

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

เครื่องอบแห้งฟลูอิดไดซ์เบดที่มีการขยายหลายช่วง

A FLUIDIZED-BED DRYER WITH MULTIPLE EXPANSIONS



ปริญญาบัตรนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2549

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เครื่องอบแห้งฟลูอิดไดซ์เบดที่มีการขยายหลายช่วง
A FLUIDIZED-BED DRYER WITH MULTIPLE EXPANSIONS

นายสมยศ ภูักัดพันธ์

นายชวลิตส์ จิตรเที่ยง

อาจารย์ที่ปรึกษา

รศ.ดร.พงษ์เจต พรหมวงศ์

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2549

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญานิพนธ์ปีการศึกษา 2549

ภาควิชา วิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง เครื่องอบแห้งฟลูอิดไคซ์เบดที่มีการขยายหลายช่วง

A FLUIDIZED-BED DRYER WITH MULTIPLE EXPANSIONS

ผู้จัดทำ

1.นายสมยศ ภูักคิพันธ์ รหัสประจำตัว 47015377

2.นายชวลิตส์ จิตรเที่ยง รหัสประจำตัว 47015389



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เครื่องอบแห้งฟลูอิดไดซ์เบดที่มีการขยายหลายช่วง

นายสมยศ ภู่อักคิพันธ์ 47015377
นายชวลิตส์ จิตรเที่ยง 47015389
รศ.ดร.พงษ์เจต พรหมวงศ์ อาจารย์ที่ปรึกษา
ปีการศึกษา 2549

บทคัดย่อ

โครงการนี้เป็นการศึกษาเกี่ยวกับการอบแห้งเมล็ดพริกไทยด้วยเทคนิคฟลูอิดไดซ์เบดที่มีการขยายหลายช่วง เพื่อคู่อธิพลของความเร็วลม อุณหภูมิและมุมของแผ่นขยายในเบดต่อการอบแห้งที่เหมาะสม เพื่อให้การอบแห้งมีประสิทธิภาพพดีที่สุด จะทำการทดลองโดยใช้ห่ออะคลิลิกใส ในห่อจะใส่แผ่นขยาย โดยลักษณะของห่อทดลองเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้า มีพื้นที่หน้าตัด กว้าง 80 มม. ยาว 200 มม. และสูง 1000 มม. ส่วนด้านล่างของห่อทดลองใช้แผ่นกระจายลม ซึ่งเป็นช่องทางให้อากาศไหลพุ่งภายในเบด ในการทดลองใช้เมล็ดพริกไทยที่มีความชื้นเริ่มต้นประมาณ 75 เปอร์เซ็นต์ (มาตรฐานเปียก) เริ่มทดลองใช้อากาศแห้งทางเข้าในช่วงที่อุณหภูมิ 60, 80 และ 100 องศาเซลเซียส มุมของแผ่นขยายที่ใช้ 30 องศา และใช้ความเร็วของอากาศภายในห่อทดลองที่ $1.2 U_{crit}$ และ $2.0 U_{crit}$ โดยใช้เวลาทดลองในแต่ละกรณี 2 ชั่วโมง วัดความชื้นของเมล็ดพริกไทยทุก ๆ 5 นาที จากผลการทดลองการอบแห้งแบบฟลูอิดไดซ์เบดที่มีการขยายหลายช่วง ดิกว่าการอบแห้งแบบฟลูอิดไดซ์เบดธรรมดาหรือหอโล่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

A FLUIDIZED-BED DRYER WITH MULTIPLE EXPANSIONS

Mr. Somyos Pupakdecpunt 47015377

Mr. Chawalit Jittiang 47015389

Assoc.prof.Dr.Pongjet Promvonge Advisor

ABSTRACT

The paper deals with a drying characteristic study of pepper corns in a fluidized-bed with multiple expansions. This study is to optimize velocity, drying temperature to obtain maximum efficiencies at a bed expansion angle. In the experiment, the bed with rectangular cross section of 80x 200 mm with 1000 mm height is introduced. The distributor plate is used to provide jet-flow in the bed. The pepper corns with initial moisture content of about 75% (w.b.) are employed as a drying sample. The experiments are conducted by using inlet drying-air temperature at 60, 80 and 100°C, bed-expansion angle of 30° and hot-air velocity at $1.2U_{mf}$ and $2.0U_{mf}$. Drying time and weight of pepper corns are measured in every 5 min for about 120 min. The experimental results reveal that the bed with multiple expansions performs better than the typical bed for all cases.

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาบัตรฉบับนี้คงไม่อาจสำเร็จได้ด้วยดี หากไม่ได้รับความช่วยเหลือ และความร่วมมือ จากหลาย ๆ ฝ่ายด้วยกัน บุคคลท่านแรกที่ต้องกล่าวถึงเพราะเป็นส่วนสำคัญที่ทำให้ปริญญาบัตรนี้เสร็จ ลงได้ก็คือ รศ.ดร.พงษ์เจต พรหมวงศ์ อาจารย์ที่ปรึกษาปริญญาบัตร และรุ่นพี่ปริญญาโท ที่ให้ความเอาใจใส่แนะนำ ให้คำปรึกษา และช่วยเหลือเสมอมา ซึ่งต้องขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

และต้องขอขอบพระคุณบุคคลที่สำคัญที่สุดที่ทำให้ข้าพเจ้ามีวันนี้ ก็คือ บิดา มารดา อันเป็นที่เคารพรักยิ่ง ซึ่งได้เลี้ยงดูผู้เขียนมาเป็นอย่างดี พร้อมให้โอกาสในการศึกษาอย่างเต็มที่ และยังคงคอยให้กำลังใจ เอาใจใส่เสมอมา ในทุก ๆ ด้านอันหาที่เปรียบมิได้ ข้าพเจ้าขอระลึกในพระคุณอันสุดประมาณ และขอกราบขอบพระคุณมา ณ ที่นี้ด้วย

คุณค่าและประโยชน์ใด ๆ ที่เป็นผลอันเนื่องจากวิทยานิพนธ์ ผู้วิจัยขอบแต่ผู้มีพระคุณทุกท่าน

นายสมยศ ภูักคิพันธ์

นายชวลิตส์ จิตรเทียง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VII
สารบัญรูป.....	VIII
สัญลักษณ์.....	X
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 สถานภาพและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	2
บทที่ 2 วรรณกรรมปริทรรศน์	
2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวกับเทคนิคฟลูอิดไดเซชัน.....	3
2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการอบแห้งและแบบจำลองทางคณิตศาสตร์.....	3
บทที่ 3 ทฤษฎี	
3.1 ทฤษฎีฟลูอิดไดเซชัน.....	9
3.1.1 ประเภทของฟลูอิดไดเซชัน.....	9
3.1.2 ลักษณะของฟลูอิดไดซ์เบด.....	9
3.2 กลศาสตร์ของฟลูอิดไดเซชัน.....	11
3.2.1 ความเป็นทรงกลม.....	11
3.2.2 สัดส่วนช่องว่าง.....	11
3.2.3 การหาความเร็วค่าสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดไดเซชัน.....	12
3.2.4 ความเร็ววิกฤติของเม็ดของแข็งในของไหลอยู่นิ่ง.....	13
3.3 กระบวนการอบแห้ง.....	14
3.3.1 ช่วงอัตราการอบแห้งคงที่.....	14
3.3.2 ช่วงอัตราการอบแห้งลดลง.....	15
3.4 นิยามความชื้นในวัสดุ.....	16
3.5 หลักการอบแห้งเมล็ดพืช.....	16
3.5.1 การได้เปรียบและเสียเปรียบของฟลูอิดไดเซชัน.....	17

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.6 ความชื้นสัมพัทธ์ของวัสดุ.....	17
3.7 ผลกระทบของอุณหภูมิในการอบแห้งต่อคุณภาพของเมล็ดพืชหลังการอบ.....	18
3.8 ก๊าซฟลูอิดไดเซชัน.....	18
3.9 การหาความเร็วของก๊าซในหอทดลองฟลูอิดไดซ์เบด.....	19
3.10 ฟลูอิดไดเซชันความเร็วของไหลต่ำสุด.....	19
บทที่ 4 การออกแบบเครื่องอบที่คิดค้นขยาย	
4.1 การออกแบบแผ่นขยายที่คิดค้น 30 องศา.....	20
4.2 แบบของหอทดลอง.....	21
บทที่ 5 อุปกรณ์และวิธีการทดลอง	
5.1 อุปกรณ์ในการทดลอง.....	22
5.1.1 เครื่องอบแห้งฟลูอิดไดซ์เบดที่มีการขยายหลายช่วง.....	22
5.1.2 ชุดป้อนอากาศ.....	23
5.1.3 ชุดควบคุมความเร็วรอบของชุดป้อนอากาศ.....	23
5.1.4 เครื่องมือวัดความเร็วของอากาศ.....	24
5.1.5 ชุดให้ความร้อน.....	24
5.1.6 ตัวควบคุมอุณหภูมิชุดให้ความร้อน.....	25
5.1.7 ชุดวัดอัตราการไหลของอากาศ.....	25
5.1.8 อุปกรณ์ซึ่งน้ำหนักของเมล็ดพืชไทย.....	26
5.2 พารามิเตอร์ในการทดลอง.....	27
5.3 ลำดับการทดลอง.....	27
5.3.1 การหาค่าความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดไดเซชัน.....	27
5.3.2 ขั้นตอนการอบแห้งเมล็ดพืชไทยโดยใช้เทคนิคฟลูอิดไดซ์เบด.....	27
5.4 การติดตั้งเครื่องอบแห้งฟลูอิดไดซ์เบดที่มีการขยายหลายช่วง.....	28
บทที่ 6 ผลการทดลอง	
6.1 แสดงการเปรียบเทียบระหว่างปริมาณความชื้นกับเวลา ของหอทดลองแบบต่าง ๆ.....	29
6.2 เปรียบเทียบฟลูอิดไดซ์เบดที่อุณหภูมิต่าง ๆ.....	33

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 7 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	
7.1 สรุปผลการทดลอง.....	35
7.2 ข้อเสนอแนะ.....	35
บรรณานุกรม.....	36
ภาคผนวก.....	38
ภาคผนวก ก.....	39
ภาคผนวก ข.....	50
ภาคผนวก ค.....	63



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
3.1 พฤติกรรมการเกิดฟลูอิดไดเซชัน.....	10
3.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความเป็นทรงกลมกับสัดส่วนช่องว่าง.....	12
3.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันลดกับความเร็วอากาศ.....	13
3.4 ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นของแข็งและเวลาในการอบแห้ง.....	15
4.1 รูปแผ่นขยายทำมุม 30 องศา.....	20
4.2 รูปหอตลอดที่ติดแผ่นขยายทำมุม 30 องศา.....	21
5.1 หอตลอด.....	22
5.2 ชุดป้อนอากาศ.....	23
5.3 ชุดควบคุมความเร็วรอบ.....	23
5.4 เครื่องมือวัดความเร็วของอากาศ.....	24
5.5 ชุดให้ความร้อน.....	24
5.6 ตัวควบคุมอุณหภูมิชุดให้ความร้อน.....	25
5.7 ชุดวัดอัตราการไหลของอากาศ.....	25
5.8 มาโนมิเตอร์.....	26
5.9 อุปกรณ์ชั่งน้ำหนัก.....	26
5.10 ผังแสดงชุดอุปกรณ์การทดลองเครื่องอบแห้งฟลูอิดไดซ์เบดที่มีการขยายหลายช่วง.....	28
6.1 กราฟเปรียบเทียบระหว่างปริมาณความชื้นกับเวลา ของหอตลอดไดซ์เบดธรรมดา.....	29
6.2 กราฟเปรียบเทียบระหว่างปริมาณความชื้นกับเวลา ของหอตลอดที่ติดแผ่นขยายทำมุม 30 องศาที่ ระยะห่างระหว่างมุมของหอตลอด 3 เซนติเมตร ความเร็ว 1.2 Umf	30
6.3 กราฟเปรียบเทียบระหว่างปริมาณความชื้นกับเวลา ของหอตลอดที่ติดแผ่นขยายทำมุม 30 องศาที่ ระยะห่างระหว่างมุมของหอตลอด 3 เซนติเมตร ความเร็ว 2.0 Umf	30
6.4 กราฟเปรียบเทียบระหว่างปริมาณความชื้นกับเวลา ของหอตลอดที่ติดแผ่นขยายทำมุม 30 องศาที่ ระยะห่างระหว่างมุมของหอตลอด 2 เซนติเมตร ความเร็ว 1.2 Umf	31
6.5 กราฟเปรียบเทียบระหว่างปริมาณความชื้นกับเวลา ของหอตลอดที่ติดแผ่นขยายทำมุม 30 องศาที่ ระยะห่างระหว่างมุมของหอตลอด 2 เซนติเมตร ความเร็ว 2.0 Umf	31
6.6 กราฟเปรียบเทียบระหว่างปริมาณความชื้นกับเวลา ของหอตลอดที่ติดแผ่นขยายทำมุม 30 องศาที่ ระยะห่างระหว่างมุมของหอตลอด 1 เซนติเมตร ความเร็ว 1.2 Umf	32
6.7 กราฟเปรียบเทียบระหว่างปริมาณความชื้นกับเวลา ของหอตลอดที่ติดแผ่นขยายทำมุม 30 องศาที่ ระยะห่างระหว่างมุมของหอตลอด 1 เซนติเมตร ความเร็ว 2.0 Umf	32

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
6.8 กราฟเปรียบเทียบระหว่างปริมาณความชื้นกับเวลา ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส.....	33
6.9 กราฟเปรียบเทียบระหว่างปริมาณความชื้นกับเวลา ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส.....	33
6.10 กราฟเปรียบเทียบระหว่างปริมาณความชื้นกับเวลา ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส.....	34
ก.1 การหาค่าสัมประสิทธิ์ของ ตะแกรงกระจายอากาศ.....	46



สัญลักษณ์

A	พื้นที่ทรงกลม, เมตร ²
D	สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้น, เมตร ² /วินาที
d	มวลของวัสดุแห้ง (ไม่มีความชื้น), กิโลกรัม
d_p	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเม็ดของแข็ง, เมตร
d_p^*	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเม็ดของแข็งไร้มิติ
g	อัตราเร่งที่เกิดจากแรงดึงดูดของโลก, เมตร ชม. ⁻²
h_p	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนจากอากาศไปสู่วัสดุ
K	ค่าคงที่ของการอบแห้ง
K_p	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวล
k	ค่าคงที่ของการอบแห้ง
k_1	ค่าคงที่ของการอบแห้ง
k_2	ค่าคงที่ของการอบแห้ง
L_{mf}	ความสูงต่ำสุดของเบด, เมตร
M	ปริมาณความชื้น, เศษส่วนมาตรฐานแห้ง
M_d	ความชื้นมาตรฐานแห้ง
M_{eq}	ปริมาณความชื้นที่สถานะสมดุล, เศษส่วนมาตรฐานแห้ง
M_{in}	ปริมาณความชื้นเริ่มต้น, เศษส่วนมาตรฐานแห้ง
M_w	ความชื้นมาตรฐานเปียก
\bar{M}_t	ปริมาณความชื้นเฉลี่ยที่เวลาใดๆ, เศษส่วนมาตรฐานแห้ง
MR	อัตราส่วนความชื้น
N_c	อัตราการระเหยน้ำต่อหน่วยพื้นที่ผิวของวัสดุในช่วงอัตราการอบแห้งคงที่
n	ค่าคงที่ของการอบแห้ง
p	ความดันย่อยของไอน้ำในอากาศ
p_{nh}	ความดันไออิ่มตัวที่อุณหภูมิกระเปาะเปียก
Δp	ความดันต่างของเบด, นิวตัน/เมตร ²
Re_{mf}	เรย์โนลด์สสัมเบอร์ ที่ความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดไดเซชัน
r	รัศมีทรงกลม, เมตร
SP	อัตราการไหลจำเพาะของอากาศ
T	อุณหภูมิอากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัญลักษณ์ (ต่อ)

T_{wh}	อุณหภูมิกระเปาะเปียก
t	ระยะเวลาในการอบแห้ง
u_0	ความเร็วของก๊าซในหอทดลอง
u_{mf}	ความเร็วต่ำสุดของฟลูอิดไดเซชัน, เมตร. วินาที
u_r	ความเร็วตกอิสระของของแข็ง
u_r^*	ความเร็วตกอิสระของเม็ดของแข็งไร้มิติ
V	ปริมาตรทรงกลม, เมตร ³
w	มวลของวัสดุ, กิโลกรัม
ε_m	สัดส่วนช่องว่าง
ε_{mf}	สัดส่วนช่องว่างที่เกิดฟลูอิดไดเซชัน
ϕ	ค่าความเป็นทรงกลม
λ	ความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอ
μ	ความหนืดของของไหล, กิโลกรัม-เมตร. วินาที
ρ_g	ความหนาแน่นของก๊าซ, กิโลกรัม/เมตร ³
ρ_p	ความหนาแน่นของของแข็ง, กิโลกรัม/เมตร ³



บทที่ 1

บทนำ

การอบแห้งเป็นกระบวนการที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรม โดยเฉพาะในอุตสาหกรรมอาหารและมักจะเป็นปฏิบัติการหน่วยสุดท้ายเสมอ เนื่องจากวัสดุอบแห้งมีประเภทรูปร่างและสภาพมากมาย กรรมวิธีที่ประหยัดที่สุดจะต้องเข้าใจหลักการทำงาน ลักษณะพิเศษและ โครงสร้างของเครื่องอบแห้งรวมทั้งมีการเลือกใช้อุปกรณ์และสภาวะเงื่อนไขการทำงานที่เหมาะสมด้วย

สิ่งที่สำคัญที่สุดในการอบแห้งคือ การที่ความร้อนถูกถ่ายเทด้วยวิธีใดวิธีหนึ่งไปยังวัสดุที่มีความชื้น เพื่อไล่ความชื้นนี้ออกโดยการระเหย โดยอาศัยความร้อนที่ได้รับความร้อนแฝงของการระเหย ความร้อนดังกล่าวจะต้องถูกถ่ายเทไปยังวัสดุอย่างมีประสิทธิภาพมากที่สุด

ในการศึกษาการอบแห้งมักจะมีการจำลองเครื่องมือการอบแห้ง ซึ่งมีขนาดใหญ่ให้มีขนาดเล็กลง และกำหนดสภาวะการทำงานให้ได้สภาวะเดียวกันกับการทำงานจริง ผลที่ได้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการออกแบบเครื่องอบแห้งขนาดใหญ่ได้

1.1 สถานภาพและความสำคัญของปัญหา

พริกไทยเป็นพืชเศรษฐกิจที่มีความสำคัญอย่างหนึ่งของจังหวัดจันทบุรี ซึ่งมีการแปรรูปทั้งพริกไทยสดและพริกไทยแห้ง พริกไทยสดจะนำส่งขายตามท้องตลาดทั่วไป และพริกไทยแห้งจะแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ พริกไทยดำและพริกไทยขาว พริกไทยทั้งสองประเภทนี้จะถูกส่งเข้าไปในโรงงานอุตสาหกรรม เพื่อทำการผลิตเป็นพริกไทยป่นต่อไป

ในปัจจุบันเมล็ดพริกไทยที่เก็บจากไร่ของเกษตรกร จะถูกนำมาแยกเอาก้านออกให้เหลือแต่เมล็ดล้วนๆ โดยการใช้เครื่องมือที่เกษตรกรได้ผลิตขึ้นมา จากนั้นเกษตรกรจะนำเอาเมล็ดพริกไทยที่ได้นั้นไปตากแดดเพื่อทำการไล่ความชื้นออกจากเมล็ด จากนั้นนำเมล็ดที่แห้งแล้วไปส่งต่อยังโรงงานอุตสาหกรรมเพื่อนำไปผลิตเป็นพริกไทยป่น แต่วิธีไล่ความชื้นโดยการตากแดดนั้น ต้องพบปัญหาและอุปสรรคมากมาย เช่น สภาพอากาศที่ไม่เอื้ออำนวย บางครั้งฝนตก บางครั้งแสงแดดอ่อน ทำให้เมล็ดพริกไทยเกิดเชื้อรา นอกจากสภาพอากาศแล้วยังมีจุลินทรีย์ แมลงเล็ก ๆ ปัญหาต่าง ๆ เหล่านี้ล้วนแล้วแต่ทำให้เกิดความเสียหายแก่ผลผลิตเมล็ดพริกไทยทั้งสิ้น เพื่อเป็นการแก้ปัญหาดังกล่าวจึงต้องมีเครื่องมือหรืออุปกรณ์ที่ทำให้เมล็ดพริกไทยแห้งเร็ว และมีคุณภาพดีขึ้น

และจากการได้ศึกษาเกี่ยวกับปรากฏการณ์ฟลูอิดไดเซชัน ที่ได้มีการนำมาประยุกต์ใช้ในการอบเมล็ดพืช พบว่าอุณหภูมิและลักษณะการไหลของลมร้อนภายในหอตลอดงมีผลต่อการอบแห้ง จึงได้เกิดความคิดที่จะพัฒนารูปแบบการไหลของลมร้อนภายในหอตลอดงขึ้น เพื่อให้การอบแห้งเมล็ดพริกไทยเร็วขึ้น และมีประสิทธิภาพมากขึ้น

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. ศึกษาหลักการของปรากฏการณ์ฟลูอิดไดเซชัน
2. ประยุกต์การเกิดปรากฏการณ์ฟลูอิดไดเซชันในเครื่องอบแห้งฟลูอิดไดซ์เบดแบบที่มีการคิดแผ่นขยายมุมตรงข้ามกันในกระบวนการอบแห้ง
3. ออกแบบและสร้างเครื่องอบแห้งฟลูอิดไดซ์เบดแบบที่มีการคิดแผ่นขยายมุมตรงข้ามกัน โดยมุมของแผ่นขยาย 30 องศา
4. ศึกษาอิทธิพลของ อุณหภูมิ ความเร็วของกระแสลมร้อนและลักษณะของกระแสลมร้อนที่มีผลต่อการอบแห้ง

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1. ศึกษาและออกแบบเครื่องอบแห้งเมล็ดพริกไทยสดด้วยเทคนิคฟลูอิดไดซ์เบด
2. ทำการทดลองที่อุณหภูมิที่ 60, 80 และ 100 องศาเซลเซียสและใช้ความเร็วในการทดลองของแต่ละหอตดลองที่ $1.2Umf$ และ $2.0Umf$
3. ในการทดลองของห่อที่มีแผ่นขยายทำมุม 30 องศา จะมีการทดลองห่อละ 3 แบบด้วยกัน โดยจะให้มุมของแผ่นขยายมีระยะห่างตั้งแต่ 3 เซนติเมตร 2 เซนติเมตรและ 1 เซนติเมตรตามลำดับ
4. ใช้เวลาในการอบแห้งของแต่ละหอตดลองเป็นเวลา 2 ชั่วโมง และทุก ๆ 5 นาที จะนำมาชั่ง โดยในการชั่งแต่ละครั้งไม่เกิน 10 วินาที
5. นำผลข้อมูลจากการทดลองของหอตดลองแต่ละชนิดมาเปรียบเทียบปริมาณความชื้นที่คงเหลือในเมล็ดพริกไทย

บทที่ 2

วรรณกรรมปริทรรศน์

การอบแห้งผลิตผลทางการเกษตรเป็นกระบวนการหนึ่งในงานด้านเทคโนโลยีหลังการเก็บเกี่ยวที่มีความสำคัญอย่างยิ่งต่อการรักษาคุณภาพ ลดความสูญเสีย และยืดระยะเวลาการเก็บรักษาของผลิตภัณฑ์ เทคโนโลยีการอบแห้งเป็นสิ่งที่ไม่สลับซับซ้อน แต่การวางแผนการดำเนินการอบแห้งภายใต้สภาวะอากาศและเงื่อนไขที่กำหนด เป็นสิ่งจำเป็นที่จะต้องศึกษา ทั้งนี้เพื่อให้ได้วิธีดำเนินการที่เหมาะสมที่สุด และแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ได้ถูกพัฒนาเพื่อนำมาประกอบการอบแห้งของผลิตภัณฑ์ โดยงานวิจัยที่เกี่ยวข้องจะแบ่งเป็น 2 ส่วนหลักๆ คือ

1. งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับเทคนิคฟลูอิดไดเซชัน
2. งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการอบแห้งและแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการอบแห้ง

2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวกับเทคนิคฟลูอิดไดเซชัน

Suksankraisorn, Patumsawad and Fungtammasan (2001) ทำการศึกษาหาความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดไดเซชัน ในห้องเผาไหม้ฟลูอิดไดซ์เบด โดยทำการทดลองเพื่อหาค่าความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดไดเซชัน โดยเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิตั้งแต่ 30-500 องศาเซลเซียส อุณหภูมิที่ใช้ในการทดลองเป็นทรายขนาด 500 μm และทำการเปรียบเทียบค่าความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดไดเซชันที่ได้จากการทดลองเทียบกับความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดไดเซชันที่ได้จากสมการการทำนายความเร็วต่ำสุดของฟลูอิดไดเซชันที่พบในงานวิจัยที่ผ่านมา พบว่าผลที่ได้จากการทำนายค่าความเร็วต่ำสุดของฟลูอิดไดเซชัน มีค่าเกินกว่าหรือน้อยกว่าค่าที่ได้จากผลการทดลอง อย่างไรก็ตามผู้วิจัยแนะนำว่าการหาค่าความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดไดเซชันจากสมการการทำนายนั้นจะใช้ได้ดีในช่วงที่แต่ละสมการกำหนด

Mawatari, Tatemoto and Noda (2003) ได้หาค่าความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดไดเซชัน สำหรับชุดการทดลองฟลูอิดไดซ์เบดร่วมกับการสั่น ซึ่งใช้กลุ่มของอนุภาค Geldart A และ C โดยเปรียบเทียบค่าที่ได้กับค่าทางทฤษฎีโดยใช้พื้นฐานสมการของ Ergun ซึ่งผลที่ได้คือ ค่าความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดไดเซชันโดยการคำนวณมีค่าใกล้เคียงกับผลการทดลองสำหรับ Geldart A แต่ Geldart C มีค่าแตกต่างกัน เพราะอนุภาครวมตัวกันเป็นก้อน

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการอบแห้งและแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

อนันต์ พงษ์ธรกุลพานิช (2539) ทำการศึกษาการอบแห้งข้าวโพดที่ความชื้นสูง และช่วงอุณหภูมิสูงด้วยเทคนิคฟลูอิดไดเซชัน จากการทดลองพบว่า อุณหภูมิทางเข้าหอตลอด และอัตราการไหลจำเพาะ มีอิทธิพลต่อการอบแห้งเมล็ดข้าวโพด สำหรับการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ โดยใช้สมการการอบแห้งกึ่งทฤษฎี ได้แก่ สมการของ Wang-Singh, Page และสมการของ Lewis มาทำการเปรียบเทียบกับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการทดลองพบว่า สมการของ Wang-Singh สามารถนำมาใช้ทำนายอัตราการอบแห้ง โดยมีค่าใกล้เคียงกับผลการทดลองมากที่สุด

วิวัฒน์ วุฒิววัฒน์ชัย (2540) งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาเพื่อหาแนวทางการอบแห้งด้วยเครื่องโดยเทคนิคฟลูอิดไดเซชัน โดยพิจารณาถึงตัวแปรต่างๆ ที่มีผลกระทบต่อการอบแห้ง และคุณภาพของผลิตภัณฑ์ และพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ โดยอุณหภูมิในการอบแห้ง 110-140 องศาเซลเซียส ความชื้นเริ่มต้นร้อยละ 24.7-33.3 มาตรฐานแห้ง ความสูงเบด 10-15 cm และความเร็วของการอบแห้ง 2.4-4.1 m/s จากการทดลองพบว่า ตัวแปรที่มีผลต่ออัตราการอบแห้งได้แก่ อุณหภูมิอากาศก่อนเข้าห้องอบแห้ง และอัตราการไหลเฉพาะของอากาศ และพบว่า Page's model มีความเหมาะสมมากที่สุดที่ใช้อธิบายผลการทดลอง

ฉัฐพล ภูมิสะอาด สมชาติ โสภณธฤทธิ์ และ อภิชาติ เทอดโยธิน (2542) พัฒนาแบบจำลองเพื่อทำนายสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นของข้าวเปลือก ที่อบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งฟลูอิดไดซ์เบด โดยใช้สมการการอบแห้งทางทฤษฎี โดยพิจารณา รูปทรงข้าวเปลือกเป็นทรงกระบอกสั้น และใช้แบบจำลองสมการของ Arrhenius พบว่าสามารถทำนายอัตราส่วนความชื้นได้ตลอดช่วงการอบแห้ง และอุณหภูมิของอากาศในการอบแห้งมีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นมากกว่าความชื้นของข้าวเปลือก

Soponronarit, Kittiporn and Prachayawarakom (1999) ได้ศึกษาการอบแห้งเมล็ดข้าวโพดในเครื่องอบแห้งฟลูอิดไดซ์เบดแบบต่อเนื่อง และนำเมล็ดร้อนกลับมาใช้ใหม่ บนพื้นฐานของพลังงานและคุณภาพของผลิตภัณฑ์ โดยปริมาณความชื้นเริ่มต้นของข้าวโพดอยู่ระหว่าง 19-40% มาตรฐานแห้ง และอบแห้งภายใต้อุณหภูมิอากาศ 130-175 องศาเซลเซียส ความสูงของเบด 17-22 cm ความเร็วของอากาศ 2.7 m/s และเป็นเวลา 3-7 นาที จากผลการทดลองพบว่าที่ปริมาณความชื้นเริ่มต้นมากกว่า 28% มาตรฐานแห้ง ประสิทธิภาพการอบแห้งจะเพิ่มขึ้นกับการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิอากาศ และปริมาณการใช้พลังงานความร้อนและพลังงานไฟฟ้าเท่ากับ 4.7-6.7 และ 0.3-0.6 MJ/kg ในการระเหยน้ำตามลำดับ แต่เมื่อปริมาณความชื้นเริ่มต้นของข้าวโพดน้อยกว่า 23% มาตรฐานแห้ง ประสิทธิภาพจะลดลงอย่างเล็กน้อยกับการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิของอากาศ และปริมาณการใช้พลังงานความร้อนและพลังงานไฟฟ้าเท่ากับ 15.2-27.8 และ 0.8-2.0 MJ/kg ในการระเหยน้ำตามลำดับ

Sharma (1999) ทำการอบแห้งมันฝรั่งและมะม่วงดิบที่ 4 รูปร่าง (แท่งสี่เหลี่ยม ทรงกระบอก ทรงกระบอกผ่าครึ่ง และพีรามิด) และสามขนาด (10, 15 และ 20 mm) ที่อุณหภูมิ 50, 60 และ 70 องศาเซลเซียส โดยวิธีฟลูอิดไดเซชันต่อผลของค่าสัมประสิทธิ์การแพร่สำหรับแท่งสี่เหลี่ยม และทรงกระบอก โดยใช้ผลเฉลยอนุกรมอนันต์ (Infinite series solution) บนพื้นฐานของกฎของ Fick (Crank, 1975) พบว่าสำหรับมะม่วงดิบมีค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของทรงกระบอกอยู่ในช่วง 1.08×10^{-10} ถึง $3.32 \times 10^{-9} m^2/s$ และสำหรับแท่งสี่เหลี่ยมอยู่ในช่วง 4.09×10^{-11} ถึง $1.18 \times 10^{-9} m^2/s$ และมันฝรั่งมีค่าสัมประสิทธิ์การแพร่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของทรงกระบอกอยู่ในช่วง 1.43×10^{-9} ถึง $3.75 \times 10^{-9} \text{ m}^2 \cdot \text{s}$ และสำหรับแท่งสี่เหลี่ยมอยู่ในช่วง 7.55×10^{-10} ถึง $1.40 \times 10^{-9} \text{ m}^2 \cdot \text{s}$

จากผลการทดลองพบว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิค่าสัมประสิทธิ์การแพร่จะเพิ่มขึ้น แต่การเปลี่ยนความยาวไม่มีผลกระทบต่อค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ และค่าสัมประสิทธิ์การแพร่จะสูงเมื่ออัตราส่วนปริมาตรต่อพื้นที่ผิวดำ และทำการหาค่าคงที่ของการอบแห้งพบว่า ค่าคงที่ของการอบแห้งเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิของอากาศเพิ่มขึ้น และจะสูงที่สุดที่อัตราส่วนปริมาตรต่อพื้นที่ผิวดำๆ และความยาวไม่มีผลต่อค่าคงที่ของการอบแห้ง

Sarsavadia, Sawhney, Pangavhane and Singh (1999) ทำการทดลองในเครื่องอบแห้งชนิดถาดในการศึกษาพฤติกรรมของการอบแห้งหัวหอมแบบแผ่น ซึ่งเป็นการอบแห้งแบบชั้นบาง โดยเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในช่วง 50-80 องศาเซลเซียส ความเร็วอากาศ 0.25-1.00 m/s และความชื้นสัมพัทธ์ในช่วง 10-20% และนำผลการทดลองที่ได้มาเปรียบเทียบกับผลที่ได้จาก Arrhenius-type model และ Power model โดยใช้เทคนิค non-linear regression analysis พบว่าแบบจำลองมีความสอดคล้องสำหรับทำนายอัตราการอบแห้งหัวหอมแผ่น และยังพบอีกว่าอัตราการอบแห้งเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิของอากาศสูงขึ้น และที่ความเร็วสูงสุด อัตราส่วนความชื้นจะลดลงเร็วที่สุด และความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศมีค่าน้อย อัตราส่วนความชื้นจะลดลงเร็วที่สุด

กิตติชัย ไตรรัตนศิริชัย และ กิตติ สิทธิประภาพร (2545) ศึกษาคุณลักษณะของการอบแห้งพริกแบบชั้นบาง ภายใต้เงื่อนไขของการอบแห้งแบบชั้นบาง โดยมีความหนาของพริกประมาณ 30 mm ความเร็วของลมร้อน 5.5 m/s และอุณหภูมิของอากาศร้อนอยู่ในช่วง 80-110 องศาเซลเซียส จากผลการทดลองพบว่าเวลาที่ใช้ในการอบแห้งพริกให้เหลือความชื้นน้อยกว่า 8% จะใช้เวลา 4 ชั่วโมง และจากการวิเคราะห์ อุณหภูมิที่เหมาะสมในการอบพริกอยู่ในช่วง 80-90 องศาเซลเซียส ถ้าอบด้วยอุณหภูมิสูงกว่านี้ จะทำให้เวลาในการอบแห้งลดลง แต่สีของพริกจะคล้ำมากขึ้นและไม่สามารถจำหน่ายได้ในราคาที่ดี

Syahnul, Hamdullahpur and Dincer (2002) งานวิจัยนี้ทำการจำลองทางความร้อนของเครื่องอบแห้งฟลูอิดไคซ์เบดของอนุภาคเปียกในการศึกษาถึงการขนถ่ายความร้อนและมวล และประสิทธิภาพทางความร้อนของเครื่องอบแห้ง โดยเทียบกับผลการทดลอง โดยศึกษาตัวแปรคือ อุณหภูมิทางเข้า ความเร็วอากาศ และปริมาณความชื้นเริ่มต้นของวัสดุ จากผลการทดลองประสิทธิภาพทางความร้อนของการอบแห้งแบบฟลูอิดไคซ์เบดลดลงอย่างฉับพลัน เมื่อปริมาณความชื้นของเมล็ดข้าวโพดลดลง และลดลงต่ำสุดที่จุดสิ้นสุดกระบวนการการอบแห้ง จากการทดลองชี้ให้เห็นว่าการขนถ่ายความร้อนจากวัตถุขึ้นอยู่กับอุณหภูมิอากาศที่ทางเข้า ความเร็วอากาศ และปริมาณความชื้นของวัตถุ ผลการทำนายโดยใช้แบบจำลองสอดคล้องกันดีกับผลการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Srivastava and John (2002) ในงานวิจัยนี้ใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ทำนายการอบแห้งเมล็ดธัญพืช โดยใช้สมการ Simi-empirical ของชั้นบางสำหรับทำนายความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ อุณหภูมิของอากาศ และอุณหภูมิของเมล็ดธัญพืช โดยเปลี่ยนแปลงความสูงของเบดนิ่งของธัญพืช อิทธิพลของการเปลี่ยนแปลงความเร็วอากาศ และช่องว่างภายในเบด ในงานวิจัยนี้สรุปว่าความชื้นจะระเหยเป็นไอได้ดีเมื่อความสูงของเบดเพิ่มขึ้น และช่องว่างในเบดมีผลกระทบต่ออุณหภูมิอากาศในห้องอบแห้งเล็กน้อย แต่ไม่มีผลกระทบต่ออุณหภูมิของเมล็ดพืช

Akpinar, Midilli and Bicer (2003) ในงานวิจัยนี้ทำการทดลองเพื่อศึกษาพฤติกรรมของการอบแห้งแผ่นมันฝรั่งแบบชั้นบาง ในเครื่องอบแห้งไซโคลอน และใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของแบบจำลองการอบแห้งของชั้นบางในงานวิจัยก่อนหน้านี้จำนวน 8 สมการ จากผลการทดลองอบแห้งแผ่นมันฝรั่งที่มีความหนา 12.5 และ 8 mm อุณหภูมิทางเข้าของอากาศที่ 60, 70 และ 80 องศาเซลเซียส ที่ความเร็วอากาศ 1 และ 1.5 m/s สรุปได้ว่าแผ่นมันฝรั่งซึ่งหนา 12.5 mm จะใช้เวลาในการอบแห้ง 460-740 นาที ซึ่งมากกว่าที่ความหนาของแผ่นมันฝรั่ง 8 mm จะใช้เวลาการอบแห้ง 280-520 นาที ความเร็วอากาศมีผลเพียงเล็กน้อยต่ออัตราการอบแห้ง และเวลาในการอบแห้งลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น และแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการอบแห้งของชั้นบางถูกหาโดยเทคนิค non-linear regression analysis และหาค่าสัมประสิทธิ์ที่เหมาะสมของแบบจำลองการแพร่ ของสมการการอบแห้งมันฝรั่ง ซึ่งทั้ง 8 สมการให้ผลสอดคล้องดีกับผลการทดลอง

Togrul and Pehlivan (2003) ศึกษาพฤติกรรมของการอบแห้งของผลเอพริคอต (apricot) โดยผ่านอากาศร้อนผ่านห้องอบแห้ง ในการทดลองโดยเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลที่ 0.2, 0.5, 1.0 และ 1.5 m/s และอุณหภูมิอากาศ 50, 60, 70 และ 80 องศาเซลเซียส ค่าอัตราการอบแห้งกับเวลา และปริมาณความชื้นใช้ในการทดสอบกับแบบจำลองการอบแห้งทางคณิตศาสตร์ทั้ง 14 แบบ ซึ่งพบในงานวิจัยก่อนหน้านี้ และได้ทำการพัฒนาแบบจำลองขึ้นมาใหม่ จากการทดลอง Logarithmic model ให้ความถูกต้องในการทำนายพฤติกรรมของการอบแห้งผลเอพริคอตมากที่สุด การหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ในช่วง Falling rate period ที่ได้จากการทดลองพบว่า การใช้เทคนิค Multiple regression analysis ให้ผลการทดลองที่มีความแม่นยำ 97.3% ขึ้นอยู่กับอัตราการไหล และอุณหภูมิภายในผลเอพริคอต

Senadecra, Bhandari, Young and Wijesinghe (2003) ได้ศึกษาพฤติกรรมของการอบแห้งด้วยเทคนิคฟลูอิดไดเซชัน ของอนุภาคทั้งสามรูปทรงคือ แท่งสี่เหลี่ยม ทรงกระบอก และทรงกลม ที่ได้จากมันฝรั่ง 3 ขนาดในอัตราส่วนด้านต่อความยาว 1:1, 2:1 และ 3:1 สำหรับแท่งสี่เหลี่ยม และจากการตัดเมล็ดถั่วเขียว ในอัตราส่วนความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลาง 1:1, 2:1 และ 3:1 สำหรับทรงกระบอก และเมล็ดถั่วสำหรับทรงกลม ตามลำดับ โดยศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิของอากาศที่เปลี่ยนแปลงในช่วง 30-50 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ 15% และแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยใช้ Exponential model ($MR = \exp(-kt)$) และ Page model ($MR = \exp(-kt^n)$) พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การแพร่มีผลเพียงเล็กน้อยกับขนาดของเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อนุภาคเมื่อความชื้นถูกพิจารณาในสามมิติ อย่างไรก็ตาม อุณหภูมิในการอบแห้งมีผลกระทบต่อค่าสัมประสิทธิ์การแพร่

Hatamipour and Mowla (2003) ทำการศึกษาความสัมพันธ์ของ การหดเหี่ยว ความหนาแน่น และการแพร่ความชื้นของเมล็ดข้าวโพด และเมล็ดถั่วเขียว ในการอบแห้งแบบฟลูอิดไดเซชัน งานวิจัยนี้จะศึกษาปัจจัยที่มีผลกระทบต่อความหนาแน่นของวัสดุ ขนาด และการแพร่ของมวลซึ่งเป็นการเปลี่ยนแปลงของปริมาณความชื้น พบว่าอุณหภูมิของอากาศ และความเร็วของอากาศไม่มีผลกระทบต่อคุณสมบัติทางฟิสิกส์ การหดเหี่ยวและความหนาแน่นเป็นฟังก์ชันเพียงสองอย่างของปริมาณความชื้น แต่สัมประสิทธิ์การแพร่เป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิและปริมาณความชื้น

Etekin and Yaldiz (2004) ทำการอบแห้งมะเขือยาวโดยเทคนิคการอบแห้งของแผ่นบาง เพื่อหาคุณสมบัติของมะเขือยาว โดยเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอากาศตั้งแต่ 30-70 องศาเซลเซียส และความเร็วอากาศจาก 0.5-2.0 m/s และเปลี่ยนความหนาที่มะเขือยาวที่หั่นเป็นแผ่น โดยหาเวลาในการอบแห้งและคุณภาพของผลิตภัณฑ์หลังการอบแห้ง และทำการเปรียบเทียบผลการทดลองการอบแห้งกับแบบจำลองการอบแห้งของแผ่นบาง ผลกระทบของอุณหภูมิ และความเร็วอากาศต่อค่าคงที่ และสัมประสิทธิ์ของแบบจำลองการอบแห้งโดยใช้เทคนิค Multiple regression analysis จากผลการทดลองแสดงว่า เมื่อเพิ่มอุณหภูมิและความเร็วอากาศจะทำให้เวลาในการอบแห้งลดลง และแผ่นของมะเขือยาวบางทำให้อัตราการอบแห้งลดลง การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิอากาศและเพิ่มความเร็วอากาศ จะเพิ่มความเข้มข้นของสีของผลิตภัณฑ์ ความหนาของผลิตภัณฑ์ไม่มีผลต่อสีของผลิตภัณฑ์ การเพิ่มความเร็วอากาศ จะเพิ่มอัตราการลดลงของอัตราส่วนความชื้น และมีค่าสูงสุดที่ อุณหภูมิอากาศ 50 องศาเซลเซียส แบบจำลองคณิตศาสตร์ของ Midilli และคณะ (2002) สามารถจำลองการอบแห้งของมะเขือยาวได้ดีที่สุด

วรเมธ ทัดทอง (2546) ได้ทำการศึกษาตัวแปรของกระบวนการอบแห้งเมล็ดกาแฟโดยใช้เครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไดซ์เบด ทำการทดลองโดยใช้ห่ออะคลิลิก 15 ซึ่งมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 140 มิลลิเมตร ความสูง 1000 มิลลิเมตร โดยใช้อุณหภูมิที่ทางเข้าของห่อทดลองอยู่ในช่วง 60 - 100 องศาเซลเซียส อัตราการไหลเฉพาะของอากาศอยู่ในช่วง 0.21 ถึง 0.43 $kg/s\text{-}kg$ dry coffee ความชื้นเริ่มต้น 18% มาตรฐานเปียก ในงานวิจัยนี้ได้พัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยมีพื้นฐานมาจากแบบจำลองของ Newton และ Page ผลการทดลองพบว่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นอัตราการอบแห้งก็จะเพิ่มขึ้นตาม และที่อุณหภูมิการอบแห้ง 100 องศาเซลเซียส ปริมาณความชื้นของเมล็ดกาแฟลดลงสู่ 14% มาตรฐานเปียก ภายในเวลา 5 ชั่วโมง และสรุปได้ว่าอัตราการไหลของอากาศไม่มีอิทธิพลต่อการอบแห้ง

กิตติชัย พาวขุนทด สุวิทย์ สุวรรณรุ่งโรจน์ และ เอกรินทร์ จินดาพิ (2547) ได้ทำการศึกษาและทำการทดลองการอบแห้งด้วยเทคนิคฟลูอิดไดซ์เบด โดยการติดตั้งชุดผิวกลิ้งเพิ่มเข้าไป วัสดุที่ใช้ในการทดลองเป็นเมล็ดพริกไทย ผิวกลิ้งที่เพิ่มเข้าไปจะมีลักษณะเป็นกรวยที่มีรัศมีขนาด 1/3 ของขนาด เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เส้นผ่านศูนย์กลางของหอคดลอง สูง 85 เซนติเมตร วางสลับกันเป็นลูกคลื่นหลาย ๆ ลูกคลื่นต่อกัน ในการทดลองใช้ฮีทเตอร์เป็นแหล่งความร้อนที่อุณหภูมิ 70, 80 และ 100 องศาเซลเซียส และความเร็วของอากาศร้อนภายในหอบมีค่า 1.0Umf , 1.2Umf และ 1.4Umf ผลการทดลองพบว่าเมื่อติดตั้งชุดผิวคลื่นเพิ่มเข้าไปจะทำให้เกิดการไหลแบบปั่นป่วนภายในหอคดลองมากขึ้น ทำให้การอบแห้งเร็วกว่าการใช้เทคนิคฟลูอิดไดซ์เบดแบบธรรมดาถึง 30%

พงษ์ศักดิ์ หมทอง สกล ผลิกระโทก และ สยาม เป็น (2547) ได้ทำการประยุกต์การใช้เทคนิคฟลูอิดไดซ์เบดแบบผิวคลื่นสำหรับอบเมล็ดกาแฟ โดยใช้หอคดลองมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.17 เมตร สูง 1 เมตร ทดลองโดยแบ่งลักษณะภายในหอบออกเป็น 4 ลักษณะ ดังนี้ หอบแบบธรรมดา หอบแบบผิวคลื่น หอบแบบวงแหวน และหอบแบบผิวคลื่นวงแหวน โดยการทดลองจะควบคุมอุณหภูมิไว้ที่ 80 และ 100 องศาเซลเซียส อัตราการไหลจำเพาะของอากาศและความเร็วลมที่ทางเข้าหอบ 4 ถึง 6 m/s จากการทดลองสรุปได้ว่าหอบแบบผิวคลื่นสามารถอบแห้งได้เร็วกว่าหอบลักษณะอื่น ๆ คือสามารถลดความชื้นของเมล็ดกาแฟจาก 66% เหลือเพียง 14% และปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการอบแห้งมากที่สุดก็คืออุณหภูมิ

ขจรศักดิ์ เพ็ญจันทร์ ชัชวาลย์ ทองประภา และ ชานนท์ พงศ์ชัยประสิทธิ์ ได้ทำการออกแบบและสร้างเครื่องอบแห้งเมล็ดข้าวโพดชนิดฟลูอิดไดซ์เบด โดยใช้เทคนิคลมหมุนควงมาใช้ในการอบ อุปกรณ์ที่ทำให้เกิดการหมุนควงของลมร้อนเป็นเทอร์โบ หอคดลองทำจากอะคริลิกใส ภายในหอคดลองจะมีกรวยที่ทำด้วยสังกะสีทำมุม 60 และ 70 องศา กับขอบของตัวเทอร์โบ โดยการทดลองแต่ละครั้งใช้เมล็ดข้าวโพดที่มีความชื้นเริ่มต้นประมาณ 80 % มวล 300 กรัม ใช้อุณหภูมิอากาศที่ทางเข้า 80 และ 100 องศาเซลเซียส โดยทำการบันทึกผลทุกๆ 10 นาที ผลการทดลองพบว่า การอบแห้งด้วยเทคนิคลมหมุนควงความเร็วลมและอุณหภูมิมีอิทธิพลต่อการลดความชื้นของเมล็ดข้าวโพด ที่ความเร็วลมและอุณหภูมิสูง จะทำการอบแห้งได้เร็วกว่าความเร็วและอุณหภูมิต่ำ และพบว่ากรวยที่ทำมุมกับขอบของเทอร์โบที่ 60 องศา ให้ประสิทธิภาพการอบแห้งดีที่สุด

จากการศึกษาบทความดังกล่าวข้างต้นพอสรุปได้ว่าลักษณะการไหลของอากาศ ความเร็วลม และอุณหภูมิมีผลต่อการอบแห้งเมล็ดพืช แต่เนื่องจากความเร็วและอุณหภูมิเราสามารถควบคุมได้ทำให้มากหรือน้อย เพราะฉะนั้นในวิทยานิพนธ์เล่มนี้จึงเน้นไปที่การออกแบบลักษณะการไหลของอากาศ โดยมีแนวความคิดที่ว่า การเพิ่มระยะทางการไหลของลมร้อนให้มากขึ้นภายในหอคดลองจะช่วยให้ลมร้อนสัมผัสกับเมล็ดพืชได้มากขึ้น และการกระจายตัวกันของเมล็ดพืชภายในหอคดลองจะช่วยให้เกิดการแลกเปลี่ยนความร้อนได้มากขึ้นด้วย และที่ได้กล่าวมาข้างต้นของงานวิจัยต่าง ๆ จะใช้หอคดลองแบบทรงกลม ดังนั้นการวิจัยในวิทยานิพนธ์เล่มนี้จึงเน้นไปที่การออกแบบโดยจะเป็นหอคดลองรูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้า และจะติดแผ่นขยายโดยใช้มุมต่าง ๆ ซึ่งจะให้เกิดฟลูอิดไดซ์เบดทั้งหอคดลอง และจะใช้แผ่นกระจายตัวไว้ที่ด้านล่างของหอคดลอง เพื่อให้อากาศร้อนได้กระจายเต็มทั่วทั้งหอคดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

ทฤษฎี

3.1 ทฤษฎีฟลูอิดไดเซชัน

ฟลูอิดไดเซชัน เป็นกระบวนการที่ของแข็ง ซึ่งมีรูปร่างลักษณะเป็นเม็ดเล็ก หรือชิ้นสัมผัสกับของไหลซึ่งไหลผ่านเม็ดของแข็งที่มีความเร็วสูงพอ ที่จะทำให้ของแข็งดังกล่าวเคลื่อนที่และมีพฤติกรรมคล้ายของไหล เมื่อนำเม็ดของแข็งกลุ่มหนึ่งมาวางไว้บนตะแกรงที่รองรับ แล้วทำให้ของไหลไหลผ่านเม็ดของแข็งกลุ่มนั้น จะเห็นเม็ดของแข็งเริ่มขยับตัวแล้วลอยขึ้นอย่างเป็นอิสระไม่เกาะติดกัน ของแข็งที่อยู่ในลักษณะนี้ จะมีคุณสมบัติคล้ายของไหล เรียกของแข็งที่ประพุดิตัวในลักษณะนี้ว่า ฟลูอิดไดซ์เบด และเรียกปรากฏการณ์ดังกล่าวว่า ฟลูอิดไดเซชัน ดังแสดงในรูปที่ 3.1

3.1.1 ประเภทของฟลูอิดไดเซชัน

ฟลูอิดไดเซชันแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภทด้วยกัน คือ

1. ฟลูอิดไดเซชันแบบสองสถานะ (Two-phase fluidization) หมายความว่า ในหอตลอดหรือในเบดที่ใช้งานจะประกอบไปด้วยสองสถานะ คือของแข็งกับของไหล ของไหลนี้อาจจะเป็นก๊าซหรือของเหลวก็ได้ ดังนั้นฟลูอิดไดเซชันสองสถานะจึงแบ่งออกได้อีกเป็น 2 ประเภท คือ ก๊าซฟลูอิดไดเซชัน (Gas Fluidization) และฟลูอิดไดเซชันเหลว (Liquid Fluidization)
2. ฟลูอิดไดเซชันสามสถานะ (Three-phase fluidization) หมายความว่า ภายในหอตลอดหรือในเบดจะประกอบด้วยสามสถานะรวมอยู่ร่วมกัน คือ ของแข็ง ของเหลว และก๊าซ สำหรับฟลูอิดไดเซชันสามสถานะนั้นเป็นกระบวนการที่พัฒนาไปจากฟลูอิดไดเซชันสองสถานะ

3.1.2 ลักษณะของฟลูอิดไดซ์เบด

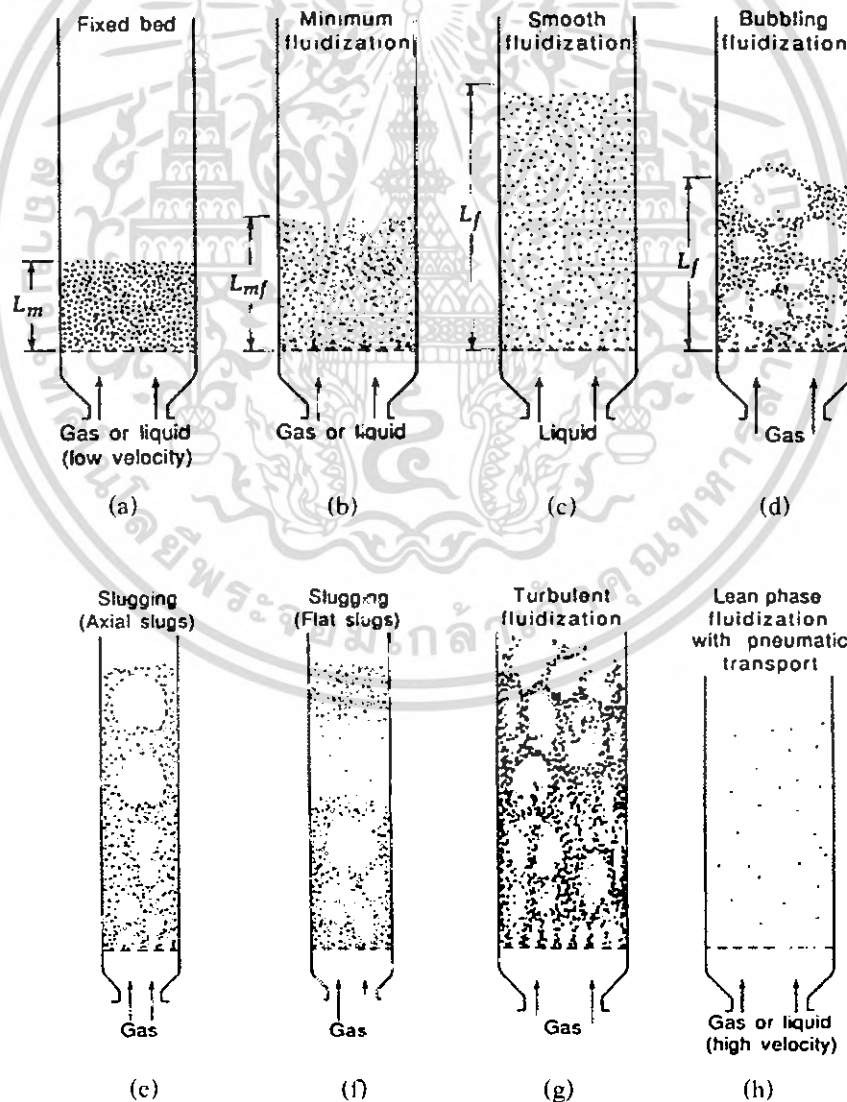
เบด (Bed) หมายถึง อาณาเขตในหอตลอดที่มีปริมาณเม็ดของแข็งบรรจุอยู่ไม่ว่าของแข็งนั้นจะอยู่นิ่งหรือเคลื่อนไหว ด้วยของไหลในหอตลอดจะมีระดับตั้งแต่แผ่น โลหะ ทำเป็นตะแกรงรองรับหรือเป็นตัวกระจายของไหล (Distributor) จนถึงระดับสูงสุด คือ ผิวหน้าของเม็ดของแข็งที่อยู่ในหอตลอด

เมื่อบรรจุเม็ดของแข็งในหอตลอดเรียบร้อยแล้ว เริ่มปล่อยของไหลเข้าทางด้านล่างของหอตลอดอย่างช้า ๆ ขณะที่ของไหลความเร็วยังน้อยอยู่ เม็ดของแข็งจะไม่ขยับตัวเลย ลักษณะของเบดเช่นนี้เรียกว่า เบดนิ่ง (Fixed bed) เมื่อเพิ่มความเร็วของของไหลให้มากขึ้นทีละน้อยจนถึงระดับความเร็วหนึ่ง เม็ดของแข็งเริ่มขยับตัว และจัดตัวอย่างเป็นระเบียบ เมื่อความเร็วของของไหลเพิ่มขึ้นอีกเล็กน้อยของแข็งจะหลุดออกจากกันลอยตัวเป็นอิสระ ลักษณะนี้เรียกว่า จุดเริ่มฟลูอิดไดเซชัน หลังจากจุดนี้ไปแล้วความเร็วของของไหลที่เพิ่มขึ้นจะไปทำให้เบดให้เบดขยายตัวตามความเร็วของของไหล เม็ดของแข็งอยู่ชิดกันมาก ดูเหมือนว่าเม็ดของแข็งยังจับกันเป็นกลุ่มก้อน เบดลักษณะนี้เรียกว่า ฟลูอิดไดซ์เบดแบบหนาแน่น (Dense-phase fluidized bed) ถ้าความเร็วของของไหลมากขึ้นอีกของไหลก็เกือบจะพาเอา

เม็ดของแข็งออกไปจากหอตลอดอยู่แล้ว ลักษณะนี้เรียกว่า ฟลูอิดไดซ์เบดเจือจาง (Diluted-phase bed) เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

fluidized bed) หลังจากนั้นเพิ่มความเร็วของไหลอีกเล็กน้อยเมื่อดึงของแข็งก็จะหลุดลอยออกจากหอตลอดไป

ฟลูอิดไดซ์เบดที่ของไหลเป็นของเหลว การขยายตัวของเบด เป็นไปอย่างสม่ำเสมอการลอยตัวและหมุนรอบตัวของเม็ดของแข็งเป็นไป อย่างช้า ๆ เราเรียกเบดนี้ว่าเบดสม่ำเสมอ หรือเบดที่เป็นเนื้อเดียวกัน ดังรูป 3.1 (b) ฟลูอิดไดซ์เบดที่ของไหลเป็นก๊าซ ลักษณะของเบดจะแตกต่างจากที่ใช้ของเหลวมาก เพราะว่ามีเมื่อความเร็วของก๊าซสูงกว่าความเร็วที่จะทำให้เกิดฟลูอิดไดซ์เบดแล้ว ก๊าซส่วนหนึ่งยังทำหน้าที่ให้เกิดการลอยตัวของเม็ดของแข็งเหมือนเดิมแค่มีก๊าซส่วนหนึ่งรวมตัวกันแล้วก่อตัวกันเป็นฟองก๊าซขึ้น ฟองก๊าซก็จะแทรกตัวเองขึ้นมาถึงบนผิวหน้าของเบดและแตกตัวเองในที่สุด ขณะที่ฟองก๊าซลอยขึ้นมาจะทำให้เม็ดของแข็งไหลจากส่วนหลังคของฟองก๊าซลงมายังส่วนล่าง พร้อมกันนั้นยังมีบางส่วนของเม็ดของแข็งลอยติดตามฟองก๊าซขึ้นไปตาม ภายในเบดจะเห็นว่ามีการเคลื่อนที่ของเม็ดของแข็งเป็นไปอย่างสุ่มวนวุ่นวายเบดชนิดนี้เรียกว่า ฟลูอิดไดซ์เบดวุ่นวาย ดังรูป 3.1 (d)



รูปที่ 3.1 พฤติกรรมการเกิดฟลูอิดไดซ์เบด [Daizo Kunii, 1991]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากคุณสมบัติที่ของแข็งในเบคทำหน้าที่คล้ายกับของเหลวนี้ จึงมีประโยชน์ทางด้านอุตสาหกรรมอย่างมหาศาล ที่สามารถนำเอาเทคนิคนี้ไปใช้ทำงานในระบบต่อเนื่อง (Continue process) ได้ดังในหอคดลองที่มีหลายหลายชั้น เม็ดของแข็งจากชั้นบนจะไหลลงมายังชั้นล่างและไหลออกนอกหอคดลองในที่สุด ในลักษณะเช่นนี้เหมือนในหอกถัน หรือใช้ป้อนของแข็งเข้าทางซ้าย แล้วให้ออกมาทางขวาของหอคดลอง ในขณะที่ผ่านเบคออกมานี้ย่อมต้องมีการเปลี่ยนแปลงบางส่วนอย่างแน่นอน ดังอย่างเช่นการตากแห้งเม็ดธัญญาหาร หรือเม็ดผลไม้ต่าง ๆ เช่น ถั่ว งา เม็ดข้าวโพด เป็นต้น

3.2 กลศาสตร์ของการเกิดฟลูอิดไลเซชัน

พฤติกรรมของการเกิดฟลูอิดไลเซชันมักมีตัวแปรต่าง ๆ ที่มีอิทธิพลต่อการออกแบบอย่างมาก เพราะก่อนที่เม็ดของแข็งจะเริ่มขยับตัวหรือเกิดฟลูอิดไลเซชัน เม็ดของแข็งจะพักอยู่บนตระแกรงรองรับปล่อยให้ของไหลไหลผ่านไปตามช่องว่างที่อยู่ในเบค ความเร็วของของไหลจึงมีอิทธิพลต่อคุณสมบัติทางกายภาพของเบค ดังรายละเอียดต่อไปนี้

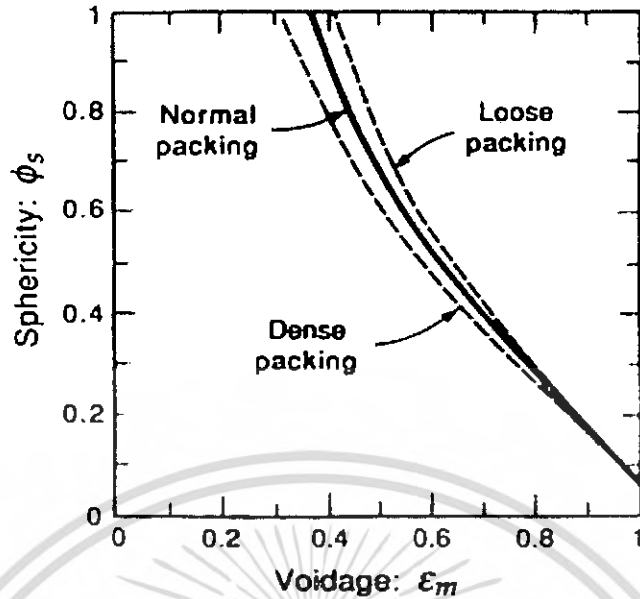
3.2.1 ความเป็นทรงกลม (Sphericity, ϕ)

การวัดค่าความไม่เป็นทรงกลมศึกษาโดย Zenz และ Othmer ปี 1960 ที่อ้างอิงโดย Kunii, D. Levenspiel, O. (1991) โดยความเป็นทรงกลมหมายถึง อัตราส่วนระหว่างพื้นที่ผิวของเม็ดทรงกลมที่มีปริมาตรเท่าเม็ดของแข็งต่อพื้นที่ผิวของเม็ดของแข็งใดๆ โดยที่เม็ดของแข็งเป็นทรงกลมค่าความเป็นทรงกลมมีค่าเท่ากับหนึ่ง ($\phi = 1$) และถ้าเม็ดของแข็งมีรูปร่างต่างๆ ไปค่าความเป็นทรงกลมมีค่าน้อยกว่าหนึ่งเสมอ ($\phi < 1$) เสมอ ซึ่งค่าความเป็นทรงกลมที่ทำการทดลองของเมล็ดพริกไทยมีค่าเข้าใกล้หนึ่งมาก จึงสมมติให้เป็นหนึ่ง

3.2.2 สัดส่วนช่องว่าง (Fraction void, ϵ)

กรณีที่เม็ดของแข็งมีรูปร่างเป็นทรงกลมและขนาดสม่ำเสมอตลอด เราสามารถคำนวณหาช่องว่างระหว่างเม็ดทรงกลมเหล่านี้ได้ด้วยวิธีทางคณิตศาสตร์ ลักษณะการเรียงตัวของเม็ดทรงกลมในเบคทำให้เกิดขนาดของช่องว่างที่มีขนาดแตกต่างกันออกไป แต่ในกรณีที่เม็ดของแข็งมีรูปร่างไม่เป็นทรงกลม Brown และ คณะ ได้หาความสัมพันธ์ระหว่างความเป็นทรงกลมกับสัดส่วนช่องว่างไว้ดังรูปที่ 3.2

ในขณะที่เริ่มเกิดฟลูอิดไลเซชัน ช่องว่างในเบคจะมีการขยายตัว ช่องว่างในขณะนั้นเรียกว่า สัดส่วนช่องว่างที่เกิดฟลูอิดไลเซชัน (ϵ_{mf})



รูปที่ 3.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความเป็นทรงกลมกับสัดส่วนช่องว่าง [Kunii, D. Levenspiel, O. 1991]

WEN และ YU, 1966 ได้เสนอผลคูณของช่องว่างต่ำสุดและความเป็นทรงกลม เป็นค่าคงที่และอาจสังเกตได้จากการทดลองของเขาโดยใช้วัสดุชนิดต่าง ๆ บรรจุลงในเบดแล้วสรุปว่าวัตถุอย่างหนึ่งก็จะมีสัดส่วนช่องว่างอันหนึ่ง ดังสมการ

$$\epsilon_{mf} = \left(\frac{0.071}{\phi_s} \right)^2 \tag{3.1}$$

3.2.3 การหาความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดไลเซชัน, u_{mf}

ในขณะที่เม็ดของแข็งเริ่มลอยตัวเป็นอิสระอยู่นั้นอาจกล่าวอีกอย่างหนึ่งได้ว่า เม็ดของแข็งอยู่ในภาวะสมดุลของแรงสองแรงที่เกิดขึ้นบนเม็ดของแข็ง คือแรงที่เกิดจากน้ำหนักของเม็ดของแข็งเองกับแรงพยุงจากการไหลหรือเกิดจากแรงเสียดทานกับแรงต้านของของไหลซึ่งเขียนและจัดรูปใหม่ได้เป็น

$$\frac{\Delta p}{L_{mf}} = (1 - \epsilon) (\rho_p - \rho_g) g \tag{3.2}$$

โดยการประยุกต์สมการ (3.2) กับสมการความดันตกของ ERGUN จะได้

$$\frac{1.75}{\epsilon_{mf}^3 \phi_s} Re_{mf}^2 + \frac{150(1 - \epsilon_{mf})}{\epsilon_{mf}^3 \phi_s^2} Re_{mf} = \frac{d_p^3 \rho_g (\rho_p - \rho_g) g}{\mu_g^2} \tag{3.3}$$

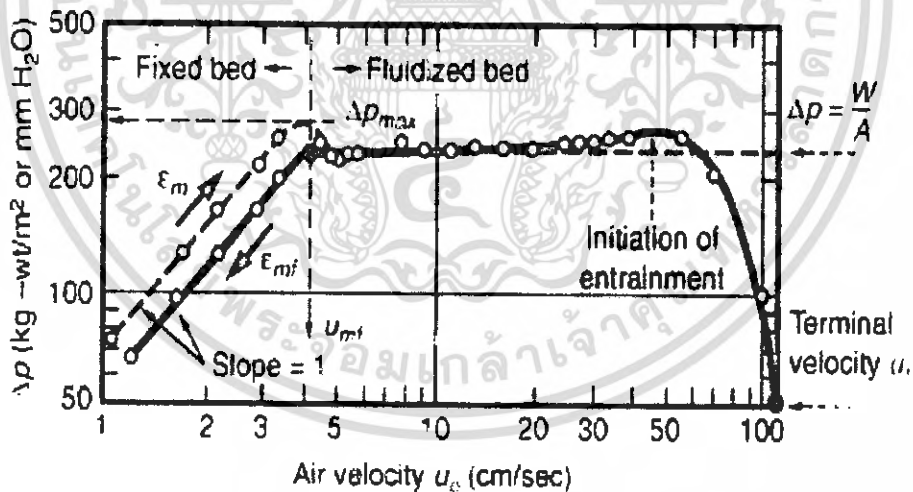
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่

$$Re_{mf} = \frac{d_p u_{mf} \rho_g}{\mu_g} \tag{3.4}$$

- เมื่อ Re_{mf} คือ เรย์โนลด์สสัมประสิทธิ์ ที่ความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดไลเซชัน
- d_p คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเม็ดของแข็ง, เมตร
- g คือ อัตราเร่งที่เกิดจากแรงดึงดูดของโลก, เมตร/ชม.²
- L_{mf} คือ ความสูงต่ำสุดของเบด, เมตร
- Δp คือ ความดันต่างของเบด, นิวตัน/เมตร
- u_{mf} คือ ความเร็วต่ำสุดของฟลูอิดไลเซชัน, เมตร/วินาที
- μ คือ ความหนืดของของไหล, กิโลกรัม-เมตร/วินาที
- ρ_g คือ ความหนาแน่นของก๊าซ, กิโลกรัม/เมตร³
- ρ_s คือ ความหนาแน่นของของแข็ง, กิโลกรัม/เมตร³

ความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดไลเซชันสามารถหาได้อีกวิธีการหนึ่ง คือจากการทดลองโดยพล็อตความสัมพันธ์ระหว่างความดันตกกับความเร็วก๊าซ (Superficial air velocity) ดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันตกกับความเร็วก๊าซ

3.2.4 ความเร็วตกอิสระของเม็ดของแข็งในของไหลอยู่นิ่ง, u_t

ในฟลูอิดไลเซชันนั้นมีขอบเขตความเร็วของของไหลอยู่สองอย่างคือ ขอบเขตแรก คือความเร็วต่ำสุดของฟลูอิดไลเซชัน และขอบเขตที่สองคือ ความเร็วของของไหลที่ทำให้เม็ดของแข็งลอยตัวหลุดออกจากหยอดตกลง ความเร็วนี้มีขนาดเท่ากับความเร็วตกอิสระของของแข็ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Haider และ Levenspiel ได้เสนอการหาค่าความเร็วตกอิสระของเม็ดของแข็งดังสมการ

$$u_i^* = \left[\frac{18}{(d_p^*)^2} + \frac{2.335 - 1.744\phi_s}{(d_p^*)^{0.5}} \right]^{-1} \quad (3.5)$$

เมื่อ d_p^* คือ ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของเม็ดของแข็งไร้มิติ
โดยที่ $0.5 < \phi_s < 1$ และ

$$d_p^* = d_p \left[\frac{\rho_g (\rho_s - \rho_g) g}{\mu^2} \right]^{-1/3} \quad (3.6)$$

ดังนั้นความเร็วตกอิสระของเม็ดของแข็งมีค่าเท่ากับ

$$u_i = u_i^* \left[\frac{\mu (\rho_s - \rho_g) g}{\rho_g^2} \right]^{1/3} \quad (3.7)$$

เมื่อ u_i^* คือ ความเร็วตกอิสระของเม็ดของแข็งไร้มิติ

3.3 กระบวนการอบแห้ง

การอบแห้ง คือ กระบวนการลดความชื้น ซึ่งส่วนใหญ่ใช้การถ่ายเทความร้อนไปยังวัสดุที่ชื้น เพื่อไล่ความชื้นออกจากวัสดุโดยการระเหย โดยใช้ความร้อนที่ได้รับจากอากาศร้อนเป็นความร้อนแฝงของการระเหย ในกระบวนการอบแห้งแบ่งออกได้เป็น 2 ช่วง คือ

3.3.1 ช่วงอัตราการอบแห้งคงที่ (Constant-rate drying Period)

จากรูปที่ 3.4 ในช่วง A ถึง B ผิววัสดุจะมีน้ำอยู่เป็นจำนวนมาก เนื่องจากการระเหยของน้ำที่ผิว ล่าช้ากว่าการแพร่ของความชื้นภายในวัสดุมายังผิวของวัสดุ จึงส่งผลให้อุณหภูมิของผิววัสดุมีค่าคงที่ที่อุณหภูมิกระเปาะเปียกของอากาศ $T_{p,w}$ และความเข้มข้นของน้ำที่ผิววัสดุคงที่ ดังนั้นอัตราการระเหยของน้ำที่ผิวจะเป็นตัวควบคุมอัตราการอบแห้ง ถ้า p คือ ความดันไออิ่มตัวที่อุณหภูมิกระเปาะเปียก p คือ ความดันย่อยของไอน้ำในอากาศ และ K_p คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวล ดังนั้นค่าอัตราการระเหยน้ำต่อหน่วยพื้นที่ผิวของวัสดุ N_i ในช่วงอัตราการอบแห้งคงที่กำหนดโดยสมการ

$$N_i = K_p (p_{s,w} - p) \quad (3.8)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

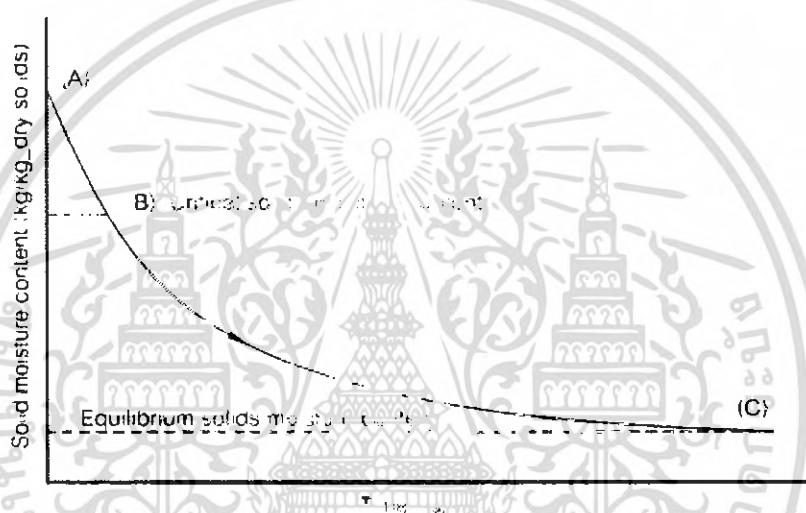
เมื่ออุณหภูมิที่ผิวของวัสดุไม่เพิ่มขึ้นในช่วงนี้ แสดงว่าความร้อนทั้งหมดถูกถ่ายโอนจากอากาศไปยังวัสดุ เพื่อใช้ในการระเหยกลายเป็นไอ จากสมการที่ 3.8 สามารถเขียนใหม่ได้เป็น

$$N_i = \frac{h_p}{\lambda} (T - T_{v,b}) \quad (3.9)$$

เมื่อ h_p คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนจากอากาศไปสู่วัสดุ

λ คือ ความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอ

T คือ อุณหภูมิอากาศ



รูปที่ 3.4 ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นของแข็งและเวลาในการอบแห้ง

[Davidson, J. F., Clift, R. and Harrison, D. 1985]

3.3.2 ช่วงอัตราการอบแห้งลดลง (Falling-Rate Drying Period)

ช่วง B ถึง C หลังจากที่มีความชื้นบริเวณผิวหน้าของวัสดุถูกระเหยออกไปมากแล้ว อัตราการอบแห้งจะเริ่มเปลี่ยนแปลงจากช่วงอัตราการอบแห้งคงที่ เป็นช่วงอัตราการอบแห้งลดลง ความชื้นที่ตำแหน่ง B นี้เรียกว่า ความชื้นวิกฤต (Critical moisture content) ในช่วงอัตราการอบแห้งลดลงนั้น การแพร่ของความชื้นมายังผิววัสดุช้ากว่าการระเหยของน้ำที่ผิวของวัสดุ ดังนั้นอัตราการอบแห้งจะถูกควบคุมด้วยการแพร่ของความชื้นภายในวัสดุ โดยที่ผิวของวัสดุจะค่อยๆ แห้งและอุณหภูมิก็จะค่อยๆ สูงขึ้น เนื่องจากความร้อนที่ถ่ายเทให้กับวัสดุถูกใช้ในการเพิ่มอุณหภูมิให้กับวัสดุส่วนหนึ่งจึงมีความร้อนเพียงบางส่วนเท่านั้นที่ใช้ในการระเหยน้ำ อัตราการอบแห้งจึงลดลงเรื่อยๆ จนกระทั่งถึงความชื้นค่าหนึ่งแล้ว ความชื้นก็จะไม่ลดลงอีก เรียกว่า ความชื้นสมดุล (Equilibrium moisture content) ดังรูปที่ 3.4 ที่จุด C โดยทั่วไปการอบแห้งเมล็ดพืชจะมีแต่ช่วงอัตรา การอบแห้งลดลงเท่านั้น มีสมการอบแห้งหลายรูปแบบทั้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมการทางทฤษฎี สมการกึ่งทฤษฎี และสมการเอมไพริคัลซึ่งได้จากการทดลอง ที่พยายามทำนาย ในช่วงความชื้นลดลง

3.4 นิยามความชื้นในวัสดุ สมชาติ โสภณภณฤทธิ์ (2540)

ความชื้นเป็นตัวบอกปริมาณของน้ำที่มีอยู่ในวัสดุ เมื่อเทียบกับมวลของวัสดุชื้นหรือแห้ง ความชื้นในวัสดุสามารถแสดงได้เป็น 2 แบบ คือ

1. ความชื้นมาตรฐานเปียก. M_w

$$M_w = \frac{w \cdot d}{w} \tag{3.10}$$

ความชื้นมาตรฐานเปียกนิยมใช้ในวงการค้า โดยทั่วไปจะอ้างในรูปของเปอร์เซ็นต์ $100M_w$

2. ความชื้นมาตรฐานแห้ง. M_d

$$M_d = \frac{w \cdot d}{d} \tag{3.11}$$

เมื่อ w คือ มวลของวัสดุ. กิโลกรัม

d คือ มวลของวัสดุแห้ง (ไม่มีน้ำ). กิโลกรัม

ความชื้นมาตรฐานแห้งนี้เป็นที่นิยมใช้กันในการวิเคราะห์ของกระบวนการอบแห้งทางทฤษฎี เพราะช่วยให้การคำนวณสะดวกขึ้น ซึ่งเป็นเพราะ มวลของวัสดุแห้งจะมีค่าคงที่หรือเกือบคงที่ระหว่างการอบแห้ง ที่เกือบคงที่ผลผลิตทางเกษตรเป็นสิ่งมีชีวิต มีการหายใจ ดังนั้นจึงมีการเผาผลาญสารอาหาร ทำให้มวลแห้งลดลง ส่วนใหญ่แล้วมวลแห้งจะลดลงเล็กน้อย

3.5 หลักการอบแห้งเมล็ดพืช

โดยทั่วไปเรามักจะใช้อากาศที่มีอุณหภูมิสูงและความชื้นสัมพัทธ์ต่ำเป็นตัวกลางในการอบแห้ง ทั้งนี้เพราะสามารถอบแห้งได้เร็ว และได้ความชื้นของเมล็ดพืชต่ำตามที่ต้องการ อุณหภูมิของอากาศจะสูงเท่าไรนั้นขึ้นอยู่กับลักษณะการนำเมล็ดพืชไปซึ่ง เบน วีรี และเทคนิคที่ใช้ในการอบแห้ง โดยมากเรามักจะเลือกเอาอุณหภูมิสูงสุดที่ขอมให้ได้โดยคุณภาพของเมล็ดพืชไม่เสียหาย เพราะจะทำให้อบแห้งเร็ว มีผลให้เครื่องอบแห้งที่ต้องใช้มีขนาดเล็กลง ทำให้การลงทุนต่ำ

เครื่องอบแห้งเมล็ดพืชอาจแบ่งได้เป็นสองชนิดคือ เครื่องอบแห้งแบบเมล็ดพืชอยู่กับที่ (fixed-bed dryer) และเครื่องอบแห้งแบบเมล็ดพืชไหล (moving-bed dryer) ซึ่งเทคนิคการอบแห้งฟลูอิดไดเซชัน เป็นเครื่องอบแห้งแบบเมล็ดพืชไหล ซึ่งมีประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนความร้อนสูง

3.5.1 การได้เปรียบและเสียเปรียบของฟลูอิดไดเซชัน

ข้อเปรียบเทียบการได้เปรียบและการเสียเปรียบระหว่างการใช้นิวเคลียสฟลูอิดไดซ์เบดกับเทคนิคอื่นๆ มีรายละเอียดดังนี้

ข้อได้เปรียบ

1. เนื่องจากเมล็ดของแข็งเคลื่อนที่อยู่ตลอดเวลา ทำให้เกิดการผสมกันอย่างรวดเร็ว และสม่ำเสมอ อุณหภูมิภายในเบดคงที่ตลอด ซึ่งต่างจากเบดนิ่งซึ่งอุณหภูมิจะไม่เท่ากันตลอดทั้งเบด
2. มีการจัดเรียงตัวของเม็ดของแข็ง เม็ดที่มีน้ำหนักน้อยจะอยู่ส่วนบน เม็ดที่มีน้ำหนักมากจะอยู่ส่วนล่าง ซึ่งสามารถนำไปใช้ในการแยกขนาดของเม็ดของแข็งได้ นอกจากนี้แรงเสียดทานต่อการไหลของของไหลมีน้อยกว่ามาก
3. จากคุณสมบัติที่คล้ายกันของไหลจึงสามารถทำงานแบบต่อเนื่องได้ คือปล่อยให้ของแข็งไหลออกจากเบดและไหลเดิมเข้าไปในเบดได้ การควบคุมก็จะทำได้ง่าย
4. พื้นที่สัมผัสระหว่างเม็ดของแข็งกับของไหลจะมีมากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับเบดนิ่งที่จำพวกเม็ดของแข็งเท่ากันจึงมีประโยชน์ในการขยายงานที่มีทั้งการถ่ายเทความร้อนและการถ่ายเทมวลสาร

ข้อเสียเปรียบ

1. เวลาของของไหลสัมผัสกับเม็ดของแข็งสั้นมาก จึงต้องใช้เบดสูง ๆ หรือเบดหลายชั้นเปลืองเงินลงทุนมาก
2. มักเกิดฟองก๊าซในเบดเมื่อทำงานกับก๊าซ ทำให้การสัมผัสไม่ดีเป็นการสูญเสียเปลว ถ้ายังเป็นขบวนการที่มีการเปลี่ยนแปลงทางเคมีและต้องใช้ตัวเร่งช่วยแล้ว ทำให้เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงลดลง
3. การทำงานมีข้อจำกัดเพราะถ้าให้ความเร็วของของไหลสูงเกินไปเม็ดของแข็งก็จะออกจากเบดไปพร้อมกับของไหล
4. ใช้กับเม็ดของแข็งที่เปราะหรือเป็นขางไม่ได้ เพราะเกิดการเกาะเป็นก้อนใหญ่และตกตะกอนมายังส่วนล่างของเบด

3.6 ความชื้นสมดุลของวัสดุ

ความชื้นสมดุลของวัสดุที่มีควาเมสำคัญต่อการศึกษาระบวนการอบแห้ง เพราะเมื่อทำการอบแห้งวัสดุโดยใช้อากาศที่สภาวะคงที่ เช่น อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์คงที่ ความชื้นของวัสดุจะลดต่ำลงจนถึงจุดๆ หนึ่งซึ่งไม่เปลี่ยนแปลง ในขณะที่ความชื้นในวัสดุมีความดันไอเท่ากับความดันไอของอากาศที่อยู่รอบๆ และอุณหภูมิของวัสดุก็เท่ากับอุณหภูมิของอากาศรอบๆ ด้วย เราเรียกความชื้นในขณะนั้นว่า ความชื้นสมดุล ค่าความชื้นสมดุลขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุ อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ

72077

3.7 ผลกระทบของอุณหภูมิในการอบแห้งต่อคุณภาพของเมล็ดพืชหลังการอบ

การอบแห้งมีผลต่อคุณภาพทางกายภาพ ทางเคมี และชีวภาพของเมล็ดพืชหลังการอบแห้ง คุณภาพทางกายภาพที่สำคัญได้แก่ ความชื้นและการหดตัวของเมล็ดพืชระหว่างการอบแห้งซึ่งส่งผลให้เกิดการร้าวหรือแตกหักในเมล็ดพืช คุณภาพทางเคมีในเมล็ดพืชบางชนิด ได้แก่ปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาล (Browning reaction) ความสามารถในการแยกแป้ง และคุณค่าทางอาหารเป็นต้น ส่วนคุณภาพทางชีวภาพ ได้แก่ความสามารถในการงอกของเมล็ดพืช

อุณหภูมิของการอบแห้งมีผลต่อคุณภาพของเมล็ดพืชหลังการอบแห้งมาก การใช้อุณหภูมิที่สูงเกินไปมักทำให้คุณภาพของเมล็ดพืชลดลง อุณหภูมิของอากาศที่ใช้ออบแห้งจะแตกต่างจากอุณหภูมิของเมล็ดพืช เมื่อเริ่มการอบแห้ง อุณหภูมิของเมล็ดพืชจะต่ำกว่าของอากาศ เมื่อเมล็ดพืชแห้งลงมากแล้ว อุณหภูมิของเมล็ดพืชจะเพิ่มสูงขึ้น จนในที่สุดอาจมีอุณหภูมิใกล้เคียงกับอุณหภูมิอากาศ

การใช้อุณหภูมิที่สูงเกินไปจะทำให้เมล็ดพืชสูญเสียความชื้นอย่างรวดเร็ว ทำให้ผิวแข็งตัว เมื่อโชนการอบแห้งเคลื่อนย้ายจากบริเวณผิวไปยังชั้นในๆ ของเมล็ด ทำให้ชั้นในสูญเสียความชื้นและหดตัว โดยแยกตัวออกจากผิวที่แข็ง ซึ่งอาจมีผลให้เกิดรอยร้าว แยกแตก ปริหรือหักในเมล็ด ซึ่งชั้นตอนต่อไปหลังการอบแห้งของเมล็ดพืชคือการสีเพื่อเอาเปลือกออก และผลกระทบอีกอย่างคือเมื่อใช้อุณหภูมิสูงเกินไปเมล็ดด้านในเปลือกจะแห้งติดกับเปลือกทำให้ชั้นตอนการ สิ้นนียาก

ในการทดลองการอบแห้งเมล็ดพืชจะพิจารณาถึงสีของเมล็ดกาแฟด้านในเปลือก ว่าจะต้องไม่เปลี่ยนสี และเมล็ดด้านในไม่เกาะติดกับเปลือก ซึ่งเป็นคุณภาพสำคัญในขั้นตอนการสี ซึ่งในการทดลองจะใช้อุณหภูมิสูงสุดที่ 100 องศาเซลเซียส โดยเมล็ดพืชด้านในเปลือกที่ได้หลังการอบแห้งเริ่มจะมีสีน้ำตาลค่อนข้างเข้ม และเมล็ดด้านในยังไม่เกาะติดกับเปลือก

3.8 ก๊าซฟลูอิดไดเซชัน

ปรากฏการณ์ของฟลูอิดไดเซชันที่เกิดจากก๊าซที่มีความซับซ้อนอย่างมาก ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความเร็วของก๊าซที่ผ่านเข้าเบด ขนาด และรูปร่างของอนุภาคของแข็งที่ใช้เป็นเบด ในขณะที่เบดเริ่มมีลักษณะเป็นฟลูอิดไดเซชันใหม่ๆ จะมีส่วนคล้ายกับลักษณะของเบดที่เกิดในฟลูอิดไดเซชันของของเหลว แต่ถ้าความเร็วของก๊าซเพิ่มขึ้น จะมีก๊าซบางส่วนรวมตัวกัน ก่อตัวเหมือนถุงอากาศ ซึ่งเรียกว่า ฟองก๊าซ

ฟองก๊าซที่เกิดขึ้นจะมีลักษณะแตกต่างกันไป ขึ้นอยู่กับขนาด และรูปร่างของอนุภาคของแข็ง ความเร็วของก๊าซ และแผ่นกระจายของไหล ซึ่งแบ่งได้ดังนี้

3.8.1 Channeling คือ เกิดการผ่านไปของก๊าซเป็นช่อง ๆ โดยที่อนุภาคของแข็งที่อยู่ตรงทางผ่านของก๊าซเท่านั้นที่เคลื่อนที่ แต่บริเวณข้างเคียงจะอยู่กับที่

3.8.2 Bubbling คือ อนุภาคของแข็งในฟลูอิดไดเซชันเบดจะเคลื่อนที่ตลอดเวลา และสม่ำเสมอในเบด แต่ถ้าบริเวณใดมีของแข็งอยู่น้อย เมื่อเปรียบเทียบกับบริเวณอื่น หรือไม่มีเลย เราเรียกบริเวณนั้นว่า Bubbling

3.8.3 Slugging คือ การเกิดฟองก๊าซหรือการรวมตัวของฟองก๊าซ จนได้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของหอคอย มีการแยกตัวของอนุภาคของแข็งเป็นชั้นๆ

3.8.4 Spouted Bed คือ การที่ก๊าซไหลผ่านเฉพาะบริเวณตรงกลางของกลุ่มของของแข็งเท่านั้น ด้วยความเร็วสูงมาก ทำให้บริเวณตรงกลางมีความหนาแน่นของอนุภาคน้อย เมื่อเทียบกับบริเวณด้านข้าง

3.9 การหาความเร็วของก๊าซในหอคอยฟลูอิดไดซ์เบด, u_0

การหาความเร็วของอากาศในหอคอยฟลูอิดไดซ์เบด ที่ทำให้อนุภาคภายในหอคอยสามารถลอยตัวอย่างสม่ำเสมอในหอคอย ความเร็วที่แนะนำคือประมาณ 1.3 เท่าของความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดไดซ์ชันแต่ต้องน้อยกว่าความเร็วสูงสุดที่จะทำให้เกิดฟลูอิดไดซ์ชัน (Soponronnarit และ คณะ. 1995)

$$u_0 = 1.3u_{mf} \quad (3.12)$$

3.10 ฟลูอิดไดซ์ชันความเร็วของไหลต่ำสุด

หมายถึง ฟลูอิดไดซ์ชันในช่วงความเร็วของไหลแคบมาก ๆ คือ ช่วงระหว่างความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดไดซ์เบด และความเร็วที่สูงกว่าเล็กน้อย ลักษณะของเบดที่เกิดขึ้นมีความสม่ำเสมอเป็นเนื้อเดียวกันตลอดทั้งเบด (Uniform and Homogeneous) ผิวหน้าของเบดราบเรียบไม่ว่าของไหลนั้นจะเป็นของเหลวหรือก๊าซ เม็ดของแข็งเริ่มลอยอยู่ในกระแสของไหลระยะห่างระหว่างเม็ดน้อยมาก เม็ดต่อเม็ดเกือบติดกัน การเคลื่อนไหวก็น้อยมาก เพราะอยู่ในวงจำกัด ในทางปฏิบัติผู้ทำการทดลอง มักใช้ความเร็วของไหลสูงกว่าความเร็วต่ำสุดอย่างน้อย 1.5 เท่า

บทที่ 4

การออกแบบเครื่องอบที่ติดแผ่นขยาย

4.1 การออกแบบแผ่นขยายที่ติดมุม 30 องศา

โดยแผ่นขยายที่ทำมุม 30 องศา จะใช้แผ่นอะคริลิกใสความหนา 3 มิลลิเมตร ในหอทดลองจะติดแผ่นขยายมุม 30 องศาประมาณด้านละ 10 ซม. เพื่อให้เหมาะสมกับขนาดความยาวของหอทดลองที่ใช้ มีความสูง 1000 มิลลิเมตร ที่ติดแผ่นขยายนี้เพื่อที่จะดูอิทธิพลของการกระจายตัวของเมล็ดพริกไทยและการลดลงของความชื้นในเมล็ดพริกไทย ดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 แผ่นขยายทำมุม 30 องศา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 แบบของหอทดลอง

หอทดลองใช้เป็นแผ่นอะคริลิกใส ซึ่งมีพื้นที่หน้าตัด ความกว้าง 8 เซนติเมตร ความยาว 20 เซนติเมตร และความสูง 100 เซนติเมตร ภายในหอทดลองจะติดตั้งแผ่นขยายที่มีมุม 30 องศา โดยจะทำการทดลอง โดยเปลี่ยนค่าระยะห่างระหว่างมุมเป็น 3, 2 และ 1 เซนติเมตร ตามลำดับ ดังรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 รูปหอทดลองที่ติดตั้งแผ่นขยายทำมุม 30 องศา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

5.1 อุปกรณ์ในการทดลอง

อุปกรณ์ที่ใช้ในการสร้างเครื่องอบแห้งฟลูอิดไดซ์เบดแบบที่มีการขยายหลายช่วงซึ่งแบ่งออกได้เป็นส่วนต่าง ๆ ดังนี้

5.1.1 เครื่องอบแห้งฟลูอิดไดซ์เบดที่มีการขยายหลายช่วง

หอตทดลองที่ใช้ในการทดลองเป็นท่อสี่เหลี่ยมที่มีขนาดความกว้าง 8 เซนติเมตรความยาว 20 เซนติเมตร และมีความสูง 100 เซนติเมตร



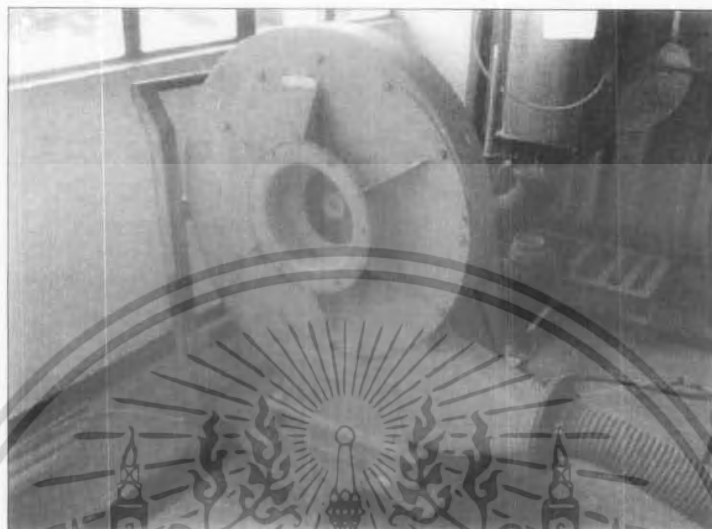
รูปที่ 5.1 หอตทดลอง

โดยจะทำการเปลี่ยนค่าความกว้างของหอตทดลอง 3 ค่าด้วยกันคือมีระยะห่างของมุมตั้งแต่ 3 เซนติเมตร 2 เซนติเมตร และ 1 เซนติเมตร ส่วนด้านล่างของหอตทดลองจะติดแผ่นกระจายลมเพื่อให้ลมกระจายเท่ากันทั้งหอตทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.1.2 ชุดป้อนอากาศ (Blower)

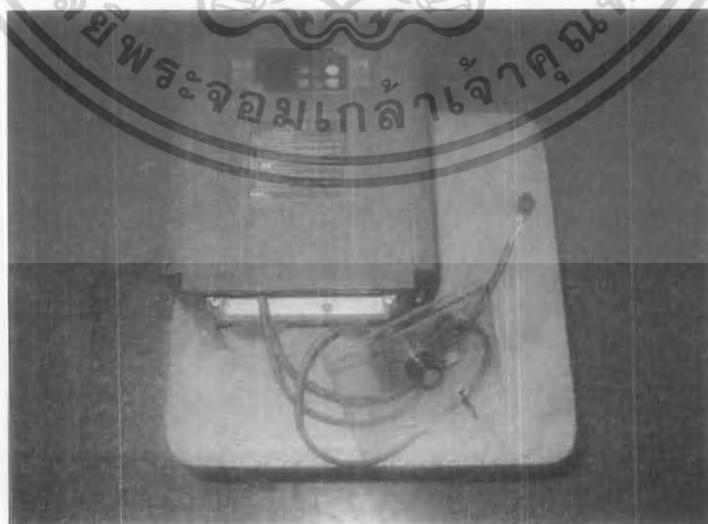
ชุดป้อนอากาศที่ใช้ในการทดลองนั้นจะเป็น Blower ขนาด 5.5 กิโลวัตต์ ความถี่ 50 เฮิร์ต และมี กระแส 11 แอมป์ มีอินเวอร์เตอร์เป็นตัวควบคุมความเร็วรอบของอากาศที่ไหลเข้าหอดทดลอง



รูปที่ 5.2 ชุดป้อนอากาศ (Blower)

5.1.3 ชุดควบคุมความเร็วรอบของชุดป้อนอากาศ (Inverter)

ชุดควบคุมความเร็วรอบที่ใช้ในการทดลองครั้งนี้คือ FUJI รุ่น FVR-E11 ซึ่งจะใช้ควบคุมความเร็วรอบของชุดป้อนอากาศเพื่อที่จะนำการทดลองในค่าความเร็วที่แตกต่างกัน ในการทดลองจะใช้ความเร็ว 2 ค่าด้วยกัน คือ $1.2 U_{mf}$ และ $1.0 U_{mf}$

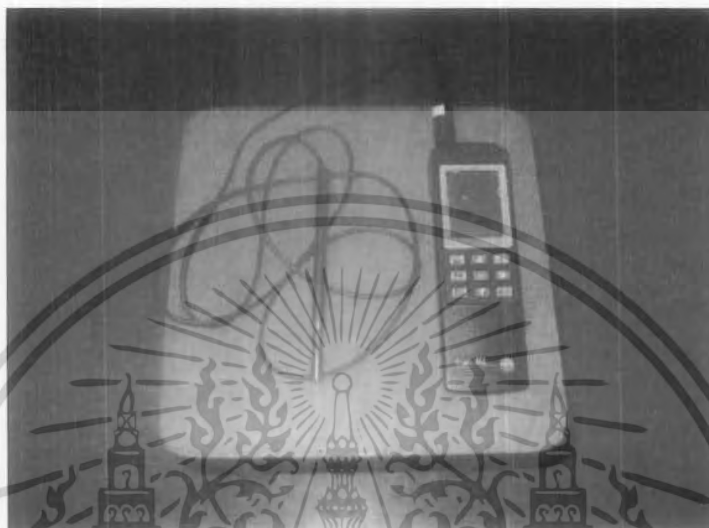


รูปที่ 5.3 ชุดควบคุมความเร็วรอบ (Inverter)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.1.4 เครื่องมือวัดความเร็วของอากาศ (Hot-Wire)

เป็นเครื่องมือวัดแบบ ลวดร้อน(Hot-Wire) ยี่ห้อ Testo รุ่น Testo 445 มีคุณสมบัติที่สามารถวัดของไหลที่เป็นอากาศเท่านั้น ใช้วัดได้ทั้ง ความเร็วอากาศ อัตราการไหล และอุณหภูมิ สามารถบันทึกค่าได้แบบ Data Locker พร้อมทั้งใบสอบเทียบมาตรฐานเครื่องมือวัด



รูปที่ 5.4 เครื่องมือวัดความเร็วของอากาศ (Hot-Wire)

5.1.5 ชุดให้ความร้อน (Heater)

ระบบให้ความร้อนนั้นได้เลือกใช้ Heater ขนาด 12 กิโลวัตต์ ซึ่งใช้ขดลวดให้ความร้อน ขดอยู่ภายในตัว Heater โดยจะมีตัวควบคุมอุณหภูมิเพื่อวัดได้อุณหภูมิที่ใช้ในการทดลองตามต้องการ



รูปที่ 5.5 ชุดให้ความร้อน (Heater)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.1.6 ตัวควบคุมอุณหภูมิชุดให้ความร้อน

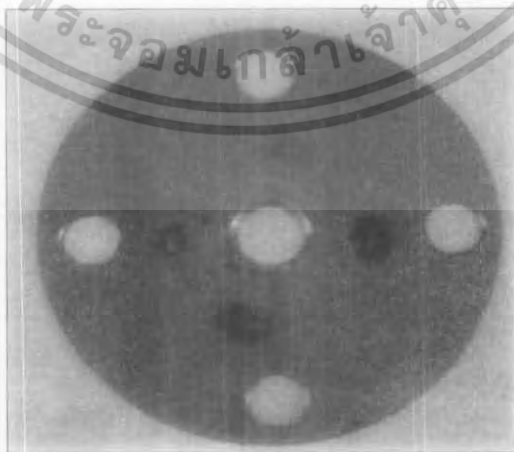
ตัวควบคุมอุณหภูมิชุดให้ความร้อนตัวนี้จะใช้ควบคุมอุณหภูมิที่ใช้ในการทดลองเพื่อให้อุณหภูมิ นั้นคงที่ตลอดเวลาการทดลองเพราะในการนำหอทดลองมาชั่งแต่ละครั้งค่าของอุณหภูมิจะเปลี่ยนแปลง ต้องคอยใช้ตัวควบคุมอุณหภูมิปรับค่าให้ได้ตามต้องการ



รูปที่ 5.6 ตัวควบคุมอุณหภูมิชุดให้ความร้อน

5.1.7 ชุดวัดอัตราการไหลของอากาศ (Orifice)

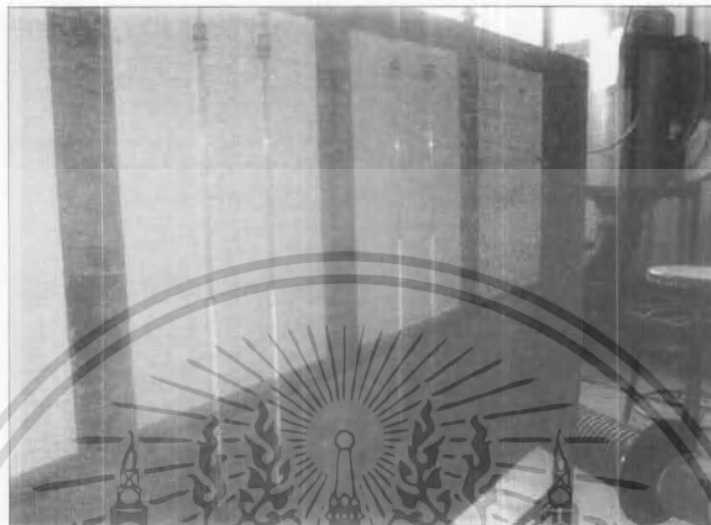
ชุดวัดความเร็วของอากาศที่ไหลเข้าหอทดลองของฟลูอิดไดซ์เบดที่มีการขยายหลายช่วง อากาศ ร้อนจากตัวให้ความร้อนจะไหลผ่าน ออร์ฟิส (Orifice) เพื่อทำการวัดความดัน โดยใช้มาโนมิเตอร์ (Manometer) วัดความดันตกต่าง ระหว่างทางเข้าและทางออกของ ออร์ฟิส (Orifice)



รูปที่ 5.7 ชุดวัดอัตราการไหลของอากาศ (Orifice)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การสร้างออร์ฟิสมิเตอร์ใช้ตามมาตรฐาน (ANSI/API 2530) และมาโนมิเตอร์ (Manometer) ซึ่งใช้น้ำเป็นของเหลวจะบรรจุอยู่ในหลอดแก้ว ดังรูปที่ 5.8



รูปที่ 5.8 มาโนมิเตอร์ (Manometer)

5.1.8 อุปกรณ์ชั่งน้ำหนักของมัลติพริกไทย

อุปกรณ์ชั่งน้ำหนักที่ใช้จะเป็นเครื่องชั่งดิจิตอลความละเอียด 0.01 กรัม (มีการแสดงผลเป็นตัวเลขทำให้ได้ความละเอียดมากขึ้น)



รูปที่ 5.9 อุปกรณ์ชั่งน้ำหนัก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2 พารามิเตอร์ในการทดลอง

การวิจัยครั้งนี้จะทำการศึกษาถึงผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงค่าความเร็ว (Superficial air velocity) ภายในหอทดลองและลักษณะของแผ่นขยายที่ทำมุม 30 องศา และเปลี่ยนค่าความกว้างของหอทดลอง แล้วมาเปรียบเทียบกับหोल่องว่ามีผลกระทบต่อการลดความชื้นอย่างไรบ้าง

การทดลองในครั้งนี้จะพิจารณาถึงการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ของการทดลองเนื่องจากได้มีการทำการศึกษาแล้วพบว่า การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในการอบเมล็ดพืช มีผลต่อการลดลงของความชื้นในเมล็ดพืชในการอบแบบเทคนิคฟลูอิดไดซ์เบด ในการวิจัยครั้งนี้ใช้อุณหภูมิที่ 60, 80 และ 100 องศาเซลเซียส

5.3 ลำดับการทดลอง

5.3.1 การหาค่าความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดไดเซชัน

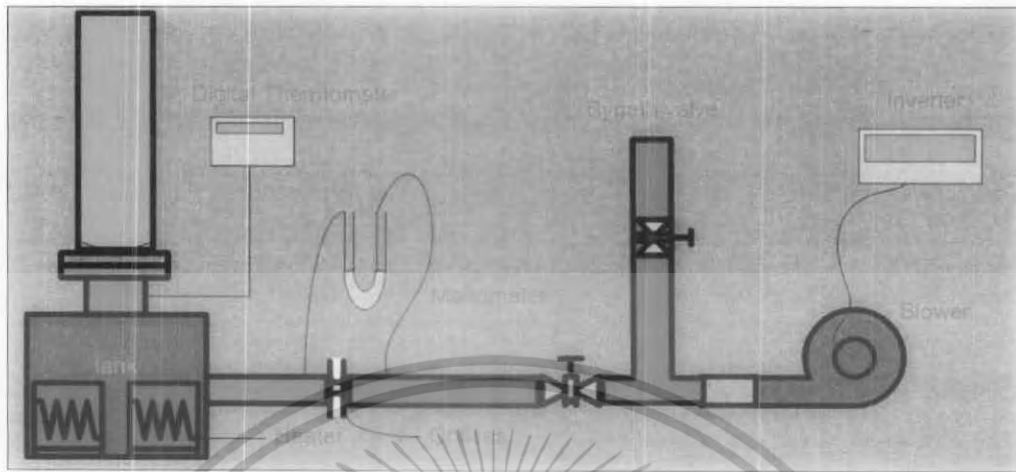
1. ทำการติดตั้งชุดมาโนมิเตอร์เข้ากับชุด ออริฟิส
2. ใส่เมล็ดพริกไทยลงในหอทดลองจำนวน 500 กรัม
3. เปิดโบลเวอร์ให้ระดับของน้ำในมาโนมิเตอร์ที่วัดจากความดันแตกต่างระหว่าง ทางเข้าและทางออกของ ออริฟิส โดยทำการปรับความเร็วของโบลเวอร์ให้ระดับของความต่างของมาโนมิเตอร์เปลี่ยนไปที่ละ 2 มิลลิเมตร
4. บันทึกค่าความดันตกคร่อมภายในหอทดลอง
5. ปรับความเร็วไปจนกว่าสังเกตเห็นเมล็ดพริกไทยเริ่มขยับและความดันในหอทดลองเริ่มคงที่ถึงแม้มีการเปลี่ยนแปลงความเร็ว
6. ทำตามขั้นตอน 2 ถึง 5 โดยเปลี่ยนหอทดลองที่ติดแผ่นขยายทำมุม 30 องศา

5.3.2 ขั้นตอนการอบแห้งเมล็ดพริกไทยโดยใช้เทคนิคฟลูอิดไดซ์เบดที่มีการขยายหลายช่วง

1. ประกอบชุดหอทดลองโถงเข้ากับเครื่องอบแห้งฟลูอิดไดซ์เบด
2. เปิดโบลเวอร์ อุณหภูมิประมาณ 15 นาที ให้ได้อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส
3. ใส่เมล็ดพริกไทยลงในหอทดลอง 200 กรัม
4. ตั้งความเร็วให้ได้ $1.2 U_{mf}$
5. นำพริกไทยออกมาชั่งทุก ๆ 5 นาที ในการนำมาชั่งแต่ละครั้งไม่ควรเกิน 15 วินาที
6. ทำตามขั้นตอน 2 ถึง 5 โดยเปลี่ยนความเร็วเป็น $2.0 U_{mf}$
7. ทำการทดลองตามขั้นตอน 2 ถึง 6 โดยเปลี่ยนหอทดลองที่ติดแผ่นขยายทำมุม 30 องศา
8. ในการทดลองของหอทดลองที่ติดแผ่นทำมุม 30 องศา มีการเปลี่ยนระยะห่างของมุม โดยมีด้วยกัน 3 ขนาดด้วยกัน คือ 3, 2 และ 1 เซนติเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.4 การติดตั้งเครื่องอบแห้งฟลูอิดไดซ์เบดที่มีการขยายหลายช่วง



รูปที่ 5.10 ผังแสดงชุดอุปกรณ์การติดตั้งเครื่องอบแห้งฟลูอิดไดซ์เบดที่มีการขยายหลายช่วง

ตารางที่ 5.1 ตารางแสดงการทดลองการอบแห้งโดยใช้เทคนิคฟลูอิดไดซ์เบดที่มีการขยายหลายช่วง

ลักษณะหอตดลอง	ระยะทางระหว่างมุม (cm)	ความเร็วของอากาศ (Umf)
หอตฟลูอิดไดซ์เบดธรรมดา	1.2 และ 2.0	1.2 และ 2.0
หอดัดแผ่นขยายมุม 30 องศา	2.1 เซนติเมตร	1.2 และ 2.0

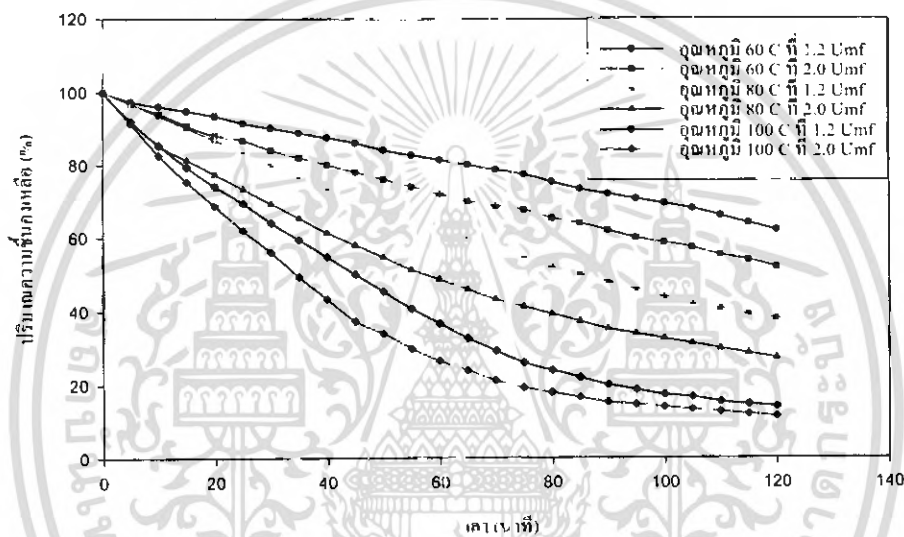
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 6

ผลการทดลอง

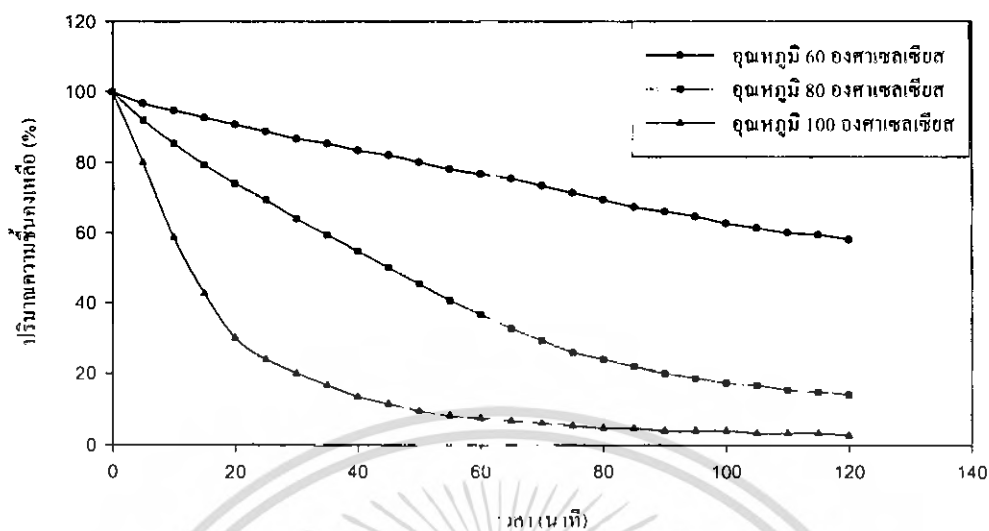
6.1 แสดงการเปรียบเทียบระหว่างปริมาณความชื้นกับเวลา ของหอยทอดลงแบบต่าง ๆ

จากการทดลองครั้งนี้ ได้บันทึกน้ำหนักของเมล็ดพริกไทยจากการนำมาซึ่งทุก ๆ 5 นาที แล้วนำค่าที่ได้ไปคำนวณหาเปอร์เซ็นต์ความชื้นคงเหลือที่เวลานำมาซึ่งแต่ละครั้ง จากนั้นนำค่าที่ได้ไปพล็อตกราฟเพื่อเปรียบเทียบอัตราการลดลงของความชื้นในแต่ละกรณี

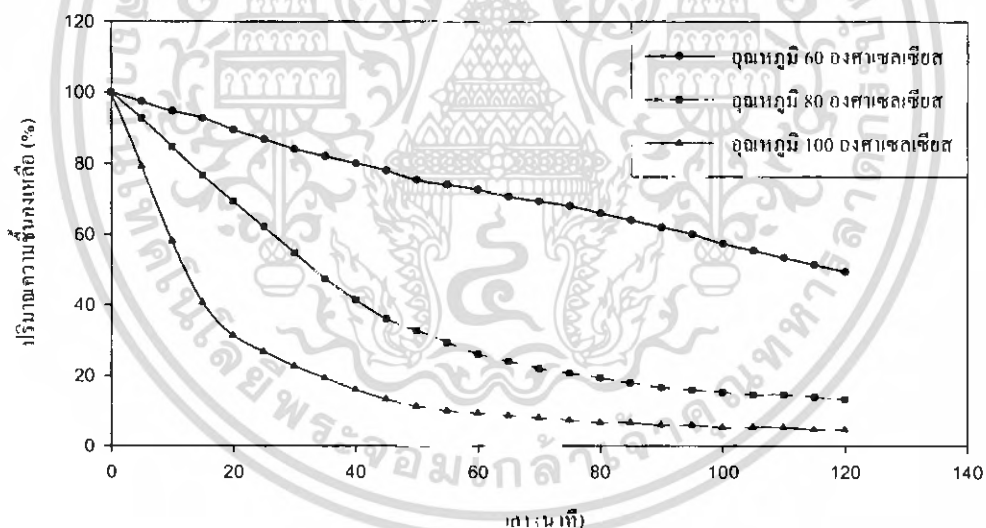


รูปที่ 6.1 กราฟเปรียบเทียบระหว่างปริมาณความชื้นกับเวลา ของหอยฟลูอิด ไคซ์เบตธรรมดา

จากกราฟในรูปที่ 6.1 จะพบว่า การทดลองโดยใช้เทคนิคฟลูอิด ไคซ์เบตแบบหอยทอดลงฟลูอิด ไคซ์เบตธรรมดา ความเร็วลมมีผลต่อการอบแห้ง เพราะที่ความเร็ว 1.2 Umf สังเกตในขณะทำการทดลองจะเห็นว่าเมล็ดพริกไทยมีการกระจายตัวกันน้อยมาก จะเกาะกลุ่มกันเป็นก้อนและเมล็ดที่ติดกับขอบข้างของหอยทอดลงจะไม่มีการขยับเมล็ดพริกไทยซึ่งจะอยู่กับที่ ส่วนที่ความเร็ว 2.0 Umf จะมีการขยับของเมล็ดบ้างแต่ก็ยังมีบางส่วนที่ไม่ขยับอยู่ ทำให้พื้นที่การถ่ายเท ความร้อนระหว่างเมล็ดพริกไทยกับลมร้อนมีน้อยและความร้อนส่วนมากจะสูญเสียออกไปจก หอยทอดลงอย่างรวดเร็วโดยไม่เกิดการถ่ายเทความร้อนให้กับเมล็ดพริกไทย ทำให้ปริมาณความชื้นของเมล็ดพริกไทยลดลงน้อยกว่าการอบแห้งในรูปแบบอื่น ๆ

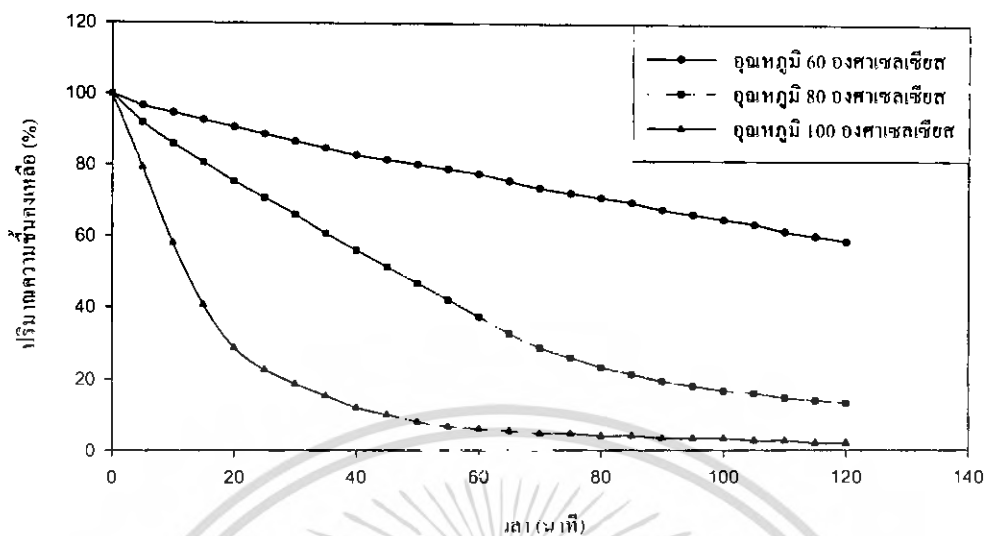


รูปที่ 6.2 กราฟเปรียบเทียบระหว่างปริมาณความชื้นกับเวลา ของหอตดลองที่ติดแผ่นขยายทำมุม 30 องศา ที่ระยะห่างระหว่างมุมของหอตดลอง 3 เซนติเมตร ความเร็ว 1.2 Umf

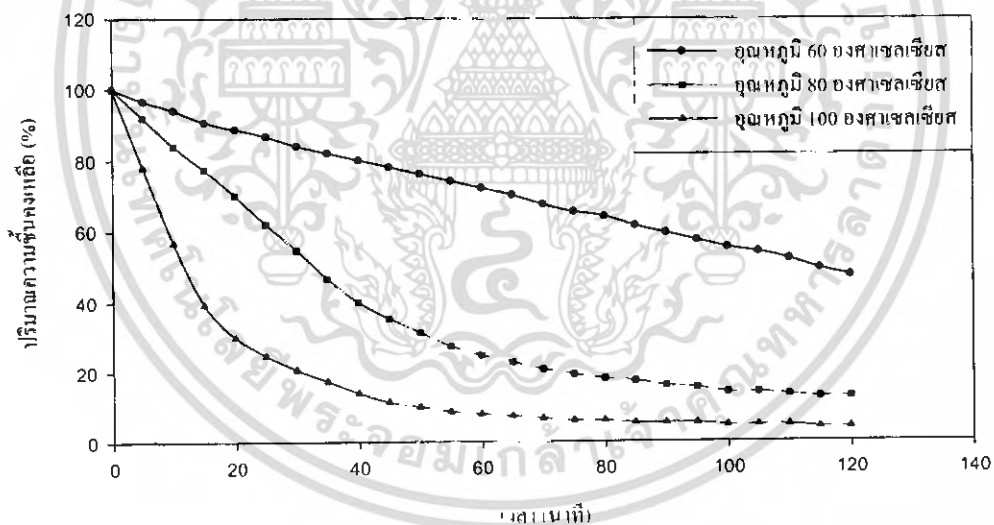


รูปที่ 6.3 กราฟเปรียบเทียบระหว่างปริมาณความชื้นกับเวลา ของหอตดลองที่ติดแผ่นขยายทำมุม 30 องศา ที่ระยะห่างระหว่างมุมของหอตดลอง 3 เซนติเมตร ความเร็ว 2.0 Umf

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

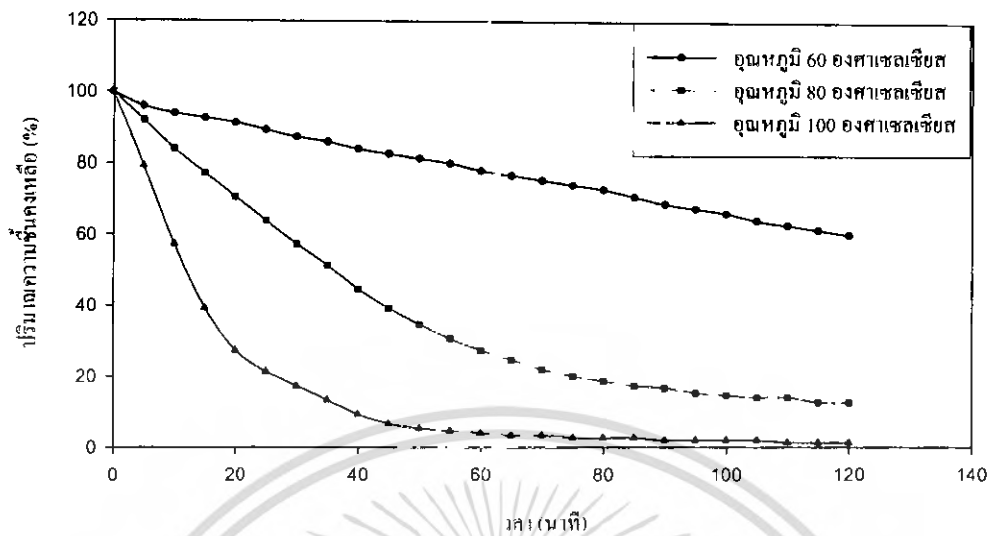


รูปที่ 6.4 กราฟเปรียบเทียบระหว่างปริมาณความชื้นกับเวลา ของหอยทอคลองที่ติดแผ่นขยายทำมุม 30 องศา ที่ระยะห่างระหว่างมุมของหอยทอคลอง 2 เซนติเมตร ความเร็ว 1.2 Umf

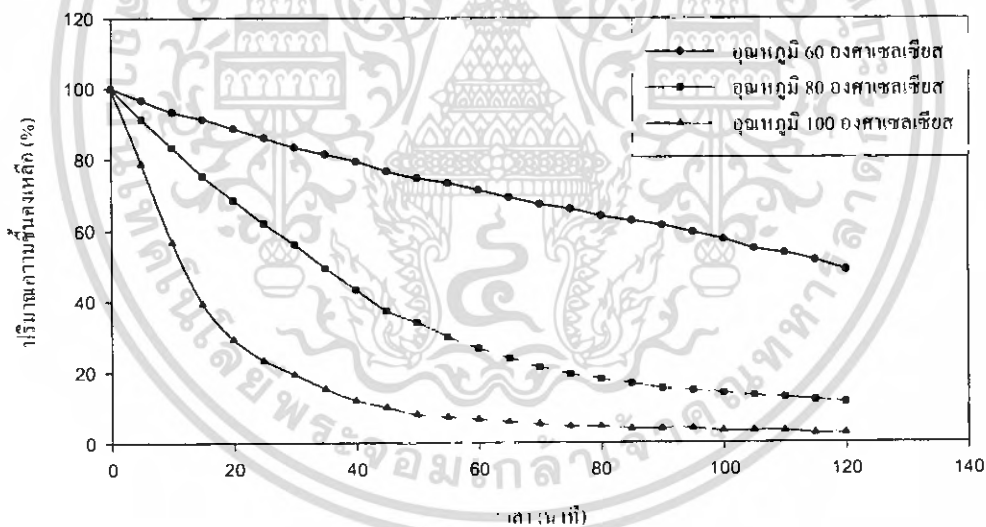


รูปที่ 6.5 กราฟเปรียบเทียบระหว่างปริมาณความชื้นกับเวลา ของหอยทอคลองที่ติดแผ่นขยายทำมุม 30 องศา ที่ระยะห่างระหว่างมุมของหอยทอคลอง 2 เซนติเมตร ความเร็ว 2.0 Umf

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.6 กราฟเปรียบเทียบระหว่างปริมาณความชื้นกับเวลา ของหอยทดลองที่ติดแผ่นขยายทำมุม 30 องศา ที่ระยะห่างระหว่างมุมของหอยทดลอง 1 เซนติเมตร ความเร็ว 1.2 *Umf*



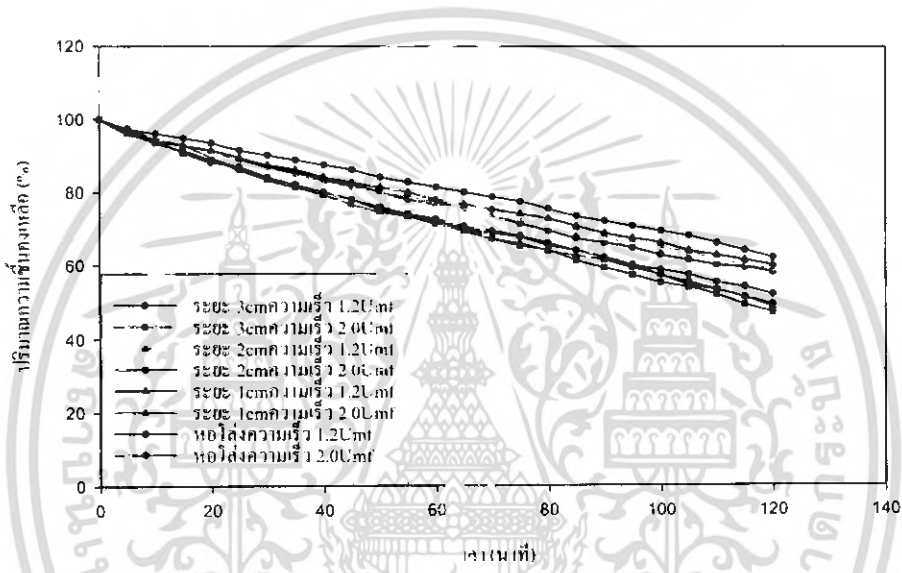
รูปที่ 6.7 กราฟเปรียบเทียบระหว่างปริมาณความชื้นกับเวลา ของหอยทดลองที่ติดแผ่นขยายทำมุม 30 องศา ที่ระยะห่างระหว่างมุมของหอยทดลอง 1 เซนติเมตร ความเร็ว 2.0 *Umf*

จากกราฟรูปที่ 6.2 - 6.7 จะพบว่าเมื่อติดแผ่นขยายทำมุม 30 องศาเข้าไปในหอยทดลองความเร็ว และอุณหภูมิต่าง ๆ มีผลต่อการอบแห้ง โดยจะเห็นว่าความชื้นจะลดลงเร็วขึ้น จะเห็นได้ว่าความกว้างของ หอยทดลองก็มีผลเช่นกัน เพราะที่ระยะห่างระหว่างมุม 1 เซนติเมตรจะลดความชื้นได้มากกว่า 3 และ 2 เซนติเมตรและแผ่นขยายทำมุม 30 องศา ยังจะช่วยให้เมล็ดพริกไทยกระจายตัวภายในหอยทดลองได้ดี เป็น ผลให้พื้นที่การแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างเมล็ดพริกไทยกับลมร้อนเพิ่มขึ้น ช่วยให้เกิดการไหลอย่าง เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

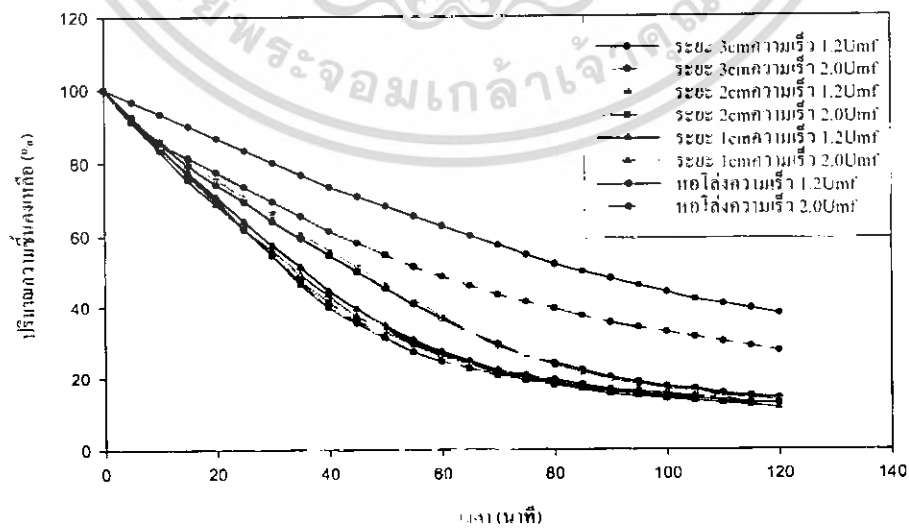
ปีนป่วนของลมร้อน ทำให้ลมร้อนใหม่เข้าไปสัมผัสกับเมล็ดพริกไทยตลอดเวลา ช่วยให้ความชื้นในเมล็ดพริกไทยลดลงเร็วขึ้น

6.2 เปรียบเทียบฟลูอิดไดซ์เบดที่อุณหภูมิต่าง ๆ

เป็นการแสดงผลของปริมาณความชื้นเทียบกับเวลา ของเทคนิคฟลูอิดไดซ์เบดชนิดแผ่นขยายทำมุม 30 องศา ที่อุณหภูมิต่าง ๆ เปรียบเทียบที่ความเร็ว 1.2 Umf และ 2.0 Umf ที่ได้ทำการทดลองมา เพื่อคุณลักษณะแนวโน้มการลดลงของความชื้นในเมล็ดพริกไทย รวมไปถึงเวลาที่ใช้ในการอบแห้ง จากกราฟที่แสดงต่อไปนี้

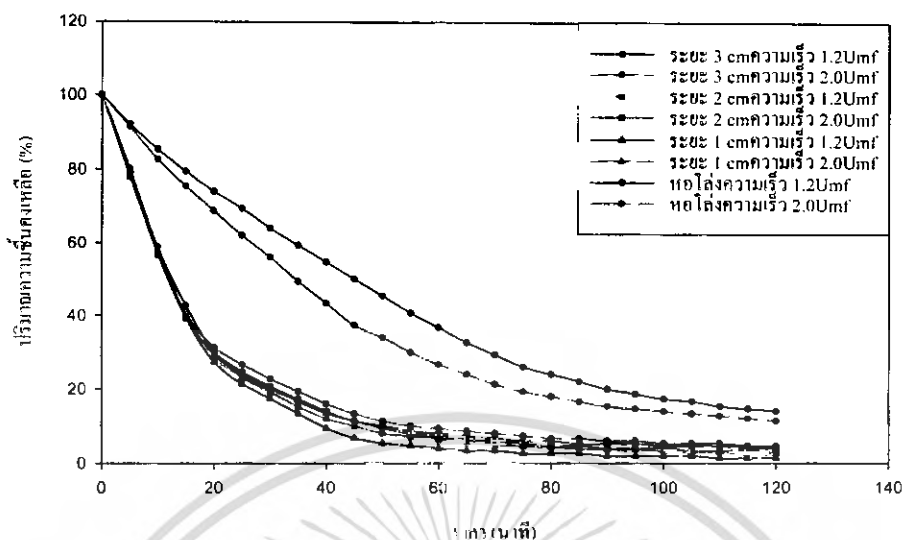


รูปที่ 6.8 กราฟเปรียบเทียบระหว่างปริมาณความชื้นกับเวลา ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส



รูปที่ 6.9 กราฟเปรียบเทียบระหว่างปริมาณความชื้นกับเวลา ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์สงวนไว้สำหรับครูอาจารย์เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นับญาติเห็นาไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.10 กราฟเปรียบเทียบระหว่างปริมาณความชื้นกับเวลา ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส

จากการเปรียบเทียบ กราฟรูปที่ 6.8 - 6.10 จะเห็นได้ว่าเมื่อตัดแผ่นขยายทำมุม 30 องศา จะดีกว่า ฟลูอิดไดซ์เบดธรรมดาหรือหอล่อง จะช่วยลดอัตรา การอบแห้งเมล็ดพริกไทยเร็วขึ้น และสามารถช่วยให้ การแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างลมร้อนกับเมล็ดพริกไทยดีขึ้นและเมล็ดพริกไทยมีการกระจายตัวได้ ดีกว่า จึงสรุปได้ว่าการอบแห้งโดยใช้หอทดลองที่ตัดแผ่นขยายทำมุม 30 องศาจะดีกว่า หอทดลองแบบ ธรรมดาหรือแบบหอล่อง

บทที่ 7

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

7.1 สรุปผลการทดลอง

จากการทดลองใช้เทคนิคฟลูอิดไดซ์เบดแบบธรรมดาหรือแบบหอโล่ง จะพบว่าความเร็วลมมีผลต่อการอบแห้ง เพราะที่ความเร็ว 1.2 *Umf* สังเกตเห็นในขณะที่ทำการทดลองจะเห็นว่าเมล็ดพริกไทยมีการกระจายตัวกันน้อยมาก โดยในช่วงแรก ๆ ของปริมาณความชื้นคงเหลือจะลดน้อยกว่า 2.0 *Umf* จะเกาะกลุ่มกันเป็นก้อนและเมล็ดที่ติดกับขอบข้างของหอตกลงจะไม่มี การยับเมล็ดพริกไทยซึ่งจะอยู่กับที่พอที่เวลาผ่านไปประมาณ 1 ชั่วโมงเมล็ดพริกไทยจะกระจายตัวดีกว่า 2.0 *Umf* ทำให้พื้นที่การถ่ายเทความร้อนระหว่างเมล็ดพริกไทยกับลมร้อนมีน้อย และความร้อนส่วนมากจะสูญเสียออกไปจากหอตกลงอย่างรวดเร็วโดยไม่เกิดการถ่ายเทความร้อนให้กับเมล็ดพริกไทย ทำให้ปริมาณความชื้นของเมล็ดพริกไทยลดลงน้อยกว่าการอบแห้งในรูปแบบอื่น ๆ และเปลี่ยนการทดลองโดยคิดแผ่นขยายที่ทำมุม 30 องศา เข้าไปในหอตกลงความเร็วเริ่มมีผลต่อการอบแห้งโดยจะเห็นว่าความชื้นจะลดลงเร็วขึ้น และความกว้างของหอตกลงก็มีผลเช่นกัน เพราะที่ระยะห่างระหว่างมุม 1 เซนติเมตรจะลดความชื้นได้มากกว่า 3 และ 2 เซนติเมตร และแผ่นขยายทำมุม 30 องศา ยังจะช่วยให้เมล็ดพริกไทยกระจายตัวทั่วทั้งหอตกลง เป็นผลให้พื้นที่การแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างเมล็ดพริกไทยกับลมร้อนเพิ่มขึ้น ซึ่งปริมาณความชื้นคงเหลือในเมล็ดพริกไทยที่ดีที่สุดของแต่ละอุณหภูมิ คือ ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส คงเหลือ 47.33 % ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส คงเหลือ 11.33 % และที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส คงเหลือ 1.33 % ตามความชื้นมาตรฐานเปียก

จากการทดลองทั้ง 3 แบบ สรุปได้ว่าการใช้เทคนิคฟลูอิดไดซ์เบดแบบคิดแผ่นขยายทำมุม 30 องศา ช่วยลดความชื้นในเมล็ดพริกไทยได้ดีกว่าการใช้เทคนิคฟลูอิดไดซ์เบดแบบธรรมดาหรือหอโล่ง และยังทำให้เมล็ดพืชเกิดการกระจายตัวกันทั่วหอยมากขึ้นการแลกเปลี่ยนความร้อนของเมล็ดพืชกับลมร้อนก็จะดีขึ้น

7.2 ข้อเสนอแนะ

7.2.1 ในการทดลองถ้าปริมาณความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศเปลี่ยนแปลงมาก ๆ จะมีผลต่ออัตราการทดลองของปริมาณความชื้นในเมล็ดพริกไทย ดังนั้นจึงควรควบคุมปริมาณความชื้นสัมพัทธ์หรือทำการทดลองที่ปริมาณความชื้นสัมพัทธ์ปกติ

7.2.2 ในการออกแบบเครื่องทดลองไม่ควรออกแบบให้ระยะห่างของหอตกลงกับแหล่งความร้อน(ฮีตเตอร์)มากเกินไปเพื่อป้องกันความร้อนสูญเสียเนื่องจากเกิดการถ่ายเทกับอากาศ

บรรณานุกรม

- กาญจน์มณี ศรีวิศาลภพ. 2546. **ความรู้เรื่องกาแฟดีแคไพน...?**. กรุงเทพฯ : ดอกหญ้าการ์ฟ.
- กิตติชัย ไตรรัตนศิริชัย และ กิตติ สิทธิประภาพร. 2545. “การจำลองแบบและการทดลองการอบแห้งพริกแบบชั้นบาง” หน้า 592-595 ใน **การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 16**. กรุงเทพฯ : มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- กรมการค้าภายใน กระทรวงพาณิชย์. 2542. **การพัฒนาการผลิตและการตลาดกาแฟ**. งานจัดประกวดเมล็ดกาแฟ ปี 2541/42 และการสัมมนา. กรุงเทพฯ : บริษัท มพิชการพิมพ์ จำกัด.
- ณัฐพล ภูมิสะอาด สมชาติ โสภณธฤทธิ และ อภิชาติ เทอดโยธิน. 2542. “แบบจำลองการแพร่ความชื้นของข้าวเปลือกที่อบแห้งด้วยเทคนิคฟลูอิดไดเซชัน.” หน้า 268-273. ใน **การประชุมใหญ่วิชาการทางวิศวกรรม**. กรุงเทพฯ : มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- วิวัฒน์ วุฒิววัฒน์ชัย. 2540. “แนวทางที่เหมาะสมสำหรับการอบแห้งถั่วเหลืองโดยเทคนิคฟลูอิดไดเซชัน” วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีพลังงาน มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- สมชาติ โสภณธฤทธิ. 2540. **การอบแห้งเมล็ดพืชและอาหารบางประเภท**. พิมพ์ครั้งที่ 7. กรุงเทพฯ : หนังสือในโครงการส่งเสริมการสร้างตำรา สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- อนันต์ พงษ์ธรรมาพิช. 2539. “การศึกษาการอบแห้งข้าวโพดโดยใช้เทคนิคฟลูอิดไดเซชัน.” วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีพลังงาน มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- วรมธ ทัดทอง. “การศึกษาเชิงทดลองอบแห้งเมล็ดกาแฟด้วยเทคนิคฟลูอิดไดซ์เบด” วิทยานิพนธ์ปริญญาโท. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. พ.ศ. 2546.
- การุณ เลาะมาน. “การศึกษาการอบแห้งเทคนิคลมหมุนวงแบบมีแผ่นขวาง” วิทยานิพนธ์ปริญญาโท. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. พ.ศ. 2547.
- กิตติชัย พาวขุนทด และคณะ. “การศึกษาเชิงทดลองการอบแห้งเมล็ดพริกไทยด้วยเทคนิคฟลูอิดไดซ์เบดแบบผิวคลื่น” วิทยานิพนธ์ปริญญาตรี. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. พ.ศ. 2547.
- Abdullah, M.Z.Husain, Z.and Yin Pong, S.I. 2003. “Analysis of cold flow fluidization test results for various.” **Biomass & Bioenergy**. 24 : 487-494.
- Akpinar, E. Midilli, A. and Bicer, Y. 2003. “Single layer drying behavior of potato slices in a convective cyclone dryer and mathematical modeling.” **Energy Conversion and Management**. 44 : 1689-1705.
- Brooker, D.B. Bakker-Arkema, F.D. and Hall, C. W. 1981. **Drying Cereals Grains**. The AVI publish
- เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Company, Inc, Westport, Connecticut.

- Crank, J. 1975. **The mathematics of diffusion**. 2nd ed. Oxford : Oxford University Press.
- Davidson, J. F. Clift, R. and Harrison, D. 1985. **Fluidization**. 2nd ed. London : Academic Press
- Ertekin, C. and Yaldiz, O. 2004. "Drying of eggplant and selection of a suitable thin layer drying model." **Journal of Food Engineering**. 63 : 349-359.
- Kozanoglu, B.U. Welti Chanes, J. Garcia Cuautle, D. and Santos Jean J.P. 2002. "Hydrodynamics of large particle fluidization in reduced pressure operations: an experimental study." **Power Technology**. 125 : 55-60.
- Kunii, D. Levenspiel, O. 1991. **Fluidization Engineering**. 2nd ed. United States of America : Butterworth-Heinemann.
- Mawatari, Y. Tatemoto, Y. Noda, K. 2003. "Prediction of minimum fluidization velocity for vibrated fluidized bed." **Power Technology** 131 : 66-70.
- Midilli, A. Olgun, H. and Yapar, Z. (2002). A new model for single layer drying. **Drying Technology**. 20(7), 1503-1513.
- Montgomery, D.C. 1997. **DESIGN AND ANALYSIS OF EXPERIMENTS**. Fourth edition. Canada : John Wiley & Sons, Inc.
- Senadeera, W. Bhandari, B.R. Toung, G. Wijesinghe, B. 2003. "Influence of shapes of selected vegetable materials on drying kinetics during fluidized bed drying." **Journal of Food Engineering**. 58 : 277-283.
- Sharma, R.R. 1999. "Fluidized bed drying characteristics of green-mango and potato." A thesis submitted in partial fulfillment of the requirements of the degree of master of Engineering. Asian Institute of technology.
- Soponronarit, S. Yapha, M. and Prachayawarakorn, S. 1995. "Cross-flow fluidized bed paddy dryer." **Drying Technology**. 53(8) : 2207-2216
- Soponronarit, S. Kittiporn, K. and Prachayawarakorn, S. 1999. "CORNDRYING IN A CONTINUOUS FLUIDIZED BED DRYER." **Agricultural Engineering Journal**. 8(4): 223-231.
- Srivastava, V.K. and John, J. 2002. "Deep bed grain drying modeling" **Energy Conversion and management**. 43 : 1689-1708.
- Suksankraison, K. Patumsawad, S. and Fungtammasan, B. 2001 "Prediction of Minimum Fluidisation Velocity from Correlations: An Observation." **Asia J. Energy Environ**. 2:145-154.
- Syahrul, S. Hamdullahpur, F. and Dincer, I. 2002. "Thermal analysis in fluidized bed drying of moist particles." **Applied Thermal Engineering**. 22 : 1763-1775.
- Togrul, I.T. and Pehlivan, D. 2003. "Modeling of drying kinetics of single apricot." **Journal of Food Engineering** 58 : 23-32.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในภาคผนวก ก นี้เป็นการคำนวณหาขนาดของอุปกรณ์หลัก ในแต่ละส่วนของเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไดซ์เบดแบบหอสีเหลี่ยม เพื่อใช้อบแห้งเมล็ดพริกไทย โดยใช้เมล็ดพริกไทยเข้ามาเป็นข้อมูลในการออกแบบ การคำนวณหาขนาดชิ้นส่วนของอุปกรณ์หลักจะใช้ทฤษฎี จากบทที่ 3 บางตามลำดับขั้นตอน ได้ใช้วิธีหาตัวแปรจากการทดลอง ดังนี้

การหาขนาดของอุปกรณ์ของเครื่องอบแห้งฟลูอิดไดซ์เบด

การคำนวณเพื่อคำนวณหาขนาดของอุปกรณ์ต่างๆ ที่เหมาะสมสำหรับเครื่องอบแห้งฟลูอิดไดซ์เบดแบบหอสีเหลี่ยม โดยมีวิธีการคำนวณหาขนาดของอุปกรณ์ดังนี้

1.1 การคำนวณหาความเร็วของอากาศต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดไดซ์ชัน (U_{cr})

โดยมีการหาตัวแปรต่าง ๆ จากการทดลอง และการคำนวณจากสมการออกแบบที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 3 ผลจากการคำนวณ สามารถใช้หาอัตราการไหลเชิงปริมาตร (Q) และขนาดของพัดลมอัดอากาศซึ่งจะได้กล่าวในหัวข้อต่อไป

1.1.1 เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของเมล็ดพริกไทย (D_p)

การออกแบบเพื่อใช้ในการอบแห้งเมล็ดพริกไทยนั้น รูปทรงของเมล็ดพริกไทยเป็นทรงกลม

ตารางที่ ก.1 ค่าเฉลี่ยของเส้นผ่านศูนย์กลางของเมล็ดพริกไทย

ตัวแปร	ค่าเฉลี่ย
เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของเมล็ดพริกไทย (D_p)	0.003 m

1.1.2 การคำนวณค่าของแฟคเตอร์รูปร่าง (ϕ)

คือ ตัวแปรเบื้องต้นอีกตัวหนึ่งที่มีผลต่อความเร็วของอากาศต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดไดซ์ชัน สำหรับการออกแบบเครื่องอบแห้งฟลูอิดไดซ์เบดแบบหอสีเหลี่ยม จากทฤษฎีในบทที่ 3 แฟคเตอร์รูปร่างสำหรับกรณีที่ต้องการอบแห้งมีรูปร่างทรงกลม ($\phi = 1$) ซึ่งในกรณีนี้ผลิตภัณฑ์ที่ต้องการอบแห้ง คือ เมล็ดพริกไทยดำ ซึ่งมีค่า ($\phi = 1$)

1.1.3 การคำนวณหาสัดส่วนช่องว่างต่ำสุดของเมล็ดพริกไทย (ε_m)

จากการทดลองของ WEN และ YU โดยใช้วัตถุชนิดต่าง ๆ ทดสอบสรุปได้ว่า จากสมการ (3.1)

$$\varepsilon_m = \left(\frac{0.071}{\phi} \right)^{1/3}$$

และรูปร่างของเมล็ดพริกไทย ($\phi = 1$)

ดังนั้นจึงได้

$$\varepsilon_m = 0.414$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.1.4 ความหนาแน่นของเมล็ดพริกไทย (ρ)

คือ อีกปัจจัยที่มีความสำคัญและมีผลต่อการคำนวณความเร็วของอากาศต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดไดเซชัน โดยที่ความหนาแน่นหาได้จากจำนวนของเมล็ดพริกไทยค่า 1 kg. เพื่อหาความหนาแน่นของเมล็ดพริกไทย แล้วแทนค่าในสมการดังนี้

$$\rho = \frac{m_p}{V}$$

$$= \frac{1}{5.8343 \times 10^{-4}}$$

$$= 1714 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$$

ดังนั้นเมล็ดพริกไทยมีความหนาแน่นเท่ากับ $1714 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$

1.1.5 ความสูงที่เกิดฟลูอิดไดเซชัน (L)

คือ การคำนวณหาความสูงที่เมล็ดพริกไทยลอยในเบดที่เป็นฟลูอิดไดเซชันเพื่อกำหนดความสูงของเบด H ต้องมีค่ามากกว่าความสูงที่เกิดฟลูอิดไดเซชันสองเท่าเป็นอย่างน้อย เพื่อป้องกันไม่ให้เมล็ดพริกไทย กระเด็นออกจากเบด การคำนวณขั้นต้นได้มีการหาตัวแปรของความสูงที่ต้องการใส่เมล็ดพริกไทย (L_0) เสียก่อน โดยกำหนดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเบด ($d = 0.090 \text{ m}$) แล้วคำนวณหาความสูงของเมล็ดพริกไทย จากปริมาตรเบดได้จากความหนาแน่น

$$L = \frac{(1 - \varepsilon)L_0}{(1 - \varepsilon_{mf})}$$

$$= \frac{(1 - 0.476)0.1}{(1 - 0.414)}$$

$$= 0.089 \text{ m}$$

ผลการคำนวณ ความสูงต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดไดเซชันเบดเท่ากับ 0.089 m การเกิดฟลูอิดไดเซชัน ในขณะเริ่มต้นอบแห้งและออกแบบให้ความสูงเป็นสองเท่า ซึ่งเราเลือกที่ $H = 1 \text{ m}$ เพื่อที่จะสร้างแผ่น ขยายในการที่จะทำให้เมล็ดพริกไทยสัมผัสกับลมร้อนมากขึ้น และเพื่อป้องกันเมล็ดพริกไทยกระเด็นออก จากเบดขณะอบแห้ง เนื่องจากเมล็ดพริกไทยจะลอยตัวสูงขึ้นเมื่อมวลของพริกไทยลดลงในขณะอบแห้ง

1.1.6 ความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดไดเซชัน (U_{mf})

ค่าความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดไดเซชัน มีผลต่อขนาดของพัดลมอัดอากาศ ความดันและความเร็วของอากาศ ณ ตำแหน่งต่าง ๆ ในเบด การคำนวณใช้ค่าตัวแปรต่าง ๆ ที่ได้ออกแบบไว้ในหัวข้อ 1.1.1-1.1.5 สรุปผลการคำนวณได้ดังนี้

ตารางที่ ก.2 ค่าตัวเบื้องต้นที่ใช้คำนวณความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดไดเซชัน (U_{mf})

ตัวแปร	ผลลัพธ์	หน่วย
1. เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย ของเม็ดสัฟรีย (d)	0.003	m
2. แฟคเตอร์รูปร่าง (ϕ_s)	1	-
3. สัดส่วนช่องว่างต่ำสุดของเม็ดสัฟรีย (ε_{mf})	0.414	-
4. สัดส่วนช่องว่างเฉลี่ย (ε)	0.476	-
5. ความหนาแน่นของเม็ดสัฟรีย (ρ_p) ที่ 35 C	1714	kg/m^3
6. ความสูงที่เกิดฟลูอิดไดเซชัน (L_{mf})	0.089	m
7. ความหนาแน่นของอากาศ (ρ_g) ที่ 35 C	1.146	kg/m^3
8. ความหนืดของอากาศ (μ) ที่ 35 C	1.865×10^{-5}	$N.s/m^2$

นำค่าของตัวแปรต่างๆจากตารางที่ ก.2 แทนค่าในสมการของ Ergun ดังนี้

$$\frac{1.75}{\phi_s \varepsilon_{mf}^3} Re_{mf}^2 + \frac{150(1-\varepsilon_{mf})}{\varepsilon_{mf}^3 \phi_s^2} Re_{mf} = \frac{d_p^3 \rho_g (\rho_p - \rho_g) g}{\mu_g^2}$$

โดยที่

$$Re_{mf} = \frac{d_p u_{mf} \rho_g}{\mu_g}$$

จัดรูปใหม่ได้

$$\frac{1.75 (d_p U_{mf} \rho_g)^2}{\phi_s \varepsilon_{mf}^3 \mu} + \frac{150(1-\varepsilon_{mf}) (d_p U_{mf} \rho_g)}{\phi_s^2 \varepsilon_{mf}^3 \mu} = \frac{d_p^3 \rho_g (\rho_p - \rho_g) g}{\mu^2}$$

$$\frac{1.75 (0.003 \cdot U_{mf} \cdot 1.146)^2}{1(0.414)^3 \cdot 1.865 \times 10^{-5}} + \frac{150(1-0.414) (0.003 \cdot U_{mf} \cdot 1.146)}{(1)^2 \cdot 0.414^3 \cdot 1.865 \times 10^{-5}}$$

$$= \frac{(0.003)^3 \cdot 1.146 \cdot (1714 - 1.146) \cdot 9.81}{(1.865 \times 10^{-5})^2}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จัดสมการใหม่ให้อยู่ในรูปแบบทางคณิตศาสตร์ของสมการกำลังสอง เพื่อหาค่าของตัวแปร U_{mf} จากการแยกตัวประกอบของ U_{mf} โดยจัดสมการให้อยู่ในรูปของ $ax^2 + bx + c = 0$ ดังนี้

$$U_{mf} = 1.32 \text{ m} \cdot \text{s}$$

สามารถคำนวณค่า U_{mf} ที่คำนวณได้จากเรย์โนลด์นัมเบอร์ เลือกเพื่อใช้สมการที่ (3-4) สามารถหาจากสมการในเทอมของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของปลาน้ำจืด ความเร็วของอากาศ และความหนืดของอากาศ จากตารางที่ ก.2 ค่าตัวแปรเบื้องต้น ดังนี้

$$\begin{aligned} \text{Re} &= \frac{\rho_f U_{mf} D_p}{\mu} \\ \text{Re} &= \frac{(1.146)(1.32)(0.003)}{1.865 \times 10^{-4}} \\ &= 3235.3 > 1000 \end{aligned}$$

1.2 การคำนวณหาความดันตกคร่อมและความดัน ณ ตำแหน่งต่าง ๆ ในหอคดลองแบบสี่เหลี่ยม

ความดันตกคร่อมและความดัน ณ ตำแหน่งต่าง ๆ ในหอคดลองแบบสี่เหลี่ยม มีผลต่อการหาค่ากำลังของพัดลมอัดอากาศ เนื่องจากกำลังของพัดลมอัดอากาศ หาได้จาก $Power = Q\Delta P_f$ โดยคำนวณความดันตกคร่อม และความดัน ณ จุดต่าง ๆ ได้ดังนี้

1.2.1 ความดันตกคร่อมเบด (ΔP)

ความดันตกคร่อมเบดมีผลต่อการหาความดัน P_f ซึ่งมีอิทธิพลต่อการออกแบบสัดส่วนรูเจาะของตะแกรงกระจายอากาศ คำนวณจากสมการ

$$\Delta P = P_f - P_a = L (1 - \epsilon) (\rho_f - \rho_a) \frac{g}{g_c}$$

จากสมการสามารถหาค่าของความดันที่ทางเข้าเบด (P_f) ได้จาก $P_f = \Delta P_b + P_a$ เพื่อนำไปใช้คำนวณความดันที่ทางออกของตะแกรงและที่ทางออกของเบด (P_f) มีความดันเท่ากับบรรยากาศ 101.325 kPa และหาความดันตกคร่อมเบดโดยนำค่าตัวแปรต่างๆ จากตารางที่ ก-2 แทนลงในสมการจะได้ดังนี้

$$\begin{aligned}\Delta P_s &= 0.089(1-0.414)(1714-1.1614) \\ &= 89.33 \times 9.81 = 876.3273 \text{ Pa} \\ P_1 &= 876.3273 + 1.01325 \times 10^5 \\ &= 102201.327 \text{ Pa}\end{aligned}$$

1.2.2 ความดันตกคร่อมตะแกรงกระจายอากาศ (ΔP_d)

จากสมการข้างล่างนี้ สามารถใช้คำนวณความดัน ณ ตำแหน่งทางเข้าตะแกรงกระจายอากาศ (P_2) ซึ่งไม่ควรเกิน 10 เปอร์เซ็นต์ของความดันตกคร่อมเบด ดังนี้

$$\Delta P_d = 0.1 \Delta P_s = P_2 - P_1$$

สามารถหาความดัน ณ ตำแหน่งทางเข้าตะแกรงกระจายอากาศ (P_2) โดย $P_2 = 0.1 \Delta P_s + P_1$ แทนค่าได้ดังนี้

$$\begin{aligned}P_2 &= 0.1(876.3273) + 102201.3273 \\ P_2 &= 102288.96 \text{ Pa}\end{aligned}$$

1.2.3 ความดันตกคร่อมพัดลมอัดอากาศ (ΔP_f)

เป็นผลต่างของความดันที่ตำแหน่งทางเข้าของพัดลมอัดอากาศ P_1 และ P_2 ตามลำดับ หาได้จาก $\Delta P_f = P_2 - P_1$ โดยที่ $P_1 = 1.01325 \times 10^5 \text{ Pa}$ จำนวนค่าของ $\Delta P_f = 963.96 \text{ Pa}$

1.2.4 ขนาดของพัดลมอัดอากาศ

ขนาดของพัดลมอัดอากาศที่ใช้สำหรับหอยทาลองแบบสี่เหลี่ยมหาได้จาก $Power = Q \Delta P_f$ โดย อัตราการไหลของอากาศ ณ ตำแหน่งทางเข้าของตะแกรง ซึ่งเป็นอัตราการไหล ณ ตำแหน่งทางออกพัดลมอัดอากาศ Q จำนวนได้จากสมการต่อไปนี โดยที่เส้นผ่านศูนย์กลางของเบด $d = 0.114 \text{ m}$ จากสมการดังต่อไปนี้

$$\begin{aligned}Q &= v \cdot A \\ &= 1.32 \times (0.08 \times 0.2) \times \left(\frac{102201.327}{102288.96} \right) \\ &= 0.021 \text{ m}^3/\text{s}\end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คำนวณกำลังงานของพัดลมอัดอากาศดังนี้

$$\begin{aligned} W_p &= Q\Delta P \\ &= 0.021 \times 963.96 \\ &= 20.341 \text{ watt} \end{aligned}$$

ควรเลือกขนาดของพัดลมอัดอากาศให้มีขนาดใหญ่กว่า ที่คำนวณได้ ถ้าเลือกขนาดเล็กกว่าอาจทำให้ปลาหมึกที่อยู่ในเบดไม่สามารถยกตัวขึ้นและไม่เกิดปรากฏการณ์ของฟลูอิดไดเซชัน ดังนั้นขนาดของพัดลมอัดอากาศที่ใกล้เคียงที่สุดคือ 1.5 Hp

1.3 การออกแบบตะแกรงกระจายอากาศ

การคำนวณตะแกรงกระจายอากาศเพื่อต้องการหาสัดส่วนของรูเจาะต่อพื้นที่ของตะแกรงทั้งหมด สำหรับเลือกตะแกรงกระจายอากาศ เพื่อให้หยดคลอง(เบด) ทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ ถ้าเลือกตะแกรงกระจายอากาศ ที่มีจำนวนรูเจายน้อยเกินไป จะทำให้เกิด Pressure drop ในเบดสูง ความเร็วของอากาศที่ไหลเข้าเบดจะมีความเร็วลดลงมากทำให้เมล็ดพริกไทยไม่สามารถยกตัวลอยขึ้นได้ ในการคำนวณมีลำดับขั้นตอนดังนี้

1.3.1 คำนวณหาค่าความเร็วอากาศในเบดว่างเปล่า U_0

ใช้หาค่าของความเร็วอากาศในเบดขณะที่ไม่มีเมล็ดพริกไทย เพื่อนำไปใช้คำนวณหาสัดส่วนพื้นที่รูเจาะต่อตะแกรง โดยที่ความเร็วอากาศในเบดว่างเปล่า U_0 หาได้จากสมการดังนี้

$$U_{01} = 1.3U_{02}$$

$$U_{01} = 1.716$$

นำค่า ของ U_0 เพื่อตรวจสอบ ค่าเรย์โนลด์ส์นัมเบอร์ จากสมการข้างล่างโดยกำหนดขนาดของเบด $d_p = 0.114 \text{ m}$ แล้วแทนค่าตัวแปรดังนี้

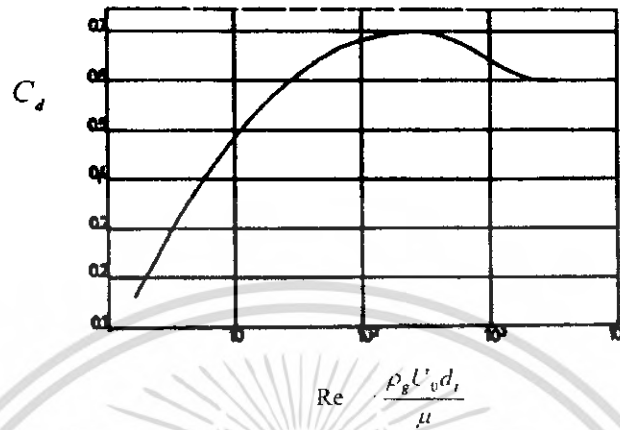
$$\text{Re} = \frac{d_p \rho U_0}{\mu}$$

$$\text{Re} = \frac{0.114 \times 1.146 \times 1.716}{1.865 \times 10^{-4}}$$

$$= 12020.64$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าสัมประสิทธิ์ของ ตะแกรงกระจายอากาศ (Orifice Coefficient: C_d) สามารถหาได้จาก รูปที่ ก.1 โดยใช้ค่าของเรย์โนลด์นัมเบอร์จากสมการที่ผ่านมา



รูปที่ ก.1 การหาค่าสัมประสิทธิ์ของ ตะแกรงกระจายอากาศ (Orifice Coefficient: C_d)

ค่าที่ได้จากภาพที่ ก.1 $C_d = 0.6$ ใช้แทนค่าในสมการต่อไปนี เพื่อหาความเร็วของอากาศที่ไหลผ่าน ตะแกรง U_{or} ดังนี้

$$U_{or} = C_{d,or} \left(2g_c \frac{\Delta P_d}{\rho_g} \right)^{1/2}$$

$$= 0.6 \left[\frac{2(9.81)(87.632)}{1.146} \right]^{1/2}$$

$$= 23.240 \text{ m.s.}$$

นำค่าของความเร็วอากาศในเบคว่างเปล่า U_0 และความเร็วของอากาศที่ไหลผ่านตะแกรง U_{or} แล้วแทนค่าในสมการดังนี้

$$N = \frac{4U_0}{\pi d_n^2 U_{or}}$$

$$N = \frac{4(1.716)}{\pi d_n^2 (23.240)}$$

เนื่องจากมีตัวแปรไม่ทราบค่าถึงสองตัวแปรจึงใช้วิธี Trial and Error โดยสรุปได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.3 ผลของวิธี Trial and Error เพื่อหาจำนวนรูเจาะของตะแกรงกระจายอากาศต่อพื้นที่

$d_{or} (m)$	$N_{or} (holes/m^2)$
0.002	23503.43
0.0025	15042.19
0.003	10445.96

จากการใช้วิธี Trial and Error ค่าของ $d = 0.0025 m$ และ $N_{or} = 15042.19 holes/m^2$ เพื่อนำมาใช้หาจำนวนรูเจาะของตะแกรงกระจายอากาศที่ใช้ในหอคดลองแบบสี่เหลี่ยม ได้จากขนาดจากเส้นผ่านศูนย์กลาง

เส้นผ่านศูนย์กลางของเบด $d_c = 0.114 m$ ดังนั้นจำนวนรูเจาะตะแกรงในเบดทั้งหมดหาได้จาก $15042.19 \times 0.016 = 240.6$ รูเจาะ และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูเจาะเท่ากับ $0.0025 m$ และ สัดส่วนรูเจาะต่อพื้นที่ตะแกรงกระจายอากาศ

$$\frac{U_o}{U_m} = \frac{1.716}{23.240} \times 100 = 7.38\%$$

1.4 การหาขนาดของฮีตเตอร์

มีผลต่อการพาความร้อนแบบบังคับในเบด ดังนั้นควรเลือกขนาดของฮีตเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับเบดแบบสี่เหลี่ยม โดยมีวิธีการคำนวณดังนี้

1.4.1 การคำนวณหาสัมประสิทธิ์การพาความร้อน h_c

โดยคำนวณหาปริมาณความร้อนที่ถ่ายเทออกจากเบดและผนังของเบดจากตัวแปรต่าง ๆ ที่ได้จากการทดลองและคำนวณ คือ สัดส่วนช่องว่างค่าสุด เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยและความหนาแน่นของเมล็ดพริกไทย โดยใช้คุณสมบัติของอากาศแวดล้อมที่ $35^\circ C$ เพื่อแทนค่าในสมการของ Toomey & Johnstone ดังนี้

$$\left(\frac{h_c d_p}{k} \right) = 3.75 \left(\frac{d U_o \rho_o}{\mu} \cdot \log \frac{U_o}{U_m} \right)^{0.11}$$

ทำการแทนค่าเพื่อทำการค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเท ความร้อน

$$\frac{h_c d_p}{k_c} = 3.75 \left(\frac{(0.0025)(1.32)(1.146)}{1.865 \times 10^{-4}} \times \log \left(\frac{1.716}{1.32} \right) \right)^{0.11}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\frac{h d}{k_c} = 6.3952$$

ดังนั้น

$$h_c = \frac{(6.3952)(2.6892 \times 10^{-2})}{0.0025}$$

$$h_c = 68.791 \text{ W m}^{-2} \cdot \text{K}$$

1.4.2 การหาขนาดความต้านทานของขดลวดของฮีตเตอร์ (R)

ปริมาณความร้อนที่ได้จากขดลวดฮีตเตอร์ จะมีค่าเทียบเท่ากับกำลังไฟฟ้า $P = I^2 R$ โดยความต้านทานสามารถคำนวณได้จากสมการพลังงานดังนี้

$$P = I^2 R = h A \Delta T_c$$

เนื่องจากไม่ทราบค่าของกระแสที่ไหลผ่านขดลวด แต่ทราบตัวแปรของแรงเคลื่อนไฟฟ้า $E = 380 \text{ V}$ แทนค่า และจัดรูปสมการเพื่อหาค่าของ R ดังนี้

$$R = \frac{E^2}{h A \Delta T_c}$$

ตารางที่ ก.4 ค่าตัวแปรสำหรับหาขนาดความต้านทานขดลวดฮีตเตอร์

ตัวแปรที่มีผลต่อการออกแบบ	ค่าที่ใช้ออกแบบ
1. อุณหภูมิสูงสุดที่ต้องการอบแห้ง	80 °C
2. อุณหภูมิของสิ่งแวดล้อม	35 °C
3. สัมประสิทธิ์การพาความร้อน h_c	68.791 $\text{W m}^{-2} \cdot \text{K}$
4. พื้นที่ผิวของผืนเบด A_c	0.56 m^2
5. แรงเคลื่อนไฟฟ้า E	380 Volt

$$\text{แทนค่า} \quad R = \frac{380^2}{68.791 \times 0.56 (80 - 35)}$$

$$= 83.298 \Omega$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่ปริมาณความร้อนของฮีตเตอร์ที่ต้องการเพื่อให้เบดมีอุณหภูมิ 80°C $Q = h_c A_c \Delta T_c$ เท่ากับ 1.733 kW ส่วนกระแสที่ไหลผ่านขดลวดหาได้จาก $I = E/R$ โดยแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่ใช้ 380Voh มีค่ากระแสที่ไหลผ่านขดลวดเท่ากับ 4.564

1.5 ผลที่ได้รับจากการออกแบบและการคำนวณ

คังหัวข้อ 1.1-1.6 ได้ผลสรุปเพื่อใช้สร้างชุดทดลองเครื่องอบแห้งฟลูอิดไคซ์เบดแบบหอสี่เหลี่ยม สำหรับอบเมล็ดพริกไทยดังนี้

ตารางที่ ก.5 ผลสรุปของค่าที่ได้จากการคำนวณอุปกรณ์จากทฤษฎี

ชนิดของอุปกรณ์ที่คำนวณหาขนาด	ผลการคำนวณ	ค่าที่เลือกใช้
1. พัดลมอัดอากาศ	1.5 Hp	2 Hp
2. ความสูงของเบด	1 m	1 m
3. ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเบด	0.144 m	0.144 m
4. สัดส่วนรูเจาะต่อพื้นที่ตะแกรงกระจายอากาศ	7.38%	รูเจาะขนาด 0.0025 m จำนวน 240 รูเจาะ
5. ความต้านทานของฮีตเตอร์	83.298 Ω	85 Ω

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก ข
ผลการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ข.1 แสดงปริมาณความชื้นกึ่งเหลือ ของหอฟลูอิดไดซ์เบคกรรมคา

อุณหภูมิในการอบแห้ง 60 องศาเซลเซียส

เปอร์เซ็นต์ความชื้นในอากาศ 67-70%RH

อุณหภูมิห้อง 32 องศาเซลเซียส

น้ำหนักพริกไทยสุทธิ 200 กรัม

เวลา (นาที)	น้ำหนัก (กรัม)		ความชื้นกึ่งเหลือ(%)	
	1.2 Umf	2.0 Umf	1.2 Umf	2.0 Umf
0	200	200	100	100
5	195	196	97.333	96.667
10	191	194	96	94
15	186	192	94.667	90.667
20	182	190	93.333	88
25	180	187	91.333	86.667
30	176	185	90	84
35	173	183	88.667	82
40	170	181	87.333	80
45	167	179	86	78
50	164	176	84	76
55	161	174	82.667	74
60	158	172	81.333	72
65	155	170	80	70
70	153	168	78.667	68.667
75	151	166	77.333	67.667
80	148	163	75.333	65.333
85	146	160	73.333	64
90	143	158	72	62
95	140	156	70.667	60
100	138	154	69.333	58.667
105	136	152	68	57.333
110	133	149	66	55.333
115	131	146	64	54
120	128	143	62	52

ตาราง ข.2 แสดงปริมาณความชื้นคงเหลือ ของหอฟลูอิดโคซ์เบคกรรมคา

อุณหภูมิในการอบแห้ง 80 องศาเซลเซียส

เปอร์เซ็นต์ความชื้นในอากาศ 67-70%RH

อุณหภูมิห้อง 32 องศาเซลเซียส

น้ำหนักพริกไทยสุทธิ 200 กรัม

เวลา (นาทึ)	น้ำหนัก (กรัม)		ความชื้นคงเหลือ(%)	
	1.2 Umf	2.0 Umf	1.2 Umf	2.0 Umf
0	200	200	100	100
5	195	188	96.667	92
10	190	178	93.333	85.333
15	185	172	90	81.333
20	180	166	86.667	77.333
25	175	160	83.333	73.333
30	170	154	80	69.333
35	165	148	76.667	65.333
40	160	142	73.333	61.333
45	156	137	70.667	58
50	152	132	68	54.667
55	148	127	65.333	51.333
60	144	123	62.667	48.667
65	140	119	60	46
70	136	115	57.333	43.333
75	132	112	54.667	41.333
80	128	109	52	39.333
85	125	106	50	37.333
90	122	103	48	35.333
95	119	101	46	34
100	116	99	44	32.667
105	113	97	42	31.333
110	111	95	40.667	30
115	109	93	39.333	28.667
120	107	91	38	27.333

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ภายในเพื่อการศึกษเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ข.3 แสดงปริมาณความชื้นคงเหลือ ของหยฟลูอิดโคईเบคกรรมคา

อุณหภูมิในการอบแห้ง 100 องศาเซลเซียส

เปอร์เซ็นต์ความชื้นในอากาศ 67-70%RH

อุณหภูมิห้อง 32 องศาเซลเซียส

น้ำหนักพริกไทยสุทธิ 200 กรัม

เวลา (นาที)	น้ำหนัก(กรัม)		ความชื้นคงเหลือ(%)	
	1.2 Umf	2.0 Umf	1.2 Umf	2.0 Umf
0	200	200	100	100
5	188	187	92	91.333
10	178	174	85.333	82.667
15	169	163	79.333	75.333
20	161	153	74	68.667
25	154	143	69.333	62
30	146	134	64	56
35	139	124	59.333	49.333
40	132	115	54.667	43.333
45	125	106	50	37.333
50	118	101	45.333	34
55	111	95	40.66667	30
60	105	90	36.667	26.667
65	99	86	32.667	24
70	94	82	29.333	21.333
75	89	79	26	19.333
80	86	77	24	18
85	83	75	22	16.667
90	80	73	20	15.333
95	78	72	18.667	14.667
100	76	71	17.333	14
105	75	70	16.667	13.333
110	73	69	15.333	12.667
115	72	68	14.667	12
120	71	67	14	11.333

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ข.4 แสดงปริมาณความชื้นคงเหลือ ของหอดูดาวแผ่นขยายมุม 30 องศา ระยะห่าง 3 cm

อุณหภูมิในการอบแห้ง 60 องศาเซลเซียส

เปอร์เซ็นต์ความชื้นในอากาศ 67-70%RH

อุณหภูมิห้อง 32 องศาเซลเซียส

น้ำหนักพริกไทยสุทธิ 200 กรัม

เวลา (นาที)	น้ำหนัก(กรัม)		ความชื้นคงเหลือ(%)	
	1.2 Umf	2.0 Umf	1.2 Umf	2.0 Umf
0	200	200	100	100
5	185	196	96.667	97.333
10	192	192	94.667	94.667
15	189	189	92.667	92.667
20	186	184	90.667	89.333
25	183	180	88.667	86.667
30	180	176	86.667	84
35	178	173	85.333	82
40	175	170	83.333	80
45	173	167	82	78
50	170	163	80	75.333
55	167	161	78	74
60	165	159	76.667	72.667
65	163	156	75.333	70.667
70	160	154	73.333	69.333
75	157	152	71.333	68
80	154	149	69.333	66
85	151	146	67.333	64
90	149	143	66	62
95	147	140	64.667	60
100	144	136	62.667	57.333
105	142	133	61.333	55.333
110	140	130	60	53.333
115	139	127	59.333	51.333
120	137	124	58	49.333

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ข.5 แสดงปริมาณความชื้นคงเหลือ ของหอยทาลองแบบแผ่นขยายมุม 30 องศา ระยะห่าง 3 cm
อุณหภูมิในการอบแห้ง 80 องศาเซลเซียส เปอร์เซ็นต์ความชื้นในอากาศ 67-70%RH
อุณหภูมิห้อง 32 องศาเซลเซียส น้ำหนักพริกไทยสุทธิ 200 กรัม

เวลา (นาที)	น้ำหนัก(กรัม)		ความชื้นคงเหลือ(%)	
	1.2 Umf	2.0 Umf	1.2 Umf	2.0 Umf
0	200	200	100	100
5	188	189	92	92.667
10	178	177	85.333	84.667
15	169	165	79.333	76.667
20	161	154	74	69.333
25	154	143	69.333	62
30	146	132	64	54.667
35	139	121	59.333	47.333
40	132	112	54.667	41.333
45	125	104	50	36
50	118	99	45.333	32.667
55	111	94	40.667	29.333
60	105	89	36.667	26
65	99	86	32.667	24
70	94	83	29.333	22
75	89	81	26	20.667
80	86	79	24	19.333
85	83	77	22	18
90	80	75	20	16.667
95	78	74	18.667	16
100	76	73	17.333	15.333
105	75	72	16.667	14.667
110	73	72	15.333	14.667
115	72	71	14.667	14
120	71	70	14	13.333

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ข.6 แสดงปริมาณความชื้นคงเหลือ ของหอยทากสองแบบแผ่นขยายมุม 30 องศา ระยะห่าง 3 cm
 อุณหภูมิในการอบแห้ง 100 องศาเซลเซียส เปอร์เซ็นต์ความชื้นในอากาศ 67-70%RH
 อุณหภูมิห้อง 32 องศาเซลเซียส น้ำหนักพริกไทยสุทธิ 200 กรัม

เวลา (นาที)	น้ำหนัก(กรัม)		ความชื้นคงเหลือ(%)	
	1.2 Umf	2.0 Umf	1.2 Umf	2.0 Umf
0	200	200	100	100
5	170	169	80	79.333
10	138	137	58.667	58
15	114	111	42.667	40.667
20	95	97	30	31.333
25	86	90	24	26.667
30	80	84	20	22.667
35	75	79	16.667	19.333
40	70	74	13.333	16
45	67	70	11.333	13.333
50	64	67	9.333	11.333
55	62	65	8	10
60	61	64	7.333	9.333
65	60	63	6.667	8.667
70	59	62	6	8
75	58	61	5.333	7.333
80	57	60	4.667	6.667
85	57	60	4.667	6.667
90	56	59	4	6
95	56	59	4	6
100	56	58	4	5.333
105	55	58	3.333	5.333
110	55	58	3.333	5.333
115	55	57	3.333	4.667
120	54	57	2.667	4.667

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ข.9 แสดงปริมาณความชื้นคงเหลือ ของหอยทดลองแบบแผ่นขยายมุม 30 องศา ระยะห่าง 2 cm
อุณหภูมิในการอบแห้ง 100 องศาเซลเซียส เปอร์เซ็นต์ความชื้นในอากาศ 67-70%RH
อุณหภูมิห้อง 32 องศาเซลเซียส น้ำหนักพริกไทยสุทธิ 200 กรัม

เวลา (นาที)	น้ำหนัก(กรัม)		ความชื้นคงเหลือ(%)	
	1.2 Umf	2.0 Umf	1.2 Umf	2.0 Umf
0	200	200	100	100
5	169	167	79.333	78
10	137	135	58	56.667
15	111	109	40.667	39.333
20	93	95	28.667	30
25	84	87	22.667	24.667
30	78	81	18.667	20.667
35	73	76	15.333	17.333
40	68	71	12	14
45	65	67	10	11.333
50	62	65	8	10
55	60	63	6.667	8.667
60	59	62	6	8
65	58	61	5.333	7.333
70	57	60	4.667	6.667
75	57	59	4.667	6
80	56	59	4	6
85	56	58	4	5.333
90	55	58	3.333	5.333
95	55	58	3.333	5.333
100	55	57	3.333	4.667
105	54	57	2.667	4.667
110	54	57	2.667	4.667
115	53	56	2	4
120	53	56	2	4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ข.10 แสดงปริมาณความชื้นคงเหลือ ของหอยทดลองแบบแผ่นขยายมุม 30 องศา ระยะห่าง 1 cm
อุณหภูมิในการอบแห้ง 60 องศาเซลเซียส เปอร์เซ็นต์ความชื้น ในอากาศ 67-70%RH
อุณหภูมิห้อง 32 องศาเซลเซียส น้ำหนักพริกไทยสุทธิ 200 กรัม

เวลา (นาที)	น้ำหนัก(กรัม)		ความชื้นคงเหลือ(%)	
	1.2 Umf	2.0 Umf	1.2 Umf	2.0 Umf
0	200	200	100	100
5	194	195	96	96.667
10	191	190	94	93.333
15	189	187	92.667	91.333
20	187	183	91.333	88.667
25	184	179	89.333	86
30	181	175	87.333	83.333
35	179	172	86	81.333
40	176	169	84	79.333
45	174	165	82.667	76.667
50	172	162	81.333	74.667
55	170	160	80	73.333
60	167	157	78	71.333
65	165	154	76.667	69.333
70	163	151	75.333	67.333
75	161	149	74	66
80	159	146	72.667	64
85	156	144	70.667	62.667
90	153	142	68.667	61.333
95	151	139	67.333	59.333
100	149	136	66	57.333
105	146	132	64	54.667
110	144	130	62.667	53.333
115	142	127	61.333	51.333
120	140	123	60	48.667

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ข.11 แสดงปริมาณความชื้นกึ่งเหลือ ของหอตลอดแบบแผ่นขยายมุม 30 องศา ระยะห่าง 1 cm
 อุณหภูมิในการอบแห้ง 80 องศาเซลเซียส เปอร์เซ็นต์ความชื้นในอากาศ 67-70%RH
 อุณหภูมิห้อง 32 องศาเซลเซียส น้ำหนักพริกไทยสุทธิ 200 กรัม

เวลา (นาที)	น้ำหนัก(กรัม)		ความชื้นกึ่งเหลือ(%)	
	1.2 Umf	2.0 Umf	1.2 Umf	2.0 Umf
0	200	200	100	100
5	188	187	92	91.333
10	176	175	84	83.333
15	166	163	77.333	75.333
20	156	153	70.667	68.667
25	146	143	64	62
30	136	134	57.333	56
35	127	124	51.333	49.333
40	117	115	44.667	43.333
45	109	106	39.333	37.333
50	102	101	34.667	34
55	96	95	30.667	30
60	91	90	27.333	26.667
65	87	86	24.667	24
70	83	82	22	21.333
75	80	79	20	19.333
80	78	77	18.667	18
85	76	75	17.333	16.667
90	75	73	16.667	15.333
95	73	72	15.333	14.667
100	72	71	14.667	14
105	71	70	14	13.333
110	71	69	14	12.667
115	69	68	12.667	12
120	69	67	12.667	11.333

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ข.12 แสดงปริมาณความชื้นคงเหลือ ของหอยทดลองแบบแผ่นขยายมุม 30 องศา ระยะห่าง 1 cm
 อุณหภูมิในการอบแห้ง 100 องศาเซลเซียส เปรอร์เซ็นต์ความชื้นในอากาศ 67-70%RH
 อุณหภูมิห้อง 32 องศาเซลเซียส น้ำหนักพริกไทยสุทธิ 200 กรัม

เวลา (นาที)	น้ำหนัก(กรัม)		ความชื้นคงเหลือ(%)	
	1.2 Umf	2.0 Umf	1.2 Umf	2.0 Umf
0	200	200	100	100
5	169	168	79.333	78.667
10	136	135	57.333	56.667
15	109	109	39.333	39.333
20	90	94	27.333	29.333
25	82	85	21.333	23.333
30	76	79	17.333	19.333
35	70	73	13.333	15.333
40	64	68	9.333	12
45	60	65	6.667	10
50	58	62	5.333	8
55	57	61	4.667	7.333
60	56	60	4	6.667
65	55	59	3.333	6
70	55	58	3.333	5.333
75	54	57	2.667	4.667
80	54	57	2.667	4.667
85	54	56	2.667	4
90	53	56	2	4
95	53	56	2	4
100	53	55	2	3.333
105	53	55	2	3.333
110	52	55	1.333	3.333
115	52	54	1.333	2.667
120	52	54	1.333	2.667

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เครื่องอบแห้งฟลูอิดไดซ์เบดที่มีการขยายหลายช่วง¹

สมยศ ภู่วัฏฒ์พันธ์², ซวลิตร์ จิตรเที่ยง²

พงษ์เจม พรหมวงศ์³

บทคัดย่อ

โครงการนี้เป็นการศึกษาเกี่ยวกับการอบแห้งเมล็ดพริกไทยด้วยเทคนิคฟลูอิดไดซ์เบดที่มีการขยายหลายช่วง เพื่อดูอิทธิพลของความเร็วลม อุณหภูมิ และมุมของแผ่นขยายในเบดต่อการอบแห้งที่เหมาะสม เพื่อให้ได้ค่าแห้งมีประสิทธิภาพ พดที่ที่สุด จะทำการทดลองโดยใช้ท่ออะคริลิกใส ในท่อจะใส่แผ่นขยาย โดยลักษณะของท่อทดลองเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้า มีพื้นที่หน้าตัดกว้าง 80 มม. ยาว 200 มม. และสูง 1000 มม. ส่วนด้านล่างของท่อทดลองใช้แผ่นกระจายลม ซึ่งยื่นช่องทางให้อากาศไหลพุ่งภายในเบด ในการทดลองใช้เมล็ดพริกไทยที่มีความชื้นเริ่มต้นประมาณ 75 เปอร์เซ็นต์ (มาตรฐานเปียก) เริ่มทดลองใช้อากาศแห้งทางเข้าในช่วงที่อุณหภูมิ 60, 80 และ 100 องศาเซลเซียส มุมของแผ่นขยายที่ใช้ 30 องศา และใช้ความเร็วของอากาศภายในท่อทดลองที่ 1.2 U_{mf} และ 2.0 U_{mf} โดยใช้เวลาทดลองในแต่ละกรณี 2 ชั่วโมง วัดความชื้นของเมล็ดพริกไทยทุก ๆ 5 นาที จากผลการทดลองการอบแห้งแบบฟลูอิดไดซ์เบดที่มีการขยายหลายช่วง ดีกว่าการอบแห้งแบบฟลูอิดไดซ์เบดธรรมดาหรือท่อลง

Abstract

The paper deals with a drying characteristic study of pepper corns in a fluidized-bed with multiple expansions. This study is to optimize velocity, drying temperature to obtain maximum efficiencies at a bed expansion angle. In the experiment, the bed with rectangular cross section of 80x 200 mm with 1000 mm height is introduced. The distributor plate is used to provide jet-flow in the bed. The pepper corns with initial moisture content of about 75% (w.b.) are employed as a drying sample. The experiments are conducted by using inlet drying-air temperature at 60, 80 and 100°C, bed-expansion angle of 30° and hot-air velocity at 1.2 U_{mf} and 2.0 U_{mf} . Drying time and weight of pepper corns are measured in every 5 min for about 120 min. The experimental results reveal that the bed with multiple expansions performs better than the typical bed for all cases.

© 2006 Department of Mechanical Engineering, KMUTL. All rights reserved

Keywords: Fluidized-bed; Multiple expansions; Initial moisture content

1. บทนำ

พริกไทยเป็นพืชเศรษฐกิจที่มีความสำคัญอย่างหนึ่งของจังหวัดจันทบุรี ซึ่งมีการแปรรูปทั้งแบบพริกไทยสดและพริกไทยแห้ง พริกไทยสดจะนำส่งขายตามท้องตลาดสดทั่วไป และพริกไทยแห้งจะแบ่งเป็น 2 ชนิด คือ พริกไทยดำ และพริกไทยขาว ซึ่งจะนำไปขายทั้งเมล็ดในท้องตลาด และนำไปส่งโรงงานอุตสาหกรรมเพื่อเข้าสู่กระบวนการผลิตเป็นพริกไทยป่นต่อไป

การผลิตเมล็ดพริกไทยแห้งนอกจากเป็นการถนอมอาหารให้มีคุณภาพร่วมกับรักษาเหยี่ยวนานขึ้นวิธีหนึ่งแล้ว เมล็ดพริกไทยแห้งยังสามารถเปลี่ยนรสชาติของผลิตภัณฑ์ให้เป็นที่ยอมรับมากขึ้นได้อีกด้วย ในปัจจุบันมีการผลิตเมล็ดพริกไทยแห้งทั้งในระดับครัวเรือนและระดับอุตสาหกรรมขนาดย่อม ซึ่งกระบวนการผลิตพริกไทยแห้งนั้น ส่วนมากผู้ผลิตมักใช้การผลิตด้วยวิธีตากแห้งตามธรรมชาติโดยใช้พลังงานแสงแดด

¹ชื่ออังกฤษ: A fluidized-bed dryer with multiple expansions
นักศึกษาคณะวิศวกรรมศาสตร์ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล สจจ. ห้อง 3Q-1 รหัส 47015377 และ 3Q-2 รหัส 47015389 ทำหน้าที่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
²รองศาสตราจารย์ประจักษ์ ภู่วัฏฒ์พันธ์ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล สจจ. โทร. 0-2326-4197 โทรสาร 0-2326-4198
³รองศาสตราจารย์พงษ์เจม พรหมวงศ์ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล สจจ. โทร. 0-2326-4197 โทรสาร 0-2326-4198

สัญลักษณ์

Re_{mf}	เรย์โนลด์ส์นัมเบอร์ที่ความเร็วต่ำทำให้เกิดฟลูอิดไดเซชัน	g	อัตราเร่งที่เกิดจากแรงดึงดูดของโลก, เมตร / วินาที ²
L_{mf}	ความสูงต่ำสุดของเบด, เมตร	ρ	ความหนาแน่นของก๊าซ, กิโลกรัม / ลูกบาศก์เมตร
w	มวลของวัสดุ, กิโลกรัม	u	ความเร็วต่ำสุดของฟลูอิดไดเซชัน
d	มวลของวัสดุแห้ง (ไม่มีความชื้น), กิโลกรัม	P	ความดันไออิ่มตัวที่อุณหภูมิกระเปาะเปียก
d_p	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเม็ดของแข็ง, เมตร	T	อุณหภูมิกระเปาะเปียก
ϵ_m	อัตราส่วนช่องว่างของเม็ดของแข็ง	λ	อัตราการระเหยของน้ำต่อหน่วยพื้นที่ของวัสดุ
ϕ	ความเป็นทรงกลมของเม็ดของแข็ง	p	ความดันย่อยของไอน้ำในอากาศ
μ	ความหนืดของของไหล, กิโลกรัมเมตร / วินาที	ρ	ความหนาแน่นของของแข็ง, กิโลกรัม ลูกบาศก์เมตร

ซึ่งการตากแห้งโดยใช้วิธีดังกล่าวนี้จะมีปัญหาเกี่ยวกับเศษวัสดุ เมล็ดเล็ก ๆ เชื้อรา จุลินทรีย์ ทำให้ผลผลิตมีคุณภาพต่ำลง ดังนั้นการที่จะทำให้เมล็ดพืชไทยแห้งมีคุณภาพ พร้อมทั้งความสะดวกและเบอร์เชนส์ ความชื้นเป็นที่ต้องการของตลาด จึงได้มีการคิดค้นประดิษฐ์เครื่องอบแห้งเมล็ดพืชด้วยเทคนิคฟลูอิดไดเซชัน ซึ่งได้รับการวิจัยและพัฒนาจนประสบความสำเร็จในระดับหนึ่ง จากการได้ศึกษาบทความย้อนหลังเกี่ยวกับเครื่องอบแห้งเมล็ดพืชโดยใช้เทคนิคฟลูอิดไดเซชัน จึงพอสรุปได้ว่าความเร็วลมที่เกิดการหมุนควงและไหลอย่างปั่นป่วนภายในท่อ มีผลต่อการอบแห้งมากที่สุด จึงได้คิดค้นและประดิษฐ์เครื่องอบแห้งเมล็ดพืชไทย โดยให้มีการปั่นป่วนและหมุนควงภายในท่อตลอด โดยใช้หัวฉีดเป็นตัวแปรดังกล่าว

2. ทฤษฎี

2.1 ระยะเวลาการอบแห้ง

ระยะเวลาการอบแห้ง คือ ระยะเวลาการลดความชื้น ซึ่งส่วนใหญ่ใช้การถ่ายเทความร้อนไปยังวัสดุที่ชื้น เพื่อไล่ความชื้นออกจากวัสดุโดยการระเหย โดยใช้ความร้อนที่ได้รับจากอากาศร้อนเป็นความร้อนแฝงของการระเหย ในระยะเวลาการอบแห้งแบ่งออกได้เป็น 2 ช่วง คือ

2.1.1 ช่วงอัตราการอบแห้งคงที่ (Constant-Rate Drying Period)

จากรูป 1 ในช่วง A ถึง B วัสดุจะมีน้ำอยู่เป็นจำนวน m เนื่องจากการระเหยของน้ำที่ผิวล้าช้ากว่าการแพร่ของความชื้นภายในวัสดุ มายังผิวของวัสดุ จึงส่งผลให้อุณหภูมิของผิวมีค่าคงที่ที่อุณหภูมิกระเปาะเปียกของอากาศและความเข้มข้นของน้ำที่ผิววัสดุคงที่ ดังนั้นอัตราการระเหยของน้ำที่ผิวจะเป็นตัวควบคุมอัตราการอบแห้ง ถ้าความดันไออิ่มตัวที่อุณหภูมิกระเปาะเปียก ความดันย่อยของไอน้ำในอากาศและสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวล ดังนั้นค่าอัตราการระเหยของน้ำต่อหน่วยพื้นที่ของวัสดุในช่วงอัตราการอบแห้งคงที่ กำหนดโดยสมการ

$$N = K (p_s - p)$$

เมื่ออุณหภูมิผิวของวัสดุไม่เพิ่มขึ้นในช่วงนี้ แสดงว่าความร้อนทั้งหมดถูกถ่ายโอนออกจากอากาศไปยังวัสดุเพื่อใช้ในการระเหยกลายเป็นไอน้ำจากผิวน้ำ 1 สามารถเขียนใหม่ได้เป็น

$$\lambda = \frac{h_p}{\lambda} (T - T_s) \tag{2}$$

2.2 ช่วงอัตราการอบแห้งลดลง (Falling-Rate Drying Period)

ช่วง B ถึง C หลังจากความชื้นบริเวณผิวหน้าของวัสดุถูกระเหยออกไปมากแล้ว อัตราการอบแห้งจะเริ่มเปลี่ยนแปลงจากช่วงอัตราการอบแห้งคงที่ เป็นช่วงอัตราการอบแห้งลดลง ความชื้นที่ตำแหน่ง B นี้เรียกว่า ความชื้นวิกฤต (critical moisture content) ในช่วงอัตราการอบแห้งลดลงนั้น การแพร่ของความชื้นมายังผิววัสดุช้ากว่าการระเหยของน้ำที่ผิวของวัสดุ ดังนั้นอัตราการอบแห้งจะถูกควบคุมด้วยการแพร่ของความชื้นภายในวัสดุ โดยที่ผิวของวัสดุจะค่อย ๆ แห้งและทำให้อุณหภูมิของผิวสูงขึ้น เนื่องจากความร้อนที่ถ่ายเทให้กับวัสดุถูกใช้ในการเพิ่มอุณหภูมิให้กับวัสดุส่วนหนึ่งจะมีความร้อนเพียงบางส่วนเท่านั้นที่ใช้ในการระเหยของน้ำ อัตราการอบแห้งจึงลดลงเรื่อย ๆ จนกระทั่งถึงความชื้นค่าหนึ่งจะไม่ลดลงอีก เรียกว่า ความชื้นสมดุล (equilibrium moisture content) ดังรูป. 1 ที่จุด C โดยทั่วไปการอบแห้งเมล็ดพืชจะมีแต่ช่วงอัตราการอบแห้งลดลงเท่านั้น มีสมการอบแห้งหลายรูปแบบทั้ง สมการเชิงทฤษฎี สมการกึ่งทฤษฎี และสมการเอมไพริคัลซึ่งได้จากการทดลอง ที่พยายามทำนายในช่วงความชื้น

2.2 นิยามความชื้นในวัสดุ [4]

ความชื้นเป็นตัวบอกปริมาณของน้ำที่มีอยู่ในวัสดุ เมื่อเทียบกับมวลของวัสดุขึ้นหรือแห้ง ความชื้นในวัสดุสามารถแสดงได้เป็น 2 แบบคือ

2.2.1 ความชื้นมาตรฐานเปียก, M_w

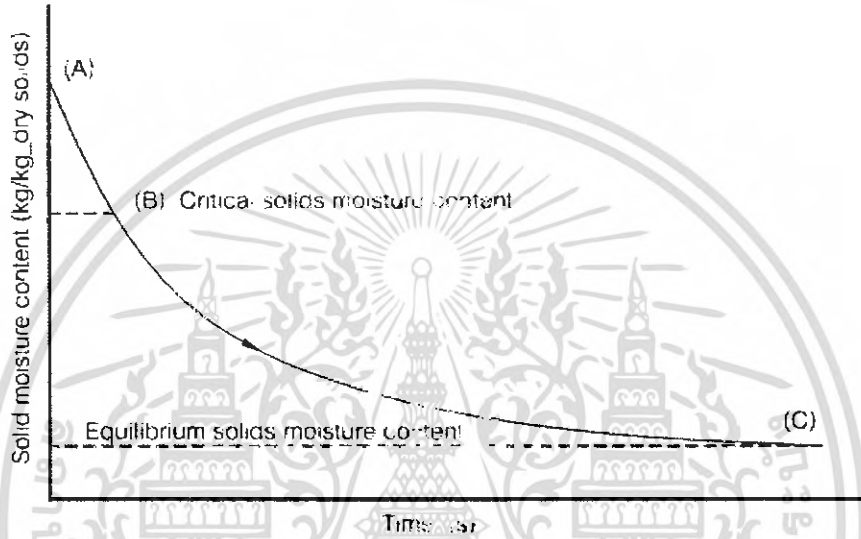
$$M_w = \frac{w-d}{w} \quad (3)$$

ความชื้นมาตรฐานเปียกนิยมใช้ในการค้า โดยทั่ว ๆ ไปจะอ้างในรูปของเปอร์เซ็นต์ $100M_w$

2.2.2 ความชื้นมาตรฐานแห้ง, M_d

$$M_d = \frac{w-d}{d} \quad (4)$$

ความชื้นมาตรฐานแห้งนี้เป็นที่นิยมใช้ในการวิเคราะห์ของกระบวนการอบแห้งทางทฤษฎี เพราะช่วยให้การคำนวณสะดวกขึ้น ซึ่งเป็นเพราะมวลของวัสดุแห้งจะมีค่าคงที่หรือเกือบคงที่ระหว่างการอบแห้ง ซึ่งผลผลิตทางการเกษตรเป็นสิ่งมีชีวิต มีการหายใจ ดังนั้นจึงมีการเผาผลาญสารอาหาร ทำให้มวลแห้งลดลง ส่วนใหญ่แล้วมวลแห้งจะลดลงเล็กน้อย



รูป 1 ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นแห้งและเวลาการในการอบแห้ง [7]

3. ความเป็นทรงกลม, ϕ

การวัดค่าความไม่เป็นทรงกลมศึกษาโดย [8] ปี 1960 ที่อ้างอิงโดย [6] โดยความเป็นทรงกลม หมายถึง อัตราส่วนระหว่างพื้นที่ผิวของเม็ดทรงกลมที่มีปริมาตรเท่าเม็ดของแข็งต่อพื้นที่ผิวของเม็ดของแข็ง โดยที่เม็ดของแข็งเป็นทรงกลมค่าความเป็นทรงกลมมีค่าเท่ากับหนึ่ง ($\phi = 1$) และถ้าเม็ดของแข็งมีรูปร่างต่าง ๆ ไปค่าความเป็นทรงกลมมีค่าน้อยกว่าหนึ่งเสมอ ($\phi < 1$) เสมอ จากลักษณะทางกายภาพของเมล็ดพริกไทยที่เป็นทรงกลมในงานวิจัยมีค่า ($\phi = 1$)

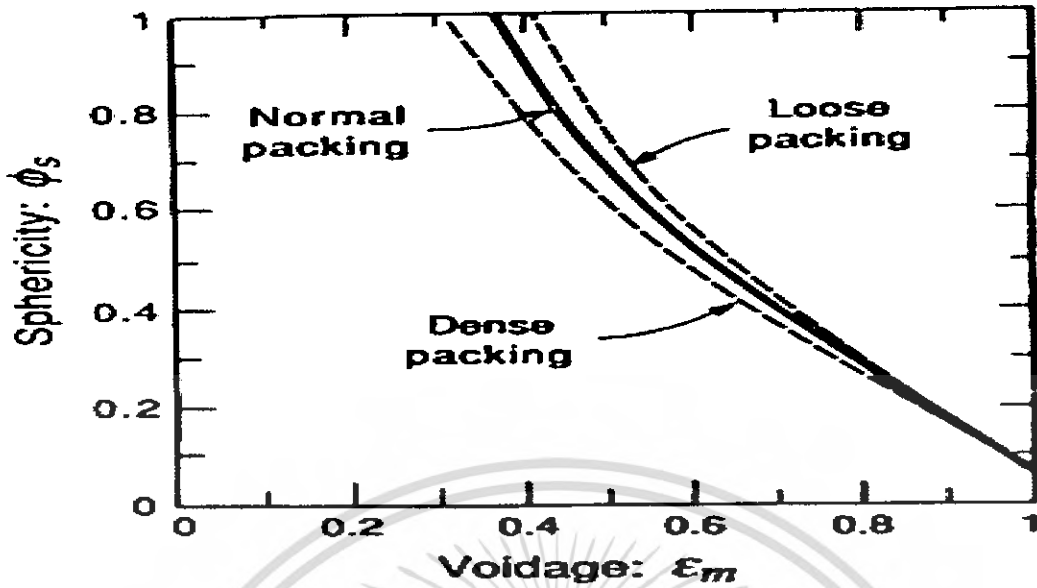
4. สัดส่วนช่องว่าง, ϵ_m

กรณีที่มีเม็ดของแข็งมีรูปร่างเป็นทรงกลมและขนาดสม่ำเสมอตลอด เราสามารถคำนวณหาช่องว่างระหว่างเม็ดทรงกลมเหล่านี้ได้ ด้วยวิธีทางคณิตศาสตร์ ลักษณะการเรียงตัวของเม็ดทรงกลมในเบด ทำให้เกิดขนาดของช่องว่างแตกต่างกันออกไป แต่ในกรณีที่มีเม็ดของแข็งมีรูปร่างไม่เป็นทรงกลม สามารถหาความสัมพันธ์ระหว่างการเป็นทรงกลมกับสัดส่วนช่องว่าง ดังรูป 2

ในขณะที่เริ่มพลูอิดไดเซชัน ช่องว่างในเบดมีการขยายตัว ช่องว่างในขณะนั้นเรียกว่า สัดส่วนช่องว่างที่เกิดพลูอิดไดเซชัน ดังสมการ

$$\epsilon = \left(\frac{0.0714}{\phi} \right)^4 \quad (5)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูป 2 ความสัมพันธ์ระหว่าง สัณฐาน และ ปริมาณช่องว่าง [6]

5. การหาความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดไดเซชัน, U_{mf}

ในขณะที่เม็ดของแข็งเริ่มลอยตัวเป็นอิสระอยู่นั้นอาจกล่าวอีกอย่างหนึ่งได้ว่า เม็ดของแข็งอยู่ในภาวะสมดุลของแรงสองแรงที่เกิดขึ้นบนเม็ดของแข็ง คือ แรงที่เกิดจากน้ำหนักของเม็ดของแข็งเองกับแรงพยุงจากการไหลหรือเกิดจากแรงเสียดทานกับแรงต้านการร่อนของไหลซึ่งเขียนและจัดรูปใหม่ได้เป็น

$$\frac{\Delta p}{L_{mf}} = (1 - \epsilon_m)(\rho_p - \rho_g)g \tag{6}$$

โดยการประยุกต์สมการ (4) กับสมการความดันตกของ ERGUN จะได้

$$\frac{1.75}{\epsilon_m^3 \phi_s} Re_{mf}^2 + \frac{150(1 - \epsilon_m)}{\epsilon_m^2 \phi_s^2} Re_{mf} = \frac{d_p^3 \rho_g (\rho_p - \rho_g) g}{\mu_g^2} \tag{7}$$

โดยที่

$$Re_{mf} = \frac{d_p U_{mf} \rho_g}{\mu_g} \tag{8}$$

6. อุปกรณ์การทดลอง

6.1 อุปกรณ์เครื่องอบแห้งเทคนิคฟลูอิดไดเซชัน

เครื่องอบแห้งเทคนิคฟลูอิดไดเซชันและอุปกรณ์ต่าง ๆ ได้ถูกแสดงดังรูป 3 ซึ่งประกอบด้วยหอทดลองแบบสี่เหลี่ยม ทำจากอะคริลิกใสขนาดกว้าง 80 มม. ยาว 200 มม. และสูง 1000 มม. แผ่นกระจายอากาศแบบเจาะตรง ซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรูเท่ากับ 2.5 มม. และมีจำนวนรู 240 รู ซึ่งคิดเป็นพื้นที่เปิด 7.38% เมล็ดพริกไทยที่ใช้ทดลองมีความชื้นเริ่มต้นอยู่ที่ 75% (มาตรฐานเปียก)

พัดลมหรือโบลเวอร์ที่ใช้ในการทดลองขนาด 5.5 กิโลวัตต์ ต่อกับชุดควบคุมความเร็วหรือที่เรียกว่าอินเวอร์เตอร์เป็นตัวควบคุมความเร็วรอบขับอากาศผ่านท่อโดยที่ความเร็วของอากาศที่ทางเข้าจะถูกวัดด้วยออร์ทิคมิเตอร์ อากาศในเครื่องอบแห้งเทคนิคฟลูอิดไดเซชันจะถูกทำให้ร้อนขึ้นด้วยขดลวดความร้อนขนาด 12 กิโลวัตต์ พร้อมด้วยอุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิการอบแห้ง ในการทดลองแต่ละครั้งใช้เวลาในการอบ 120 นาที ในการควบคุมอุณหภูมิของอากาศให้มีค่าคงที่ตามที่กำหนด อุณหภูมิทดสอบภายในหอทดลองจะอยู่ที่ 80 องศาเซลเซียส โดยจะทำการวัดอุณหภูมิภายในเบ็ดด้วยเทอร์มิคัพเบิล ในการทดลองเมล็ดพริกไทยจะถูกวัดความชื้นที่ลดลงจากค่าน้ำหนักเมล็ดพริกไทยที่เปลี่ยนไป ซึ่งจะทำการวัดทุก ๆ 5 นาที โดยเครื่องชั่งน้ำหนักดิจิตอลที่มีความละเอียด 0.01 กรัม

6.2 อุปกรณ์เครื่องอบแห้งฟลูอิดไดเซชันแบบขยายหลายช่วง

เครื่องอบแห้งฟลูอิดไดเซชันแบบขยายหลายช่วงจะใช้อุปกรณ์พื้นฐานร่วมกับเครื่องอบแห้งเทคนิคไดเซชันแต่จะต่างกันตรงที่หอทดลองจะมีแผ่นขยายท่ามุม 30 องศา ดังรูป. 4 จะมีการติดตั้งในหอทดลองสี่เหลี่ยม ซึ่งการอบแห้งเทคนิคฟลูอิดไดเซชันแบบธรรมดาภายในหอทดลองจะไม่มีแผ่นขยาย ซึ่งเป็นหอโล่ง

7. วิธีการทดลอง

7.1 การหาค่าความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดไดเซชัน

7.1.1 ทำการเปรียบเทียบชุดออร์พิคมิเตอร์ที่ใช้ในการทดลอง

7.1.2 ใส่เมล็ดพริกไทยมวล 200 กรัม ลงในหอทดลอง

7.1.3 เดินเครื่องพัดอากาศหรือโบลเวอร์ที่ใช้ในการอบแห้ง โดยค่อย ๆ ผ่านอากาศที่อัตราการไหลต่ำ ๆ ก่อน แล้วค่อย ๆ เพิ่มอัตราการไหลของอากาศเพิ่มขึ้น

7.1.4 บันทึกผลของความดันลดคร่อมเบดจากที่อ่านได้จากมานอร์มิเตอร์ และบันทึกค่าความดันตกคร่อมออร์พิคมิเตอร์ เพื่อนำไปหาค่าความเร็วอากาศที่ไหลผ่านหอทดลอง

7.1.5 นำผลที่บันทึกได้มาเขียนเป็นกราฟและวิเคราะห์หาจุดที่ความดันลดคร่อมเบดเริ่มคงที่

7.1.6 เลือกใช้ความเร็วที่ความดันลดคร่อมเบดเริ่มคงที่เป็นค่าความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดไดเซชัน

7.2 การอบแห้งเมล็ดพริกไทยโดยเทคนิคฟลูอิดไดเซชัน

7.2.1 เปิดสวิทช์เดินเครื่องพัดอากาศหรือโบลเวอร์ ให้อากาศไหลผ่านระบบเครื่องอบแห้ง และเปิดเครื่องให้ความร้อนจนเครื่องให้ได้อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ประมาณ 15 นาที

7.2.2 รัับอัตราการไหลอากาศในหอทดลองให้ได้เท่ากับ $1.2U_{mf}$

7.2.3 ใส่เมล็ดพริกไทยมวล 200 กรัม ลงในหอทดลอง และสังเกตผลการทดลอง

7.2.4 นำเมล็ดพริกไทยออกมาชั่งน้ำหนักของน้ำหนักที่หายไปทุก ๆ 5 นาที ด้วยเครื่องชั่งดิจิตอลที่มีความละเอียด 0.01 กรัม และบันทึกผลการทดลอง

7.2.5 ทำการทดลองจนกระทั่งครบ 2 ชั่วโมง (มวลเมล็ดพริกไทยไม่เปลี่ยนแปลง) แล้วเปลี่ยนอัตราการไหลอากาศเป็น $2.0U_{mf}$ แล้วดำเนินการทดลองซ้ำตามลำดับขั้นตอน 7.1.1-7.1.5 ใหม่ตามลำดับ

7.3 การอบแห้งเมล็ดพริกไทยโดยเทคนิคฟลูอิดไดเซชันแบบขยายหลายช่วง

7.3.1 เปลี่ยนหอทดลอง โดยเริ่มการทดลองที่แผ่นขยายที่ 30 องศา และมีช่องว่างระหว่างมุม คือ มุมตรงกันข้ามห่างกัน 3 cm

7.3.2 รัับอัตราการไหลอากาศในหอทดลองให้ได้เท่ากับ $1.2U_{mf}$

7.3.3 ใส่เมล็ดพริกไทยมวล 200 กรัม ลงในหอทดลอง และสังเกตผลการทดลอง

7.3.4 นำเมล็ดพริกไทยออกมาชั่งน้ำหนักของน้ำหนักที่หายไปทุก ๆ 5 นาที ด้วยเครื่องชั่งดิจิตอลที่มีความละเอียด 0.01 กรัม และบันทึกผลการทดลอง

7.3.5 ทำการทดลองจนกระทั่งครบ 2 ชั่วโมง (มวลเมล็ดพริกไทยไม่เปลี่ยนแปลง) แล้วปรับแผ่นขยายให้มีระยะช่องว่างระหว่างมุมเท่ากับ 2 cm และ 1 cm แล้วปรับเปลี่ยนอัตราการไหลอากาศเป็น $2.0U_{mf}$ แล้วดำเนินการทดลองซ้ำตามลำดับขั้นตอน 7.3.1-7.3.5 ใหม่ตามลำดับ

8. ผลการทดลอง

8.1 ผลของการอบแห้งโดยใช้เทคนิคฟลูอิดไดซ์เบด

ในรูปที่ 5 จากการทดลองใช้เทคนิคฟลูอิดไดซ์เบดแบบธรรมดาหรือแบบท่อโค้ง จะพบว่าความเร็วลมมีผลต่อการอบแห้ง เพราะที่ความเร็ว $1.2U_{mf}$ สังเกตเห็นในขณะทำการทดลองจะเห็นว่าเมล็ดพริกไทยมีการกระจายตัวกันน้อยมาก โดยในช่วงแรก ๆ ของปริมาณลมที่เพิ่มขึ้นคงเหลือจะลดน้อยกว่า $2.0U_{mf}$ จะเกาะกลุ่มกันเป็นก้อนและเมล็ดที่ติดกับขอบข้างของหอทดลองจะไม่มีการขยับเมล็ดพริกไทยซึ่งจะอยู่ที่พอดิเวลาที่เวลาผ่านไปประมาณ 1 ชั่วโมงเมล็ดพริกไทยจะกระจายตัวดีกว่า $2.0U_{mf}$ ทำให้พื้นที่การถ่ายเทความร้อนระหว่างเมล็ดพริกไทยกับลมร้อนมีน้อย และความร้อนส่วนมากจะสูญเสียออกไปจากหอทดลองอย่างรวดเร็วโดยไม่เกิดการถ่ายเทความร้อนให้กับเมล็ดพริกไทย ทำให้ปริมาณความชื้นของเมล็ดพริกไทยลดลงน้อยกว่าการอบแห้งในรูปแบบอื่น ๆ

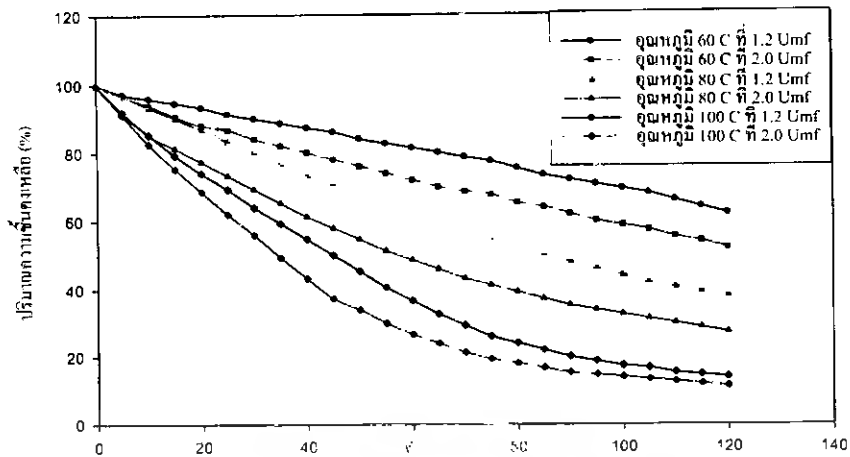
8.2 ผลของการอบแห้งฟลูอิดไดซ์เบดที่มีการขยายหลายช่วง

8.2.1 ผลของการอบแห้งโดยการเปลี่ยนความเร็วลมที่อุณหภูมิและมุมของแผ่นขยายของหอทดลองเดียวกัน

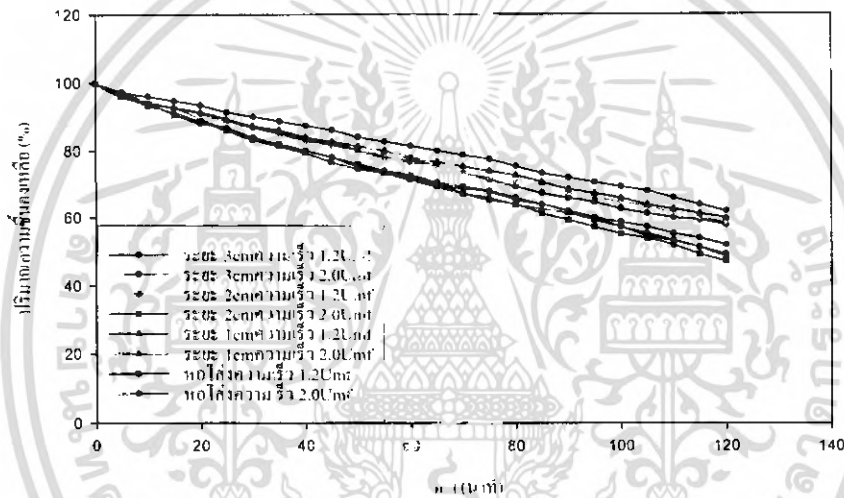
ในรูปที่ 6 ถึงรูปที่ 8 แสดงผลการอบแห้งที่มีการขยายหลายช่วง ที่ความเร็วลม $1.2U_{mf}$ และ $2.0U_{mf}$ อุณหภูมิต่าง ๆ มุมของแผ่นขยายของหอทดลอง 30 องศา และระยะห่างระหว่างมุมในการทดลอง 1 cm 2 cm และ 3 cm ตามลำดับ

จากรูปที่ 6 ถึงรูปที่ 7 เมื่อทำการอบแห้งจะเห็นได้ว่าความเร็วลมมีอิทธิพลต่อการอบแห้ง ซึ่งที่ความเร็วสูงจะให้อัตราการอบแห้งดีกว่าที่ความเร็วต่ำ

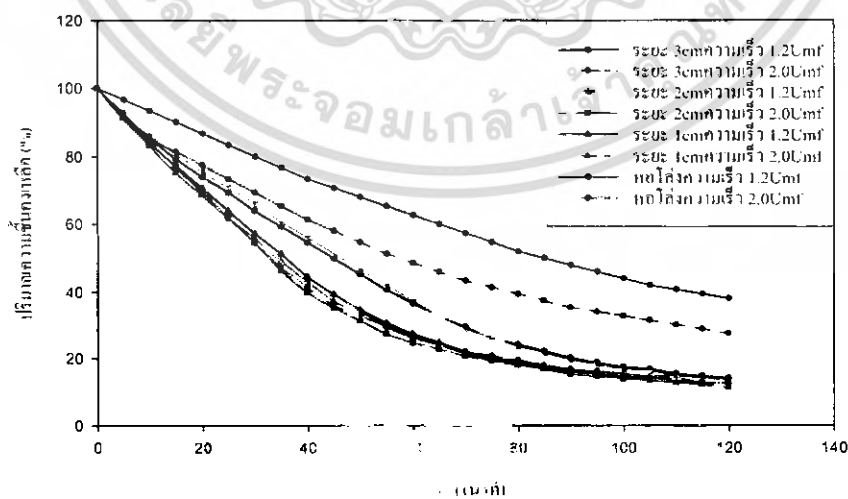
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูป 5 แสดงผลการทดลองฟลูอิดไดร้ง ที่มี 3 ระยะ หลุมช่วง ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส

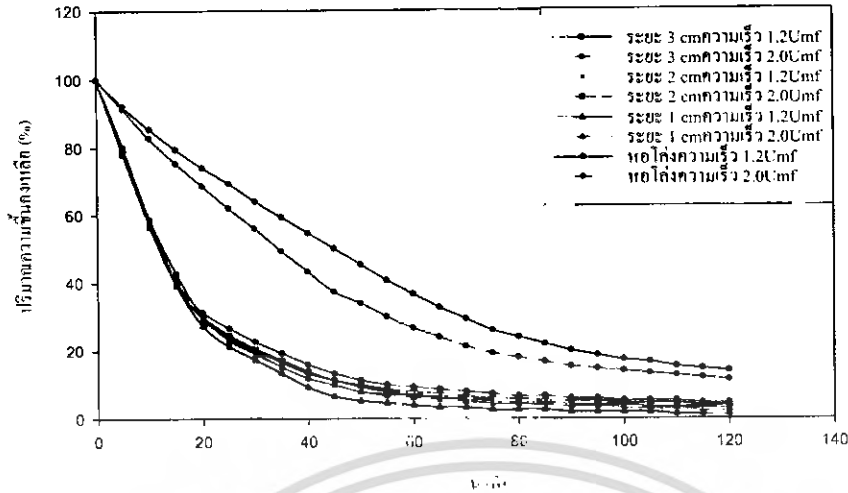


รูป 6 แสดงผลการทดลองฟลูอิดไดร้ง ที่มี 3 ระยะ หลุมช่วง ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส



รูป 7 แสดงผลการทดลองฟลูอิดไดร้ง ที่มี 3 ระยะ หลุมช่วง ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูป 9 แสดงผลการทดลองฟลูอิดไดซ์เบดที่มีรัศมีหลอดยวง ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส

9. สรุปผลการทดลองและข้อเสนอนแนะ

9.1 การอบแห้งฟลูอิดไดซ์เบดที่มีการขยายหลายช่วง

จากการทดลองเพื่อศึกษาการอบแห้งเมล็ดพริกไทยด้วยเทคนิคฟลูอิดไดซ์เบด (หอโล่ง) และแบบที่มีการขยายหลายช่วง ที่ความชื้นเริ่มต้น 75% มาตรฐานเปียก อุณหภูมิอากาศ 80 องศาเซลเซียส และความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศที่ 67-70% มวลเมล็ดพริกไทยที่ใช้ในการอบแห้ง 200 กรัม สามารถสรุปได้ดังต่อไปนี้

9.1.1 การอบแห้งเมล็ดพริกไทยที่ใช้เทคนิคฟลูอิดไดซ์เบด (หอโล่ง) ความเร็วลมมีผลต่อการอบแห้งเพราะที่ความเร็ว $1.2 U_{mf}$ สังเกต ในขณะที่ทำการทดลองจะเห็นว่าเมล็ดพริกไทยมีการกระจายตัวกันน้อยมาก จะเกาะกลุ่มกันเป็นก้อนและเมล็ดที่ติดกับขอบข้างของหอตลอด จะไม่มีการขยับเมล็ดพริกไทยซึ่งจะอยู่กับที่ ส่วนที่ความเร็ว $2.0 U_{mf}$ จะมีการขยับของเมล็ดบ้างแต่ก็ยังมีส่วนที่ไม่ขยับอยู่ ทำให้พื้นที่การถ่ายเทความร้อนระหว่างเมล็ดพริกไทยกับลมร้อนมีน้อย และความร้อนส่วนมากจะสูญเสียออกไปจากหอตลอดอย่างรวดเร็วโดยไม่เกิดการถ่ายเทความร้อนให้กับเมล็ดพริกไทย ทำให้ปริมาณความชื้นของเมล็ดพริกไทยลดลงน้อยกว่าการอบแห้งในรูแบบอื่น *

9.1.2 การอบแห้งเมล็ดพริกไทยฟลูอิดไดซ์เบดที่มีการขยายหลายช่วงที่อุณหภูมิเดียวกัน ความเร็วลมในหอตลอดมีอิทธิพลต่ออัตราการอบแห้ง คือ เมื่อเพิ่มความเร็วลมในหอตลอดจะมีผลทำให้อัตราการอบแห้งดีขึ้น

9.1.3 การเปลี่ยนแผ่นขยายมุมของหอตลอดมีผลต่ออัตราการอบแห้ง โดยจากการทดลองที่มุมของแผ่นขยายมุมของหอตลอด 30 จะพบว่าที่อุณหภูมิและความเร็วในหอตลอดเดียวกัน จะให้ประสิทธิภาพในการอบแห้งดีกว่าหอโล่ง

9.2 ข้อเสนอนแนะ

9.2.1 ในการทดลองถ้าปริมาณความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศเปลี่ยนแปลงมาก * มีผลให้อัตราการลดลงของปริมาณความชื้นในเมล็ดพริกไทยต่อเวลาที่มีการเปลี่ยนแปลงไปด้วย ดังนั้นควรมีงานวิจัยที่ศึกษาผลกระทบของการเปลี่ยนค่าความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ และตัวแปรอื่นอีก

9.2.2 ควรที่จะศึกษาผลของการนำอากาศที่ใช้อบแล้วนำกลับมาใช้ใหม่ และความคุ้มค่าของพลังงานโดยเทคนิคฟลูอิดไดซ์เบด

9.2.3 พัฒนาการอบแห้งเมล็ดพริกไทยโดยเทคนิคฟลูอิดไดซ์เบดไปสู่อุตสาหกรรมการอบแห้งเมล็ดพริกไทยภายในประเทศต่อไปในอนาคต

10. เอกสารอ้างอิง

- [1] สมศักดิ์ ดำรงเลิศ, "ฟลูอิดไดซ์เบด," สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, พ.ศ 2528
- [2] วรเมธ หัดทอง, "การศึกษาเชิงทดลองการอบแห้งเมล็ดกาแฟด้วยเทคนิคฟลูอิดไดซ์เบด," วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, พ.ศ 2546
- [3] อรุณ เลาหะมาน, "การศึกษาการอบแห้งเทคนิคลมหมุนควงแบบมีแผ่นขวาง," วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, พ.ศ.2547
- [4] สมชาติ โสภณรณฤทธิ์, "การอบแห้งเมล็ดพืชอาหาร," พิมพ์ครั้งที่ 5, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, พ.ศ 2535, หน้า 50-60
- [5] อรุณี ผุดผ่อง, "การศึกษาค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญสำหรับการวิเคราะห์และออกแบบการอบแห้งเมล็ดข้าวโพด," วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิตสาขาวิชาเทคโนโลยีพลังงานสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, พ.ศ.2531, หน้า 1-38.

- [6] D. Kunii, O. Levenspiel, "Fluidization Engineering," John Wiley, New York, 1969
- [7] Davidson, J.F. and Harrison, D., "Fluidized Particles," Cambridge University Press, New York, 1963
- [8] Othmer, D.F., "Fluidization," Reinhold Publishing Corp., New York, 1960



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้