

อิทธิพลของการอบแห้งแบบฟลูอิดิซด์เบดด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง

ต่อคุณภาพของถั่วลันเตา

EFFECTS OF SUPERHEATED STEAM FLUIDIZED BED DRYING

ON THE QUALITY OF GREEN PEAS



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมอาหาร

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2565

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อิทธิพลของการอบแห้งแบบฟลูอิดิซ์เบดด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง

ต่อคุณภาพของถั่วลันเตา

EFFECTS OF SUPERHEATED STEAM FLUIDIZED BED DRYING

ON THE QUALITY OF GREEN PEAS



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมอาหาร

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2565

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

EFFECTS OF SUPERHEATED STEAM FLUIDIZED BED DRYING
ON THE QUALITY OF PEAS



THIS THESIS IS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENTS FOR THE DEGREE OF
BACHELOR OF ENGINEERING IN FOOD ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
ACADEMIC YEAR 2022

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาานิพนธ์ ปีการศึกษา 2565

สาขาวิชาวิศวกรรมอาหาร คณะวิศวกรรมศาสตร์


สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง อิทธิพลของการอบแห้งแบบฟลูอิดไรซ์เบดด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งต่อคุณภาพของถั่วลันเตา

Effects of Superheated Steam Fluidized Bed Drying on the Quality of Green Peas

คณะผู้จัดทำ

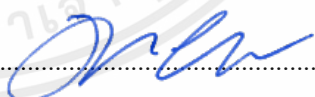
- | | | |
|------------------|--------------|-----------------------|
| 1. นางสาวชัชญา | กระต่ายเผือก | รหัสนักศึกษา 62010180 |
| 2. นางสาวพรลภัส | ประกอบธรรม | รหัสประจำตัว 62010595 |
| 3. นางสาวสุมิตรา | แน่นอุตร | รหัสประจำตัว 62010976 |



.....

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เอกพงษ์ ชีวีตโสภณ)

อาจารย์ที่ปรึกษา



.....

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เจษฎา ชัยโณม)

หัวหน้าภาควิชาวิศวกรรมอาหาร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อปริญญานิพนธ์	อิทธิพลของการอบแห้งแบบฟลูอิดไชน์เบดด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งต่อคุณภาพของถั่วลิ้นเตา	
นักศึกษา	นางสาวชัชญา	กระต่ายเผือก
	นางสาวพรลภัส	ประกอบธรรม
	นางสาวสุมิตรา	แน่นอุดร
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผศ. ดร.เอกพงษ์ ชีวีตโสภณ	
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต	
สาขาวิชา	วิศวกรรมอาหาร	
ปีการศึกษา	2565	

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาจลนพลศาสตร์ของการอบแห้งถั่วลิ้นเตาแบบฟลูอิดไชน์เบดด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง และอิทธิพลของอุณหภูมิในการอบแห้งแบบฟลูอิดไชน์เบดด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งต่อคุณภาพของถั่วลิ้นเตา การทดลองเริ่มจากการหาความเร็วที่ทำให้เกิดฟลูอิดไชน์ (U_{mf}) และความเร็วไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่เหมาะสมในการอบแห้งถั่วลิ้นเตา (U_t = 1.36U_{mf} m/s) ทำการอบแห้งตัวอย่างที่อุณหภูมิ 140, 160 และ 180 °C จนกระทั่งตัวอย่างมีความชื้นสุดท้ายน้อยกว่า 4.5 %wb เป็นเวลา 60, 17.5 และ 15 min ตามลำดับ จากนั้นวิเคราะห์คุณภาพของตัวอย่างอบแห้ง จากการทดลองพบว่า เมื่ออุณหภูมิอบแห้งเพิ่มขึ้นทำให้อัตราการอบแห้งเฉลี่ยเพิ่มขึ้นเป็น 1.16, 1.67 และ 1.76 %wb/min ตามลำดับ อุณหภูมิมีผลทำให้ค่าความสว่าง ค่าความเป็นสีแดง และค่าความเป็นสีเหลืองของถั่วลิ้นเตาแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ โดยที่อุณหภูมิ 180 °C สีของถั่วลิ้นเตามีความแตกต่างจากก่อนทำการอบแห้งน้อยที่สุด อุณหภูมิอบแห้งที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้โพรงอากาศภายในมีขนาดใหญ่เพิ่มขึ้นและส่งผลความหนาแน่นรวมลดลง ในขณะที่ความแข็งของถั่วลิ้นเตาไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ อย่างไรก็ตามพบว่าการอบแห้งแบบจำลองการอบแห้งชั้นบางของ Page สามารถอธิบายพฤติกรรมของการอบแห้งได้ดีที่สุด

คำสำคัญ: ถั่วลิ้นเตา, การอบแห้งแบบฟลูอิดไชน์เบด, ไอน้ำร้อนยวดยิ่ง

Thesis	Effects of Superheated Steam Fluidized Bed Drying on the Quality of Green Pea	
Students	Ms. Chutchaya	Krataiphueak
	Ms. Pornlapat	Prakobtham
	Ms. Sumitra	Nanudon
Thesis advisor	Asst. Prof. Dr. Ekkapong Cheevitsopon	
Degree	Bachelor of Engineering	
Program	Food Engineering	
Academic year	2022	

ABSTRACT

The main objectives of this research were to study the kinetics of superheated steam fluidized bed drying of green peas and the effects of temperature of superheated steam fluidized bed drying on quality of green peas. The fluidization velocity (U_{mf}) and suitable superheated steam velocity for green peas drying ($U_t = 1.36U_{mf}$ m/s) were determined. The samples were dried at temperatures of 140, 160, and 180 °C until the final moisture content was less than 4.5%wb for 60.0, 17.5, and 15.0 min, respectively. Then, the qualities of dried samples were analyzed. The results indicated that an average drying rate increased with drying temperature. The average drying rates were 1.16, 1.67, and 1.76 %wb/min when drying temperatures were 140, 160, and 180 °C, respectively. The most of qualities of dried sample were significantly affected by a drying temperature. In addition, the lightness, redness, and yellowness of samples dried by superheated steam at 180 °C were slightly different when compared with raw materials. The microstructure of dried samples increased with drying temperature whereas bulk density decreased. However, no significant effect of the drying temperature on the hardness was observed. Moreover, the Page model was found to be the best model for describing the drying behavior of green peas.

Key words: Green peas, Fluidized bed drying, Superheated steam

กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้อย่างสมบูรณ์ โดยได้รับความอนุเคราะห์อย่างยิ่ง จาก ผศ.ดร.เอกพงษ์ ชีวีโตโสภณ อาจารย์ที่ปรึกษา ที่ได้ให้คำแนะนำ แนวคิด ข้อเสนอแนะ ตลอดจนการ แก้ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ ด้วยความเอาใจใส่เป็นอย่างดี ตลอดปีการศึกษา จนโครงการวิจัยเล่มนี้สำเร็จ สมบูรณ์ คณะผู้จัดทำตระหนักถึงความตั้งใจจริง ความทุ่มเทของอาจารย์ และขอกราบขอบพระคุณ และจารึกพระคุณนี้ไว้ในความทรงจำว่า ความสำเร็จในครั้งนี้เกิดขึ้นได้ด้วยความกรุณาจาก ท่านอาจารย์

ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.จิราพร ศรีภิญโญวิชย์ จงยิ่งเจริญ และเจ้าหน้าที่ภาควิชาวิศวกรรม เกษตรทุก ๆ ท่าน ที่ให้ความอนุเคราะห์เครื่องมือจนทำให้ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

สุดท้ายนี้ขอแสดงความกตัญญูตเวทิตาแต่คุณอาจารย์และเจ้าหน้าที่ ที่กรุณาให้ความ ช่วยเหลือในการแก้ไข และให้คำแนะนำที่มีประโยชน์ที่มีส่วนให้งานวิจัยครั้งนี้มีคุณค่ายิ่งขึ้น

ชัชญา กระต่ายเฟือก

พรลภัส ประกอบธรรม

สุมิตรา แน่นอุดร

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VII
สารบัญภาพ.....	VIII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	3
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
1.5 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 ถั่วลิ้นเต่า.....	5
2.1.1 ลักษณะทั่วไป.....	5
2.1.2 การแบ่งกลุ่มถั่วลิ้นเต่า.....	6
2.1.3 สรรพคุณ.....	6
2.1.4 คุณค่าทางโภชนาการ.....	7
2.1.5 ผักอบกรอบ.....	7
2.2 ทฤษฎีการอบแห้ง.....	7
2.2.1 ประเภทการอบแห้ง และการเลือกใช้.....	8
2.2.2 อัตราการทำแห้ง (Drying rate)	10
2.2.3 ความชื้นสมดุล (Equilibrium moisture content).....	11
2.2.4 อัตราส่วนความชื้น (Moisture ratio).....	11
2.2.5 อัตราการอบแห้ง (Drying rate).....	11
2.3 ฟลูอิดไอเซชัน.....	12
2.3.1 ประเภทของฟลูอิดไอเซชัน.....	12
2.4 ใช้น้ำร้อนยวดยิ่ง.....	13
2.5 จลนพลศาสตร์ของการอบแห้ง.....	15

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5.1 สมการการอบแห้ง.....	15
2.6 ลักษณะทางกายภาพ.....	16
2.6.1 ปริมาณความชื้น (Moisture Content).....	16
2.6.2 ปริมาณน้ำอิสระ (Water activity, a_w).....	16
2.6.3 สี (Color).....	17
2.6.4 ความหนาแน่นรวม (Bulk density).....	18
2.6.5 ความแข็ง (Hardness).....	18
2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	19
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	23
3.1 วัสดุ และอุปกรณ์.....	23
3.2 ตัวอย่างที่ใช้ในการทดลอง.....	23
3.3 แผนการทดลอง.....	24
3.3.1 การทดลองหาความเร็วที่ทำให้เกิดฟลูอิดเซชัน.....	26
3.3.2 การทดลองหาเวลาในการอบแห้งด้วยวิธีการลดความชื้น.....	26
3.3.3 การทดลองการอบแห้งแบบฟลูอิดซ์เบดด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง.....	26
3.4 เครื่องทำแห้งแบบฟลูอิดซ์เบดด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง.....	27
3.4.1 ส่วนประกอบเครื่องทำแห้งแบบฟลูอิดซ์เบดด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง.....	27
3.4.2 หลักการทำงานของเครื่องทำแห้งแบบฟลูอิดซ์เบดด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง..	28
3.5 การวิเคราะห์ความชื้น.....	28
3.6 การวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพ.....	28
3.6.1 ปริมาณน้ำอิสระ.....	28
3.6.2 ค่าสี.....	29
3.6.3 โครงสร้างภายใน.....	29
3.6.4 ความหนาแน่นรวม.....	30
3.6.5 ความแข็ง.....	30
3.7 การวิเคราะห์ทางสถิติ.....	31
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง.....	32
4.1 การอบแห้งถั่วลิ้นเตาแบบฟลูอิดซ์เบดด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง.....	32
4.1.1 ความเร็วไอน้ำร้อนยวดยิ่งในการอบแห้งแบบฟลูอิดซ์เบด ของถั่วลิ้นเตา.....	32

4.2 การศึกษาพฤติกรรมของการลดความชื้นในถั่วลิ้นเตาฟลูอิดไธซ์เบดด้วยไอน้ำร้อน ยวดยิ่ง.....	33
4.2.1 จลนศาสตร์การอบแห้ง.....	33
4.2.2 ลักษณะการอบแห้งของถั่วลิ้นเตา.....	34
4.3 ลักษณะทางกายภาพของถั่วลิ้นเตา.....	37
4.3.1 ปริมาณน้ำอิสระ (a_w).....	37
4.3.2 การวิเคราะห์ค่าสี.....	38
4.3.3 การวิเคราะห์ลักษณะทางโครงสร้าง.....	38
4.3.4 การวิเคราะห์ความหนาแน่นรวม	40
4.3.5 การวิเคราะห์ความแข็ง.....	40
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง และข้อเสนอแนะ.....	42
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	42
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	43
บรรณานุกรม.....	44

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 คุณค่าทางโภชนาการของถั่วลิ้นเตาสด ต่อ 100 g.....	7
ตารางที่ 2.2 เครื่องอบแห้งแบบต่าง ๆ.....	9
ตารางที่ 2.3 สมการการอบแห้งชั้นบาง.....	15
ตารางที่ 4.1 ผลทางสถิติของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์การอบแห้งถั่วลิ้นเตา.....	33
ตารางที่ 4.2 เวลา, อัตราอบแห้งสูงสุด และอัตราอบแห้งเฉลี่ยของถั่วลิ้นเตา.....	35
ตารางที่ 4.3 ค่าปริมาณน้ำอิสระในแต่ละอุณหภูมิการอบแห้ง.....	38
ตารางที่ 4.4 ค่า L^* , a^* และ b^* ของถั่วลิ้นเตาในแต่ละเงื่อนไข.....	38
ตารางที่ 4.5 โครงสร้างภายในของถั่วลิ้นเตาในแต่ละเงื่อนไข.....	39
ตารางที่ 4.6 ค่าความหนาแน่นรวมของถั่วลิ้นเตาในแต่ละเงื่อนไข.....	40
ตารางที่ 4.7 ค่าความแข็งถั่วลิ้นเตาในแต่ละอุณหภูมิการอบแห้ง.....	41



สารบัญรูป

รูป	หน้า
รูปที่ 2.1 ถั่วลิ้นเตา.....	5
รูปที่ 2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการทำแห้ง และความชื้นของวัสดุ.....	10
รูปที่ 2.3 พฤติกรรมการเกิดฟลูอิดไอเซชัน.....	13
รูปที่ 2.4 ช่วงคลื่นที่ตามองเห็น.....	17
รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการดำเนินการทดลอง.....	25
รูปที่ 3.2 เครื่องทำแห้งแบบฟลูอิดไคซ์เบดด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง.....	27
รูปที่ 3.3 เครื่องวัดปริมาณน้ำอิสระ.....	29
รูปที่ 3.4 เครื่องวัดสี Hunter Lab.....	29
รูปที่ 3.5 กล้องจุลทรรศน์สเตอริโอ	30
รูปที่ 3.6 การทดสอบ Compression ด้วย Texture Analyzer.....	30
รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันตกคร่อมกับความถี่ของอินเวอร์เตอร์.....	32
รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นที่ได้จากการทดลองกับการทำนาย.....	34
รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นฐานเปียก และเวลาอบแห้งของถั่วลิ้นเตา.....	36
รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้น และเวลาอบแห้งของถั่วลิ้นเตา.....	36
รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการอบแห้ง และความชื้นฐานเปียกของถั่วลิ้นเตา.....	37

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มา และความสำคัญ

ถั่วลันเตาเป็นพืชตระกูลถั่ว มีชื่อวิทยาศาสตร์ว่า *Pisum sativum* L. มีชื่อสามัญเรียก เช่น Pea, Sweet pea, Sugar pea, Garden pea, Green pea เป็นต้น จัดเป็นพืชล้มลุกที่สามารถนำมาบริโภคได้หลายส่วนทั้งยอดอ่อน ฝักอ่อน และเมล็ดทั้งเมล็ดสดและเมล็ดแห้ง (เริงชัย ชุ่มภิรมย์, 2532) พืชชนิดนี้มีถิ่นกำเนิดในแถบเอเชียกลางและเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ และเริ่มมีการเพาะปลูกในแถบเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ในระยะเวลาต่อมา (Tindall, 1983) ในประเทศไทยสามารถปลูกถั่วลันเตาได้ทั่วประเทศ โดยภาคเหนือมีการปลูกมากที่จังหวัดลำปาง นครสวรรค์ เชียงใหม่ เชียงราย เพชรบูรณ์ และตาก โดยเฉพาะที่จังหวัดเพชรบูรณ์สามารถปลูกได้ตลอดปี ทางภาคตะวันออกเฉียงเหนือปลูกมากที่จังหวัดนครราชสีมา ภาคกลางปลูกมากที่จังหวัดสระบุรี นครปฐม และกาญจนบุรี ซึ่งสามารถปลูกพันธุ์พื้นเมืองได้ดี ภาคใต้ปลูกมากที่จังหวัดสุราษฎร์ธานี และภาคตะวันออกปลูกมากที่จังหวัดปราจีนบุรี (กองบรรณาธิการฐานเกษตรกรรม, 2541)

ถั่วลันเตาเป็นผักที่มีคุณค่าทางอาหารสูง เนื่องจากถั่วลันเตามีโปรตีนสูงมาก นอกจากนี้ ถั่วลันเตายังมีธาตุแคลเซียม ฟอสฟอรัส โยอาหาร พร้อมคาร์โบไฮเดรต และวิตามิน โปรตีนที่ได้จากผักเป็นโปรตีนที่ปราศจากไขมันมีประโยชน์ต่อสุขภาพ ผักที่มีสีเขียวเข้มมีเบต้าแคโรทีนที่ต้านมะเร็ง และโรคขาดเลือดได้ โดยทั่วไปเมล็ดมีโปรตีนประมาณ 20-30 % ของน้ำหนักแห้งและประมาณ 5 % ของน้ำหนักสด (มูลนิธิโตโยต้าแห่งประเทศไทย, 2540) นอกจากนี้ยังอุดมไปด้วยสารต้านอนุมูลอิสระ ซึ่งช่วยป้องกันไม่ให้เซลล์ถูกทำลาย อันเป็นสาเหตุของโรคร้ายต่าง ๆ รวมทั้งช่วยชะลอการเกิดริ้วรอยก่อนวัยอีกด้วย อีกทั้งช่วยลดน้ำหนัก ลดคอเลสเตอรอล แก้ท้องผูก บำรุงหัวใจ ควบคุมระดับน้ำตาลในเลือด บำรุงสายตา บำรุงกระดูก และอุดมไปด้วยธาตุเหล็ก แต่เนื่องจากถั่วลันเตาเป็นพืชที่มีอายุสั้น และเสื่อมคุณภาพเร็วจึงมีการนำถั่วลันเตาไปแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ เพื่อทำการยืดอายุของถั่วลันเตา ไม่ว่าจะเป็นขนมถั่วลันเตาอบกรอบ ถั่วลันเตากระป๋อง หรือผงโปรตีนถั่วลันเตา เป็นต้น (เริงชัย ชุ่มภิรมย์, 2532)

การอบแห้ง เป็นการลดความชื้นในผลิตภัณฑ์ ส่วนใหญ่การอบแห้งมักใช้ลมร้อนเป็นตัวกลางในการทำให้น้ำระเหยและเอาความชื้นออกไป ซึ่งการอบแห้งมีวัตถุประสงค์เพื่อการเก็บรักษาและถนอมผลิตภัณฑ์ โดยการลดปริมาณความชื้นจนถึงระดับที่สามารถป้องกันการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ได้ (รุ่งนภา พงศ์สวัสดิ์มานิต, 2536) หลักการในการอบแห้งมีหลายวิธีด้วยกัน ได้แก่ เทคนิค

ฟลูอิดเบตต์ไมโครเวฟ (Kassem, R.S. et.al., 2011) การอบแห้งสุญญากาศ (Orikasa and Tagawa, 2007) เป็นต้น

เทคนิคฟลูอิดเบตต์เป็นเทคนิคที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมการอบแห้งผลิตภัณฑ์ที่มีลักษณะเป็นเม็ดหรือชิ้นที่มีขนาดไม่ใหญ่หรือเล็กเกินไป ต้องมีขนาดใกล้เคียงกัน ไม่เกาะกันง่ายเกินไป และต้องไม่เปราะหรือแตกหักได้ง่าย หลักการทำงาน คือ จะทำให้วัตถุที่อยู่ในเบตต์มีพฤติกรรมคล้ายของไหล โดยใช้ของไหลสร้างแรงยกตัวให้กับวัตถุ ทำให้วัตถุในเบตต์ลอยตัวได้อย่างเป็นอิสระไม่เกาะติดกัน ทำให้พื้นที่ผิววัตถุจะสัมผัสกับของไหลได้อย่างเต็มที่ และเทคนิคนี้มีข้อได้เปรียบกว่าการอบแห้งแบบอื่น คือ การถ่ายเทความร้อนระหว่างผลิตภัณฑ์เป็นไปได้อย่างรวดเร็ว เพราะผิวสัมผัสระหว่างผลิตภัณฑ์และของไหลมีมากกว่าทำให้ใช้เวลาในการอบแห้งน้อยลง (สมชาติ โสภณธนฤทธิ์, 2540)

จุดเด่นที่สำคัญของการอบแห้งแบบฟลูอิดเบตต์ด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง คือ ไม่มีออกซิเจนเข้ามาเกี่ยวข้องกับกระบวนการอบแห้ง เนื่องจากอากาศที่อยู่ภายในห้องอบแห้งถูกแทนที่ด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง ส่งผลให้ไม่เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันที่ไม่ต้องการได้ นอกจากนี้ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการอบแห้งโดยใช้ไอน้ำร้อนยวดยิ่งมักมีความพรุน (Porosity) สูงกว่าผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการอบแห้งโดยใช้อากาศร้อน เนื่องจากการเดือดของน้ำในวัฏศระหว่างกระบวนการอบแห้งทำให้เกิดการขยายปริมาตรของน้ำเป็นจำนวนมาก ส่งผลให้ไอน้ำดันโครงสร้างภายในของวัสดุให้ขยายตัวออกไป เกิดเป็นรูพรุนจำนวนมากทำให้ค่าความพรุนสูงขึ้น ลักษณะเช่นนี้ทำให้วัสดุสามารถคืนตัวได้อย่างรวดเร็ว จากงานวิจัยของ Prachayawarakorn, S. et.al. (2006) ได้ศึกษากระบวนการอบแห้งของถั่วเหลืองโดยใช้เครื่องฟลูอิดเบตต์ด้วยอากาศร้อนและไอน้ำร้อนยวดยิ่ง พบว่าอัตราการยับยั้งการทำงานของเอนไซม์ในถั่วเหลืองของการอบแห้งแบบฟลูอิดเบตต์ด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งเร็วกว่าแบบอากาศร้อน และจากงานวิจัยของ Rordprapat, W. et.al. (2005) อิทธิพลของตัวกลางการอบแห้งโดยใช้ฟลูอิดเบตต์ด้วยอากาศร้อนและไอน้ำร้อนยวดยิ่งต่อจลนพลศาสตร์ของการอบแห้งและคุณภาพของข้าวกล้องงอก การอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งส่งผลให้ปริมาณการแตกหักของเมล็ดข้าวต่ำกว่าการอบแห้งด้วยอากาศร้อน ตัวกลางอากาศร้อนและไอน้ำร้อนยวดยิ่งในการอบแห้งและอุณหภูมิอบแห้งไม่ส่งผลต่อปริมาณสารกาบาและเนื้อสัมผัสของข้าวกล้องงอกหุงสุก หลังการอบแห้งด้วยลมร้อนและไอน้ำร้อนยวดยิ่งสามารถลดปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ในผลิตภัณฑ์อบแห้งได้

ดังนั้น ผู้วิจัยจึงได้ศึกษาจลนพลศาสตร์ของการอบแห้งถั่วลิ้นเตาแบบฟลูอิดเบตต์ด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง และศึกษาอิทธิพลจากอุณหภูมิในการอบแห้งถั่วลิ้นเตาแบบฟลูอิดเบตต์ด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง เพื่อนำไปแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ถั่วลิ้นเตาอบกรอบเพื่อสุขภาพ

1.2 วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาจลนพลศาสตร์ของการอบแห้งถั่วลิสงเตาแบบฟลูอิดไคซ์เบตด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง
2. เพื่อศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิในการอบแห้งแบบฟลูอิดไคซ์เบตด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งต่อคุณภาพของถั่วลิสงเตา

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1. ตัวอย่างที่ใช้ คือ ถั่วลิสงเตา
2. การเปรียบเทียบสมบัติทางกายภาพถั่วลิสงเตาภายใต้การอบแห้งแบบฟลูอิดไคซ์เบตด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งอุณหภูมิ 140, 160 และ 180 °C ได้แก่ ปริมาณน้ำอิสระ, สี, ลักษณะทางโครงสร้าง, ความหนาแน่นรวม และความแข็ง
3. อบแห้งเพื่อทำเป็นผลิตภัณฑ์ขนมถั่วลิสงเตาอบกรอบมีความชื้นตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์ถั่วอบกรอบปรุงรส (มอก.1089-2535)

1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

1. ความเร็วไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่เหมาะสมในการอบแห้งถั่วลิสงเตาแบบฟลูอิดไคซ์เบตด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง
2. เวลาในการทำแห้งแบบฟลูอิดไคซ์เบตด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งของถั่วลิสงเตาอบกรอบภายใต้สภาวะอุณหภูมิ 140, 160 และ 180 °C
3. สมบัติทางกายภาพถั่วลิสงเตาอบกรอบที่ได้จากการอบแห้งแบบฟลูอิดไคซ์เบตด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งภายใต้สภาวะอุณหภูมิ 140, 160 และ 180 °C

1.5 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย

1. ศึกษากระบวนการอบแห้งถั่วลิสงเตาแบบฟลูอิดไคซ์เบตด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งและอุณหภูมิต่อสมบัติทางกายภาพ
2. ศึกษาหลักการการทำงานของเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไคซ์เบตด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง
3. ทดลองหาความเร็วของไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่ทำให้เกิดฟลูอิดไคซ์ชัน (U_{mf}) และความเร็วไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่เหมาะสมในการอบแห้งถั่วลิสงเตา (U_T)

4. ทดลองหาเวลาในการอบแห้ง ที่ทำให้ผลิตภัณฑ์ถั่วลันเตาอบกรอบมีปริมาณความชื้นน้อยกว่า 4.5 %wb ภายใต้สภาวะอุณหภูมิ 140, 160 และ 180 °C

5. วิเคราะห์สมการจลนพลศาสตร์ของการอบแห้ง ภายใต้สภาวะอุณหภูมิ 140, 160 และ 180 °C เพื่อนำมาวิเคราะห์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ที่อธิบายพฤติกรรมการอบแห้งแบบฟลูอิดซ์เบดด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งของถั่วลันเตาได้ดีที่สุด

6. การวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพถั่วลันเตา ที่ได้จากการอบแห้งแบบฟลูอิดซ์เบดด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งภายใต้สภาวะอุณหภูมิ 140, 160 และ 180 °C ได้แก่ ปริมาณน้ำอิสระ, สี, ลักษณะทางโครงสร้าง, ความหนาแน่นรวม และค่าความแข็ง



บทที่ 2

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 ถั่วลันเตา

ถั่วลันเตา ดังรูปที่ 2.1 เป็นพืชตระกูลถั่ว มีชื่อสามัญหลายชื่อ เช่น Pea, Sweet pea, Sugar pea, Garden pea และ Green pea เป็นต้น ในทางตอนใต้ของสหรัฐอเมริกา ถั่วลันเตา หมายถึง ถั่วอังกฤษ (English pea) ทางภาคเหนือของประเทศไทยเรียกว่าถั่วน้อย ถั่วลันเตาจัดอยู่ในตระกูล Fabaceae (Leguminosae) มีชื่อทางวิทยาศาสตร์ว่า *Pisum sativum* L. (นิพนธ์ ไชยมงคล, 2554)

ถั่วลันเตาเป็นพืชที่ปลูกกันอย่างกว้างขวางในเขตร้อนและเขตกึ่งร้อน เช่น ในประเทศอินเดีย พม่า เอธิโอเปีย ประเทศรอบ ๆ ทะเลสาบวิกตอเรีย ในแอฟริกาตะวันออก ได้แก่ ประเทศคองโก โมร็อกโก ในอเมริกาใต้ ได้แก่ โคลัมเบีย เอกวาดอร์ และเปรู ในประเทศไทยสามารถปลูกถั่วลันเตาได้ทุกภาค โดยภาคเหนือมีปลูกมากที่สุดที่ลำปาง นครสวรรค์ เชียงใหม่ เชียงราย ตาก โดยเฉพาะเพชรบูรณ์นั้นปลูกได้ตลอดปี ทางภาคตะวันออกเฉียงเหนือปลูกมากที่สุดที่นครราชสีมา ภาคกลางปลูกมากที่สุดที่สระบุรี นครปฐมและกาญจนบุรี ซึ่งปลูกพันธุ์พื้นเมืองได้ดี ภาคใต้ปลูกมากที่สุดที่สุราษฎร์ธานี และภาคตะวันออกมีมากที่สุดที่ปราจีนบุรี



รูปที่ 2.1 ถั่วลันเตา

2.1.1 ลักษณะทั่วไป

ถั่วลันเตา ในขณะที่ยังสดดอกอาหารสำรองอยู่ใต้ดิน ใบเลี้ยงอยู่เหนือดิน เป็นพืชฤดูเดียว มีใบแบบสลับ ปลายใบเปลี่ยนเป็นมือเกาะ การเจริญเติบโตแบบพุ่มหรือขึ้นค้ำ บางสายพันธุ์อาจมีเฉพาะใบ บางสายพันธุ์อาจมีเฉพาะมือเกาะ ใบมีสีเขียวอ่อนจนถึงเขียวเข้ม ลำต้นเล็กมีลักษณะเป็นเหลี่ยม รากเป็นระบบรากแก้วอาจเจริญลึก 80 cm ประกอบด้วยรากแขนง ดอกเป็นแบบสมบูรณ์เพศ ผสมตัวเอง ปกติจะผสมเกสรก่อนที่กลีบดอกบานเต็มที่ กลีบดอกมีสีขาว ชมพู หรือม่วง สายพันธุ์ที่เก็บเกี่ยวเร็ว ดอกเจริญในข้อที่ 5 หรือ 6 สายพันธุ์ที่เก็บเกี่ยวช้าดอกเจริญในข้อ 15 หรือ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิพนธ์ให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สูงกว่า สายพันธุ์เก็บเกี่ยวเร็วอาจติดฝัก 1-2 ฝักต่อข้อ สายพันธุ์เก็บเกี่ยวช้าติดฝักมากกว่า 2 ฝักต่อข้อ ขนาดฝัก เมล็ดและจำนวนเมล็ดต่อฝักขึ้นอยู่กับสายพันธุ์ เมล็ดที่มีผิวเรียบ พัฒนาและสะสมแป้งอย่างรวดเร็ว ประกอบด้วยน้ำตาลในปริมาณที่ต่ำกว่าเมล็ดที่มีผิวขรุขระ

ถั่วลันเตา เป็นพืชผักที่มีเถาเลื้อย สูงได้ถึง 2 m เป็นพืชที่ชอบอากาศเย็น จึงปลูกได้ดีในช่วงฤดูหนาว ถั่วลันเตาสามารถขึ้นได้ในดินแทบทุกชนิด โดยเฉพาะดินร่วนปนเหนียว ควรเป็นดินที่ค่อนข้างมีความเป็นกรดเล็กน้อย ผลเป็นฝักแบบถั่ว แต่ละฝักจะมีเมล็ด 3-10 เมล็ด ขยายพันธุ์โดยการเพาะเมล็ด อายุการเก็บเกี่ยวแต่ละพันธุ์ไม่เหมือนกัน โดยทั่วไปจะเก็บเกี่ยวหลังการปลูก 60-90 day (กรมส่งเสริมการเกษตร, 2555)

2.1.2 การแบ่งกลุ่มถั่วลันเตา

1) Oriental edible pod pea หรือ Chinese pod pea หรือ Snow pea หรือ Sugar pea (*Pisum sativum* var. *saccharatum*) ฝักแบน เก็บเกี่ยวฝักและเมล็ดอ่อน เพื่อประกอบอาหาร

2) Snap pea หรือ Sugar snap pea (*Pisum sativum* var. *macrocarpon*) พันธุ์ที่ถูกพัฒนาพันธุ์ใหม่ ฝักกลมยาว มีเส้นใยต่ำ บริโภคฝักและเมล็ดอ่อน มีการเจริญแบบพุ่มและแบบขึ้นค้ำ การผลิตเพื่อการแปรรูปจะใช้สายพันธุ์พุ่ม เนื่องจากสามารถใช้เครื่องจักรเก็บเกี่ยวได้

สายพันธุ์ที่มีเส้นใยต่ำเก็บรักษาได้ 2-3 day มีรายงานว่า การเก็บรักษาสายพันธุ์ที่มีเส้นใยต่ำในอุณหภูมิต่ำกว่า 21 °C เมล็ดจะพัฒนาทำให้ฝักบวม และสร้างเส้นใยนอกจากนี้สายพันธุ์ดังกล่าวจะมีความแข็งแรงต่ำ พืชมีทรงพุ่มเล็ก และผลผลิตต่ำกว่าสายพันธุ์ปกติ

3) Green pea หรือ Field pea หรือ Shelling pea ถั่วลันเตาชนิดบริโภคเมล็ด ใช้เมล็ดแก่ประกอบอาหารหรือแปรรูป ฝักมีลักษณะคล้ายกับ Snap pea แต่มีปริมาณเส้นใยสูง ฝักหนา แข็ง และมีรสขม เมล็ดขนาดใหญ่ มีการเจริญแบบพุ่ม และแบบขึ้นค้ำ

4) ถั่วลันเตายอด (โตเขียว/Top Green Pea) สายพันธุ์ที่มีลำต้นใหญ่ ใซ้ยอดและหน่ออ่อนประกอบอาหาร

2.1.3 สรรพคุณ

ถั่วลันเตาเป็นถั่วที่มีไขมันต่ำ ดังตารางที่ 2.1 ทั้งยังอยู่ในรูปไขมันไม่อิ่มตัวซึ่งเมื่อรับประทานแล้วส่งผลดีต่อสุขภาพของผู้บริโภค และที่สำคัญถั่วลันเตาเป็นถั่วที่ไม่มีกลูเตนและมีโปรตีนสูง นอกจากนี้ถั่วลันเตายังเป็นอาหารที่เหมาะสมกับผู้ป่วยโรคความดันโลหิตสูง เนื่องจากมีโซเดียมเพียง 5% ของปริมาณสูงสุดที่สามารถบริโภคได้ต่อวัน ซึ่งถือว่าน้อยมาก ดังนั้นผู้ที่มีความดันโลหิตสูงจึงสามารถรับประทานได้ ทั้งยังมีเบต้าแคโรทีนที่ต้านมะเร็งและโรคขาดเลือด อุดมไปด้วยวิตามินบี 12 และสารเลซิทิน (Lecithin) ที่จำเป็นต่อการทำงานของระบบประสาทมาก ซึ่งช่วยป้องกันอาการขี้หลงขี้ลืมอีกด้วย (นิพนธ์ ไชยมงคล, 2554)

2.1.4 คุณค่าทางโภชนาการ

ตารางที่ 2.1 คุณค่าทางโภชนาการของถั่วลิ้นเตาสด ต่อ 100 g

องค์ประกอบ	ปริมาณ	หน่วย
พลังงาน	81	kCal
คาร์โบไฮเดรต	14.45	g
น้ำตาล	5.67	g
เส้นใย	5.10	g
ไขมัน	0.40	g
โปรตีน	5.42	g
วิตามินเอ	38	μg
เบต้าแคโรทีน	449	μg
ลูทีนและซีแซนทีน	2,477	μg
วิตามินบี 6	0.17	mg
วิตามินซี	40	mg
ธาตุแมกนีเซียม	33	mg
ธาตุฟอสฟอรัส	1.47	mg
ธาตุโซเดียม	5	mg

ที่มา : กรมส่งเสริมการเกษตร (2555)

2.1.5 ผักอบกรอบ

ผักอบกรอบ คือ ผักที่ถูกแปรรูปด้วยการนำไปผ่านกระบวนการการอบแห้งด้วยความร้อนหรืออบแห้งแบบแช่แข็งสุญญากาศเพื่อให้ผักกรอบอร่อยและสามารถเก็บได้นานขึ้น (นริศร ลักษณะานุกรักษ์, 2564) การอบทั้ง 2 แบบจะแตกต่างจากการทอดให้กรอบแบบปกติหรือทอดสุญญากาศ ที่แม้จะมีน้ำมันเหลืออยู่น้อยแต่ก็ยังเป็นการใช้น้ำมันเป็นการทำให้สุกและแห้งส่งผลต่อสุขภาพมากกว่าการอบ

2.2 ทฤษฎีการอบแห้ง (สมชาติ โสภณธณฤทธิ์, 2540)

การอบแห้ง (Drying) คือ กระบวนการที่ให้ความร้อนกับวัสดุที่มีความชื้น เพื่อระเหยน้ำออกไปจนกลายเป็นผลิตภัณฑ์ของแข็ง วัสดุที่พึ่งกระบวนการอบแห้งนั้น มีตั้งแต่จำพวกที่มีรูปร่างและสัดส่วนชัดเจน อย่างเช่น วัสดุไม้ ไปจนถึงวัสดุอื่น ๆ เช่น วัสดุที่มีสภาพเป็นเม็ดผง, โคลน, แป้งเปียก หรือมีสภาพเป็นของเหลว เป็นต้น กระบวนการอบแห้งนี้เป็นตัวอย่างที่เด่นชัดของ

ปรากฏการณ์การถ่ายเทมวล และความร้อนในเวลาเดียวกัน โดยมีการเปลี่ยนแปลงเฟส เพราะระเหย น้ำออกไปโดยการให้ความร้อน

การอบแห้ง หรือการกำจัดน้ำ คือการใช้ความร้อนเพื่อกำจัดน้ำที่อยู่ในวัสดุ โดยการระเหยน้ำ หรือการระเหิดจากของแข็ง โดยอาศัยหลักการถ่ายเทความร้อนตรงจุดที่มีความแตกต่างของอุณหภูมิ ระหว่างจุดสองจุด หรืออาศัยหลักการอบแห้ง โดยการลดความชื้นในระบบการถ่ายเทความร้อนมี 3 แบบ คือ การพาความร้อน การนำความร้อน และการแผ่รังสี

2.2.1 ประเภทการอบแห้ง และการเลือกใช้

ขั้นตอนในการเลือกใช้ตู้อบแห้ง ต้องเลือกจากลักษณะของวัตถุดิบที่จะนำมาอบที่มีความหลากหลาย ในการเลือกตู้อบจะยึดตามลักษณะความชื้นของวัตถุดิบเป็นหลัก หลังจากนั้นจึงพิจารณาถึงปริมาณการผลิต, รูปแบบของกระบวนการ (ต่อเนื่อง หรือ Batch) รวมทั้งคุณลักษณะของกระบวนการ และคุณลักษณะของตู้อบ เพื่อกำหนดเงื่อนไขการเดินเครื่อง โดยพิจารณาจากขนาดกำลังการผลิตของตู้อบ เลือกอุปกรณ์ประกอบต่าง ๆ รวมทั้งเครื่องป้อนถ่ายวัตถุดิบออกจากตู้อบ แล้วคำนวณค่าเครื่องจักร และค่าใช้จ่ายในการเดินเครื่อง เมื่อออกแบบพื้นฐานได้เป็นรูปธรรมแล้ว ยังต้องทำการทดสอบอบภายใต้เงื่อนไขที่ใกล้เคียงที่สุดกับเงื่อนไขการอบที่คาดการณ์เอาไว้อีกด้วย ในการทดสอบจะทำการตรวจสอบคุณลักษณะการอบ, คุณภาพของผลิตภัณฑ์, พฤติกรรมของวัตถุดิบภายในเครื่องอบ ฯลฯ ผลจากการทดสอบอาจทำให้ต้องย้อนกลับไปพิจารณาเลือกชนิดของตู้อบใหม่ ดังนั้น การทดสอบจะเป็นสิ่งที่สำคัญมาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งกรณีที่ไม่สามารถคาดการณ์เกี่ยวกับคุณลักษณะของวัตถุดิบได้ (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2547)

การอบแห้งจะถูกแบ่งออกเป็น 3 ประเภทตามวิธีการรับความร้อน คือ วิธีรับความร้อนด้วยลมร้อน วิธีรับความร้อนด้วยการนำความร้อน และวิธีให้ความร้อนอื่น ๆ

1) วิธีรับความร้อนด้วยลมร้อน ได้แก่ ตู้อบแบบแฟลช (Flash dryer), ตู้อบแบบสเปรย์ (Spray dryer), ตู้อบแบบ Fluidized bed dryer, ตู้อบแบบสายพาน (Band dryer) แบบต่อเนื่อง, ตู้อบ Nozzle jet dryer, ตู้อบแบบถาด (Tray dryer), ตู้อบ Drying tumbler และตู้อบแบบอุโมงค์ (Tunnel dryer)

2) วิธีรับความร้อนด้วยการนำความร้อน ได้แก่ ตู้อบแบบ Bezel stirring dryer เครื่องอบ Freeze dryer, เครื่องอบภายใต้สุญญากาศ (Vacuum dryer) และเครื่องอบแบบถังหมุน Drum dryer

3) วิธีให้ความร้อนอื่น ๆ ได้แก่ เครื่องอบอินฟราเรด เครื่องอบไมโครเวฟ เป็นต้น

การแบ่งประเภท จะแบ่งประเภทตู้อบเอาไว้ตามวิธีการรับความร้อน และสภาพของวัตถุดิบภายในตู้อบ ดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 เครื่องอบแห้งแบบต่าง ๆ

สภาพของ วัตถุดิบ	เครื่องอบ	การเดินทางเครื่อง	กระแส ของลมร้อน	กำลัง ผลิต	วัตถุดิบที่เหมาะสม ดีมาก	ดี	
รับความร้อนด้วยลมร้อน	ปลิวไปกับ ลมร้อน	Flash dryer	ต่อเนื่อง	กระเจิง	สูง	2, 3	
		Spray dryer	ต่อเนื่อง	กระเจิง	สูง	1, 2	
		Drying tumble, Through- flow drying tumbler	ต่อเนื่อง	ขนานไหลผ่าน กระเจิง	สูง	3, 4, 5	
	กวน	Bezel stirring dryer	ต่อเนื่อง	ไหลผ่าน (ขนาน)	สูง	3	
		Fluidized bed dryer	batch หรือต่อเนื่อง	กระเจิง	สูง	3	
		Multistage disk dryer	ต่อเนื่อง	ขนาน	สูง	3	
	วางนิ่ง	Tray dryer	batch	ขนาน	ต่ำ	7	2, 4
		Tunnel dryer	ต่อเนื่อง	ไหลผ่าน	สูง	2, 5, 6	3, 4, 7
		Nozzel jet dryer	ต่อเนื่อง	ขนาน	สูง	2, 7, 8	4, 5, 9
	เคลื่อนที่	Nozzel jet dryer	ต่อเนื่อง	กระแสวิก	สูง	8, 9	
รับความร้อนด้วยการนำความร้อน	เคลื่อนที่	Band dryer	ต่อเนื่อง	ไหลผ่าน	สูง	2, 5, 6	3, 4, 7
		Turbo dryer	ต่อเนื่อง	ไหลผ่าน	สูง	3	
		Vertical dryer	ต่อเนื่อง	ไหลผ่าน	สูง	3, 4	
		Bezel disk stirring dryer (ความดันปกติ สูญญากาศ)	batch หรือต่อเนื่อง		ต่ำ	2, 3	
	กวน	Steam heated tube bundle drying tumbler	ต่อเนื่อง		สูง	3, 4, 5	
	วางนิ่ง	Vacuum, Freeze tray dryer	batch		ต่ำ	10	2, 3
	เคลื่อนที่	Drum dryer	ต่อเนื่อง		ต่ำ	1, 2	
		Multi-disk dryer	ต่อเนื่อง		สูง	8	
	อื่น ๆ	เครื่องอบอินฟราเรด	batch หรือต่อเนื่อง		ต่ำ, สูง	9	8
		เครื่องอบไมโครเวฟ	batch หรือต่อเนื่อง		ต่ำ, สูง		7

เมื่อ 1. ของเหลวหรือ Slurry 2. แป้งนม 3. เป็นผง 4. เป็นก้อน 5. เป็นเกล็ด 6. เส้นใยสั้น ๆ

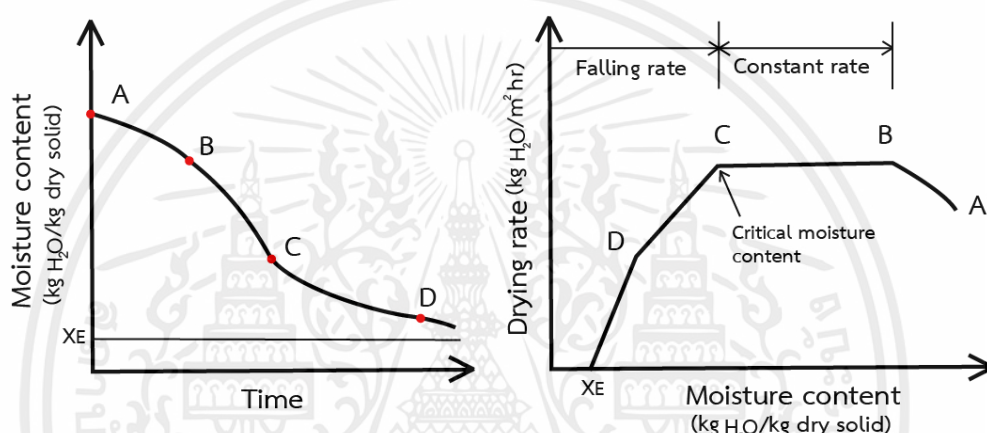
7. วัตถุดิบห่อ 8. แผ่นบางต่อเนื่อง 9. ผิวที่ทาเคลือบไว้ 10. วัตถุดิบแช่แข็ง

ที่มา : กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน (2547)

2.2.2 อัตราการทำแห้ง (Drying rate)

อัตราการทำแห้ง คือ อัตราการระเหยน้ำออกจากวัสดุต่อพื้นที่ที่เกิดการระเหยต่อหน่วยเวลา ระหว่างการทำแห้ง อัตราการทำแห้งของอาหารขึ้นอยู่กับสภาพธรรมชาติของอาหารเริ่มต้นก่อนการทำแห้ง และสภาวะแวดล้อมระหว่างการทำแห้ง เช่น ชนิดของเครื่องทำแห้ง, อุณหภูมิ, เวลา, ความชื้นสัมพัทธ์ และสัมประสิทธิ์การพาความร้อน เป็นต้น

กราฟอัตราการทำแห้ง เป็นกราฟที่แสดงถึงการเปลี่ยนแปลงของปริมาณความชื้นในวัสดุ เทียบกับระยะเวลาที่ใช้ในการทำแห้ง โดยปกติอัตราการทำแห้งของวัสดุจะไม่คงที่ แต่จะเปลี่ยนแปลงไปตามระยะเวลา ดังรูปที่ 2.2 สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ช่วง คือ



รูปที่ 2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการทำแห้ง และความชื้นของวัสดุ (นิธิยา รัตนาปนนท์, 2544)

1) ช่วงการปรับสภาวะเบื้องต้น (Initial adjustment period - AB) เป็นช่วงเริ่มต้นของการอบแห้ง ความชื้นเริ่มต้นจึงมีค่าสูง ในช่วงนี้จะเกิดการถ่ายเทความร้อนระหว่างตัวกลางลมร้อนกับอาหาร ทำให้อุณหภูมิพื้นผิวของอาหารสูงขึ้นจนมีค่าใกล้เคียงกับอุณหภูมิสมดุล ที่เงื่อนไขกำหนดในการอบแห้งเพื่อให้ เกิดการถ่ายเทมวลของน้ำไปยังอากาศ อัตราการทำแห้งค่อย ๆ เพิ่มขึ้น จนถึงช่วงอัตราทำแห้งคงที่ (Constant rate)

2) ช่วงอัตราการอบแห้งคงที่ (Constant rate period - BC) เป็นช่วงที่น้ำภายในอาหารเคลื่อนที่ มาที่ผิวหน้าและระเหยออกไปด้วยพลังงานความร้อนอย่างต่อเนื่อง เป็นช่วงที่ความชื้นเฉลี่ยของอาหารลดลง เป็นสัดส่วนกับเวลาในการอบแห้งจนถึงความชื้นวิกฤต (Critical moisture content) อัตราการทำแห้งจะเริ่มลดลง

3) ช่วงอัตราการอบแห้งลดลง (Falling rate period CD และ DE) เป็นช่วงที่ความชื้นในอาหารเหลือน้อยจนแพร่ไปยังผิวหน้าของอาหารอย่างไม่ต่อเนื่อง ทำให้อุณหภูมิที่ผิวของอาหารสูงขึ้นเรื่อย ๆ จนผิวหน้าของอาหารเริ่มแห้ง อัตราการอบแห้งและความชื้นจะลดลงเรื่อย ๆ จนถึงค่าความชื้นสมดุล (Equilibrium moisture content, XE) ซึ่งเป็นความชื้นที่ต่ำสุดภายใต้สภาวะที่ใช้

อยู่ในขณะนั้นที่ ความชื้นนี้ อัตราการทำแห้งเป็นศูนย์ น้ำในอาหารไม่สามารถ ระเหยออกมาได้อีก (สมชาติ โสภณธนฤทธิ์, 2540)

2.2.3 ความชื้นสมดุล (Equilibrium moisture content)

เป็นปริมาณความชื้นของวัสดุที่อยู่ในสภาวะสมดุลกับสิ่งแวดล้อมภายนอก วัสดุจะไม่มี การดูด และคายความชื้นจากอากาศรอบ ๆ มีค่าความชื้นคงที่ สภาวะสมดุลจะขึ้นอยู่กับธรรมชาติของวัสดุ อุณหภูมิ และความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ ถ้าต้องการให้ความชื้นลดลงจากนี้ต้องเปลี่ยนสภาวะ การอบ เช่น อุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ หรือเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของวัสดุ เช่น ลดขนาด

2.2.4 อัตราส่วนความชื้น (Moisture ratio)

ปริมาณน้ำที่เหลืออยู่ในวัสดุที่กำลังอบแห้งเทียบกับปริมาณน้ำทั้งหมดที่มีอยู่ในวัสดุที่สามารถ ระเหยได้ภายใต้สภาวะการอบแห้งหนึ่ง ๆ แต่การอบแห้งวัสดุที่สภาวะสูญญากาศ น้ำจะเดือดที่ อุณหภูมิต่ำ ให้ความชื้นสมดุลของวัสดุมีค่าใกล้เคียงร้อยละศูนย์ ($M_{eq} \approx 0$) ซึ่งมีค่าน้อยกว่า ความชื้นเริ่มต้น และความชื้นที่เวลาใด ๆ ค่อนข้างมาก โดยสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (1)

$$MR = \frac{M - M_{eq}}{M_0 - M_{eq}} \times 100 \quad (1)$$

เมื่อ	MR	คือ อัตราส่วนความชื้น
	M	คือ ความชื้นที่เวลาใด ๆ (%wb)
	M_0	คือ ความชื้นเริ่มต้น (%wb)
	M_{eq}	คือ ความชื้นที่สมดุล (%wb)

2.2.5 อัตราการอบแห้ง (Drying rate)

อัตราการระเหยน้ำออกจากวัสดุต่อพื้นที่ที่เกิดการระเหยต่อหน่วยเวลาระหว่างการทำแห้ง โดยสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2)

$$DR = \frac{M_{t-dt} - M_t}{d_t} \quad (2)$$

เมื่อ	DR	คือ อัตราทำแห้ง (%wb/min)
	M_{t-dt}	คือ ความชื้นที่เวลาก่อนหน้า (%wb)
	M_t	คือ ความชื้นที่เวลาใด (%wb)
	d_t	คือ ผลต่างเวลาอบแห้ง (min)

2.3 ฟลูอิดเซชัน (สมศักดิ์ ดำรงค์เลิศ, 2528)

คำว่า ฟลูอิดเซชัน เป็นคำที่ใช้อธิบายกระบวนการที่ของแข็ง ซึ่งมีลักษณะรูปร่างเป็นเม็ดหรือชิ้น สัมผัสกับของไหลแล้วเม็ดของแข็งเหล่านี้จะมีคุณสมบัติคล้ายของไหล ทั้งนี้เม็ดหรือชิ้นของแข็ง ตอนเริ่มแรกถูกวางอยู่ในตะแกรงในหอตลอดที่มีรูปร่างเป็นทรงกระบอก ในปัจจุบันมีการดัดแปลงให้อยู่ในแนวนอน ของไหลที่ใช้อาจเป็นแก๊ส หรือของเหลวปล่อยให้ผ่านมาทางด้านล่างของตะแกรงที่รองรับเม็ดของแข็ง ของไหลจะไหลผ่านชั้นเม็ดของแข็งแล้วไหลออกทางส่วนบนของหอตลอด เมื่อเพิ่มความเร็วของไหลให้มากขึ้นเรื่อย ๆ จนเม็ดของแข็งขยับตัว และลอยตัวเป็นอิสระ ไม่เกาะติดกัน ของแข็งที่อยู่ในลักษณะนี้จะมีคุณสมบัติคล้ายของไหล คือมีการไหลหมุนเวียนของเม็ดของแข็งภายในเบตหรือภายในหอตลอด จึงเรียกของแข็งในลักษณะนี้ว่า ฟลูอิดเซชัน

2.3.1 ประเภทของฟลูอิดเซชัน

1) ฟลูอิดเซชันสองสถานะ (Two - phases Fluidization) หมายความว่า ในหอตลอดหรือเบตที่ใช้งานจะประกอบด้วยของสองสถานะ คือของแข็งกับของไหล ของไหลนี้อาจจะเป็นแก๊สหรือของเหลวก็ได้ ดังนั้น ฟลูอิดเซชันสองสถานะจึงแบ่งออกได้เป็นอีก 2 ประเภทคือ แก๊สฟลูอิดเซชัน และฟลูอิดเซชันของเหลว

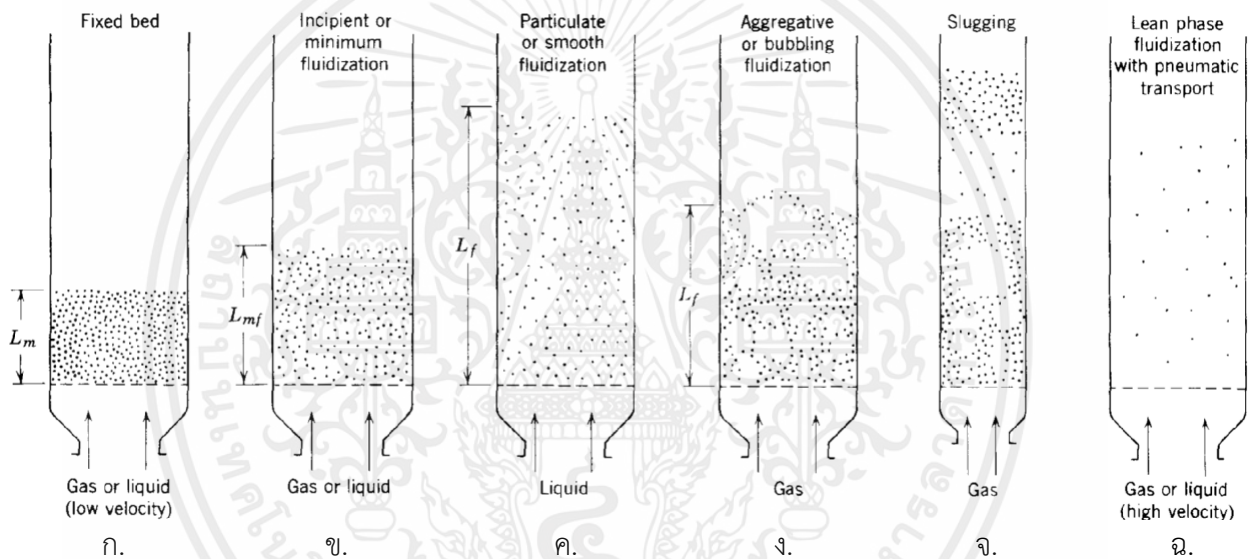
2) ฟลูอิดเซชันสามสถานะ (Three - phases Fluidization) หมายความว่า ภายในหอตลอดหรือเบตจะประกอบไปด้วยของสามสถานะอยู่ด้วยกัน คือ ของแข็ง ของเหลว และแก๊ส

2.3.2 ลักษณะของฟลูอิดเบต

เบต (Bed) หมายถึง อาณาเขตในหอตลอดที่มีปริมาณเม็ดของแข็งบรรจุอยู่ไม่ว่าเม็ดของแข็งนั้นจะอยู่นิ่งหรือเคลื่อนไหวด้วยของไหลในหอตลอด จะมีระดับตั้งแต่แผ่นโลหะทำเป็นตะแกรงรองรับหรือเป็นตัวกระจายของไหล (Distributor) จนถึงระดับสูงสุด คือผิวหน้าของเม็ดของแข็งที่อยู่ในหอตลอด

เมื่อบรรจุเม็ดของแข็งในหอตลอดเรียบร้อยแล้ว เริ่มปล่อยของไหลเข้าทางด้านล่างของหอตลอดอย่างช้าๆ ขณะที่ของไหลความเร็วยังน้อยอยู่ เม็ดของแข็งจะไม่ขยับตัวเลย ลักษณะของเบตเช่นนี้เรียกว่า เบตนิ่ง (Fixed bed) เมื่อค่อย ๆ เพิ่มความเร็วของของไหลให้มากขึ้นทีละน้อยจนถึงความเร็วระดับหนึ่ง เม็ดของแข็งจะเริ่มขยับตัว และยังจัดตัวอย่างเป็นระเบียบ เมื่อความเร็วของของไหลเพิ่มขึ้นอีกเล็กน้อย เม็ดของแข็งจะหลุดออกจากกันลอยตัวเป็นอิสระ ลักษณะนี้เรียกว่า จุดเริ่มฟลูอิดเซชัน หลังจากจุดนี้ไปแล้วความเร็วของของไหลที่เพิ่มขึ้นจะไปทำให้เบตขยายตัวขึ้นตามความเร็วของของไหล เม็ดของแข็งยังอยู่ชิดกันมาก และยังจับกันเป็นกลุ่มก้อน เบตลักษณะนี้เรียกว่า ฟลูอิดเบตแบบหนาแน่น (Dense - phase fluidized bed) ถ้าความเร็วของไหลมากขึ้นอีกของไหลก็เกือบจะพาเอาเม็ดของแข็งออกไปจากหอตลอดอยู่แล้ว เบตลักษณะนี้เรียกว่า ฟลูอิดเบตเจือจาง (Diluted - phase fluidized bed) หลังจากนั้นเมื่อเพิ่มความเร็วของของไหลอีกเล็กน้อยเม็ดของแข็งก็หลุดลอยออกจากหอตลอดไป

ฟลูอิดเบดที่ของไหลเป็นของเหลว การขยายตัวของเบดเป็นไปอย่างสม่ำเสมอ การลอยตัวและหมุนรอบตัวเองของเม็ดของแข็งเป็นไปอย่างช้า ๆ เรียกเบดนี้ว่า เบดสม่ำเสมอ หรือเบดที่เป็นเนื้อเดียวกัน ดังรูป 2.3 ค. ฟลูอิดเบดที่ของไหลเป็นแก๊ส ลักษณะของเบดจะแตกต่างจากที่ใช้ของเหลวมาก เพราะว่าเมื่อความเร็วของแก๊สสูงกว่าความเร็วที่จะทำให้เกิดฟลูอิดเบดแล้ว แก๊สส่วนหนึ่งยังทำหน้าที่ให้เกิดการลอยตัวของเม็ดของแข็งเหมือนเดิมแต่มีอีกส่วนหนึ่งรวมตัวกันแล้วก่อตัวเป็นฟองแก๊สเกิดขึ้น ฟองแก๊สก็จะแทรกตัวเองขึ้นมาถึงบนผิวหน้าของเบดและแตกตัวเองในที่สุดขณะที่ฟองแก๊สลอยขึ้นมาจะทำให้เม็ดของแข็งไหลจากส่วนหลังคาของฟองแก๊สลงมายังส่วนล่าง พร้อมกันนั้นยังมีบางส่วนของเม็ดของแข็งลอยติดตามฟองแก๊สขึ้นไปด้วย ภายในเบดจะเห็นว่าการเคลื่อนที่ของเม็ดของแข็งเป็นไปอย่างซุกมุ่นวุ่นวาย เรียกว่าฟลูอิดเบดวุ่นวาย ดังรูป 2.3 ง.



รูปที่ 2.3 พฤติกรรมการเกิดฟลูอิดเซชัน (Kunii and Levenspiel 1991)

2.4 ใช้น้ำร้อนยวดยิ่ง (สั๊กมน เทพหัสติน ณ อยุรยา, 2555)

หลักสำคัญของการอบแห้งโดยใช้น้ำร้อนยวดยิ่งคือ การใช้น้ำร้อนยวดยิ่งเป็นตัวกลางในการให้ความร้อนกับวัสดุ และพาความชื้นที่ระเหยจากวัสดุออกไปจากห้องอบแห้ง โดยหลักการแล้วสามารถดัดแปลงเครื่องอบแห้งแบบให้ความร้อนโดยตรงทุกประเภทให้สามารถทำการอบแห้งโดยใช้น้ำร้อนยวดยิ่งได้ แม้ว่าบางกรณีอาจมีความซับซ้อนและยุ่งยากอยู่บ้าง เนื่องจากเครื่องอบแห้งนี้ต้องเป็นระบบปิด เพื่อไม่ให้เกิดการรั่วไหลของไอน้ำออกจากเครื่องอบแห้งจนทำให้เกิดอันตรายแก่ผู้ปฏิบัติงานงานหรือมีผลกระทบต่อสมรรถนะของเครื่องอบแห้ง

จุดเด่นที่สำคัญของการอบแห้งโดยใช้น้ำร้อนยวดยิ่งคือความสามารถในการนำพลังงานส่วนใหญ่ที่ป้อนให้กับเครื่องอบแห้งกลับมาใช้ใหม่ได้ ซึ่งช่วยในการประหยัดพลังงานที่ต้องใช้ในกระบวนการอบแห้งได้มาก และการที่ไม่มีออกซิเจนเข้ามาเกี่ยวข้องในกระบวนการอบแห้ง เนื่องจากเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อากาศที่อยู่ภายในห้องอบแห้งจะถูกแทนที่ด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งส่งผลให้ไม่เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันที่ไม่ต้องการได้ นอกจากนี้การใช้ไอน้ำร้อนยวดยิ่งเป็นตัวกลางในการอบแห้งยังทำให้เกิดกระบวนการอื่น ๆ พร้อมไปกับกระบวนการอบแห้ง เช่น การลวก (Prachayawarakorn, S. et.al., 2002) การทำข้าวหนึ่ง (Parboiling) (Soponronnarit, S. et.al., 2006) หรือการพองตัว (Lyota, H. et.al., 2001) ผลผลิตที่ได้จากการอบแห้งโดยใช้ไอน้ำร้อนยวดยิ่งมักมีความพรุน (Porosity) สูงกว่าผลผลิตที่ได้จากการอบแห้งโดยใช้อากาศร้อน เนื่องจากการเดือดของน้ำในวัสดุระหว่างกระบวนการอบแห้งทำให้เกิดการขยายปริมาตรของน้ำเป็นจำนวนมาก ส่งผลให้ไอน้ำดันโครงสร้างภายในของวัสดุให้ขยายตัวออกไป เกิดเป็นรูพรุนจำนวนมากทำให้ค่าความพรุนสูงขึ้น ลักษณะนี้ทำให้วัสดุสามารถคืนตัวได้อย่างรวดเร็ว

การอบแห้งวัสดุด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งจะแตกต่างกับการอบแห้งด้วยอากาศร้อน คือ ในช่วงแรกของการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งจะเกิดการควบแน่นของไอน้ำที่ผิวของวัสดุแล้วจึงเริ่มเข้าสู่ช่วงการอบแห้ง ดังนั้นการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งแบ่งออกได้เป็น 3 ช่วง ดังนี้

1) ช่วงเกิดการควบแน่นของไอน้ำที่ผิวของวัสดุ (Condensation rate period)

เนื่องจากอุณหภูมิของวัสดุต่ำกว่าอุณหภูมิของตัวกลาง เมื่อไอน้ำร้อนยวดยิ่งสัมผัสกับเม็ดวัสดุจะเกิดการควบแน่นของไอน้ำขึ้นในช่วงแรกของการอบแห้ง ความร้อนแฝงของไอน้ำที่เกิดจากการควบแน่นจะช่วยให้อุณหภูมิของวัสดุสูงถึงจุดเดือดของน้ำได้อย่างรวดเร็ว เมื่อเทียบกับการอบแห้งด้วยอากาศร้อน ช่วงแรกที่เกิดการควบแน่นของไอน้ำที่ผิวของวัสดุนั้น อุณหภูมิที่ผิวของวัสดุจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ส่วนอุณหภูมิภายในเนื้อวัสดุจะค่อย ๆ เพิ่มขึ้น และความชื้นที่ผิวของวัสดุจะเพิ่มขึ้นอย่างมาก ส่วนความชื้นภายในเนื้อวัสดุบริเวณที่ใกล้ผิวจะมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องมาจากไอน้ำที่เกิดจากการควบแน่นบางส่วนแพร่เข้าไปภายในเนื้อวัสดุ เมื่อน้ำที่ควบแน่นบริเวณผิววัสดุมีอุณหภูมิสูงถึงอุณหภูมิอิ่มตัวของไอน้ำจึงเกิดการระเหยขึ้น ทำให้ความชื้นที่ผิวของวัสดุลดลง และเมื่อเวลาในการอบแห้งมากขึ้น ความชื้นที่ผิวของวัสดุจะลดลงต่ำกว่าความชื้นเริ่มต้นของวัสดุ แต่ความชื้นภายในเนื้อวัสดุบริเวณที่ใกล้กับผิวอาจจะยังสูงกว่าความชื้นเริ่มต้นแต่จะค่อย ๆ ลดลงจนต่ำกว่าความชื้นเริ่มต้นเมื่อเวลาเพิ่มมากขึ้น โดยปริมาณไอน้ำที่ควบแน่นจะขึ้นอยู่กับความชื้นในวัสดุ อุณหภูมิไอน้ำร้อนยวดยิ่ง และค่า Thermal diffusivity ของวัสดุ

2) ช่วงอัตราการอบแห้งคงที่ (Constant rate drying period)

เป็นช่วงที่วัสดุมีความชื้นสูงอยู่ และบริเวณผิววัสดุเต็มไปด้วยน้ำอิสระ ดังนั้นจึงมีการถ่ายเทมวลและความร้อนเกิดขึ้นเฉพาะที่ผิวของวัสดุเท่านั้น โดยความร้อนส่วนใหญ่ที่วัสดุได้รับจะถูกใช้ไปในการระเหยน้ำอิสระบริเวณผิววัสดุ ซึ่งอุณหภูมิของวัสดุจะคงที่ที่อุณหภูมิจุดเดือดของน้ำในวัสดุ ส่งผลให้อัตราการถ่ายเทความร้อนและอัตราการอบแห้งคงที่ด้วย แต่การอบแห้งวัสดุด้วยไอน้ำ

ร้อนยวดยิ่งจะมีกระบวนการถ่ายเทมวลที่แตกต่างไปจากการอบแห้งด้วยอากาศร้อน เนื่องจากโดยรอบวัสดุเต็มไปด้วยไอน้ำ ดังนั้นการถ่ายเทความชื้นที่ผิวด้านนอกจึงไม่ได้เกิดจากการแพร่ (Diffusion mass transfer) แต่เกิดจากการพาของไอน้ำร้อนยวดยิ่งโดยมีความดันที่แตกต่างเป็นแรงขับเคลื่อนและความร้อนที่ถ่ายเทโดยการพาจากไอน้ำร้อนยวดยิ่งมาที่ผิวของวัสดุจะเท่ากับเอนทัลปีที่ใช้ในการระเหยน้ำที่ผิวของเมล็ดวัสดุ

3) ช่วงอัตราการอบแห้งลดลง (Falling rate drying period)

ช่วงอัตราการอบแห้งลดลงของการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งจะเหมือนกับการอบแห้งด้วยอากาศร้อนคือ ช่วงนี้ความชื้นของวัสดุมีค่าต่ำกว่าความชื้นวิกฤต (Critical moisture content) ที่ความชื้นนี้อัตราการอบแห้งจะลดลง

2.5 จลนพลศาสตร์ของการอบแห้ง

2.5.1 สมการอบแห้งชั้นบาง

การวิเคราะห์สมการอบแห้งชั้นบางทำได้โดยการนำอัตราส่วนความชื้นที่เวลาใด ๆ จากการทดลองมาเปรียบเทียบกับสมการสมการอบแห้งกึ่งทฤษฎี (Semi-Theoretical Drying Equation) รูปแบบสมการพื้นฐานที่ใช้ทำนายการอบแห้งชั้นบางมีรายละเอียดดังแสดงในตารางที่ 2.3 ซึ่งการวิเคราะห์ความถดถอยแบบไม่เชิงเส้น (Nonlinear regression) ดัชนีบ่งชี้ความสามารถในการทำนายของสมการ คือ ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Coefficient of Determination, R^2) โดยเลือกสมการที่มีค่า R^2 มากที่สุด

ตารางที่ 2.3 สมการการอบแห้งชั้นบาง

No.	ชื่อสมการ	รูปแบบสมการ
1	Newton	$MR = \exp(-kt)$
2	Page	$MR = \exp(-kt^n)$
3	Henderson and Pabis	$MR = a \exp(-kt)$
4	Logarithmic	$MR = a \exp(-kt) + c$

ที่มา : Prakobsang, J. et.al. (2021)

2.6 ลักษณะทางกายภาพ

2.6.1 ปริมาณความชื้น (Moisture Content) (สมชาติ โสภณธนฤทธิ์, 2540)

ความชื้น คือตัวบอกปริมาณน้ำที่มีอยู่ในอาหารหรือวัสดุเมื่อเทียบกับมวลของวัสดุขึ้น หรือแห้ง ซึ่งปริมาณความชื้นของอาหารสามารถแสดงได้เป็นเปอร์เซ็นต์มี 2 รูปแบบ คือ

(1) ความชื้นฐานเปียก (Wet basis)

เป็นค่าที่นิยมใช้ในทางการค้า สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (3)

$$MC(\%wb) = \frac{(W_w - W_d)}{W_w} \times 100 \quad (3)$$

เมื่อ MC คือ เปอร์เซ็นต์ความชื้นฐานเปียก (%wb)

W_w คือ มวลวัสดุเริ่มต้น (g)

W_d คือ มวลวัสดุที่แห้ง (g)

(2) ความชื้นฐานแห้ง (Dry basis)

เป็นค่าที่นิยมใช้กันในการวิเคราะห์กระบวนการอบแห้งเพราะช่วยให้คำนวณได้สะดวก เนื่องจากน้ำหนักแห้งของอาหารคงที่ อาจบอกเป็นจำนวนกรัมของน้ำต่อจำนวนกรัมของของแข็ง ($g_{\text{water}}/g_{\text{solid}}$) หรือเปอร์เซ็นต์ สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (4)

$$MC(\%db) = \frac{(W_w - W_d)}{W_d} \times 100 \quad (4)$$

เมื่อ MC คือ เปอร์เซ็นต์ความชื้นฐานแห้ง (%db)

W_w คือ มวลวัสดุเริ่มต้น (g)

W_d คือ มวลวัสดุที่แห้ง (g)

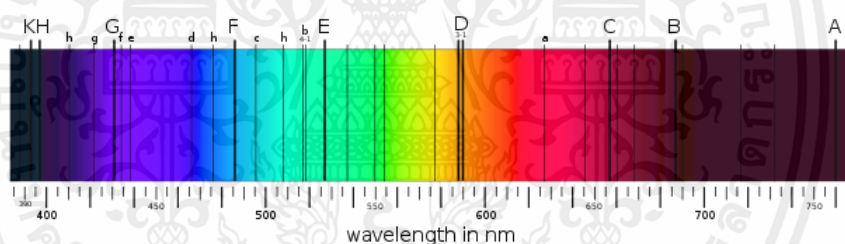
2.6.2 ปริมาณน้ำอิสระ (Water activity, a_w) (นุชนารถ ทรัพย์ภานิชย์, 2545)

ปริมาณน้ำอิสระ เป็นปัจจัยที่สำคัญในการควบคุม และป้องกันการเสื่อมเสียของผลิตภัณฑ์อาหาร จึงมีผลต่อการกำหนดอายุการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์อาหาร เนื่องจากค่า a_w เป็นปัจจัยชี้วัดปริมาณน้ำอิสระภายในอาหารที่เชื้อจุลินทรีย์สามารถนำไปใช้ในการเจริญเติบโต และใช้ในการเกิดปฏิกิริยาเคมีต่าง ๆ

ค่าจำกัดความของ a_w คือ อัตราส่วนความดันไอของน้ำในระบบกับความดันไอของน้ำบริสุทธิ์ อุณหภูมิเดียวกัน หรือความชื้นสัมพัทธ์สมดุลของอากาศแวดล้อมของระบบอุณหภูมิเดียวกัน ระดับ a_w ที่ 0.5 เป็นค่าที่เชื้อจุลินทรีย์ไม่สามารถเจริญเติบโตได้ โดยอาหารส่วนมากมีค่า a_w 0.6–0.7

2.6.3 สี (นิธิยา รัตนานนท์, 2544)

สี (Color) เป็นสมบัติเชิงทัศนศาสตร์ของอาหารมีอิทธิพลเป็นอย่างมากต่อความพึงพอใจของผู้บริโภค ความผิดเพี้ยนของสมบัติเชิงทัศนศาสตร์อาจทำให้ผู้บริโภคปฏิเสธอาหารนั้น ๆ โดยไม่คำนึงถึงรสชาติหรือสมบัติด้านอื่น ๆ ดังนั้นในการผลิตจึงต้องคำนึงถึงสมบัติเชิงทัศนศาสตร์ของอาหาร อีกทั้งลักษณะปรากฏยังใช้บอกคุณภาพของอาหารได้ เช่น ความสด ความอ่อนแก่ และ ส่วนประกอบ เป็นต้น สมบัติเชิงทัศนศาสตร์ของวัตถุ คือพลังงานคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่สะท้อนออกมาจากวัตถุนั้น เป็นพลังงานในช่วงความยาวคลื่นที่ตามองเห็นได้เท่านั้น โดยตาจะรับรู้และมีปฏิกิริยาตอบสนองด้วยกระบวนการวิเคราะห์แยกแยะของสมองให้เรารับรู้ถึงสรรพสิ่งรอบตัว ช่วงความยาวคลื่นที่ตามองเห็น (Visible wavelength) เป็นช่วงที่แคบมากเมื่อเทียบกับช่วงอื่น ๆ มีค่าอยู่ระหว่าง 380–770 nm แบ่งออกเป็น 7 ช่วงสีรวมกันอยู่ คือ ม่วง คราม น้ำเงิน เขียว เหลือง แสด และแดง ดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 ช่วงคลื่นที่ตามองเห็น (Kumar, 2018)

การอธิบายค่าสีของวัตถุเชิงกายภาพนิยมบอกเป็นเชิง 3 มิติ ความสว่าง (Lightness) ความยาวคลื่นเด่น (Dominant wavelength) ความบริสุทธิ์ของสี (Purity) ความสว่าง (Lightness) คือ ความสัมพันธ์ระหว่างการสะท้อนและการดูดซับแสง เรียกอีกอย่างหนึ่งว่าค่า Value โดยเมื่อแสงตกกระทบวัตถุแสงอาจสะท้อน (Reflect) ส่งผ่าน (Transmit) หรือ หักเห (Refract) ขึ้นอยู่กับว่า วัตถุ ทับแสง โปร่งใส หรือโปร่งแสง ความยาวคลื่นเด่น (Dominant wavelength) คือ ความยาวคลื่นที่สะท้อนออกมามากกว่าความยาวคลื่นอื่นและมีอิทธิพลต่อสีที่ปรากฏของวัตถุ อาจเรียกว่า ค่าสีหลัก (Hue) เช่น ถ้าวัตถุสะท้อนคลื่นช่วง 380 nm ออกมามากที่สุด จะเห็นวัตถุเป็นสีม่วง เป็นต้น ความบริสุทธิ์ของสี (Purity) คือ ค่าปริมาณการปนของสีเทา เนื่องจากนอกจากความยาวคลื่นเด่นแล้วยังมีความยาวคลื่นอื่นที่สะท้อนออกมาด้วย มีผลทำให้เห็นสีเทาปนมากับสีหลัก (Hue)

การวัดสีโดย Hunter Lab ผลลัพธ์แสดงเป็นค่า L^* , a^* , b^* , C^* และ h^* โดยที่ L^* คือ ความสว่าง และความมืด ค่าบวก และลบของ a^* หมายถึง ความเป็นสีแดง (+) และความเป็นสีเขียว (-)

ค่าบวก และลบของ b^* ค่าบวก (+) หมายถึงความเป็นสีเหลือง และค่าลบ (-) หมายถึงความเป็นสีน้ำเงิน มุมสีวัดคุณสมบัติของสีและคำนวณตามค่าของสมการด้านล่าง ปริมาณค่า h^* ที่ 0° , 90° , 180° , 270° และ 360° หมายถึงสีแดง, สีเหลือง, สีเขียว, สีน้ำเงิน และสีม่วง ตามลำดับ C^* หมายถึงความเข้มของสี

2.6.4 ความหนาแน่นรวม (Bulk density)

เป็นสมบัติทางกายภาพ (Physical properties) ของวัสดุ หมายถึง ความหนาแน่นของวัสดุ ปริมาณมวล (Bulk material) เช่น แป้ง เมล็ดธัญพืช กาแฟผง นมผง อาหารสัตว์ ขนมอบเคี้ยว และลูกกวาด เป็นต้น ซึ่งเป็นความหนาแน่นที่รวมที่ว่างระหว่างชิ้นวัสดุด้วย ต่างจากความหนาแน่นเนื้อ (Solid density) ซึ่งเป็นความหนาแน่นของชิ้นวัสดุแต่ละชิ้น และจะไม่รวมที่ว่างระหว่างชิ้นวัสดุ ดังนั้นความหนาแน่นรวมจะมีค่าน้อยกว่าความหนาแน่นเนื้อเสมอ

ความหนาแน่นรวม คำนวณได้จากสมการที่ (5)

$$\text{ความหนาแน่นรวม} = \frac{\text{มวลของวัสดุ}}{\text{ปริมาตรของวัสดุ}} \quad (5)$$

2.6.5 ความแข็ง (Hardness)

เป็นสมบัติด้านเนื้อสัมผัส (Texture properties) การวิเคราะห์เนื้อสัมผัสของอาหาร เพื่อให้ได้ค่าความแข็งสามารถทำได้ด้วยการทดสอบแบบการกด (Compression test) การเจาะทะลุ (Penetration test) จากกราฟการเปลี่ยนแปลงรูปร่างพร้อมแรงต้านของตัวอย่างของอาหาร ความแข็ง ของวัสดุแสดงได้ด้วยแรงกดสูงสุด (Maximum force, N) ก่อนวัสดุจะแตกหัก วัสดุที่มีความแข็งมากจะต้านทานแรงกดได้มากมีแรงกดสูงสุดมาก

2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

มนตรี หวังจิ และคณะ (2540) ได้ศึกษาเกี่ยวกับการอบแห้งถั่วเหลืองโดยเทคนิคฟลูอิดไคเซน งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาหาแนวทางขั้นตอนสำหรับการดำเนินการอบแห้งเมล็ดถั่วเหลืองด้วยเครื่องอบแห้งฟลูอิดไคเซนแบบต่อเนื่อง ซึ่งได้ทำการทดลองศึกษาตามสภาวะเงื่อนไขการอบแห้งที่อัตราการกำลังผลิต 2.9 ton/h อัตราการไหลอากาศอบแห้ง 3.6 m³/s (3.3 kg/s) ความเร็วอากาศอบแห้ง 2.9 m/s ความสูงของชั้น (Bed) เมล็ดถั่วเหลือง 15 cm ระยะเวลาที่เมล็ดถั่วเหลืองอยู่ในห้องอบแห้ง 2.35 min อัตราการเวียนคืนอากาศอบแห้งประมาณ 83 % โดยทำการทดลองที่อุณหภูมิ 110 , 120, 130 และ 140 °C ซึ่งสามารถลดความชื้นที่เริ่มต้นโดยเฉลี่ย 20.2 , 22.9 , 25.2 และ 28.2 %wb เหลือความชื้นสุดท้ายโดยเฉลี่ย 16.8 , 18.0 18.6 และ 19.0 %wb ตามลำดับ ความสิ้นเปลืองพลังงานปฏุมภูมิโดยเฉลี่ย 4.62 MJ/kg_{water} และจากการทดลองพบว่า พลังงานปฏุมภูมิจะลดลงตามความชื้นเริ่มต้นเมล็ดถั่วเหลืองที่เพิ่มขึ้น ส่วนเปอร์เซ็นต์เมล็ดร้าวจะเพิ่มขึ้นตามระดับอุณหภูมิของอากาศอบแห้ง

กรกช ภูโพบูลย์ (2545) ได้ศึกษาเกี่ยวกับการอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเครื่องอบแห้งพัลส์ฟลูอิดไคเซน โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการอบแห้งข้าวเปลือกโดยใช้เครื่องอบแห้งพัลส์ฟลูอิดไคเซน โดยการประเมินสมรรถนะ วิเคราะห์การใช้พลังงาน ค่าใช้จ่ายในการอบแห้งและทดสอบคุณภาพข้าว รวมทั้งเปรียบเทียบผลการทดลองที่ได้จากการอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเครื่องอบแห้งพัลส์ฟลูอิดไคเซนกับการอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเครื่องอบแห้งฟลูอิดไคเซนจากงานวิจัยที่ผ่านมา โดยมีเงื่อนไขการทดลองคืออุณหภูมิอบแห้ง 144-154 °C ความสูงเบต 11.6-12.3 cm และความเร็วของอากาศเข้าห้องอบแห้ง 1.6-1.8 m/s ผลการทดลองพบว่าเครื่องอบแห้งพัลส์ฟลูอิดไคเซนสามารถอบแห้งข้าวเปลือกจากความชื้นเริ่มต้นประมาณ 29 %db เหลือประมาณ 24 %db โดยคุณภาพข้าวเปลือกไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก มีค่าใช้จ่ายในการอบแห้งข้าวเปลือกเฉลี่ย 0.53 baht/kg_{steam} ใช้พลังงานความร้อนจำเพาะเฉลี่ยอยู่ในช่วง 6.23-9.37 MJ/kg_{steam} และใช้พลังงานไฟฟ้าจำเพาะเฉลี่ยอยู่ในช่วง 0.18-0.25 MJ/kg_{steam} การอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเครื่องอบแห้งพัลส์ฟลูอิดไคเซนจะมีปริมาณการใช้พลังงานความร้อนจำเพาะเฉลี่ยใกล้เคียงกับการอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเครื่องอบแห้งฟลูอิดไคเซน แต่ใช้พลังงานไฟฟ้าจำเพาะเฉลี่ยน้อยกว่าเครื่องอบแห้งฟลูอิดไคเซน

วรเมธ ทัดทอง (2547) ได้ศึกษาเกี่ยวกับคุณลักษณะการอบแห้งเมล็ดกาแฟด้วยเทคนิคฟลูอิดไคเซน โดยนำเสนอการประยุกต์ใช้เทคนิคฟลูอิดไคเซนสำหรับการอบแห้งเมล็ดกาแฟสดให้มีคุณภาพของผลผลิตดีขึ้น เทคนิคนี้จะช่วยลดเวลาการอบแห้งของเมล็ดกาแฟสดลงจากปกติ 2 week เหลือเพียง 5 h ในชุดการทดลองหอดทดลองฟลูอิดไคเซนทำจากท่ออะคริลิกใสที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 140 mm และมีความสูง 1,000 mm ขณะที่แผ่นการกระจายอากาศจะถูกวางไว้ที่ปลายทางเข้าของหอดทดลองฟลูอิดไคเซนโดยมีสัดส่วนพื้นที่ว่างของลมที่ออกจากแผ่นกระจายอากาศ

เป็น 60% ของพื้นที่หน้าตัดทั้งหมดของแผ่นการกระจายอากาศ ในการทดลองจะทำการอบที่ความจุ 0.6 ถึง 1.2 kg ของเมล็ดกาแฟสด ซึ่งอากาศที่เข้าสู่ฟลูอิดเบตจะถูกให้ความร้อนจากชุดฮีตเตอร์ ขนาด 3 kW เป็นเวลา 30 min จนกระทั่งได้อุณหภูมิของอากาศที่ทางเข้าได้ตามความต้องการ ในการทดลองจะควบคุมอุณหภูมิให้คงที่ไว้ที่ 50 ถึง 90 °C ค่าอัตราการไหลของอากาศจำเพาะและความเร็วลมที่ทางเข้าชุดฟลูอิดเบต 2 ถึง 4 m/s ซึ่งตัวแปรทั้งหมดได้ถูกนำมาศึกษาผลกระทบต่อ การลดลงของความชื้นของเมล็ดกาแฟสด จากผลการทดลองสามารถที่จะลดความชื้นของเมล็ดกาแฟสดจาก 68% เหลือเพียง 14% ในช่วงเวลา 5 ถึง 7 h และพบว่าในช่วง 1 ถึง 2 h แรกจะเกิดการลดลงของความชื้นของเมล็ดกาแฟอย่างมาก

อำนาจ บุญลอย และคณะ (2550) ได้ศึกษาเกี่ยวกับการอบแห้งพริกไทยในหอบมี crib แบบ ฟลูอิดเบตหมุนควง โดยจากการทดลองพบว่าความเร็วลมมีผลต่อการลดความชื้นของเมล็ดพริกไทย และช่วยให้ความชื้นของเมล็ดพริกไทยออกได้เร็วขึ้นเนื่องจากติดครีบทําให้เมล็ดพริกไทยมีการสั่น และการไหลอย่างปั่นป่วนของลมร้อนช่วยให้เกิดการกระจายตัวของเมล็ดพริกไทยในหอบทดลองเพิ่มมากขึ้น ทำให้เพิ่มพื้นที่ในการถ่ายเทความร้อน ซึ่งทำให้การอบแห้งเร็วขึ้น และเมื่อเปรียบเทียบระหว่าง 2 เทคนิค ระหว่างเทคนิคฟลูอิดเบตแบบธรรมดา กับเทคนิคฟลูอิดเบตแบบหมุนควงซึ่ง ได้ผลว่าแบบหมุนควงที่มีการติดครีบทําให้ผลที่ดีกว่า โดยในการอบแห้งนั้นมีความชื้นเริ่มต้น 400 %db อุณหภูมิอากาศ 80 และ 100 °C และความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศที่ 67-70 % มวลพริกไทยที่ใช้ในการอบแห้ง 200 g ความเร็วของอากาศภายในหอบทดลอง 1.0, 1.2 และ 1.5 m/s ใช้เวลาในการทดลองแต่ละกรณี 100 min และวัดความชื้นของเมล็ดพริกไทยทุกๆ 10 min

ศุภฤกษ์ ชามงคลประดิษฐ์ และคณะ (2550) ได้ศึกษาเกี่ยวกับปัจจัยที่มีผลต่อการอบแห้ง พริกแบบต่อเนื่องโดยใช้กระบวนการอบแห้งตามเทคนิคฟลูอิดเบต โดยที่มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษา ผลของอุณหภูมิ ความเร็วลมร้อน ความชื้นที่เวลาระดับต่าง ๆ ที่มีผลต่อการอบแห้งพริกแบบต่อเนื่อง โดยใช้กระบวนการอบแห้งตามเทคนิคฟลูอิดเบตเพื่อหาความสัมพันธ์ของอุณหภูมิ ความเร็วลมร้อน ความชื้นและเวลาที่ระดับต่าง ๆ ที่เหมาะสมในการอบแห้งพริก โดยทดสอบในห้องอบกว้าง 0.3 m ยาว 1.0 m สูง 0.5 m ที่อุณหภูมิ 50, 55, 60, 70, 80, 90 และ 100 °C ที่ความเร็วลมร้อน 4.0, 5.0 และ 6.0 m/s ตามลำดับ จากการทดสอบอบแห้งพริกแบบต่อเนื่องโดยใช้กระบวนการอบแห้งตาม เทคนิคฟลูอิดเบต พบว่าน้ำหนักของพริกจะลดลงอย่างต่อเนื่อง เมื่อระยะเวลาของการอบแห้งพริก เพิ่มมากขึ้นอุณหภูมินั้นจะมีอิทธิพลอย่างมีนัยสำคัญต่อการเปลี่ยนแปลงของน้ำหนักและความชื้นของ พริกที่หายไปและมีผลต่อสีของเม็ดพริกมากกว่าความเร็วลมร้อนโดยที่ความเร็วลมร้อนจะมีอิทธิพลต่อ การเคลื่อนตัวของเม็ดพริกและยังมีผลต่อผิวของเม็ดพริกอีกด้วย โดยพริกจะมีการเคลื่อนตัวแบบฟลูอิด เบต จะต้องมีความชื้นอยู่ในช่วง 45-60 %wb และมีความเร็วเริ่มต้นในการเกิดการเคลื่อนที่แบบ ฟลูอิดเบตเท่ากับ 6.38 m/s ส่วนพริกจะมีการเคลื่อนตัวออกจากห้องอบจะต้องมีความชื้นอยู่ใน ช่วง 10-45 %wb ในการทดสอบนี้จะได้จุดที่เหมาะสม ในการอบแห้งพริกแบบต่อเนื่องโดยใช้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระบวนการอบแห้งตามเทคนิคฟลูอิดไธซ์เบต คือ ที่อุณหภูมิ 90 °C ความเร็วลมร้อน 5.0 m/s โดยมี น้ำหนักเริ่มต้น 0.5 kg และน้ำหนักสุดท้าย 0.14 kg ฟริกจะมีความชื้นสุดท้ายเท่ากับ 12.16 %wb และ 13.84 %db มีอัตราส่วนความชื้นเท่ากับ 0.14 และใช้ระยะเวลาในการอบแห้งฟริก 2 h 45 min

วัชรินทร์ ดงบัง และคณะ (2552) ได้ศึกษาเกี่ยวกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์การอบแห้ง ผักถั่วลิสงด้วยเทคนิคฟลูอิดไธซ์เบต โดยนำเสนอผลการศึกษากการอบแห้งเมล็ดพืชด้วยเทคนิคฟลูอิดไธซ์เบต โดยทำการทดลองอบแห้งผักถั่วลิสง อบแบบเป็นงวด งวดละ 5 kg มีการหมุนเวียนลมร้อน กลับมาใช้ซ้ำอีกประมาณ 80% อุณหภูมิที่ศึกษาแบ่งเป็น 3 ระดับ คือ 50, 60 และ 70 °C ความสูงเบต 10 cm ความเร็วลมร้อนประมาณ 9 m/s ผักถั่วลิสงมีความ ชื้นเริ่มต้นประมาณ 38 %wb ความชื้นสุดท้ายประมาณ 15 %wb ผลการทดลองพบว่า การอบแห้งด้วยอุณหภูมิลมร้อนที่สูงกว่าจะ ช่วยลดระยะเวลาให้สั้นลงได้ กล่าวคือใช้เวลาในการอบแห้ง 8.8, 6.8 และ 5.5 h ตามลำดับ และลด การสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้าลงได้ โดยที่คุณภาพของผลิตภัณฑ์อยู่ในระดับที่ยอมรับได้ในทางพาณิชย์ อัตราส่วนความชื้นถูกพิตเข้ากับแบบจำลองการอบแห้งต่าง ๆ 6 แบบจำลอง โดยพิจารณาจากค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) พบว่าแบบจำลอง Modified Henderson and Pabis, Verma et.al. และTwo-exponential มีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจสูงที่สุด นอกจากนี้แล้วยังได้พิตผลการทดลอง เพื่อค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นของผักถั่วลิสงด้วย

เอกพงษ์ ชีวดีโสภณ และเกียรติศักดิ์ รุ่งพระแสง (2556) ศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิมอบแห้ง ต่อคุณภาพของข้าวกล้องงอกกึ่งสำเร็จรูปด้วยเทคนิคฟลูอิดไธซ์เบต กระบวนการผลิตข้าวกล้องงอกกึ่งสำเร็จรูปประกอบด้วยสามขั้นตอนที่สำคัญคือ การงอกเป็นเวลา 24 h การหุงสุก และการอบแห้ง ใน ขั้นตอนการอบแห้ง เมล็ดข้าวได้รับการลดความชื้นจากความชื้นสูงจนถึงร้อยละ 12 %db ด้วยเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไธซ์เบตที่อุณหภูมิอากาศเป็น 110, 130 และ 150°C ข้าวกล้องงอกกึ่งสำเร็จรูป ได้รับการคืนรูปด้วยวิธีการไมโครเวฟเป็นเวลา 8 min คุณภาพของข้าวกล้องงอกกึ่งสำเร็จรูปทั้งก่อน และหลังการคืนรูปได้รับการตรวจสอบ ผลการศึกษาพบว่า การเพิ่มอุณหภูมิมอบแห้งมีผลกระทบต่อ คุณภาพของข้าวกล้องงอกกึ่งสำเร็จรูป ข้าวกล้องงอกกึ่งสำเร็จรูปที่ผ่านการอบแห้งที่อุณหภูมิ 150°C มีค่าความขาว อัตราส่วนการดูดน้ำกลับ อัตราส่วนการเพิ่มปริมาตรมากที่สุด แต่มีค่าความหนาแน่นรวมต่ำที่สุด เมื่อคืนรูปข้าวกล้องงอกกึ่งสำเร็จรูปด้วยวิธีการไมโครเวฟพบว่าข้าวกล้องงอกกึ่งสำเร็จรูป ที่ผ่านการอบแห้งที่อุณหภูมิสูงขึ้นมีค่าความแข็งและความเหนียวลดลง

Rordprapat, W. et.al. (2005) ได้ศึกษาเปรียบเทียบการอบแห้งข้าวเปลือกโดยใช้ฟลูอิดไธซ์เบตด้วยลมร้อนและไอน้ำร้อนยวดยิ่ง ใช้อุณหภูมิลมร้อนและไอน้ำร้อนยวดยิ่ง 150°C พบว่าระหว่าง การอบแห้งช่วงเริ่มต้นอัตราการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งต่ำกว่าการอบแห้งด้วยลมร้อนเนื่องจาก ไอน้ำเกิดการควบแน่นส่งผลให้แบ่งในเมล็ดข้าวเกิดการเจลาตินเนชันทำให้ปริมาณข้าวสารเต็มเมล็ด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(Head rice yield) สูงกว่าการอบแห้งด้วยลมร้อน ค่าความขาวของข้าวที่อบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งต่ำกว่าการอบแห้งด้วยลมร้อนเนื่องจากเกิดปฏิกิริยาเมลลาร์ดในช่วงการอบแห้งเริ่มต้น

Soponronnarit, S. et.al. (2006) ประสบความสำเร็จในการผลิตข้าวหนึ่งจากข้าวกล้องโดยใช้เทคนิคแบบฟลูอิดไชน์เบดด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง หลักการทำงานที่สำคัญคือ เกิดการนึ่งและการอบแห้งขึ้นมาในขั้นตอนเดียวกัน เป็นการลดระยะเวลาและขั้นตอนของการผลิตข้าวหนึ่ง ส่วนข้อดีอย่างอื่นของการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งคือ ไม่เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันเนื่องจากไม่มีอากาศในระบบให้อัตราการอบแห้งที่สูง สามารถประยุกต์ใช้ได้กับเครื่องอบแห้งแบบพาความร้อน และเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมเนื่องจากไม่มีการเผาไหม้เพื่อให้ได้ความร้อนสำหรับการอบแห้ง

จากการศึกษางานวิจัยต่าง ๆ เหล่านี้ สามารถนำมาเป็นฐานข้อมูลเกี่ยวกับโครงการนี้ได้ เนื่องจากการศึกษาเรื่องการอบแห้งแบบฟลูอิดไชน์เบดมีผู้ศึกษาอยู่มากโดยใช้วัสดุที่แตกต่างกันตามวัตถุประสงค์ที่ต้องการศึกษา แต่ยังไม่มีความชัดเจนถึงการศึกษาการอบแห้งถั่วลิสงแบบฟลูอิดไชน์เบดด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง จึงมีความเหมาะสมอย่างยิ่งที่จะศึกษาการอบแห้งถั่วลิสงแบบฟลูอิดไชน์เบดด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง เพื่อให้ได้ความเหมาะสมของผลิตภัณฑ์

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 วัสดุและอุปกรณ์

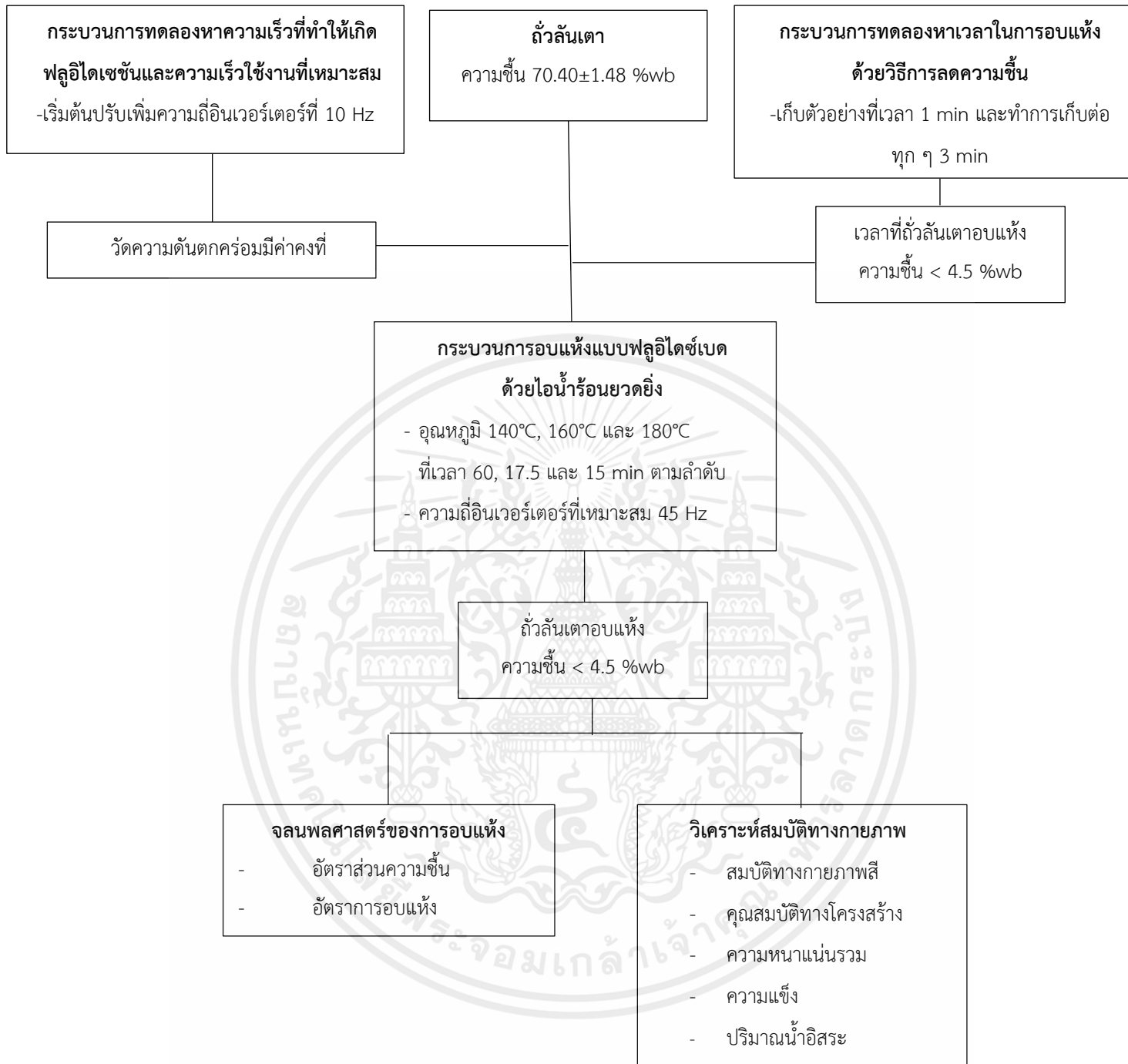
1. ถั่วลิ้นเตา
2. เครื่องทำแห้งแบบฟลูอิดไรซ์เบดด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง
3. ตู้อบลมร้อน (UFB160 Memmert, Germany)
4. เครื่องวัดปริมาณน้ำอิสระ AquaLab รุ่น 4TE
5. เครื่องวัดสี Hunter lab (Color flex, USA)
6. เครื่องวัดเนื้อสัมผัส รุ่น TA-XT Plus
7. กล้องจุลทรรศน์สเตอริโอ รุ่น ZEISS Stemi 508
8. เครื่องชั่งน้ำหนัก 4 ตำแหน่ง และ 2 ตำแหน่ง
9. Hot-wire anemometer
10. ถ้วยอะลูมิเนียม
11. โถดูดความชื้น
12. กระบอกตวง
13. ถ้วยอะลูมิเนียมฟอยล์

3.2 ตัวอย่างที่ใช้ในการทดลอง

นำถั่วลิ้นเตามาซับน้ำที่เกิดจากการแช่แข็งออก แล้วนำออกมาวางไว้ที่อุณหภูมิห้องจนกว่าถั่วลิ้นเตาจะมีอุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิห้อง จากนั้นก่อนการทดลองแต่ละครั้งจะทำการสุ่มตัวอย่างเพื่อไปวิเคราะห์หาค่าความชื้นเริ่มต้น โดยแบ่งตัวอย่างถั่วลิ้นเตาประมาณ 15 g อบแห้งด้วยตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 105 ± 1 °C เป็นเวลา 24 h แล้วนำถั่วลิ้นเตาออกจากตู้อบลมร้อนใส่ไว้ในโถดูดความชื้นจนกระทั่งอุณหภูมิของถั่วลิ้นเตาเย็นลง หลังจากนั้นจะนำถั่วลิ้นเตาไปชั่งน้ำหนัก และหาค่าความชื้นจากการทดลองพบว่าถั่วลิ้นเตามีค่าความชื้นเริ่มต้นเท่ากับ 70.40 ± 1.48 %wb

3.3 แผนการทดลอง

จากแผนภูมิรูปที่ 3.1 แสดงแผนภูมิขั้นตอนการดำเนินการทดลองของงานวิจัยนี้ เริ่มจากนำ ถั่วลิสงเตามาแช่น้ำที่เกิดจากการแช่แข็งออก แล้วจึงนำถั่วลิสงเตา 400 g มาทำการทดลองหาความเร็วที่ทำให้เกิดฟลูอิดไอเซชัน โดยการปรับความถี่อินเวอร์เตอร์เริ่มต้นที่ 10 Hz ที่อุณหภูมิบรรยากาศ พร้อมทั้งวัดความดันตกคร่อมทั้งบนและล่างก่อนห้องอบแห้งและความเร็วลมก่อนที่จะเข้าห้องอบแห้ง จากนั้นทำการปรับความถี่ของอินเวอร์เตอร์ให้เพิ่มขึ้น จนกระทั่งวัดความดันตกคร่อมมีค่าคงที่ จึงได้ความเร็วที่เกิดปรากฏการณ์ฟลูอิดไอเซชัน (U_{mf}) 4.4 m/s และความเร็วที่เหมาะสมในการอบแห้ง ถั่วลิสงเตา (U_T) $1.36U_{mf}$ m/s หลังจากได้ความเร็วที่เหมาะสมในการอบแห้งถั่วลิสงเตา จึงนำถั่วลิสงเตา 400 g มาทำการการอบแห้งแบบฟลูอิดไอเซชันด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งด้วยความเร็วเหมาะสมที่ความถี่อินเวอร์เตอร์ 45 Hz ไปทำการทดลองลดความชื้นที่อุณหภูมิ 140, 160 และ 180 °C โดยมีความชื้นเริ่มต้น 71.73, 69.24 และ 69.90 %wb ตามลำดับ เก็บตัวอย่างของถั่วลิสงเตาแต่ละช่วงเวลาไปหาความชื้นโดยเริ่มเก็บตัวอย่างที่เวลา 1 min และทุก ๆ 3 min โดยทำการเก็บเข้าตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 105 ± 1 °C เป็นเวลา 24 h แล้วนำมาชั่งน้ำหนักด้วยเครื่องชั่ง 4 ตำแหน่ง เพื่อนำข้อมูลมาคำนวณหาค่าความชื้น อัตราส่วนความชื้น และอัตราการอบแห้ง เมื่อทราบปริมาณความชื้นที่ลดลงแต่ละช่วงเวลาจึงหาเวลาที่แน่นอนในการอบแห้งจากการทดลองลดความชื้น ในช่วงเวลาที่ทำให้ถั่วลิสงเตามีปริมาณความชื้นน้อยกว่า 4.5 %wb เมื่อได้เวลาที่ทำให้ถั่วลิสงเตามีปริมาณความชื้นน้อยกว่า 4.5 %wb ต่อจากนั้นทำการทดลองอบแห้งแบบฟลูอิดไอเซชันด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง โดยทำการอบแห้งที่อุณหภูมิ 140, 160 และ 180 °C โดยทำการอบแห้งตามเวลาที่ได้จากการทดลองลดความชื้นที่เวลา 60 min, 17.5 min และ 15 min ตามลำดับ แล้วจึงนำมาวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพของถั่วลิสงเตา ได้แก่ ปริมาณน้ำอิสระ (ข้อ 3.6.1), การวิเคราะห์ค่าสี (ข้อ 3.6.2), วิเคราะห์ลักษณะทางโครงสร้าง (ข้อ 3.6.3), ความหนาแน่นรวม (ข้อ 3.6.4) และวิเคราะห์ความแข็ง (ข้อ 3.6.5)



รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการดำเนินการทดลอง

3.3.1 การทดลองหาความเร็วที่ทำให้เกิดฟลูอิดเซชัน

เตรียมถั่วลันเตา 400 g เริ่มเดินเครื่องอบแห้งและสุ่มความถี่ของอินเวอร์เตอร์โดยเริ่มต้นที่ 10 Hz ที่อุณหภูมิบรรยากาศ จากนั้นนำถั่วลันเตาที่เตรียมไว้ใส่ลงในเบตของห้องอบแห้ง ทำการวัดความเร็วลมด้วย Hot-wire anemometer พร้อมทั้งวัดความดันตกคร่อมทั้งบนและล่างก่อนห้องอบแห้งด้วย Manometer จากนั้นปรับความถี่ของอินเวอร์เตอร์ให้เพิ่มขึ้นและทำการการวัดอีกรอบ จนกระทั่งวัดความดันตกคร่อมมีค่าคงที่ จึงได้ความเร็วที่เกิดปรากฏการณ์ฟลูอิดเซชัน (U_{mf}) เท่ากับ 4.4 m/s และความเร็วที่เหมาะสมในการอบแห้งถั่วลันเตา (U_f) เท่ากับ $1.36U_{mf}$ m/s

3.3.2 การทดลองหาเวลาในการอบแห้งด้วยวิธีการลดความชื้น

เติมน้ำเครื่องต้ม น้ำความดันให้ระดับน้ำภายในหลอดวัดระดับน้ำเพียงพอ แล้วทำการให้เปิดเครื่องต้ม น้ำความดันเพื่อให้ความร้อนกับน้ำจนไปเป็นไอน้ำร้อนยวดยิ่ง เดินเครื่องอบแห้งทำการปรับความถี่ของอินเวอร์เตอร์ที่ 45 Hz และตั้งอุณหภูมิมอบแห้งไว้ที่ 140 °C, 160 °C และ 180 °C ไปทำโดยมีความชื้นเริ่มต้นที่ทำการสุ่มเก็บก่อนการทดลองที่ 71.73, 69.24 และ 69.90 %wb ตามลำดับ รวจนกระทั่งอุณหภูมิมอบแห้งและล่างห้องเบตใกล้เคียงกัน จากนั้นทำการเปิดวาล์วไอน้ำร้อนเข้าไปในเครื่องอบแห้ง จนไอน้ำร้อนยวดยิ่งกระจายทั่วห้องอบแห้ง นำถั่วลันเตา 400 g ใส่ในเบตของห้องอบแห้ง จากนั้นเก็บตัวอย่างของถั่วลันเตาแต่ละช่วงเวลาไปหาความชื้นโดยเก็บเข้าตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 105 ± 1 °C เป็นเวลา 24 h โดยเริ่มเก็บตัวอย่างที่เวลา 1 min และทำการเก็บต่อทุก ๆ 3 min แล้วนำมาชั่งน้ำหนักด้วยเครื่องชั่ง 4 ตำแหน่ง เพื่อนำข้อมูลมาคำนวณหาค่าความชื้น อัตราส่วนความชื้น และอัตราการอบแห้ง เมื่อทราบปริมาณความชื้นที่ลดลงแต่ละช่วงเวลาจึงหาเวลาที่แน่นอนจากการทดลองลดความชื้นในช่วงเวลาที่ทำให้ถั่วลันเตามีปริมาณความชื้นน้อยกว่า 4.5 %wb โดยได้เวลาในการอบแห้งที่เวลา 60 min, 17.5 min และ 15 min ตามลำดับ

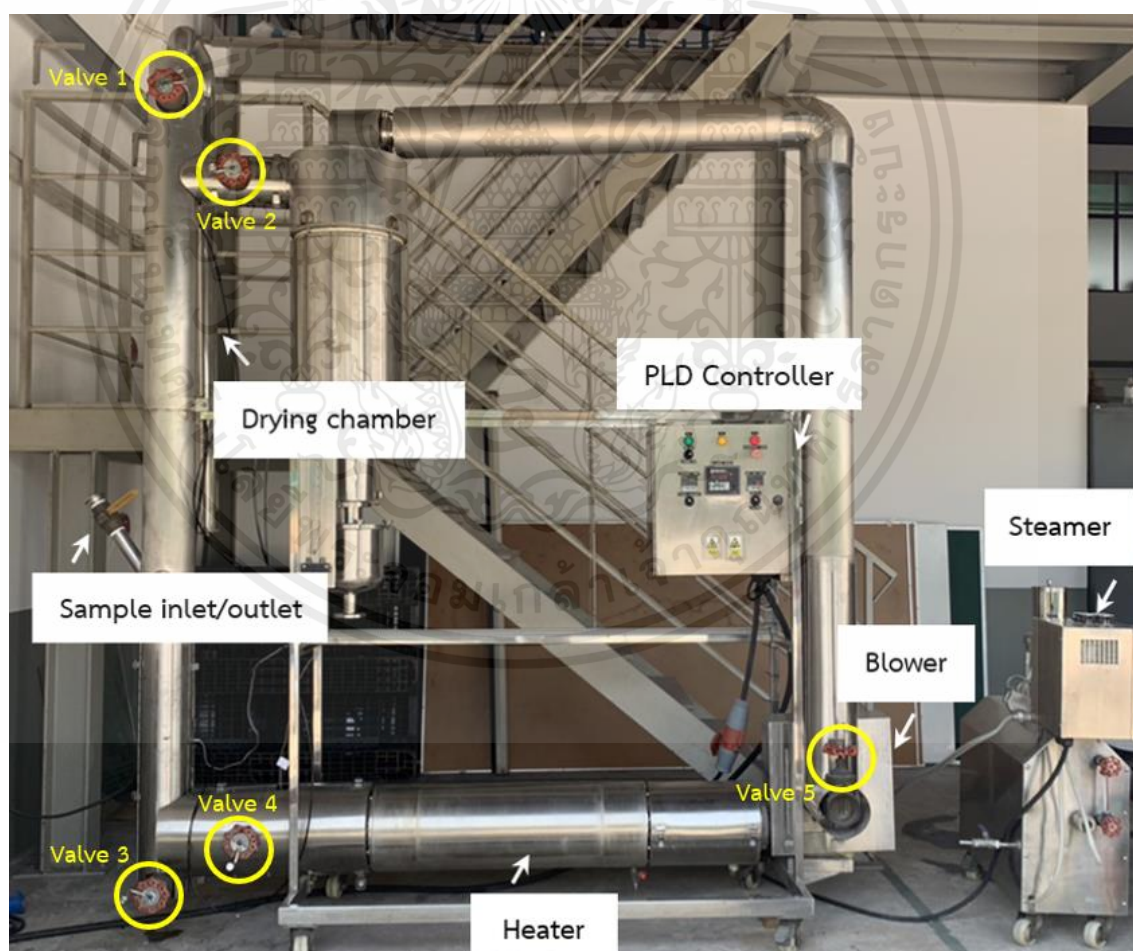
3.3.3 การทดลองการอบแห้งแบบฟลูอิดเบตด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง

เติมน้ำเครื่องต้ม น้ำความดันให้ระดับน้ำภายในหลอดวัดระดับน้ำเพียงพอ แล้วทำการให้เปิดเครื่องต้ม น้ำความดันเพื่อให้ความร้อนกับน้ำจนไปเป็นไอน้ำร้อนยวดยิ่ง เดินเครื่องอบแห้งทำการปรับความถี่ของอินเวอร์เตอร์ที่ 45 Hz และตั้งอุณหภูมิมอบแห้งไว้ที่ 140 °C, 160 °C และ 180 °C รวจนกระทั่งอุณหภูมิมอบแห้งและล่างห้องเบตใกล้เคียงกัน จากนั้นทำการเปิดวาล์วไอน้ำร้อนเข้าไปในเครื่องอบแห้ง จนกระทั่งไอน้ำร้อนยวดยิ่งกระจายทั่วห้องอบแห้ง นำถั่วลันเตา 400 g ใส่ในเบตของห้องอบแห้ง เก็บตัวอย่างถั่วลันเตาที่เวลา 60 min, 17.5 min และ 15 min ตามลำดับ แล้วจึงนำมาวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพของถั่วลันเตา ได้แก่ ปริมาณน้ำอิสระ, การวิเคราะห์ค่าสี, วิเคราะห์ลักษณะทางโครงสร้าง, ความหนาแน่นรวม และวิเคราะห์ความแข็ง

3.4 เครื่องทำแห้งแบบฟลูอิดไรซ์เบดด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง

3.4.1 ส่วนประกอบเครื่องทำแห้งแบบฟลูอิดไรซ์เบดด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง จากรูปที่ 3.2 เครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไรซ์เบดด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง มีส่วนประกอบของเครื่องที่สำคัญ ดังนี้

- 1) พัดลม (Blower)
- 2) แหล่งทำความร้อน (Heater)
- 3) ห้องอบแห้ง (Drying chamber)
- 4) แหล่งกำเนิดไอน้ำ (Steamer)
- 5) แหล่งควบคุมความเร็วลมและอุณหภูมิภายในห้องอบแห้ง (PLD Controller)
- 6) ระบบท่อ และวาล์ว



รูปที่ 3.2 เครื่องทำแห้งแบบฟลูอิดไรซ์เบดด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4.2 หลักการทำงานเครื่องทำแห้งแบบพลูอิดซ์เบตด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง

เริ่มจากป้อนไอน้ำอิ่มตัว (Saturated steam) จากแหล่งกำเนิดไอน้ำเข้าสู่แหล่งทำความร้อน เพื่อเพิ่มอุณหภูมิเป็นไอน้ำร้อนยวดยิ่ง เป่าผ่านกลุ่มท่อกระจายไอน้ำทางด้านล่างห้องอบแห้งทำให้ ถั่วลันเตาลอยตัวขึ้น สัมผัสกับไอน้ำร้อนยวดยิ่งได้เป็นอย่างดี ทัวถึงและสม่ำเสมอ ไอน้ำร้อนยวดยิ่ง ถ่ายเทความร้อนให้กับถั่วลันเตาทำให้น้ำในถั่วลันเตาระเหยออกไปส่งผลให้ถั่วลันเตามีความชื้นลดลง ไอน้ำร้อนยวดยิ่งรับความชื้นที่ระเหยออกจากถั่วลันเตาทำให้ไอน้ำร้อนยวดยิ่งมีอุณหภูมิลดลงไหลออกจากห้องอบแห้งผ่านพัดลมและผ่านแหล่งทำความร้อนเพื่อเพิ่มอุณหภูมิแล้วไหลเข้าสู่ห้องอบแห้งต่อไป ไอน้ำร้อนยวดยิ่งไหลหมุนเวียนในระบบท่อบปิด

3.5 การวิเคราะห์ความชื้น

ก่อนการทดลองแต่ละครั้งจะทำการสุ่มตัวอย่างเพื่อไปวิเคราะห์หาค่าความชื้นเริ่มต้น โดยแบ่งตัวอย่างถั่วลันเตาประมาณ 15 g ในตอนเริ่มต้นเข้าตู้อบลมร้อน จากนั้นทำการเก็บตัวอย่าง ถั่วลันเตาโดยเริ่มเก็บตัวอย่างที่เวลา 1 min และทำการเก็บต่อทุก ๆ 3 min จนครบเวลาที่กำหนดไว้ โดยจะนำตัวอย่างถั่วลันเตาที่เก็บได้ไปชั่งน้ำหนักด้วยเครื่องชั่ง 4 ตำแหน่ง เพื่อให้ทราบน้ำหนักเริ่มต้น และนำเข้าตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 105 ± 1 °C เป็นเวลา 24 h จากนั้นนำออกจากตู้อบลมร้อน ใส่ใน โถดูดความชื้นเป็นเวลา 30 min แล้วนำไปชั่งน้ำหนักด้วยเครื่องชั่ง 4 ตำแหน่ง เพื่อให้ทราบน้ำหนักสุดท้าย นำค่าน้ำหนักเริ่มต้นและสุดท้ายที่ได้มาคำนวณหาปริมาณความชื้นในสมการที่ (3)

$$MC(\%wb) = \frac{(W_w - W_d)}{W_w} \times 100 \quad (3)$$

3.6 การวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพ

3.6.1 ปริมาณน้ำอิสระ

วิเคราะห์ปริมาณน้ำอิสระโดยดัดแปลงจากวิธีการของ AOAC (2000) ทำการ Calibrate เครื่องวัดปริมาณน้ำอิสระด้วยน้ำกลั่น จากนั้นนำตัวอย่างถั่วลันเตาที่ผ่านการอบแห้งมาบดให้มีขนาดเล็กใส่ลงในตลับตัวอย่าง เกลี่ยให้มีผิวหน้าเสมอกัน แล้วใส่ในเครื่องวัดปริมาณน้ำอิสระ AquaLab รุ่น 4TE ดังรูปที่ 3.3 เพื่อวิเคราะห์ค่าปริมาณน้ำอิสระในอาหาร โดยวัดตัวอย่างละ 3 ซ้ำ



รูปที่ 3.3 เครื่องวัดปริมาณน้ำอิสระ

3.6.2 ค่าสี

วิเคราะห์ค่าสีโดยดัดแปลงจากงานวิจัยของ Chulalaksananukul, P. et.al. (2021) นำถั่วลิ้นเตาทั้งที่ยังไม่ผ่านการอบแห้ง และผ่านการอบแห้งแต่ละอุณหภูมิแล้วมาวัดสีด้วยเครื่องวัดสี Hunter Lab รุ่น Color Flex ดังรูปที่ 3.4 ซึ่งใช้ในระบบ Hunter L*, a* และ b* โดยเปรียบเทียบค่าสีก่อนการตรวจวัดด้วย Black glass standard และ White tile standard และวัดตัวอย่างละ 5 ซ้ำ



รูปที่ 3.4 เครื่องวัดสี Hunter Lab

3.6.3 โครงสร้างภายใน

วิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างภายในโดยดัดแปลงจากงานวิจัยของ Zielinska, M. et.al. (2013) นำถั่วลิ้นเตาทั้งที่ยังไม่ผ่านการอบแห้ง และผ่านการอบแห้งแต่ละอุณหภูมิแล้วมาผ่าครึ่งออก แล้วส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์สเตอริโอ รุ่น ZEISS Stemi 508 ดังรูปที่ 3.5 โดยจะแสดงผลในโปรแกรม IMT iSolution และนำรูปภาพที่ได้มาใช้เปรียบเทียบโครงสร้างภายในของถั่วลิ้นเตาต่อไป



รูปที่ 3.5 กล้องจุลทรรศน์สเตอริโอ

3.6.4 ความหนาแน่นรวม

วิเคราะห์ค่าความหนาแน่นรวมโดยดัดแปลงจากวิธีการของ AOAC (1995) และงานวิจัยของ Sornsomboonsuk, S (2018) ใส่ตัวอย่างถั่วลันเตาประมาณ 30 g ลงในกระบอกตวงขนาด 250 cm³ ที่ทราบน้ำหนักแล้ว จากนั้นชั่งกระบอกตวงที่มีตัวอย่างถั่วและอ่านปริมาตรถั่วที่ได้ บันทึกค่าเพื่อนำไปคำนวณหาความหนาแน่น ทำซ้ำอีก 2 ครั้ง โดยเคาะกระบอกตวงอย่างน้อย 40 ครั้งเพื่อลดช่องว่างระหว่างตัวอย่าง และทำเช่นเดียวกันนี้กับตัวอย่างที่ผ่านการอบแห้งแต่ละอุณหภูมิ

3.6.5 ความแข็ง

วิเคราะห์ค่าความแข็งโดยดัดแปลงจากงานวิจัยของ Zielinska, M. et.al. (2013) นำตัวอย่างถั่วลันเตาที่ผ่านการอบแห้งมาทดสอบ Hardness แบบใช้แรงกด (Compression test) ด้วยเครื่อง Texture Analyzer รุ่น TA-XT Plus และใช้หัวกดแบบ Flat probe ขนาด 50 mm ดังรูปที่ 3.6 ทำการกดแต่ละครั้งด้วยความเร็ว 1 mm/s ที่ 60% strain โดยผลการทดสอบแรงกดสูงสุดถูกคำนวณเฉลี่ยจากการวัด 30 ครั้ง



รูปที่ 3.6 การทดสอบ Compression ด้วย Texture Analyzer

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.7 การวิเคราะห์ทางสถิติ

วิเคราะห์ข้อมูลการทดลองอบแห้งถั่วลิสงเตา โดยวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียว (One-way ANOVA) ด้วยการออกแบบการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ (Completely Randomized Design, CRD) นำเสนอข้อมูลการทดลองโดยวิเคราะห์ค่าเฉลี่ย และค่าความแปรปรวน วิเคราะห์ปัจจัยต่างกันด้วยกระบวนการ Duncan (DMRT) แต่ละการทดลองมีการวัดตัวอย่างไม่น้อยกว่า 3 ซ้ำ



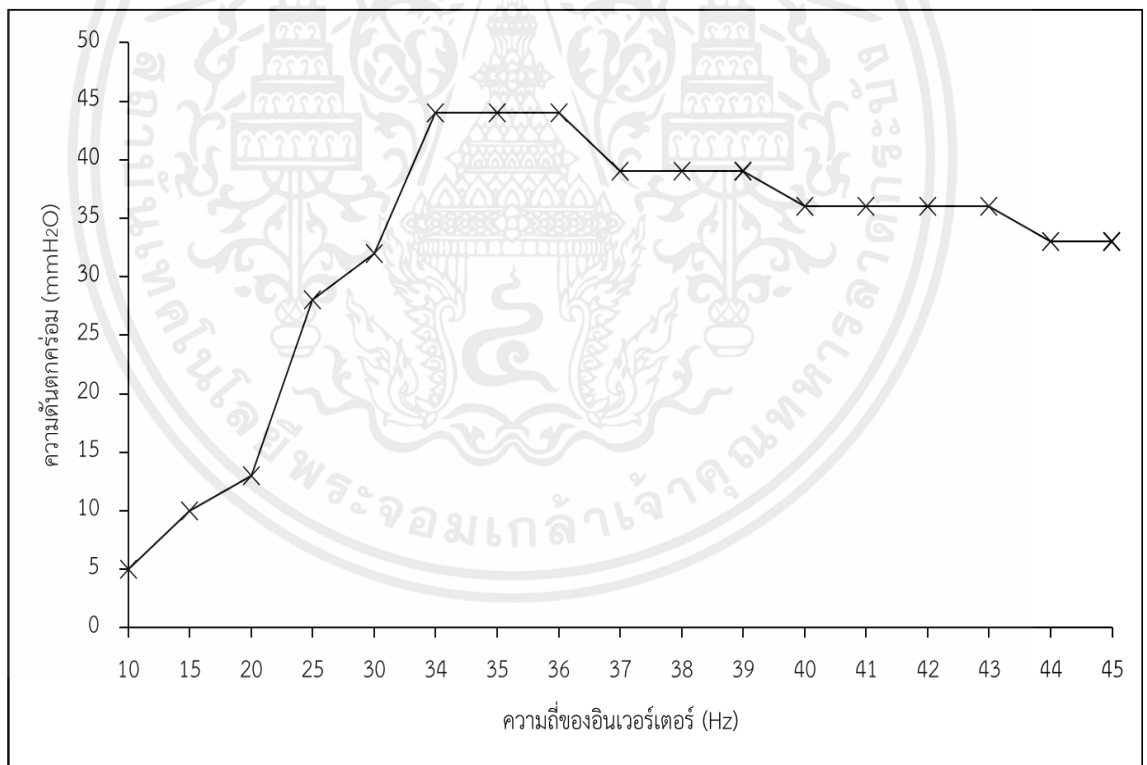
บทที่ 4

ผลการทดลอง และวิจารณ์ผลการทดลอง

4.1 การอบแห้งถั่วลิสงเตาฟลูอิดไคซ์เบดด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง

4.1.1 ความเร็วไอน้ำร้อนยวดยิ่งในการอบแห้งแบบฟลูอิดไคซ์เบดของถั่วลิสงเตา

จากรูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันตกคร่อมกับความถี่ของอินเวอร์เตอร์ พบว่าที่จุดความถี่ของอินเวอร์เตอร์ เริ่มส่งผลทำให้ถั่วลิสงเตามีพฤติกรรมลอยตัวขึ้นคล้ายของไหล คือที่ความถี่ 39 Hz ซึ่งเป็นจุดที่มีความเร็วที่ทำให้เกิดปรากฏการณ์ฟลูอิดไคเซน (U_{mf}) เท่ากับ 4.4 m/s และพบว่าที่จุดความถี่ของอินเวอร์เตอร์ 45 Hz เป็นจุดที่ถั่วลิสงเตามีสถานะที่เม็ดของแข็งยังอยู่ชิดกันและยังจับกันเป็นกลุ่มก้อน ดังนั้นจึงเป็นจุดที่มีความถี่ของอินเวอร์เตอร์ที่เหมาะสมและมีความเร็วที่เหมาะสมในการอบแห้งถั่วลิสงเตา (U_r) ประมาณ 6 m/s หรือ $1.36U_{mf}$ m/s



รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันตกคร่อมกับความถี่ของอินเวอร์เตอร์

4.2 พฤติกรรมของการลดความชื้นในถั่วลิสงเตาฟลูอิดซ์เบดด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง

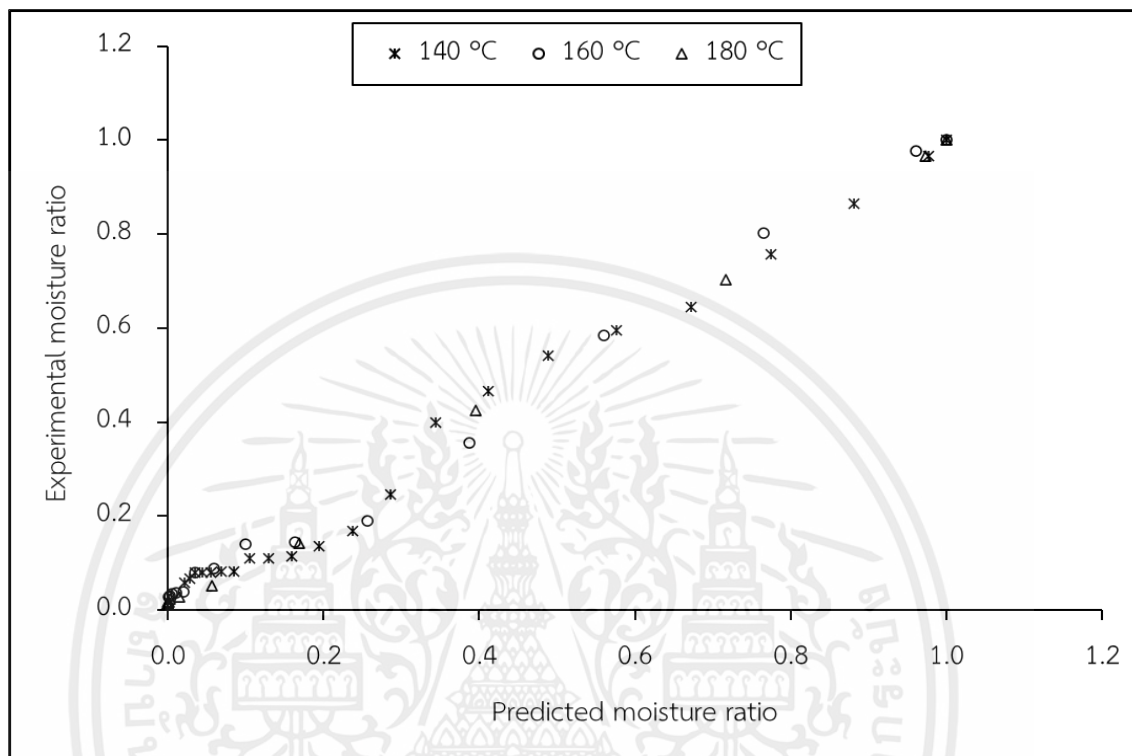
4.2.1 จลนศาสตร์การอบแห้ง

ข้อมูลของปริมาณความชื้นที่ได้จากการทดลองการอบแห้งแบบฟลูอิดซ์เบดด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งภายใต้อุณหภูมิที่แตกต่างกัน นำมาวิเคราะห์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ทั้ง 4 รูปแบบ ซึ่งพิจารณาจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่มีค่า R^2 สูงที่สุด พบว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Page (แบบจำลองที่ 2) ที่อุณหภูมิ 140, 160 และ 180 °C มีค่า R^2 สูงที่สุดเท่ากับ 0.987, 0.991 และ 0.998 ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าแบบจำลองของ Page อธิบายพฤติกรรมการอบแห้งแบบฟลูอิดซ์เบดด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งของถั่วลิสงเตาได้ดีที่สุด

ตารางที่ 4.1 ผลทางสถิติของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์การอบแห้งถั่วลิสงเตา

No	Treatment	Model constants and coefficient					R^2
		k	N	a	b	c	
1	140 °C	0.0492					0.976
	160 °C	0.0991					0.977
	180 °C	0.1459					0.967
2	140 °C	0.0224	1.2495				0.987
	160 °C	0.0396	1.3797				0.991
	180 °C	0.0265	1.8269				0.998
3	140 °C	0.0516		1.0498			0.979
	160 °C	0.1060		1.0733			0.983
	180 °C	0.1567		1.0848			0.967
4	140 °C	0.0466		1.0797		-0.0414	0.980
	160 °C	0.1023		1.0831		-0.0135	0.983
	180 °C	0.1493		1.0996		-0.0188	0.975

จากการทวนสอบความเหมาะสมของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Page ดังรูปที่ 4.2 แสดงการเปรียบเทียบระหว่างอัตราส่วนความชื้นที่ได้จากการทดลองกับการทำนายจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Page



รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นที่ได้จากการทดลองกับการทำนาย

4.2.2 ลักษณะการอบแห้งของถั่วลิ้นเต่า

ถั่วลิ้นเต่าที่ใช้ทดลองมีความชื้นเริ่มต้นเท่ากับ 71.73, 69.24 และ 69.90 %wb ที่อุณหภูมิ 140, 160 และ 180 °C ตามลำดับ จากนั้นทำการอบแห้งแบบฟลูอิดซ์เบดด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง จนถั่วลิ้นเต่ามีปริมาณความชื้นสุดท้ายน้อยกว่า 4.5 %wb แสดงลักษณะการอบแห้งในรูปของความชื้น, อัตราส่วนความชื้น และอัตราการอบแห้ง ดังรูปที่ 4.3, 4.4 และ 4.5

จากรูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นฐานเปียกและเวลาในการอบแห้ง แสดงให้เห็นว่าในการอบแห้งแบบฟลูอิดซ์เบดด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่อุณหภูมิ 140, 160 และ 180 °C ใช้เวลาในการอบแห้ง จนกระทั่งมีค่าความชื้นสุดท้ายของถั่วลิ้นเต่าน้อยกว่า 4.5 %wb ที่เวลา 60, 17.5 และ 15 min ตามลำดับ

จากรูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นและเวลาในการอบแห้ง แสดงถึงอัตราส่วนของปริมาณความชื้นที่ลดลงในแต่ละช่วงเวลาจากปริมาณความชื้นของถั่วลิ้นเต่าตอนเริ่มต้น

จากรูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการอบแห้งและความชื้นฐานเปียก แสดงให้เห็นว่าการอบแห้งแบบฟลูอิดซ์เบดด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่อุณหภูมิ 180 °C ใช้เวลาในการอบแห้งน้อยที่สุด

คือ 15 min และมีอัตราการอบแห้งเฉลี่ยสูงสุด คือ 1.76 %wb/min และจากตารางที่ 4.2 แสดงให้เห็นว่าการอบแห้งแบบฟลูอิดไรซ์เบดด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่อุณหภูมิสูงขึ้นส่งผลทำให้เวลาในการอบแห้งลดลง และอัตราการอบแห้งเพิ่มขึ้น และมีลักษณะทางกายภาพของสีที่ให้ความแตกต่างจากก่อนทำการอบแห้งน้อยที่สุด ลักษณะทางโครงสร้างมีโพรงอากาศขนาดใหญ่ที่สุดในขณะที่ความหนาแน่นรวมมีค่าเพิ่มขึ้นน้อยกว่า ค่าความแข็งมีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ และในระหว่างการอบแห้งพบว่า

(1) ช่วงการอบแห้งเริ่มต้น ซึ่งเป็นช่วงที่มีอัตราการอบแห้งสูงสุด เกิดการถ่ายเทความร้อนระหว่างไอน้ำร้อนยวดยิ่งกับถั่วลิ้นเตา ส่งผลให้อุณหภูมิพื้นผิวของถั่วลิ้นเตาสูงขึ้น จนกระทั่งเกิดความสมดุลระหว่างผิวถั่วลิ้นเตากับไอน้ำร้อนยวดยิ่ง

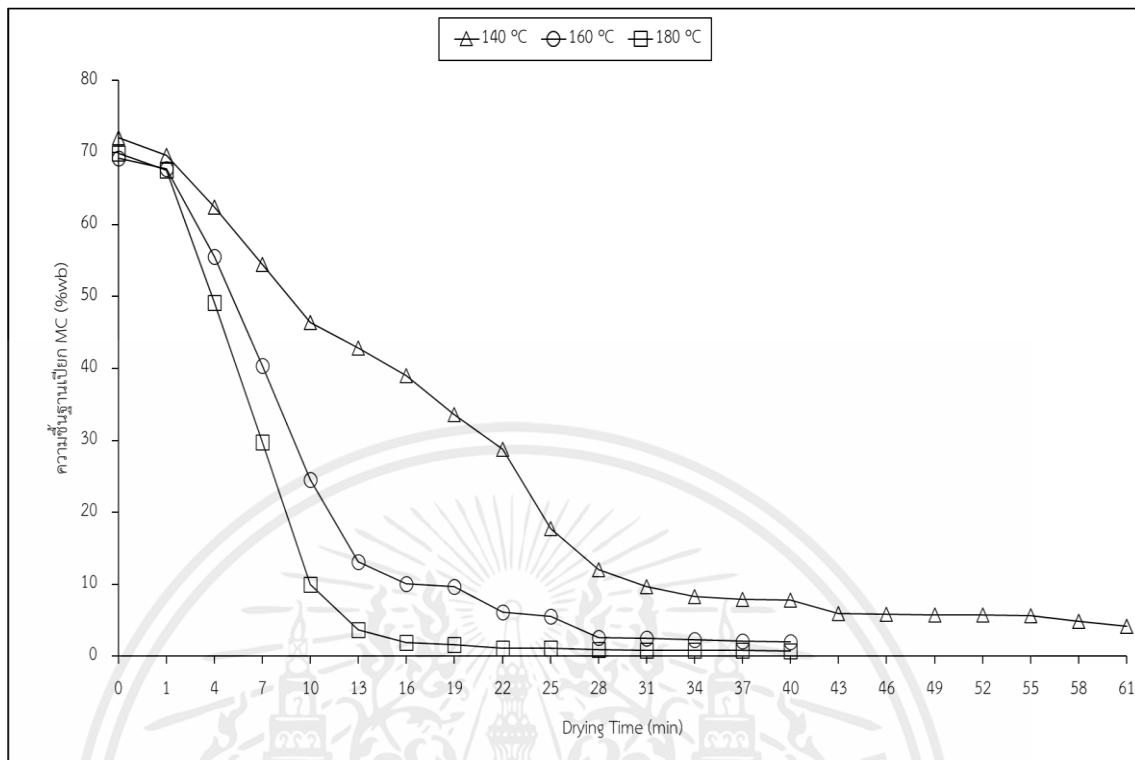
(2) ช่วงอัตราการอบแห้งคงที่ เมื่อถั่วลิ้นเตาได้รับความร้อนสูง ทำให้โมเลกุลของน้ำที่แทรกตัวในโครงสร้างเคลื่อนที่มาที่ผิวอย่างรวดเร็วและต่อเนื่องทำให้ความชื้นของถั่วลิ้นเตาลดลงอย่างคงที่ จากนั้นน้ำที่ผิวถั่วลิ้นเตาจะถูกพาออกไปพร้อมกับไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่มาจากด้านล่างห้องอบแห้ง อัตราการอบแห้งในช่วงนี้จะขึ้นอยู่กับอัตราการถ่ายเทความร้อนไปยังผิวของถั่วลิ้นเตา ซึ่งสอดคล้องกับอุณหภูมิของไอน้ำร้อนยวดยิ่ง

(3) ช่วงอัตราการอบแห้งลดลง เกิดจากความชื้นภายในถั่วลิ้นเตาเหลือน้อย การเคลื่อนตัวของน้ำจากภายในออกมาได้ยาก ส่งผลให้ปริมาณความชื้นภายในเนื้อวัสดุเคลื่อนที่มาสู่ผิวด้านนอกลดลง จึงไม่สามารถทดแทนน้ำที่ผิวอย่างต่อเนื่องได้ จนกระทั่งถึงจุดความชื้นสมดุล

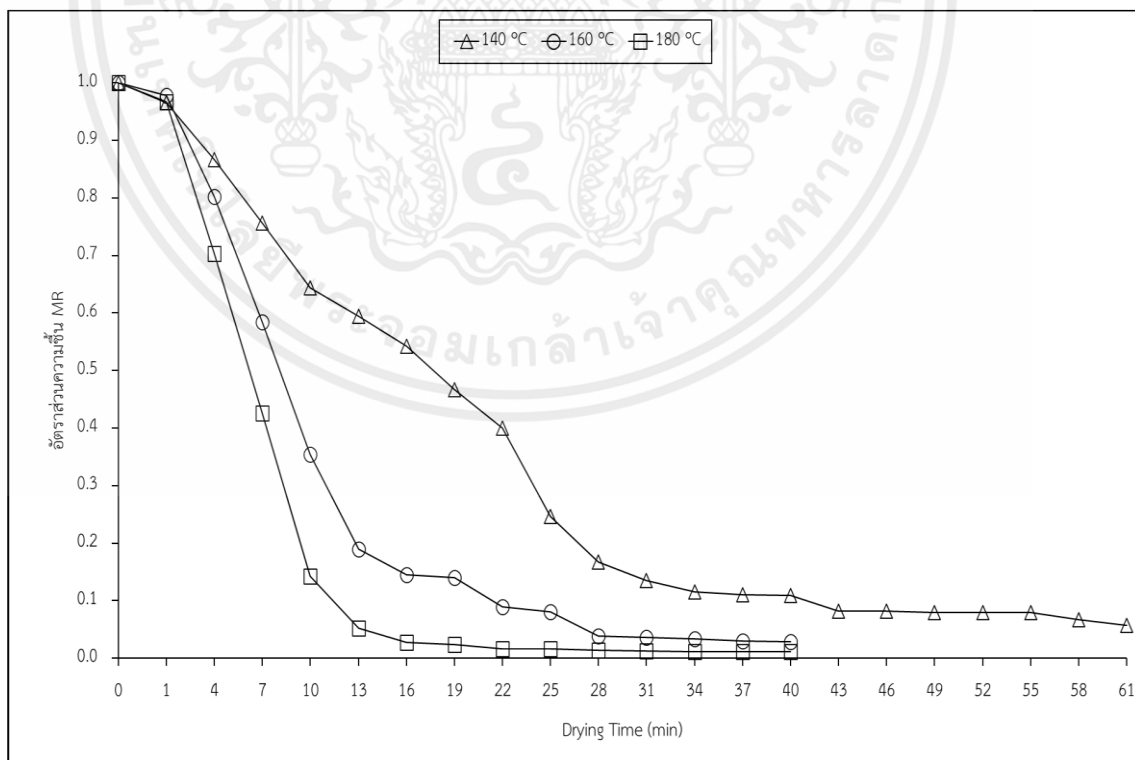
ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของณัฐธนนันท์ กิริติธาดาธนภัทร และประทีป ตุ่มทอง (2559) ได้ศึกษาการอบแห้งไข่น้ำด้วยเทคนิคฟลูอิดไรซ์เบด พบว่าจากการเปรียบเทียบที่ความเร็วลมเดียวกัน การอบแห้งที่อุณหภูมิสูงจะให้อัตราการอบแห้งสูงกว่าการอบแห้งที่อุณหภูมิต่ำ นอกจากนั้นยังพบว่าจากความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับเวลา อัตราส่วนความชื้นจะลดลงตามระยะเวลาในระหว่างการอบแห้ง โดยช่วงแรกของการอบแห้งความชื้นจะลดลงอย่างรวดเร็ว หลังจากนั้นความชื้นจะค่อย ๆ ลดลงจนคงที่ในที่สุด

ตารางที่ 4.2 เวลา, อัตราอบแห้งสูงสุด และอัตราอบแห้งเฉลี่ยของถั่วลิ้นเตา

Treatment	Drying Time (min)	Maximum drying rate (%wb/min)	Average drying rate (%wb/min)
140 °C	60.0	3.68	1.16 ± 1.13
160 °C	17.5	5.29	1.67 ± 1.98
180 °C	15.0	6.58	1.76 ± 2.63

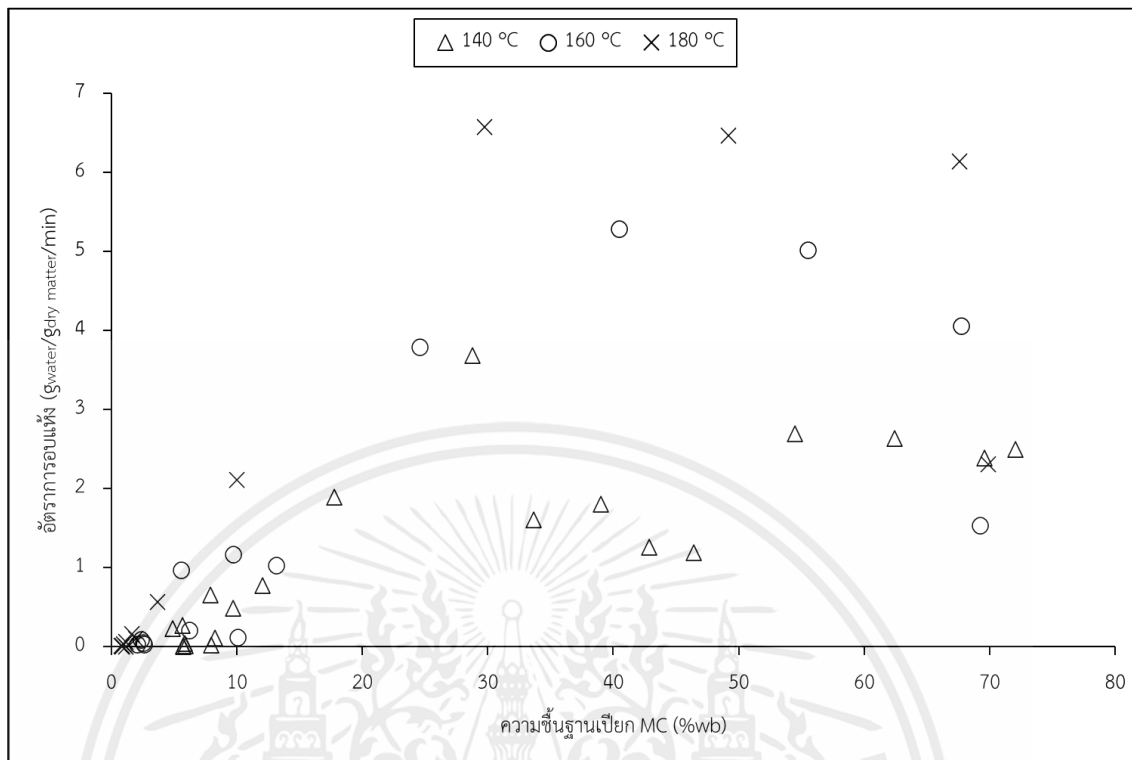


รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นฐานเปียก และเวลาอบแห้งของถั่วลิ้นเตา



รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้น และเวลาอบแห้งของถั่วลิ้นเตา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการอบแห้ง และความชื้นฐานเปียกของถั่วลิ้นเตา

4.3 สมบัติทางกายภาพของถั่วลิ้นเตา

ในการวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพของถั่วลิ้นเตาอบกรอบที่มีความชื้นสุดท้ายของถั่วลิ้นเตาน้อยกว่า 4.5 %wb ประกอบด้วย การวิเคราะห์ปริมาณน้ำอิสระ, ค่าสี, ลักษณะโครงสร้างภายใน, ความหนาแน่นรวม และการวิเคราะห์ความแข็งเป็นการวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพเชิงลึก โดยเป็นการวิเคราะห์ลักษณะที่เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้ง จากการทดลองการอบแห้งแบบฟลูอิดไอซ์เบดด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่อุณหภูมิ 140, 160 และ 180 °C พบว่าอุณหภูมิมีอิทธิพลในการเปลี่ยนแปลงลักษณะทางกายภาพของถั่วลิ้นเตา

4.3.1 ปริมาณน้ำอิสระ (a_w)

ปริมาณน้ำอิสระ เป็นตัวบ่งชี้ปริมาณน้ำที่ต่ำที่สุดในอาหารที่จุลินทรีย์สามารถนำไปใช้ในการเจริญเติบโต และใช้ในการเกิดปฏิกิริยาเคมีต่าง ๆ ได้ ซึ่งหากมีค่าเกินมาตรฐาน จะส่งผลต่อระยะเวลาในการเก็บรักษาของผลิตภัณฑ์ จากตารางที่ 4.3 แสดงค่าปริมาณน้ำอิสระของถั่วลิ้นเตาแต่ละอุณหภูมิการอบแห้ง พบว่ามีปริมาณน้ำอิสระเป็นไปตามมาตรฐานของอาหารแห้ง คือ a_w น้อยกว่า 0.6 จึงกล่าวได้ว่า ถั่วลิ้นเตาอบกรอบมีความปลอดภัยต่อผู้บริโภคเป็นอย่างยิ่ง

ตารางที่ 4.3 ค่าปริมาณน้ำอิสระในแต่ละอุณหภูมิการอบแห้ง

Treatment	ปริมาณน้ำอิสระ
140 °C	0.45 ^c ± 0.01
160 °C	0.26 ^a ± 0.01
180 °C	0.41 ^b ± 0.01

4.3.2 การวิเคราะห์ค่าสี

จากตารางที่ 4.4 เป็นการแสดงค่าสีแต่ละเงื่อนไขการอบแห้ง ได้แก่ ค่าความสว่าง (L*) ค่าความเป็นสีเขียว (-a*) และค่าความเป็นสีเหลือง (b*) ของถั่วลันเตาหลังผ่านการอบแห้ง พบว่า อุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้งมีผลทำให้ค่าความสว่าง ค่าความเป็นสีเขียว และค่าความเป็นสีเหลืองของ ถั่วลันเตาแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ โดยที่อุณหภูมิสูงทำให้ใช้เวลาในการอบแห้งลดลง ดังนั้น ระยะเวลาที่ถั่วลันเตาสัมผัสกับไอน้ำร้อนยวดยิ่งจึงน้อยลงด้วย ส่งผลให้ถั่วลันเตาที่อบแห้งในอุณหภูมิ 180 °C มีสีของถั่วลันเตาความแตกต่างจากก่อนทำการอบแห้งน้อยที่สุด โดยค่าความสว่างมีสีที่ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ และค่าความเป็นสีเขียวมีความใกล้เคียงก่อนอบแห้งมากที่สุด ในขณะที่ถั่วลันเตาที่อบแห้งในอุณหภูมิ 140°C และ 160°C มีค่าความเป็นสีแดงและค่าความเป็นสีเหลืองมากที่สุดและที่อุณหภูมิทั้ง 2 มีค่าความเป็นสีแดงและค่าความเป็นสีเหลืองไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ

ตารางที่ 4.4 ค่า L*, a* และ b* ของถั่วลันเตาในแต่ละเงื่อนไข





Treatment	L*	a*	b*
ก่อนอบ	43.08 ^{bc} ± 1.02	-14.84 ^a ± 0.65	32.28 ^c ± 1.30
140 °C	39.82 ^a ± 0.28	4.69 ^c ± 0.12	25.65 ^b ± 0.24
160 °C	43.58 ^c ± 0.55	4.35 ^c ± 0.26	26.08 ^b ± 0.22
180 °C	42.61 ^b ± 0.26	0.35 ^b ± 0.09	24.36 ^a ± 0.60

4.3.3 การวิเคราะห์ลักษณะทางโครงสร้าง

จากตารางที่ 4.5 แสดงลักษณะโครงสร้างของถั่วลันเตาก่อนและหลังการอบแห้งแบบ ฟลูอิดเบดด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งในแต่ละอุณหภูมิการอบแห้ง พบว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นด้านใน โครงสร้างโพรงอากาศมีขนาดใหญ่มากขึ้น เป็นผลอันเนื่องมาจากช่วงอัตราการอบแห้งคงที่ อัตราการ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถ่ายเทความร้อนไปยังผิวของถั่วลิ้นเต่าสอดคล้องกับอุณหภูมิของไอน้ำร้อนยวดยิ่ง เมื่อถั่วลิ้นเต่าได้รับความร้อนที่สูงขึ้นของไอน้ำร้อนยวดยิ่งจะทำให้โมเลกุลของน้ำที่แทรกตัวในโครงสร้างขยายตัวและเคลื่อนที่มาที่ผิวอย่างรวดเร็ว ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Zielinska, M. et.al. (2013) ได้ศึกษาการอบแห้งถั่วลิ้นเต่าแบบหลายขั้นตอนร่วมกับการใช้ป้อนความร้อนและไมโครเวฟภายใต้สภาวะสุญญากาศ พบว่าในตัวอย่างถั่วลิ้นเต่าที่ทำการอบแห้งแบบไมโครเวฟภายใต้สภาวะสุญญากาศ โครงสร้างภายในได้สร้างความดันไอขนาดใหญ่ที่กึ่งกลางของถั่วลิ้นเต่า และในตัวอย่างถั่วลิ้นเต่าที่ทำการอบแห้งแบบแช่เยือกแข็งด้วยฟลูอิด์เบดโดยใช้ป้อนความร้อนร่วมกับไมโครเวฟภายใต้สภาวะสุญญากาศนั้น มีอุณหภูมิที่ต่ำกว่าทำให้มีการขยายของไอที่มีขนาดใหญ่น้อยกว่า เนื่องจากมีอุณหภูมิที่ต่ำกว่ากระบวนการเปลี่ยนแปลงส่วนใหญ่จึงต่ำกว่า ซึ่งทำให้ถั่วลิ้นเต่าในขั้นสุดท้ายมีความพรุนสูงกว่าแต่ขนาดรูพรุนเล็กกว่า

ตารางที่ 4.5 โครงสร้างภายในของถั่วลิ้นเต่าในแต่ละเงื่อนไข

Treatment	โครงสร้างภายใน
ก่อนอบ	
140 °C	
160 °C	
180 °C	

4.3.4 การวิเคราะห์ความหนาแน่นรวม

จากผลการวิเคราะห์ความหนาแน่นรวมของถั่วลันเตาก่อนการอบแห้ง ที่ความชื้นเริ่มต้นเท่ากับ 70.40 ± 1.48 %wb และถั่วลันเตาหลังการอบแห้งแบบฟลูอิดไรซ์เบดด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่อุณหภูมิ 140, 160 และ 180 °C ที่มีความชื้นสุดท้ายน้อยกว่า 4.5 %wb แสดงดังตารางที่ 4.6 พบว่าถั่วลันเตาทั้งก่อนการอบแห้งและหลังการอบแห้งในแต่ละอุณหภูมิมีความหนาแน่นรวมแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ เมื่ออุณหภูมิไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่ใช้ในการอบแห้งสูงขึ้น ทำให้ความหนาแน่นรวมของถั่วลันเตาลดลง โดยที่อุณหภูมิไอน้ำร้อนยวดยิ่ง 180 °C มีความหนาแน่นรวมน้อยที่สุด ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Zielinska, M. et.al. (2013) ได้ศึกษาการอบแห้งถั่วลันเตาแบบหลายขั้นตอนร่วมกับการใช้ป้มความร้อนและไมโครเวฟภายใต้สภาวะสุญญากาศ พบว่าในตัวอย่างถั่วลันเตาที่ทำการอบแห้งแบบไมโครเวฟภายใต้สภาวะสุญญากาศ โครงสร้างภายในได้สร้างความดันไอขนาดใหญ่ที่กึ่งกลางของถั่วลันเตา ซึ่งทำให้ลดความหนาแน่นของถั่วลันเตา แต่ในตัวอย่างถั่วลันเตาที่ทำการอบแห้งแบบแช่เยือกแข็งด้วยฟลูอิดไรซ์เบดโดยใช้ป้มความร้อนร่วมกับไมโครเวฟภายใต้สภาวะสุญญากาศนั้น มีอุณหภูมิที่ต่ำกว่าทำให้มีการขยายของไอที่มีขนาดใหญ่กว่า เนื่องจากมีอุณหภูมิที่ต่ำกว่ากระบวนการเปลี่ยนแปลงส่วนใหญ่จึงต่ำกว่าและความหนาแน่นของถั่วลันเตาจึงมากกว่า

ตารางที่ 4.6 ค่าความหนาแน่นรวมของถั่วลันเตาในแต่ละเงื่อนไข

Treatment	Bulk density (g/cm ³)
ก่อนอบ	$0.55^d \pm 0.01$
140 °C	$0.30^c \pm 0.01$
160 °C	$0.27^b \pm 0.01$
180 °C	$0.24^a \pm 0.01$

4.3.5 การวิเคราะห์ความแข็ง

จากตารางที่ 4.7 แสดงค่าความแข็งของถั่วลันเตาหลังการอบแห้งแบบฟลูอิดไรซ์เบดด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งในแต่ละอุณหภูมิการอบแห้ง จากการศึกษาวิเคราะห์ทางสถิติพบว่าค่าความแข็งของถั่วลันเตาที่อุณหภูมิ 140, 160 และ 180 °C ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Zielinska, M. et.al. (2013) ได้ศึกษาการอบแห้งถั่วลันเตาแบบหลายขั้นตอนร่วมกับการใช้ป้มความร้อนและไมโครเวฟภายใต้สภาวะสุญญากาศ พบว่าในตัวอย่างถั่วลันเตาภายใต้ทุกสภาวะการทดลองแสดงให้เห็นว่า ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญในทางสถิติของแรงกดสูงสุดที่กระทำกับตัวอย่างถั่วลันเตาภายใต้สภาวะที่แตกต่างกัน

ตารางที่ 4.7 ค่าความแข็งถั่วลิ้นเตาในแต่ละอุณหภูมิการอบแห้ง

Treatment	Hardness (N)
140 °C	27.92 ^a ± 11.56
160 °C	24.29 ^a ± 8.66
180 °C	27.67 ^a ± 10.97



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย

5.1 สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาจลนพลศาสตร์ของการอบแห้งถั่วลิ้นเตาแบบฟลูอิดไคซ์เบดด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง และอิทธิพลของอุณหภูมิในการอบแห้งแบบฟลูอิดไคซ์เบดด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งต่อคุณภาพของถั่วลิ้นเตา โดยวิธีการศึกษาการอบแห้งแบบฟลูอิดไคซ์เบดด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง ได้ทำทดลองหาความเร็วที่ทำให้เกิดฟลูอิดไคซ์ชัน (U_{mf}) และความเร็วไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่เหมาะสมในการอบแห้งถั่วลิ้นเตา และทำการทดลองลดปริมาณความชื้นสามารถสรุปผลการทดลองได้ดังนี้

1. ความเร็วที่ทำให้เกิดปรากฏการณ์ฟลูอิดไคซ์ชัน (U_{mf}) เท่ากับ 4.4 m/s และความเร็วที่เหมาะสมในการอบแห้งถั่วลิ้นเตา (U_T) เท่ากับ $1.36U_{mf}$ m/s

2. อธิบายพฤติกรรมของการอบแห้งแบบฟลูอิดไคซ์เบดด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งโดยพิจารณาจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่มีค่า R^2 สูงที่สุด พบว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Page ที่อุณหภูมิ 140, 160 และ 180 °C มีค่า R^2 สูงที่สุดเท่ากับ 0.987, 0.991 และ 0.998 ตามลำดับ

3. การอบแห้งถั่วลิ้นเตาที่อุณหภูมิ 140, 160 และ 180 °C จนกระทั่งตัวอย่างมีความชื้นสุดท้ายน้อยกว่า 4.5 %wb เป็นเวลา 60, 17.5 และ 15 min ตามลำดับ

4. ผลกระทบของอุณหภูมิในการอบแห้งแบบฟลูอิดไคซ์เบดด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่สูงขึ้นมีอิทธิพลต่อเวลาในการอบแห้งที่ลดลงและอัตราการอบแห้งที่สูงขึ้น การอบแห้งแบบฟลูอิดไคซ์เบดด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่อุณหภูมิ 180 °C ใช้เวลาในการอบแห้งน้อยที่สุดคือ 15 min และอัตราการอบแห้งเฉลี่ยมากที่สุดคือ 1.76 %wb/min

5. ผลกระทบของอุณหภูมิไอน้ำร้อนยวดยิ่งมีผลทำให้ค่าความสว่าง ค่าความเป็นสีเขียว และค่าความเป็นสีเหลืองของถั่วลิ้นเตาแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ และอุณหภูมิไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่สูงขึ้นทำให้เวลาในการอบแห้งลดลง ในการอบแห้งแบบฟลูอิดไคซ์เบดด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่อุณหภูมิ 180 °C ส่งผลให้ถั่วลิ้นเตามีค่าความสว่างที่ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญกับถั่วลิ้นเตาก่อนการอบแห้ง และมีความเป็นสีเขียวใกล้เคียงกับก่อนทำการอบแห้งมากที่สุด

6. ผลกระทบของอุณหภูมิไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่สูงขึ้น ด้านในโครงสร้างโพรงอากาศมีขนาดใหญ่มากขึ้น เป็นผลอันเนื่องมาจากถั่วลิ้นเตาที่ได้รับความร้อนที่สูงขึ้นทำให้โมเลกุลของน้ำที่แทรกตัวในโครงสร้างขยายตัวและเคลื่อนที่มาที่ผิวของถั่วลิ้นเตาอย่างรวดเร็ว

7. ผลกระทบของอุณหภูมิไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่สูงขึ้น ทำให้ความหนาแน่นรวมของถั่วลิ้นเตาลดลง โดยที่อุณหภูมิไอน้ำร้อนยวดยิ่ง 180 °C มีความหนาแน่นรวมน้อยที่สุด

8. ค่าความแข็งถั่วลิ้นเตาที่อุณหภูมิ 140, 160 และ 180 °C ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ควรมีการทดสอบทางประสาทสัมผัสเพื่อเป็นตัวบ่งบอกถึงความพึงพอใจของผู้บริโภคต่อผลิตภัณฑ์
2. ควรมีการศึกษาการใช้พลังงานการอบแห้งแบบฟลูอิดไรเซชันด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง เพื่อหาความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บรรณานุกรม

- กรกช ภูไพบูลย์. 2545. "การอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเครื่องอบแห้งพัลส์ฟลูอิดไคซ์เบต". วิทยานิพนธ์ วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต เทคโนโลยีการจัดการพลังงาน, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี พระจอมเกล้าธนบุรี.
- กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน. 2004. ตอนที่ 4 บทที่ 4 การอนุรักษ์พลังงานในระบบอื่น ๆ. **ตำราฝึกอบรมผู้รับผิดชอบด้านพลังงานอาวุโส (ผอส.) ด้านความร้อน**. 4-33-4-51.
- กรมส่งเสริมการเกษตร. 2555. **การปลูกถั่วลิสงเตา**. กรุงเทพฯ : บริษัท สุวรรณการพิมพ์ (ประเทศไทย) จำกัด.
- กองบรรณาธิการฐานเกษตรกรรม. 2541. **รวมเรื่องผัก**. พิมพ์ครั้งที่ 5. นนทบุรี : โรงพิมพ์มิตรสยาม.
- ณัฐธินันท์ กิริติญาดาธนภัทร และประทีป ตุ่มทอง. 2559. "การอบแห้งชิ้นน้ำด้วยเทคนิค ฟลูอิดไคซ์เบต". **วารสารวิทยาศาสตร์ คชสารสนเทศ**. คณะเกษตรศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี วิทยาเขตสุรินทร์.
- นริศร ลักขณานุกรักษ์. 2564. **ผักและผลไม้อบกรอบรับประทานอย่างไรให้เกิดประโยชน์**. กรุงเทพฯ : จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- นิพนธ์ ไชยมงคล. 2554. **ถั่วลิสงเตา**. เชียงใหม่ : มหาวิทยาลัยแม่โจ้.
- นิธิยา รัตนานพนธ์. 2544. **หลักการแปรรูปอาหารเบื้องต้น**. กรุงเทพฯ : โอเดียนสโตร์.
- นุชนารถ ททรัพย์พาณิชย์. 2545. "Water activity กับการควบคุมอายุการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์อาหาร." **วารสารจารย์พา**. 9(68) : 48-51.
- มนตรี หวังจิ, สมชาติ โสภณรณฤทธิ์ และ สมบูรณ์ เวชกามา. 2540. "การอบแห้งถั่วเหลืองโดยเทคนิค ฟลูอิดไคซ์เบต." หน้า 534-548. ใน **การประชุมใหญ่ทางวิชาการประจำปี 2540 ของ วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์**. กรุงเทพฯ : วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์.
- มูลนิธิโตโยต้าแห่งประเทศไทย. 2540. **มหัศจรรย์ผัก 108**. กรุงเทพฯ : มหาวิทยาลัยมหิดล.
- รุ่งนภา พงศ์สวัสดิ์มานิต. 2536. **วิศวกรรมแปรรูปอาหาร**. นครปฐม : โอเดียนสโตร์.
- เริงชัย ชุ่มภิรมย์. 2532. "ถั่วลิสงเตารับประทานเมล็ด." **กสิกรรม**. 62(2) : 147-149.
- วรมธ ทัดทอง. 2547. "การศึกษาเชิงทดลองการอบแห้งเมล็ดกาแฟด้วยเทคนิคฟลูอิดไคซ์เบต". วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล สถาบันเทคโนโลยี พระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

- วัชรินทร์ ดงบัง, วรเชษฐ์ ภิรมย์ภักดี และกิตติชัย ไตรรัตน์ศิริชัย. 2552. “แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ การอบแห้งผักถั้วลิสงด้วยเทคนิคฟลูอิดไดซ์เบด.” ใน **รายงานการประชุมวิชาการเครือข่าย วิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 23**. เชียงใหม่ : มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.
- ศุภฤกษ์ ชามงคลประดิษฐ์ และคณะ (2550). “การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการอบแห้งพริกแบบต่อเนื่อง โดยใช้กระบวนการอบแห้งตามเทคนิคฟลูอิดไดซ์เบด.” ใน **การประชุมวิชาการเครือข่าย วิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย**. ชลบุรี. เครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย.
- สถาบันอาหาร. 2535. **มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมถั้วกรอบปรุงรส (มอก. 1089-2535)**. กรุงเทพฯ : ฐานข้อมูลสถาบันอาหาร.
- สมชาติ โสภณรณฤทธิ. 2540. **การอบแห้งเมล็ดพืช และอาหารบางประเภท**. พิมพ์ครั้งที่ 3. กรุงเทพฯ : มหาวิทยาลัยพระจอมเกล้าธนบุรี.
- สมศักดิ์ ดำรงค์เลิศ. 2528. **ฟลูอิดไดซ์ชั่น**. กรุงเทพฯ : จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- สักกมน เทพหัสดิน ณ อยุธยา. 2555. **การอบแห้งอาหารและวัสดุชีวภาพ Drying of Foods And Biomaterials**. กรุงเทพฯ : บริษัท สำนักพิมพ์ท็อป จำกัด.
- เอกพงษ์ ชีวดีโสภณ และเกียรติศักดิ์ รุ่งพระแสง. 2556. “อิทธิพลของอุณหภูมิอบแห้งต่อคุณภาพ ของข้าวกล้องงอกกิ่งสำเร็จรูปด้วยเทคนิคฟลูอิดไดซ์เบด.” **วารสารวิทยาศาสตร์เกษตร**. 44(2) : 465-468.
- อำนาจ บุญลอย, ประสิทธิ์ คำพันธ์ และพงษ์เจต พรหมวงศ์. 2550. “การอบแห้งพริกไทยในหอมี **ครีบบแบบฟลูอิดไดซ์หมุนควง**”. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- AOAC. 1995. **Methods of Association of Official Chemists**. 16th ed. Gaithersburg, MD, USA : Official Analytical International.
- AOAC. 2000. **Methods of Association of Official Chemists**. 17th ed. Arlington, VA, USA : Official Analytical International.
- Chulalaksananukul, P. et. al. 2021. “Development of Food Color and Color Properties Of Beetroot.” **Srinakharinwirot University Journal of Science and Technology**. 13(26) : 73-82.
- Iyota, H. et. al. 2001. “Drying of Sliced Raw Potatoes in Superheated Steam and Hot Air.” **Drying Technology**. 19 : 1411-1424.
- Kassem, R.S. et. al. 2011. “Improving Yield, Quality and Profitability of FlameSeedless Grapevine Grown Under Aird Environmental by Growth Regulators Preharvest Applications.” **Middle East Journal of Scientific Research**.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- Kumar. 2018. **ความรู้พื้นฐานและเทคนิคชีวฟิสิกส์และชีววิทยาโมเลกุล**. นิวเดลี : สิ่งพิมพ์ของผู้เบิกทาง.
- Kunii, D. and Levenspiel, O. 1991. **“Fluidization Engineering.”** 2nd Edition. Massachusetts : Butterworth-Heinemann.
- Prachayawarakorn, S. et. al. 2002. “Desorption Isotherms and Drying Characteristics of Shrimp in Superheated Steam and Hot Air.” **Drying Technology**. 20 : 669-684.
- Prakobsang, J. et. al. 2021. “Effect of Vibration Assisted Infrarad Drying Under Vacuum Condition on Quality of Centella Asiatica Tea.” Master of Engineering Thesis Department of Food Engineering, King Mongkut’s Institute of Technology Ladkrabang.
- Rordprapat, W. et. al. 2005. “Comparative Study of Fluidized Bed Paddy Drying Using Hot Air and Superheated Steam.” **Journal of Food Engineering**. 71 : 28-36.
- Prachayawarakorn, S. et. al. 2006. “Heating process of soybean using hot-air and superheated-steam fluidized-bed dryers.” **LWT - Food Science and Technology**. 39(7) : 770-778.
- Soponronnarit, S. et. al. 2006. “Parboiling Brown Rice Using Superheated Steam Fluidization Technique.” **Journal of food Engineering**. 75 : 426-432.
- Sornsomboonsuk, S. 2018. “Development of Instant Bael Powder Product by Spray Drying.” Master of Engineering Thesis Department of Mechanical Engineering and Process Systems, Suranaree University of Technology.
- Takahiro Orikasa and Akio Tagawa. 2007. “Vacuum drying characteristics of eggplants.” **Journal of Food Engineering**. 83(3) : 422-42
- Tindall, H.D. 1983. **Vegetables in the Tropics**. London : Macmillan Press.
- Zielinska, M. et. al. 2013. “A multi-stage combined heat pump and microwave vacuum drying of green peas.” **Journal of Food Engineering**. 115(3) : 347-356.