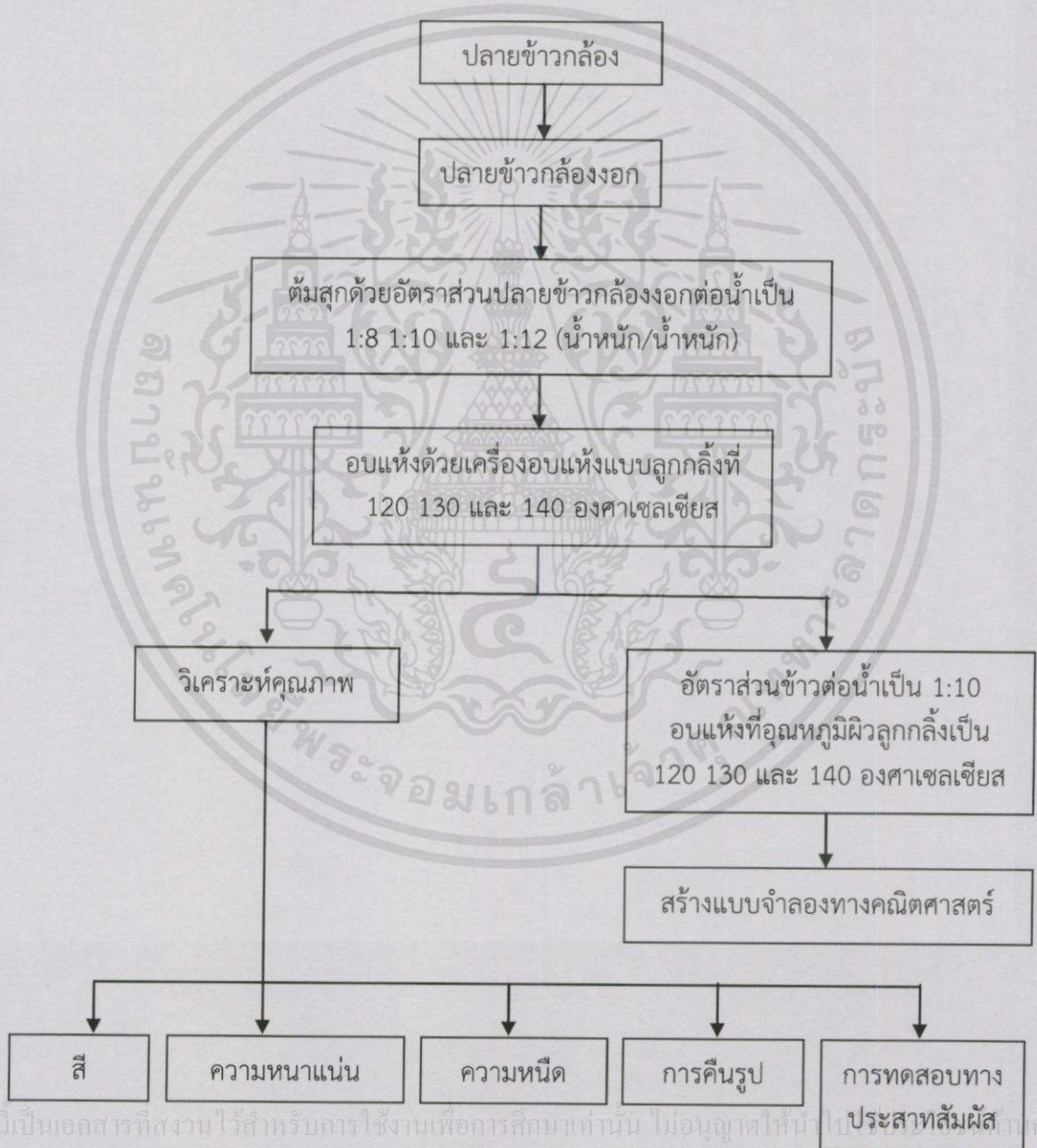
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3 วิธีการทดลอง

3.1. การศึกษาปัจจัยของกระบวนการผลิตโฉกข้าวกล้องงอกถึงสำเร็จรูปต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์

กระบวนการผลิตโฉกข้าวกล้องงอกถึงสำเร็จรูปประกอบด้วยขั้นตอนที่สำคัญ 3 ขั้นตอนได้แก่

- 1) การเตรียมปลายข้าวกล้องงอก
- 2) การต้มสุก และ
- 3) การอบแห้งดังแสดงในรูปที่ 3.1



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งรูปที่ 3.1 กระบวนการผลิตโฉกข้าวกล้องงอกถึงสำเร็จรูป ทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.1. การเตรียมข้าวกล้องงอก

นำข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 จำนวน 500 กรัม แช่ในอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง จากนั้นนำไปเพาะงอกโดยการบ่มที่อุณหภูมิที่ 35 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 20 ชั่วโมง โดยมีการเปลี่ยนน้ำทุกๆ 5 ชั่วโมง (รูปที่ 3.2) ข้าวกล้องงอกภายหลังการบ่มจะเกิดการงอกบริเวณจมูกข้าวเป็นตุ่มเล็กๆ ได้เป็นปลายข้าวกล้องงอก (Cheevitsopon and Noomhorm, 2011)



รูปที่ 3.2 กระบวนการผลิตข้าวปลายกล้องงอก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.2. การอบแห้งด้วยตู้อบลมร้อนแบบถาด

นำข้าวกล้องงอกที่ผ่านการทำให้งอกมาอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบถาด (Tray Dryer) ด้วยความเร็วลม 0.8 เมตร/วินาที โดยใช้อุณหภูมิการทำแห้ง 40 องศาเซลเซียส จนกระทั่งเหลือความชื้นฐานเปียกประมาณ 11 เปอร์เซ็นต์ (รูปที่ 3.3)



รูปที่ 3.3 อบแห้งด้วยตู้อบลมร้อนแบบถาด

3.1.3 การต้มสุก

ต้มตัวอย่างโดยใช้สัดส่วนข้าวต่อน้ำ 1:8 1:10 และ 1:12 (น้ำหนัก/น้ำหนัก) โดยปิดฝาไว้ 30 นาทีแรก หลังจากนั้นเปิดฝาแล้วคน 10 รอบ ทุก 10 นาที รวมระยะเวลาทั้งหมดเป็น 1 ชั่วโมง 30 นาที ได้ตัวอย่างเป็นโจ๊กข้าวกล้องงอก (รูปที่ 3.4)

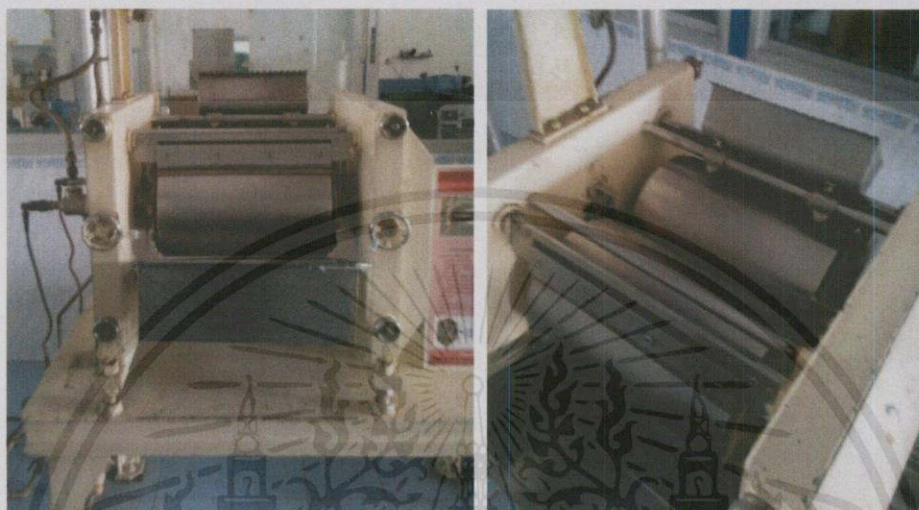


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ ก) ต้มตัวอย่างโดยปิดฝา เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีทรัพย์สินของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 3.4 การต้มสุก

3.1.4 การอบแห้งแบบลูกกลิ้ง (Drum Drying)

ทำการอบแห้งตัวอย่างโຈ็กข้าวกล็องงอกด้วยเครื่องอบแห้งแบบลูกกลิ้งโดยการปรับความดันไอน้ำจนอุณหภูมิผิวลูกกลิ้งเป็น 120 130 และ 140 องศาเซลเซียส ปรับความเร็วรอบของลูกกลิ้งที่ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์มีความชื้นฐานเปียกสุดท้ายประมาณ 3-5 เปอร์เซ็นต์ (รูปที่ 3.5)



ก) ภาพด้านหน้า

ข) ภาพด้านบน

รูปที่ 3.5 เครื่องอบแห้งแบบลูกกลิ้ง

3.2 แผนการทดลอง

แผนการทดลองที่ใช้เป็นแบบ Full Factorial Design เพื่อศึกษาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ ได้แก่ อัตราส่วนข้าวต่อน้ำ (1:8 1:10 และ 1:12 น้ำหนัก/น้ำหนัก) และ อุณหภูมิของการอบแห้งแบบลูกกลิ้ง (120 130 และ 140 องศาเซลเซียส)

3.3 การวิเคราะห์คุณภาพของผลิตภัณฑ์

3.3.1 ความขาว

วัดค่าสีด้วยเครื่องวัดสี Colormeter (Model JC 801, Color Techno, Japan) ดังรูปที่ 3.6 แสดงค่าความสว่าง (Lightness, L^*) โดยมีค่าอยู่ระหว่าง 0 (สีดำ) ถึง 100 (สีขาว) ความเป็นสีแดงหรือสีเขียว (redness-green, a^*) โดยค่าเป็น + หมายถึงมีแนวโน้มความเป็นสีแดง และมีค่าเป็น - หมายถึงมีแนวโน้มเป็นสีเขียว และความเป็นสีเหลืองหรือสีน้ำเงิน (yellowness-blueness, b^*) โดยค่าเป็น + หมายถึงมีแนวโน้มความเป็นสีเหลือง และมีค่าเป็น - หมายถึงมีแนวโน้มเป็นสีน้ำเงิน คำนวณค่าความขาว (Whiteness Index, WI) จากสมการ 3.1 (Prasert and Suwannaporn, 2009) ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$WI = 100 - \sqrt{(100 - L^*)^2 + a^{*2} + b^{*2}} \quad (3.1)$$

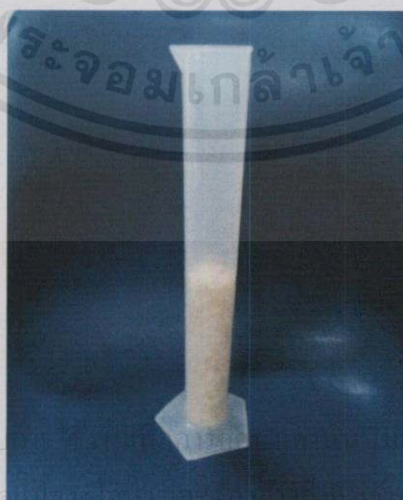
เมื่อ	WI	=	ค่าดัชนีความขาว
	L^*	=	ค่าความสว่าง
	a^*	=	ค่าความเป็นสีแดง หรือสีเขียว
	b^*	=	ค่าความเป็นสีเหลือง หรือสีน้ำเงิน



รูปที่ 3.6 เครื่องวัดค่าสี

3.3.2 ความหนาแน่น

หาค่าความหนาแน่นโดยทำการลดขนาดตัวอย่าง ร่อนผ่านตะแกรงให้เหลือขนาด 20-50 mesh ตวงผลิตภัณฑ์ปริมาตรประมาณ 150 มิลลิลิตร (รูปที่ 3.7) ใส่กระบอกตวงเคาะกับโต๊ะ 10 ครั้ง โดยแต่ละครั้งยกกระบอกตวงสูงจากพื้นโต๊ะ 5 เซนติเมตร ปล่อยให้ตกลงตามแรงโน้มถ่วงแล้วอ่านค่าปริมาตรที่ได้ และชั่งน้ำหนักผลิตภัณฑ์ คำนวณความหนาแน่นของผลิตภัณฑ์จากสัดส่วนมวลต่อปริมาตร (ดัดแปลงจาก Abdullah and Geldart, 1988)

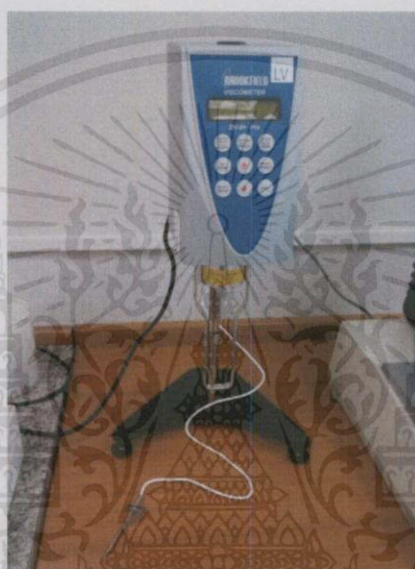


รูปที่ 3.7 การวัดความหนาแน่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับ... อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.3 ความหนืด

ทำการวัดค่าความหนืดด้วยเครื่องวัดความหนืด (Brookfield-Programmable Viscometer: LVDV-II+, England) โดยใช้หัวทดสอบเบอร์ S63 (รูปที่ 3.8) เตรียมตัวอย่างผสมน้ำร้อนที่อุณหภูมิ 97 องศาเซลเซียส ด้วยอัตราส่วนตัวอย่างหลังการอบแห้งต่อน้ำเป็น 1:13 (น้ำหนัก/น้ำหนัก) มีปริมาตรตัวอย่างหลังการผสมน้ำประมาณ 500 มิลลิลิตร ทำการคนตัวอย่างจนเป็นเนื้อเดียวกัน วัดค่าความหนืดที่ความเร็วรอบ 80 รอบ/นาที บันทึกค่าความหนืด และค่าการบิด (เปอร์เซ็นต์)



รูปที่ 3.8 เครื่อง Brookfield-Programmable Viscometer

3.3.4 Pasting property

หาค่า Pasting property โดยใช้เครื่องวัดความหนืด (Rapid Visco Analyser Series 4, Newport Scientific, Australia) โดยปรับความชื้นของตัวอย่างให้ได้ 14 เปอร์เซ็นต์ โดยใช้ตัวอย่าง 3 กรัม ผสมกับน้ำ 25.3 มิลลิลิตร คนตัวอย่าง 10 ครั้งก่อนนำเข้าเครื่อง (รูปที่ 3.9) ตั้งค่าการวัดโดยใช้ Standard 1 ผลลัพธ์ที่ได้จากเครื่องนำมาวิเคราะห์และบันทึกค่าต่างๆ ดังนี้

Peak Time	คือ เวลาที่เกิดของความหนืดสูงสุด
Pasting Temperature	คือ อุณหภูมิเริ่มเปลี่ยนค่าความหนืด
Peak viscosity	คือ ความหนืดสูงสุด
Trough	คือ ความหนืดต่ำสุด
Final Viscosity	คือ ความหนืดสุดท้ายของการทดลอง
Breakdown	คือ ผลต่างระหว่างค่าความหนืดสูงสุดและความหนืดต่ำสุด

(Peak Viscosity- Trough)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษานานับ ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Setback Form Peak คือ ผลต่างระหว่างความหนืดสุดท้ายกับความหนืดสูงสุด
(Final Viscosity - Peak viscosity)

Setback Form Trough คือ ผลต่างระหว่างความหนืดสุดท้ายกับความหนืดต่ำสุด
(Final Viscosity - Trough)



รูปที่ 3.9 เครื่องวัดความหนืด

3.3.5 การคืนรูป

ทดลองหาค่าการคืนรูปโดยใช้ตัวอย่างอบแห้งผสมน้ำร้อน 97 องศาเซลเซียส ด้วยอัตราส่วน ตัวอย่าง 7.7 กรัม ต่อน้ำ 100 กรัม (1:13) คนตัวอย่าง 25 รอบ จนเป็นเนื้อเดียวกัน หลังจากนั้นวางไว้ 5 นาที กรองตัวอย่างโดยใช้กระดาษกรอง Advantech เบอร์ 1 ร่วมกับปั๊มสุญญากาศเป็นเวลา 10 วินาที (รูปที่ 3.10) คำนวณค่าการคืนรูปจากสัดส่วนมวลของตัวอย่างหลังการกรองต่อมวลของตัวอย่างเริ่มต้น (ดัดแปลงจาก Singh et al., 2008; โสรยา และคณะ, 2555)



รูปที่ 3.10 อุปกรณ์สำหรับทดลองการคืนรูป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น กรุณาอย่าได้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงชื่อของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.6 การทดสอบทางประสาทสัมผัส

ทดสอบทางประสาทสัมผัสโดยใช้วิธี 9 Point Hedonic Scale โดยใช้ผู้ทดสอบ 30 คน ทำการทดสอบทางด้านรูปลักษณ์ สี กลิ่น เนื้อสัมผัส รสชาติ ความหนืด และความชอบโดยรวม

- เมื่อ
- 1 = Dislike Extremely (ไม่ชอบอย่างที่สุด)
 - 2 = Dislike Very Much (ไม่ชอบอย่างมาก)
 - 3 = Dislike Moderately (ไม่ชอบปานกลาง)
 - 4 = Dislike Slightly (ค่อนข้างไม่ชอบ)
 - 5 = Neither Like Nor Dislike (เฉยๆ)
 - 6 = Like Slightly (ค่อนข้างชอบ)
 - 7 = Like Moderately (ชอบปานกลาง)
 - 8 = Like Very Much (ชอบอย่างมาก)
 - 9 = Like Extremely (ชอบอย่างที่สุด)

3.3.7 ความชื้น

ทำการหาความชื้นของตัวอย่างโดยใช้ตัวอย่าง 3 กรัม อบในตู้อบด้วยอุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง คำนวณค่าความชื้นจากสมการที่ 3.2

$$M = \frac{W_i - W_f}{W_i} \times 100 \% \quad (3.2)$$

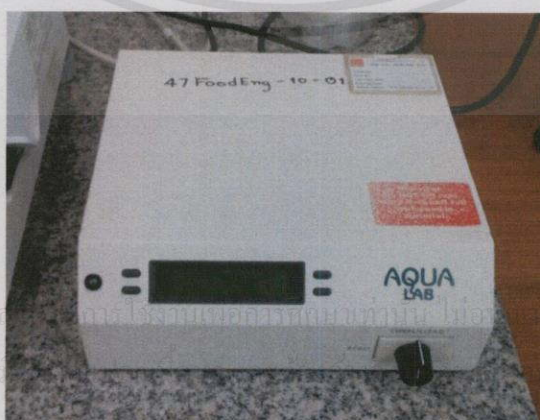
เมื่อ M คือ เปอร์เซ็นต์ความชื้นฐานเปียก (เปอร์เซ็นต์)

W_i คือ มวลตัวอย่างเริ่มต้น (กรัม)

W_f คือ มวลตัวอย่างสุดท้าย (กรัม)

3.3.8 วอเตอร์แอกทีวิตี (a_w)

วัดค่าวอเตอร์แอกทีวิตีโดยใช้เครื่องวัดค่าวอเตอร์แอกทีวิตี (AquaLab Series 3, USA) ดังรูปที่ 3.11

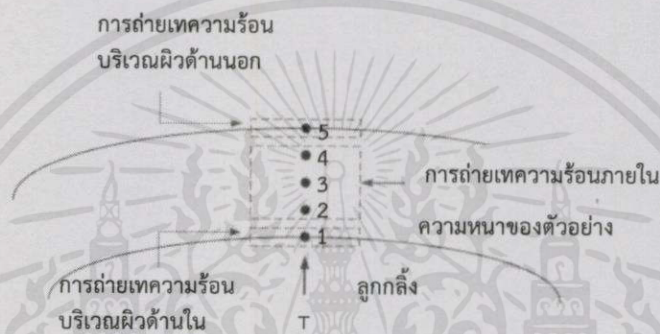


รูปที่ 3.11 เครื่อง AquaLab Series 3

3.4 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการกระจายตัวอุณหภูมิ

3.4.1 การถ่ายเทความร้อนและสมมติฐานในระหว่างการอบแห้งแบบลูกกลิ้ง

การถ่ายเทความร้อนของผลิตภัณฑ์ในกระบวนการอบแห้งแบบลูกกลิ้งเป็นการให้ความร้อนแบบสัมผัส อาศัยหลักการนำความร้อนจากผิวของลูกกลิ้งผ่านบริเวณผิวด้านล่างถ่ายเทความร้อนสู่ผิวด้านบนของผลิตภัณฑ์ และมีการสูญเสียความร้อนจากการพาความร้อนของสิ่งแวดล้อมบริเวณผิวด้านบนของผลิตภัณฑ์ ซึ่งในการทดลองได้ทำการวัดอุณหภูมิทั้งหมด 2 จุดคือที่ผิวของเครื่องอบแห้งแบบลูกกลิ้ง และที่ผิวของผลิตภัณฑ์ แสดงดังรูปที่ 3.12



รูปที่ 3.12 การกำหนด Node ของอุณหภูมิที่กระจายตัวในตัวอย่าง

ในการทดลองได้สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อศึกษาการถ่ายเทความร้อนของผลิตภัณฑ์ในระหว่างกระบวนการอบแห้งแบบลูกกลิ้งโดยมีสมมติฐานดังนี้

- 1) ความร้อนที่ส่งผ่านจากผิวลูกกลิ้งให้ความร้อนที่อุณหภูมิคงที่
 - 2) อุณหภูมิผิวด้านล่างของตัวอย่างเท่ากับอุณหภูมิของผิวลูกกลิ้ง
 - 3) การถ่ายเทความร้อนภายในตัวอย่างขึ้นอยู่กับเวลาและอุณหภูมิ
 - 4) บริเวณผิวด้านบนผลิตภัณฑ์มีการสูญเสียความร้อนจากการพาความร้อนของสิ่งแวดล้อม และการแผ่รังสีความร้อน
 - 5) ไอน้ำที่อยู่ภายในตัวอย่างจะแพร่ไปยังผิวด้านบนและระเหยออกไปยังสิ่งแวดล้อม
 - 6) การระเหยของน้ำภายในตัวอย่างจะเริ่มระเหยเมื่ออุณหภูมิของผลิตภัณฑ์มากกว่า 100 องศาเซลเซียส
 - 7) สมบัติทางกายภาพและสมบัติทางความร้อนของตัวอย่างมีค่าคงที่
 - 8) ความหนาของตัวอย่างไม่เปลี่ยนแปลงตลอดการทดลอง
 - 9) การสูญเสียพลังงานความร้อนจากการพาความร้อนของสิ่งแวดล้อมและพลังงานที่ใช้ในการระเหย
- ไม่ว่าจะมีค่าคงที่ตลอดการทดลอง ได้คิดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

10) การคำนวณการถ่ายเทความร้อนภายในตัวอย่างเป็นการถ่ายเทความร้อนแบบมิติเดียวเนื่องจากปริมาตรโดยเฉลี่ยของตัวอย่าง ($1 \times 300 \times 470$ ลูกบาศก์มิลลิเมตร) มีความหนาแน่นน้อยมาก (1 มิลลิเมตร) เมื่อเทียบกับความกว้างและความยาว จึงทำให้การนำพาความร้อนที่สะสมในด้านกว้างและยาวมีผลน้อยมากเมื่อเทียบด้านหนา

3.4.2 สมการทางคณิตศาสตร์การถ่ายเทความร้อนในระหว่างการอบแห้งแบบลูกกลิ้ง

สมการทางคณิตศาสตร์การถ่ายเทความร้อนในกระบวนการอบแห้งแบบลูกกลิ้งคือสมการที่ใช้แสดงถึงลักษณะการถ่ายเทความร้อนของผลิตภัณฑ์ในกระบวนการอบแห้งแบบลูกกลิ้งโดยใช้กฎทรงพลังงาน (Conservation of energy) และแก้สมการหาการกระจายอุณหภูมิแต่ละตำแหน่งด้วยวิธี Finite-Difference แบบ Implicit Method และสามารถแบ่งสมการในการถ่ายเทความร้อนได้ 3 รูปแบบดังนี้

1) การถ่ายเทความร้อนบริเวณผิวด้านล่างของผลิตภัณฑ์

การถ่ายเทความร้อนบริเวณผิวล่างของผลิตภัณฑ์ ตำแหน่งนี้สัมผัสกับแผ่นให้ความร้อนโดยตรงทำให้เกิดการถ่ายเทความร้อนอย่างรวดเร็ว ส่งผลให้อุณหภูมิบริเวณดังกล่าวมีค่าเท่ากับอุณหภูมิของแผ่นส่งผ่านความร้อนดังสมมติฐานข้อที่ 2

2) การถ่ายเทความร้อนภายในผลิตภัณฑ์

การถ่ายเทความร้อนภายในผลิตภัณฑ์เป็นการถ่ายเทความร้อนมาจากผิวด้านล่างของผลิตภัณฑ์และความร้อนภายในผิวผลิตภัณฑ์ ซึ่งภายในมีการสูญเสียความร้อนเนื่องจากความร้อนที่ใช้ในการระเหยน้ำออกจากผลิตภัณฑ์ แสดงสมการในตารางที่ 3.1

3) การถ่ายเทความร้อนบริเวณผิวด้านบนของผลิตภัณฑ์

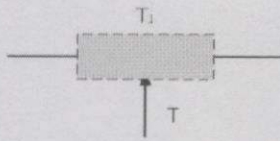
การถ่ายเทความร้อนบริเวณผิวด้านบนของผลิตภัณฑ์เป็นการถ่ายเทความร้อนมาจากภายในผลิตภัณฑ์ ซึ่งบริเวณด้านบนผิวมีการสูญเสียความร้อนเนื่องจากการพาความร้อนของสิ่งแวดล้อม การแผ่รังสีความร้อนสู่สิ่งแวดล้อม และความร้อนที่ใช้ในการระเหยน้ำออกจากผลิตภัณฑ์ แสดงสมการในตารางที่ 3.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.1 สมการการกระจายอุณหภูมิของผลิตภัณฑ์

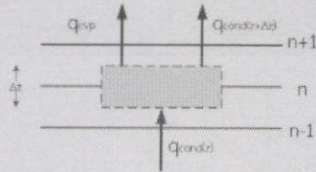
ตำแหน่งที่สนใจ (Node, N)

สมการการกระจายอุณหภูมิ



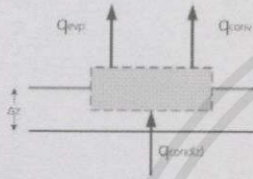
$$T - T_1 = 0$$

บริเวณที่ 1 ตำแหน่งการถ่ายเทความร้อนบริเวณผิวด้านใน (สมมติฐานที่ 2)



$$-F_o T_{n+1}^{p+1} + (1+2F_o)T_n^{p+1} - F_o T_{n-1}^{p+1} = T_n^p - q_{evp} \left(\frac{\alpha \Delta t}{kV} \right)$$

บริเวณที่ 2 ตำแหน่งการถ่ายเทความร้อนภายใน



$$-2F_o T_{n-1}^{p+1} + (1+2F_o)T_n^p = T_n^p - 2 \left(\frac{\alpha \Delta t}{kV} \right) (q_{evp} + q_{conv} + q_{rad})$$

บริเวณที่ 3 ตำแหน่งการถ่ายเทความร้อนบริเวณผิวด้านนอก

จากตารางที่ 3.1 สามารถเขียนสมการการกระจายอุณหภูมิของผลิตภัณฑ์ ได้ดังนี้

ตำแหน่ง 1: $T_s - T_1^{p+1} = 0$

ตำแหน่ง 2: $-F_o T_3^{p+1} + (1+2F_o)T_2^{p+1} - F_o T_1^{p+1} = T_2^p - q_{evp} \left(\frac{\alpha \Delta t}{kV} \right)$

ตำแหน่ง 3: $-F_o T_4^{p+1} + (1+2F_o)T_3^{p+1} - F_o T_2^{p+1} = T_3^p - q_{evp} \left(\frac{\alpha \Delta t}{kV} \right)$

ตำแหน่ง 4: $-F_o T_5^{p+1} + (1+2F_o)T_4^{p+1} - F_o T_3^{p+1} = T_4^p - q_{evp} \left(\frac{\alpha \Delta t}{kV} \right)$

ตำแหน่ง 5: $-2F_o T_4^{p+1} + (1+2F_o)T_5^{p+1} = T_5^p - 2 \left(\frac{\alpha \Delta t}{kV} \right) (q_{evp} + q_{conv} + q_{rad})$

นำสมการในช่วงการเพิ่มอุณหภูมิให้แก่ผลิตภัณฑ์จัดให้อยู่ในรูปเมทริกซ์ คือ $[A][X]=[B]$ จะได้

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -F_o & (1+2F_o) & -F_o & 0 & 0 \\ 0 & -F_o & (1+2F_o) & -F_o & 0 \\ 0 & 0 & -F_o & (1+2F_o) & -F_o \\ 0 & 0 & 0 & -2F_o & (1+2F_o) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} T_1^{p+1} \\ T_2^{p+1} \\ T_3^{p+1} \\ T_4^{p+1} \\ T_5^{p+1} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} T_s \\ T_2^p - q_{evp} \left(\frac{\alpha \Delta t}{kV} \right) \\ T_3^p - q_{evp} \left(\frac{\alpha \Delta t}{kV} \right) \\ T_4^p - q_{evp} \left(\frac{\alpha \Delta t}{kV} \right) \\ T_5^p - 2 \left(\frac{\alpha \Delta t}{kV} \right) (q_{evp} + q_{conv} + q_{rad}) \end{pmatrix}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4.3 ค่าสมบัติทางกายภาพ และความร้อนของตัวอย่าง

หาค่าสมบัติทางกายภาพ และความร้อนของตัวอย่างโดยใช้ตัวอย่างที่ได้จากการต้มด้วย สัดส่วนปลายข้าวต่อน้ำ 1:10 (น้ำหนัก/น้ำหนัก) เป็นเวลา 90 นาที นำมาหาค่าคุณสมบัติต่างๆ ดังนี้

1) ความหนาแน่น (Density, ρ)

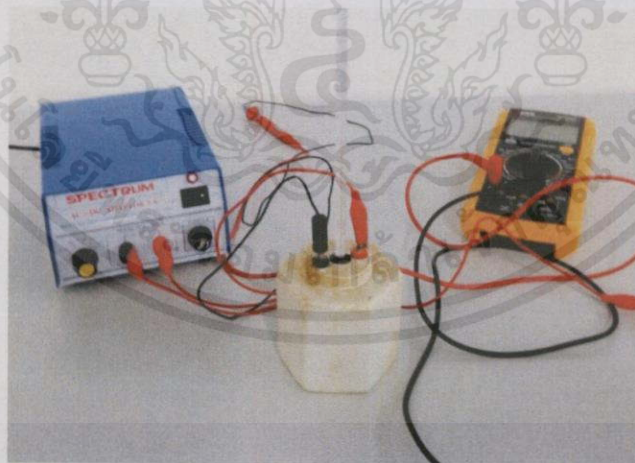
หาค่าความหนาแน่นโดยนำตัวอย่างที่ได้ไปชั่งหาน้ำหนักแล้วตวงหาค่าปริมาตร คำนวณหาค่า ความหนาแน่นจากสัดส่วนมวลต่อปริมาตร

2) ค่าความร้อนจำเพาะ (Specific Heat, C_p)

หาค่าความร้อนจำเพาะโดยใช้เครื่องแคลอรีมิเตอร์แบบไฟฟ้าโดยใช้ไฟฟ้ากระแสตรง 4.5 โวลต์ ใช้มัลติมิเตอร์วัดกระแสตั้งรูปที่ 3.13 โดยทำการจับเวลาเมื่ออุณหภูมิเพิ่ม 1 องศาเซลเซียส (ΔT) คำนวณค่าความร้อนจำเพาะจากสมการที่ 3.3

$$Q = IEt = mc_p\Delta T \quad (3.3)$$

โดยที่	Q	คือ พลังงานทางความร้อน (วัตต์)
	I	คือ กระแสไฟฟ้า (แอมแปร์)
	E	คือ ความต่างศักย์ (โวลต์)
	t	คือ เวลา (วินาที)
	m	คือ มวลของตัวอย่าง (กิโลกรัม)
	ΔT	คือ ผลต่างของอุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)



รูปที่ 3.13 การทดลองหาค่าความร้อนจำเพาะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3) ค่าการนำความร้อน (Thermal Conductivity, k)

ทำการหาค่าการนำความร้อนโดยใช้วิธีการ Line-Probe Heat Source โดยใช้หลักการเปลี่ยนจากพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานความร้อน ใช้ไฟฟ้ากระแสตรง 3 โวลต์ จ่ายเข้าไปใน Probe ซึ่งมีค่าความต้านทานเป็น 1041.5 โอห์ม/เมตร คำนวณค่าพลังงานความร้อนจากสมการที่ 3.4 โดยค่าความต่างศักย์คือค่าแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมจริง และค่าความต้านทานมีค่าเท่ากับ 1 โอห์ม และนำค่าของอุณหภูมิและเวลาที่ได้จาก Data Logger มาหาค่าความชันและคำนวณค่าการนำความร้อนจากสมการที่ 3.5 และ 3.6

$$q = \left(\frac{E_{ref}}{R_{ref}} \right)^2 \cdot 1041.5 \quad (3.4)$$

$$T = [q/4\pi k] \ln(t - t_0) + C \quad (3.5)$$

$$\text{Slope} = \left[\frac{q}{4\pi k} \right] \quad (3.6)$$

โดยที่	k	คือ	ค่าการนำความร้อน (วัตต์/(เมตร.เคลวิน))
	q	คือ	พลังงานความร้อน (วัตต์/เมตร)
	R _{ref}	คือ	ค่าความต้านทาน (โอห์ม)
	E _{ref}	คือ	ความต่างศักย์ (โวลต์)
	t	คือ	เวลา (วินาที)

3.4.4 การทวนสอบแบบจำลอง

วัดอุณหภูมิบนผิวของตัวอย่างไม้ด้วยเครื่องมือวัดอุณหภูมิแบบเทอร์โมคัปเปิลแบบลูกกลิ้ง (Roller Surface Thermocouple) เปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างค่าอุณหภูมิที่ได้จากเครื่องมือวัดและค่าอุณหภูมิที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ โดยแสดงในรูปกราฟที่สองของค่าคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (RMSE) ตามสมการที่ 3.7 ตามลำดับ

$$\text{RMSE} = \left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (T_{exp,i} - T_{pre,i})^2 \right)^{\frac{1}{2}} \quad (3.7)$$

โดยที่	T _{exp,i}	คือ	อุณหภูมิที่ได้จากการทดลอง (องศาเซลเซียส)
	T _{pre,i}	คือ	อุณหภูมิที่ได้จากแบบจำลอง (องศาเซลเซียส)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4.5 โปรแกรมแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์นี้พัฒนาขึ้นจากโปรแกรม MatLAB โดยแผนผังการทำงานของแบบจำลองนี้แสดงดังรูปที่ 3.14 เพื่อแสดงการกระจายอุณหภูมิ ณ ตำแหน่งใด ๆ ของผลิตภัณฑ์ในระหว่างกระบวนการอบแห้งแบบลูกกลิ้ง โดยกำหนดตำแหน่งในการแสดงอุณหภูมิทั้งหมด 5 ตำแหน่ง ได้แก่ 1 2 3 4 และ 5 โดยแต่ละตำแหน่งห่างกันเป็นระยะ 0.1 มิลลิเมตร โดยอุณหภูมิ ณ ตำแหน่งที่ผิวของผลิตภัณฑ์ที่สัมผัสกับผิวลูกกลิ้ง ความร้อนมีค่าเท่ากับอุณหภูมิของแผ่นส่งผ่านความร้อนตลอดการถ่ายเทความร้อนดังสมมติฐานข้อที่ 2 ส่วนอุณหภูมิ ณ ตำแหน่งอื่น ๆ ขึ้นอยู่กับรูปแบบของสมการการกระจายอุณหภูมิของตำแหน่งนั้น องค์ประกอบของโปรแกรมแสดงดังรูปที่ 3.15 ได้แก่

1) ข้อมูลสถานะของการอบแห้งแบบลูกกลิ้ง

ส่วนนี้เป็นการป้อนข้อมูลอัตราส่วนข้าวตอกน้ำที่ใช้ในการเตรียมโจ๊กข้าวกลิ้งงอก อุณหภูมิผิวของลูกกลิ้ง และความถี่ของเครื่องอินเวอร์เตอร์ที่ใช้ควบคุมรอบการหมุนของลูกกลิ้ง

2) ข้อมูลสถานะของตัวอย่าง

ในส่วนนี้เป็นการกำหนดค่าอุณหภูมิเริ่มต้นของตัวอย่างโจ๊กข้าวกลิ้งงอก ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน ค่าความร้อนจำเพาะ ค่าความหนาแน่น และความหนาของตัวอย่าง ซึ่งได้จากการระเหยแห้งของลูกกลิ้ง

3) ข้อมูลอุณหภูมิที่ได้จากการวัดด้วยเครื่องมือ

ทำการป้อนค่าของอุณหภูมิที่ได้จากการวัดด้วยเครื่องมือเพื่อใช้แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของตัวอย่างระหว่างการอบแห้งที่ได้จากการวัดด้วยเครื่องมือและอุณหภูมิที่ได้จากแบบจำลองในระหว่างการอบแห้งแบบลูกกลิ้ง

4) อุณหภูมิของ Node ภายในตัวอย่างระหว่างการอบแห้ง

ในส่วนนี้เป็นการแสดงค่าอุณหภูมิที่ได้จากแบบจำลองของ Node ทั้ง 5 Node เมื่อมีการรันโปรแกรม ซึ่งค่าของอุณหภูมิจะแสดงทุกๆ วินาทีจนถึงสิ้นสุดระยะเวลาของการอบแห้ง

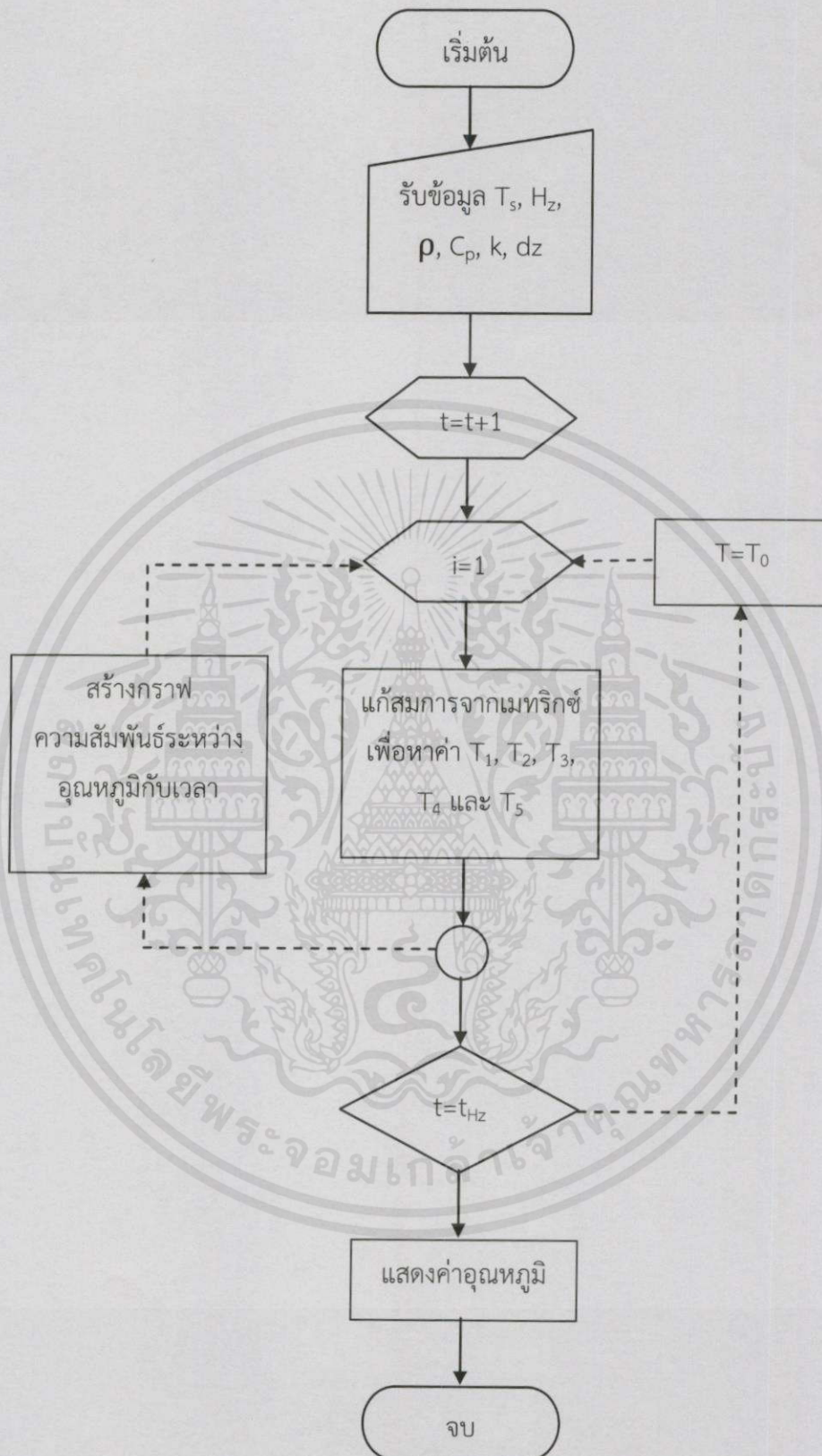
5) รูปแสดงตำแหน่งการวัดอุณหภูมิ

ส่วนนี้เป็นการแสดงตำแหน่งที่แบบจำลองกำลังทำการคำนวณอุณหภูมิของตัวอย่างทั้ง 5 Node

6) ปุ่มรันโปรแกรม ปิดโปรแกรม และรีเซตโปรแกรม

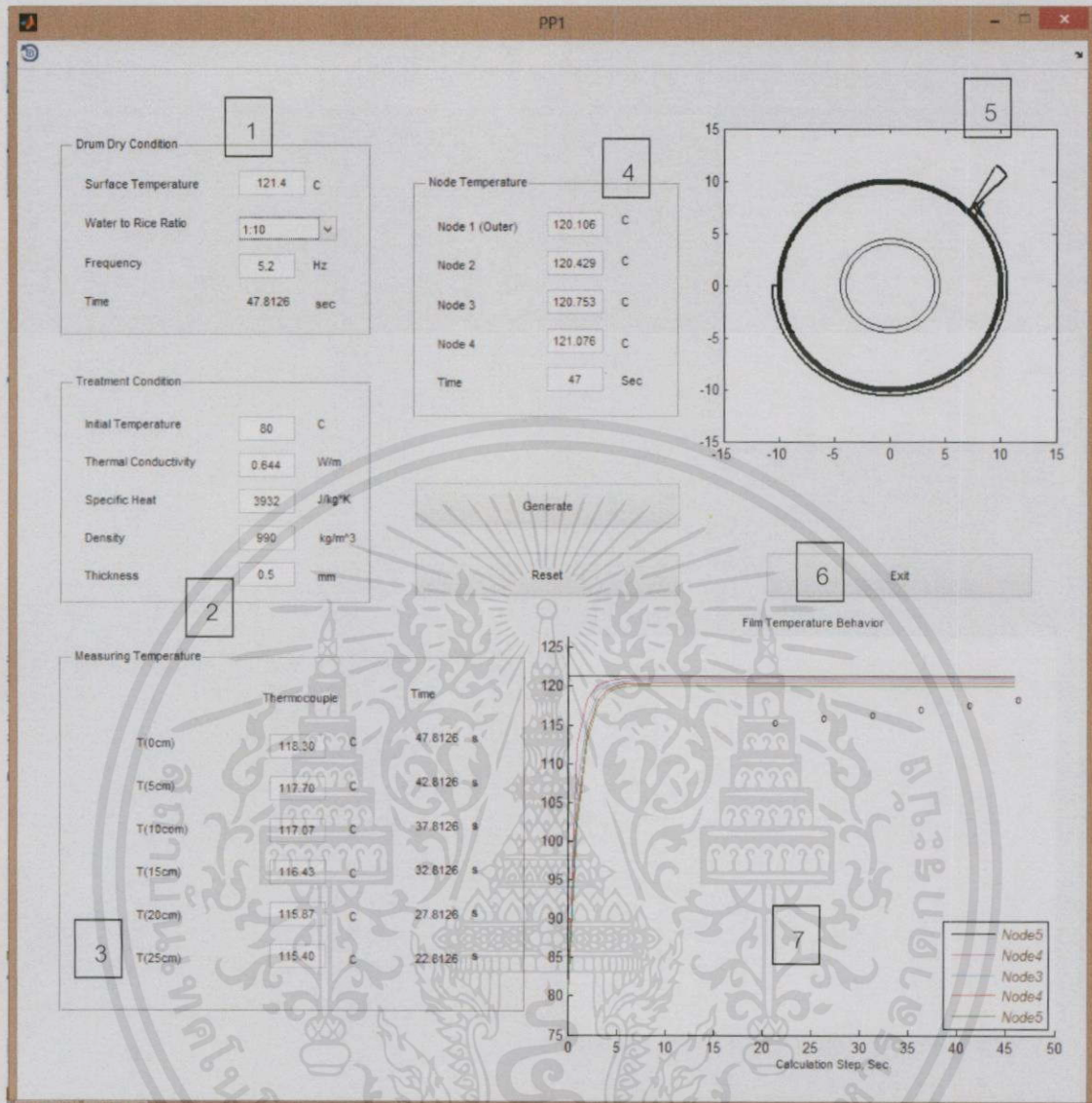
7) กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิผิวของตัวอย่างเทียบกับเวลาที่ใช้ในการอบแห้งในทุกๆ วินาที โดยเปรียบเทียบระหว่างค่าอุณหภูมิที่ได้จากแบบจำลองและค่าอุณหภูมิที่ได้จากเครื่องมือวัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 3.14 แผนผังการทำงานของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์การถ่ายเทความร้อน



รูปที่ 3.15 โปรแกรม Simulation แบบจำลองทำคณิตศาสตร์

3.5 การวิเคราะห์ทางสถิติ

ทำการทดสอบคุณภาพของตัวอย่างโดยทำซ้ำ 3 ครั้ง วิเคราะห์ความแตกต่างของข้อมูลทางสถิติด้วย One Way Analysis of Variance ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ แสดงผลการทดลองเป็นค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน

การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติถูกนำมาใช้เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนน้ำของการต้มและอุณหภูมิของการอบแห้งต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์โดยใช้การวิเคราะห์ Response Surface จากสมการ Linear Regression แบบ Polynomial อันดับ 2 ดังแสดงในสมการที่ 3.8 เพื่ออธิบายความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรที่ศึกษาคืออัตราส่วนข้าวต่อน้ำ กับอุณหภูมิผิวลูกกลิ้งและคุณสมบัติของโจ๊กข้าวกลิ้งออกกึ่งสำเร็จรูป ได้แก่ ค่าความขาว ความหนาแน่น ความหนืด และการคืนรูป

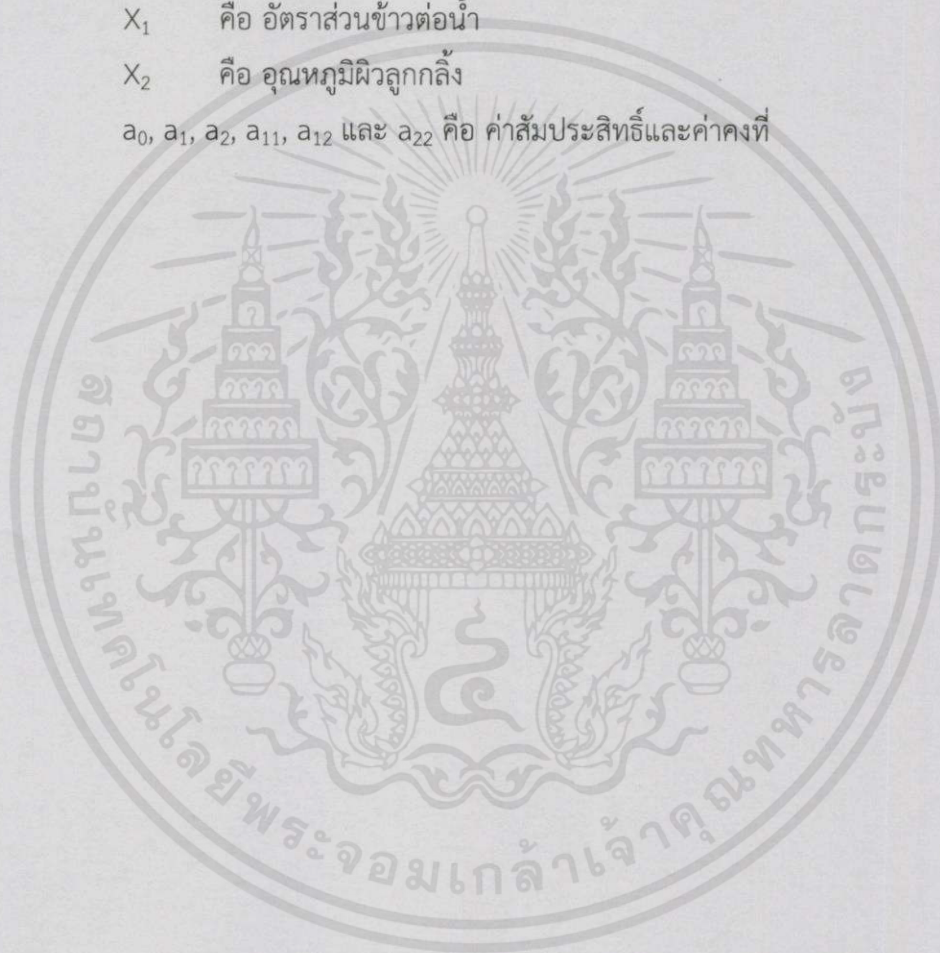
สมการความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์

$$Y = a_0 + a_1X_1 + a_2X_2 + a_{11}X_1^2 + a_{12}X_1X_2 + a_{22}X_2^2 \quad (3.8)$$

โดยที่ Y เป็นตัวแปรตาม a เป็นค่าสัมประสิทธิ์และค่าคงที่ X_1 เป็นสัดส่วนน้ำของการต้ม (8 10 และ 12 เท่าของมวลของข้าว) และ X_2 เป็นอุณหภูมิของการอบแห้งแบบลูกกลิ้ง (120 130 และ 140 องศาเซลเซียส)

เมื่อ

Y	คือ	คุณสมบัติของผลิตภัณฑ์
X_1	คือ	อัตราส่วนข้าวต่อน้ำ
X_2	คือ	อุณหภูมิผิวลูกกลิ้ง
$a_0, a_1, a_2, a_{11}, a_{12}$ และ a_{22}	คือ	ค่าสัมประสิทธิ์และค่าคงที่



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์

วัตถุประสงค์หลักของงานวิจัยนี้คือการศึกษาอิทธิพลของปัจจัยกระบวนการผลิตโจ๊กข้าวกล้องงอกกึ่งสำเร็จรูปต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ และการสร้างแบบจำลองคณิตศาสตร์สำหรับการกระจายตัวของอุณหภูมิในตัวอย่างระหว่างการอบแห้งแบบลูกกลิ้ง

4.1 อิทธิพลของสัดส่วนน้ำของการต้มและอุณหภูมิของการอบแห้งต่อค่าความขาวของตัวอย่าง

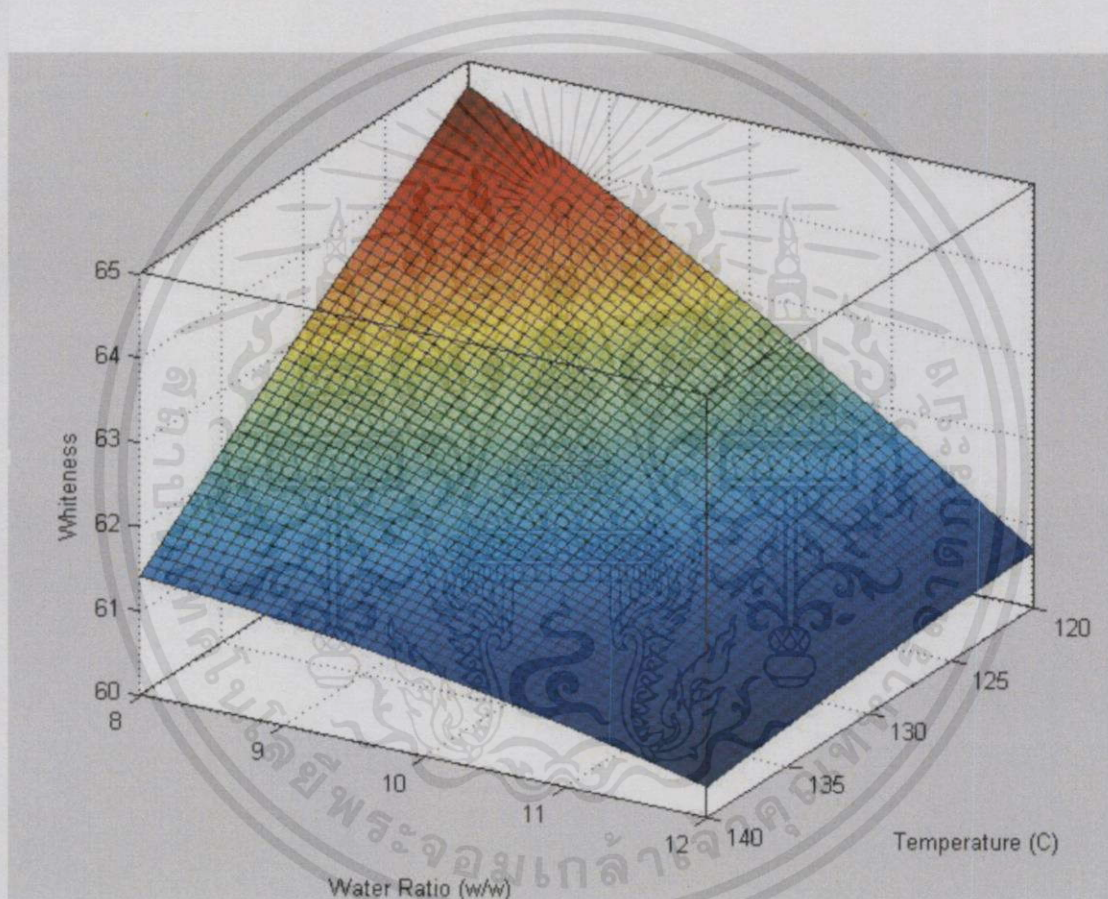
กระบวนการผลิตโจ๊กข้าวกล้องงอกกึ่งสำเร็จรูปประกอบด้วยขั้นตอนที่สำคัญ 3 ขั้นตอน ได้แก่ 1) การเตรียมปลายข้าวกล้องงอกโดยใช้ข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 2) การต้มสุกโดยใช้อัตราส่วนข้าวต่อน้ำเป็น 1:8 1:10 และ 1:12 (น้ำหนัก/น้ำหนัก) และ 3) การอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบลูกกลิ้งที่ 120 130 และ 140 องศาเซลเซียส จนได้ความชื้นฐานเปียกสุดท้ายของตัวอย่างประมาณ 3-5 เปอร์เซ็นต์ และทำการวิเคราะห์คุณภาพของตัวอย่าง

ผลการวัดค่าสีของตัวอย่างหลังการอบแห้งแสดงในตารางที่ 4.1 พบว่าค่าความสว่าง (L^*) มีแนวโน้มลดลงเมื่ออัตราส่วนน้ำที่ใช้ต้มและอุณหภูมิเพิ่มขึ้น โดยค่า L^* สูงสุดอยู่ที่อัตราส่วน 1:8 ที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียสมีค่าเป็น 69.72 ± 0.53 และค่าต่ำสุดอยู่ที่อัตราส่วน 1:12 ที่อุณหภูมิ 140 องศาเซลเซียส มีค่าเป็น 62.94 ± 0.66 เมื่อพิจารณาค่าความเป็นสีแดงหรือสีเขียว (a^*) พบว่าค่าอยู่ในช่วงระหว่าง -3.08 ± 1.23 ถึง 3.69 ± 0.58 ซึ่งมีความแตกต่างกันเล็กน้อย โดยค่า a^* ต่ำสุดอยู่ที่อัตราส่วนข้าวต่อน้ำที่ใช้ต้ม 1:12 ที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส และมีค่า a^* สูงสุดอยู่ที่อัตราส่วนน้ำที่ใช้ต้ม 1:10 ที่อุณหภูมิ 130 องศาเซลเซียส เมื่อพิจารณาค่าความเป็นสีเหลืองหรือสีน้ำเงิน (b^*) พบว่ามีค่าแตกต่างกันเพียงเล็กน้อยในช่วงระหว่าง 14.64 ± 0.19 ถึง 16.63 ± 0.20 แสดงให้เห็นว่าอัตราส่วนข้าวต่อน้ำและอุณหภูมิของการอบแห้งมีผลเล็กน้อยต่อค่า b^*

นำค่าสีที่แสดงอยู่ในรูป L^* a^* และ b^* มาคำนวณหาค่าความขาวด้วยสมการที่ 3.1 ผลลัพธ์ของปัจจัยกระบวนการผลิตต่อค่าความขาวของตัวอย่างแสดงในตารางที่ 4.1 ค่าความขาวของตัวอย่างมีแนวโน้มลดลงเมื่ออัตราส่วนน้ำที่ใช้ต้มและอุณหภูมิอบแห้งเพิ่มขึ้น แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนน้ำของการต้ม และอุณหภูมิของการอบแห้งต่อค่าความขาวของตัวอย่างในรูปที่ 4.1 โดยค่าความขาวสูงสุดของตัวอย่างที่ได้จากการต้มโจ๊กด้วยสัดส่วนข้าวต่อน้ำเป็น 1:8 และอบแห้งที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส มีค่าเป็น 65.45 ± 0.39 และมีค่าความขาวต่ำสุดของตัวอย่างที่ได้จากการต้มโจ๊กด้วยสัดส่วนข้าวต่อน้ำเป็น 1:12 และอบแห้งที่อุณหภูมิ 140 องศาเซลเซียส มีค่าเป็น 59.96 ± 0.65 ผลของการศึกษานี้สอดคล้องกับงานวิจัยของดารารัตน์ และคณะ (2554) ซึ่งพบว่าการอบแห้งแป้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบลูกกลิ้งมีค่าความขาวลดลงเมื่ออุณหภูมิของอบแห้งเพิ่มขึ้น และ

เมื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของค่าสี (ΔE) ของระหว่างตัวอย่างก่อนและหลังการอบแห้งพบว่าการเปลี่ยนแปลงมากที่สุดที่อัตราส่วนข้าวต่อน้ำที่ใช้ต้ม 1:12 และอบแห้งที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส เนื่องจากอบแห้งที่ 120 องศาเซลเซียส ต้องใช้เวลาในการอบแห้งนานกว่าการอบแห้งที่อุณหภูมิ 130 และ 140 องศาเซลเซียส ซึ่งแสดงให้เห็นว่าระยะเวลาของการอบแห้งมีอิทธิพลต่อค่าการเปลี่ยนแปลงของค่าสีอย่างชัดเจน

จากการศึกษาอิทธิพลของอัตราส่วนข้าวต่อน้ำของการต้มและอุณหภูมิอบแห้งของผิวลูกกลิ้งต่อค่าความขาวของตัวอย่างพบว่าค่าความขาวมีค่าลดลงเมื่อปริมาณน้ำที่ใช้ต้มและอุณหภูมิผิวลูกกลิ้งเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นที่ 95 เปอร์เซ็นต์



รูปที่ 4.1 แสดงอิทธิพลของสัดส่วนน้ำของการต้มและอุณหภูมิของการอบแห้งต่อค่าความขาวของตัวอย่าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 อิทธิพลของสัดส่วนน้ำของการต้มและอุณหภูมิของการอบแห้งต่อค่าความขาวของตัวอย่าง

อัตราส่วน ข้าวต่อน้ำ	อุณหภูมิ (°C)	เวลา (วินาที)	L^*	a^*	b^*
1:8	120	104	69.72±0.53a	-0.38±0.35c	16.63±0.20a
	130	96	66.48±0.67b	2.92±0.94ab	16.59±0.24a
	140	89	64.65±0.27cd	1.92±1.43b	15.65±0.33bc
1:10	120	94	65.12±0.67c	0.24±0.62c	16.00±0.46b
	130	89	66.50±0.27b	3.69±0.58a	16.11±0.19ab
	140	80	65.13±0.34c	2.99±0.60ab	15.90±0.44b
1:12	120	77	64.13±1.22cd	-3.08±1.23d	14.64±0.19d
	130	72	63.72±0.51de	-0.34±0.10c	15.60±0.16bc
	140	64	62.94±0.66e	-0.70±0.18c	15.14±0.2c

ตัวอักษรที่ต่างกันหมายถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$)

ตารางที่ 4.1 (ต่อ) อิทธิพลของสัดส่วนน้ำของการต้มและอุณหภูมิของการอบแห้งต่อค่าความขาวของตัวอย่าง

อัตราส่วน ข้าวต่อน้ำ	อุณหภูมิ (°C)	เวลา (วินาที)	ค่าความขาว	ΔE
1:8	120	104	65.45±0.39a	11.44±0.51b
	130	96	62.48±0.78b	7.08±1.12d
	140	89	61.28±0.36c	7.81±1.46d
1:10	120	94	61.62±0.80bc	9.45±0.68c
	130	89	62.64±0.36b	6.44±0.66d
	140	80	61.55±0.19bc	6.79±0.51d
1:12	120	77	61.12±1.04c	12.92±1.22a
	130	72	60.51±0.52cd	10.03±0.11bc
	140	64	59.96±0.65d	10.53±0.20bc

ตัวอักษรที่ต่างกันหมายถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 อิทธิพลของสัดส่วนน้ำของการต้มและอุณหภูมิของการอบแห้งต่อค่าความหนาแน่นของตัวอย่าง

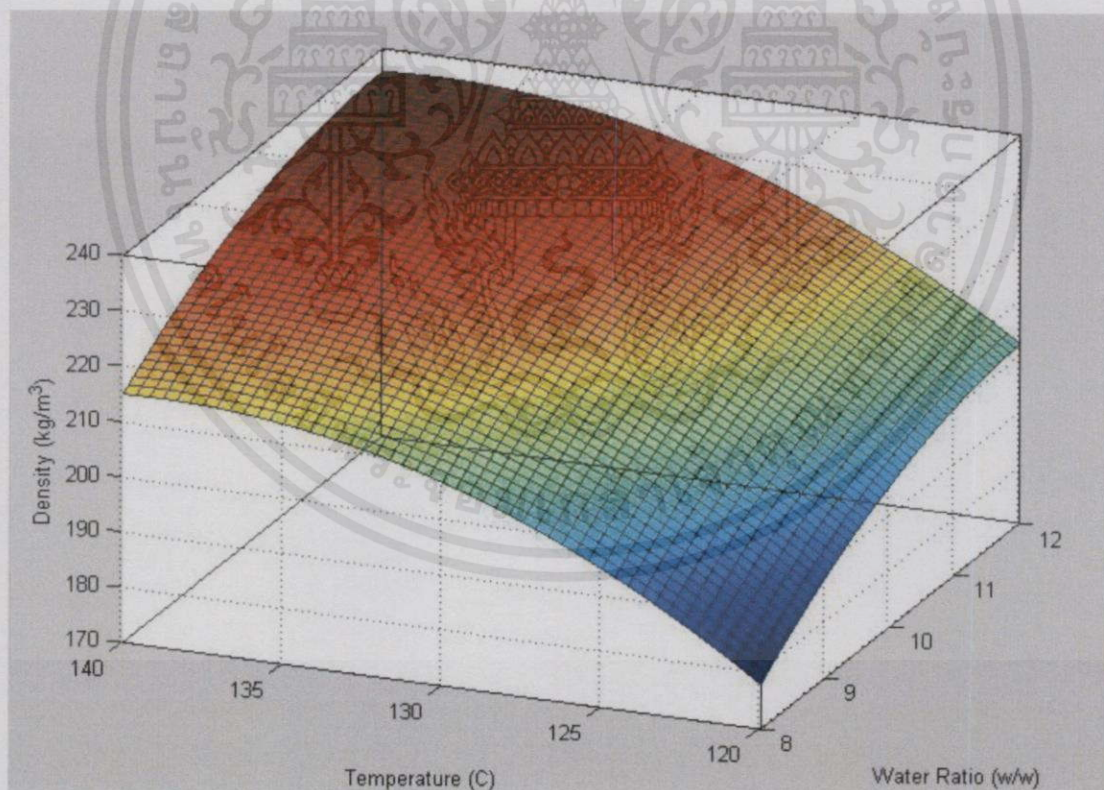
การคำนวณค่าความหนาแน่นของตัวอย่างหลังการอบแห้งโดยทำการลดขนาดตัวอย่างและร่อนตัวอย่างผ่านตะแกรงให้มีขนาดในช่วงระหว่าง 20-50 mesh นำตัวอย่างปริมาตรประมาณ 150 มิลลิลิตร ใส่กระบอกตวงที่มีปริมาตรบรรจุ 250 มิลลิลิตร เคาะกับโต๊ะ 10 ครั้ง คำนวณค่าความหนาแน่นของตัวอย่างจากสัดส่วนมวลต่อปริมาตร ผลที่ได้แสดงค่าในตารางที่ 4.2 พบว่าค่าความหนาแน่นมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อสัดส่วนน้ำที่ใช้ต้มเพิ่มขึ้นซึ่งแต่ละอัตราส่วนมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นที่ 95 เปอร์เซนต์ ค่าความหนาแน่นสูงสุดอยู่ที่อัตราส่วนข้าวต่อน้ำที่ใช้ต้มเป็น 1:12 (น้ำหนัก/น้ำหนัก) และอบแห้งที่อุณหภูมิ 140 องศาเซลเซียส มีค่าเป็น 235.00 ± 0.76 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร และมีค่าความหนาแน่นต่ำสุดอยู่ที่อัตราส่วนข้าวต่อน้ำที่ใช้ต้ม 1:8 และอุณหภูมิต่ำสุดเป็น 120 องศาเซลเซียส มีค่าเท่ากับ 179.87 ± 1.20 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร การเปลี่ยนแปลงของความหนาแน่นสอดคล้องกับงานวิจัยของอุทัยวรรณ และคณะ (2553) ซึ่งสรุปไว้ว่าการเพิ่มปริมาณสัดส่วนน้ำของการต้มส่งผลให้ความหนาแน่นของบัตเตอร์เค้กเพิ่มขึ้น

เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ของการอบแห้งตัวอย่างแบบลูกกลิ้งกับอุณหภูมิมิวนลูกกลิ้งพบว่าผลิตภัณฑ์หลังการอบแห้งจากตัวอย่างที่อัตราส่วนข้าวต่อน้ำที่ใช้ต้มเป็น 1:10 มีค่าความหนาแน่นเท่ากับ 192.78 ± 0.93 225.21 ± 0.94 และ 231.74 ± 1.51 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร ที่อุณหภูมิมิวนลูกกลิ้งอบแห้งเป็น 120 130 และ 140 องศาเซลเซียส ตามลำดับ แสดงให้เห็นแนวโน้มความหนาแน่นมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิต่ำสุดเพิ่มขึ้น จากการศึกษาอิทธิพลของอัตราส่วนข้าวต่อน้ำของการต้มและอุณหภูมิของมิวนลูกกลิ้งต่อค่าความหนาแน่นของตัวอย่างพบว่าค่าความหนาแน่นเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) เมื่อสัดส่วนน้ำของการต้มและอุณหภูมิต่ำสุดเพิ่มขึ้น โดยพบว่าค่าความหนาแน่นสูงสุดและต่ำสุด เป็น 235.00 ± 0.76 และ 179.87 ± 1.20 ตามลำดับ การอบแห้งที่อุณหภูมิสูงทำให้ตัวอย่างมีการหดตัวมากจึงส่งผลให้ความหนาแน่นเพิ่มขึ้น รูปที่ 4.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนน้ำของการต้มและอุณหภูมิต่ำสุดต่อค่าความหนาแน่นของตัวอย่าง ซึ่งอธิบายได้ด้วยสมการดังแสดงในตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.2 อิทธิพลของสัดส่วนน้ำของการต้มและอุณหภูมิของการอบแห้งต่อค่าความหนาแน่น ความหนืด และการคืนรูปของตัวอย่าง

อัตราส่วน ข้าวต่อน้ำ	อุณหภูมิ (°C)	ความหนาแน่น (kg/m ³)	ความหนืด (cP)	การคืนรูป (w/w)
1:8	120	179.87±1.20h	1463.19±19.57a	0.764±8.0×10 ⁻⁴ c
	130	205.27±1.42f	1451.19±24.10a	0.775±3.2×10 ⁻⁴ b
	140	214.75±1.21e	1167.72±6.96b	0.793±3.3×10 ⁻⁴ a
1:10	120	192.78±0.93g	935.03±8.26c	0.725±2.6×10 ⁻⁴ gh
	130	225.21±0.94d	901.31±4.50d	0.737±1.4×10 ⁻⁴ f
	140	231.74±1.51b	830.29±10.20e	0.752±2.9×10 ⁻⁴ d
1:12	120	203.47±1.65f	766.34±6.54f	0.722±3.7×10 ⁻⁴ h
	130	229.05±1.98c	685.36±17.03g	0.728±4.0×10 ⁻⁵ g
	140	235.00±0.76a	602.37±5.27h	0.745±4.3×10 ⁻⁴ e

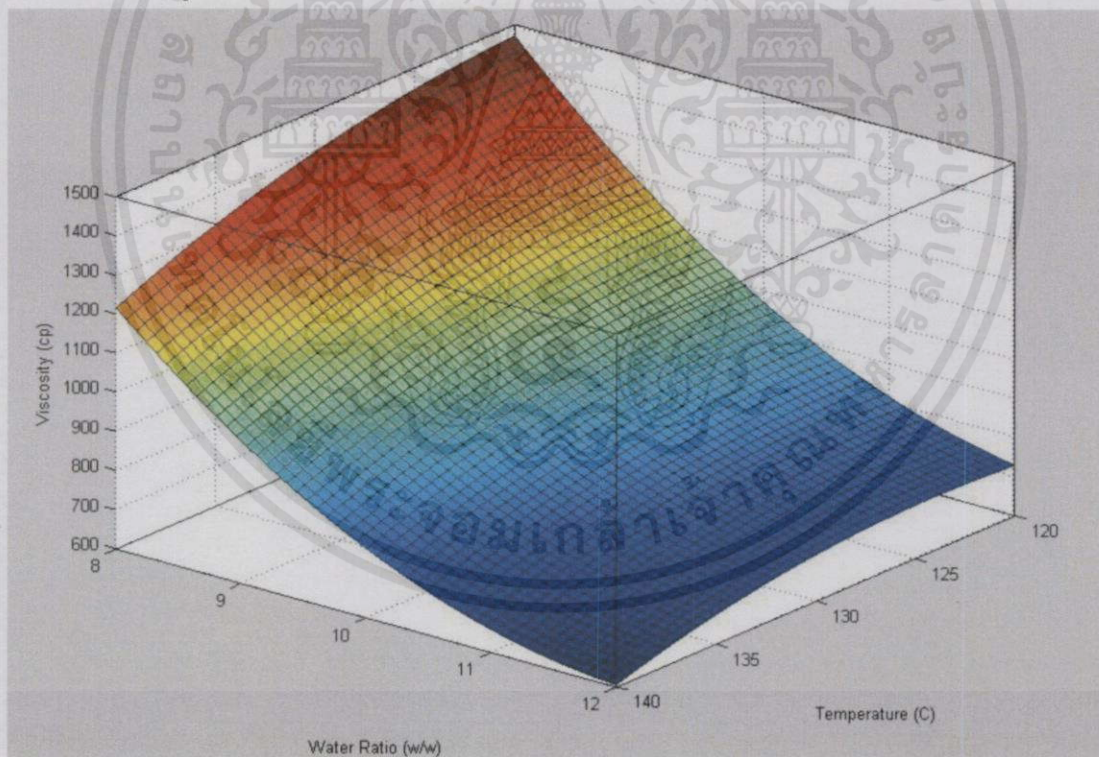
ตัวอักษรที่ต่างกันหมายถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ (p<0.05)



เอกสารนี้เป็นเอกสารรูปที่ 4.2 แสดงอิทธิพลของสัดส่วนน้ำของการต้มและอุณหภูมิของการอบแห้งประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกหรือเผยแพร่ข้อมูลของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 อิทธิพลของสัดส่วนน้ำของการต้มและอุณหภูมิของลูกกลิ้งต่อค่าความหนืดของตัวอย่าง

ทำการวัดค่าความหนืดด้วยเครื่องวัดความหนืด โดยนำตัวอย่างหลังการอบแห้งผสมกับน้ำร้อนอุณหภูมิ 97 องศาเซลเซียส ด้วยอัตราส่วนข้าวต่อน้ำเป็น 1:13 (น้ำหนัก/น้ำหนัก) วัดค่าความหนืดของตัวอย่างที่ความเร็วรอบ 80 รอบ/นาที ผลการทดสอบแสดงค่าความหนืดในตารางที่ 4.2 พบว่าค่าความหนืดสูงสุดอยู่ที่อัตราส่วนข้าวต่อน้ำที่ใช้ในการต้ม 1:8 และอุณหภูมิอบแห้งเป็น 120 องศาเซลเซียส มีค่าเป็น 1463.19 ± 19.57 เซนติพอยต์ และมีความหนืดต่ำสุดที่อัตราส่วนข้าวต่อน้ำที่ใช้ต้ม 1:12 และอุณหภูมิอบแห้งเป็น 140 องศาเซลเซียส มีค่าเป็น 602.37 ± 5.27 เซนติพอยต์ แสดงให้เห็นว่าค่าความหนืดมีแนวโน้มลดลงเมื่อสัดส่วนน้ำและอุณหภูมิอบแห้งเพิ่มขึ้น อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นที่ 95 เปอร์เซ็นต์ ผลการทดลองนี้สอดคล้องกับงานวิจัยของโสโรยา (2555) ซึ่งกล่าวไว้ว่าอัตราส่วนของข้าวต่อน้ำมีอิทธิพลต่อค่าความหนืดโดยพบว่าการเพิ่มสัดส่วนปริมาณน้ำส่งผลให้จึกข้างฮางมีความหนืดลดลง สัดส่วนน้ำของการต้มและอุณหภูมิอบแห้งมีความสัมพันธ์ต่อค่าความหนืดของตัวอย่างดังแสดงในรูปที่ 4.3 และความสัมพันธ์นี้อธิบายได้ด้วยสมการที่แสดงอยู่ในตารางที่ 4.3



รูปที่ 4.3 แสดงอิทธิพลของสัดส่วนน้ำและอุณหภูมิของการอบแห้ง

ต่อค่าความหนืดของตัวอย่าง

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4 อิทธิพลของสัดส่วนน้ำของการต้มและอุณหภูมิของลูกกลิ้งต่อค่าการคินรูปของตัวอย่าง

ทำการหาค่าการคินรูปโดยใช้ตัวอย่างหลังการอบแห้งผสมน้ำร้อนที่มีอุณหภูมิ 97 องศาเซลเซียส กรองตัวอย่างโดยใช้กระดาษกรอง Advantech เบอร์ 1 ร่วมกับปั๊มสุญญากาศเป็นเวลา 10 วินาที คำนวณค่าการคินรูปจากสัดส่วนมวลของตัวอย่างหลังการกรองต่อมวลของตัวอย่างเริ่มต้น แสดงค่าผลลัพธ์ที่ได้ในตารางที่ 4.2 ค่าการคินรูปสูงสุดอยู่ที่อัตราส่วนข้าวต่อน้ำที่ใช้ต้มเป็น 1:8 และอบแห้งที่อุณหภูมิ 140 องศาเซลเซียส มีค่าเป็น $0.793 \pm 3.3 \times 10^{-4}$ (น้ำหนัก/น้ำหนัก) และมีค่าการคินรูปต่ำสุดอยู่ที่อัตราส่วนข้าวต่อน้ำที่ใช้ต้มเป็น 1:12 อบแห้งที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส มีค่าเท่ากับ $0.732 \pm 3.7 \times 10^{-4}$ (น้ำหนัก/น้ำหนัก) จากตัวอย่างที่อบแห้งด้วยอุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส เมื่ออัตราส่วนข้าวต่อน้ำของการต้มเป็น 1:8 1:10 และ 1:12 มีค่าการคินรูปเป็น $0.764 \pm 8.0 \times 10^{-4}$ $0.725 \pm 2.6 \times 10^{-4}$ และ $0.722 \pm 3.7 \times 10^{-4}$ (น้ำหนัก/น้ำหนัก) ตามลำดับ พบว่าเมื่อสัดส่วนน้ำเพิ่มขึ้น การคินรูปมีแนวโน้มลดลง

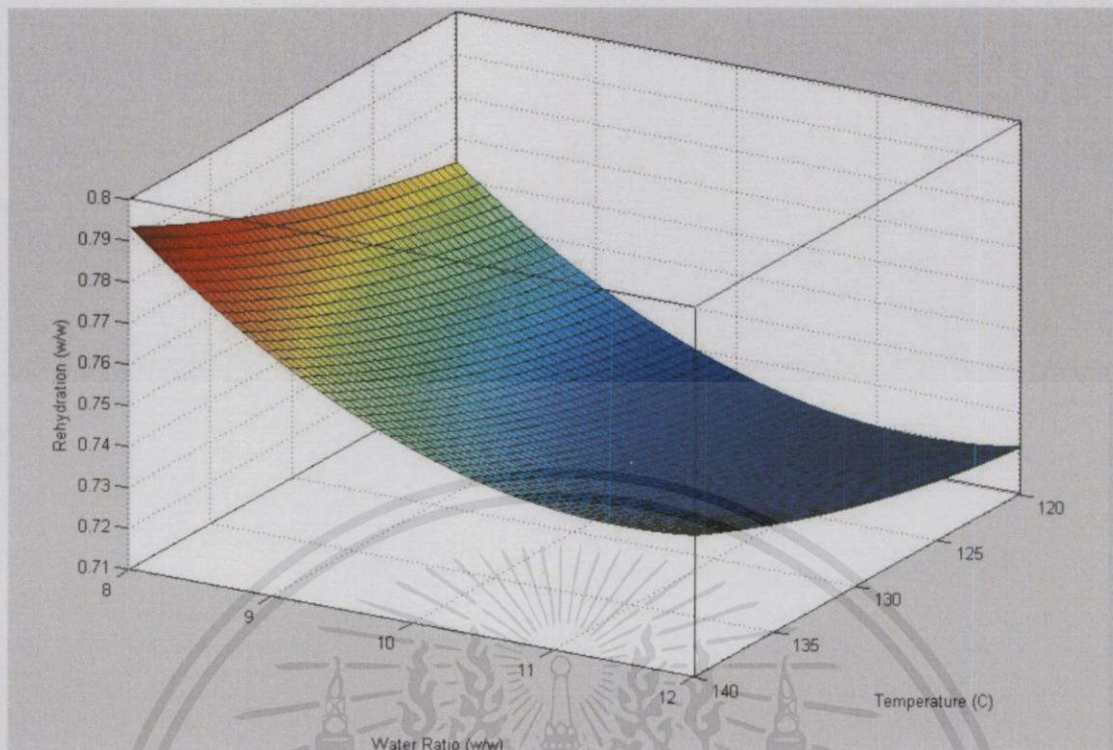
เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ของการอบแห้งตัวอย่างกับอุณหภูมิผิวลูกกลิ้งจากตัวอย่างที่อัตราส่วน 1:8 เมื่ออุณหภูมิตอบแห้งเป็น 120 130 และ 140 มีค่าการคินรูปเป็น $0.764 \pm 8.0 \times 10^{-4}$ $0.775 \pm 3.2 \times 10^{-4}$ และ $0.793 \pm 3.3 \times 10^{-4}$ (น้ำหนัก/น้ำหนัก) ตามลำดับ พบว่าเมื่ออุณหภูมิผิวลูกกลิ้งเพิ่มขึ้นการคินรูปมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ผลการทดลองนี้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Jittanit et al. (2012) ซึ่งกล่าวไว้ว่าการอบแห้งโจ๊กที่อุณหภูมิ 140 องศาเซลเซียส สามารถคินรูปได้เร็วกว่า 120 องศาเซลเซียส เพราะลักษณะของโจ๊กที่ได้จากการอบแห้งที่อุณหภูมิสูงมีรูพรุนมาก ทำให้การดูดซึมน้ำกลับได้ดีขึ้น

จากการศึกษาอิทธิพลของอัตราส่วนข้าวต่อน้ำของการต้มและอุณหภูมิของลูกกลิ้งต่อค่าการคินรูปแสดงในรูปที่ 4.4 และอธิบายความสัมพันธ์นี้ได้ด้วยสมการในตารางที่ 4.3 พบว่าค่าการคินรูปมีค่าลดลงเมื่อปริมาณน้ำที่ใช้ต้มเพิ่มขึ้น แต่ค่าการคินรูปมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิผิวลูกกลิ้งเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นที่ 95 เปอร์เซ็นต์

ตารางที่ 4.3 ค่าสัมประสิทธิ์และค่าคงที่ของสมการถดถอยของความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำของการต้มและอุณหภูมิของการอบแห้งต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์

คุณภาพ	a_0	a_1	a_2	a_{11}	a_{12}	a_{22}	R^2
ความขาว	117.6	-0.3449	-4.843	-0.000467	0.03762	-0.03417	0.8378
ความหนาแน่น	223.5	9.859	15.11	-4.091	-0.5016	-7.766	0.9931
การคินรูป	0.7357	-0.01977	0.0114	0.01238	-0.001125	0.002625	0.9988
ความหนืด	923.4	-292.7	-81.43	100.4	24.66	38.85	0.9845

เอกสารนี้สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับงานวิจัยที่ศึกษาเรื่องนี้ ไม่อาจนำเนื้อหาไปใช้ประโยชน์ทางการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.4 แสดงอิทธิพลของสัดส่วนน้ำและอุณหภูมิของการอบแห้ง
ต่อค่าการคืนรูปของตัวอย่าง

4.5 อิทธิพลของสัดส่วนน้ำของการต้มและอุณหภูมิของการอบแห้งต่อค่า Pasting Property ของตัวอย่าง

ศึกษาค่า Pasting Property ของตัวอย่างโดยใช้เครื่องเครื่องวัดความหนืด แสดงค่าในตารางที่ 4.4 พบว่าค่า Peak Viscosity มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อสัดส่วนน้ำที่ใช้ต้มและอุณหภูมิมอบแห้งเพิ่มขึ้น โดยค่า Peak Viscosity มีค่าสูงสุดที่อัตราส่วนข้าวต่อน้ำเป็น 1:10 อุณหภูมิมอบแห้งเป็น 130 องศาเซลเซียส มีค่าเป็น 527.36 ± 22.34 RVU และมีค่าต่ำสุดอยู่ที่อัตราส่วนข้าวต่อน้ำเป็น 1:12 ที่อุณหภูมิมอบแห้ง 140 องศาเซลเซียส มีค่าเป็น 319.00 ± 9.53 RVU

ค่า Trough ที่ได้มีค่าสูงสุดอยู่ที่อัตราส่วนข้าวต่อน้ำเป็น 1:10 อุณหภูมิมอบแห้งเป็น 130 องศาเซลเซียส มีค่าเป็น 159.86 ± 2.76 RVU และมีค่าต่ำสุดอยู่ที่อัตราส่วนข้าวต่อน้ำเป็น 1:8 ที่อุณหภูมิมอบแห้งเป็น 130 องศาเซลเซียส มีค่าเป็น 100.28 ± 1.97 RVU ซึ่งที่อัตราส่วนข้าวต่อน้ำ 1:8 1:10 และ 1:12 อบแห้งที่อุณหภูมิมอบแห้ง 120 130 และ 140 องศาเซลเซียส พบว่าไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นที่ 95 เปอร์เซ็นต์

นอกจากนี้ค่า Final Viscosity มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อสัดส่วนน้ำที่ใช้ต้มและอุณหภูมิมอบแห้งเพิ่มขึ้น โดยไม่ต่างกันค่า Final Viscosity สูงสุดอยู่ที่อัตราส่วนข้าวต่อน้ำเป็น 1:10 ที่อุณหภูมิมอบแห้งเป็น 130 องศาเซลเซียส

เซลเซียส มีค่าเป็น 265.70 ± 3.93 RVU และมีค่าต่ำสุดอยู่ที่อัตราส่วนข้าวตอกน้ำเป็น 1:8 ที่อุณหภูมิอบแห้งเป็น 130 องศาเซลเซียส มีค่าเป็น 167.44 ± 2.10 RVU

เมื่อสกัดส่วนน้ำและอุณหภูมิเพิ่มขึ้น พบว่าค่า Break Down มีแนวโน้มลดลงแต่ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ โดยค่า Breakdown มีค่าสูงสุดอยู่ที่อัตราส่วนข้าวตอกน้ำเป็น 1:10 ที่อุณหภูมิอบแห้งเป็น 120 องศาเซลเซียส มีค่าเป็น 394.36 ± 12.74 RVU และมีค่าต่ำสุดอยู่ที่อัตราส่วนข้าวตอกน้ำเป็น 1:12 ที่อุณหภูมิอบแห้งเป็น 140 องศาเซลเซียส มีค่าเป็น 204.17 ± 10.54 RVU

เมื่อพิจารณาค่า Set Back พบว่าเมื่ออุณหภูมิอบแห้งเพิ่มขึ้น ค่า Set Back มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ โดยค่า Set Back สูงสุดอยู่ที่อัตราส่วนข้าวตอกน้ำเป็น 1:12 ที่อุณหภูมิอบแห้งเป็น 130 องศาเซลเซียส มีค่าเท่ากับ 96.89 ± 10.55 RVU และมีค่าต่ำสุดอยู่ที่อัตราส่วนข้าวตอกน้ำเป็น 1:8 ที่อุณหภูมิอบแห้งเป็น 130 องศาเซลเซียส มีค่าเท่ากับ 67.17 ± 0.55 RVU

จากการศึกษาอิทธิพลของสัดส่วนน้ำของการต้มและอุณหภูมิของการอบแห้งต่อค่า Pasting Property ของตัวอย่าง พบว่าการเพิ่มสัดส่วนน้ำของการต้มและอุณหภูมิของการอบแห้งส่งผลเพียงเล็กน้อยต่อค่า Pasting Property ซึ่งไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์

ตารางที่ 4.4 อิทธิพลของสัดส่วนน้ำของการต้มและอุณหภูมิของลูกกลิ้งต่อค่า Pasting Property ของตัวอย่าง

อัตราส่วนข้าวตอกน้ำ (w/w)	อุณหภูมิ (°C)	Peak Viscosity (RVU)	Trough (RVU)	Break Down (RVU)	Final Viscosity (RVA)
1:8	120	371.17 ± 12.70 de	100.69 ± 4.55 d	270.47 ± 14.14 b	172.44 ± 2.94 e
	130	382.42 ± 9.31 d	100.28 ± 1.97 d	282.14 ± 6.35 b	167.44 ± 2.10 e
	140	472.89 ± 27.47 b	122.86 ± 3.38 b	350.03 ± 24.11 a	205.14 ± 6.10 c
1:10	120	397.92 ± 14.71 cd	103.55 ± 12.74 d	394.36 ± 12.74 b	180.94 ± 4.67 d
	130	527.36 ± 22.34 a	159.86 ± 2.76 a	367.50 ± 25.00 a	265.70 ± 3.93 a
	140	427.17 ± 20.03 c	126.84 ± 0.83 b	300.33 ± 20.86 b	220.09 ± 0.59 b
1:12	120	347.47 ± 14.17 ef	111.03 ± 15.21 c	236.44 ± 15.21 c	186.86 ± 3.14 d
	130	405.50 ± 28.12 cd	121.11 ± 4.84 b	284.39 ± 23.78 b	218.00 ± 6.29 b
	140	319.00 ± 9.53 f	114.83 ± 3.42 c	204.17 ± 10.54 d	188.08 ± 1.30 d

ตัวอักษรที่ต่างกันหมายถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$)

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.4 (ต่อ) อิทธิพลของสัดส่วนน้ำของการต้มและอุณหภูมิของลูกกลิ้งต่อค่า Pasting Property ของตัวอย่าง

อัตราส่วน ข้าวต่อน้ำ	อุณหภูมิ (°C)	Setback Viscosity (RVU)	Peak Time (°C)	Pasting Temp (°C)
1:8	120	71.75±3.27de	3.62±0.04d	52.45±0.09a
	130	67.17±0.55e	4.02±0.04ab	52.45±0.05a
	140	82.28±2.72c	3.89±0.08bc	52.40±0.05a
1:10	120	77.39±0.49cd	3.64±0.10d	52.45±0.10a
	130	105.83±6.67a	3.84±0.08bc	52.42±0.03a
	140	93.25±1.41b	4.14±0.09a	52.47±0.03a
1:12	120	75.83±11.78d	3.89±0.17bc	52.47±0.06a
	130	96.89±10.55b	4.00±0.12ab	52.45±0.10a
	140	73.25±3.24d	3.75±0.04cd	52.40±0.05a

ตัวอักษรที่ต่างกันหมายถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$)

4.6 การประเมินทางประสาทสัมผัสของตัวอย่าง

ทดสอบทางประสาทสัมผัสโดยใช้วิธี 9 Point Hedonic Scale โดยใช้ผู้ทดสอบ 30 คน ทำการเตรียมตัวอย่างโดยทำการคั้นรูปผลิตภัณฑ์ด้วยน้ำร้อนอุณหภูมิ 97 องศาเซลเซียส โดยใช้สัดส่วนตัวอย่างหลังการอบแห้งต่อน้ำเป็น 1:13 (น้ำหนัก/น้ำหนัก) ทำการทดสอบทางด้านรูปลักษณะ สี กลิ่น เนื้อสัมผัส รสชาติ ความหนืด และความชอบโดยรวม คะแนนเฉลี่ยของการทดสอบคุณภาพทางประสาทสัมผัสของตัวอย่างแสดงในตารางที่ 4.5 พบว่าคะแนนความชอบทางด้านลักษณะภายนอกมีค่าอยู่ในช่วง 4.97 ± 1.30 ถึง 5.93 ± 1.11 มีค่าสูงสุดที่อัตราส่วนข้าวต่อน้ำ 1:12 อุณหภูมิอบแห้ง 120 องศาเซลเซียส คะแนนความชอบทางด้านสีมีค่าอยู่ในช่วง 5.57 ± 1.14 ถึง 6.32 ± 1.09 มีค่าสูงสุดที่อัตราส่วนข้าวต่อน้ำ 1:8 อุณหภูมิอบแห้ง 120 องศาเซลเซียส ซึ่งมีค่าความขาวสูงสุด คะแนนความชอบทางด้านกลิ่นมีค่าอยู่ในช่วง 4.80 ± 1.19 ถึง 5.70 ± 1.06 คะแนนความชอบทางด้านเนื้อสัมผัสมีค่าอยู่ในช่วง 4.70 ± 1.47 ถึง 5.93 ± 1.34 คะแนนความชอบทางด้านรสชาติมีค่าอยู่ในช่วง 4.53 ± 1.33 ถึง 5.80 ± 1.54 คะแนนความชอบทางด้านความหนืดมีค่าอยู่ในช่วง 4.90 ± 1.42 ถึง 5.97 ± 1.38 และคะแนนความชอบโดยรวมอยู่ในช่วง 4.60 ± 1.28 ถึง 6.23 ± 1.14 ซึ่งมีค่าสูงสุดที่อัตราส่วนข้าวต่อน้ำ 1:12 อุณหภูมิอบแห้ง 120 องศาเซลเซียส

จากการศึกษานี้พบว่าอัตราส่วนข้าวต่อน้ำ และอุณหภูมิของการอบแห้งแบบลูกกลิ้งไม่มีผลต่อคะแนนการทดสอบทางประสาทสัมผัสอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) ได้แก่ ลักษณะภายนอก สี กลิ่น เนื้อสัมผัส รสชาติ และความหนืด อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาถึงความชอบรวมพบว่าการต้มตัวอย่าง

ด้วยสัดส่วนข้าวต่อน้ำเป็น 1:12 และอบแห้งแบบลูกกลิ้งที่ 120 องศาเซลเซียส ได้รับคะแนนสูงสุด เป็น 6.23 ± 1.14 ซึ่งมีคะแนนความชอบโดดเด่นด้านลักษณะภายนอก เนื้อสัมผัส และรสชาติ

ตารางที่ 4.5 อิทธิพลของสัดส่วนข้าวต่อน้ำและอุณหภูมิของลูกกลิ้งต่อการทดสอบทางประสาทสัมผัสของตัวอย่าง

อัตราส่วน ข้าวต่อน้ำ	อุณหภูมิ (°C)	ลักษณะภายนอก	สี	กลิ่น	เนื้อสัมผัส
1:8	120	5.79±1.03a	6.32±1.09a	5.04±0.92b	5.64±1.23a
	130	5.63±1.00a	6.07±1.17ab	5.20±0.92ab	5.40±1.10ab
	140	5.60±1.30a	5.83±1.32ab	5.17±1.05ab	5.37±0.93ab
1:10	120	4.97±1.30b	5.80±1.47ab	4.80±1.19b	4.70±1.47b
	130	5.43±1.38ab	5.93±1.14ab	5.33±1.06ab	5.33±1.35ab
	140	5.73±0.94a	5.90±1.16ab	5.40±1.00ab	5.67±1.18a
1:12	120	5.93±1.11a	5.83±1.23ab	5.67±1.09a	5.93±1.34a
	130	5.67±1.06a	5.73±1.34ab	5.30±1.29ab	5.50±1.31a
	140	5.70±1.15a	5.57±1.14b	5.70±1.06a	5.80±1.49a

ตัวอักษรที่ต่างกันหมายถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$)

ตารางที่ 4.5 (ต่อ) อิทธิพลของสัดส่วนข้าวต่อน้ำและอุณหภูมิของลูกกลิ้งต่อการทดสอบทางประสาทสัมผัสของตัวอย่าง

อัตราส่วน ข้าวต่อน้ำ	อุณหภูมิ (°C)	รสชาติ	ความหนืด	ความชอบโดยรวม
1:8	120	5.14±1.41ab	5.86±1.08a	5.75±1.04abc
	130	4.57±1.48b	4.90±1.42bc	5.17±1.12cd
	140	4.67±1.45b	5.17±1.26ab	5.20±1.00cd
1:10	120	4.53±1.33b	4.33±1.35c	4.60±1.28d
	130	5.20±1.49ab	5.63±1.59ab	5.47±1.28bc
	140	5.67±1.35a	5.77±1.43a	5.77±0.97abc
1:12	120	5.80±1.54a	5.83±1.34a	6.23±1.14a
	130	5.57±1.07a	5.77±1.76a	6.00±1.17ab
	140	5.63±1.56a	5.97±1.38a	6.00±1.08ab

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับก... การศึกษา... อนุญาตให้นำไปใช้... กับการค้า
ไม่ว่าก็ตาม ตัวอักษรที่ต่างกันหมายถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) ของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.7 อิทธิพลของสัดส่วนน้ำของการต้มและอุณหภูมิของการอบแห้งต่อค่าความชื้นของตัวอย่าง

ทำการหาค่าความชื้นโดยอบตัวอย่างในตู้อบด้วยอุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง คำนวณค่าความชื้นจากสูตรที่ 3.2 แสดงผลที่ได้ในตารางที่ 4.6 ค่าความชื้นของตัวอย่างหลังการอบแห้งมีค่าอยู่ในช่วง 3.75 ถึง 4.85 เปอร์เซ็นต์ โดยความชื้นสูงสุดอยู่ที่อัตราส่วนข้าวต่อน้ำเป็น 1:10 ที่อุณหภูมิอบแห้งเป็น 120 องศาเซลเซียส มีค่าเท่ากับ 4.85 ± 0.010 เปอร์เซ็นต์ และมีค่าต่ำสุดอยู่ที่อัตราส่วนข้าวต่อน้ำเป็น 1:10 ที่อุณหภูมิอบแห้งเป็น 140 องศาเซลเซียส มีค่าเท่ากับ 3.75 ± 0.020 เปอร์เซ็นต์ ผลของการทดลองนี้สอดคล้องกับมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน (2554) ซึ่งกล่าวว่าผลิตภัณฑ์จักหลังการอบแห้งต้องมีความชื้นของผลิตภัณฑ์ไม่เกิน 10 เปอร์เซ็นต์

4.8 อิทธิพลของสัดส่วนน้ำของการต้มและอุณหภูมิของการอบแห้งต่อค่าวอเตอร์แอกทีวิตีของตัวอย่าง

ทำการหาค่าความชื้นโดยใช้เครื่องวัดค่าวอเตอร์แอกทีวิตี แสดงผลที่ได้ในตารางที่ 4.6 พบว่าค่าวอเตอร์แอกทีวิตีของตัวอย่างหลังการอบแห้งมีค่าอยู่ระหว่าง 0.071 ถึง 0.191 โดยมีค่าวอเตอร์แอกทีวิตีสูงสุดเป็น 0.191 ± 0.0076 ที่อัตราส่วนข้าวต่อน้ำเป็น 1:8 น้ำหนัก/น้ำหนัก และอุณหภูมิผิวลูกกลิ้งเป็น 120 องศาเซลเซียส และมีค่าวอเตอร์แอกทีวิตีต่ำสุดเป็น 0.071 ± 0.0080 ที่อัตราส่วนข้าวต่อน้ำเป็น 1:10 น้ำหนัก/น้ำหนัก และอุณหภูมิผิวลูกกลิ้งเป็น 130 องศาเซลเซียส ผลการทดลองนี้สอดคล้องกับศูนย์เครือข่ายข้อมูลอาหารครบวงจร (2557) ซึ่งกล่าวว่าอาหารแห้งคืออาหารที่มีค่าวอเตอร์แอกทีวิตีน้อยกว่า 0.6 ซึ่งจุลินทรีย์ทุกชนิดไม่สามารถเจริญเติบโตได้

ตารางที่ 4.6 อิทธิพลของสัดส่วนข้าวต่อน้ำและอุณหภูมิของลูกกลิ้งต่อค่าความชื้นและค่าวอเตอร์แอกทีวิตีของตัวอย่าง

อัตราส่วนข้าวต่อน้ำ	อุณหภูมิ (°C)	เวลา (วินาที)	ความชื้นฐานเปียก (%)	a_w
1:8	120	104	4.54 ± 0.004	0.191 ± 0.0076
	130	96	4.53 ± 0.017	0.125 ± 0.0035
	140	89	4.06 ± 0.045	0.088 ± 0.0012
1:10	120	94	4.85 ± 0.010	0.190 ± 0.0050
	130	89	4.00 ± 0.109	0.071 ± 0.0080
	140	80	3.75 ± 0.020	0.084 ± 0.0064
1:12	120	77	4.04 ± 0.014	0.146 ± 0.0067
	130	72	3.94 ± 0.066	0.086 ± 0.0078
	140	64	3.82 ± 0.034	0.144 ± 0.0038

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษานานาชาติ ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

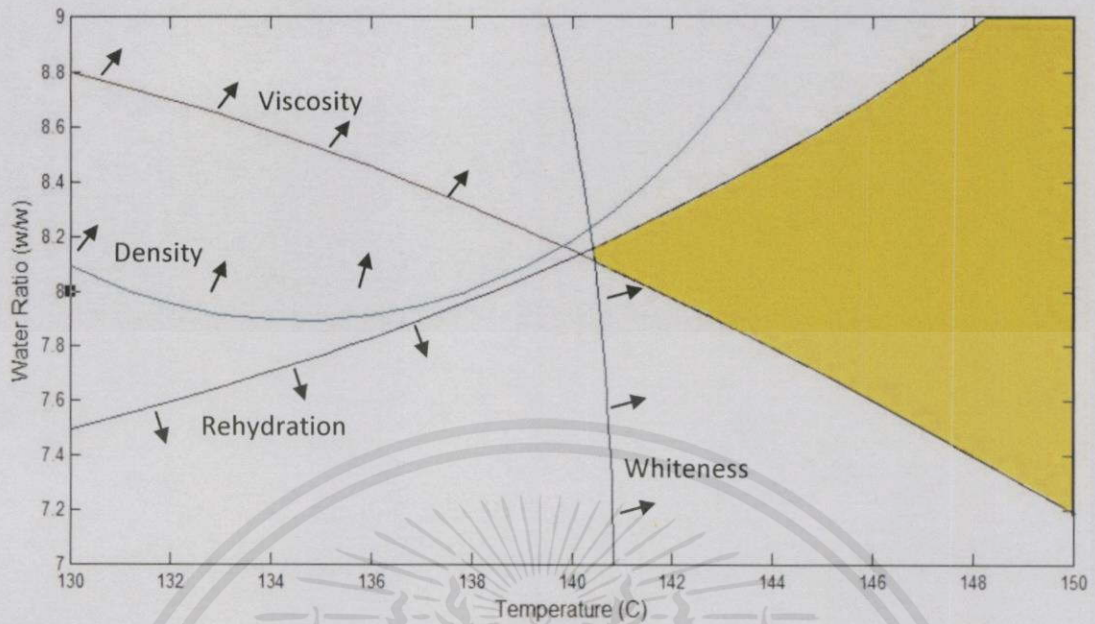
4.9 การหาสภาวะที่เหมาะสมของกระบวนการผลิตโจ๊กข้าวกล้องงอกกิ่งสำเร็จรูป

ปัจจัยที่ใช้ในกระบวนการผลิตมีอยู่ 2 ปัจจัย ได้แก่ อัตราส่วนข้าวต่อน้ำของการต้มและอุณหภูมิผิวของลูกกลิ้งสำหรับการอบแห้ง โดยแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอิทธิพลของปัจจัยของกระบวนการผลิตต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์หลังการอบแห้งด้วยวิธีพื้นผิวตอบสนอง (Response Surface Method) คุณภาพของผลิตภัณฑ์ได้แก่ ค่าความขาว ความหนาแน่น ความหนืด และการคืนรูป การหาสภาวะที่เหมาะสมของการอบแห้งแบบลูกกลิ้งของโจ๊กข้าวกล้องงอกมีขอบเขตดังตารางที่ 4.7 สมบัติที่สำคัญของผลิตภัณฑ์ประเภทอาหารกิ่งสำเร็จรูปคือ ความสามารถด้านการคืนรูป เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่ดีที่สุดภายหลังการคืนรูปจึงเลือกค่าการคืนรูปเป็นคุณสมบัติแรกสำหรับการพิจารณาเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมของกระบวนการผลิตโจ๊กข้าวกล้องงอกกิ่งสำเร็จรูป จากผลการทดลองพบว่าตัวอย่างมีค่าการคืนรูปสูงที่สุดคือประมาณ 0.793 กรัม/กรัม ซึ่งได้มาจากการทดลองที่อัตราส่วนข้าวต่อน้ำของการต้มเป็น 1:8 และอบแห้งที่อุณหภูมิเป็น 140 องศาเซลเซียส ที่สภาวะนี้มีค่าความขาวประมาณเป็น 62 ค่าความหนาแน่นประมาณ 214.75 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร และค่าความหนืดประมาณ 1167.7 เซนติพอยต์ คุณสมบัติที่มีความสำคัญรองลงมาจากค่าการคืนรูปคือค่าความขาว ค่าความหนาแน่น และค่าความหนืด

ตารางที่ 4.7 ขอบเขตในการหาสภาวะที่เหมาะสมของกระบวนการอบแห้งโจ๊กข้าวกล้องงอกโดยใช้เครื่องอบแห้งแบบลูกกลิ้ง

คุณภาพหลังการอบแห้ง	ลักษณะของผลิตภัณฑ์ที่ดี
การคืนรูป	ควรมีค่ามาก
ความขาว	ควรมีค่ามาก
ความหนาแน่น	ควรมีค่าน้อย
ความหนืด	ควรมีค่าน้อย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น "ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้"



รูปที่ 4.5 กราฟแสดงสถานะที่เหมาะสมของกระบวนการอบแห้งโจ๊กข้าวกล้องงอก โดยใช้เครื่องอบแห้งแบบลูกกลิ้ง

พิจารณาสมบัติของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากอัตราส่วนข้าวต่อน้ำของการต้มเป็น 1:8 และอบแห้งที่อุณหภูมิเป็น 140 องศาเซลเซียส โดยการสร้างกราฟขอบเขตความสัมพันธ์ (Contour) ได้ความสัมพันธ์ดังรูปที่ 4.5 รูปภาพความสัมพันธ์ของคุณภาพหลังการอบแห้งแสดงให้เห็นว่าปริมาณน้ำที่ใช้ต้มควรเป็น 8.12 ถึง 8.16 เท่าของมวลข้าว และอบแห้งที่อุณหภูมิตั้งแต่ 140 องศาเซลเซียสขึ้นไป โดยพบว่าถ้าอุณหภูมิลบแห้งสูงขึ้นค่าการคืนรูปยิ่งดีขึ้น

4.10 การทวนสอบแบบจำลองคณิตศาสตร์สำหรับการกระจายตัวของอุณหภูมิในตัวอย่างระหว่างการอบแห้งแบบลูกกลิ้ง

ทำการเตรียมตัวอย่างโจ๊กข้าวกล้องงอกโดยจากการต้มปลายข้าวกล้องงอกด้วยสัดส่วนข้าวต่อน้ำเป็น 1:10 (น้ำหนัก/น้ำหนัก) และตรวจสอบสมบัติของตัวอย่างโจ๊กเพื่อสร้างแบบจำลองคณิตศาสตร์ ตารางที่ 4.8 แสดงค่าสมบัติของตัวอย่างโจ๊กและข้อมูลของเครื่องอบแห้งแบบลูกกลิ้งพบว่าตัวอย่างเริ่มต้นมีค่าความร้อนจำเพาะเป็น 3.932 ± 0.029 กิโลจูล/(กิโลกรัม·องศาเซลเซียส) ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนเป็น 0.644 ± 0.005 วัตต์/(กิโลกรัม·องศาเซลเซียส) และค่าความหนาแน่นเป็น 990.26 ± 4.73 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร ตัวอย่างหลังการต้มมีอุณหภูมิประมาณ 80 องศาเซลเซียส อบแห้งตัวอย่างด้วยเครื่องอบแห้งแบบลูกกลิ้งที่อุณหภูมิผิวเป็น 121.4 130.6 และ 139.4 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลาประมาณ 48 วินาที และทำการวัดอุณหภูมิที่ผิวของตัวอย่างด้วยเครื่องวัดอุณหภูมิแบบ Roller-Surface Thermocouple นำค่าที่ได้มาเปรียบเทียบกับค่าอุณหภูมิผิวที่ได้จากแบบจำลอง

ตารางที่ 4.8 ตัวแปรสำหรับการสร้างแบบจำลองคณิตศาสตร์ของการกระจายตัวของอุณหภูมิในตัวอย่างระหว่างการอบแห้งแบบลูกกลิ้ง

ตัวแปร	ค่า
ระยะห่างลูกกลิ้ง	1 มิลลิเมตร
ความยาวของกระบอกลูกกลิ้ง	300 มิลลิเมตร
รัศมีของลูกกลิ้ง	150 มิลลิเมตร
จำนวน Node	5 ตำแหน่ง
อุณหภูมิสิ่งแวดล้อมภายนอก	35 องศาเซลเซียส
อุณหภูมิเริ่มต้นของตัวอย่าง	80 องศาเซลเซียส
พลังงานของการระเหย	2257 กิโลจูล/กิโลกรัม
ความหนาแน่น	990.26±4.73 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร
ความร้อนจำเพาะ	3.932±0.029 กิโลจูล/(กิโลกรัม.องศาเซลเซียส)
สัมประสิทธิ์การนำความร้อน	0.644±0.005 วัตต์/(กิโลกรัม.องศาเซลเซียส)
เวลาในการทำแห้ง	48 วินาที
ความเร็วรอบลูกกลิ้ง	0.625 รอบต่อนาที

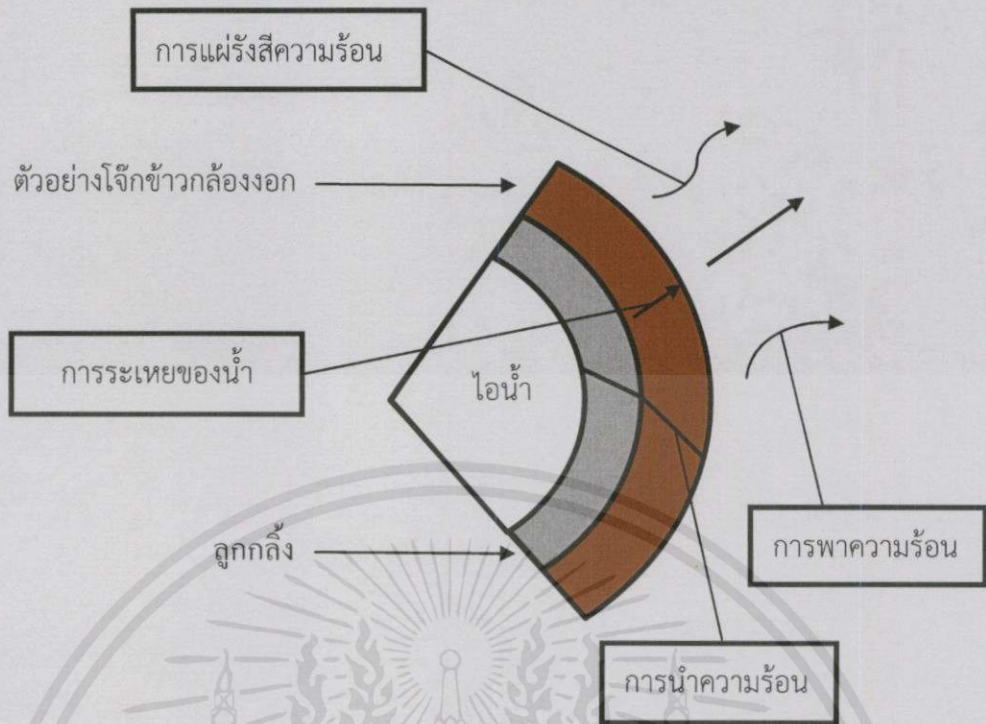
4.10.1 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของตัวอย่างระหว่างการอบแห้งแบบลูกกลิ้ง

การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิในตัวอย่างระหว่างการอบแห้งแบบลูกกลิ้งเกิดจากการถ่ายเทความร้อนของไอน้ำที่ไหลภายในลูกกลิ้ง พลังงานจากไอน้ำมีการถ่ายเทจากผิวด้านในของลูกกลิ้งออกไปสู่ผิวด้านนอก และถ่ายเทให้กับผลิตภัณฑ์ ภายในตัวอย่างมีการถ่ายความร้อนแบบการนำความร้อน และมีการสูญเสียความร้อนเนื่องจากการระเหยไอน้ำ โดยเฉพาะผิวด้านนอกของตัวอย่างมีการแผ่รังสีของความร้อน และการพาความร้อนออกสู่สิ่งแวดล้อมอีกด้วย ดังแสดงในรูปที่ 4.6

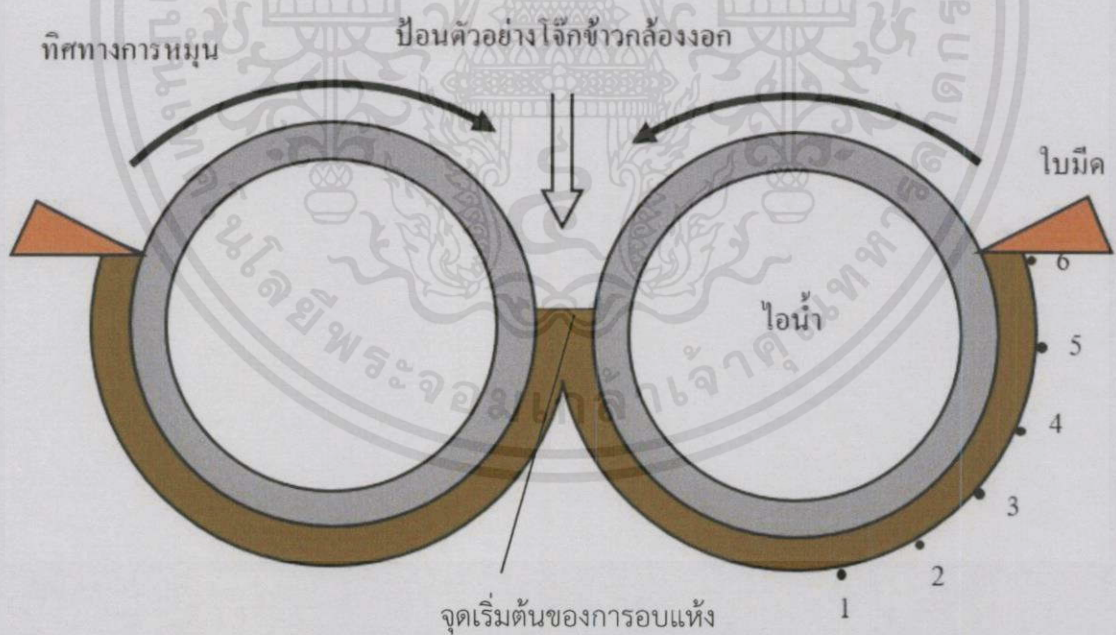
ในการทดลองอุณหภูมิผิวของเครื่องอบแห้งแบบลูกกลิ้งมีค่าเท่ากับ 121.4 130.6 และ 139.4 องศาเซลเซียส ตัวอย่างมีอัตราส่วนข้าวต่อน้ำเป็น 1:10 (น้ำหนัก/น้ำหนัก) ทำการอบแห้งที่ความเร็วรอบลูกกลิ้งเป็น 0.625 รอบต่อนาที จากนั้นทำการวัดอุณหภูมิผิวของตัวอย่างจำนวน 6 ตำแหน่ง โดยที่แต่ละตำแหน่งห่างกัน 5 เซนติเมตร ดังแสดงอยู่ในรูปที่ 4.7

จากการวัดอุณหภูมิผิวของตัวอย่างที่ตำแหน่งต่างๆ พบว่าอุณหภูมิของตัวอย่างเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาของการอบแห้ง อุณหภูมิที่ตำแหน่งสุดท้ายบริเวณใบมีด (ตำแหน่งที่ 6) มีค่าเท่ากับ 118.0 128.2 และ 138.2 องศาเซลเซียส ที่อุณหภูมิผิวลูกกลิ้งคงที่เป็น 121.4 130.6 และ 138.2 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 4.9 4.10 และ 4.11 ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.6 การถ่ายเทความร้อนรูปแบบต่าง ๆ ผ่านผิวของลูกกลิ้งและตัวอย่าง



รูปที่ 4.7 ตำแหน่งของการวัดอุณหภูมิบนผิวลูกกลิ้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.9 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่ผิวของตัวอย่างในระหว่างการอบแห้งเมื่ออุณหภูมิที่ผิวของลูกกลิ้งคังที่เป็น 121.4 องศาเซลเซียส

ตำแหน่ง	เวลาอบแห้ง (วินาที)	ระยะทางจากจุดเริ่มต้น (เซนติเมตร)	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)
1	22.5	22	115.4
2	27.6	27	115.9
3	32.7	32	116.4
4	37.8	37	117.1
5	42.9	42	117.7
6	48.0	47	118.0

ตารางที่ 4.10 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่ผิวของตัวอย่างในระหว่างการอบแห้งเมื่ออุณหภูมิที่ผิวของลูกกลิ้งคังที่เป็น 130.6 องศาเซลเซียส

ตำแหน่ง	เวลาอบแห้ง (วินาที)	ระยะทางจากจุดเริ่มต้น (เซนติเมตร)	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)
1	22.5	22	125.2
2	27.6	27	125.7
3	32.7	32	126.2
4	37.8	37	126.7
5	42.9	42	127.4
6	48.0	47	128.2

ตารางที่ 4.11 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่ผิวของตัวอย่างในระหว่างการอบแห้งเมื่ออุณหภูมิที่ผิวของลูกกลิ้งคังที่เป็น 139.4 องศาเซลเซียส

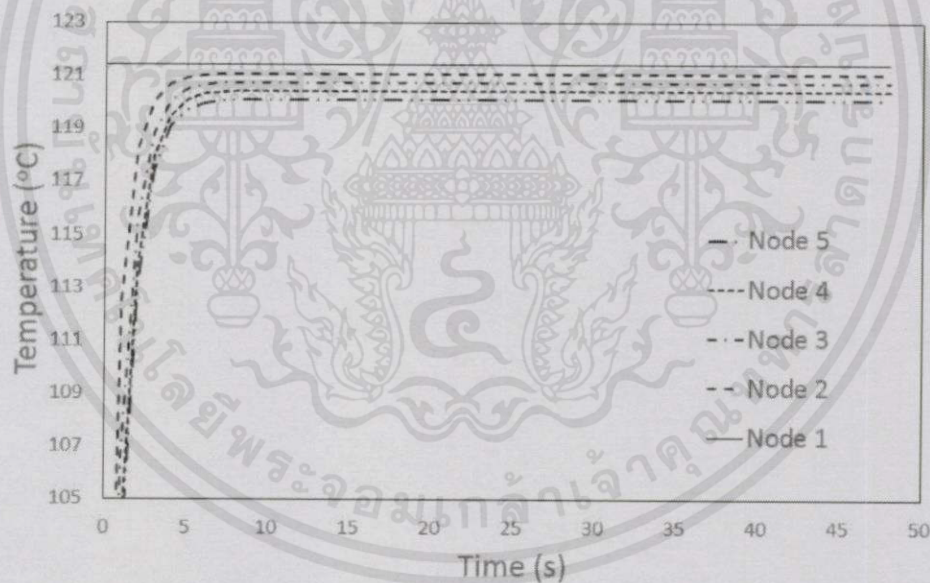
ตำแหน่ง	เวลาอบแห้ง (วินาที)	ระยะทางจากจุดเริ่มต้น (เซนติเมตร)	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)
1	22.5	22	135.1
2	27.6	27	135.6
3	32.7	32	136.2
4	37.8	37	136.7
5	42.9	42	137.5
6	48.0	47	138.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องแจ้งถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่จะนำไปใช้

4.10.2 แบบจำลองคณิตศาสตร์ของการกระจายตัวของอุณหภูมิของตัวอย่างระหว่างการอบแห้งแบบลูกกลิ้ง

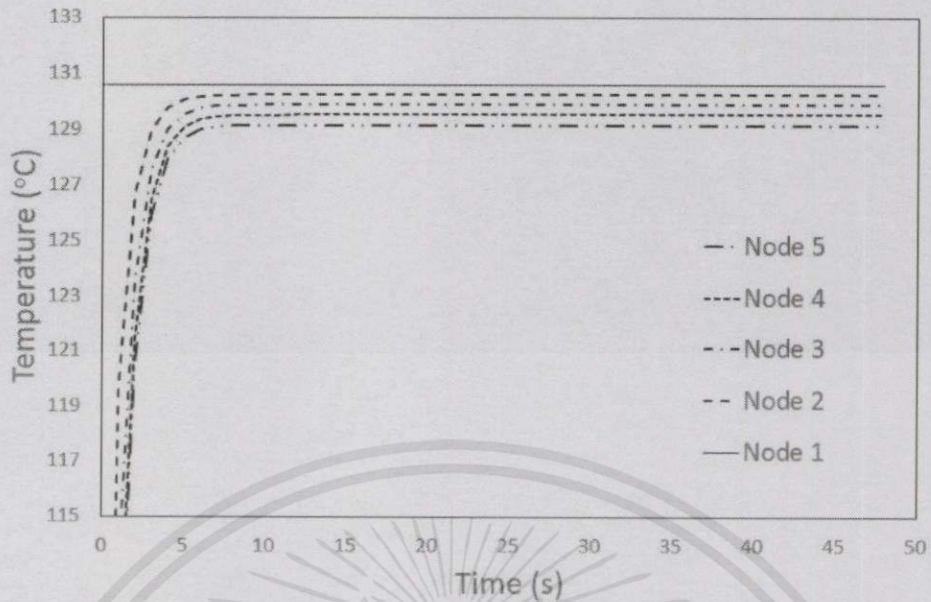
การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการกระจายตัวของอุณหภูมิในตัวอย่างระหว่างการอบแห้งแบบลูกกลิ้งมีพื้นฐานจากกฎทรงพลังงานและแก๊สมการโดยใช้วิธี Finite Difference แบบ Implicit Method โดยใช้สมมติฐานตามที่กล่าวไว้ในหัวข้อที่ 3.4.1 โดยแบ่งการคำนวณเป็น 3 ช่วง คือ 1) การถ่ายเทความร้อนบริเวณด้านล่างของตัวอย่าง 2) การถ่ายเทความร้อนภายในตัวอย่าง 3) การถ่ายเทความร้อนที่ผิวด้านบนของตัวอย่าง ซึ่งได้สมการดังตารางที่ 3.1 และทำการเปลี่ยนแปลงของการกระจายของอุณหภูมิตลอดการอบแห้งโดยใช้โปรแกรม MatLAB

จากการวิเคราะห์กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของตัวอย่างระหว่างการอบแห้งและเวลา จากโปรแกรมพบว่าค่าในแต่ละตำแหน่งของตัวอย่างโฉกข้าวกลิ้งของกที่อุณหภูมิผิวของลูกกลิ้งเป็น 121.4 130.6 และ 139.4 องศาเซลเซียส มีอุณหภูมิภายในเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงระยะเวลา 12 วินาทีแรก หลังจากนั้นอุณหภูมิของตัวอย่างเข้าสู่สภาวะคงที่จนสิ้นสุดการทำแห้งที่เวลา 48 วินาที โดยกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิในแต่ละ Node และเวลาการอบแห้งแสดงอยู่ในรูปที่ 4.8 4.9 และ 4.10 ตามลำดับ และค่าอุณหภูมิสุดท้ายของแต่ละ Node แสดงค่าอยู่ในตารางที่ 4.12



รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิในแต่ละ Node และเวลาที่อุณหภูมิผิวของลูกกลิ้งคงที่เป็น 121.4 องศาเซลเซียส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิในแต่ละ Node และเวลา
ที่อุณหภูมิผิวของลูกกลิ้งคงที่เป็น 130.6 องศาเซลเซียส



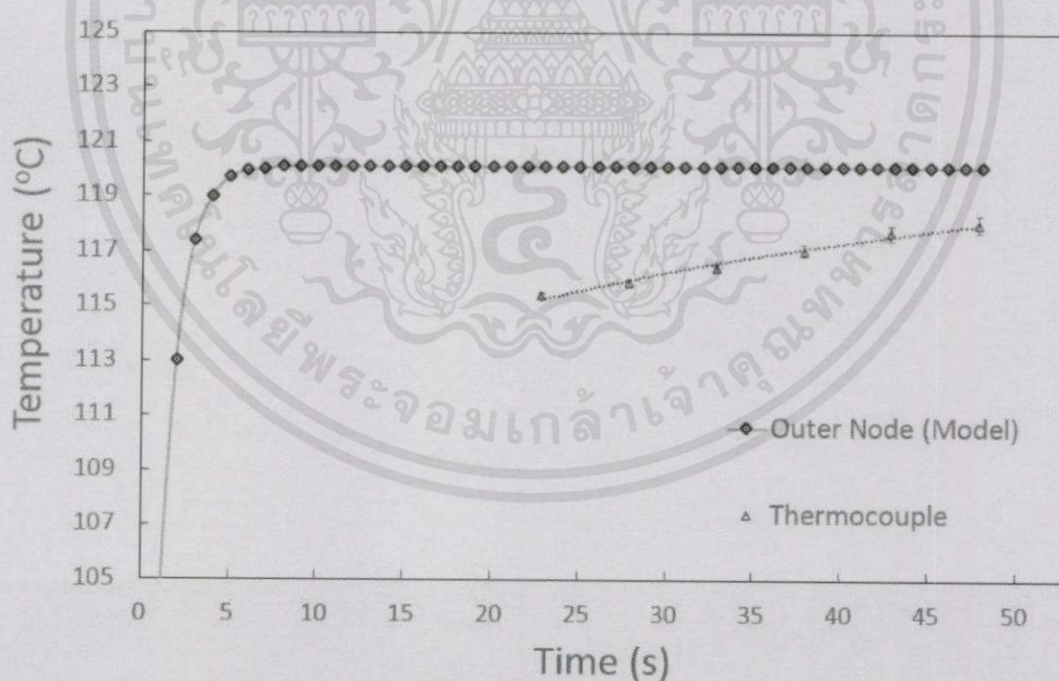
รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิในแต่ละ Node และเวลา
ที่อุณหภูมิผิวของลูกกลิ้งคงที่เป็น 139.4 องศาเซลเซียส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.12 อุณหภูมิที่ผิวของตัวอย่างจากแบบจำลองเมื่ออุณหภูมิผิวของลูกกลิ้งที่เป็น 121.4 130.6 และ 139.4 องศาเซลเซียส

Node	อุณหภูมิผิวของลูกกลิ้ง (องศาเซลเซียส)		
	121.4	130.6	139.4
1	121.4	130.6	139.4
2	121.1	130.2	139.0
3	120.8	129.9	138.6
4	120.4	129.5	138.2
5	120.1	129.2	137.8

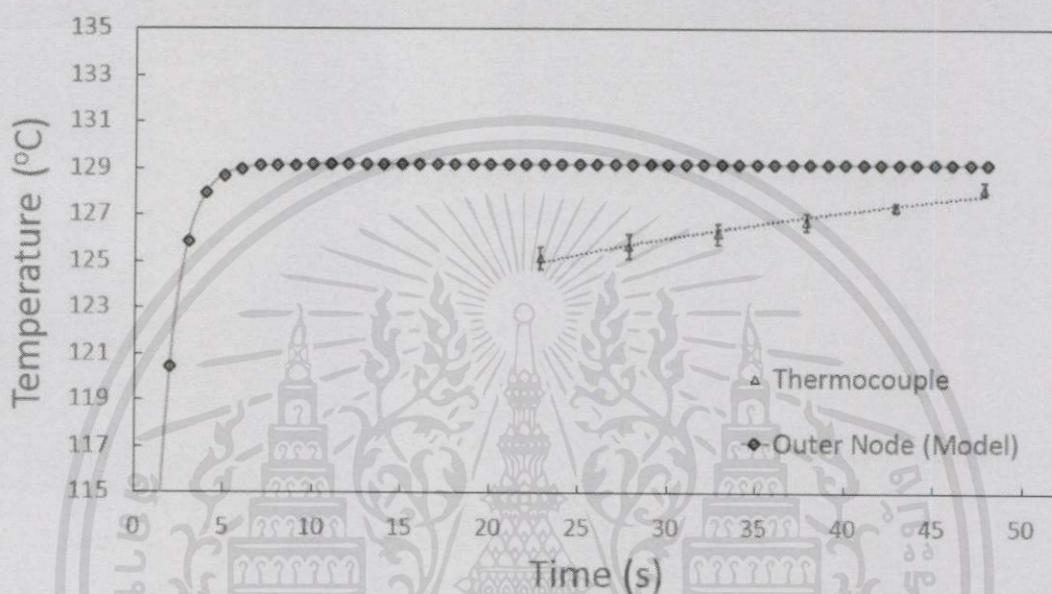
จากการวิเคราะห์กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของตัวอย่างที่ได้จากแบบจำลองเมื่ออุณหภูมิผิวของลูกกลิ้งที่เป็น 121.4 องศาเซลเซียส พบว่าอุณหภูมิเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วง 12 วินาทีแรก จากนั้นอุณหภูมิเข้าสู่สภาวะคงที่เป็น 120.1 องศาเซลเซียส ใช้เวลาในการอบแห้งทั้งหมด 48 วินาที อุณหภูมิของผิวตัวอย่างมีค่าเป็น 115.4 115.9 116.4 117.1 117.7 และ 118.0 องศาเซลเซียส จากตำแหน่งที่ 1 ถึงตำแหน่งที่ 6 ตามลำดับ โดยแสดงความสัมพันธ์ดังรูปที่ 4.11 คำนวณหาค่ารากที่สองของค่าคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยจากสมการที่ 3.7 มีค่าเท่ากับ 3.48



รูปที่ 4.11 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่ผิวของตัวอย่างระหว่างการอบแห้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ เมื่ออุณหภูมิผิวลูกกลิ้งที่เป็น 121.4 องศาเซลเซียสให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสาร ทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

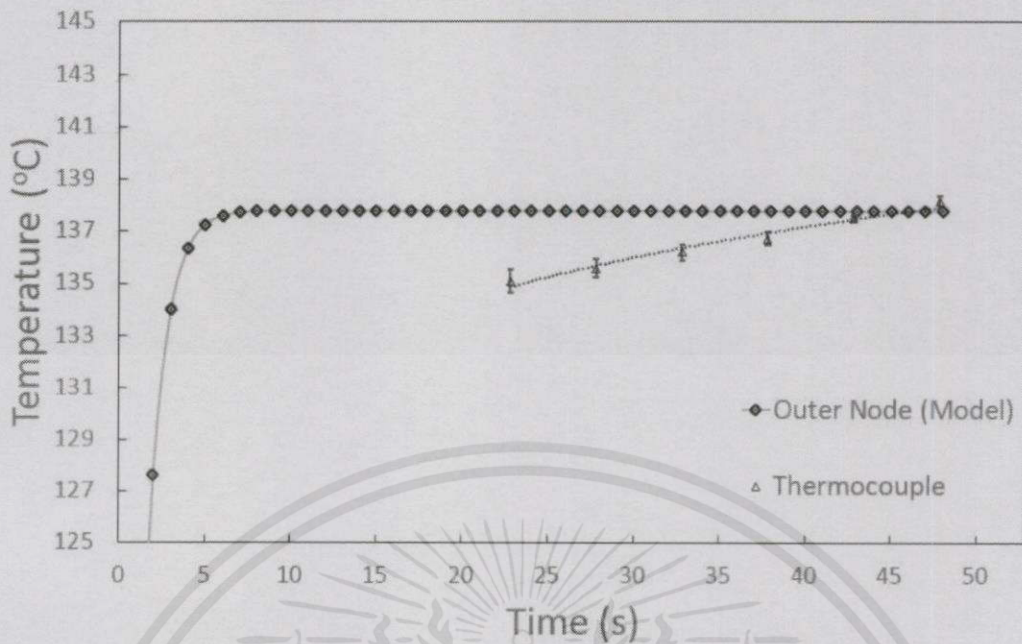
รูปที่ 4.12 แสดงการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของตัวอย่างระหว่างการอบแห้งเมื่ออุณหภูมิผิวของลูกกลิ้งมีค่าคงที่เป็น 130.6 องศาเซลเซียส ซึ่งอุณหภูมิของตัวอย่างจากแบบจำลองมีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วในช่วงแรกของการอบแห้ง จากนั้นมีค่าคงที่เป็น 129.2 องศาเซลเซียส โดยใช้เวลาในการอบแห้งทั้งหมด 48 วินาที และจากการวัดอุณหภูมิผิวด้วยเครื่องมือพบว่าอุณหภูมิของผิวตัวอย่างมีค่าเป็น 125.2 125.7 126.2 126.7 127.4 และ 128.2 องศาเซลเซียส คำนวนหาค่ารากที่สองของค่าคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยจากสมการที่ 3.7 มีค่าเท่ากับ 2.83



รูปที่ 4.12 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่ผิวของตัวอย่างระหว่างการอบแห้งเมื่ออุณหภูมิผิวลูกกลิ้งคงที่เป็น 130.6 องศาเซลเซียส

จากการอบแห้งตัวอย่างไก่ข้าวกล้องอกที่อุณหภูมิผิวลูกกลิ้งคงที่เป็น 139.4 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 48 วินาที พบว่าอุณหภูมิผิวของตัวอย่างที่ได้จากแบบจำลองมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว จากนั้นเข้าสู่สภาวะคงที่เป็น 137.8 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิผิวของตัวอย่างที่ได้จากด้วยเครื่องมือมีค่าเป็น 125.2 125.7 126.2 126.7 127.4 และ 128.2 องศาเซลเซียส จากตำแหน่งที่ 1 ถึง ตำแหน่งที่ 6 ตามลำดับ โดยแสดงความสัมพันธ์ดังรูปที่ 4.13 คำนวนหาค่ารากที่สองของค่าคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยจากสมการที่ 3.7 มีค่าเท่ากับ 1.64

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.13 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่ผิวของตัวอย่างระหว่างการอบแห้ง
เมื่ออุณหภูมิผิวลูกกลิ้งคงที่เป็น 139.4 องศาเซลเซียส

เปรียบเทียบค่าอุณหภูมิที่ผิวของตัวอย่างซึ่งได้จากการวัดด้วยเครื่องมือและจากการทำนายด้วยแบบจำลองพบว่าอุณหภูมิที่ผิวของตัวอย่างเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาของการอบแห้ง ค่าอุณหภูมิที่ได้จากการทำนายด้วยแบบจำลองมีค่าใกล้เคียงกับค่าอุณหภูมิที่ได้จากการทดลอง ซึ่งมีค่ารากที่สองของค่าคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยเป็น 3.48 2.83 และ 1.64 สำหรับการทดลองที่อุณหภูมิผิวของลูกกลิ้งคงที่เป็น 121.4 130.6 และ 139.4 องศาเซลเซียส ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าแบบจำลองคณิตศาสตร์สามารถใช้ทำนายอุณหภูมิที่ผิวของตัวอย่างในระหว่างการอบแห้งแบบลูกกลิ้งได้ดี อย่างไรก็ตามความผิดพลาดจากการทำนายอุณหภูมิด้วยแบบจำลองคณิตศาสตร์อาจเกิดจากสมมติฐานที่ได้กำหนดไว้ เช่น ความหนาของผลิตภัณฑ์ไม่มีการเปลี่ยนแปลงระหว่างการอบแห้ง สมบัติทางความร้อนมีค่าคงที่เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง และข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

ในงานวิจัยนี้เป็นการศึกษาปัจจัยของกระบวนการผลิตโจ๊กข้าวกล้องงอกกิ่งสำเร็จรูปต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์และการสร้างแบบจำลองคณิตศาสตร์สำหรับการกระจายตัวของอุณหภูมิในตัวอย่างระหว่างการอบแห้งแบบลูกกลิ้ง กระบวนการผลิตโจ๊กข้าวกล้องงอกกิ่งสำเร็จรูปประกอบด้วยขั้นตอนที่สำคัญ 3 ขั้นตอนได้แก่ 1) การเตรียมปลายข้าวกล้องงอก 2) การต้มสุกโดยใช้อัตราส่วนข้าวต่อน้ำเป็น 1:8 1:10 และ 1:12 และ 3) การอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบลูกกลิ้งที่ 120 130 และ 140 องศาเซลเซียส จนได้ความชื้นฐานเปียกสุดท้ายของตัวอย่างประมาณ 3-5 เปอร์เซ็นต์ และวิเคราะห์อิทธิพลของปัจจัยกระบวนการผลิตต่อคุณภาพของโจ๊กข้าวกล้องงอกกิ่งสำเร็จรูปและสร้างแบบจำลองความร้อนของการอบแห้งแบบลูกกลิ้ง จึงสรุปผลการทดลองได้ดังนี้

- 1) ในระหว่างการอบแห้งแบบลูกกลิ้งตัวอย่างมีความชื้นลดลงอย่างต่อเนื่อง เมื่ออบแห้งด้วยอุณหภูมิสูงส่งผลให้ระยะเวลาของการอบแห้งลดลง
- 2) สัดส่วนข้าวต่อน้ำของการต้มและอุณหภูมิของการอบแห้งแบบลูกกลิ้งมีผลต่อคุณภาพผลิตภัณฑ์โจ๊กข้าวกล้องงอกกิ่งสำเร็จรูปอย่างมีนัยสำคัญ
- 3) ค่าความขาวของตัวอย่างมีค่าลดลงเมื่อปริมาณน้ำที่ใช้ต้มและอุณหภูมิผิวลูกกลิ้งเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ
- 4) การเพิ่มปริมาณน้ำของการต้มและอุณหภูมิมอบแห้งทำให้ค่าความหนาแน่นของตัวอย่างเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ
- 5) ค่าความความหนืดของตัวอย่างมีแนวโน้มลดลงเมื่อสัดส่วนน้ำของการต้มและอุณหภูมิมอบแห้งเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ
- 6) เมื่อปริมาณน้ำที่ใช้ต้มเพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าการคืนรูปของตัวอย่างมีค่าลดลง แต่เมื่ออุณหภูมิมอบแห้งแบบลูกกลิ้งเพิ่มขึ้นทำให้ค่าการคืนรูปของตัวอย่างมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ
- 7) อัตราส่วนข้าวต่อน้ำของการต้มและอุณหภูมิของการอบแห้งส่งผลเพียงเล็กน้อยต่อค่า Pasting Property
- 8) อัตราส่วนข้าวต่อน้ำของการต้มและอุณหภูมิของการอบแห้งแบบลูกกลิ้งไม่มีผลต่อคะแนนการทดสอบทางประสาทสัมผัสอย่างมีนัยสำคัญ เมื่อพิจารณาด้านความชอบรวมพบว่าการต้มตัวอย่างด้วยสัดส่วนข้าวต่อน้ำเป็น 1:12 และอบแห้งแบบลูกกลิ้งที่ 120 องศาเซลเซียส ได้รับคะแนนสูงสุด ซึ่งมีคะแนนโดดเด่นด้านลักษณะภายนอก เนื้อสัมผัส และรสชาติ
- 9) ค่าความชื้นของตัวอย่างหลังการอบแห้งมีค่าอยู่ในช่วง 3.75 ถึง 4.85 เปอร์เซ็นต์
- 10) ค่าอเวอเตอร์แอกทีวิตีของตัวอย่างหลังการอบแห้งมีค่าอยู่ระหว่าง 0.071 ถึง 0.191

- 11) ผลผลิตพันธุ์ที่ได้มีค่าการคืนรูปสูงสุดเป็น 0.793 กรัม/กรัม ที่สภาวะอัตราส่วนข้าวต่อของการต้ม เป็น 1:8 และอบแห้งที่อุณหภูมิผิวลูกกลิ้งเป็น 140 องศาเซลเซียส
- 12) ตัวอย่างโจ๊กข้าวกล้องงอกที่เตรียมด้วยอัตราส่วนข้าวต่อน้ำเป็น 1:10 มีค่าสัมประสิทธิ์การนำ ความร้อนเท่ากับ 0.644 วัตต์/(กิโลกรัม.องศาเซลเซียส) ค่าความร้อนจำเพาะของตัวอย่างมีค่าเป็น 3.932 กิโลจูล/(กิโลกรัม.องศาเซลเซียส) และความหนาแน่นมีค่าเป็น 990.23 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร
- 13) อุณหภูมิตัวอย่างมีค่าเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาของการอบแห้งแบบลูกกลิ้ง ใช้เวลาในการอบแห้ง ทั้งหมด 48 วินาที พบว่าที่ผิวของตัวอย่างมีอุณหภูมิเป็น 118.0 128.2 และ 138.2 องศาเซลเซียส เมื่ออุณหภูมิที่ผิวลูกกลิ้งเป็น 121.4 130.6 และ 139.4 องศาเซลเซียส ตามลำดับ
- 14) เปรียบเทียบค่าอุณหภูมิที่ผิวตัวอย่างที่ได้จากแบบจำลองและที่ได้จากการวัดด้วยเครื่องมือ มีค่า รากที่สองของค่าคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยเป็น 3.48 2.83 และ 1.64 เมื่ออุณหภูมิที่ผิวลูกกลิ้งเป็น 121.4 130.6 และ 139.4 องศาเซลเซียส ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าแบบจำลองคณิตศาสตร์สามารถใช้ทำนายอุณหภูมิที่ผิวของตัวอย่างในระหว่างจากอบแห้งแบบลูกกลิ้งได้ดี

5.2 ข้อเสนอแนะ

- 1) ควรศึกษาอิทธิพลของขนาดปลายข้าวที่ใช้ต้มต่อคุณภาพของโจ๊กข้าวกล้องงอกที่สำเร็จรูป
- 2) หลังจากขั้นตอนการรอกของปลายข้าวกล้อง ไม่ควรอบแห้งก่อนนำตัวอย่างไปต้ม เพื่อลดอิทธิพล ของอุณหภูมิต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์
- 3) การใช้พลังงานรวมของกระบวนการผลิตโจ๊กข้าวกล้องงอกที่สำเร็จรูปควรมีการศึกษา
- 4) ควรศึกษาการเปลี่ยนแปลงคุณภาพ และอายุการเก็บรักษาของโจ๊กข้าวกล้องงอกที่สำเร็จรูปใน สภาวะต่าง ๆ และบรรจุภัณฑ์แต่ละประเภท
- 5) เพื่อให้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการทำนายอุณหภูมิในตัวอย่างระหว่างการอบแห้งแบบ ลูกกลิ้งมีความถูกต้องและแม่นยำเพิ่มขึ้น ควรกำหนดสมมติฐานให้สอดคล้องกับความเป็นจริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บรรณานุกรม

จรัสพรรณ ดันหยง. 2544. การพัฒนาผลิตภัณฑ์โจ๊กข้าวกล้องผสมกิ่งสำเร็จรูป. กรุงเทพฯ : มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

จิตพัฑ แยมแพ. 2541. การพัฒนาผลิตภัณฑ์ซूपไก่กิ่งสำเร็จรูปโดยกระบวนการทำแห้งแบบแชเยือกแข็ง. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร บัณฑิตวิทยาลัย, มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.

จตุ เจริญศรี เมธินี สงไทย และอาทิตยา คงไขศรี. 2555. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการถ่ายเทความร้อนระหว่างกระบวนการให้ความร้อนแบบสัมผัส. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมอาหาร, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

ดารารัตน์ นาคละอ อามัสรา แสงนาค และกุลยา ลี้มรุ่งเรืองรัตน์. 2554. การปรับปรุงคุณภาพของแป้งเมล็ดขนุนโดยวิธีการพรีเจลาทีไนซ์. วารสารวิทยาศาสตร์บูรพา. 16(1) : 12-21.

ดารุณี ปนคำ เบ็ญจรัก วายุภาพ และวราพร ลักษณะลมาย. 2552. กระบวนการผลิตข้าวกล้องอกหุงสุกเร็ว. การประชุมนำเสนอผลงานระดับบัณฑิตศึกษา, มหาวิทยาลัยรังสิต.

ณรงค์ นิยมวิทย์. 2538. องค์ประกอบของข้าวกล้อง. เอกสารประกอบการสอบวิชาัญชาติและพืชหัว. กรุงเทพฯ : มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

นฤบดี ศรีสังข สมเกียรติ ปรัชญารากร สมชาติ โสภณรณฤทธิ์ และวารุณี วารัญญานนท. 2552. การศึกษาเปรียบเทียบการอบแห้งข้าวกล้องอกด้วยฟลูอิดไซเคดแบบอากาศร้อนและไอน้ำร้อนยวดยิ่ง. การประชุมวิชาการและเสนอผลงานวิจัยพืชเขตร้อนและกิ่งร้อน ครั้งที่ 3. กรุงเทพฯ : มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.

นิธิยา รัตนาปนนท์. 2544. หลักการแปรรูปอาหารเบื้องต้น. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ : โอเดียนสโตร์.

ไพบุลย์ ธรรมรัตน์วาลิก. 2532. กรรมวิธีการแปรรูปอาหาร. กรุงเทพฯ : โอเดียนสโตร์.

มาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน. 2547. โจ๊กข้าวกล้องกิ่งสำเร็จรูป. กรุงเทพฯ : สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม.

วิไล รังสาดทอง. 2546. เทคโนโลยีแปรรูปอาหาร. กรุงเทพฯ : สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ: 290-298.

สมาคมผู้ส่งออกข้าวไทย. 2540. มาตรฐานสินค้าข้าว. กรุงเทพฯ : สำนักงานมาตรฐานสินค้า.

ลักกมน เทพหัสดิน ณ อยุธยา. 2555. การอบแห้งอาหารและวัสดุชีวภาพ. กรุงเทพฯ : ท็อป.

สายสนม ประดิษฐดวง. 2541. อาหารป้องกันโรค: ข้าวกล้องและรำข้าว. วารสารอุตสาหกรรมเกษตร. 9(2) : 38-41.

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามเป็นเหตุแห่งฟ้องเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้ สมบัติ ขอทวีวัฒนา. 2529. กรรมวิธีการอบแห้ง. กรุงเทพฯ : มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

สมโภชน์ ใหญ่เอี่ยม ช่อลัดดา เทียงพุกวัฒนา วิริวดีกร และจารุวรรณ ศิริพรรณพร. 2548. การพัฒนาผลิตภัณฑ์โจ๊กข้าวหอมมะลิสำเร็จรูป. วารสารอาหาร. 34(3).

โสธยา เกิดพิบูลย์ ธงชัย พุฒทองศิริ และ สักกมน เทพหัสดิน ณ อยุธยา. 2554. ผลของอุณหภูมิอบแห้งที่มีต่อสมบัติเชิงกายภาพและลักษณะการไหลของโจ๊กผสมฟักทองกึ่งสำเร็จรูป. วารสารวิทยาศาสตร์เกษตร. 42(2) : 445-448.

โสธยา เกิดพิบูลย์. 2555. ผลของสมบัติเชิงวิทยาการกระแสน้ำของโจ๊กข้าวฮางที่มีต่อโครงสร้างและสมบัติเชิงกายภาพของผลิตภัณฑ์อบแห้ง. รายงานวิจัย คณะอุตสาหกรรมเกษตร, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

ศรีนวล เจียรจันทร์พงษ์. 2529. อาหารและสุขภาพ. กรุงเทพฯ: รุ่งแสงการพิมพ์.

ศูนย์เครือข่ายข้อมูลอาหารครบวงจร. 2557. แอคติวิตีของน้ำ. [Online]. Available : <http://www.foodnetworksolution.com/wiki/word/0551/water-activity-แอคติวิตีของน้ำ>

ศูนย์ทางด้านข้อมูลการเกษตร. 2553. การต้มโจ๊กไม่ให้คืนตัวเร็ว. [Online]. Available : http://doityourseftg4wd.blogspot.com/2010/03/blog-post_2418.html.

อุทัยวรรณ ทองทั้งวงศ์ และสุนทรี สุวรรณสิขณน์. 2553. ผลของการทดแทนแป้งสาลีด้วยแป้งข้าวสาลีต่อคุณภาพของบัตเตอร์เค้ก. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร, มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต.

อรอนงค์ นัยวิกุล. 2550. ข้าว. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

Abdullah, E.C. and Geldart D., 1988. The Use of Bulk Density Measurements as Flow ability Indicators, Department of Chemical Engineering, University of Bradford, Bradford, West Yorkshire, United Kingdom.

Alan S.F., Leonard, A.W., Curtis, W.C., Louis, M., Andersen L.B.. 1980. Principles of Unit Operations, 2nd edition. New York, United State of America: John Wiley & Sons.

Cheevitsopon, E. and Noomhorm, A. 2011. Effects of Parboiling and Fluidized Bed Drying on The Physicochemical Properties of Germinated Brown Rice, International Journal of Food Science and Technology, 46, 2498-2504.

Guine, R.P.F. and Barroc, M.J., 2012. Effect of Drying Treatments on Texture and Color of Vegetables (Pumpkin and Green Pepper). Food and Bioproducts Processing, 90(1), 58-63

เอกสาร Helland, M.H., Wicklund, T., and Narvhus, J.A. 2002. Effect of germination time on α -amylase production and viscosity of maize porridge. Food Reserch International, 35, 315-321.

- Jittanit W., Lalitmassakul, C., Charn-Ustar, P. 2012. **Quality of Instant Congee and Energy Consumption in the Drying Process by Using Drum Dryer**, The Journal of King Mongkut's University of Technology North Bangkok, 22, No. 2.
- Karel, M. and Chirife, J. 1974. **Effect of Structure Disrupting Treatments on Volatile Release from Freezing-Dried Maltose**. Journal of Food Technology, 9, 13-20.
- Luangmalawat, P., Prachayawarakorn, S., Nathakaranakule, A., Soponronnarit, S. 2008. **Effect of Temperature on Drying Characteristics and Quality of Cooked Rice**. LWT Food Science and Technology. 41, 716-723.
- Manohar Sai, R., Devi Urmila, G.R., Bhattacharya, S., and Raoa G.V. 1998. **Wheat Porridge with Soy Protein Isolate and Skimmed Milk Powder: Rheological, Pasting and Sensory Characteristics**. Journal of Food Engineering, 103(1), 1-8.
- Matz, S.A. 1991. **The Chemistry and Technology of Cereal as Food and Feed : Rice, Structure and Composition**. Manila, Philippine : the International Rice Research Institute.
- Nalesnik, C.A., Onwulata, C.I., and Tomasula, P.M., 2007. **Drying Properties of Extruded Whey Protein Concentrates and Isolates**. Journal of Food Engineering. 80, 688-694.
- Prasert, W., and Suwannaporn, P. 2009. **Optimization of Instant Jasmine Rice Process and Its Physicochemical Properties**. Journal of Food Engineering, 95, 54-61.
- Rhim, J.W., Koh S. and Kim, J.M. 2011. **Effect of Freezing Temperature on Rehydration and Water Vapor Adsorption Characteristics of Freeze-Dried Rice Porridge**. Department of Food Engineering, National University, Korea.
- Roonprasang, K. 2008. **Thermal Analysis of Multi Cylinder Drying Section with Variant Geometry**. Doctoral Dissertation, Department of Processing Machine and Processing Technology, Faculty of Mechanical Engineering, Dresden University of Technology, Dresden, Germany.
- Singh, G.D., Sharma, R., Bawa, A.S., and Saxena, D.C. 2008. **Drying and Rehydration Characteristics of Water Chestnut (Trapanatans) as a Function of Drying Air Temperature**. Journal of Food Engineering. 87, 213-221.
- Tarhan, S., Telci, I., Tuncay, M. T. and Polatci, H. 2010. **Product quality and energy consumption when drying peppermint by rotary drum dryer**. Industrial Crops and Products, 32(3), 420-427.



ภาคผนวก ก.

ตารางแสดงข้อมูลที่ได้จากการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.1 ปริมาณความชื้นของตัวอย่างหลังการอบแห้งแบบลูกกลิ้งด้วยอุณหภูมิผิวลูกกลิ้งเป็น 121.4 องศาเซลเซียส

ครั้ง	อัตราส่วนข้าวต่อน้ำ (w/w)								
	1:8			1:10			1:12		
	น้ำหนัก ก่อนอบ (g)	น้ำหนัก หลังอบ (g)	ความชื้น (%)	น้ำหนัก ก่อนอบ (g)	น้ำหนัก หลังอบ (g)	ความชื้น (%)	น้ำหนัก ก่อนอบ (g)	น้ำหนัก หลังอบ (g)	ความชื้น (%)
1	3.2305	3.0838	4.5411	3.6175	3.454	4.5197	3.3785	3.2397	4.1083
2	3.1739	3.0297	4.5433	3.4017	3.2477	4.5271	3.3803	3.2443	4.0233
3	3.5746	3.412	4.5488	3.8529	3.6775	4.5524	3.2278	3.0974	4.0399

ตารางที่ ก.2 ปริมาณความชื้นของตัวอย่างหลังการอบแห้งแบบลูกกลิ้งด้วยอุณหภูมิผิวลูกกลิ้งเป็น 130.6 องศาเซลเซียส

ครั้ง	อัตราส่วนข้าวต่อน้ำ (w/w)								
	1:8			1:10			1:12		
	น้ำหนัก ก่อนอบ (g)	น้ำหนัก หลังอบ (g)	ความชื้น (%)	น้ำหนัก ก่อนอบ (g)	น้ำหนัก หลังอบ (g)	ความชื้น (%)	น้ำหนัก ก่อนอบ (g)	น้ำหนัก หลังอบ (g)	ความชื้น (%)
1	3.5718	3.3987	4.8463	3.5291	3.3866	4.0379	3.1463	3.0282	3.7536
2	3.4638	3.2962	4.8386	3.44	3.2996	4.0814	3.3463	3.2205	3.7594
3	3.1779	3.0235	4.8586	3.6934	3.5503	3.8745	3.457	3.3283	3.7229

ตารางที่ ก.3 ปริมาณความชื้นของตัวอย่างหลังการอบแห้งแบบลูกกลิ้งด้วยอุณหภูมิผิวลูกกลิ้งเป็น 138.2 องศาเซลเซียส

ครั้ง	อัตราส่วนข้าวต่อน้ำ (w/w)								
	1:8			1:10			1:12		
	น้ำหนัก ก่อนอบ (g)	น้ำหนัก หลังอบ (g)	ความชื้น (%)	น้ำหนัก ก่อนอบ (g)	น้ำหนัก หลังอบ (g)	ความชื้น (%)	น้ำหนัก ก่อนอบ (g)	น้ำหนัก หลังอบ (g)	ความชื้น (%)
1	4.0134	3.8508	4.0514	3.4152	3.2786	3.9998	3.6399	3.501	3.8160
2	3.9825	3.8214	4.0452	3.6132	3.4733	3.8719	3.8128	3.6684	3.7872
3	3.6922	3.5436	4.0247	3.6586	3.5137	3.9605	3.9218	3.7706	3.8554

ตารางที่ ก.4 ค่าความหนาแน่นของตัวอย่างหลังการอบแห้งแบบลูกกลิ้งด้วยอุณหภูมิผิวลูกกลิ้งเป็น 121.4 องศาเซลเซียส

ครั้ง	อัตราส่วนข้าวต่อน้ำ (w/w)								
	1:8			1:10			1:12		
	น้ำหนัก (g)	ปริมาตร (ml)	ความ หนาแน่น (kg/m ³)	น้ำหนัก (g)	ปริมาตร (ml)	ความ หนาแน่น (kg/m ³)	น้ำหนัก (g)	ปริมาตร (ml)	ความ หนาแน่น (kg/m ³)
1	24.14	135	178.815	25.65	124	206.855	26.03	122	213.361
2	23.35	130	179.615	26.63	130	204.846	25.84	120	215.333
3	23.19	128	181.172	26.33	129	204.109	26.73	124	215.565

ตารางที่ ก.5 ค่าความหนาแน่นของตัวอย่างหลังการอบแห้งแบบลูกกลิ้งด้วยอุณหภูมิผิวลูกกลิ้งเป็น 130.6 องศาเซลเซียส

ครั้ง	อัตราส่วนข้าวต่อน้ำ (w/w)								
	1:8			1:10			1:12		
	น้ำหนัก (g)	ปริมาตร (ml)	ความ หนาแน่น (kg/m ³)	น้ำหนัก (g)	ปริมาตร (ml)	ความ หนาแน่น (kg/m ³)	น้ำหนัก (g)	ปริมาตร (ml)	ความ หนาแน่น (kg/m ³)
1	23.26	120	193.833	31.76	141	225.248	28.06	121	231.901
2	24.63	128	192.422	32.11	142	226.127	27.98	120	233.167
3	23.05	120	192.083	31.62	141	224.255	27.85	121	230.165

ตารางที่ ก.6 ค่าความหนาแน่นของตัวอย่างหลังการอบแห้งแบบลูกกลิ้งด้วยอุณหภูมิผิวลูกกลิ้งเป็น 138.2 องศาเซลเซียส

ครั้ง	อัตราส่วนข้าวต่อน้ำ (w/w)								
	1:8			1:10			1:12		
	น้ำหนัก (g)	ปริมาตร (ml)	ความ หนาแน่น (kg/m ³)	น้ำหนัก (g)	ปริมาตร (ml)	ความ หนาแน่น (kg/m ³)	น้ำหนัก (g)	ปริมาตร (ml)	ความ หนาแน่น (kg/m ³)
1	25.02	122	205.082	30.06	130	231.231	30.26	129	234.574
2	24.81	122	203.361	29.33	129	227.364	30.9	131	235.878
3	24.82	123	201.789	30.17	132	228.561	30.96	132	234.545

ตารางที่ ก.7 ค่าการคืนรูปของตัวอย่างหลังการอบแห้งแบบลูกกลิ้งด้วยอุณหภูมิผิวลูกกลิ้งเป็น 121.4 องศาเซลเซียส

ครั้ง	อัตราส่วนข้าวต่อน้ำ (w/w)								
	1:8			1:10			1:12		
	น้ำหนัก ก่อน (g)	น้ำหนัก หลัง (g)	การคืน รูป	น้ำหนัก ก่อน (g)	น้ำหนัก หลัง (g)	การคืน รูป	น้ำหนัก ก่อน (g)	น้ำหนัก หลัง (g)	การคืน รูป
1	97.68	74.56	0.7633	98.62	76.08	0.7714	97.1	77.34	0.7965
2	98.42	75.23	0.7644	99.25	76.88	0.7746	97.78	77.23	0.7898
3	98.26	75.15	0.7648	97.84	76.11	0.7779	97.65	77.48	0.7934

ตารางที่ ก.8 ค่าการคืนรูปของตัวอย่างหลังการอบแห้งแบบลูกกลิ้งด้วยอุณหภูมิผิวลูกกลิ้งเป็น 130.6 องศาเซลเซียส

ครั้ง	อัตราส่วนข้าวต่อน้ำ (w/w)								
	1:8			1:10			1:12		
	น้ำหนัก ก่อน (g)	น้ำหนัก หลัง (g)	การคืน รูป	น้ำหนัก ก่อน (g)	น้ำหนัก หลัง (g)	การคืน รูป	น้ำหนัก ก่อน (g)	น้ำหนัก หลัง (g)	การคืน รูป
1	98.27	71.23	0.7248	97.88	72.08	0.7364	99.16	74.86	0.7549
2	98.11	71.45	0.7283	97.93	72.02	0.7354	99.47	74.52	0.7492
3	98.34	71.11	0.7231	98.01	72.35	0.7382	99.28	74.64	0.7518

ตารางที่ ก.9 ค่าการคืนรูปของตัวอย่างหลังการอบแห้งแบบลูกกลิ้งด้วยอุณหภูมิผิวลูกกลิ้งเป็น 138.2 องศาเซลเซียส

ครั้ง	อัตราส่วนข้าวต่อน้ำ (w/w)								
	1:8			1:10			1:12		
	น้ำหนัก ก่อน (g)	น้ำหนัก หลัง (g)	การคืน รูป	น้ำหนัก ก่อน (g)	น้ำหนัก หลัง (g)	การคืน รูป	น้ำหนัก ก่อน (g)	น้ำหนัก หลัง (g)	การคืน รูป
1	98.76	71.44	0.7234	99.69	72.51	0.7274	99.45	74.54	0.7495
2	99.28	71.31	0.7183	99.55	72.47	0.7280	99.72	73.89	0.7410
3	98.44	71.42	0.7255	99.02	72.02	0.7273	99.68	74.23	0.7447

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.10 อุณหภูมิที่ได้จากแบบจำลองเมื่ออุณหภูมิที่ผิวลูกกลิ้งเป็นเท่ากับ 121.4 องศาเซลเซียส

เวลา (s)	Node				
	1	2	3	4	5
0	80	80	80	80	121.4
1	101.9	103.1	106.5	112.4	121.4
2	113.0	113.8	115.6	118.2	121.4
3	117.4	117.9	118.8	120.0	121.4
4	119.0	119.5	120.0	120.6	121.4
5	119.7	120.0	120.5	120.9	121.4
6	120.0	120.1	120.7	121.0	121.4
7	120.0	120.3	120.7	121.1	121.4
8	120.1	120.4	120.7	121.1	121.4
9	120.1	120.4	120.7	121.1	121.4
10	120.1	120.4	120.8	121.1	121.4
11	120.1	120.4	120.8	121.1	121.4
12	120.1	120.4	120.8	121.1	121.4
13	120.1	120.4	120.8	121.1	121.4
14	120.1	120.4	120.8	121.1	121.4
15	120.1	120.4	120.8	121.1	121.4
16	120.1	120.4	120.8	121.1	121.4
17	120.1	120.4	120.8	121.1	121.4
18	120.1	120.4	120.8	121.1	121.4
19	120.1	120.4	120.8	121.1	121.4
20	120.1	120.4	120.8	121.1	121.4
21	120.1	120.4	120.8	121.1	121.4
22	120.1	120.4	120.8	121.1	121.4
23	120.1	120.4	120.8	121.1	121.4
24	120.1	120.4	120.8	121.1	121.4
25	120.1	120.4	120.8	121.1	121.4
26	120.1	120.4	120.8	121.1	121.4
27	120.1	120.4	120.8	121.1	121.4
28	120.1	120.4	120.8	121.1	121.4
29	120.1	120.4	120.8	121.1	121.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ส่วนตัวในการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ในด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆก็ตาม หากมีการเปลี่ยนแปลงและต้องขอแจ้งเจ้าของลิขสิทธิ์ทุกครั้งให้นำไปใช้

ตารางที่ ก.10 (ต่อ) อุณหภูมิที่ได้จากแบบจำลองเมื่ออุณหภูมิที่ผิวลูกกลิ้งเป็นเท่ากับ 121.4 องศาเซลเซียส

เวลา (s)	Node				
	1	2	3	4	5
30	120.1	120.4	120.8	121.1	121.4
31	120.1	120.4	120.8	121.1	121.4
32	120.1	120.4	120.8	121.1	121.4
33	120.1	120.4	120.8	121.1	121.4
34	120.1	120.4	120.8	121.1	121.4
35	120.1	120.4	120.8	121.1	121.4
36	120.1	120.4	120.8	121.1	121.4
37	120.1	120.4	120.8	121.1	121.4
38	120.1	120.4	120.8	121.1	121.4
39	120.1	120.4	120.8	121.1	121.4
40	120.1	120.4	120.8	121.1	121.4
41	120.1	120.4	120.8	121.1	121.4
42	120.1	120.4	120.8	121.1	121.4
43	120.1	120.4	120.8	121.1	121.4
44	120.1	120.4	120.8	121.1	121.4
45	120.1	120.4	120.8	121.1	121.4
46	120.1	120.4	120.8	121.1	121.4
47	120.1	120.4	120.8	121.1	121.4
48	120.1	120.4	120.8	121.1	121.4

ตารางที่ ก.11 อุณหภูมิที่ได้จากแบบจำลองเมื่ออุณหภูมิที่ผิวลูกกลิ้งเป็นเท่ากับ 130.6 องศาเซลเซียส

เวลา (s)	Node				
	1	2	3	4	5
0	80	80	80	80	130.6
1	106.9	108.3	112.5	119.7	130.6
2	120.5	121.4	123.5	126.7	130.6
3	125.9	126.5	127.5	129.0	130.6
4	127.9	128.4	129.0	129.8	130.6
5	128.7	129.1	129.6	130.0	130.6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ในบริบทอื่นด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีนำไปใช้

ตารางที่ ก.11 (ต่อ) อุณหภูมิที่ได้จากแบบจำลองเมื่ออุณหภูมิที่ผิวลูกกลิ้งเป็นเท่ากับ 130.6 องศาเซลเซียส

เวลา (s)	Node				
	1	2	3	4	5
6	129.0	129.4	129.8	130.1	130.6
7	129.1	129.5	129.8	130.2	130.6
8	129.1	129.5	129.9	130.2	130.6
9	129.2	129.5	129.9	130.2	130.6
10	129.2	129.5	129.9	130.2	130.6
11	129.2	129.5	129.9	130.2	130.6
12	129.2	129.5	129.9	130.2	130.6
13	129.2	129.5	129.9	130.2	130.6
14	129.2	129.5	129.9	130.2	130.6
15	129.2	129.5	129.9	130.2	130.6
16	129.2	129.5	129.9	130.2	130.6
17	129.2	129.5	129.9	130.2	130.6
18	129.2	129.5	129.9	130.2	130.6
19	129.2	129.5	129.9	130.2	130.6
20	129.2	129.5	129.9	130.2	130.6
21	129.2	129.5	129.9	130.2	130.6
22	129.2	129.5	129.9	130.2	130.6
23	129.2	129.5	129.9	130.2	130.6
24	129.2	129.5	129.9	130.2	130.6
25	129.2	129.5	129.9	130.2	130.6
26	129.2	129.5	129.9	130.2	130.6
27	129.2	129.5	129.9	130.2	130.6
28	129.2	129.5	129.9	130.2	130.6
29	129.2	129.5	129.9	130.2	130.6
30	129.2	129.5	129.9	130.2	130.6
31	129.2	129.5	129.9	130.2	130.6
32	129.2	129.5	129.9	130.2	130.6
33	129.2	129.5	129.9	130.2	130.6
34	129.2	129.5	129.9	130.2	130.6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.11 (ต่อ) อุณหภูมิที่ได้จากแบบจำลองเมื่ออุณหภูมิที่ผิวลูกกลิ้งเป็นเท่ากับ 130.6 องศาเซลเซียส

เวลา (s)	Node				
	1	2	3	4	5
35	129.2	129.5	129.9	130.2	130.6
36	129.2	129.5	129.9	130.2	130.6
37	129.2	129.5	129.9	130.2	130.6
38	129.2	129.5	129.9	130.2	130.6
39	129.2	129.5	129.9	130.2	130.6
40	129.2	129.5	129.9	130.2	130.6
41	129.2	129.5	129.9	130.2	130.6
42	129.2	129.5	129.9	130.2	130.6
43	129.2	129.5	129.9	130.2	130.6
44	129.2	129.5	129.9	130.2	130.6
45	129.2	129.5	129.9	130.2	130.6
46	129.2	129.5	129.9	130.2	130.6
47	129.2	129.5	129.9	130.2	130.6
48	129.2	129.5	129.9	130.2	130.6

ตารางที่ ก.12 อุณหภูมิที่ได้จากแบบจำลองเมื่ออุณหภูมิที่ผิวลูกกลิ้งเป็นเท่ากับ 138.2 องศาเซลเซียส

เวลา (s)	Node				
	1	2	3	4	5
0	80	80	80	80	139.4
1	111.7	113.3	118.2	126.6	139.4
2	127.6	128.7	131.2	134.9	139.4
3	134.0	134.6	135.8	137.5	139.4
4	136.4	136.9	137.6	138.4	139.4
5	137.3	137.7	138.2	138.8	139.4
6	137.6	138.0	138.5	138.9	139.4
7	137.7	138.1	138.6	139.0	139.4
8	137.8	138.2	138.6	139.0	139.4
9	137.8	138.2	138.6	139.0	139.4
10	137.8	138.2	138.6	139.0	139.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานในการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อที่และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีกรณีไปใช้

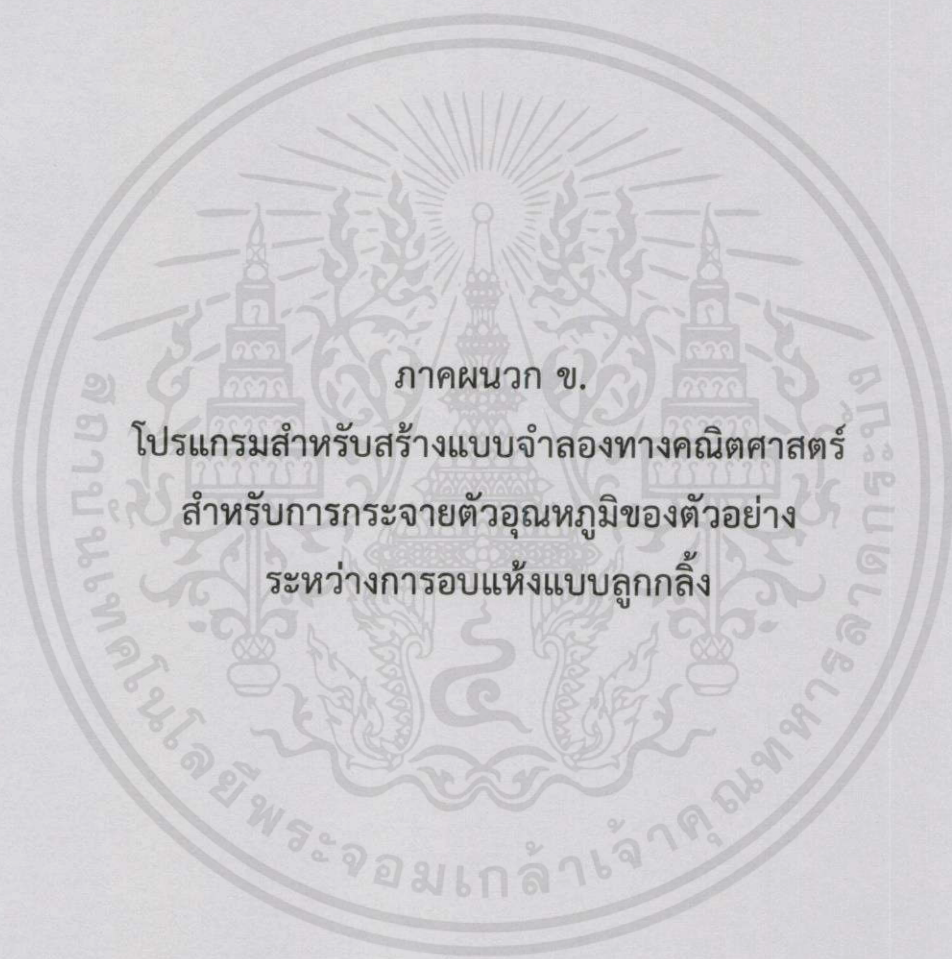
ตารางที่ ก.12 (ต่อ) อุณหภูมิที่ได้จากแบบจำลองเมื่ออุณหภูมิที่ผิวลูกกลิ้งเป็นเท่ากับ 138.2 องศาเซลเซียส

เวลา (s)	Node				
	1	2	3	4	5
11	137.8	138.2	138.6	139.0	139.4
12	137.8	138.2	138.6	139.0	139.4
13	137.8	138.2	138.6	139.0	139.4
14	137.8	138.2	138.6	139.0	139.4
15	137.8	138.2	138.6	139.0	139.4
16	137.8	138.2	138.6	139.0	139.4
17	137.8	138.2	138.6	139.0	139.4
18	137.8	138.2	138.6	139.0	139.4
19	137.8	138.2	138.6	139.0	139.4
20	137.8	138.2	138.6	139.0	139.4
21	137.8	138.2	138.6	139.0	139.4
22	137.8	138.2	138.6	139.0	139.4
23	137.8	138.2	138.6	139.0	139.4
24	137.8	138.2	138.6	139.0	139.4
25	137.8	138.2	138.6	139.0	139.4
26	137.8	138.2	138.6	139.0	139.4
27	137.8	138.2	138.6	139.0	139.4
28	137.8	138.2	138.6	139.0	139.4
29	137.8	138.2	138.6	139.0	139.4
30	137.8	138.2	138.6	139.0	139.4
31	137.8	138.2	138.6	139.0	139.4
32	137.8	138.2	138.6	139.0	139.4
33	137.8	138.2	138.6	139.0	139.4
34	137.8	138.2	138.6	139.0	139.4
35	137.8	138.2	138.6	139.0	139.4
36	137.8	138.2	138.6	139.0	139.4
37	137.8	138.2	138.6	139.0	139.4
38	137.8	138.2	138.6	139.0	139.4
39	137.8	138.2	138.6	139.0	139.4

ตารางที่ ก.12 (ต่อ) อุณหภูมิที่ได้จากแบบจำลองเมื่ออุณหภูมิที่ผิวลูกกลิ้งเป็นเท่ากับ 138.2 องศาเซลเซียส

เวลา (s)	Node				
	1	2	3	4	5
40	137.8	138.2	138.6	139.0	139.4
41	137.8	138.2	138.6	139.0	139.4
42	137.8	138.2	138.6	139.0	139.4
43	137.8	138.2	138.6	139.0	139.4
44	137.8	138.2	138.6	139.0	139.4
45	137.8	138.2	138.6	139.0	139.4
46	137.8	138.2	138.6	139.0	139.4
47	137.8	138.2	138.6	139.0	139.4
48	137.8	138.2	138.6	139.0	139.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก ข.

โปรแกรมสำหรับสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์
สำหรับการกระจายตัวอุณหภูมิของตัวอย่าง
ระหว่างการอบแห้งแบบลูกกลิ้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Code MATLAB

```

function varargout = PP1(varargin)

gui_Singleton = 1;
gui_State = struct('gui_Name',       mfilename, ...
                  'gui_Singleton',   gui_Singleton, ...
                  'gui_OpeningFcn',  @PP1_OpeningFcn, ...
                  'gui_OutputFcn',   @PP1_OutputFcn, ...
                  'gui_LayoutFcn',   [], ...
                  'gui_Callback',    []);

if nargin && ischar(varargin{1})
    gui_State.gui_Callback = str2func(varargin{1});
end

if nargout
    [varargout{1:nargout}] = gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
else
    gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
end

function PP1_OpeningFcn(hObject, eventdata, handles, varargin)
handles.output = hObject;
guidata(hObject, handles);

function varargout = PP1_OutputFcn(hObject, eventdata, handles)
varargout{1} = handles.output;

function pushbutton1_Callback(hObject, eventdata, handles)
% Constant
% -----
--
Tsurr = 35; % C
NN = 4; % Node Number
dist = 0.47; % m
width = 0.30; % m
dz = handles.input.dz/(NN*1000); % m
dt = 1; % sec
hair = 8; % W/m^2*K
Emiss = 0.9; %
Sigma = 5.67*(10^(-8)); %
k = handles.input.k; % W/m*K
Cp = handles.input.cp; % J/kg*K
rho = handles.input.rho; % kg/m^3
Mat_A = zeros(NN, NN);
% -----
CT = 1;
time = (529.4*(handles.input.hz^(-1.038)))/2;
OT = count_near_below(time);
set(handles.text33, 'String', time);
Area = dist*width; % m^2
Vol = Area*dz; % m^3
al = k/(rho*Cp); % Alpha
Fo = (al*dt)/(dz^2); % Fourier Number
velocity = (dist*100)/OT; % cm/s
dtime = -5/velocity; % sec

```

```

Op_time = [OT OT+(1*dtime) OT+(2*dtime) OT+(3*dtime) OT+(4*dtime)
OT+(5*dtime)];
% -----
% Energy Conversation
% -----
m_loss = 2; % kg
H_L = 2257; % kJ/kg
Qevp = m_loss*H_L; % kJ
qevp = Qevp/((NN-1)*OT); % kW/m^2
Evp = (2*qevp*al*dt)/(k*Vol);
% -----
% Fo Matrix (Mat_A)
% -----
for i = 1:NN
    for j = 1:NN
        if i == j
            Mat_A(i,j) = 1+(2*Fo);
        elseif i == j+1
            if j == NN-1
                Mat_A(i,j) = -2*Fo;
            else
                Mat_A(i,j) = -Fo;
            end
        elseif i == j-1
            Mat_A(i,j) = -Fo;
        end
    end
end
% -----
% Constant Matrix (Mat_B)
% -----
Mat_B = zeros(NN,1);
Mat_X = zeros(NN,1);
Mat_Ans = zeros(NN, ((OT-CT)/dt)+1);
% -----
n = 1; % Loop Count
for j = CT:dt:OT
    if j == 1
        T = zeros(NN,1);
        for i = 1:NN
            T(i,1) = handles.input.Tpi;
        end
    else
        T = Mat_X;
    end
    % -----
    qair = hair*Area*(T(NN,1)-Tsurr); % kW
    Conv = (2*qair*al*dt)/(k*Vol);
    qrad = Emiss*Sigma*Area*((T(NN,1)+273)^4)-((Tsurr+273)^4));
    Radd = (2*qrad*al*dt)/(k*Vol);
    % -----

    for i = 1:NN
        if i == 1
            Mat_B(i,1) = (Fo*handles.input.Ts)+T(i,1);
        elseif i == NN
            Mat_B(i,1) = T(i,1)-Evp-Conv-Radd;
        else
            Mat_B(i,1) = T(i,1);
        end
    end
end

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีกรนำมาใช้

```

% end
% -----

% Answer Matrix (Mat_X)
% -----
Mat_IA = Mat_A^-1;
Mat_X = Mat_IA*Mat_B;
Mat_Ans(:,n) = Mat_X;
% -----
n = n+1;

end
% -----
% Plot Matrix
% -----
Mat_Plot = zeros(NN+1,OT+1);
X_axis = zeros(1,OT+1);

for i = 1:NN+1
    for j = 1:OT+1
        if i == 1
            Mat_Plot(i,j) = handles.input.Ts;
        else
            if j == 1
                Mat_Plot(i,j) = handles.input.Tpi;
            else
                Mat_Plot(i,j) = Mat_Ans(i-1,j-1);
            end
        end
        X_axis(1,j) = j-1;
    end
end
end
% -----

i = 1;
r1 = 10.6; v = (1.25*pi)/OT; a = pi;
Count = 1;
t=timer('TimerFcn','stat=false', 'StartDelay',OT);
start(t)
stat=true;
while(stat==true)
    while i < OT+1
        axes(handles.axes2);
        cla;
        axis([0 OT+3 handles.input.Tpi-5 handles.input.Ts+5])
        set(handles.edit13, 'String',Mat_Ans(4,i));
        set(handles.edit14, 'String',Mat_Ans(3,i));
        set(handles.edit15, 'String',Mat_Ans(2,i));
        set(handles.edit16, 'String',Mat_Ans(1,i));
        set(handles.edit17, 'String',i);
        N1 = line(X_axis(1,1:i),Mat_Plot(1,1:i));
        set(N1,'Color',[0,0,0])
        N2 = line(X_axis(1,1:i),Mat_Plot(2,1:i));
        set(N2,'Color',[1,0,1])
        N3 = line(X_axis(1,1:i),Mat_Plot(3,1:i));
        set(N3,'Color',[0.2,1,1])
        N4 = line(X_axis(1,1:i),Mat_Plot(4,1:i));
        set(N4,'Color',[1,0.2,0.2]);
        N5 = line(X_axis(1,1:i),Mat_Plot(5,1:i));
        set(N5,'Color',[0.2,1,0.2])
        axes(handles.axes1);
        cla;

```

เอกสารนี้เป็นเอกสาร
 1. 2. 3. 4. 5. 6. 7. 8. 9. 10. 11. 12. 13. 14. 15. 16. 17. 18. 19. 20. 21. 22. 23. 24. 25. 26. 27. 28. 29. 30. 31. 32. 33. 34. 35. 36. 37. 38. 39. 40. 41. 42. 43. 44. 45. 46. 47. 48. 49. 50. 51. 52. 53. 54. 55. 56. 57. 58. 59. 60. 61. 62. 63. 64. 65. 66. 67. 68. 69. 70. 71. 72. 73. 74. 75. 76. 77. 78. 79. 80. 81. 82. 83. 84. 85. 86. 87. 88. 89. 90. 91. 92. 93. 94. 95. 96. 97. 98. 99. 100. 101. 102. 103. 104. 105. 106. 107. 108. 109. 110. 111. 112. 113. 114. 115. 116. 117. 118. 119. 120. 121. 122. 123. 124. 125. 126. 127. 128. 129. 130. 131. 132. 133. 134. 135. 136. 137. 138. 139. 140. 141. 142. 143. 144. 145. 146. 147. 148. 149. 150. 151. 152. 153. 154. 155. 156. 157. 158. 159. 160. 161. 162. 163. 164. 165. 166. 167. 168. 169. 170. 171. 172. 173. 174. 175. 176. 177. 178. 179. 180. 181. 182. 183. 184. 185. 186. 187. 188. 189. 190. 191. 192. 193. 194. 195. 196. 197. 198. 199. 200. 201. 202. 203. 204. 205. 206. 207. 208. 209. 210. 211. 212. 213. 214. 215. 216. 217. 218. 219. 220. 221. 222. 223. 224. 225. 226. 227. 228. 229. 230. 231. 232. 233. 234. 235. 236. 237. 238. 239. 240. 241. 242. 243. 244. 245. 246. 247. 248. 249. 250. 251. 252. 253. 254. 255. 256. 257. 258. 259. 260. 261. 262. 263. 264. 265. 266. 267. 268. 269. 270. 271. 272. 273. 274. 275. 276. 277. 278. 279. 280. 281. 282. 283. 284. 285. 286. 287. 288. 289. 290. 291. 292. 293. 294. 295. 296. 297. 298. 299. 300. 301. 302. 303. 304. 305. 306. 307. 308. 309. 310. 311. 312. 313. 314. 315. 316. 317. 318. 319. 320. 321. 322. 323. 324. 325. 326. 327. 328. 329. 330. 331. 332. 333. 334. 335. 336. 337. 338. 339. 340. 341. 342. 343. 344. 345. 346. 347. 348. 349. 350. 351. 352. 353. 354. 355. 356. 357. 358. 359. 360. 361. 362. 363. 364. 365. 366. 367. 368. 369. 370. 371. 372. 373. 374. 375. 376. 377. 378. 379. 380. 381. 382. 383. 384. 385. 386. 387. 388. 389. 390. 391. 392. 393. 394. 395. 396. 397. 398. 399. 400. 401. 402. 403. 404. 405. 406. 407. 408. 409. 410. 411. 412. 413. 414. 415. 416. 417. 418. 419. 420. 421. 422. 423. 424. 425. 426. 427. 428. 429. 430. 431. 432. 433. 434. 435. 436. 437. 438. 439. 440. 441. 442. 443. 444. 445. 446. 447. 448. 449. 450. 451. 452. 453. 454. 455. 456. 457. 458. 459. 460. 461. 462. 463. 464. 465. 466. 467. 468. 469. 470. 471. 472. 473. 474. 475. 476. 477. 478. 479. 480. 481. 482. 483. 484. 485. 486. 487. 488. 489. 490. 491. 492. 493. 494. 495. 496. 497. 498. 499. 500. 501. 502. 503. 504. 505. 506. 507. 508. 509. 510. 511. 512. 513. 514. 515. 516. 517. 518. 519. 520. 521. 522. 523. 524. 525. 526. 527. 528. 529. 530. 531. 532. 533. 534. 535. 536. 537. 538. 539. 540. 541. 542. 543. 544. 545. 546. 547. 548. 549. 550. 551. 552. 553. 554. 555. 556. 557. 558. 559. 560. 561. 562. 563. 564. 565. 566. 567. 568. 569. 570. 571. 572. 573. 574. 575. 576. 577. 578. 579. 580. 581. 582. 583. 584. 585. 586. 587. 588. 589. 590. 591. 592. 593. 594. 595. 596. 597. 598. 599. 600. 601. 602. 603. 604. 605. 606. 607. 608. 609. 610. 611. 612. 613. 614. 615. 616. 617. 618. 619. 620. 621. 622. 623. 624. 625. 626. 627. 628. 629. 630. 631. 632. 633. 634. 635. 636. 637. 638. 639. 640. 641. 642. 643. 644. 645. 646. 647. 648. 649. 650. 651. 652. 653. 654. 655. 656. 657. 658. 659. 660. 661. 662. 663. 664. 665. 666. 667. 668. 669. 670. 671. 672. 673. 674. 675. 676. 677. 678. 679. 680. 681. 682. 683. 684. 685. 686. 687. 688. 689. 690. 691. 692. 693. 694. 695. 696. 697. 698. 699. 700. 701. 702. 703. 704. 705. 706. 707. 708. 709. 710. 711. 712. 713. 714. 715. 716. 717. 718. 719. 720. 721. 722. 723. 724. 725. 726. 727. 728. 729. 730. 731. 732. 733. 734. 735. 736. 737. 738. 739. 740. 741. 742. 743. 744. 745. 746. 747. 748. 749. 750. 751. 752. 753. 754. 755. 756. 757. 758. 759. 760. 761. 762. 763. 764. 765. 766. 767. 768. 769. 770. 771. 772. 773. 774. 775. 776. 777. 778. 779. 780. 781. 782. 783. 784. 785. 786. 787. 788. 789. 790. 791. 792. 793. 794. 795. 796. 797. 798. 799. 800. 801. 802. 803. 804. 805. 806. 807. 808. 809. 810. 811. 812. 813. 814. 815. 816. 817. 818. 819. 820. 821. 822. 823. 824. 825. 826. 827. 828. 829. 830. 831. 832. 833. 834. 835. 836. 837. 838. 839. 840. 841. 842. 843. 844. 845. 846. 847. 848. 849. 850. 851. 852. 853. 854. 855. 856. 857. 858. 859. 860. 861. 862. 863. 864. 865. 866. 867. 868. 869. 870. 871. 872. 873. 874. 875. 876. 877. 878. 879. 880. 881. 882. 883. 884. 885. 886. 887. 888. 889. 890. 891. 892. 893. 894. 895. 896. 897. 898. 899. 900. 901. 902. 903. 904. 905. 906. 907. 908. 909. 910. 911. 912. 913. 914. 915. 916. 917. 918. 919. 920. 921. 922. 923. 924. 925. 926. 927. 928. 929. 930. 931. 932. 933. 934. 935. 936. 937. 938. 939. 940. 941. 942. 943. 944. 945. 946. 947. 948. 949. 950. 951. 952. 953. 954. 955. 956. 957. 958. 959. 960. 961. 962. 963. 964. 965. 966. 967. 968. 969. 970. 971. 972. 973. 974. 975. 976. 977. 978. 979. 980. 981. 982. 983. 984. 985. 986. 987. 988. 989. 990. 991. 992. 993. 994. 995. 996. 997. 998. 999. 1000.

```

Drumdry(1)

text(r1*cos(a+(i*v)),r1*sin(a+(i*v)),'x','FontSize',20,'HorizontalAli
gnment','left')
    pause(1)
    i = i+1;
end
stat=false;
end

        axes(handles.axes2);
        set(handles.text101, 'String',time);
        set(handles.text102, 'String',time+dtype);
        set(handles.text103, 'String',time+(2*dtype));
        set(handles.text104, 'String',time+(3*dtype));
        set(handles.text105, 'String',time+(4*dtype));
        set(handles.text106, 'String',time+(5*dtype));
        text(Op_time(1,6)-
1,handles.input.P26,'o','FontSize',8,'HorizontalAlignment','left')
        text(Op_time(1,5)-
1,handles.input.P25,'o','FontSize',8,'HorizontalAlignment','left')
        text(Op_time(1,4)-
1,handles.input.P24,'o','FontSize',8,'HorizontalAlignment','left')
        text(Op_time(1,3)-
1,handles.input.P23,'o','FontSize',8,'HorizontalAlignment','left')
        text(Op_time(1,2)-
1,handles.input.P22,'o','FontSize',8,'HorizontalAlignment','left')
        text(Op_time(1,1)-
1,handles.input.P21,'o','FontSize',8,'HorizontalAlignment','left')
        hleg =
legend('Node5','Node4','Node3','Node4','Node5','Location','SouthEast'
);
        set(hleg,'FontAngle','italic','TextColor',[.3,.2,.1])

function pushbutton2_Callback(hObject, eventdata, handles)

function pushbutton3_Callback(hObject, eventdata, handles)
close(handles.figure1);

function edit13_Callback(hObject, eventdata, handles)

function edit13_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function edit14_Callback(hObject, eventdata, handles)

function edit14_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function edit15_Callback(hObject, eventdata, handles)
function edit15_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');

```

เอกสารนี้ function edit15_Callback(hObject, eventdata, handles) นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ทำกรณีอื่น ๆ ขึ้นชื่ออื่น ๆ นี้จะแปลว่า... และต้องอ่านเงื่อนไขว่า... ทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
end
```

```
function edit16_Callback(hObject, eventdata, handles)
```

```
function edit16_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
```

```
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),  
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
```

```
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
```

```
end
```

```
function edit7_Callback(hObject, eventdata, handles)
```

```
value = str2double(get(hObject, 'String'));  
if isnan(value)
```

```
    set(hObject, 'String', 0);  
    errordlg('Input must be a number','Error');
```

```
end
```

```
handles.input.Tpi = value;  
guidata(hObject,handles)
```

```
function edit7_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
```

```
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),  
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
```

```
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
```

```
end
```

```
function edit8_Callback(hObject, eventdata, handles)
```

```
value = str2double(get(hObject, 'String'));  
if isnan(value)
```

```
    set(hObject, 'String', 0);  
    errordlg('Input must be a number','Error');
```

```
end
```

```
handles.input.k = value;  
guidata(hObject,handles)
```

```
function edit8_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
```

```
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),  
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
```

```
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
```

```
end
```

```
function edit9_Callback(hObject, eventdata, handles)
```

```
value = str2double(get(hObject, 'String'));  
if isnan(value)
```

```
    set(hObject, 'String', 0);  
    errordlg('Input must be a number','Error');
```

```
end
```

```
handles.input.cp = value;  
guidata(hObject,handles)
```

```
function edit9_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
```

```
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),  
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
```

```
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
```

```
end
```

```
function edit10_Callback(hObject, eventdata, handles)
```

```
value = str2double(get(hObject, 'String'));  
if isnan(value)
```

```
end
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้า ไม่นอนุญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

    set(hObject, 'String', 0);
    errordlg('Input must be a number','Error');
end
handles.input.rho = value;
guidata(hObject,handles)

```

```

function edit10_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

```

```

function edit11_Callback(hObject, eventdata, handles)
value = str2double(get(hObject, 'String'));
if isnan(value)
    set(hObject, 'String', 0);
    errordlg('Input must be a number','Error');
end
handles.input.dz = value;
guidata(hObject,handles)

```

```

function edit11_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

```

```

function edit1_Callback(hObject, eventdata, handles)

```

```

function edit1_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

```

```

function edit2_Callback(hObject, eventdata, handles)

```

```

function edit2_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

```

```

function edit3_Callback(hObject, eventdata, handles)

```

```

value = str2double(get(hObject, 'String'));
if isnan(value)
    set(hObject, 'String', 0);
    errordlg('Input must be a number','Error');
end
handles.input.hz = value;
guidata(hObject,handles)

```

```

function edit3_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)

```

```

if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

```

```

function axes1_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)

```

```

Drumdry(1)

function axes2_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)

function edit17_Callback(hObject, eventdata, handles)

function edit17_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function popupmenu1_Callback(hObject, eventdata, handles)

function popupmenu1_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end
set(hObject, 'String', {'1:8', '1:10', '1:12'});

function edit19_Callback(hObject, eventdata, handles)
value = str2double(get(hObject, 'String'));
if isnan(value)
    set(hObject, 'String', 0);
    errordlg('Input must be a number','Error');
end
handles.input.P11 = value;
guidata(hObject,handles)

function edit19_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function edit20_Callback(hObject, eventdata, handles)
value = str2double(get(hObject, 'String'));
if isnan(value)
    set(hObject, 'String', 0);
    errordlg('Input must be a number','Error');
end
handles.input.P12 = value;
guidata(hObject,handles)

function edit20_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function edit21_Callback(hObject, eventdata, handles)
value = str2double(get(hObject, 'String'));
if isnan(value)
    set(hObject, 'String', 0);
    errordlg('Input must be a number','Error');
end
handles.input.P13 = value;
guidata(hObject,handles)

```

```
function edit21_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end
```

```
function edit22_Callback(hObject, eventdata, handles)
value = str2double(get(hObject, 'String'));
if isnan(value)
    set(hObject, 'String', 0);
    errordlg('Input must be a number','Error');
end
handles.input.P14 = value;
guidata(hObject,handles)
```

```
function edit22_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end
```

```
function edit23_Callback(hObject, eventdata, handles)
value = str2double(get(hObject, 'String'));
if isnan(value)
    set(hObject, 'String', 0);
    errordlg('Input must be a number','Error');
end
handles.input.P15 = value;
guidata(hObject,handles)
```

```
function edit23_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end
```

```
function edit24_Callback(hObject, eventdata, handles)
value = str2double(get(hObject, 'String'));
if isnan(value)
    set(hObject, 'String', 0);
    errordlg('Input must be a number','Error');
end
handles.input.P16 = value;
guidata(hObject,handles)
```

```
function edit24_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end
```

```
function edit27_Callback(hObject, eventdata, handles)
value = str2double(get(hObject, 'String'));
if isnan(value)
    set(hObject, 'String', 0);
    errordlg('Input must be a number','Error');
end
handles.input.P21 = value;
guidata(hObject,handles)
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ห้ามเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
 ไม่ทำการแก้ไขโดยไม่ได้รับอนุญาต และต้องอ้างถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
function edit27_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end
```

```
function edit28_Callback(hObject, eventdata, handles)
value = str2double(get(hObject, 'String'));
if isnan(value)
    set(hObject, 'String', 0);
    errordlg('Input must be a number','Error');
end
handles.input.P22 = value;
guidata(hObject,handles)
```

```
function edit28_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end
```

```
function edit29_Callback(hObject, eventdata, handles)
value = str2double(get(hObject, 'String'));
if isnan(value)
    set(hObject, 'String', 0);
    errordlg('Input must be a number','Error');
end
handles.input.P23 = value;
guidata(hObject,handles)
```

```
function edit29_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end
```

```
function edit30_Callback(hObject, eventdata, handles)
value = str2double(get(hObject, 'String'));
if isnan(value)
    set(hObject, 'String', 0);
    errordlg('Input must be a number','Error');
end
handles.input.P24 = value;
guidata(hObject,handles)
```

```
function edit30_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end
```

```
function edit31_Callback(hObject, eventdata, handles)
value = str2double(get(hObject, 'String'));
if isnan(value)
    set(hObject, 'String', 0);
    errordlg('Input must be a number','Error');
end
handles.input.P25 = value;
guidata(hObject,handles)
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ และสงวนลิขสิทธิ์ของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
function edit31_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end
```

```
function edit32_Callback(hObject, eventdata, handles)
value = str2double(get(hObject, 'String'));
if isnan(value)
    set(hObject, 'String', 0);
    errordlg('Input must be a number','Error');
end
handles.input.P26 = value;
guidata(hObject,handles)
```

```
function edit32_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end
```

```
function edit39_Callback(hObject, eventdata, handles)
value = str2double(get(hObject, 'String'));
if isnan(value)
    set(hObject, 'String', 0);
    errordlg('Input must be a number','Error');
end
handles.input.Ts = value;
guidata(hObject,handles)
```

```
function edit39_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end
```

```
function A = count_near_below(value)
```

```
loop = 0;
check = 1;
while loop<1
    if check>value
        A = check-1;
        loop = loop+1;
    end
    check = check+1;
end
```

```
function Drumdry(value)
```

```
if value ==1
    a1 = 0:(pi/180):(2*pi);
    r1 = 10;
    x1 = r1*cos(a1);
    y1 = r1*sin(a1);
    plot(x1,y1, 'Linewidth',4, 'Color', [0,0,0]);
    hold all
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดทั้งสิ้น หากพบการละเมิดลิขสิทธิ์หรือการนำเอกสารนี้ไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาต กรุณาแจ้งให้ทางผู้จัดทำทราบ

```

a2 = pi:(pi/180):(2.25*pi);
r2 = 10.6;
x2 = r2*cos(a2);
y2 = r2*sin(a2);
plot(x2,y2,'LineWidth',2,'Color',[0,0,0]);
n = -r2:0.1:-r1;
m = (0*n);
plot(n,m,'LineWidth',2,'Color',[0,0,0]);
o = r1*cos(0.25*pi):0.1:r2*cos(0.25*pi);
plot(o,o,'LineWidth',2,'Color',[0,0,0]);

r3 = 15;
a3 = 0.28*pi;
p = r1*cos(0.25*pi):0.1:r3*cos(0.25*pi);
plot(p,p,'LineWidth',2,'Color',[0,0,0]);
m31 = ((r3*sin(a3))-(r1*sin(0.25*pi)))/((r3*cos(a3))-
(r1*cos(0.25*pi)));
x31 = r1*cos(0.25*pi):0.1:r3*cos(a3);
y31 = m31*x31+(r1*sin(0.25*pi)-(m31*(r1*cos(0.25*pi))));
plot(x31,y31,'LineWidth',2,'Color',[0,0,0]);
m32 = ((r3*sin(a3))-(r3*sin(0.25*pi)))/((r3*cos(a3))-
(r3*cos(0.25*pi)));
x32 = r3*cos(a3):0.1:r3*cos(0.25*pi);
y32 = m32*x32+(r3*sin(0.25*pi)-(m32*(r3*cos(0.25*pi))));
plot(x32,y32,'LineWidth',2,'Color',[0,0,0]);

a4 = 0:(pi/180):(2*pi);
r41 = 4.5;
x41 = r41*cos(a4);
y41 = r41*sin(a4);
plot(x41,y41,'LineWidth',1.3,'Color',[0,0,0]);
r42 = 4;
x42 = r42*cos(a4);
y42 = r42*sin(a4);
plot(x42,y42,'LineWidth',1.3,'Color',[0,0,0]);
hold all
loop = 0;
check = 1;
else errorig('Value must be 1 for drawing');
end

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้