

การอบแห้งของเมล็ดพริกไทยในเครื่องอบแห้งฟลูอิดไรซ์เบดที่ติดตั้งอุปกรณ์  
แผ่นสร้างความปั่นป่วน

DRYING OF PEPPERCORNS IN A FLUIDIZED-BED DRYER EQUIPPED  
WITH BAFFLE TURBULATORS



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมอาหาร

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2566

KMITL-2023-EN-M- 270-133

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

DRYING OF PEPPERCORNS IN A FLUIDIZED-BED DRYER EQUIPPED  
WITH BAFFLE TURBULATORS

KESMANEE BANTHUMPORN

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT  
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF  
MASTER OF ENGINEERING IN FOOD ENGINEERING  
FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

2023

KMITL-2023-EN-M- 270-133

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2023

SCHOOL OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การอบแห้งของเมล็ดพริกไทยในเครื่องอบแห้งฟลูอิดไชน์เบดที่ติดตั้งอุปกรณ์แผ่นสร้างความปั่นป่วน
นักศึกษา	นางสาวเกษมณี บรรทมพร
รหัสประจำตัว	59601242
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมอาหาร
พ.ศ.	2566
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	ผศ.ดร.วรีสา ชูวัฒน์กุล

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาจลศาสตร์การอบแห้งของเมล็ดพริกไทยในเครื่องอบแห้งฟลูอิดไชน์เบดที่ติดตั้งอุปกรณ์แผ่นสร้างความปั่นป่วน (fluidized-bed dryer equipped with baffle turbulators : B-FBD) ที่ทำมุม 30°, 45° และ 60° ระยะการจัดเรียง (BR) เท่ากับ 0.3D, 0.5D และ 0.7D ทำการเปรียบเทียบกับเครื่องอบแห้งฟลูอิดไชน์เบดแบบทั่วไป (typical fluidized-bed dryer : FBD) การทดสอบใช้อุณหภูมิอากาศร้อนทางเข้าเครื่องอบแห้ง ( $T_m$ ) ที่ 90°C และความเร็วจำเพาะของอากาศ ( $U^*$ ) เท่ากับ  $1.2U_{mf}$ ,  $1.4U_{mf}$  และ  $1.6U_{mf}$  ใช้เวลา 120 นาที การทดสอบแต่ละครั้งใช้เมล็ดพริกไทย 400 กรัม ที่มีความชื้นเริ่มต้นประมาณ  $400 \pm 15\%$  มาตรฐานแห้ง ผลการทดลองพบว่าเครื่องฟลูอิดไชน์เบดที่ติดตั้งอุปกรณ์แผ่นกั้นสร้างความปั่นป่วนทำมุม 45° ระยะการจัดเรียง 0.5D และความเร็วจำเพาะของอากาศเท่ากับ  $1.4U_{mf}$  มีอัตราการทำแห้งที่ 10-15 นาทีแรก สูงกว่าฟลูอิดไชน์เบดแบบทั่วไป เท่ากับ 77.2% , 77.3% และ 75.2%

สร้างสหสัมพันธ์เพื่อใช้ทำนายผลการทดลองการอบแห้งด้วยเครื่องฟลูอิดไชน์เบดตาม พบว่าสำหรับเครื่องฟลูอิดไชน์เบดแบบทั่วไป (FBD) สมการของ Logarithmic ให้ผลในการทำนายใกล้เคียงมากที่สุด ที่ค่า  $R^2$  เท่ากับ 0.9962, RMSE เท่ากับ 0.03250 และ  $\chi^2$  เท่ากับ 0.001148

และในกรณีของสำหรับเครื่องฟลูอิดไชน์เบดที่ติดตั้งอุปกรณ์สร้างการไหลปั่นป่วน (B-FBD) สมการของ Henderson and Pabis ให้ผลในการทำนายใกล้เคียงมากที่สุดที่มีค่า  $R^2$  เท่ากับ 0.9789, RMSE เท่ากับ 0.04182 และ  $\chi^2$  เท่ากับ 0.001754

นำเมล็ดพริกไทยที่ได้จากการอบแห้งไปศึกษาลักษณะทางกายภาพของเมล็ดพริกไทยเมื่อทำการอบแห้งด้วยเครื่องฟลูอิดไชน์เบด ได้แก่ ค่า Water activity (aw) เมล็ดพริกไทยในพบว่ามีความต่ำกว่า 0.6 ซึ่งอยู่ในเกณฑ์ที่ปลอดภัยต่อการเก็บรักษาเมล็ดพริกไทยไว้ได้ และได้นำไปทดสอบลักษณะเนื้อสัมผัส ด้วยค่าความแข็ง (hardness) และคุณสมบัติสีของเมล็ดพริกไทยดำด้วยการวิเคราะห์ทางสถิติของค่าสีระบบ (CIE  $L^*a^*b^*$ ) ทำการเปรียบเทียบกับสินค้าตามท้องตลาด 3 แบรินด์ A, B และ C พบว่า ค่าความแข็ง (hardness) ค่าความสว่าง ( $L^*$ ) และค่าสี  $a^* b^*$  มีความแตกต่างอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis	Drying of peppercorns in a fluidized-bed dryer equipped with baffle turbulators
Student	Kesmanee Banthumporn
Student ID.	59601242
Degree	Master of Engineering
Program	Food Engineering
Year	2023
Thesis Advisor	Asst. Prof. Dr. Varesa Chuwattanakul

### Abstract

This research aims to study the characteristics of dried peppercorns in fluidized-bed equipped with baffle attack angle of modified degree 30°, 45° and 60°. Blockage Ratio, (BR= 0.3D, 0.5D และ 0.7D). The inlet hot air temperature for drying ( $T_m$ ) was 90°C. The specific air velocity ( $U^*$ ) was  $1.2U_{mf}$ ,  $1.4U_{mf}$  and  $1.6U_{mf}$  for 120 minutes of each batch. 400 gram of peppercorns were tested in each batch with an initial moisture content  $400 \pm 15\%$  drybasis. As a result, it was found that the drying rate of the peppercorns in the fluidized-bed equipped with baffle tabulator at 45° attack angle, blockage Ratio at 0.3D, 0.5D and 0.7D and  $1.4U_{mf}$  of specific air velocity higher than the conventional fluidized-bed dryer up to 77.2% , 77.3% และ 75.2% higher the same conditions.

The present drying rate data of the pepper corn of both dryer techniques were made to fit with tree mathematical models which Logarithmic model is performed the best fit model highest value of  $R^2$  and the lowest value of RMSE and  $\chi^2$  for FBD. And Henderson and Pabis model for B-FBD. Furthermore, B-FBD and FBD are compact and have good control over drying conditioned, relatively high drying rates at the initial interval of the drying time.

To study the physical properties of the peppercorn when dried by a fluidized bed machine, Water activity ( $a_w$ ) The value of the peppercorn was lower than 0.6, which was in the range that was safe for peppercorn storage. Hardness and Color (CIE  $L^*a^*b^*$ ) are comparison with products in the market of 3 sample, there are no statistically significant difference.

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้ได้รับสำเร็จได้ด้วยการให้คำปรึกษาและการสนับสนุนจากบุคคลหลายฝ่ายโดยเฉพาะอย่างยิ่ง อาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร.วรีสา ชูวัฒนกุล ซึ่งเป็นผู้ให้คำแนะนำ รับฟังปัญหา และคอยสนับสนุนช่วยเหลือในหลายๆ เรื่องทั้งเรื่องการศึกษาและการให้ทัศนคติที่ดีในเรื่องต่างๆ

นอกจากนี้ขอขอบคุณการให้ความช่วยเหลือจากเจ้าหน้าที่วิจัยและเจ้าหน้าที่ธุรการภาควิชาวิศวกรรมอาหาร และขอขอบพระคุณ คณะครูอาจารย์ทุกท่านที่ให้ความรู้และคำแนะนำสำหรับความช่วยเหลือและสนับสนุนดูแลเรื่องการใช้อุปกรณ์และสถานที่ให้มีความสะดวกในการศึกษา

และสุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร คณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาเครื่องกล โดย ศ.ดร.สมิทธิ์ เอี่ยมสอาด ที่มีความกรุณาให้ใช้สถานที่ในการทำงานวิจัยครั้งนี้

เกษมณี บรรทมพร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VII
สารบัญรูป.....	VIII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์งานวิจัย.....	3
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	3
1.4 ประโยชน์ที่ว่าจะได้รับ.....	3
1.5 การเผยแพร่ผลงาน.....	4
1.6 สมมุติฐานในการทดลอง.....	4
บทที่ 2 งานวิจัยและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	6
2.1 พริกไทย.....	6
2.2 กระบวนการทำแห้งเมล็ดพริกไทย.....	10
2.2.1 การทำแห้ง.....	10
2.2.2 วิธีการทำแห้ง.....	10
2.2.3 ผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมพริกไทย.....	10
2.3 กระบวนการทำแห้งด้วยเทคนิคฟลูอิดไชน์เบด.....	11
2.3.1 การทำอาหารแห้งด้วยเทคนิคฟลูอิดไชน์เบด.....	11
2.3.2 เครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไชน์เบด (fluidized bed dryer).....	11
2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการทำแห้งเมล็ดพริกไทย.....	12
2.5 งานวิจัยทำแห้งด้วยเครื่องฟลูอิดไชน์เบด.....	16
2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	19

บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย.....	22
3.1 เครื่องมือ อุปกรณ์ และวัสดุดิบ.....	22
3.1.1 เครื่องมือ และอุปกรณ์เครื่องอบแห้งฟลูอิดไชน์เบด ประกอบไปด้วย....	22
3.2.2 วัสดุดิบ.....	23
3.2 ชุดหอบแห้ง.....	23
3.2.1 หอบแห้งแบบทั่วไป.....	23
3.2.2 หอบแห้งที่ติดตั้งแผ่นกั้นสร้างความปั่นป่วน.....	23
3.3 วิธีการทดลอง.....	25
3.3.1 การสอบเทียบออร์ฟิก.....	25
3.2.2 การหาค่าความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดไชน์ (U <sub>mf</sub> ).....	25
3.3.3 การเตรียมวัสดุดิบ.....	27
3.3.4 การหาความชื้นเริ่มต้น (MC <sub>i</sub> ).....	28
3.3.5 การทดลองการอบแห้งเมล็ดพริกไทย.....	28
3.3.6 การหาความชื้นฐานแห้ง (MC <sub>d</sub> ).....	29
3.4 การหาอัตราการทำให้แห้ง.....	30
3.4.1 อัตราส่วนความชื้น (Moisture ratio).....	30
3.4.2 อัตราการอบแห้ง (Drying Rate).....	30
3.5 การสร้างสมการสำหรับการทำนายการทดสอบการอบแห้งด้วยเครื่องฟลูอิดไชน์เบด .....	31
3.6 การวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพ.....	32
3.6.1 ค่าแอกติวิตีของน้ำ (Water activity, a <sub>w</sub> ).....	32
3.6.2 ลักษณะเนื้อสัมผัส.....	32
3.6.3 ค่าสี.....	33
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์.....	34
4.1 อิทธิพลความเร็วของอากาศ.....	34
4.1.1 เครื่องอบแห้งฟลูอิดไชน์เบดแบบทั่วไป (Fluidized bed dryer,FBD)	34
4.1.2 เครื่องอบแห้งฟลูอิดไชน์เบดที่มีการติดตั้งอุปกรณ์แผ่นสร้างความปั่นป่วน (Fluidized-bed dryer equipped with baffle turbulators, B-FBD).....	36

4.2 อิทธิพลของชนิดเครื่องอบแห้งฟลูอิดไชน์เบด.....	40
4.3 สร้างสมการสำหรับการทำนายการทดสอบการอบแห้งด้วยเครื่องฟลูอิด ไชน์เบด.....	42
4.4 ค่า Water activity ( $a_w$ ).....	43
4.5 ลักษณะเนื้อสัมผัส.....	44
4.6 สีของเมล็ดพริกไทยดำ.....	45
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย.....	46
บรรณานุกรม.....	47
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก.....	52
ภาคผนวก ข.....	57
ประวัติผู้เขียน.....	68



## สารบัญ

ตารางที่	หน้า
2.1 สายพันธุ์พริกไทยที่นิยมปลูกในแต่ละประเทศ.....	8
2.2 ตารางคุณสมบัติของสายพันธุ์พริกไทยที่นิยมปลูกในประเทศไทย.....	9
3.1 แบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์ทำนายการทดลองสำหรับวัตถุดิบที่ทำแห้ง.....	31
4.1 สร้างความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ตามแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์สำหรับการ อบแห้งเมล็ดพริกไทยด้วยเครื่องฟลูอิดไดซ์เบดแบบทั่วไป (FBD) และเครื่องฟลูอิดไดซ์ เบดที่ติดตั้งอุปกรณ์สร้างการไหลปั่นป่วน (B-FBD).....	42
4.2 การวิเคราะห์ทางสถิติของค่าสีระบบ (CIE L*a*b*).....	45



## สารบัญ

รูปที่	หน้า
1.1 ชุดแผ่นสร้างความเป็นปวนที่ติดตั้งแบบ $\theta=30^\circ$ และ $\theta=45^\circ$ .....	4
1.2 ชุดแผ่นสร้างความเป็นปวนที่ติดตั้งแบบ $\theta=45^\circ$ ระยะพิชต์การจัดเรียง (BR) ต่างกัน	4
1.3 ชุดแผ่นสร้างความเป็นปวนที่ติดตั้งแบบ $\theta=45^\circ$ ระยะพิชต์การจัดเรียง (BR) เท่ากับ 0.5D.....	5
2.1 ผลึกของพีเพอริน.....	7
2.2 สมการการสลายพันธะของพีเพอริน.....	7
2.3 ลักษณะการทำงานของเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไชน์เบด.....	12
2.4 หอบแห้งที่มีลักษณะของแผ่นกระจายลมแบบเกลียว.....	13
2.5 เทคนิคที่ใช้แบบผิวของสี่เหลี่ยมทรงกระบอกที่มีผิวคลื่นอยู่ภายใน.....	13
2.6 เครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไชน์เบดที่ติดตั้งแผ่นกั้นสร้างการหมุนวน.....	14
2.7 เครื่องอบแห้งฟลูอิดไชน์เบดโดยการใส่ชุดแผ่นบิดเกลียว.....	15
2.8 เครื่องจ่ายอากาศทรงกรวยต่อการอบแห้ง.....	15
2.9 แผ่นกระจายลม.....	16
2.10 เครื่องอบแห้งฟลูอิดไชน์เบดที่ติดตั้งแผ่นกระจายลมแบบใบพัด.....	17
2.11 เครื่องอบแห้งฟลูอิดไชน์เบดที่ติดตั้งการติดตั้งแผ่นจานลมแบบกรวย.....	18
2.12 เครื่องอบแห้งฟลูอิดไชน์เบดที่ติดตั้งการติดตั้งแผ่นจานลมแบบกรวย.....	19
2.13 เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่มีการติดตั้งแผ่นกั้นแบบตัววี (V-Orifice).....	19
2.14 เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่ติดตั้งรูปตัววีขนาดเล็ก (V-shaped ribs) ผิวท่อเว้า	20
2.15 เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่ติดตั้งโดยชุด V-rib ในท่อกลม.....	20
3.1 อุปกรณ์การทดลอง.....	22
3.2 หอบแห้งแบบทั่วไป.....	23
3.3 หอบแห้งติดตั้งแผ่นกั้นสร้างความเป็นปวน.....	23
3.4 แผ่นพับอลูมิเนียม.....	24
3.5 อุปกรณ์แผ่นสร้างความเป็นปวนระยะพิชต์การจัดเรียง (BR) เท่ากับ 0.3D.....	24
3.6 อุปกรณ์แผ่นสร้างความเป็นปวนระยะพิชต์การจัดเรียง (BR) เท่ากับ 0.5D.....	24

3.7 อุปกรณ์แผ่นสร้างความปั่นป่วนระยะพิชต์การจัดเรียง (BR) เท่ากับ 0.7D.....	24
3.8 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็ว (V) กับความดันตกคร่อม ( $\Delta P$ ) ในการสอบเทียบบอริฟิก.....	25
3.9 ความสัมพันธ์ระหว่างความแตกต่างของความดันและความเร็วของอากาศทางเข้าหอบแห้ง.....	26
3.10 เมล็ดพริกไทยสด.....	27
3.11 กระบวนการเตรียมวัตถุดิบ.....	27
3.12 จำนวนการทดลองทั้งหมด 30 การทดลอง.....	28
4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นของเมล็ดพริกไทยและเวลาในการอบแห้ง สำหรับเครื่องอบแห้งฟลูอิดซ์เบดแบบทั่วไป (FBD).....	34
4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นของเมล็ดพริกไทยและเวลาในการอบแห้ง สำหรับเครื่องอบแห้งฟลูอิดซ์เบดแบบทั่วไป (FBD).....	35
4.3 อัตราการทำแห้งของเมล็ดพริกไทย สำหรับเครื่องอบแห้งฟลูอิดซ์เบดแบบทั่วไป (FBD).....	35
4.4 ความชื้นและอัตราส่วนความชื้นของเมล็ดพริกไทยและเวลาในการอบแห้ง สำหรับเครื่องอบแห้งฟลูอิดซ์เบดที่มีการติดตั้งอุปกรณ์สร้างการไหลปั่นป่วน (B-FBD).....	36
4.5 อัตราการทำแห้งของเมล็ดพริกไทย สำหรับเครื่องอบแห้งฟลูอิดซ์เบดที่มีการติดตั้งอุปกรณ์สร้างการไหลปั่นป่วน (B-FBD).....	37
4.6 ความชื้นของเมล็ดพริกไทยและเวลาในการอบแห้ง สำหรับเครื่องอบแห้งฟลูอิดซ์เบดที่มีการติดตั้งอุปกรณ์สร้างการไหลปั่นป่วน (B-FBD) ที่มุม 30°.....	38
4.7 ความชื้นของเมล็ดพริกไทยและเวลาในการอบแห้ง สำหรับเครื่องอบแห้งฟลูอิดซ์เบดที่มีการติดตั้งอุปกรณ์สร้างการไหลปั่นป่วน (B-FBD) ที่มุม 45°.....	39
4.8 ความชื้นของเมล็ดพริกไทยและเวลาในการอบแห้ง สำหรับเครื่องอบแห้งฟลูอิดซ์เบดที่มีการติดตั้งอุปกรณ์สร้างการไหลปั่นป่วน (B-FBD) ที่มุม 60°.....	40
4.9 อัตราการทำแห้งของเมล็ดพริกไทย ระหว่างเครื่องอบแห้งฟลูอิดซ์เบดแบบทั่วไป (FBD) กับฟลูอิดซ์เบดที่ติดตั้งอุปกรณ์สร้างการไหลปั่นป่วน (B-FBD).....	41
4.10 ค่า Water activity ในการทดลองทุกกรณีศึกษา.....	43
4.11 ค่าความแข็งในการทดลองทุกกรณีศึกษาและสินค้าตัวอย่าง.....	44
4.12 ค่าความสว่าง (Lightness, L*) ในการทดลองทุกกรณีศึกษาและสินค้าตัวอย่าง.....	45

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ที่มาและความสำคัญ

พริกไทยเป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญของประเทศ จากมูลค่าส่งออก 120 ล้านบาท โดยมีอัตราขยายตัวการส่งออกเพิ่มขึ้นร้อยละ 147.7 การส่งออกพริกไทยเป็นลำดับที่ 24 ของโลก (กรมวิชาการเกษตรและสำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร, 2562) โดยจากสถิติของ Global Trade Atlas จะเห็นได้ว่าไทยเริ่มมีศักยภาพในการส่งออกพริกไทยมากขึ้น ใน 3 อันดับต้นๆ คือ ประเทศ แอฟริกาใต้ สหรัฐอเมริกา และจีน ต่างนำเข้าพริกไทยจากเวียดนามลดลงแต่หันมานำเข้าจากไทยเพิ่มมากขึ้น ก็เป็นเหตุผลหนึ่งที่สนับสนุนได้ว่าไทยได้พัฒนาคุณภาพพริกไทยที่ดีขึ้น ทำให้ส่งออกได้มากขึ้น เนื่องด้วยพริกไทยสามารถใช้ในการประกอบอาหารได้หลากหลายประเภท ดังนั้นหลายๆประเทศทั่วโลกจึงใช้เมล็ดพริกไทยเป็นส่วนหนึ่งในการประกอบอาหาร และได้รับการยอมรับจากพ่อครัวระดับโลกคือ *Alton Brown* ให้คำนิยามกับพริกไทยว่าเป็น “King of Spices” (ราชาแห่งเครื่องเทศ) (Montalto A., 2016) เนื่องจากความโดดเด่นในเรื่องของกลิ่นที่หอม เมื่อใส่ลงไปในการปรุงอาหารแล้วทำให้อาหารมีรสชาติชวนรับประทาน เพราะในพริกไทยมีน้ำมันหอมระเหย (Volatile Oil) อยู่ร้อยละ 0.4-7 (Peter, KV., 2006) ซึ่งพริกไทยดำมีน้ำมันหอมระเหยสูงกว่าพริกไทยสดและพริกไทยขาว สารที่อยู่ในน้ำมันหอมระเหยยังมีส่วนช่วยในการถนอมอาหาร (Darshan and Doreswamy, 2004) ทำให้อาหารที่ใช้พริกไทยปรุงนั้นเก็บไว้ได้นานขึ้น (Yang et al., 2002) นอกจากนี้ยังมีคุณสมบัติทางด้านเภสัชวิทยา ใช้เป็นสารกระตุ้นการหลั่งกรดในกระเพาะอาหาร (Parthasarathy et al., 2008) ลดระดับน้ำตาลในเลือด บรรเทาอาการปวดกล้ามเนื้อและข้อต่อ (Sosa et al., 2002) และยับยั้งการกระจายของเซลล์มะเร็ง (Raman and Gaikar, 2002) ดังนั้นจึงมีความประสงค์ที่ต้องการแปรรูปพริกไทยสดให้เป็นพริกไทยดำเพื่อเพิ่มปริมาณสารสำคัญคือฟิเพอรินให้มากยิ่งขึ้น และทั้งนี้ยังช่วยยืดระยะเวลาการเก็บรักษาพริกไทยเนื่องด้วยพริกไทยเป็นพืชเศรษฐกิจที่มีการส่งออกและบริโภคตลอดทั้งปี จึงได้นำเทคนิคการอบแห้ง (Drying) มาประยุกต์ใช้ในการแปรรูปพริกไทยซึ่งเป็นวิธีลดความชื้นโดยการระเหยน้ำออกจากวัตถุดิบ โดยที่อุณหภูมิในการระเหยนั้นอาจจะไม่ต้องระเหยที่จุดเดือดแต่ใช้อากาศพัดผ่านวัตถุดิบเพื่อดึงน้ำออกมา ทำให้ปริมาณน้ำในวัตถุดิบนั้นลดลง

สำหรับวิธีการทำแห้งเมล็ดพริกไทยแบบภูมิปัญญาชาวบ้าน ทำโดยการวางเมล็ดพริกไทยบนตาข่ายและตากแดด 4 แดด หรือใช้เวลาประมาณ 12 ชั่วโมง (อมรทิพย์ ภิรมย์บูรณ์ และคณะ, 2556) ซึ่งใช้เวลานานและ

ต้องอาศัยพลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์ ข้อจำกัดคือเมื่อถึงฤดูฝนและฤดูหนาว ก็ไม่สามารถใช้การทำแห้ง เมล็ดพริกไทยด้วยวิธีนี้ได้ ดังนั้นจึงนำเทคนิคอบแห้งที่ใช้ในโรงงานอุตสาหกรรมมาประยุกต์ใช้เพื่อแก้ไขปัญหาดังกล่าว วิธีการอบแห้งเมล็ดพริกไทยที่ใช้อย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมมีอยู่ 2 วิธี คือ การอบแห้งที่ให้เมล็ดพริกไทยอยู่กับที่ ตัวอย่างเช่น การอบแห้งแบบถาด (Tray Drying) และการอบแห้งที่เมล็ดพริกไทยเคลื่อนที่ เช่น การอบแห้งเทคนิคฟลูอิดไดซ์เบด (Fluidized bed drying) ผลของการอบแห้งแบบถาดลักษณะเมล็ดพริกไทยที่ได้ จะไม่มีความสม่ำเสมอ เนื่องจากอัตราการอบแห้งไม่เท่ากันทั่วทั้งผิวสัมผัส จึงส่งผลต่อส่วนที่สัมผัสกับอากาศ ร้อนมากกว่าระเหยน้ำในส่วนนั้นได้มากกว่าและยุบตัวลงไป ส่วนการอบแห้งด้วยเทคนิคฟลูอิดไดซ์เบด เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการทำแห้งโดยใช้อากาศร้อนเป่าผ่านชั้นวัสดุทำให้วัสดุลอยตัวอย่างเป็นอิสระ เกิดการผสมกับอากาศร้อนอย่างสม่ำเสมอทั่วทั้งผิวสัมผัส ทำให้ลักษณะเมล็ดพริกไทยที่ได้มีความสม่ำเสมอ ภายใต้อัตราการถ่ายเทความร้อนและมวลสูง และอัตราการไหลของอากาศที่ต่ำ ทำให้ประหยัดพลังงานในการอบแห้ง สามารถลดความชื้นของวัสดุได้อย่างรวดเร็ว จากงานวิจัยของ (Mert and Mesut. 2014) พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ในเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไดซ์เบดสูงกว่าเครื่องอบแห้งแบบถาดประมาณร้อยละ 70 การเพิ่มขึ้นนี้ส่วนใหญ่เป็นผลมาจากการเคลื่อนที่ของวัสดุทำให้เกิดการผสมกันระหว่างวัสดุและอากาศร้อนได้เป็นอย่างดี

สำหรับงานวิจัยนี้จึงมีความสนใจที่จะพัฒนาเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไดซ์เบด (Fluidized bed dryer) เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการอบแห้งให้สูงขึ้น จากงานวิจัยที่ผ่านมาได้มีการปรับปรุงและพัฒนาเครื่องอบแห้งฟลูอิดไดซ์เบดแบบทั่วไปโดยทำการติดตั้งอุปกรณ์เพื่อสร้างความปั่นป่วนและเพิ่มการผสมระหว่างวัสดุและอากาศร้อนให้ดีขึ้นทำให้ใช้เวลาในการอบแห้งลดลงเมื่อเทียบกับเครื่องอบแห้งฟลูอิดไดซ์เบดแบบทั่วไป โดยลักษณะการติดตั้งจะแบ่งออกเป็น 2 แบบหลักๆ คือ 1. ทำการติดตั้งภายนอกหอบแห้งซึ่งส่วนมากจะติดตั้งบริเวณทางเข้าหอบแห้ง และ 2. ติดตั้งภายในหอบแห้ง สำหรับการติดตั้งแบบที่ 1. มีการติดตั้งอุปกรณ์ได้หอบแห้งหรือบริเวณทางเข้าหอบแห้งด้วยอุปกรณ์ต่างๆ เช่น แผ่นกระจายแบบเกลียว (Helical distributor plate) (Boonloi and Promvong. 2006) ใบพัด (Vane) (Ozbeý and Soylemez. 2005) กรวยที่ติดใบพัดฐานตรงฐาน (Venkiteswaran at al., 2012) เป็นต้น และแบบที่ 2. ติดตั้งภายในหอบแห้ง เช่น ผนังหอบแห้งเป็นคลื่นสามเหลี่ยม (Promvong, P. et al., 2011) เมื่อทำการเปรียบเทียบการติดตั้งทั้งสองแบบพบว่าสามารถลดเวลาในการทำแห้งเมื่อเทียบกับเครื่องอบแห้งฟลูอิดไดซ์เบดแบบทั่วไปอยู่ในช่วงร้อยละ 30-43 โดยแบบที่มีการติดตั้งผนังแบบคลื่นสามเหลี่ยมสูงที่สุด สำหรับวิธีการติดตั้งภายในหอบแห้งมีข้อดีกว่าคือ ต้นทุนการทำชิ้นงานต่ำ ติดตั้งง่าย การใช้งานไม่ซับซ้อน

ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงทำการศึกษาออกแบบชุดแผ่นกั้นสร้างความปั่นป่วนที่ติดตั้งภายในหอบแห้ง โดยง่ายต่อการใช้งาน การทำความสะอาด และเกิดความดันตกคร่อม (Pressure drop) น้อยที่สุดเพื่อลด

พลังงานในการขับเคลื่อนพัดลม (Blower) ในการจ่ายอากาศให้เพียงพอต่ออนุภาคเกิดฟลูอิดไอเซชันอย่างต่อเนื่องและสม่ำเสมอ ช่วยเพิ่มโดยการเพิ่มประสิทธิภาพในการกระจายความร้อน การถ่ายเทมวลและพลังงานภายในหอบแห้ง และยังใช้เป็นแนวทางในการขยายขนาดของเครื่องอบแห้งใช้สำหรับโรงงานอุตสาหกรรม

## 1.2 วัตถุประสงค์งานวิจัย

1. ศึกษาผลกระทบของการติดตั้งแผ่นกั้นในเครื่องฟลูอิดไอซ์เบด ต่อผลของ ความชื้นและอัตราการอบแห้ง ของเมล็ดพริกไทย
2. ศึกษาอิทธิพลของมุม ( $\theta$ ) ระยะพิชต์การจัดเรียง (BR) ของแผ่นกั้น และความเร็วในการอบแห้ง เมล็ดพริกไทยด้วยเครื่องฟลูอิดไอซ์เบด
3. สร้างสหสัมพันธ์เพื่อใช้ทำนายผลการทดลองการอบแห้งด้วยเครื่องฟลูอิดไอซ์เบด
4. ศึกษาลักษณะทางกายภาพของเมล็ดพริกไทยเมื่อทำการอบแห้งด้วยเครื่องฟลูอิดไอซ์เบด

## 1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1. เมล็ดพริกไทยสายพันธุ์จันทบุรี เส้นผ่านศูนย์กลาง ( $D_p$ ) ประมาณ 4.5-5.5 mm
2. ความชื้นเริ่มต้นของเมล็ดพริกไทย ประมาณ  $400 \pm 15$  %db (ฐานแห้ง) ปริมาณ 400 กรัม ต่อการทดสอบ
3. เวลาในการทำแห้งเท่ากับ 120 นาที เก็บผลทดสอบความชื้นทุกๆ 5 นาที
4. อุณหภูมิที่ใช้ในการทำแห้งเมล็ดพริกไทยเท่ากับ  $90^\circ\text{C}$
5. ความเร็วจำเพาะของอากาศที่ใช้ในการอบแห้ง ( $U^*=U(U_{mf})$ ) เท่ากับ  $1.2U_{mf}$ ,  $1.4U_{mf}$  และ  $1.6U_{mf}$
6. อุปกรณ์แผ่นสร้างความปั่นป่วนที่ทำมุม ( $\theta$ ) เท่ากับ  $30^\circ$ ,  $45^\circ$  และ  $60^\circ$  และระยะพิชต์การจัดเรียง ( $BR=L/D$ ) เท่ากับ 0.3D, 0.5D และ 0.7D

## 1.4 ประโยชน์ที่ว่าจะได้รับ

1. ความเร็วลม มุมและระยะพิชต์การจัดเรียง ที่เหมาะสมในการอบแห้งเมล็ดพริกไทยด้วยเครื่องอบแห้งฟลูอิดไอซ์เบด
2. เพื่อนำเทคนิคฟลูอิดไอซ์เบดที่ติดตั้งแผ่นกั้นสร้างความปั่นป่วนไปประยุกต์กับการอบแห้งกับผลิตภัณฑ์ชนิดอื่นและพัฒนาเครื่องอบแห้งฟลูอิดไอซ์เบดสู่ระดับอุตสาหกรรมต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

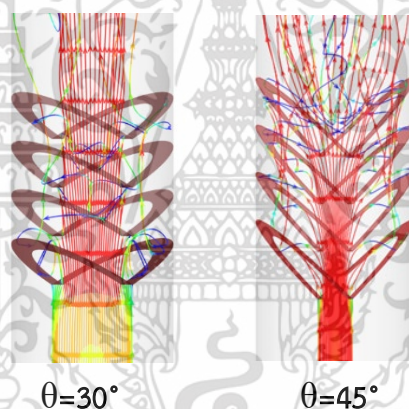
## 1.5 การเผยแพร่ผลงาน

จลศาสตร์การอบแห้งของเมล็ดพริกไทยในเครื่องอบแห้งฟลูอิดไธซ์เบดที่ติดตั้งอุปกรณ์แผ่นสร้างความปั่นป่วน (Drying kinetic of peppercorns in a fluidized-bed dryer equipped with baffle turbulators) การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 32 (ME-NETT2018)

## 1.6 สมมุติฐานในการทดลอง

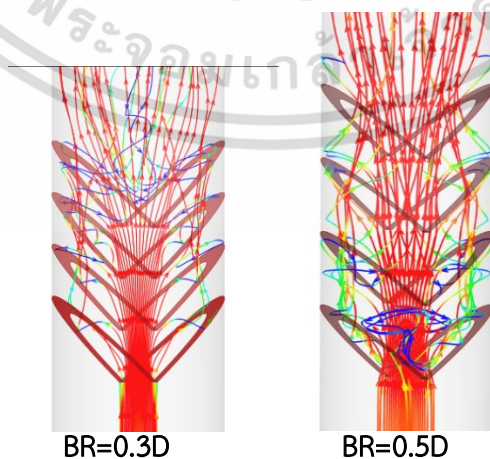
การติดตั้งชุดอุปกรณ์สร้างความปั่นป่วนในเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไธซ์เบด ทำให้ของไหลภายในหอบแห้งเกิดการไหลแบบปั่นป่วนเพิ่มมากขึ้น โดยการทดสอบสมมุติฐานจากการจำลองการไหล (simulation) ด้วยวิธีพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (Computational Fluid Dynamics, CFD) โดยการสร้างแผ่นกั้นสร้างความปั่นป่วนในหอบแห้งขนาดเท่ากับแบบทดสอบจริง สามารถแสดงผลการทดสอบได้ดังรูปที่ 1.1-1.3

อิทธิพลของมุม ( $\theta$ )



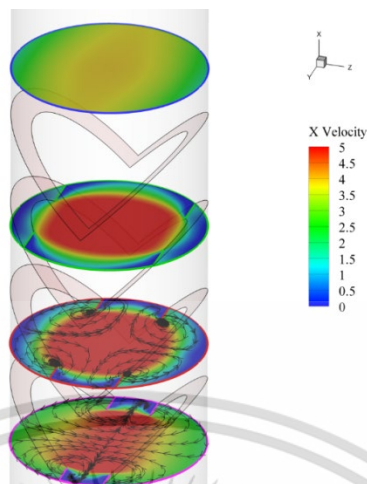
รูปที่ 1.1 ชุดแผ่นสร้างความปั่นป่วนที่ติดตั้งแบบ  $\theta=30^\circ$  และ  $\theta=45^\circ$

อิทธิพลของระยะพิชต์การจัดเรียง (BR)



รูปที่ 1.2 ชุดแผ่นสร้างความปั่นป่วนที่ติดตั้งแบบ  $\theta=45^\circ$  ระยะพิชต์การจัดเรียง (BR) ต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 1.3 ชุดแผ่นสร้างความปั่นป่วนที่ติดตั้งแบบ  $\theta=45^\circ$  ระยะพิชต์การจัดเรียง (BR) เท่ากับ 0.5D

จากรูปพบว่าเมื่อองศาการจัดวางและระยะพิชต์การจัดเรียงแตกต่างกัน ส่งผลให้กระแสของไหลในหอบแห้งเกิดความปั่นป่วนต่างกัน เนื่องจากรูปทรงของแผ่นกันเป็นตัววีจิงทำให้กระแสเกิดการหมุนวนในแนวตั้ง (Vertical vortex flow) ดังรูปที่ 1.3 ในกระแสของไหลที่เป็นเส้นสีดำ จะเกิดการไหลแบบหมุนวน (Mahmoudirad, S. et al., 2021) ซึ่งจะเหนี่ยวนำกระแสบริเวณรอบข้างเข้าไปแลกเปลี่ยนความร้อนกับกระแสของของไหลภายในช่องว่าง ทำให้การผสมกันระหว่างเมล็ดพริกไทยกับอากาศร้อนเพิ่มมากขึ้น ส่งผลต่อการเพิ่มประสิทธิภาพการแลกเปลี่ยนความร้อน ทำให้อัตราการทำแห้งของเมล็ดพริกไทยสูงขึ้น โดยที่ดังรูปที่ 1.1 และ 1.2

## บทที่ 2

# งานวิจัยและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

การวิจัยครั้งนี้ ได้ศึกษาการอบแห้งของเมล็ดพริกไทยด้วยเครื่องอบแห้งฟลูอิดไชน์เบดที่ทำการติดตั้งอุปกรณ์แผ่นสร้างความปั่นป่วน เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่าง อากาศร้อนและเมล็ดพริกไทย ผู้วิจัยได้ทำการศึกษาค้นคว้าข้อมูลดังนี้

- 1) พริกไทย
- 2) กระบวนการทำแห้งเมล็ดพริกไทย
- 3) กระบวนการทำแห้งด้วยเทคนิคฟลูอิดไชน์เบด
- 4) งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการทำแห้งเมล็ดพริกไทย
- 5) งานวิจัยทำแห้งด้วยเครื่องฟลูอิดไชน์เบด
- 6) งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 2.1 พริกไทย

พริกไทยเป็นพืชไม้เลื้อยอายุยืนนานกว่า 15 ปี มีชื่อทางวิทยาศาสตร์: *Piper nigrum* ในทุกส่วนของพริกไทยสามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้ทั้งสิ้นได้แก่ ราก ลำต้น ก้าน โดยเฉพาะเมล็ดพริกไทยที่นิยมนำมาปรุงอาหาร เนื่องจากความโดดเด่นในเรื่องกลิ่นที่หอมและรสชาติเผ็ดร้อน เนื่องจากในพริกไทยมีน้ำมันหอมระเหย (Volatile Oil) ประมาณร้อยละ 0.4-7 (Peter, KV., 2006) โดยมีพีเพอริน (Piperine) เป็นส่วนประกอบหลักซึ่งพีเพอรินเป็นสารแอลคาลอยด์ (alkaloid) ที่ได้จากการสกัดพริกไทยโดยนักไฟฟ้าและเคมีศาสตร์ชื่อ *Hans Christian Ørstedin* ในค.ศ.1819 เป็นสารประกอบผลึกสีเหลืองที่มีจุดหลอมเหลว 128 ถึง 130 °C ดังแสดงในรูปที่ 2.1 (Gorgani, L. et al., 2017) มีสูตรทางเคมี  $C_{17}H_{19}NO_3$  ที่มีคุณสมบัติเป็นเบสอ่อน เมื่อทำการย่อยสลายพันธะด้วยเบสแก่หรือกรดแก่ในน้ำ (Alkali hydrolysis decomposes) จะได้สารผลิตภัณฑ์เป็นกรดพีเพอริก (Piperic acid) มีสูตรทางเคมีเป็น  $C_{12}H_{10}O_4$  และพีเพอริดีน (Piperidine) ที่สามารถระเหยและให้กลิ่นหอมฉุน มีสูตรทางเคมี  $C_5H_{11}N$  (Mohammadi, M. et al., 2017) เกิดปฏิกิริยาดังรูปที่ 2.2 ในพริกไทยมีพีเพอรินอยู่ร้อยละ 98 ของสารแอลคาลอยด์ทั้งหมด (Hirasa and Takemasa. 1998) ดังนั้นพีเพอรินเป็นสารสำคัญในการชี้วัดคุณภาพของพริกไทยรวมไปถึงสรรพคุณทางยารักษาโรค ใช้เป็นสารกระตุ้นการหลั่งกรดในกระเพาะอาหาร ลดระดับน้ำตาลในเลือด บรรเทาอาการปวดกล้ามเนื้อและข้อต่อ และยับยั้งการกระจายของเซลล์มะเร็ง (Suvarna and

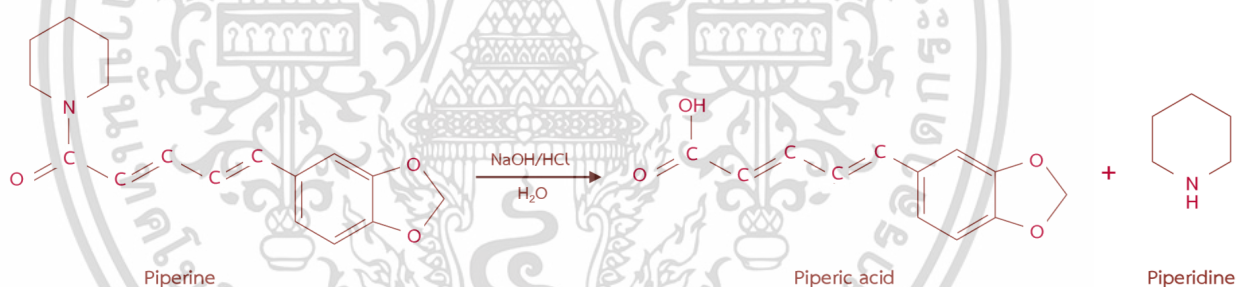
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Abdul Rahaman. 2019) นั่นเป็นเพราะว่าและสำหรับพริกไทยดำจะมีพีเพอรินมากกว่าพริกไทยขาวและพริกไทยอ่อนถึงร้อยละ 4 และร้อยละ 9 ตามลำดับ (Duangjai, A. et al., 2013)



รูปที่ 2.1 ผลึกของพีเพอริน

ที่มา : Gorgani, L. et al., 2017



รูปที่ 2.2 สมการการสลายพันธะของพีเพอริน

สายพันธ์ของพริกไทยมีต้นกำเนิดมาจากทั่วโลก แต่พบมากที่สุดทวีปเอเชียและในประเทศที่มีภูมิอากาศอยู่ในเขตร้อนชื้น เช่น อินเดีย อินโดนีเซีย ศรีลังกา มาเลเซีย บราซิลและประเทศไทย โดยในแต่ละประเทศมีสายพันธ์ที่เฉพาะเหมาะสมสำหรับภูมิภาคทางการเกษตรที่แตกต่างกันเช่นเดียวกับการเติบโตภายใต้ระบบการเพาะปลูกพืช (Risfaheri et al., 2000 ; Zachariah. 2000) สำหรับพันธ์ุที่ได้รับความนิยมในแต่ละประเทศมีดังตารางที่ 2.1

**ตารางที่ 2.1** สายพันธุ์พริกไทยที่นิยมปลูกในแต่ละประเทศ

ประเทศ	สายพันธุ์
อินเดีย	Aimpiriyan, Arakkulam Munda, Blankotta, Cheriyananiyakadan, Jeerakamundi, Kerallakally, Kerallundi, Kudanadan, Karimkotta, Nambamundi, Nambamundi, Kuduvi, Kuduvi, Kudan, Kudan Kandi ปรับปรุงพันธุ์: Panniyur 1, 2, 3, 4, 5, 6 และ 7, Sreekara, Subhakara, Panchami, Pournami และ PLD-2
Brazil	กูชิง (Singapura), ปันนิยูริ 1
มาเลเซีย	ซาราวัก, คุซซิง
อินโดนีเซีย	Bangka, Banjarmasin, Belantung, Beng Kayang, Chunuk, Chunuk Kernuga (CK2), Djambi, Duantebei, Kerenci, Kernuga (CK1), Korintji, LDK (Lampung Daun Kocil), LDL (Lampung Daun Lebar), Palulauta, Petaling 1, Petaling 2, Merefin, Natar 1, Natar 2, LDLN1 (Lampung Daun Lebar Namang 1), LDLN2 (Lampung Daun Lebar Namang 2)
ศรีลังกา	ซีลอน
มาดากัสการ์	Sel.IV.1, Sel.IV.2
ไทย	โบราณ (ควายกระบองเพชร), บ้านเขา, ปรานค์ถึหรือจันทุรี

ที่มา : Risfaheri et al., (2000) ; Zachariah. (2000)

ในประเทศไทยสำหรับการศึกษาดำเนินการเพาะปลูกพริกไทยได้ทำการนำเข้าเมล็ดพันธุ์จากประเทศมาเลเซียและศรีลังกาเนื่องจากมีคุณสมบัติต้านทานต่อแมลงและสภาพอากาศร้อนได้ดีกว่าพันธุ์ไทยดั้งเดิม จึงทำให้ในประเทศไทยมีการปลูกพริกไทย 3 สายพันธุ์หลักๆ (Zachariah, T.J. 2000) ได้แก่ 1. พันธุ์ซีลอนจากประเทศศรีลังกา 2. พันธุ์ซาราวักหรือคนไทยเรียกพันธุ์มาเลเซียจากประเทศมาเลเซีย และ 3. พันธุ์ปรานค์ถึหรือพันธุ์จันทุรี โดยในแต่ละสายพันธุ์มีความแตกต่างกันดังตารางที่ 2.2 ต่อไปนี้

**ตารางที่ 2.2** คุณสมบัติของสายพันธุ์พริกไทยที่นิยมปลูกในประเทศไทย

สายพันธุ์พริกไทย	พันธุ์ซีลอน	พันธุ์มาเลเซีย	พันธุ์จันทบุรี
นิยมจำหน่าย	พริกไทยอ่อน, ส่งทำ พริกไทยดอง	พริกไทยดำ/ขาว	พริกไทยอ่อน/ พริกไทยดำ/ขาว
ขนาดเมล็ด	3	2	2
น้ำหนัก	3	2	2
ปริมาณความชื้นเริ่มต้น	3	2	1
รสชาติ(รสเผ็ดร้อน)	1	2	3
กลิ่นหอมฉุน	1	2	3
จำนวนเมล็ดต่อพวง	3 (ลักษณะพวงยาว)	2 (ลักษณะพวงยาว)	1 (ลักษณะพวงสั้น)
ระยะเวลาเก็บเกี่ยว	ตลอดทั้งปี หลังจากช่อดอก 4-5 เดือน เก็บขายพริกไทยอ่อน หรือหลังจากช่อดอก 6-7 เดือน ขายพริกไทยดำ/ขาว		

\*หมายเหตุ ระดับคะแนน 1 คือ น้อยที่สุด 2 คือ เท่าๆกัน และ 3 คือมากที่สุด

ที่มา : Hirasa and Takemasa. (1998)

จากที่กล่าวมาข้างต้นพบว่าคุณสมบัติทางเภสัชวิทยาของพีเพอรินซึ่งเป็นส่วนประกอบหลักในน้ำมันหอมระเหยที่พบมากที่สุดไนพริกไทยดำและคุณสมบัติทางการภาพของเมล็ดพริกไทยพันธุ์จันทบุรีไม่ว่าจะเป็นเรื่องรสชาติและกลิ่นที่มีความโดดเด่นกว่าทุกๆ สายพันธุ์ในประเทศไทย และเนื่องด้วยต้องการหาคุณสมบัติเฉพาะที่ประเทศอื่น ๆ ไม่มี รวมไปถึงการอนุรักษ์พืชพันธุ์ไทยพื้นบ้านของไทยไว้ด้วย จึงเลือกนำพันธุ์จันทบุรีใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตพริกไทยดำ

## 2.2 กระบวนการทำแห้งเมล็ดพริกไทย

### 2.2.1 การทำแห้ง

การทำแห้ง (Drying) คือ การลดความชื้นโดยใช้หลักการดึงน้ำออกจากโมเลกุลของวัตถุดิบ จนถึงระดับที่จุลินทรีย์ไม่สามารถเจริญเติบโตได้ และไม่เอื้อต่อการทำปฏิกิริยาเคมีและปฏิกิริยาการทำงานของเอนไซม์ที่ทำให้อาหารเสื่อมเสียคุณภาพ และการทำแห้งยังช่วยลดต้นทุนในการขนส่งเนื่องจากน้ำหนักของผลิตภัณฑ์ลดลงนั่นเอง

### 2.2.2 วิธีการทำแห้ง

วิธีการทำแห้ง มี 2 วิธีหลักๆ ได้แก่

1. การทำอาหารแห้งโดยอาศัยธรรมชาติ คือ จะอาศัยความร้อนจากแสงอาทิตย์ เช่น การตากแดด การทำแห้งด้วยตู้อบพลังแสงอาทิตย์ **ข้อเสีย**คือ ขึ้นกับสภาพดินฟ้าอากาศจึงไม่สามารถควบคุมอุณหภูมิ การตากแห้ง ความชื้น การหมุนเวียนของอากาศและกระแสลมให้คงที่ได้ตลอด ต้องใช้พื้นที่มาก และใช้เวลานาน

2. การทำแห้งโดยอาศัยวิธีการ คือ การนำหลักการทางวิทยาศาสตร์ และวิศวกรรมมาออกแบบเครื่องทำแห้ง โดยอาศัยหลักการการถ่ายเทความร้อน เพื่อส่งความร้อนเข้าไปในวัตถุดิบเพื่อให้โมเลกุลของน้ำเกิดการสั่นและแตกตัวกลายเป็นไอระเหยออกไปยังผิวของวัตถุดิบ การส่งผ่านความร้อนไปยังวัตถุดิบอาจจะเป็นลักษณะการนำ ความร้อน การพาความร้อน และการแผ่รังสี เพื่อทำให้วัตถุดิบแห้งด้วยการถ่ายเทความร้อนและมวลสารไปพร้อมๆ กัน โดยทั่วไปแล้ว การทำแห้งมักจะใช้อากาศร้อนเป็นตัวกลาง (Drying medium) ในการพาความร้อนออกไปจากวัสดุ ดังนั้นปัจจัยหลักที่มีอิทธิพลต่ออัตราการทำแห้งจึงได้แก่ อุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ และอัตราการไหลของอากาศร้อน ด้วยเหตุนี้ปรากฏการณ์หลักที่เกิดขึ้นกับการทำแห้งด้วยลมร้อน คือ การถ่ายเทความร้อนและมวลสารระหว่างวัสดุและของไหล โดยอาศัยแรงขับเคลื่อนจากความต่างศักย์ของอุณหภูมิและความชื้น กล่าวคือ ความร้อนสัมผัสจากของไหลถูกถ่ายเทสู่วัสดุ ทำให้ความชื้นระเหยออกไปกับอากาศ (เฉลิมชล ช่างถม. 2559) **ข้อดี**คือ สามารถควบคุมคุณภาพของผลิตภัณฑ์ได้ ใช้เวลาสั้นในการอบแห้ง (Dong Chen and Mujumdar Arun. 2008)

### 2.2.3 ผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมพริกไทย

**พริกไทยดำ** คือ ผลของต้นพริกไทยที่เก็บเมื่อแก่ และผ่านกระบวนการ (Processed) แล้วจะมีสีน้ำตาลเทาหรือดำ และมีรอยย่นที่เปลือก

**พริกไทยขาว** คือ ผลของต้นพริกไทย ที่แก่หรือสุกจัด ที่แยกเปลือกออก และผ่านกระบวนการ

ดังนั้น พริกไทยดำ จึงต้องผ่านกระบวนการทำแห้งเสียก่อน โดยมีคุณลักษณะคือ ต้องมีกลิ่น รสชาติ เฉาะ ตามลักษณะของพริกไทย ไม่เหม็นอับหรือขึ้น โดยมีความชื้นที่สามารถเก็บรักษาพริกไทยดำไว้ได้ ต่ำกว่าหรือเท่ากับ 13 %wb (ฐานเปียก) (พระราชบัญญัติมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม. 2511)

## 2.3 กระบวนการทำแห้งด้วยเทคนิคฟลูอิดไชน์เบด

### 2.3.1 การทำอาหารแห้งด้วยเทคนิคฟลูอิดไชน์เบด

อาศัยลมร้อนเป่าผ่านชั้นวัสดุติด (Bed) ทำให้วัสดุติดลอยตัวเป็นอิสระ เกิดการคลุกเคล้าและสัมผัส กับลมร้อนอย่างสม่ำเสมอ มีอัตราการถ่ายเทความร้อนและมวลสูง สามารถ ลดความชื้นของวัสดุลงได้ อย่างรวดเร็ว เหมาะกับใช้ทำแห้งวัสดุที่เป็นเม็ดเล็กที่มีรูพรุนและขนาดสม่ำเสมอ เช่น เมล็ดธัญพืช (Cereal grain) ถั่ว (Legume) เป็นต้น (Potter and Hotchkiss. 1997)

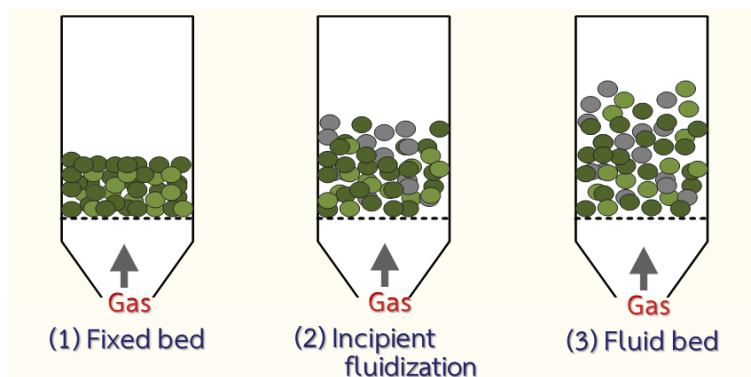
### 2.3.2 เครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไชน์เบด (fluidized bed dryer)

ลักษณะการทำงานของเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไชน์เบด แบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอนหลักๆ ดังรูปที่ 2.3 (Khawaja, H. 2011.)

1) Fixed bed เป็นการใส่วัสดุติดเข้าไปในเบด แล้วใส่อากาศเข้าไปขณะที่ของไหลไหลผ่านเบดด้วยความเร็วที่ต่ำกว่า ความเร็วต่ำสุดของการเกิดฟลูอิดไชน์ (Minimum fluidization velocity,  $U_{mf}$ ) เบดจะอยู่ในสภาวะนิ่งไม่มีการเคลื่อนที่

2) Incipient fluidization เป็นขั้นตอนการเริ่มเกิดฟลูอิดไชน์ (Fluidization) ซึ่งวัสดุติดมีการลอยตัวขึ้น และเมื่อเพื่อความเร็วของของไหลให้สูงขึ้น เมื่อความเร็วของของไหลมีค่าเท่ากับความเร็วต่ำสุดของการเกิดฟลูอิดไชน์ เกิดการลอยตัวของวัสดุติดด้วยแรงดันอากาศ อนุภาคของแข็งเกิดการขยับตัว และจัดเรียงให้เป็นระเบียบ สามารถลอยตัวได้อย่างอิสระและอยู่ในสภาวะสมดุลระหว่างแรง 2 แรง คือ แรงโน้มถ่วง และ แรงพยุง จากนั้นจะสามารถหาความเร็วต่ำสุดที่เกิดฟลูอิดไชน์ หรือ ความเร็วต่ำสุดของการเกิดฟลูอิดไชน์ ( $U_{mf}$ ) ในขั้นตอนนี้

3) Fluid bed เมื่อเพิ่มอัตราการไหลของอากาศเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จนความเร็วเกินความเร็วต่ำสุดของการเกิดฟลูอิดไชน์ ( $U_{mf}$ ) จะทำให้เกิดสภาวะลอยตัวเป็นของไหลภายในหอบแห้งและจะเป็นความเร็วที่ใช้ในการอบแห้ง ทั้งนี้ประสิทธิภาพของการอบแห้งขึ้นอยู่กับการออกแบบของเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไชน์เบด



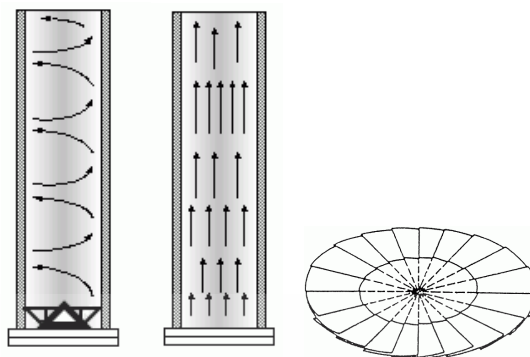
รูปที่ 2.3 ลักษณะการทำงานของเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดซ์เบด

## 2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการทำแห้งเมล็ดพริกไทย

อิทธิพล แก่งสันเทียะ. (2551) ได้ทำการศึกษาพฤติกรรมการอบแห้งเมล็ดพริกไทยในหอฟลูอิดซ์เบดที่มีครีบริบตัววี โดยได้ทำการทดลองในหอทดลองรูปทรงสี่เหลี่ยมขนาด กว้าง 8 เซนติเมตร ยาว 20 เซนติเมตร และ สูง 1 เมตร ในการทดลองใช้เมล็ดพริกไทยที่มีความชื้นเริ่มต้นประมาณ 430%db (ฐานแห้ง) เริ่มทดลองใช้อากาศแห้งทางเข้าในช่วงที่อุณหภูมิ 60, 80 และ 90 °C และใช้ความเร็วของอากาศภายในหอทดลองที่ 2, 2.5, 3 และ 3.5 m/s โดยทดลองให้เหลือความชื้นที่ 12%db (ฐานแห้ง) จากการศึกษาพบว่าอุณหภูมิของอากาศทางเข้าหอบมีอิทธิพลโดยตรงต่ออัตราการอบแห้งทุกเทคนิคและความเร็วมีอิทธิพลน้อยมากต่อเทคนิคฟลูอิดซ์เบด และพบว่าเมื่อติดตั้งผิวครีบริบตัววีเข้าไปในเครื่องอบแห้งเทคนิคฟลูอิดซ์เบดสามารถช่วยลดเวลาการอบแห้งได้ประมาณ 30%

Boonloi and Promvong. (2006) ได้ทำการศึกษาคุณลักษณะการอบแห้งเมล็ดพริกไทยด้วยเทคนิคฟลูอิดซ์เบดที่มีแผ่นกระจายแบบเกลียว โดยทำการอบในหอทดลองขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 0.13 เมตร สูง 1 เมตร ดังรูปที่ 2.4 ด้านล่างของหอทดลองจะมีแผ่นกระจายเกลียวซึ่งจะเป็นตัวทำให้เกิดการหมุนควงของลมร้อนภายในหอ โดยในการทดลองแต่ละครั้งใช้เมล็ดพริกไทยที่มีความชื้นเริ่มต้นประมาณ 80%wb (มาตรฐานเปียก) มวล 0.2 kg ทดลองที่อุณหภูมิ 80 °C และใช้ความเร็วของอากาศภายในหอทดลอง  $1.3U_{mf}$ ,  $1.6 U_{mf}$  และ  $2.0U_{mf}$  ใช้เวลาทดลองแต่ละกรณี 180 นาที และวัดความชื้นของเมล็ดพริกไทยทุกๆ 10 นาที จากผลการทดลองพบว่าในการอบแห้งด้วยเทคนิคฟลูอิดซ์เบดทั่วไปความเร็วลมไม่มีผลต่อการอบแห้งของเมล็ดพริกไทย แต่ในการอบแห้งด้วยเทคนิคแบบฟลูอิดซ์เบดที่มีแผ่นกระจายแบบเกลียวพบว่าความเร็วลมมีผลต่อการลดความชื้นของเมล็ดพริกไทยและเมื่อเปรียบเทียบระหว่างสองแบบจะดีกว่าการอบแห้งเมล็ดพริกไทยด้วยเทคนิคแบบฟลูอิดซ์เบดที่มีแผ่นกระจายแบบเกลียวให้ผลที่ดีกว่าแบบฟลูอิดซ์เบดทั่วไป โดยสามารถลดเวลาในการอบแห้งได้ถึง 30%

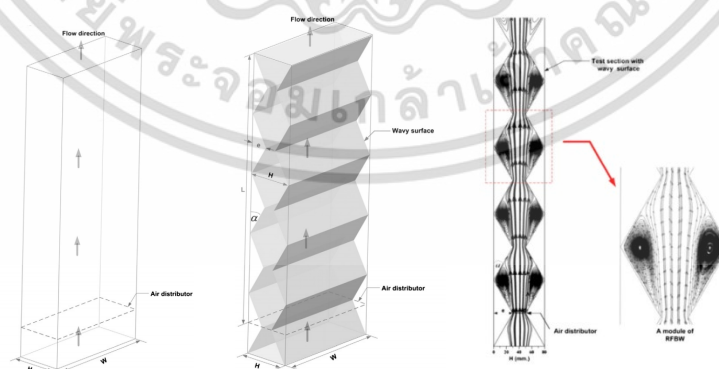
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.4 หอบแห้งที่มีลักษณะของแผ่นกระจายลมแบบเกลียว

ที่มา : Boonloi and Promvong. (2006)

Promvong, P. et al., (2011) ได้ทำการอบแห้งเมล็ดพริกไทยด้วยเทคนิคฟลูอิดไดซ์เบดกับเทคนิคฟลูอิดไดซ์แบบหอยฉล้น ดังรูปที่ 2.5 ในการทดลองแต่ละครั้งได้ใช้เมล็ดพริกไทยปริมาณ 200 กรัม ที่มีความชื้นเริ่มต้นประมาณ 400%db ทดลองที่อุณหภูมิ 80°C โดยใช้ความเร็วของอากาศภายในหอบแห้ง 1.7, 2.1 และ 2.6 m/s และใช้เวลาทดลองแต่ละกรณี 180 นาที วัดความชื้นที่ลดลงของเมล็ดพริกไทยทุกๆ 10 นาที ซึ่งผลจากการทดลองจะนำมาเปรียบเทียบกับการอบแห้งแบบฟลูอิดไดซ์เบดทั่วไป การทดลองพบว่าในการอบแห้งด้วยเทคนิคฟลูอิดไดซ์เบดทั่วไป ความเร็วลมไม่มีผลต่ออัตราการอบแห้งของเมล็ดพริกไทย แต่ในการอบแห้งด้วยเทคนิคฟลูอิดไดซ์แบบหอยฉล้นพบว่าความเร็วลมมีผลต่อการลดค่าความชื้นของเมล็ดพริกไทยโดยช่วยให้ความชื้นที่มีอยู่ในเมล็ดระเหยออกได้เร็วขึ้น เนื่องจากหอยฉล้นทำให้เมล็ดมีการเคลื่อนที่ลักษณะของไหลแบบปั่นป่วนเกิดการสั่นและกระจายตัวในหอบแห้งเพิ่มมากขึ้นกว่าเทคนิคฟลูอิดไดซ์เบดทั่วไป ทำให้เพิ่มค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน ช่วยให้การอบแห้งใช้เวลาลดลง 43%



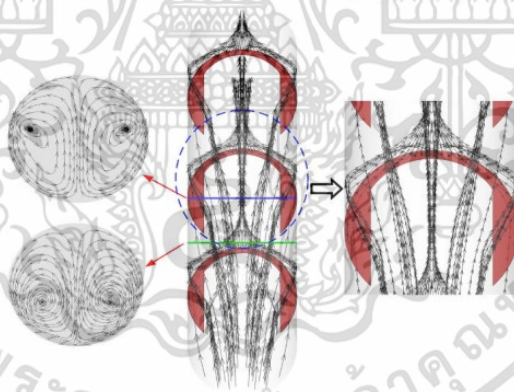
รูปที่ 2.5 เทคนิคที่ใช้แบบผิวของสี่เหลี่ยมทรงกระบอกที่มีผิวฉล้นอยู่ภายใน

ที่มา : Promvong, P. et al., (2011)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Guzzo Silva, B. et al., (2017) ทำการหาคุณภาพของเมล็ดพริกไทยสีชมพู ด้วยการทำแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบถาด ที่อุณหภูมิของอากาศอยู่ในช่วง 35-75 °C และความเร็ว 0.3-0.9 m/s โดยทำการทดสอบหาความชื้นแลพคุณสมบัติทางกายภาพของสี ด้วยระบบสี CIELAB และทำการสกัดน้ำมันหอมระเหยจากผลสดและผลแห้ง ด้วยวิธีการกลั่นด้วยไอน้ำ (hydrodistillation) และวิเคราะห์โดยเทคนิคแก๊สโครมาโทกราฟี (Gas chromatography, GC) พบว่า ความเร็วของอากาศไม่มีผลอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ และเมื่อพิจารณาคุณภาพทั้งหมด พบว่าที่อุณหภูมิของอากาศอยู่ระหว่าง 40 ถึง 55 °C ให้สภาวะที่ที่เหมาะสมต่อการทำแห้ง โดยที่ไม่ทำให้สีและน้ำมันหอมระเหย ลดลงมาก

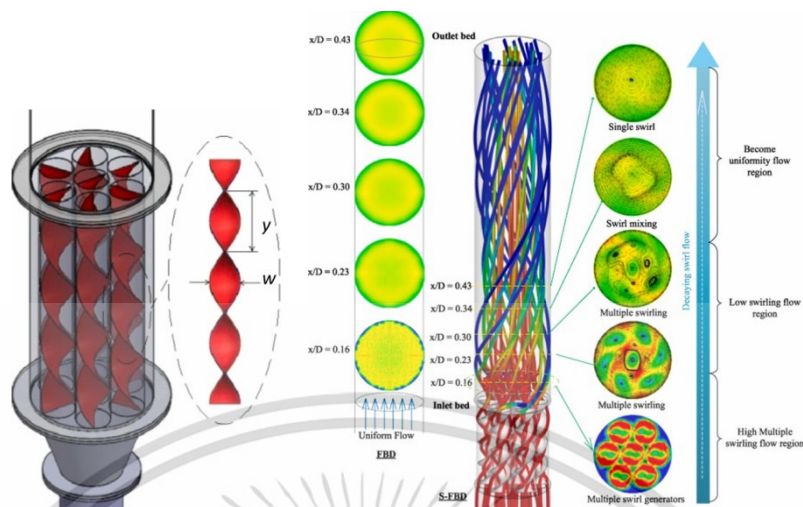
Chuwattanakul, V. et al. (2017) ศึกษาลักษณะเฉพาะของการอบแห้งพริกไทยโดยใช้เครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไคซ์เบดที่ติดตั้งแผ่นกั้นสร้างการหมุนวน (Baffle vortex generators) ดังรูปที่ 2.6 ทำการทดสอบที่ความเร็วของอากาศ เท่ากับ  $1.2U_{mf}$ ,  $1.4U_{mf}$  และ  $1.6U_{mf}$  ที่อุณหภูมิ 70 °C พบว่า เครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไคซ์เบดที่ติดตั้งแผ่นกั้นสร้างการหมุนวนที่เวลา 120 นาที มีค่าความชื้นต่ำกว่าแบบเครื่องอบแห้งฟลูอิดไคซ์เบดแบบทั่วไปถึง 10%db (ฐานแห้ง) เนื่องจากแผ่นกั้นสร้างการหมุนวน เกิดการทำให้ของไหลมีกระแสนวนตามแนวยาวซึ่งช่วยให้ เกิดอัตราการผสมระหว่างของไหล ความร้อน และการถ่ายโอนมวลได้มากขึ้น



รูปที่ 2.6 เครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไคซ์เบดที่ติดตั้งแผ่นกั้นสร้างการหมุนวน

ที่มา : Chuwattanakul, V. et al. (2017)

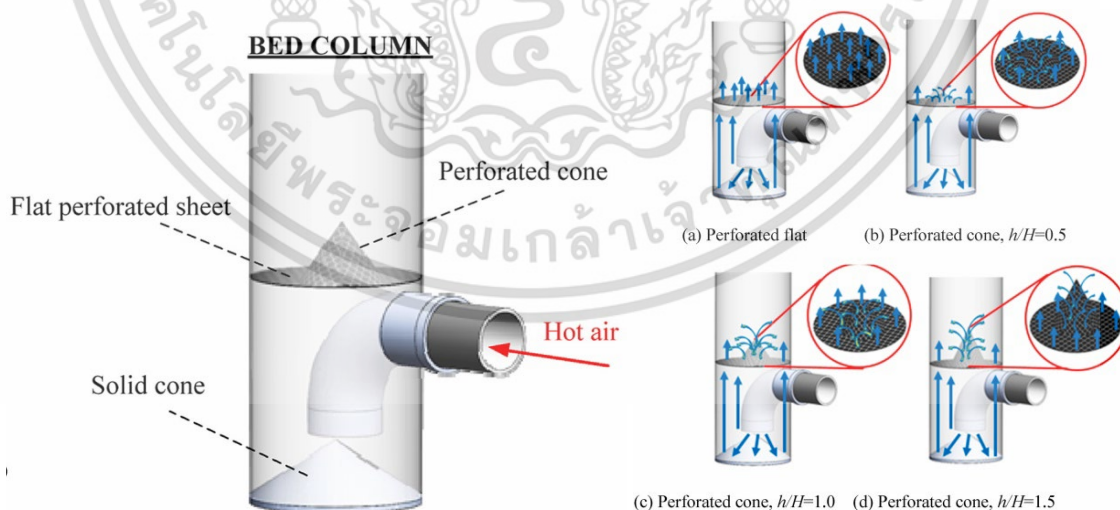
Chuwattanakul and Eiamsa-ard. (2019) ออบแบบเครื่องอบแห้งฟลูอิดไคซ์แบบโดยการใส่ชุดแผ่นบิดเกลียวเพื่อสร้างการแบบหมุนวนตามแนวแกน ดังรูปที่ 2.7 ทำการอบแห้งเมล็ดพริกไทยด้วยอุณหภูมิ 70 °C พบว่า ที่ความเร็วจำเพาะของอากาศ เท่ากับ  $1.2U_{mf}$  เครื่องอบแห้งฟลูอิดไคซ์เบดแบบใส่ชุดแผ่นบิดเกลียว มีค่าความชื้นต่ำกว่า เครื่องอบแห้งฟลูอิดไคซ์เบดแบบทั่วไปประมาณ 125 %db (ฐานแห้ง)



รูปที่ 2.7 เครื่องอบแห้งฟลูอิดไชน์เบดโดยการใส่ชุดแผ่นบิดเกลียว

ที่มา : Chuwattanakul and Eiamsa-ard. (2019)

Chuwattanakul, V. et al., (2022) ได้ทำการศึกษเครื่องจ่ายอากาศทรงกรวยต่อการอบแห้งพริกไทยในเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไชน์เบด มีการติดตั้งแผ่นกรวยสองชั้น ชั้นแรกเป็นกรวยที่บอยู่ใต้ท่ออากาศ ชั้นที่สองเป็นกรวยโลหะเจาะรูวางบนแผ่นเจาะรูเรียบ ดังรูปที่ 2.8 ทำการทดลองโดยจัดวางกรวยโลหะที่เจาะรูมีอัตราส่วนต่างกัน ( $h/H$ ) เท่ากับ 0.5, 1.0 และ 1.5 และความเร็วลม เท่ากับ  $1.2U_{mf}$ ,  $1.6U_{mf}$  และ  $2.0 U_{mf}$  พบว่าที่ ระยะ  $h/H = 1.0$  และความเร็วลม  $2.0U_{mf}$  แสดงประสิทธิภาพการทำให้แห้งที่ดีที่สุด



รูปที่ 2.8 เครื่องจ่ายอากาศทรงกรวยต่อการอบแห้ง

ที่มา : Chuwattanakul, V. et al., (2022)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Fatihah Mohd Roslan, N. et al. (2022) ทำการอบแห้งเมล็ดพริกไทยด้วยเครื่องอบแห้งฟลูอิดซ์แบบหมุนวน (Swirling fluidized bed dryer) โดยทำการออกแบบแผ่นกระจายลมให้เกิดการไหลแบบหมุนวน ดังรูปที่ 2.9 เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการอบแห้ง โดยใช้มุมเอียงสองมุมของตัวกระจายลมได้แก่ 45 และ 67 องศา และตัวกระจายลมแบบแผ่นเจาะรูหนึ่งตัว ทำการทดลองที่อุณหภูมิ 47°C -59°C พบว่าแผ่นกระจายลมที่ 45 องศา เวลาในการอบแห้ง น้อยที่สุด ลองลงมาจะเป็น 67 องศา และแผ่นกระจายลมที่เจาะรู ตามลำดับ



(ก) แบบเจาะรู (ข) แบบทำมุม 45 องศา (ค) แบบทำมุม 67 องศา

### ดังรูปที่ 2.9 แผ่นกระจายลม

ที่มา : Fatihah Mohd Roslan, N. et al. (2022)

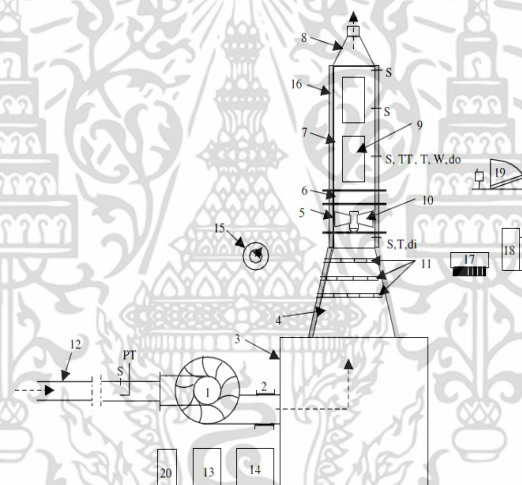
## 2.5 งานวิจัยทำแห้งด้วยเครื่องฟลูอิดซ์เบด

วิวัฒน์ วุฒิวิวัฒน์ชัย, (2540) ได้ทำการศึกษาแนวทางที่เหมาะสมสำหรับการอบแห้งถั่วเหลืองโดยเทคนิคฟลูอิดเซชัน โดยทำการทดลองถั่วเหลืองในเครื่องอบแห้งฟลูอิดซ์เบดแบบวงวัดที่อุณหภูมิอากาศก่อนเข้าห้องอบแห้ง 110-140 °C ความชื้นเริ่มต้นร้อยละ 24.7-33.3 %db ความสูงเบด 10-15 cm. และความเร็วของอากาศอบแห้ง 2.4-4.1 m/s จากการทดลองพบว่าตัวแปรที่มีผลต่ออัตราการอบแห้งได้แก่ อุณหภูมิอากาศก่อนเข้าห้องอบแห้ง อัตราการไหลจำเพาะของอากาศ และยังพบว่า page's model มีความเหมาะสมมากที่สุดที่จะใช้อธิบายผลการทดลองร้อยละของการร้าวและร้อยละของการแตกเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิอบแห้ง

หนูทอง และ อั้งกิมบัวน. (2557) ได้ทำการศึกษาจลนพลศาสตร์การอบแห้งพริกไทยแบบจำลองการอบแห้งชั้นบางที่เหมาะสมสำหรับทำนายจลนพลศาสตร์การอบแห้งและสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้น ประสิทธิภาพของพริกไทยที่อบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่อุณหภูมิ 120, 140 และ 160°C โดยทำการอบแห้งพริกไทยจากความชื้นเริ่มต้นประมาณ 410%db จนเหลือความชื้นสุดท้ายประมาณ 17% db และ

จากข้อมูลการทดลองใช้แบบจำลองการอบแห้งจำนวน 7 แบบจำลอง ได้แก่ แบบจำลอง Newton, Page, Henderson and Pabis, Logarithm, Two-term, Approximation of Diffusion, และแบบจำลอง Midilli (Midilli and Kucuk. 2003) เพื่อหาแบบจำลองการอบแห้งที่เหมาะสมสำหรับการอบแห้งพริกไทยด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง

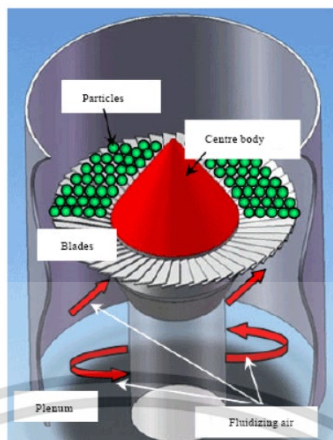
Özbey and Söylemez. (2005). ได้ทำการศึกษาการอบแห้งแบบเป็นช่วง (Batch) สำหรับการอบแห้งเมล็ดข้าวสาลี (Wheat grains) ด้วยวิธีฟลูอิดไคซ์เบตโดยให้การไหลของตัวกลางในการอบแห้งเป็นแบบหมุนควงซึ่งพบว่าอิทธิพลของการหมุนแบบหมุนควงสำคัญ ดังรูปที่ 2.10 ற்பค่าสมรรถนะในการอบแห้งทำให้อัตราการอบแห้งมีค่าเพิ่มขึ้นโดยค่าในการหมุนควงอยู่ในช่วง 0.2-0.85 การดูดซับความชื้นมีค่าเพิ่มมากขึ้น 5-25% ค่าสมรรถนะในการอบแห้งเพิ่มขึ้น 38% เมื่อเปรียบเทียบกับการอบแห้งที่ไม่ได้ใช้เทคนิคการหมุนควงเข้ามาช่วยในการอบแห้ง ค่าสมรรถนะการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนที่มากที่สุดมีค่าเท่ากับ 0.85 สำหรับการอบแห้งแบบฟลูอิดไคซ์เบตที่ใช้เทคนิคการหมุนควง



ดั่งรูปที่ 2.10 เครื่องอบแห้งฟลูอิดไคซ์เบตที่ติดตั้งแผ่นกระจายลมแบบใบพัด

ที่มา : Özbey and Söylemez. (2005).

Venkiteswaran et al., (2012) ออกแบบเครื่องอบแห้งฟลูอิดไคซ์เบต โดยทำการติดตั้งแผ่นจานลมแบบกรวยที่มีใบพัดเป็นฐานหมุนได้ (Annular spiral distributor) ดังรูป 2.11 เพื่อทำการทดสอบหารูปทรงของวัสดุที่เหมาะสมต่อการอบแห้งด้วยเครื่องดังกล่าว โดยพบว่า ระหว่าง อนุภาครูปทรงแบบทรงกระบอก ทรงรี และทรงกลม พบว่าอนุภาคทรงกลมเหมาะสมที่สุด เนื่องจากใช้พลังงานน้อยที่สุดในการทำให้อนุภาคเข้าสู่สภาวะ ฟลูอิดไคซ์เซชัน



**ดั่งรูปที่ 2.11** เครื่องอบแห้งฟลูอิด์เบดที่ติดตั้งการติดตั้งแผ่นจานลมแบบกรวย

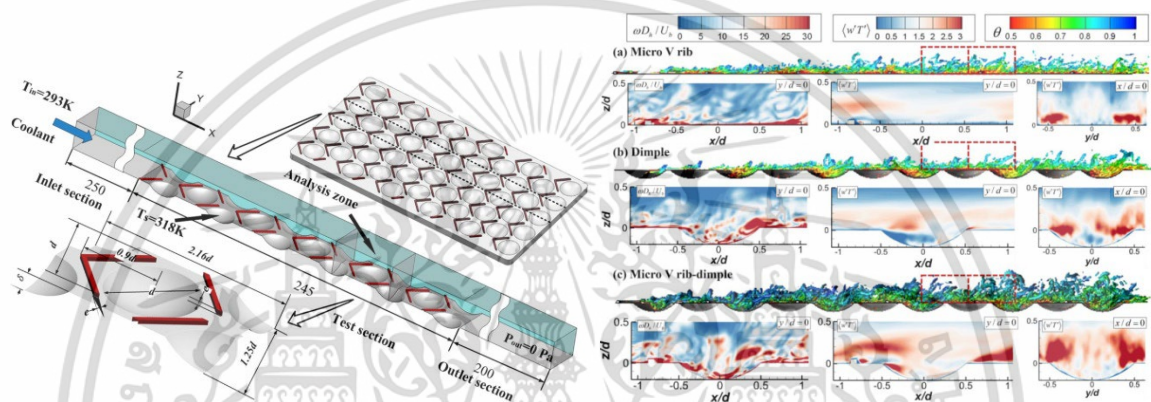
ที่มา : Özbey and Söylemez. (2005).

Ozahi and Demir. (2015) ได้ทำการศึกษาวิเคราะห์ประสิทธิภาพการอบแห้งข้าวโพดและถั่วพิสตาเซียไม่มีเปลือกด้วยวิธีฟลูอิด์เบดแบบชุดเกี่ยวกับประสิทธิภาพทั้งของพลังงานและคุณค่าของพลังงาน โดยได้ทำการออกแบบและสร้างเครื่องอบแห้งฟลูอิด์เบดแบบชุดเพื่อใช้ตรวจสอบการประสิทธิภาพกระบวนการอบแห้ง โดยกำหนดมวลของผลิตภัณฑ์ 100-300 กรัม ช่วงอุณหภูมิ 50-75 °C ความเร็วอากาศ 6.8-10.86 m/s และมีเลขเรย์โนลด์นัมเบอร์ในช่วง 47,632-75,296 เมื่อเพิ่มอุณหภูมิอากาศทำให้ต้องเพิ่มเวลาการอบแห้งตามไปด้วย ในทางกลับกันถ้าเพิ่มอุณหภูมิอากาศและความเร็วอากาศจะทำให้เวลาการอบแห้งลดลง ผลการทดลองของพลังงานความร้อนและคุณค่าทางความร้อน เปรียบเทียบกับงานคนอื่น ๆ ที่ผ่านมาทำให้ทราบว่ามีความสอดคล้องกันซึ่งผลการทดลองต่างๆขึ้นอยู่กับอัตราการไหลอากาศ มวลของอนุภาค ความชื้นของอนุภาคและอุณหภูมิแวดล้อม

Thant, P.P. et al. (2015) ศึกษาแนวทางการเพิ่มประสิทธิภาพการอบแห้งข้าวเปลือกด้วยวิธีฟลูอิด์เบดแบบห่อเอียง โดยเขาได้กำหนดค่าการเอียงของหอบดไว้สามค่าคือ 0° (เบดตั้งตรง), 15° และ 30° การทดลองได้ใช้ข้าวเปลือกมวล 0.5–2.5 kg ความเร็วอากาศเริ่มต้น 1.1 m/s และ 1.6 m/s อุณหภูมิอบแห้งที่ 50, 60 และ 65 °C การทดลองใช้หอบดปกติ (ไม่สอดใส่ชุดปั่นป่วน) และแบบสอดใส่ชุดปั่นป่วน ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าผลลัพธ์ที่ดีที่สุดในแง่ของการใช้พลังงานและอัตราการขจัดความชื้นคือเบดเอียงที่มุม 15° ด้วยการสอดใส่ชุดปั่นป่วนแบบเกลียวภายในห้องเบด ทำให้เวลาการอบแห้งลดลงและทำให้การลดการใช้พลังงานอย่างมีนัยสำคัญ

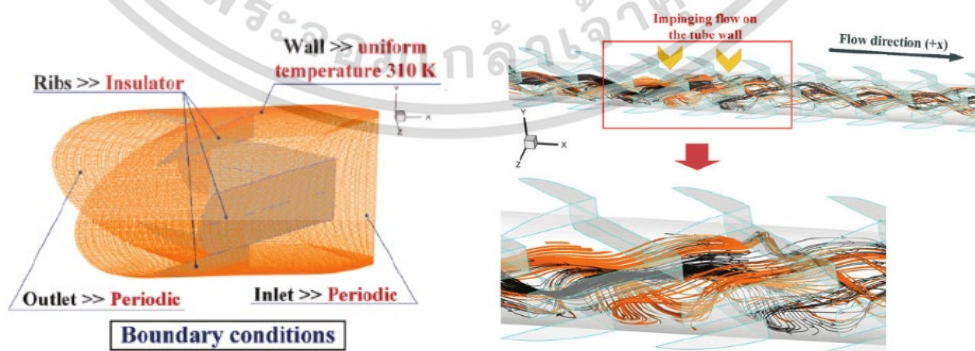


Zhang, P. et al., (2021). ศึกษาลักษณะการไหลแบบปั่นป่วนและการถ่ายเทความร้อนในช่องสี่เหลี่ยมที่มีการติดตั้งโครงสร้างภายในท่อรูปตัววีขนาดเล็ก (V-shaped ribs) หรือผิวท่อแบบเว้า และโครงสร้างแบบผสม ดังรูปที่ 2.14 ที่เลขเรย์โนลด์ (Re) เท่ากับ 50500 พบโครงสร้างแบบผสมระหว่างท่อรูปตัววีขนาดเล็กและผิวท่อแบบเว้าเกิดการผสมที่ปั่นป่วนบริเวณช่องเว้าด้านล่าง และด้านหลังกระแสน้ำของไหลที่ไหลผ่านเป็นกระแสน้ำวนตามยาวที่แรงกว่า โครงสร้างภายในท่อรูปตัววีขนาดเล็กเพียงอย่างเดียว กระบวนการนี้ช่วยเพิ่มทั้งการผสมแบบปั่นป่วนและการพาความร้อน จึงช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการถ่ายเทความร้อนให้ดียิ่งขึ้น



ดั่งรูปที่ 2.14 เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่ติดตั้งรูปตัววีขนาดเล็ก (V-shaped ribs) ผิวท่อแบบเว้า  
ที่มา : Zhang, P. et al., (2021)

Boonloi, A. and Jedsadaratanachai, W. (2023) ศึกษาการไหลของของไหลและพฤติกรรมทางความร้อนในตัวแลกเปลี่ยนความร้อนท่อกลม ที่ติดตั้งโดยชุด V-rib ดังรูป 2.15 พบพฤติกรรมการไหลของกระแสน้ำของไหลผสมกันมากขึ้น เมื่อทำการเปรียบเทียบกับท่อกลมทั่วไปพบว่าศักยภาพการถ่ายเทความร้อนสูงที่สุดถึง 19 เท่า และประสิทธิภาพเชิงความร้อนเท่ากับ 4.10



ดั่งรูปที่ 2.15 เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่ติดตั้งโดยชุด V-rib ในท่อกลม

ที่มา : Boonloi, A. and Jedsadaratanachai, W. (2023)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการทำงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการศึกษางานวิจัยแล้วพบว่าการอบแห้งเมล็ดพริกไทยดำทำให้ปริมาณของสารสำคัญอย่างฟิเพอรินสูงกว่าพริกไทยขาว ซึ่งเป็นสารบ่งชี้ถึงคุณสมบัติทางเภสัชวิทยาของพริกไทยอบแห้ง และทำการเลือกสายพันธุ์ปรางค์หรือพันธุ์จันทบุรี เนื่องจากมีขนาดเมล็ดที่ให้ เมื่ออบแห้งแล้วจะมีขนาดที่ได้มาตรฐานตามอุตสาหกรรมผลิตพริกไทยที่กำหนดไว้ และที่สำคัญเลยคือ สายพันธุ์จันทบุรีเมื่อทำการอบแห้งแล้วให้กลิ่นที่หอมเป็นเอกลักษณ์

เทคนิคฟลูอิดซ์เบดเป็นวิธีการทำแห้งเมล็ดพริกไทย เนื่องด้วยมีความเหมาะสมทางด้านคุณลักษณะของเมล็ดพริกไทยที่มีขนาดเล็ก รูปทรงกลม และเมื่อเปรียบเทียบกับเครื่องอบแห้งแบบถาดแล้วนั้น ทำให้ประหยัดเวลาทำแห้งได้มากถึง 70% ทำให้ประหยัดพลังงานในการทำแห้ง

ทั้งนี้เพื่อทำการเพิ่มประสิทธิภาพของเครื่องอบแห้งฟลูอิดซ์เบดให้มีประสิทธิภาพในการทำแห้งสูงมากขึ้น โดยภายใต้การแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างเมล็ดพริกไทยกับอากาศร้อนสูงขึ้น จึงทำการสร้างสภาวะที่เพิ่มโอกาสให้ของไหลเกิดการคลุกเคล้ากันมากขึ้น โดยทำให้เมล็ดพริกไทยเคลื่อนที่ชนกับอากาศและชนกันระหว่างตัวพริกไทยเองให้มากขึ้นเพื่อเพิ่มโมเมนตัม ส่งผลให้การส่งผ่านพลังงานเข้าไปสู่ชั้นในของพริกไทย และทำให้น้ำที่อยู่ภายในเกิดการแพร่ออกมาได้เร็วขึ้น ซึ่งนั่นเป็นการช่วยลดเวลาในการทำแห้งได้ จากการวิจัยพบว่าแนวคิดการออกแบบเครื่องอบแห้งฟลูอิดซ์เบดที่สร้างการไหลทั้งในลักษณะของแบบหมุนวน (Circulation flow) หมุนควง (Swearing flow) โดยการติดตั้งอุปกรณ์ซึ่งสร้างกระแสการไหลให้เกิดความปั่นป่วนภายในหอบแห้ง ให้ผลการอบแห้งที่ดีกว่า ชื้นงานและอุปกรณ์ทำง่าย ราคาถูก ติดตั้งง่าย เหมาะกับการบำรุงรักษา การทำความสะอาด

เนื่องด้วยการติดตั้งชุดอุปกรณ์สร้างกระแสการไหลให้เกิดความปั่นป่วนภายในหอบแห้งนั้น จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อน พบว่าการติดตั้งอุปกรณ์ลักษณะที่ทำการขัดขวางการไหลในแนวตรง ทำให้เกิดการไหลทั้งสามแนวแกน ส่งผลต่อการประสิทธิภาพการแลกเปลี่ยนความร้อน จึงสรุปได้ว่าในงานวิจัยนี้ได้ออกแบบ แผ่นกั้นที่มีลักษณะเป็นแผ่นพับเจาะรูตรงกลาง เพื่อให้สามารถมีพื้นที่การระบายของความชื้นออกไปภายนอก และมีพื้นที่เหลือในการขัดขวางกระแสของของไหลภายในหอบแห้งให้เกิดการไหลแบบหมุนวนตามแนวแกน (Vertical vortex flow) ข้อดีคือของไหลจะเกิดการผสมระหว่างเมล็ดพริกไทยและอากาศร้อนมากขึ้น และจากนั้นจะเกิดแรงเหวี่ยงออกมาจากศูนย์กลาง ซึ่งช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อน

ทั้งนี้การที่มีการติดตั้งชุดแผ่นสร้างความปั่นป่วน จึงยังคงต้องศึกษาถึงเงื่อนไขความสัมพันธ์ที่เหมาะสมระหว่าง อุณหภูมิ ความร้อน ความเร็ว และความเข้มข้นของกระแสการไหลการปั่นป่วน อันส่งผลต่ออัตราการอบแห้งและลักษณะทางกายภาพและคุณสมบัติภายในของผลิตภัณฑ์

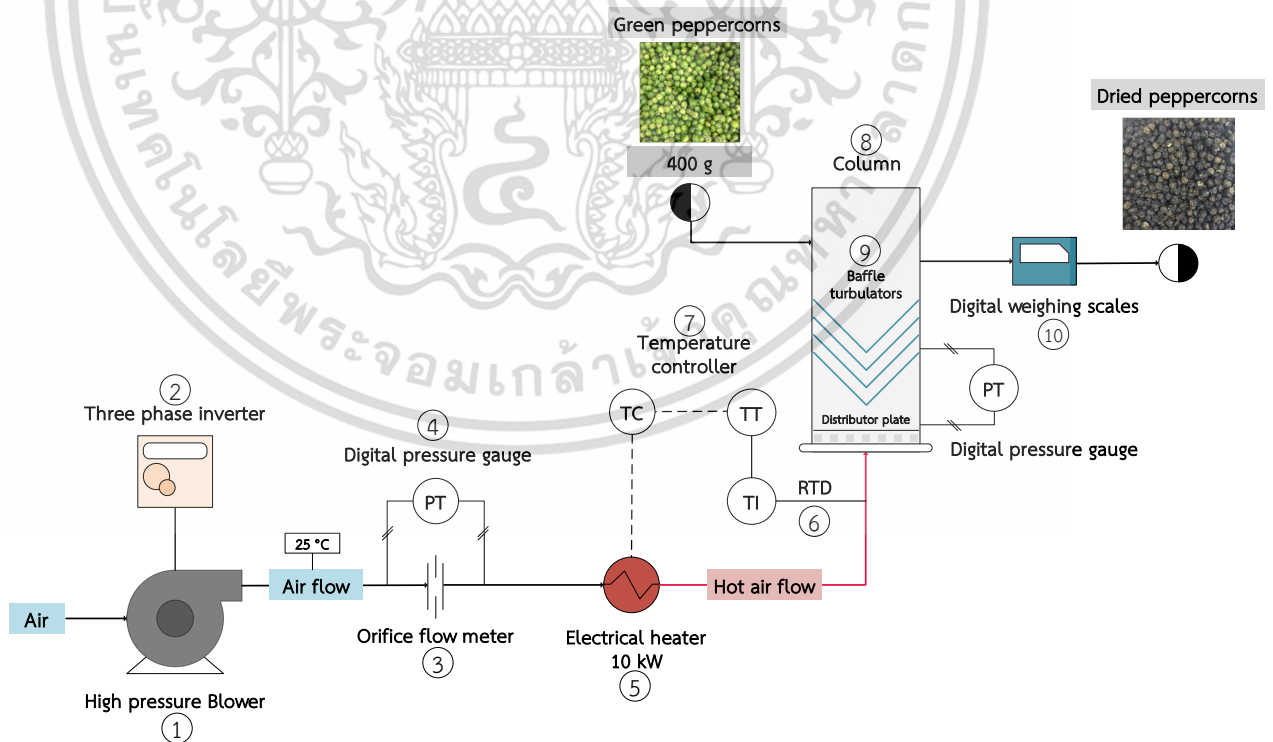
# บทที่ 3

## วิธีการดำเนินงานวิจัย

### 3.1 เครื่องมือ อุปกรณ์ และวัสดุ

#### 3.1.1 เครื่องมือ และอุปกรณ์เครื่องอบแห้งฟลูอิดซ์เบด ประกอบไปด้วย

1. High pressure blower
2. ชุดควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์โบว์เวอร์ (Inverter)
3. เครื่องวัดอัตราการไหลของอากาศ (orifice flow meter)
4. เครื่องวัดความแตกต่างของความดัน (Digital pressure gauge)
5. เครื่องให้ความร้อน (Heater)
6. เครื่องวัดอุณหภูมิ (RTD)
7. ชุดควบคุมอุณหภูมิ (Temperature controller)
8. หออบแห้ง (Column)
9. ชุดแผ่นสร้างความปั่นป่วน
10. เครื่องชั่งน้ำหนักแบบดิจิตอล (Digital weighing scales)



รูปที่ 3.1 อุปกรณ์การทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

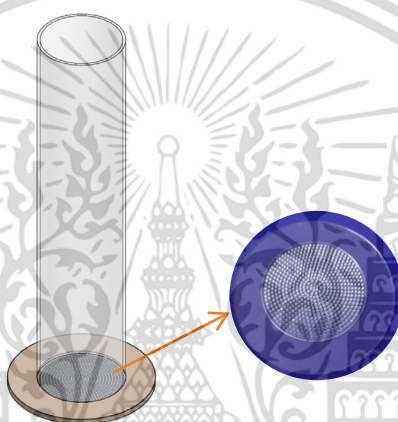
### 3.1.2 วัสดุคืบ

เมล็ดพริกไทยสด สายพันธ์จันทบุรี ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4.5-5.5 mm. มีความชื้นเริ่มต้น (MC<sub>i</sub>) อยู่ในช่วง 400±15% (ฐานแห้ง)

## 3.2 ชุดหอบแห้ง

### 3.2.1 หอบแห้งแบบทั่วไป

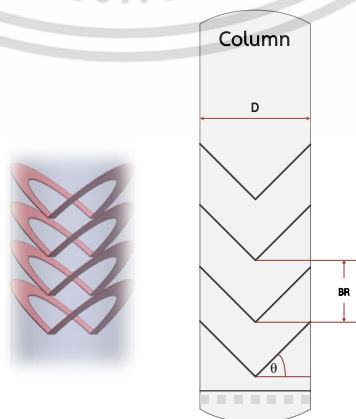
มีลักษณะเป็นท่อเปล่าทรงกระบอกวัสดุทำจากอะคริลิกใส ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 140 mm. หนา 1 mm. และสูง 1000 mm. ภายใต้ออบแห้งมีแผ่นกระจายลม เพื่อกระจายทิศทางของอากาศให้เข้าสู่หอบแห้งได้อย่างสม่ำเสมอ ดังรูป 3.2



รูปที่ 3.2 หอบแห้งแบบทั่วไป

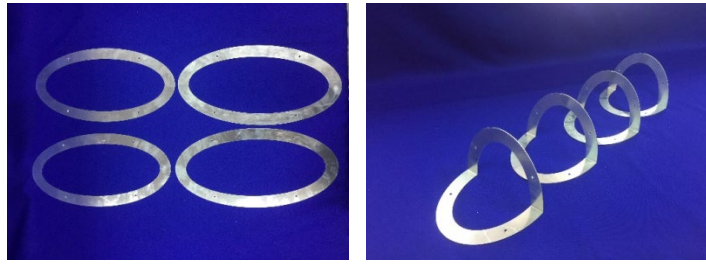
### 3.2.2 หอบแห้งที่ติดตั้งแผ่นกั้นสร้างความปั่นป่วน

อุปกรณ์แผ่นสร้างความปั่นป่วนประกอบไปด้วยแผ่นกั้นที่จัดเรียงแบบขนานทำมุม ( $\theta = 30^\circ, 45^\circ$  และ  $60^\circ$ ) จำนวน 4 แผ่นต่อชุด วัสดุทำจากแผ่นอลูมิเนียมขึ้นหนา 0.5 mm. เจาะรู กว้าง 20 mm. ถูกลำมาพับที่มุม  $30^\circ, 45^\circ$  และ  $60^\circ$  จัดวางเรียงกันเป็นระยะห่าง 0.3, 0.5 และ 0.7 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางหอบแห้ง (BR= 0.3D, 0.5D และ 0.7D) ดังรูปที่ 3.3-3.7

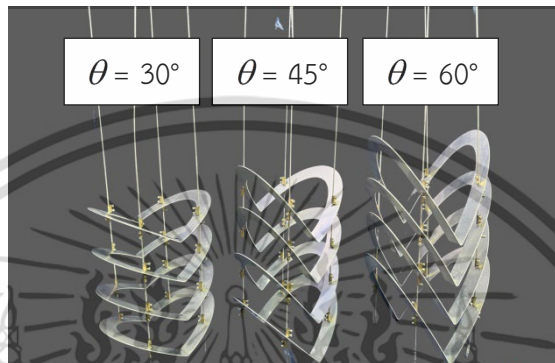


รูปที่ 3.3 หอบแห้งติดตั้งแผ่นกั้นสร้างความปั่นป่วน

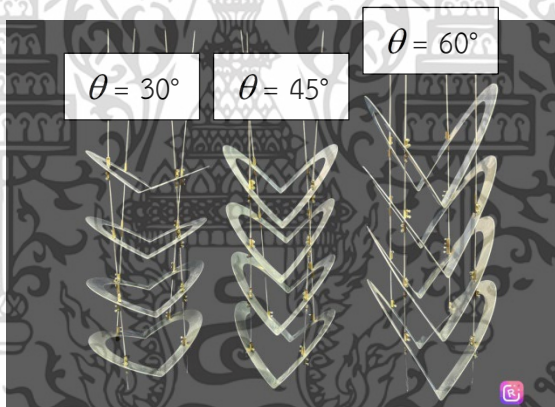
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ภายในเพื่อการศึกษาเท่านั้น มิได้อนุญาตให้ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



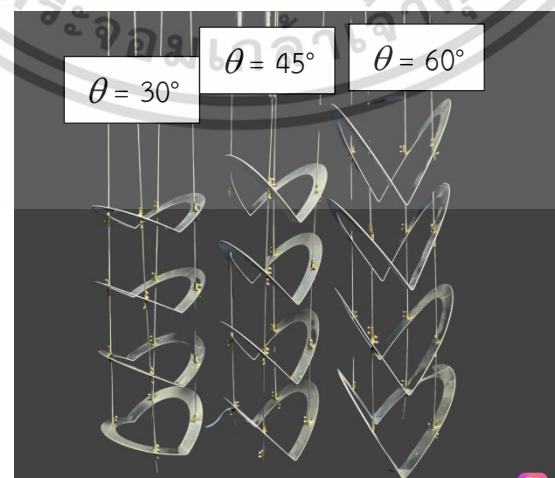
รูปที่ 3.4 แผ่นพับอลูมิเนียม



รูปที่ 3.5 อุปกรณ์แผ่นสร้างความปั่นป่วนระยะพิชต์การจัดเรียง (BR) เท่ากับ 0.3D



รูปที่ 3.6 อุปกรณ์แผ่นสร้างความปั่นป่วนระยะพิชต์การจัดเรียง (BR) เท่ากับ 0.5D



รูปที่ 3.7 อุปกรณ์แผ่นสร้างความปั่นป่วนระยะพิชต์การจัดเรียง (BR) เท่ากับ 0.7D

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3 วิธีการทดลอง

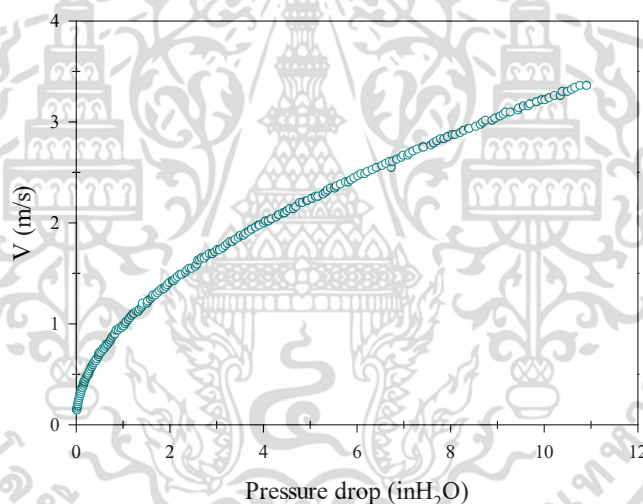
#### 3.3.1 การสอบเทียบออริฟิก

ทำการสอบเทียบออริฟิกโดยการวัดความแตกต่างของความดันระหว่างทางเข้าและทางออกของออริฟิกด้วยเครื่องวัดความดันตกคร่อมแบบดิจิตอล และเครื่องวัดความเร็วลมเพื่อวัดความเร็วของอากาศ มีขั้นตอนการสอบเทียบดังนี้

- เปิดโบลเวอร์พร้อมปรับความเร็วรอบของมอเตอร์ครั้งละ 0.1 Hz
- วัดความเร็วลมของอากาศ (V) และความดันตกคร่อม (Pressure drop) ออริฟิก ( $\Delta P$ )
- นำชุดข้อมูลมาสร้างความสัมพันธ์ระหว่างความเร็ว (V) กับความดันตกคร่อม ( $\Delta P$ ) โดยใช้

ฟังก์ชันสมการโพลิโนเมียลอันดับ 6 (Polynomials order 6) แสดงในรูปที่ 3.8 ซึ่งเหมาะสมที่สุดในการทำนาย จากผลพบว่ามีค่า  $R^2$  สูงที่สุดเท่ากับ 0.9995 ดังแสดงในสมการที่ 3.1

$$V \text{ (m/s)} = -3 \times 10^{-05} \Delta P^6 + 0.0011 \Delta P^5 - 0.0156 \Delta P^4 + 0.1099 \Delta P^3 - 0.4201 \Delta P^2 + 1.1125 \Delta P + 0.2054 \quad (3.1)$$



รูปที่ 3.8 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็ว (V) กับความดันตกคร่อม ( $\Delta P$ ) ในการสอบเทียบออริฟิก

#### 3.3.2 การหาค่าความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดเซชัน ( $U_{mf}$ )

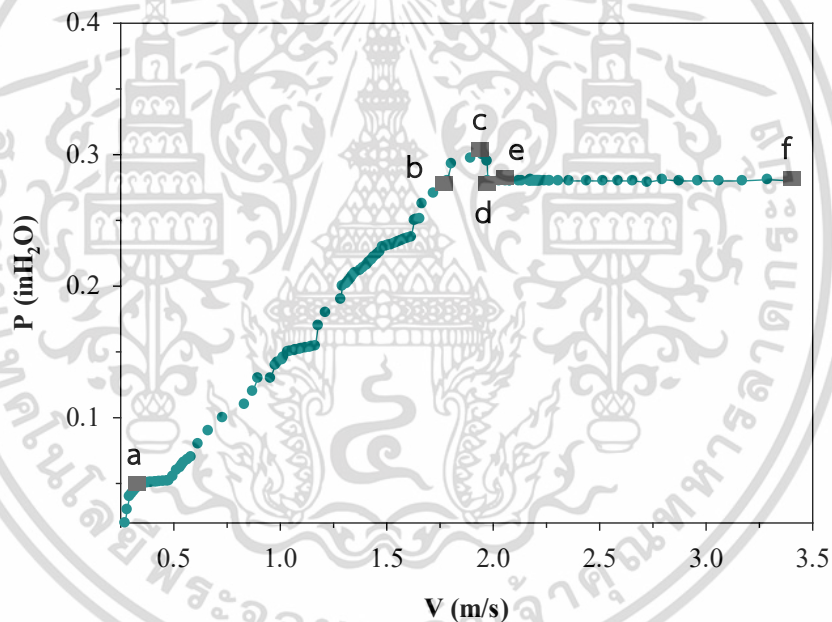
ความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดเซชัน (Minimum velocity of fluidization,  $U_{mf}$ ) มีขั้นตอนการหาดังนี้

- ใส่เมล็ดพริกไทยน้ำหนัก 400 g ในหอบแห้ง
- เปิดโบลเวอร์พร้อมปรับความเร็วรอบของมอเตอร์ไปที่ความเร็วรอบต่ำด้วยอินเวอร์เตอร์ เพื่อให้ความเร็วของอากาศที่จะเข้าสู่หอบแห้งต่ำที่สุด
- วัดความเร็วของอากาศเข้าสู่หอบแห้ง (V)
- วัดความแตกต่างของความดันที่ตำแหน่งใต้แผ่นกระจายลมและเหนือวัตถุภายในหอบแห้ง

ด้วยเครื่องวัดความดันตกคร่อมแบบดิจิตอล ( $\Delta P$ )

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ทำซ้ำโดยการเพิ่มความเร็วยานรอบมอเตอร์ครึ่งละ 0.1 Hz เพื่อให้ได้ค่าความเร็วของอากาศทางเข้าละเอียดที่สุด
- นำผลมาวิเคราะห์ ระหว่างความแตกต่างของความดัน ( $\Delta P$ ) และความเร็วของอากาศ (V) ทางเข้าในหอบแห้ง
- เมื่อพิจารณาจากรูปที่ 3.9 จะพบว่าเมื่อความเร็วของอากาศเพิ่มขึ้นจะทำให้ความแตกต่างของความดันเพิ่มมากขึ้นตามเส้น ab จนกระทั่งที่จุด b จะพบว่าความเร็วมีค่าใกล้เคียงกับความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดไอเซชัน อนุภาคของของแข็งจะเกิดการขยับตัว แล้วในขณะที่ทำการเพิ่มความเร็วยานของอากาศ อนุภาคของแข็งจะเคลื่อนที่และถูกจัดเรียงให้เป็นระเบียบจึงส่งผลให้เกิดความดันคร่อมเบตนั้นมีค่ามากที่สุดตามเส้น bc เมื่ออนุภาคจัดเรียงตัวเป็นระเบียบแล้วส่งผลให้ความดันคร่อมเบตลดลงมาอยู่ที่จุด d จากนั้นเพิ่มความเร็วของอากาศพบว่าความดันคร่อมเบตสูงขึ้นถึงจุด e และคงที่ ef โดยจะพบว่าความเร็วต่ำสุดที่ทำให้ความดันคร่อมเบตคงที่คือจุด e ซึ่งเป็นความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดไอเซชัน มีค่าเท่ากับ 2.17 m/s



รูปที่ 3.9 ความสัมพันธ์ระหว่างความแตกต่างของความดันและความเร็วของอากาศทางเข้าหอบแห้ง

### 3.2.3 ความเร็วจำเพาะของอากาศ ( $U^*$ )

ความเร็วที่ใช้ในการอบแห้ง ( $U^* = U(U_{mf})$ ) มี 3 ระดับ ได้แก่

1.2 $U_{mf}$  เท่ากับ 2.60 m/s

1.4 $U_{mf}$  เท่ากับ 3.04 m/s

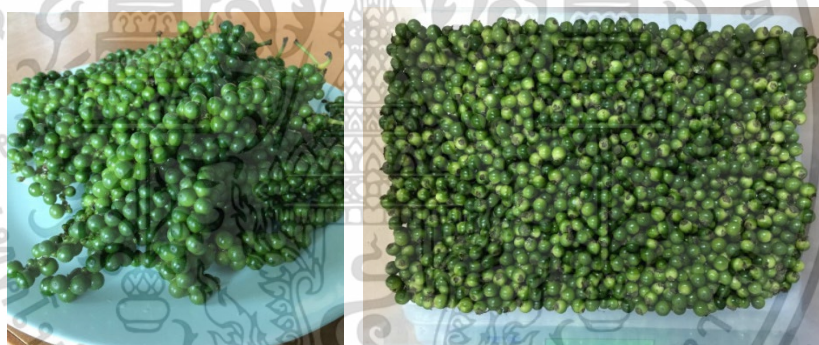
1.6 $U_{mf}$  เท่ากับ 3.47 m/s

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

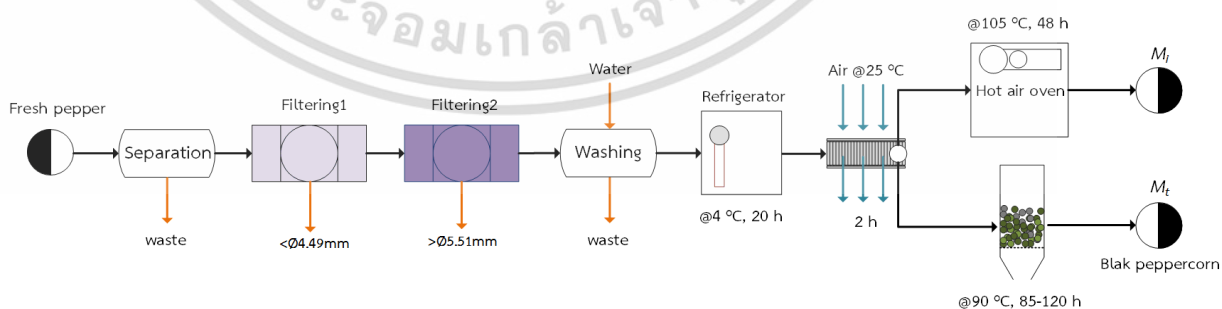
### 3.3.3 การเตรียมวัตถุดิบ

สำหรับผลิตภัณฑ์ที่ใช้ในการทดลองเป็นเมล็ดพริกไทยสด ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4.5-5.5 mm. ในการทดลองนั้นจะนำเมล็ดพริกไทยสดที่ติดกันเป็นพวง มาคัดแยกออกให้เหลือเฉพาะเมล็ดเท่านั้น ดังรูปที่ 3.10 จากนั้นก็นำมาทดลองหาค่าความชื้นเริ่มต้นก่อนทำการทดลอง โดยแสดงขั้นตอนดังรูปที่ 3.11 คือ

- ทำการแยกเมล็ดกับก้านพริกไทยออก
- นำเมล็ดไปร่อนผ่านตะแกรงกรองที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่น้อยกว่า 4.49 mm.
- นำเมล็ดไปร่อนผ่านตะแกรงกรองที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่มากกว่า 5.51 mm.
- ทำการล้างด้วยน้ำสะอาด 1 ครั้ง จากนั้นพักให้สะเด็ดน้ำที่อุณหภูมิห้อง
- นำไปแช่ตู้แช่เย็นที่อุณหภูมิ 4 °C เป็นเวลา 20 ชม. โดยมีการห่ออะลูมิเนียมฟอยล์ (Aluminum foil) ก่อนเข้าแช่เย็น
- นำพริกไทยออกจากตู้แช่เย็นแล้วมาพักไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 2 ชม.
- ก่อนที่จะทำการทดลองนำพริกไทยส่วนหนึ่งไปประมาณ 100 กรัม ไปค่าความชื้นเริ่มต้น
- และการทดลองการอบแห้งด้วยพริกไทยจำนวน 400 กรัม ต่อการทดลอง



รูปที่ 3.10 เมล็ดพริกไทยสด



รูปที่ 3.11 กระบวนการเตรียมวัตถุดิบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3.4 การหาความชื้นเริ่มต้น (MC<sub>i</sub>) (Moisture content, AOAC, 2005)

- นำถั่วเยอะลูมิเนียม มาอบไล่ความชื้นในตู้อบลมร้อน (Hot air oven) ที่อุณหภูมิ 105 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง
- จากนั้นนำถั่วเยอะลูมิเนียมชั่งน้ำหนักด้วยเครื่องชั่งน้ำหนักทศนิยมสี่ตำแหน่ง
- ชั่งเมล็ดพริกไทยจำนวน 20 กรัม และ 30 กรัม แล้วใส่ในถั่วเยอะลูมิเนียม อย่างละ 2 ถ้วย
- นำเมล็ดพริกไทยทั้ง 4 ถ้วย ไปใส่ในตู้อบลมร้อน ที่อุณหภูมิ 105 °C เป็นเวลา 48 ชั่วโมง
- นำเมล็ดพริกไทยทั้ง 4 ถ้วยออกจากตู้อบลมร้อนและใส่ในเดซิเคเตอร์เป็นเวลา 30 นาที
- นำไปชั่งน้ำหนักด้วยเครื่องชั่งน้ำหนักทศนิยมสี่ตำแหน่ง แล้วก็คำนวณหาความชื้นจากสมการที่ 3.2 ความชื้นฐานแห้งซึ่งนิยมใช้ในการวิเคราะห์กระบวนการอบแห้งทางทฤษฎีเพราะมวลแห้งจะมีค่าคงที่ตลอดการอบแห้ง

$$MC_i = \frac{w-d}{d} \times 100 \quad (3.2)$$

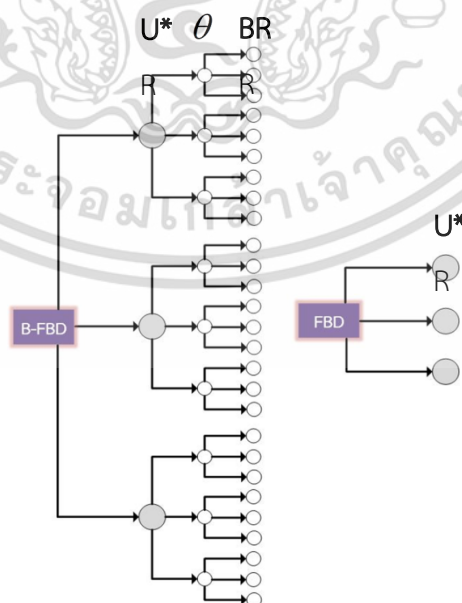
MC<sub>i</sub> คือ ความชื้นเริ่มต้นฐานแห้ง หน่วย ร้อยละฐานแห้ง (%db)

w คือ น้ำหนักเปียก หนอย กรัม

d คือ น้ำหนักแห้ง หนอย กรัม

### 3.3.5 การทดลองการอบแห้งเมล็ดพริกไทย

- ทำการทดลองแบบ Full factorial experiments โดยการสุ่มเลือกการทดลองแบบอิสระ (Randomization) ดังรูปที่ 3.12



รูปที่ 3.12 จำนวนการทดลองทั้งหมด 30 การทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ทำการเปิดโบลเวอร์ให้อากาศไหลเข้าสู่ระบบ พร้อมปรับอินเวอร์เตอร์เพื่อให้ได้ความเร็ว (U\*) ของอากาศเข้าตามที่ต้องการ
- เปิดเครื่องทำความร้อนและตั้งอุณหภูมิในการทดสอบที่ 90 °C
- เมื่ออุณหภูมิของอากาศถึง 90 °C ใช้เวลาประมาณ 10-15 นาที ในการไล่ความชื้นออกจากระบบ
- วัดค่าความชื้นสัมพัทธ์ ด้วยเครื่องไฮโครมิเตอร์ อยู่ในช่วง 59-63 %RH
- ชั่งน้ำหนักของชุดหอบแห้งเปล่า (สำหรับเครื่องอบแห้งฟลูอิดซ์เบดแบบทั่วไป) ด้วยเครื่องชั่งน้ำหนักดิจิตอลที่มีค่าความละเอียด 0.05 กรัม
- ใส่เมล็ดพริกไทยลงในหอบแห้งจำนวน 400 กรัมต่อการทดสอบ
- ทำการอบแห้งเป็นเวลา 120 นาที
- โดยมีการเก็บข้อมูลทุกๆ 5 นาที จากการนำหอบแห้งออกมาชั่งน้ำหนัก
- ข้อมูลที่ได้จะเป็นน้ำหนักของเมล็ดพริกไทยที่เวลาต่าง สามารถหาได้จาก ผลต่างชั่งน้ำหนักหอบแห้งที่มีเมล็ดพริกไทยกับหอบแห้งเปล่า ที่ทำชั่งไว้ก่อนหน้านี้
- เก็บตัวอย่างจากการทดลองโดยใส่ถุงซิปลใส่อาหาร Food grade ขนาดกว้าง 13 cm. สูง 20 cm. บรรจุลงถุงทันที ปิดปากถุงโดยการใส่อากาศออกให้ได้มากที่สุด
- เมื่อครบเวลาการทำแห้งแล้วให้ทำการปิดเครื่องทำความร้อน และปล่อยให้อากาศพาความร้อนจากเครื่องทำความร้อน จนมีอุณหภูมิของอากาศต่ำลงถึง 40 °C จึงทำการปิดโบลเวอร์
- ทำการทดลองใส่ชุดอุปกรณ์แผ่นสร้างความปั่นป่วน (สำหรับเครื่องอบแห้งฟลูอิดซ์เบดติดตั้งแผ่นสร้างความปั่นป่วน) ทำการปรับ มุม ( $\theta$ ) และระยะพิชต์การจัดเรียง (BR) และทำการทดลองซ้ำอีก 3 ครั้ง
- นำชั่งน้ำหนักของเมล็ดพริกไทยที่ได้ในเวลาต่างๆ ไปหาความชื้นฐานแห้ง
- และนำเมล็ดพริกไทยที่ได้จากการทำแห้งแล้วที่เวลา 120 นาที ไปทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพ ได้แก่ ค่าสี ค่าเนื้อสัมผัส และค่าแอดิเวตของน้ำ ต่อไป

### 3.3.6 การหาความชื้นฐานแห้ง (MC<sub>d</sub>)

- จากสมการ 3.2 การหาค่าขึ้นเริ่มต้น (MC<sub>i</sub>) แทนค่า w = 400 กรัม คำนวณหาค่า d
- แทนค่า d ที่คงที่ ด้วยค่าน้ำหนักเปียก (w) ที่เวลาใดๆ ในสมการที่ 3.3 จะได้ค่าความชื้นฐานแห้ง (MC<sub>d</sub>) ที่เวลานั้นๆ

$$MC_d = \frac{w-d}{d} \times 100 \quad (3.3)$$

MC<sub>d</sub> คือ ความชื้นฐานแห้ง หน่วย ร้อยละฐานแห้ง (%db)

w คือ น้ำหนักเปียก หน่วย กรัม

d คือ น้ำหนักแห้ง หน่วย กรัม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.4 การหาอัตราการทำให้แห้ง

ในการอบแห้งวัสดุหรือผลผลิตต่างๆ ปริมาณที่สำคัญที่สุดที่จะต้องคำนึงถึงคือความชื้นของวัสดุหลังผ่านการอบแห้งแล้วความชื้นของวัสดุอบแห้งเป็นตัวบอกลถึงปริมาณของน้ำที่มีอยู่ในวัสดุเมื่อเทียบกับมวลของวัสดุขึ้นหรือวัสดุแห้ง การบอกค่าอัตราความชื้นทำให้การเปรียบเทียบข้อมูลทั้งในงานวิจัยของตนเองและของผู้อื่นเห็นได้ชัดเจนขึ้น (Yilbas, B.S. et al., (2003) ; Özdemir, M. and Devres, Y. O. (1999) )

#### 3.4.1 อัตราส่วนความชื้น (Moisture ratio)

คือ อัตราส่วนความชื้นที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาการอบแห้ง สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 3.4

$$MR = \frac{MC_t - MC_{eq}}{MC_i - MC_{eq}} \quad (3.4)$$

MR คือ อัตราส่วนความชื้น (-)

$MC_t$  คือ ความชื้นที่เวลาใด หน่วย ร้อยละฐานแห้ง (%db)

$MC_i$  คือ ความชื้นเริ่มต้น หน่วย ร้อยละฐานแห้ง (%db)

$MC_{eq}$  คือ ความชื้นสมดุล หน่วย ร้อยละฐานแห้ง (%db)

ความชื้นสมดุล (Equilibrium moisture content,  $M_{eq}$ )

ความชื้นสมดุล คือ ความชื้นของวัสดุในขณะที่มีความดันไอน้ำภายในวัสดุสมดุลกับความดันไอน้ำของอากาศแวดล้อมวัสดุนั้น โดยความชื้นสมดุลจะขึ้นอยู่กับ ชนิดของวัสดุ อุณหภูมิ และความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศแวดล้อมวัสดุ

#### 3.4.2 อัตราการอบแห้ง (Drying Rate)

คือ ความชื้นที่ออกจากวัสดุต่อช่วงเวลาการอบแห้ง สามารถบอกลถึงความเร็วในการทำแห้งของเครื่องอบแห้ง สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 3.5 (Yilbas, B.S. et al., (2003) ; Özdemir, M. and Devres, Y. O. (1999) )

$$DR = \frac{dMC}{dt} = \frac{MC_{t+\Delta t} - MC_t}{dt} \quad (3.5)$$

DR คือ อัตราการอบแห้ง หน่วย กรัม/น้ำต่อเวลา

$M_{t+\Delta t}$  คือ ความชื้นที่เวลาเปลี่ยนแปลง หน่วย ร้อยละฐานแห้ง (%db)

$M_t$  คือ ความชื้นที่เวลาใดๆ หน่วย ร้อยละฐานแห้ง (%db)

dt คือ ช่วงเวลาในการทำให้แห้ง หน่วย นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.5 การสร้างสมการสำหรับการทำนายการทดสอบการอบแห้งด้วยเครื่องฟลูอิดไดซ์เบด

การศึกษากระบวนการอบแห้ง สามารถสร้างแบบจำลองในรูปแบบสมการจลนพลศาสตร์อบแห้งกึ่งทฤษฎี (Semi-theoretical drying kinetic equation) โดยการสมมุติฐานว่าอัตราการอบแห้งภายใต้สภาวะคงที่แปรผันตรงกับความ อัตราส่วนความชื้น (Moisture ratio) ความชื้นในวัตถุดิบ ข้อสมมุติฐานดังกล่าวคล้ายกับกฎการเย็นตัวของนิวตัน สามารถเขียนสมการได้ ดังนี้

$$\frac{dMC}{dt} = -k (MC - MC_{eq}) \quad (3.6)$$

จัดรูปจะได้

$$\frac{dMC}{(MC - MC_{eq})} = -k dt \quad (3.6)$$

อินทิเกรตสมการ (3.6) โดย  $MC(0) = MC_0$  จะได้

$$\ln \left[ \frac{(MC - MC_{eq})}{(MC_0 - MC_{eq})} \right] = -k dt \quad (3.7)$$

$$MR = \left[ \frac{(MC - MC_{eq})}{(MC_0 - MC_{eq})} \right] = \exp(-k dt) \quad (3.8)$$

เมื่อ  $k$  คือ ค่าคงที่ของการอบแห้ง

ค่าคงที่เป็นคุณสมบัติเฉพาะของสมการหนึ่งๆ ซึ่งอยู่ในช่วงสภาวะการอบแห้งและวัตถุดิบที่ใช้ในการทดลองเท่านั้น

การนำข้อมูลที่ได้จากการทดลองมาสร้างแบบจำลอง สำหรับการอบแห้งเมล็ดพริกไทยที่อุณหภูมิเดียวกัน ภายใต้เงื่อนไขความชื้นสัมพัทธ์ ของความเร็วของอากาศ ( $U^*$ ) มุม แผ่นกั้นสร้างความปั่นป่วน ( $\theta$ ) และระยะพิชต์การจัดเรียง (BR) จากผู้สร้างสมการการอบแห้งไว้หลายสมการที่ได้จากการทดลอง ซึ่งเรียกว่า สมการจลนพลศาสตร์อบแห้งแอมไพริคัล (Empirical drying equation) จึงทำการเลือกสมการที่เหมาะสมสำหรับงานวิจัยครั้งนี้ ได้แก่ สมการของ 1) Page, 2) Henderson and Pabis และ 3) Logarithmic รูปแบบสมการแสดงดังตารางที่ 3.1

**ตารางที่ 3.1** แบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์ทำนายการทดลองสำหรับวัตถุดิบที่ทำแห้ง

แบบจำลอง	สมการ
Page	$MR = \exp(-kt)^n$ Zhang, Q. and Litchfield, J. B. (1991)
Henderson and Pabis	$MR = a \exp(-kt)$ Henderson, S. M. and Pabis, S. (1961)
Logarithmic	$MR = a \exp(-kt) + c$ Kassem, A. (1998)

ค่า  $k$ ,  $n$ ,  $a$  และ  $c$  เป็นค่าคงที่ของสมการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าของสมการ  $k$ ,  $n$ ,  $a$  และ  $c$  จะถูกนำมาหาความสัมพันธ์ ของความเร็วของอากาศ ( $U^*$ ) มุม แผ่นกั้นสร้างความปั่นป่วน ( $\theta$ ) และระยะพิชต์การจัดเรียง (BR) ในรูปแบบสมการเชิงเส้น

สำหรับเครื่องอบแห้งฟลูอิดซ์แบบทั่วไป (FBD)

$$a = A + BU^* + BU^{*2}$$

สำหรับเครื่องอบแห้งฟลูอิดซ์เบดที่ติดตั้งอุปกรณ์แผ่นสร้างความปั่นป่วน (B-FBD)

$$k = A + BU^* + C(BR) + D\theta^*$$

การแทนค่าในสมการ

$U^*$  มีค่าเท่ากับ 1.2, 1.4 และ 1.6

BR มีค่าเท่ากับ 0.3, 0.5 และ 0.7

$\theta^*$  มีค่าเท่ากับ 3, 2 และ 1.2 ( $\theta^* = 90^\circ/\theta$ )

ดัชนีบ่งชี้ที่แสดงถึงความสามารถของแบบจำลองที่นำมาอธิบายผลการทดลอง จลนพลศาสตร์ การเปลี่ยนแปลงความชื้นด้วยแบบข้างต้น ค่าคงที่หรือพารามิเตอร์ต่างๆ ของสมการความชื้นสมดุลใช้ เทคนิคของการวิเคราะห์แบบไม่เป็นเชิงเส้น (nonlinear regression) โดยการประเมินเปรียบเทียบ ค่าทางสถิติ ได้แก่ ค่า  $R^2$  (coefficient of determination) ที่สูงที่สุด ค่า  $\chi^2$  (reduced chi-square) และ ค่า RMSE (root mean square error) ที่ต่ำที่สุด

### 3.6 การวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพ

วิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพ ทำการเปรียบเทียบตัวอย่างเมล็ดพริกไทยดำที่ขายในท้องตลาด 3 แบรินด์ A, B และ C ว่าเมล็ดพริกไทยที่ได้จากการทดลอง มีมาตรฐานใกล้เคียงกับแบรินด์ พริกไทยตามท้องตลาดหรือไม่

#### 3.6.1 ค่าแอกติวิตีของน้ำ (Water activity, $a_w$ )

ใส่เมล็ดพริกไทยลงในภาชนะสำหรับวัดค่าแอกติวิตีของน้ำ ประมาณ 5 กรัม ลงในภาชนะด้วย เครื่อง Aquila Series 3TE

#### 3.6.2 ลักษณะเนื้อสัมผัส

ทำการทดสอบ แรงกด (compression force) เพื่อหาค่าความแข็ง (hardness) คือแรงสูงสุดที่ กดหรืออัดในแนวตรงที่ให้วัสดุเปลี่ยนรูปร่าง (deformation) ทดสอบหาแรงกดอัด (Compression test) ใช้เครื่อง Texture analyzer TA-XT2i หัวทรงกระบอก เส้นผ่านศูนย์กลาง 50 mm, ทดสอบ การกด (Compression test) โดยกด 50% strain ที่ความเร็ว 0.5 mm/s

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยความสูงของกราฟคือ แรงกดที่กระทำในแต่ละครั้ง ซึ่งจะแสดงค่าความแข็งของตัวอย่าง (Hardness) นอกจากนี้กราฟที่ได้ยังแสดงถึงแรงกดที่ กระทำครั้งแรกซึ่งทำให้เกิดการแตกหักหรือ เสียรูปของ ชิ้นงาน (Fracturability) (Jakubczyk, E. et al., 2017)

### 3.6.3 ค่าสี

วิเคราะห์ความแตกต่างของสีจากระบบ (CIE  $L^*a^*b^*$ ) ด้วยเครื่อง Hunter lab ดูค่า  $L^*$  ที่แตกต่างกันเนื่องจากเมล็ดพริกไทยมีสีน้ำตาลเข้มถึงดำ จะมีค่า  $L^*$  ต่างกันมากที่สุด



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

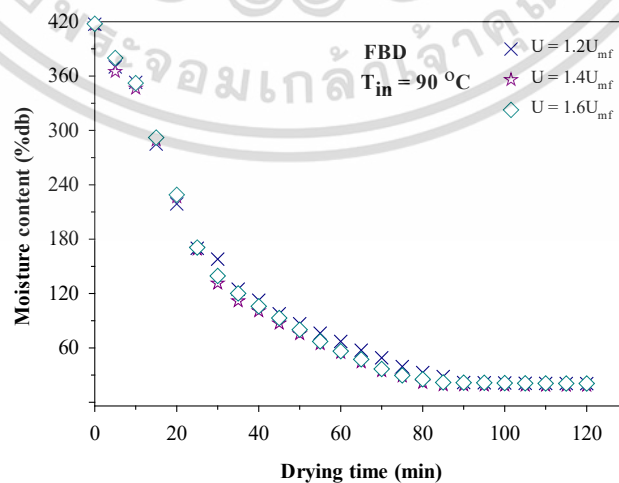
### ผลการทดลองและวิจารณ์

ผลการทดลองการอบแห้งเมล็ดพริกไทยด้วยเครื่องอบแห้งฟลูอิดไคซ์เบดแบบทั่วไป และแบบพัฒนาขึ้น ภายใต้เงื่อนไขเวลาในการอบแห้งเท่ากับ 120 นาที และอุณหภูมิของอากาศร้อนเท่ากับ 90 °C โดยศึกษาผลการเปลี่ยนแปลงของค่าความชื้น และอัตราการการทำแห้งของเมล็ดพริกไทย จากนั้นสร้างสมการสำหรับการทำนายการทดสอบการอบแห้งด้วยเครื่องฟลูอิดไคซ์เบดทั้ง 2 แบบ และทดสอบลักษณะทางกายภาพของเมล็ดพริกไทย ด้วยค่า ค่าแอดวิตีของน้ำ เนื้อสัมผัส และค่าสี

#### 4.1 อิทธิพลความเร็วของอากาศ

##### 4.1.1 เครื่องอบแห้งฟลูอิดไคซ์เบดแบบทั่วไป (Fluidized bed dryer, FBD)

ศึกษาการอบแห้งเมล็ดพริกไทยด้วยเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไคซ์เบดแบบทั่วไป โดยใช้ ความเร็วจำเพาะของอากาศ (superficial air velocities,  $U^*$ ) เท่ากับ  $1.2U_{mf}$ ,  $1.4U_{mf}$  และ  $1.6U_{mf}$  จากศึกษาการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางความชื้นของเมล็ดพริกไทย ภายใต้อิทธิพลความเร็วของอากาศ จากรูปที่ 4.1 และ 4.2 พบว่า สำหรับทุกๆ ความเร็วของอากาศ ความชื้นของเมล็ดพริกไทยจะลดลงเมื่อเวลาในการอบแห้งเพิ่ม โดยในระยะแรกนั้นจะลดลงอย่างรวดเร็ว เพราะว่าปริมาณน้ำในเมล็ดพริกไทยมีสูง จึงทำให้การระเหยของน้ำที่ผิวของเมล็ดพริกไทยสามารถระเหยได้ปริมาณมากกว่า จากนั้นความชื้นจะค่อยๆ ลดลง เมื่อความชื้นบนพื้นผิวทั้งหมดถูกระเหยออกไป ทำให้เซลล์ผิวของวัสดุเล็กลง น้ำที่อยู่ภายในวัสดุที่เคลื่อนที่ออกมาข้างผิวและระเหยออกได้ยาก โดยมีค่าความชื้นต่ำสุดสำหรับความเร็วจำเพาะของอากาศ  $1.2U_{mf}$ ,  $1.4U_{mf}$  และ  $1.6U_{mf}$  เท่ากับ 21.8%db, 19.2%db และ 21.9%db ตามลำดับ

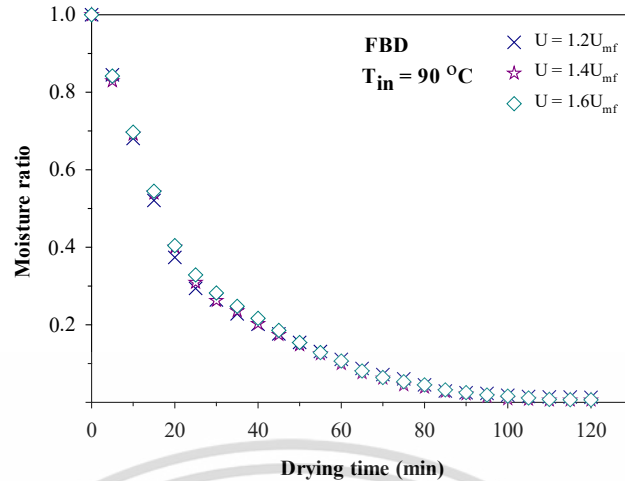


รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นของเมล็ดพริกไทยและเวลาในการอบแห้ง สำหรับเครื่อง

อบแห้งฟลูอิดไคซ์เบดแบบทั่วไป (FBD)

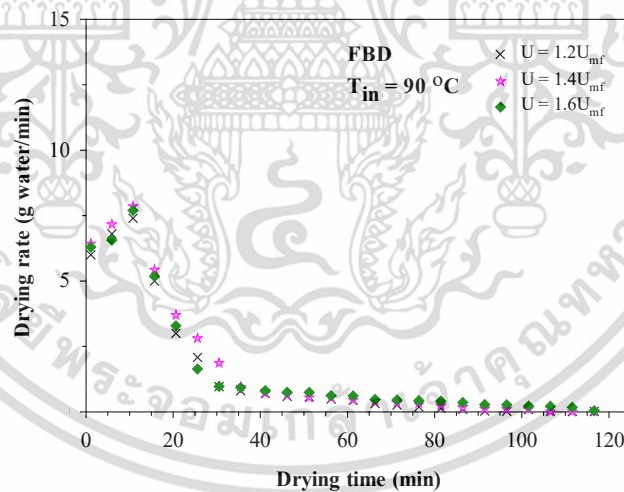
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นของเมล็ดพริกไทยและเวลาในการอบแห้ง สำหรับเครื่องอบแห้งฟลูอิดซ์เบดแบบทั่วไป (FBD)

อัตราการการทำแห้งของเมล็ดพริกไทยด้วยเครื่องอบแห้งฟลูอิดซ์เบดแบบทั่วไป มีค่าสูงสุดอยู่ที่เวลาทำแห้งในช่วง 10-15 นาที แรกของการอบแห้ง โดยมีค่าเท่ากับ 7.40, 7.85 และ 7.70 กรัม น้ำต่อนาที สำหรับความเร็วจำเพาะของอากาศ เท่ากับ  $1.2U_{mf}$ ,  $1.4U_{mf}$  และ  $1.6U_{mf}$  ตามลำดับ ดังรูปที่ 4.3 ซึ่งมีความแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ โดยที่



รูปที่ 4.3 อัตราการทำแห้งของเมล็ดพริกไทย สำหรับเครื่องอบแห้งฟลูอิดซ์เบดแบบทั่วไป (FBD)

ดังนั้นอิทธิพลของความเร็วจึงไม่ส่งผลต่ออัตราการอบแห้งของเมล็ดพริกไทย เนื่องจากพฤติกรรมการไหลของเมล็ดพริกไทยเกิดสมดุลภายในหอบแห้ง เมื่อเพิ่มความเร็วของอากาศทำให้เวลาในการแลกเปลี่ยนพลังงานระหว่างเมล็ดพริกไทยกับอากาศเกิดขึ้นน้อยลง แต่จะมีความสามารถในการพาความชื้นออกจากหอบแห้งได้เร็วกว่า หรืออาจกล่าวได้อีกอย่างหนึ่งว่า ความสามารถในการแลกเปลี่ยนมวลเพิ่มขึ้นแต่การแลกเปลี่ยนพลังงานลดลง ดังนั้นความเร็วเมื่อเกิดจุดของการเกิดฟลูอิด

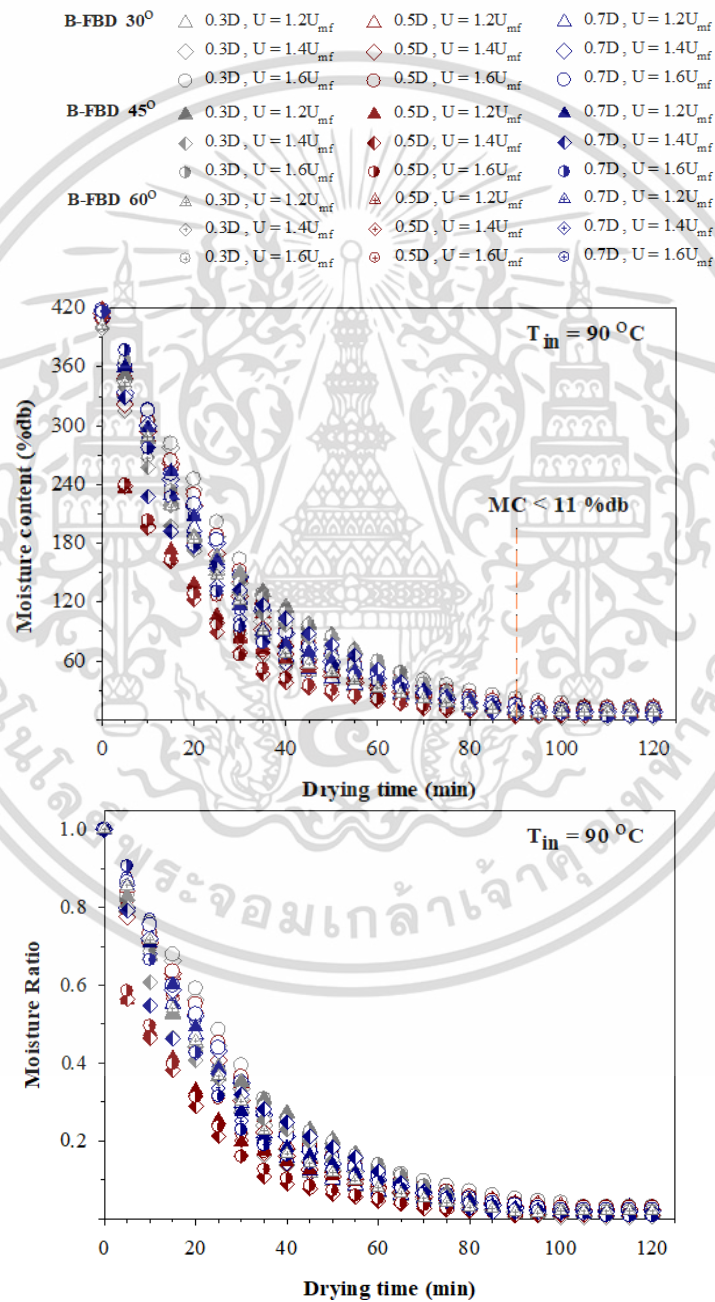
เซชันไปแล้วจึงไม่ส่งผลต่ออัตราการทำแห้งสำหรับเครื่องอบแห้งฟลูอิดซ์เบดแบบทั่วไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.1.2 เครื่องอบแห้งฟลูอิดไคซ์เบดที่มีการการติดตั้งอุปกรณ์แผ่นสร้างความปั่นป่วน (Fluidized-bed dryer equipped with baffle turbulators, B-FBD)

ศึกษาการอบแห้งเมล็ดพริกไทยด้วยเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไคซ์เบดที่มีการการติดตั้งอุปกรณ์สร้างการไหลปั่นป่วน ที่ทำมุม  $30^\circ$   $45^\circ$  และ  $60^\circ$  ระยะพิชต์การจัดเรียง (BR) เท่ากับ 0.3D, 0.5D และ 0.7D ของแผ่นกั้น ความเร็วจำเพาะของอากาศ (superficial air velocities,  $U^*$ ) เท่ากับ  $1.2U_{mf}$ ,  $1.4U_{mf}$  และ  $1.6U_{mf}$  จากรูป 4.4-4.5 พบว่าที่เวลา 90 นาที ความชื้นของเมล็ดพริกไทยในทุกๆ กรณีศึกษามีค่าความชื้นต่ำกว่า  $11\%db$  ซึ่งเป็นความชื้นที่เหมาะสมกับการเก็บรักษา

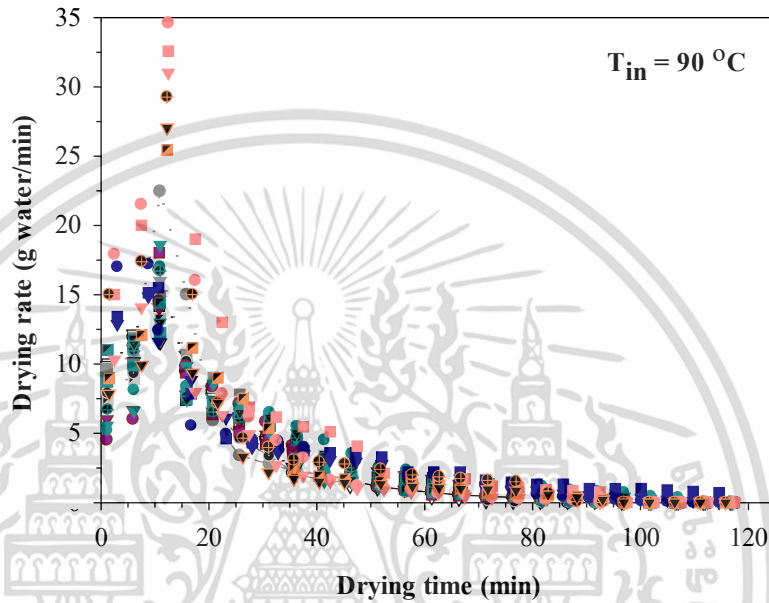


รูปที่ 4.4 ความชื้นและอัตราส่วนความชื้นของเมล็ดพริกไทยและเวลาในการอบแห้ง สำหรับเครื่องอบแห้งฟลูอิดไคซ์เบดที่มีการการติดตั้งอุปกรณ์สร้างการไหลปั่นป่วน (B-FBD)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- |                  |                                |                                |                                |
|------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| <b>B-FBD 30°</b> | ■ 0.3D, U = 1.2U <sub>mf</sub> | ■ 0.5D, U = 1.2U <sub>mf</sub> | ■ 0.7D, U = 1.2U <sub>mf</sub> |
|                  | ● 0.3D, U = 1.4U <sub>mf</sub> | ● 0.5D, U = 1.4U <sub>mf</sub> | ● 0.7D, U = 1.4U <sub>mf</sub> |
|                  | ▼ 0.3D, U = 1.6U <sub>mf</sub> | ▼ 0.5D, U = 1.6U <sub>mf</sub> | ▼ 0.7D, U = 1.6U <sub>mf</sub> |
| <b>B-FBD 45°</b> | ■ 0.3D, U = 1.2U <sub>mf</sub> | ■ 0.5D, U = 1.2U <sub>mf</sub> | ■ 0.7D, U = 1.2U <sub>mf</sub> |
|                  | ● 0.3D, U = 1.4U <sub>mf</sub> | ● 0.5D, U = 1.4U <sub>mf</sub> | ● 0.7D, U = 1.4U <sub>mf</sub> |
|                  | ▼ 0.3D, U = 1.6U <sub>mf</sub> | ▼ 0.5D, U = 1.6U <sub>mf</sub> | ▼ 0.7D, U = 1.6U <sub>mf</sub> |
| <b>B-FBD 60°</b> | □ 0.3D, U = 1.2U <sub>mf</sub> | ■ 0.5D, U = 1.2U <sub>mf</sub> | ■ 0.7D, U = 1.2U <sub>mf</sub> |
|                  | ○ 0.3D, U = 1.4U <sub>mf</sub> | ● 0.5D, U = 1.4U <sub>mf</sub> | ● 0.7D, U = 1.4U <sub>mf</sub> |
|                  | ▽ 0.3D, U = 1.6U <sub>mf</sub> | ▼ 0.5D, U = 1.6U <sub>mf</sub> | ▼ 0.7D, U = 1.6U <sub>mf</sub> |



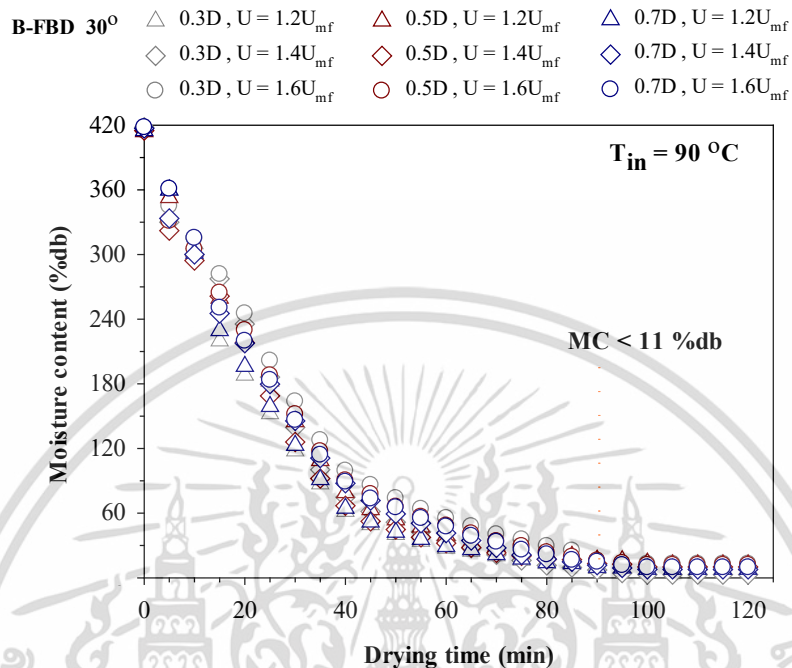
**รูปที่ 4.5** อัตราการทำแห้งของเมล็ดพริกไทย สำหรับเครื่องอบแห้งฟลูอิดเบดที่มีการการติดตั้งอุปกรณ์สร้างการไหลปั่นป่วน (B-FBD)

**มุม 30°**

พบว่าที่ระยะพิชต์การจัดเรียงที่ BR=0.3D ความเร็วของอากาศไม่ส่งต่ออัตราการอบแห้ง ซึ่งในช่วงเวลาการอบแห้งที่ 0-45 นาทีแรก อัตราการอบแห้งมีค่าแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญ โดยมีค่าสูงสุดอยู่ที่นาที่อบแห้งที่ 10-15 ที่ความเร็วเท่ากับ 1.2U<sub>mf</sub>, 1.4U<sub>mf</sub> และ 1.6U<sub>mf</sub> เท่ากับ 14.1, 14.2 และ 14.0 กรัม/น้ำต่อเวลา ตามลำดับ ดังรูปที่ 4.6 เนื่องจากมีระยะของแผ่นกั้นห่างกันน้อยเกินไปทำให้กระแสของอากาศร้อนภายในเคลื่อนที่ผ่านโดยแทรกตัวเข้าไปในระหว่างได้น้อยและมีความเร็วต่ำ ส่งผลต่อโมเมนต์ในการชนกันของอนุภาคภายใน จึงไม่สามารถสร้างการไหลแบบหมุนวนหรือเกิดการปั่นป่วนของกระแสของของไหลได้

แต่เมื่อระยะการจัดวางแผ่นกั้นเพิ่มขึ้น (BR=0.5D, 0.7D) โดย BR=0.7D ที่ความเร็วเท่ากับ 1.2U<sub>mf</sub>, 1.4U<sub>mf</sub> และ 1.6U<sub>mf</sub> มีความชื้นต่ำที่สุดเท่ากับ 10.2%db, 8.5%db และ 11.0%db อัตราการทำแห้งที่เวลา 10-15 นาที เท่ากับ 12.2, 18.5 และ 16.9 กรัม/น้ำต่อเวลา ตามลำดับ และที่ BR=0.5D ที่ความเร็วเท่ากับ 1.2U<sub>mf</sub>, 1.4U<sub>mf</sub> และ 1.6U<sub>mf</sub> มีความชื้นต่ำที่สุดเท่ากับ 8.0%db, 7.9%db และ 9.6%db มีอัตราการแห้งที่เวลา 10-15 นาที เท่ากับ 10.9, 16.6 และ 14.3 กรัม

น้ำต่อเวลา ตามลำดับ พบว่าทุกๆระยะห่างการจัดวางที่ความเร็ว  $1.4U_{mf}$  ให้ค่าอัตราการอบแห้งสูงที่สุด ดังนั้นในกรณีของมุม มุม  $30^\circ$  ความเร็วของอากาศจะส่งผลก็ต่อเมื่อ ระยะห่างระหว่างแผ่นกันเพิ่มขึ้น



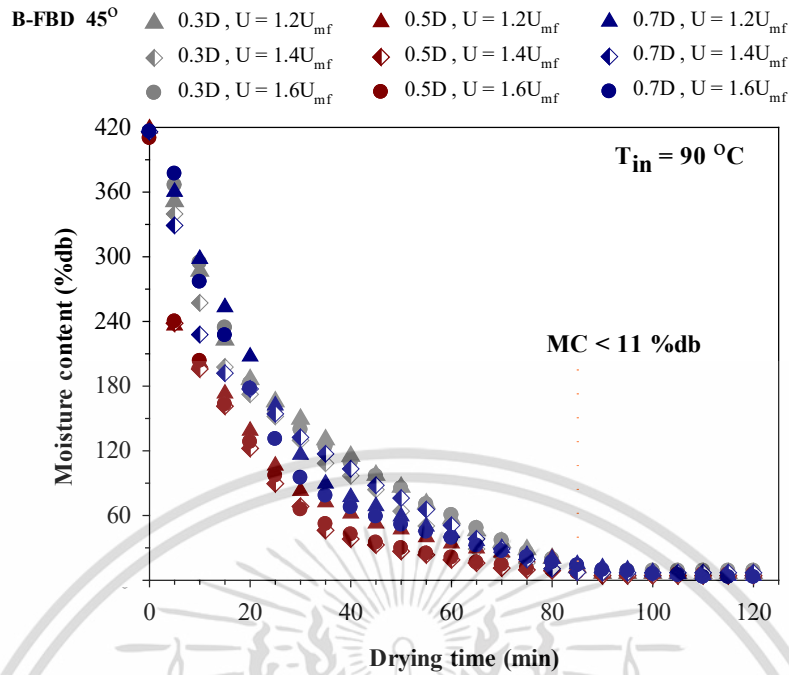
**รูปที่ 4.6** ความชื้นของเมล็ดพริกไทยและเวลาในการอบแห้ง สำหรับเครื่องอบแห้งฟลูอิดซ์เบดที่มีการติดตั้งอุปกรณ์สร้างการไหลปั่นป่วน (B-FBD) ที่มุม  $30^\circ$

#### มุม $45^\circ$

ในมุม  $45^\circ$  พบว่าที่เวลาทำแห้ง 85 นาที ความชื้นของเมล็ดพริกไทยในทุกๆ กรณีศึกษามีค่าความชื้นต่ำกว่า  $11\% db$  ซึ่งเป็นความชื้นที่เหมาะสมกับการเก็บรักษา ดังรูปที่ 4.7 โดยที่ความเร็วมีผลต่ออัตราการทำให้แห้ง ทุกๆระยะพิชต์การจัดเรียง โดยที่ระยะพิชต์การจัดเรียงเท่ากับ  $BR=0.5D$  มีอัตราการทำให้แห้งสูงที่สุด ต่อมาจะเป็นระยะ  $BR=0.7D$  และ  $0.3D$  ตามลำดับ โดยมีค่าอัตราการอบแห้งในเวลาช่วง 10-15 นาที ความเร็วเท่ากับ  $1.2U_{mf}$ ,  $1.4U_{mf}$  และ  $1.6U_{mf}$  เท่ากับ 32.5, 34.5 และ 31.0 กรัม/น้ำต่อเวลา ความชื้นต่ำสุด ( $BR=0.5D$ ) 25.4, 29.2 และ 27.0 กรัม/น้ำต่อเวลา ( $BR=0.7D$ ) และ 16.4, 20.4 และ 18.6 กรัม/น้ำต่อเวลา ( $BR=0.3D$ ) ที่มุม  $45^\circ$  ทำให้ระยะทั้งหมดของชุดแผ่นกันจัดเรียงต่อกันมีระยะที่สูงขึ้น ซึ่งในเป็นระยะที่เหมาะสมในการกระจายตัวของเมล็ดพริกไทยในหอบแห้งเกิดการเข้าผสมกับกระแสของอากาศร้อนได้ดีมากขึ้น โดยมีลักษณะการไหลของของแบบหมุนวนตามแนวแกน เมื่อเคลื่อนตัวเข้าไปในช่องว่างนั้น จากนั้นก็กระจายตัวออกมาในลักษณะเหมือนน้ำวนและกระแสนั้นจะถูกนำมาผสมกับกระแสอากาศร้อนบริเวณ เกิดการแลกเปลี่ยนพลังงานและมวล ส่งผลให้พบค่าอัตราการทำให้แห้งสูงและเวลาการทำแห้งน้อยที่สุด โดยในระยะที่  $BR=0.5D$  ทำให้กระแสอากาศร้อนบริเวณตรงกลางเข้าไปเหนี่ยวนำอากาศบริเวณรอบๆที่อยู่ภายใต้หอบแห้งทำให้เกิดการแลกเปลี่ยนของความร้อนได้ดีมากขึ้น จึงส่งผลอัตราการอบแห้งได้ดีมากขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

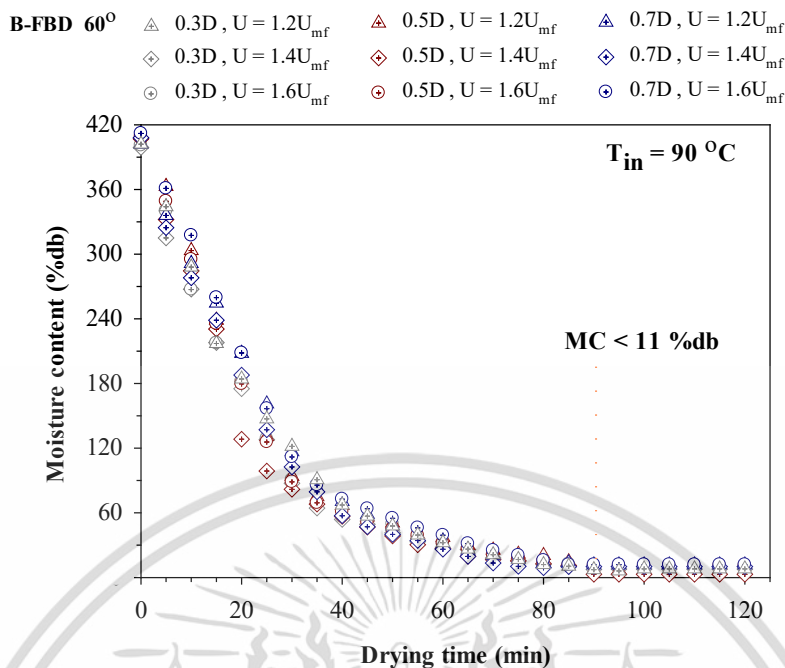


**รูปที่ 4.7** ความชื้นของเมล็ดพริกไทยและเวลาในการอบแห้ง สำหรับเครื่องอบแห้งฟลูอิดไคส์เบดที่มีการติดตั้งอุปกรณ์สร้างการไหลปั่นป่วน (B-FBD) ที่มุม 45°

#### มุม 60°

ความเร็วมีผลต่ออัตราการทำให้แห้ง ทุกๆระยะการจัดวาง โดยที่ระยะห่างของกันเท่ากับ  $BR=0.5D$  มีอัตราการทำให้แห้งสูงสุด ต่อมาจะเป็นระยะ  $BR=0.3D$  และ  $0.7D$  ตามลำดับ โดยมีค่าอัตราการอบแห้งในเวลาช่วง 10-15 นาที ความเร็วเท่ากับ  $1.2U_{mf}$ ,  $1.4U_{mf}$  และ  $1.6U_{mf}$  เท่ากับ 14.9, 22.4 และ 15.9 กรัม/น้ำต่อเวลา ( $BR=0.5D$ ) 14.2, 16.8 และ 14.6 กรัม/น้ำต่อเวลา ( $BR=0.3D$ ) และ 13.2, 16.7 และ 11.5 กรัม/น้ำต่อเวลา ( $BR=0.7D$ ) พบว่า ที่ความเร็ว  $1.4U_{mf}$  ของทุกๆระยะการจัดวางมีค่าอัตราการทำให้แห้งสูงสุด และพบค่าความชื้นต่ำสุดเท่ากับ 7.29 %db, 7.51 %db และ 9.92 %db ( $BR=0.3D$ ), 7.23 %db, 5.99 %db และ 11%db ( $BR=0.5D$ ), 13.69%db, 10.10%db และ 11.88%db ( $BR=0.7D$ ) ดังรูปที่ 4.8

เนื่องจากที่ความเร็วต่ำส่งผลให้การเคลื่อนการชนกันระหว่างอากาศร้อนและเมล็ดพริกไทย กับเมล็ดพริกไทยเอง มีแรงชนที่ต่ำส่งผลให้โมเมนต์ตัมในการชนน้อยซึ่งทำให้เกิดพลังงานในการสั่นของของเหลวในตัวเมล็ดพริกไทยน้อยด้วย พลังงานที่ส่งผ่านของเหลวออกมาจากตัวเมล็ดพริกไทยสู่ผิวด้านนอกต่ำ จึงทำให้เกิดการระเหยของของเหลวที่ช้าลง ส่งผลให้อัตราการทำให้แห้งต่ำเมื่อเทียบกับความเร็วที่เหมาะสมคือ  $1.4U_{mf}$  นั้นเอง

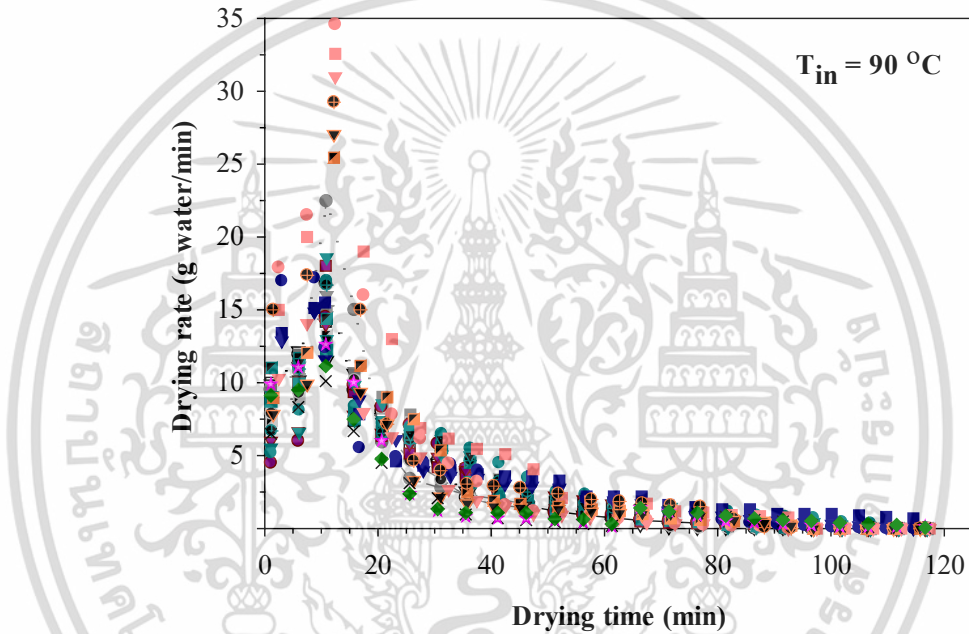


**รูปที่ 4.8** ความชื้นของเมล็ดพริกไทยและเวลาในการอบแห้ง สำหรับเครื่องอบแห้งฟลูอิดซ์เบดที่มีการติดตั้งอุปกรณ์สร้างการไหลปั่นป่วน (B-FBD) ที่มุม 60°

#### 4.2 อิทธิพลของชนิดเครื่องอบแห้งฟลูอิดซ์เบด

ทำการเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างเครื่องอบแห้งฟลูอิดซ์เบดแบบทั่วไป (FBD) กับฟลูอิดซ์เบดที่ติดตั้งอุปกรณ์สร้างการไหลปั่นป่วน (B-FBD) จากรูป 4.9 พบว่าที่ความเร็วของอากาศมีเดียวกัน อัตราการทำแห้งของฟลูอิดซ์เบดที่ติดตั้งอุปกรณ์สร้างการไหลปั่นป่วนสูงกว่าเครื่องอบแห้งฟลูอิดซ์เบดแบบทั่วไปทุกกรณี โดยที่ B-FBD มุม 45° , BR= 0.5 ความเร็วเท่ากับ 1.2U<sub>mf</sub> , 1.4U<sub>mf</sub> และ 1.6U<sub>mf</sub> มีอัตราการทำแห้งที่ 10-15 นาทีแรก สูงกว่าแบบ FBD เท่ากับ 77.2% , 77.3% และ 75.2% และมีค่าความชื้นต่ำสุดเท่ากับ 6.3%db, 4.2%db และ 5.5%db ซึ่งต่ำกว่า FBD เท่ากับ 15.5%db, 15%db และ 16.4%db ตามลำดับ เนื่องจากชุดอุปกรณ์สร้างการไหลปั่นป่วน ทำให้ลักษณะการไหลของอากาศเกิดขึ้นทั้งสองแนวคือตามแนวแกนและแนวสัมผัส ส่งผลให้เมล็ดพริกไทยและอากาศร้อนเกิดการผสมกัน ส่งผลให้ประสิทธิภาพการถ่ายเทมวลและพลังงานเพิ่มมากขึ้น

- FBD**
- ×  $U = 1.2U_{mf}$
  - ★  $U = 1.4U_{mf}$
  - ◆  $U = 1.6U_{mf}$
- B-FBD 30°**
- 0.3D,  $U = 1.2U_{mf}$
  - 0.3D,  $U = 1.4U_{mf}$
  - ▼ 0.3D,  $U = 1.6U_{mf}$
  - 0.5D,  $U = 1.2U_{mf}$
  - 0.5D,  $U = 1.4U_{mf}$
  - ▼ 0.5D,  $U = 1.6U_{mf}$
  - 0.7D,  $U = 1.2U_{mf}$
  - 0.7D,  $U = 1.4U_{mf}$
  - ▼ 0.7D,  $U = 1.6U_{mf}$
- B-FBD 45°**
- 0.3D,  $U = 1.2U_{mf}$
  - 0.3D,  $U = 1.4U_{mf}$
  - ▼ 0.3D,  $U = 1.6U_{mf}$
  - 0.5D,  $U = 1.2U_{mf}$
  - 0.5D,  $U = 1.4U_{mf}$
  - ▼ 0.5D,  $U = 1.6U_{mf}$
  - 0.7D,  $U = 1.2U_{mf}$
  - 0.7D,  $U = 1.4U_{mf}$
  - ▼ 0.7D,  $U = 1.6U_{mf}$
- B-FBD 60°**
- 0.3D,  $U = 1.2U_{mf}$
  - 0.3D,  $U = 1.4U_{mf}$
  - ▽ 0.3D,  $U = 1.6U_{mf}$
  - 0.5D,  $U = 1.2U_{mf}$
  - 0.5D,  $U = 1.4U_{mf}$
  - ▼ 0.5D,  $U = 1.6U_{mf}$
  - 0.7D,  $U = 1.2U_{mf}$
  - 0.7D,  $U = 1.4U_{mf}$
  - ▼ 0.7D,  $U = 1.6U_{mf}$



รูปที่ 4.9 อัตราการทำแห้งของเมล็ดพริกไทย ระหว่างเครื่องอบแห้งฟลูอิดซ์เบดแบบทั่วไป (FBD) กับฟลูอิดซ์เบดที่ติดตั้งอุปกรณ์สร้างการไหลปั่นป่วน (B-FBD)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 4.3 สร้างสมการสำหรับการทำนายการทดสอบการอบแห้งด้วยเครื่องฟลูอิดไดซ์เบด

ตารางที่ 4.1 สร้างความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ตามแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์สำหรับการอบแห้งเมล็ดพริกไทยด้วยเครื่องฟลูอิดไดซ์เบดแบบทั่วไป (FBD) และเครื่องฟลูอิดไดซ์เบดที่ติดตั้งอุปกรณ์สร้างการไหลปั่นป่วน (B-FBD)

	Model		$R^2$	RMSE	$\chi^2$
FBD	Page	$k = -0.1651+0.4789U^*-0.2224U^{*2}$ $n = 1.3891-0.5146U^*+0.1715U^{*2}$	0.9968	0.1281	0.0178
	Henderson and Pabis	$a = 0.8741+0.17614U^*-0.058725U^{*2}$ $k = 0.0165+0.0397U^*-0.0155U^{*2}$	0.9921	0.0689	0.0052
	Logarithmic	$a = -0.8003-0.0011U^*+0.0397U^{*2}$ $k = 0.9303+0.0045U^*+0.0376U^{*2}$ $c = 0.9385+0.0092U^*+0.0460U^{*2}$	0.9961	0.0324	0.0012
B-FBD	Page	$k = 0.056+0.014U^*+0.016(BR)-0.016\theta^*$ $n = 1.053-0.125U^*-0.067(BR)+0.076\theta^*$	0.9295	0.2482	0.0618
	Henderson and Pabis	$a = 0.998-0.003U^*+0.029(BR)-0.001\theta^*$ $k = 0.051+0.000001U^*+0.001(BR)-0.004\theta^*$	0.9789	0.0418	0.0017
	Logarithmic	$a = 0.972+0.000001U^*+0.026(BR)+0.01\theta^*$ $k = 0.054+0.000001U^*+0.002(BR)-0.006\theta^*$ $c = 0.017+0.003U^*+0.006(BR)-0.01\theta^*$	0.9786	0.0446	0.0019

หมายเหตุ  $U^* = U/U_{mf}$  มีค่า 1.2, 1.4 และ 1.6

$BR = L/D$  มีค่า 0.3, 0.5 และ 0.7

$\theta^* = 90^\circ/\theta$  มีค่า 3, 2 และ 1.5

จากตารางที่ 4.1-4.2 เป็นแบบจำลองเพื่อใช้ในการทำนายเพื่อหาอัตราส่วนของความชื้น (MR) ด้วยความเร็วของลมร้อน ( $U^*$ ) ระยะของการจัดเรียง (BR) และมุมมอง ( $\theta^*$ ) ของแผ่นกั้นสร้างความปั่นป่วน ซึ่งเป็นฟังก์ชันของเวลา โดยมีค่าคงที่คือ  $k$ ,  $n$ ,  $a$  และ  $c$  เป็นค่าคงที่ของสมการ

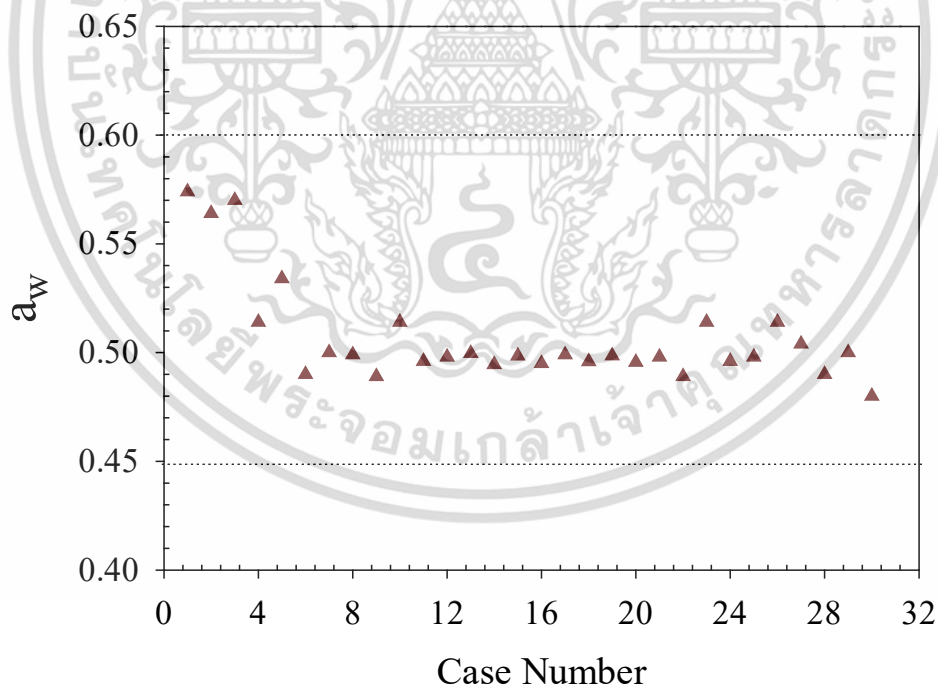
พบว่าสำหรับเครื่องฟลูอิดไดซ์เบดแบบทั่วไป (FBD) สมการของ Logarithmic ให้ผลในการทำนายใกล้เคียงมากที่สุดโดยมีค่า  $R^2$  เท่ากับ 0.9962, RMSE เท่ากับ 0.03250 และ  $\chi^2$  เท่ากับ 0.001148 และในกรณีของสำหรับเครื่องฟลูอิดไดซ์เบดที่ติดตั้งอุปกรณ์สร้างการไหลปั่นป่วน (B-FBD) สมการของ Henderson and Pabis ให้ผลในการทำนายใกล้เคียงมากที่สุดโดยมีค่า  $R^2$  เท่ากับ 0.9789, RMSE เท่ากับ 0.04182 และ  $\chi^2$  เท่ากับ 0.001754

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.4 ค่า Water activity ( $a_w$ )

ค่า  $a_w$  เป็นปัจจัยที่สำคัญในการควบคุมและป้องกันการเสื่อมเสียของผลิตภัณฑ์อาหารซึ่งบ่งชี้ระดับปริมาณน้ำอิสระในผลิตภัณฑ์ที่เชื้อจุลินทรีย์สามารถนำไปใช้ในการเจริญเติบโตและใช้ในการเกิดปฏิกิริยาเคมีต่างๆ โดยเป็นผลโดยตรงต่อการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์ โดยทั่วไปแล้วเมล็ดพืชที่อบแห้งหรือเครื่องเทศต้องมีค่า  $a_w$  น้อยกว่า 0.6 พบว่าค่า  $a_w$  ของเมล็ดพริกไทยในกรณีศึกษาทั้งหมดอยู่ในช่วง 0.498-0.574 ซึ่งไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ และอยู่ในเกณฑ์ที่ปลอดภัยต่อการเก็บรักษาเมล็ดพริกไทยไว้ได้ สามารถแสดงค่า  $a_w$  กับกรณีศึกษาได้ดังรูปที่ รูปที่ 4.10

FBD	B-FBD 30°	B-FBD 45°	B-FBD 60°
1 : $U = 1.2U_{mf}$	4: BR = 0.3D, $U = 1.2U_{mf}$	13: BR = 0.3D, $U = 1.2U_{mf}$	22: BR = 0.3D, $U = 1.2U_{mf}$
2 : $U = 1.4U_{mf}$	5: BR = 0.3D, $U = 1.4U_{mf}$	14: BR = 0.3D, $U = 1.4U_{mf}$	23: BR = 0.3D, $U = 1.4U_{mf}$
3 : $U = 1.2U_{mf}$	6: BR = 0.3D, $U = 1.6U_{mf}$	15: BR = 0.3D, $U = 1.6U_{mf}$	24: BR = 0.3D, $U = 1.6U_{mf}$
	7: BR = 0.5D, $U = 1.2U_{mf}$	16: BR = 0.5D, $U = 1.2U_{mf}$	25: BR = 0.5D, $U = 1.2U_{mf}$
	8: BR = 0.5D, $U = 1.4U_{mf}$	17: BR = 0.5D, $U = 1.4U_{mf}$	26: BR = 0.5D, $U = 1.4U_{mf}$
	9: BR = 0.5D, $U = 1.6U_{mf}$	18: BR = 0.5D, $U = 1.6U_{mf}$	27: BR = 0.5D, $U = 1.6U_{mf}$
	10: BR = 0.7D, $U = 1.2U_{mf}$	19: BR = 0.7D, $U = 1.2U_{mf}$	28: BR = 0.7D, $U = 1.2U_{mf}$
	11: BR = 0.7D, $U = 1.4U_{mf}$	20: BR = 0.7D, $U = 1.4U_{mf}$	29: BR = 0.7D, $U = 1.4U_{mf}$
	12: BR = 0.7D, $U = 1.6U_{mf}$	21: BR = 0.7D, $U = 1.6U_{mf}$	30: BR = 0.7D, $U = 1.6U_{mf}$

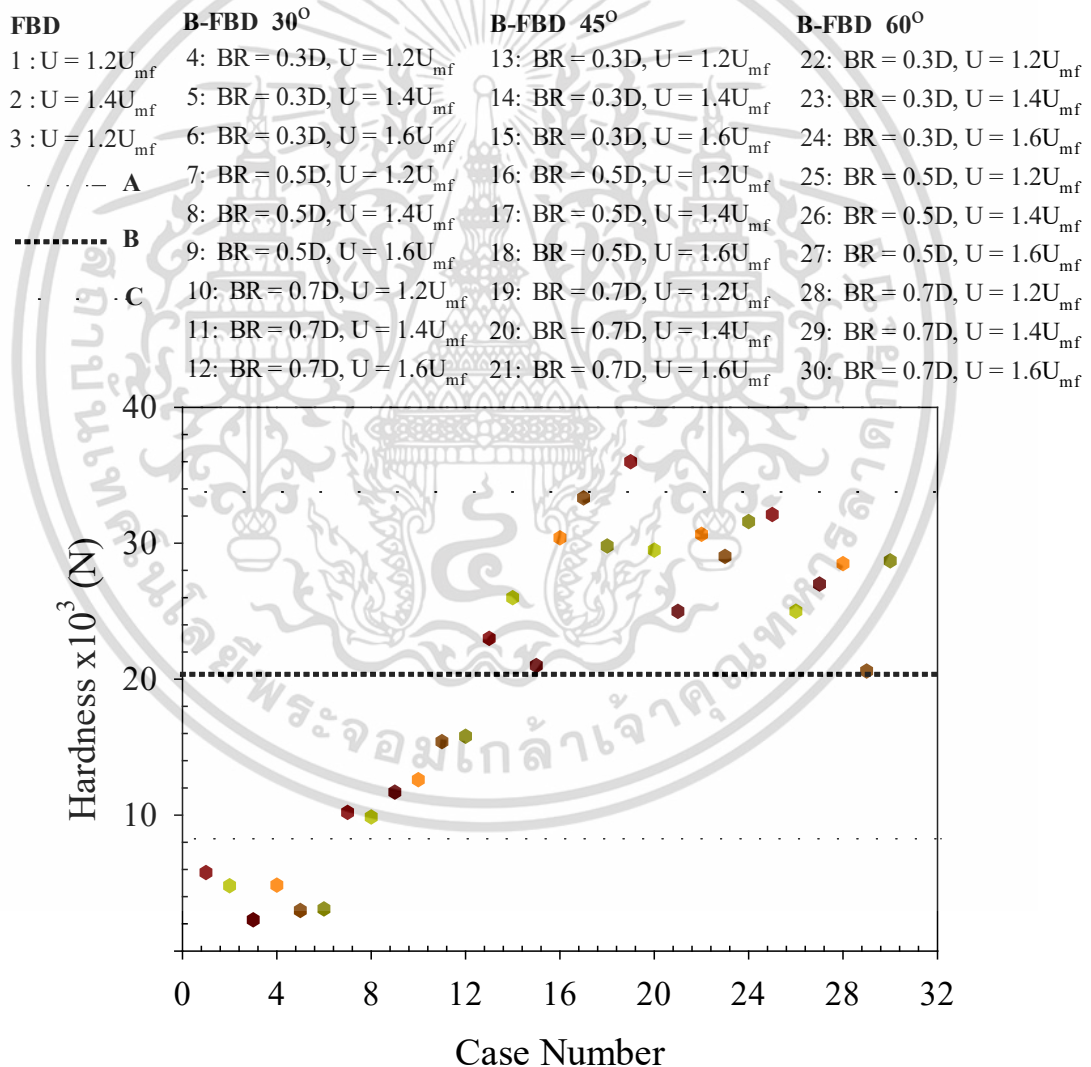


รูปที่ 4.10 ค่า Water activity ในการทดลองทุกกรณีศึกษา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 4.5 ลักษณะเนื้อสัมผัส

ทำการทดสอบ แรงกด (compression force) เพื่อหาค่าความแข็ง (hardness) คือแรงสูงสุดที่กดหรืออัดในแนวตรงที่ให้วัสดุเปลี่ยนรูปร่าง (deformation) โดยที่ความแข็งมีผลต่อการบดเมล็ดพริกไทยดำก่อนนำไปประกอบอาหาร ทำการเปรียบเทียบโดยสุ่มตัวอย่างเมล็ดพริกไทยดำที่ขายในท้องตลาด 3 แบรินด์ ได้แก่ A, B และ C พบว่าค่าความแข็งของเมล็ดพริกไทยดำตัวอย่างมีค่าอยู่ในช่วง  $2.3-34.3 \times 10^3$  N ส่วนเมล็ดพริกไทยดำจากการทดลองมีค่าอยู่ในช่วง  $6.78-33.1 \times 10^3$  N พบว่าค่าความแข็งของเมล็ดพริกไทยดำจากการทดลองครอบคลุมค่าของแบรินด์ตามท้องตลาด ดังรูปที่ 4.11 ซึ่งพบว่ากรณีที่ใช้เครื่องฟลูอิดซ์เบดที่ติดตั้งอุปกรณ์สร้างการไหลปั่น่วน (B-FBD) ให้ค่าใกล้เคียงกับสินค้าที่ขายตามท้องตลาด มากกว่าเครื่องฟลูอิดซ์เบดแบบทั่วไป (FBD)



รูปที่ 4.11 ค่าความแข็งในการทดลองทุกกรณีศึกษาและสินค้าตัวอย่าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

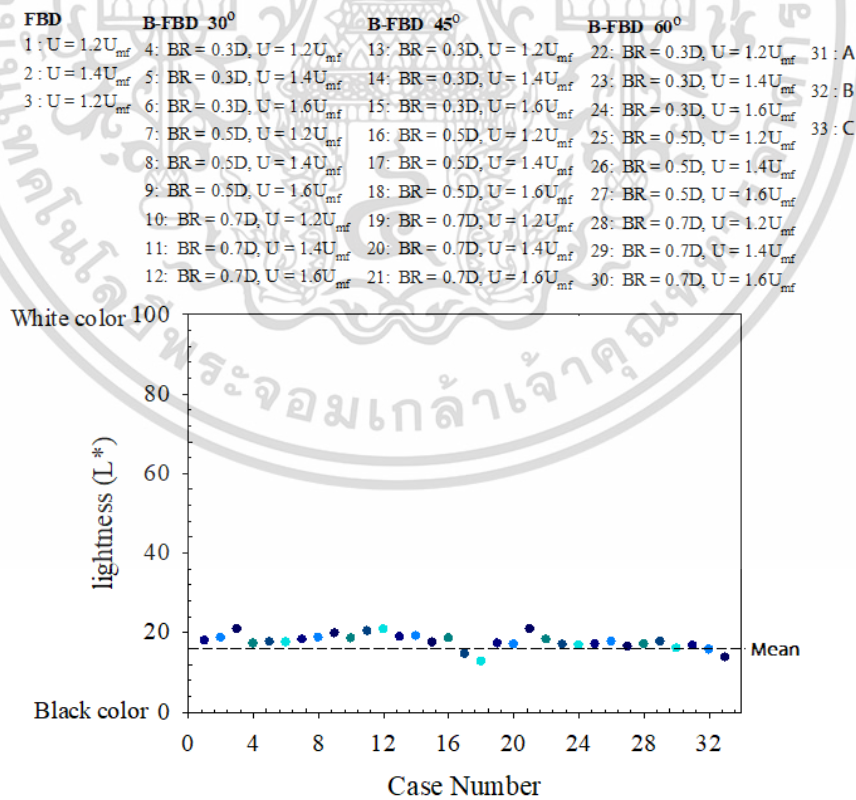
### 4.6 สีของเมล็ดพริกไทยดำ

การอบแห้ง ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสีของผลิตภัณฑ์ซึ่งจากเมล็ดพริกไทยสดที่เป็นสีเขียวเกิดการเปลี่ยนแปลงเป็นสีน้ำตาล เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงทางเคมีของคลอโรฟิลล์จากความร้อนและปฏิกิริยาออกซิเดชันระหว่างการอบแห้ง ทำการทดสอบหาความเปลี่ยนแปลงของสีเมล็ดพริกไทยจากการวิเคราะห์ทางสถิติของค่าสีระบบ (CIE L\*a\*b\*) เทียบกับสินค้าตามท้องตลาด 3 แบรินด์ ได้แก่ A, B และ C พบว่าดังตารางที่ 4.2 พบว่าค่า สีของ L\* a\* และ b\* มีความแตกต่างกันไม่มีนัยสำคัญทางสถิติและ ในรูปที่ 4.12 จะเห็นได้ว่าค่าระดับความสว่าง (ของ L\*) อยู่บริเวณใกล้เคียงกันนั้นแสดงให้เห็นว่าเมล็ดพริกไทยมีความเป็นสีดำมาก

ตารางที่ 4.2 การวิเคราะห์ทางสถิติของค่าสีระบบ (CIE L\*a\*b\*)

ตัวอย่าง	L*	a*	b*
ไรท์ท็อปส์ Tops แม็คคอร์มิค			
FBD	17.67±0.32446	2.0194±0.08383	5.5691±0.20246
B-FBD			

(ในการทดสอบทางสถิติ พบว่า L\* a\* และ b\* มีค่า  $p < 0.05$ )



รูปที่ 4.12 ค่าความสว่าง (Lightness, L\*) ในการทดลองทุกกรณีศึกษาและสินค้าตัวอย่าง เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัย

การศึกษาผลกระทบของการติดตั้งแผ่นกันน้ำในเครื่องฟลูอิดไดซ์เบด ต่อผลของความชื้นและอัตราการอบแห้งของเมล็ดพริกไทย พบว่าในสภาวะความเร็วของอากาศร้อนเดียวกัน มีผลให้อัตราการทำแห้งของเครื่องฟลูอิดไดซ์เบดที่ติดตั้งอุปกรณ์สร้างการไหลปั่นป่วน (B-FBD) สูงกว่าเครื่องอบแห้งฟลูอิดไดซ์เบดแบบทั่วไป (FBD) โดยสูงที่สุดที่นาทือบแห้งในช่วง 10-15 นาทีแรกโดยที่ B-FBD มุม  $45^\circ$ , BR= 0.5 ความเร็วเท่ากับ  $1.2U_{mf}$ ,  $1.4U_{mf}$  และ  $1.6U_{mf}$  มีอัตราการทำแห้งที่ 10-15 นาทีแรก สูงกว่าแบบ FBD เท่ากับ 77.2% , 77.3% และ 75.2% และมีค่าความชื้นต่ำสุดเท่ากับ 6.3%db, 4.2%db และ 5.5%db ซึ่งต่ำกว่า FBD เท่ากับ 15.5%db, 15%db และ 16.4%db ตามลำดับ

เมื่อศึกษาอิทธิพลของมุม ( $\theta$ ) ระยะพิสการจัดเรียง (BR) ของแผ่นกันน้ำ พบว่าที่ความเร็วในการอบแห้งเท่ากัน มุม  $45^\circ$  ระยะพิสการจัดเรียง BR= 0.5 มีอัตราการทำแห้งสูงที่สุด และมีค่าความชื้นต่ำที่สุด

ซึ่งสามารถนำค่าอัตราส่วนความชื้น (MR) มาสร้างสหสัมพันธ์เพื่อใช้ทำนายผลการทดลองการอบแห้งด้วยเครื่องฟลูอิดไดซ์เบดตาม แบบสมการของ Page, Henderson and Pabis และ Logarithmic พบว่าสำหรับเครื่องฟลูอิดไดซ์เบดแบบทั่วไป (FBD) สมการของ Logarithmic ให้ผลในการทำนายใกล้เคียงมาก และในกรณีของสำหรับเครื่องฟลูอิดไดซ์เบดที่ติดตั้งอุปกรณ์สร้างการไหลปั่นป่วน (B-FBD) สมการของ Henderson and Pabis ให้ผลในการทำนายใกล้เคียงมากที่สุด

เมื่อนำเมล็ดพริกไทยที่ได้จากการอบแห้งไปศึกษาลักษณะทางกายภาพของเมล็ดพริกไทย เมื่อทำการอบแห้งด้วยเครื่องฟลูอิดไดซ์เบด ได้แก่ ค่า Water activity ( $a_w$ ) เมล็ดพริกไทยในพบว่ามีค่าต่ำกว่า 0.6 ซึ่งอยู่ในเกณฑ์ที่ปลอดภัยต่อการเก็บรักษาเมล็ดพริกไทยไว้ได้ และได้นำไปทดสอบลักษณะเนื้อสัมผัส ด้วยค่าความแข็ง (hardness) และคุณสมบัติสีของเมล็ดพริกไทยดำด้วยการวิเคราะห์ทางสถิติของค่าสีระบบ (CIE  $L^*a^*b^*$ ) ทำการเปรียบเทียบกับสินค้าตามท้องตลาด 3 แบรินด์ พบว่า ค่าความแข็ง (hardness) ค่าความสว่าง ( $L^*$ ) และค่าสี  $a^* b^*$  มีความแตกต่างอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ

## บรรณานุกรม

- กรมวิชาการเกษตรและสำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร. 2562. *พริกไทยสินค้าส่งออกที่นำจับตามอง*. กรมเจรจาการค้าระหว่างประเทศ. <https://api.dtn.go.th/files>
- เฉลิมชล ช่างถม. 2559 “จันทบุรี เมืองแห่งพริกไทยพันธุ์ดี” กลุ่มส่งเสริมและพัฒนาการผลิต สำนักงานจังหวัดจันทบุรี, วารสารเคหการเกษตรในรูปแบบ e-book ฉบับเดือน มกราคม 2559.
- พระราชบัญญัติมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม พ.ศ. 2511. (2556, 1, สิงหาคม). ราชกิจจานุเบกษา. เล่ม 130 ตอนพิเศษ 93. หน้า 4
- วิวัฒน์ วุฒิวิวัฒน์ชัย, (2540) “แนวทางที่เหมาะสมสำหรับการอบแห้งถั่วเหลืองโดยเทคนิคฟลูอิดไอเซน”วิทยานิพนธ์ (วศ.ม. เทคโนโลยีพลังงาน) มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
- อิทธิพล แก่งสันเทียะ. 2551. “พฤติกรรมการอบแห้งเมล็ดพริกไทยในหอพลูอิดไอเซนที่มีศรีรูปตัววี” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- อมรทิพย์ ภิรมย์บุรณ, อัจฉรา สุขสมบุรณ, พงษ์เพชร วงศ์โสภณ, อำไพพงษ์เกาะเทียน และ รัฐฐา ศรีญาณลักษณ์. 2556. *องค์ความรู้เพิ่มประสิทธิภาพการผลิต สู่การเป็น smart officer : สมุนไพรและเครื่องเทศ. สำนักพัฒนาการถ่ายทอดเทคโนโลยีกรมส่งเสริมการเกษตร* กลุ่มสื่อส่งเสริมการเกษตร ส่วนส่งเสริมและเผยแพร่.
- อรอุมา หนูทอง และ ณรงค์ อึ้งกิม้วน (2557) “การศึกษาพฤติกรรมการอบแห้งพริกไทยด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง”, วารสารวิทยาศาสตร์บูรพา ฉบับพิเศษ การประชุมวิชาการระดับชาติวิทยาศาสตร์วิจัย ครั้งที่ 6
- AOAC, 2005. Official Methods of Analysis of the AOAC International. Gaithersburg : AOAC INTERNATIONAL.
- Arun S. Mujumdar, (1995) “Handbook of Industrial Drying”, second edition, CRC Press LLC
- Taylor, B.J. Quinn, A.R. and Kataoka, A. (2019) “Listeria monocytogenes in Low-moisture Food and Ingredients,” **Food control**. 103: 153-160
- Boonloi, A. and Promvongse, P. 2006. “Drying Kinetic of Pepper Corns in a Fluidized-bed with Helical Distributor Plate.” **The 2<sup>nd</sup> Joint International Conference on Sustainable Energy and Environment (SEE)**.
- Boonloi, A. and Jedsadaratanachai, W. (2019). “Numerical Study on Flow and Heat Transfer Mechanisms in the Heat Exchanger Channel with V-Orifice at Various

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- Blockage Ratios, Gap Spacing Ratios, and Flow Directions.” **Hindawi Modelling and Simulation in Engineering**. Volume 2019, Date: May 31, Article ID 8656435
- Boonloi, A. and Jedsadaratanachai, W. (2021). “Impacts of Double V-Rings in the Heat Exchanger Duct on Heat Transfer and Flow Behaviors: A Numerical Study.”, **Mathematical Problems in Engineering**. October 2021(3):1-28
- Boonloi, A. and Jedsadaratanachai, W. (2023). “Numerical Assessments on Flow Topology and Heat Transfer Behavior in a Round Tube Inserted with Three Sets of V-Ribs.” **Frontiers in Heat and Mass Transfer**, Published online 04 July 2023
- Brooker, D.B., Bakker-Arkema, F.W. and Hall, C.W., (1992) “Drying and storage of grains and oilseeds,” Van Nostrand Reinhold, New York, NY.
- Chuwattanakul, V. Banthumporn, K. Promvong, P. and Eiamsa-ard, S. (2017). “Drying peppercorn characteristics in fluidized bed dryer equipped with baffle vortex generators.” **Earth and Environmental Science**, 6<sup>th</sup> International Conference on Power Science and Engineering (ICPSE 2017), 136 (2018) 012020
- Chuwattanakul, V. and Eiamsa-ard, S. (2019). “Hydrodynamics investigation of pepper drying in a swirling fluidized bed dryer with multiple-group twisted tape swirl generators.”, **Case Studies in Thermal Engineering**, volume 13, March 2019, 100389
- Chuwattanakul, V. Wongcharee, K. Pimsarn, M. Chokphoemphun, S. Chamoli, S. and Eiamsa-ard, S. (2022). “Effect of conical air distributors on drying of peppercorns in a fluidized bed dryer: Prediction using an artificial neural network” **Case Studies in Thermal Engineering**, volume 36, August 2022, 102188
- Darshan, S. and Doreswamy, R. (2004). “Patented anti-inflammatory plant drug development from traditional medicine.” **Phytother Res** 18 : 343–57.
- Dong Chen, X. and Mujumdar Arun, S. (2008). *Drying Technologies in Food Processing*. Pages displayed by permission of **John Wiley & Sons**. Copyright.
- Duangjai, A. Ingkaninan, K. Praputbut, S. and Limpeanchob, N. (2013). “Black pepper and piperine reduce cholesterol uptake and enhance translocation of cholesterol transporter proteins.” **J Nat Med**. 67: 303-310.
- Fatihah Mohd Roslan, N. Shukrie Md Yudin, A. Afiq Sumono, M. Faris Mohamad Pozi, M. and Aidil Safuan Othman, M. 2022. “Drying Performance of Piper Nigrum in a

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- Swirling Fluidized Bed Dryer: An Experimental Study.” **Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences** **93**, Issue 1(2022) 148-166
- Gorgani, L. Mohammadi, M. Ghasem D, N. and Maryam, N. 2017. “Piperine-The Bioactive Compound of Black Pepper: From Isolation to Medicinal Formulations.” **Compr Rev Food Sci Food Saf**, Jan;16(1):124-140. doi: 10.1111/1541-4337.12246. Epub 2016 Nov 22.
- Guzzo Silva, B. Maria Frattini Fileti, A. Ann Foglio, M. Paulo de Tarso Vieira, R. and Pereira Taranto, O. 2017. “Effects of Different Drying Conditions on Key Quality Parameters of Pink Peppercorns (*Schinus terebinthifolius* Raddi).” *Journal of Food Quality*, volume 2017, Article, 12 pages
- Henderson, S. M. and Pabis, S. (1961) “Grain drying theory II: temperature effects on drying coefficients,” **Journal of Agricultural Engineering Research**, vol. 6, pp. 169-174,
- Hirasa, K. and Takemasa, M. 1998 “Spice science and technology”, **Boca Raton, Fla.** CRC Press.
- Jakubczyk, E., Gondek, E. and Tryzno, E. (2017) “Application of Novel Acoustic Measurement Techniques for Texture Analysis of Co-extruded Snacks.” **LWT-Food Science and Technology**. 75 : 582-589.
- Kassem, A. (1998) “Comparative studies on thin layer drying model for wheat,” **13<sup>th</sup> international congress on agricultural engineering**, vol. 6, February 2-6, Morocco
- Khawaja, H. 2011. “CFD-DEM simulation of minimum fluidisation velocity in two phase medium.” **The International Journal of Multiphysics**. June 2011 5(2):89-100
- Mahmoudirad, S. Shirani, E. and Aloui, F. 2021. “Study of circular Couette flow, Taylor vortex and wavy vortex regimes in Couette–Taylor flows with transient periodic oscillation of the inner cylinder—a computational fluid dynamics analysis.” **Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering** , volume 43, Article number: 559
- Mert, G. and Mesut, G. 2014. “Comparing Corn Drying in Fluidized Bed Dryer and Convective Tray Dryer.” **Springer International**, book Progress in Exergy, Energy and the Environment (pp.687-694).

- Midilli, A. and Kucuk, H. 2003. "Mathematical modeling of thin layer drying of pistachio by using solar energy." **Energy Conversion and Management**. Volume 44, Issue 7, May 2003, Pages 1111-1122
- Montalto, A. (2016). *EveryDayCook: This Time It's Personal*. Ballantine
- Mohammadi, M. Gorgani, L. Ghasem D, N. and Maryam, N. 2017. (2017) "Piperine The Bioactive Compound of Black Pepper From Isolation to Medicinal Formulations." **Institute of Food Technologists**, Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety Vol.16.
- Özdemir M. and Devres Y. O. (1999) "The thin layer drying characteristics of hazelnuts during roasting", **Journal of Food Engineering**, vol. 42, pp. 225-233.
- Ozbey, M. and Soylemez, M.S. 2005 "Effect of swirling flow on fluidized bed drying of wheat grains." **Energy conversion and management** 46 p(1495-1512).
- Ozahi, E. and Demir, H. 2015. "Drying performance analysis of a batch type fluidized bed drying process for corn and unshelled pistachio nut regarding to energetic and exergetic efficiencies," **Measurement**, 60, 85-96.
- Parthasarathy, VA. Chempakam, B. and Zachariah, TJ. (2008). "Chemistry of spices." **London CABI**.
- Peter, KV. (2006). "Handbook of herbs and spices.", Woodhead publishing limited, published in North and South America by CRC press LLC.
- Perrotin, T. and Clodic, D. (2004). "Thermal-hydraulic CFD study in louvered fin-and-flat-tube heat exchangers." **International Journal of Refrigeration**, 27(4): 422-432.
- Potter, N.N. and Hotchkiss, J.H. (1997). **Food Science**. 5<sup>th</sup> edition. Chapman & Hall
- Promvongse, P. Boonloi, A. Pimsarn, M. Thianpong, C. 2011. "Drying characteristics of peppercorns in a rectangular fluidized-bed with triangular wavy walls", **International Communications in Heat and Mass Transfer** 38 : 1239-1246.
- Raman, G. and Gaikar, VG. (2002). "Process for extraction of piperine from piper species." **Google Patents**
- Risfaheri and nurdjannah, n. 2000. "Pepper processing – The Indonesian Scenario", In: Ravindran, P.N (Ed.) Black Pepper, **Harwood Academic**, 355–366
- Sosa, S. Balick, M. Arvigo, R. Esposito, R. Pizza, C. Altinier, G. and Tubaro, A. 2002. "Screening of the topical anti-inflammatory activity of some Central American plants." **J Ethnopharmacol** 81 : 211–5.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

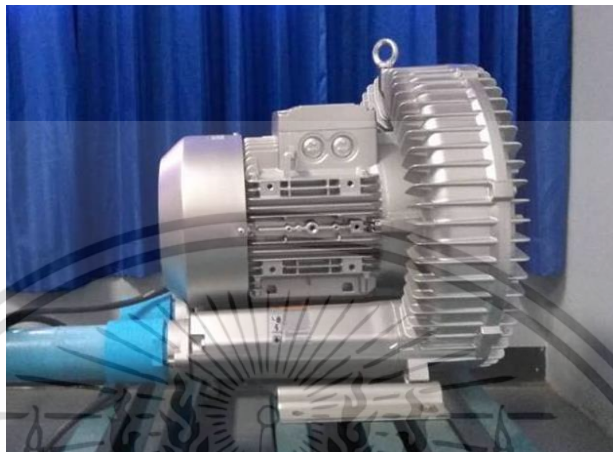
- Sau, D.C., S. Mohanty and K.C. Biswal, (2007) “Minimum fluidization velocities and maximum bed pressure drops for gas-solid tapered fluidized beds”, **Chem. Eng. J.**, 132: 151-157., DOI: 10.1016/j.cej.2007.01.036.
- Suvarna, Y. and Abdul Rahaman, SK. 2019. “Pharmacotherapeutic properties of black pepper: a systematic review” **Asian Journal of Research in Chemistry and Pharmaceutical Sciences**. 7(1), 2019, 293-304.
- Thant, P.P. Mahanta, P.P. and Robi, P.S. 2015 “Performance enhancement of Inclined bubbling fluidized bed paddy dryer by design modification,” **International Journal of Engineering and Applied Science**, 2, 2394-3661.
- Venkiteswaran, V.K. Jun, G.J. Sing, C.Y. Sulaiman, S.A. and Raghavan, V.R. 2012. “Variation of bed pressure drop with particle shapes in a swirling fluidized bed.” **Journal of Applied Sciences** 12, 2598-2603.
- Watcharin Dongbang and Rungtawan Wiwattanasirikul, (2015), “Experimental Comparisons of Anchovy Drying using Centrifugal and Gravitational Fluidized Bed Techniques”, **American Journal of Applied Sciences**, 12 (2): 72.79
- Yang, YC. Lee, SG. Lee, HK. Kim, MK. and Lee, SH. (2002). “A piperidine amide extracted from *Piper longum* L. fruit shows activity against *Aedes aegypti* mosquito larvae.” **J Agric Food Chem**, Jun 19;50(13) : 3765-7.
- Yilbas B.S., Hussain M.M. and Dincer I. (2003) “Heat and moisture diffusion in slab products due to convective boundary condition”, **Heat and Mass Transfer** 39, pp. 471–476.
- Zachariah, T.J. 2000 “On farm processing of black pepper” In: Ravindran, P.N. (Ed.) **Black Pepper**, **Harwood Academic**, pp. 335–54
- Zhang, P., Rao, Y., Xie, Y., Zhang, M. (2021). Turbulent flow structure and heat transfer mechanisms over surface vortex structures of micro V-shaped ribs and dimples. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, 178(3), 121611.
- Zhang, Q. and Litchfield, J. B. (1991) “An optimization of intermittent corn drying in a laboratory scale thin layer dryer,” **Drying Technology: An International Journal**, vol. 9, pp. 383-395,



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 1. อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

### 1.1 Blower พัดลมแรงดันสูง Ventex ring blower



รายละเอียดของพัดลมอัดอากาศ

MODEL	2RB710-7AH16
Output	2.2 (KW)
Voltage at .50 Hz	200-240V/345-415Y (V)
Max. Air Flow (m <sup>3</sup> /min)	5.3
Max. Static Suction (mbar/mmAq)	210/2142
Max.Static Pressure (mbar/mmAq)	200/2040
Inlet & Outlet Diameter (inches)	2

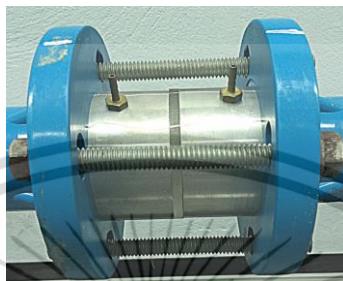
### 1.2 Inverter ชุดควบคุมความเร็วมอเตอร์เครื่องอัดอากาศ (ความละเอียด 0.1 Hz)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## อุปกรณ์วัดปรับค่าความเร็วมอเตอร์เครื่องอัดอากาศ ยี่ห้อ ABB

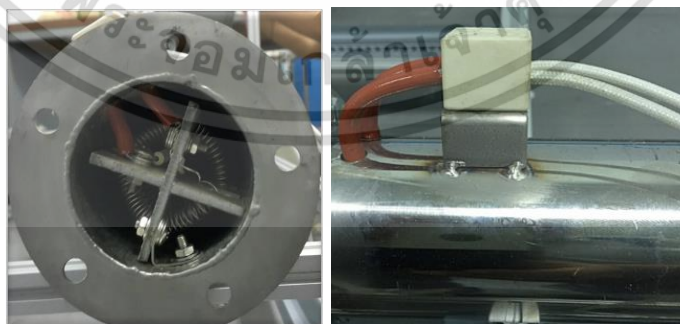
### 1.3 ออริฟิส (Orifice)



### 1.4 Pressure Differential ชุดวัดความดันอากาศยี่ห้อ Dwyer



### 1.5 ชุดให้ความร้อน (Heater) แบบขดลวดทองแดงให้ความร้อนขนาด 10 kW



ก. ด้านหน้า

ข. ด้านข้าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



### 1.6 RTD (Resistance Temperature Detector)

RTD เป็นทรานสดิวเซอร์ (transducer) วัดอุณหภูมิ โดยอาศัยหลักการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานไฟฟ้าของวัสดุ การทำงานต้องอาศัยแหล่งจ่ายไฟภายนอกป้อนให้กับวงจร โดยค่าความต้านทานไฟฟ้าของวัสดุและอุณหภูมิแสดงความสัมพันธ์แบบแปรผันตรง โดยเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นค่าความต้านทานของโลหะจะมีค่าสูงขึ้น RTD เป็นวัสดุที่ค่าสัมประสิทธิ์ความต้านทานสูง เพราะเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิไปเพียงเล็กน้อยค่าความต้านทานของโลหะจะเปลี่ยนแปลงอย่างชัดเจน

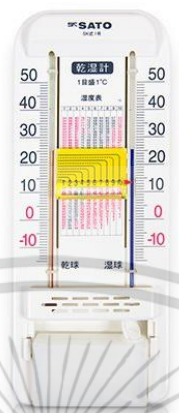


### 1.7 Temperature Control ชุดควบคุมอุณหภูมิยี่ห้อ TOHO TTM-i4N



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

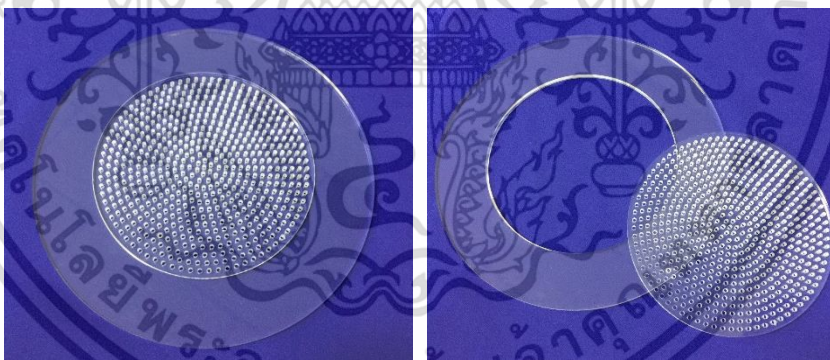
## 1.8 วัดค่าความชื้นสัมพัทธ์ (Relative Humidity)



ไซโครมิเตอร์ Psychrometer กระเปาะเปียกกระเปาะแห้ง แบบฐานพลาสติก ช่วงการวัด  $-10$  to  $50^{\circ}\text{C}$  สำหรับแขวนผนัง

## 1.9 แผ่นกระจายลม

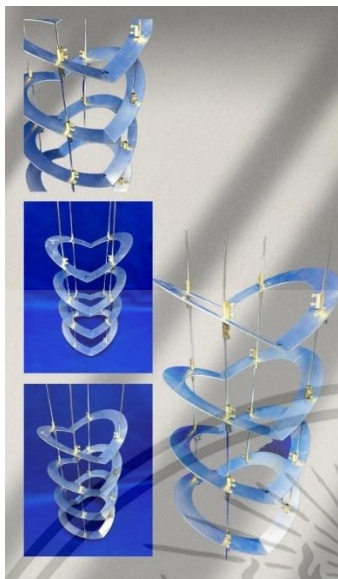
ทำจากอะคริลิก ที่เจาะรูตรง มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 2.5 มิลลิเมตร



## 1.10 อุปกรณ์แผ่นสร้างความปั่นป่วน

อุปกรณ์แผ่นสร้างความปั่นป่วนประกอบไปด้วยแผ่นกั้นที่จัดเรียงแบบขนาน จำนวน 4 แผ่นต่อชุด วัสดุทำจากแผ่นอลูมิเนียมขึ้นหนา 0.5 mm เจาะรู กว้าง 20 mm ถูกนำมาพับที่มุม  $30^{\circ}$ ,  $45^{\circ}$  และ  $60^{\circ}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



อุปกรณ์แผ่นสร้างความปั่นป่วนมุม =  $30^\circ$

จัดวางเรียงกันเป็นระยะห่าง 0.3, 0.5 และ 0.7 เท่าของ  
เส้นผ่านศูนย์กลางท่ออบแห้ง

อุปกรณ์แผ่นสร้างความปั่นป่วนมุม =  $45^\circ$

จัดวางเรียงกันเป็นระยะห่าง 0.3, 0.5 และ 0.7 เท่าของ  
เส้นผ่านศูนย์กลางท่ออบแห้ง



อุปกรณ์แผ่นสร้างความปั่นป่วนมุม =  $60^\circ$

จัดวางเรียงกันเป็นระยะห่าง 0.3, 0.5 และ 0.7 เท่า  
เส้นผ่านศูนย์กลางท่ออบแห้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



**รวมบทความฉบับเต็ม**

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 32






เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



## สารบัญ

บทความ		หน้า
ASM020	Exponential stability of switched dynamical systems with nonlinear perturbed and mixed time-varying delays via stable and unstable subsystem	1664
ASM022	Exponential H-infinity control of neural network with interval and distributed time-varying delays via feedback control	1669
ASM23	ปัญหาการจัดเส้นทางเดินรถที่มีเป้าหมายหลากหลาย	1679
HTE001	Numerical Study of Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -Water Nano fluid Flow and Heat Transfer in a Tube with Angled Rings	1686
HTE003	Heat Transfer and Uniformity of Swirling Impinging Jet on Flat Plate using Three-Start Spirally Twisted Nozzle	1692
HTE004	จลศาสตร์การอบแห้งของเมล็ดพริกไทยในเครื่องอบแห้งฟลูอิดเบดที่ติดตั้งอุปกรณ์แผ่นสร้างความปั่นป่วน	1703
HTE005	อิทธิพลของความสูงและตำแหน่งของปีกสี่เหลี่ยมต่อพฤติกรรมความดันตกคร่อมและการถ่ายเทความร้อนในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบครีป-ทอ	1711
HTE006	ผลของการบีบปาล์มน้ำมันให้แตกก่อนอบเพื่อเร่งอัตราการลดความชื้น	1723
HTE007	การประเมินสมรรถนะเชิงความร้อนของเครื่องปรับอากาศพลังแสงอาทิตย์ที่มีการติดตั้งตัวสร้างการไหลแบบบวอร์เท็กซ์ชนิดแผ่นกันเอียง	1729
HTE008	ศึกษาลักษณะการถ่ายเทความร้อนในท่อแลกเปลี่ยนความร้อนที่มีการสอดใส่แผ่นปิดคู่อิทธิพลของการลด/เพิ่มอัตราส่วนการบิด	1738
HTE009	ผลของอัตราการไหลของอากาศและการติดตั้งฉนวนกันความร้อนต่อการลดความร้อนสูญเสีย ของเครื่องอบแห้งเอนกประสงค์โดยใช้พลังงานชีวมวลสำหรับชุมชน	1748
HTE010	การเพิ่มการถ่ายเทความร้อนของแผ่นระนาบโดยใช้คลื่นเหนือเสียงความถี่ 20 kHz ที่ถูกปล่อยจากหัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียงแบบจุ่ม	1754
HTE011	การศึกษาพฤติกรรมการไหลและการถ่ายเทความร้อนในทอสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่มีการติดตั้งแผ่นกันรูปคลื่นไซน์	1766
HTE012	อิทธิพลของกลุ่มเจ็ทพุ่งชนต่อการกระจายตัวของการถ่ายเทความร้อนและความดันตกคร่อมในอุปกรณ์ผลิตอากาศร้อนพลังงานแสงอาทิตย์	1775
HTE013	ผลของความสูงห้องในห้องหัวฉีดที่มีต่อโครงสร้างเปลวไฟและการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทเปลวไฟแบบหมุนควง	1783
HTE014	การเปรียบเทียบการทำงานของเครื่องพาสเจอร์ไรซ์น้ำผลไม้ด้วยภาพถ่ายทางความร้อน	1791

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

HTE – 004

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 32  
3 – 6 กรกฎาคม 2561 จังหวัดมุกดาหาร



จลศาสตร์การอบแห้งของเมล็ดพริกไทยในเครื่องอบแห้งฟลูอิดซ์เบดที่ติดตั้งอุปกรณ์แผ่นสร้าง  
ความปั่นป่วน  
Drying kinetic of peppercorns in a fluidized-bed dryer equipped with baffle  
turbulators

เอกศณี บรรทมพร<sup>1</sup>, สมิทธิ์ เอี่ยมสอาด<sup>2</sup>, ชวัญชัย หนานนน<sup>3</sup> และ วรีสา ชูวัฒน์กุล<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> ภาควิชาวิศวกรรมอาหาร คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520

<sup>2</sup> ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร หนองจอก กรุงเทพฯ 10530

<sup>3</sup> ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบุรี อ.เมือง จ.เพชรบุรี 76000

\*ติดต่อ: E-mail: varesaaknmitl@gmail.com, โทรศัพท์: 02-329-8356-8 ต่อ 0, โทรสาร: 02-329-8356 ต่อ 13

**บทคัดย่อ**

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาจลศาสตร์การอบแห้งของเมล็ดพริกไทยในเครื่องอบแห้งฟลูอิดซ์เบดที่ติดตั้งอุปกรณ์แผ่นสร้าง  
ความปั่นป่วน (fluidized-bed dryer equipped with baffle turbulators : B-FBD) ที่ทำมุม 45 องศา ทำการเปรียบเทียบกับ  
เครื่องอบแห้งฟลูอิดซ์เบดแบบธรรมดา (typical fluidized-bed dryer : FBD) การทดสอบใช้อุณหภูมิอากาศร้อนทางเข้า  
เครื่องอบแห้ง ( $T_m$ ) ที่ 70, 80 และ 90 °C และความเร็วจำเพาะของอากาศ ( $U^*$ ) เท่ากับ  $1.2U_{mf}$ ,  $1.4U_{mf}$  และ  $1.6U_{mf}$  ใช้เวลา 120  
นาที การทดสอบแต่ละครั้งใช้เมล็ดพริกไทย 400 กรัม ที่มีความชื้นเริ่มต้นประมาณ 450% มาตรฐานแห้ง ผลการทดลองพบว่า  
เครื่องฟลูอิดซ์เบดที่ติดตั้งอุปกรณ์แผ่นกั้นสร้างการปั่นป่วน อุณหภูมิอากาศร้อนทางเข้าเครื่องอบแห้งที่ 80 °C และความเร็วจำ  
เพาะของอากาศเท่ากับ  $1.4U_{mf}$  มีความชื้นต่ำกว่าเครื่องอบแห้งฟลูอิดซ์เบดแบบธรรมดาถึง 35.7% ภายใต้เงื่อนไขเดียวกัน  
**คำหลัก:** เมล็ดพริกไทย, การอบแห้งแบบฟลูอิดซ์เบด, แผ่นสร้างการปั่นป่วน, สมบัติทางกายภาพและสมบัติทางเคมีของเมล็ด  
พริกไทย

**Abstract**

This research aims to study the characteristics of dried peppercorns in fluidized-bed equipped with baffle attack angle of modified degree 45°. The inlet hot air temperature for drying ( $T_m$ ) was 70, 80 and 90 °C. The specific air velocity ( $U^*$ ) was  $1.2U_{mf}$ ,  $1.4U_{mf}$  and  $1.6U_{mf}$  for 120 minutes of each batch. 400 gram of peppercorns were tested in each batch with an initial moisture content 450 %db As a result, it was found that the drying rate of the peppercorns in the fluidized-bed equipped with baffle tabulator at 45° attack angle, the inlet hot air temperature of 90°C and  $1.4U_{mf}$  of specific air velocity higher than the conventional fluidized-bed dryer up to 35.7% under the same conditions.

**Keywords:** peppercorn, fluidized-bed dryer, baffle turbulators, physical properties and chemical properties of peppercorn

**1. บทนำ**

พริกไทยเป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญของประเทศ  
สามารถสร้างรายได้ให้กับประเทศจากการส่งออกปีละ

50-70 ล้านบาท และมีแนวโน้มของราคาสูงขึ้นเรื่อยๆ  
ด้วยกำลังการผลิตเฉลี่ย 3.5 ล้านกิโลกรัมต่อปี [1]  
พริกไทยสามารถใช้ในการประกอบอาหารได้หลากหลาย

1703

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ประเภท ดังนั้นหลายๆ ประเทศทั่วโลกจึงใช้พริกไทยเป็นส่วนหนึ่งในการประกอบอาหาร นอกจากพริกไทยจะเป็นเครื่องเทศแล้ว ยังใช้แต่งกลิ่นอาหารเพราะในพริกไทยมีน้ำมันหอมระเหย ( Volatile Oil) อยู่ 2-4 เปอร์เซ็นต์ [2] ซึ่งพริกไทยดำมีน้ำมันหอมระเหยสูงกว่าพริกไทยอ่อนทำให้อาหารมีรสชาติชวนรับประทานและพริกไทยยังมีส่วนช่วยในการถนอมอาหาร ทำให้อาหารที่ใช้พริกไทยปรุงนั้นเก็บไว้ได้นานขึ้น นอกจากนี้ยังมีคุณสมบัติทางด้านเภสัชวิทยา ใช้เป็นสารกระตุ้นการหลั่งกรดในกระเพาะอาหาร ลดระดับน้ำตาลในเลือด บรรเทาอาการปวดกล้ามเนื้อและข้อต่อ และยับยั้งการกระจายของเซลล์มะเร็ง แต่ทั้งนี้ในการเก็บรักษาเมล็ดพริกไทยสดนั้นมีความจำกัดเนื่องจากพริกไทยเป็นพืชเศรษฐกิจที่ต้องการส่งออกและให้มีใช้ตลอดทั้งปี จึงมีการนำเทคนิคในการถนอมอาหารมาประยุกต์กับการถนอมเมล็ดพริกไทยโดยการอบแห้ง (Drying) ซึ่งเป็นวิธี ลดความชื้นของวัตถุดิบ โดยการระเหยน้ำออก ซึ่งอุณหภูมิที่ระเหยน้ำออกจากวัตถุดิบนั้นอาจจะไม่ต้องระเหยที่จุดเดือดแต่ใช้อากาศพัดผ่านวัตถุดิบเพื่อดึงน้ำออกมา ทำให้ปริมาณน้ำในวัตถุดิบนั้นลดลง วิธีการอบแห้งที่ใช้อย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมมีอยู่ 2 วิธี คือ การอบแห้งที่ให้เมล็ดพืชอยู่กับที่ ตัวอย่างเช่น การอบแห้งแบบถาด (Tray Drying) และการอบแห้งที่เมล็ดพืชเคลื่อนที่ ยกตัวอย่างเช่น การอบแห้งเทคนิคฟลูอิดไชเบต (Fluidized bed dryer) ผลของการอบแห้งแบบถาด (Tray Drying) ลักษณะเมล็ดพริกไทยที่ได้จะไม่มีความสม่ำเสมอ เนื่องจากอัตราการอบแห้งไม่เท่ากันทั่วทั้งผิวสัมผัส จึงส่งผลให้ส่วนที่สัมผัสกับอากาศร้อนมากกว่าระเหยน้ำในส่วนนั้นได้มากกว่าและยุบตัวลงไป ส่วนการอบแห้งด้วยเทคนิคฟลูอิดไชเบตเป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการทำแห้งใช้อากาศร้อนเป่าผ่านชั้นวัตถุดิบ (bed) ทำให้วัสดุลอยตัวอย่างเป็นอิสระ เกิดการผสมกับอากาศร้อนอย่างสม่ำเสมอทั่วทั้งผิวสัมผัส ทำให้ลักษณะเมล็ดพริกไทยที่ได้มีความสม่ำเสมอ ภายใต้อัตราการถ่ายเทความร้อนและมวลสูง และอัตราการไหล

ของอากาศที่ต่ำ ทำให้ประหยัดพลังงานในการอบแห้งสามารถลดความชื้นของวัตถุดิบได้อย่างรวดเร็ว ซึ่งเหมาะสมกับวัตถุดิบที่มีขนาดรูปร่างสม่ำเสมอ เช่น ทรงกลมของเมล็ดพริกไทย [3]

จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับจุลศาสตร์ของ Promvong และคณะ [4] ศึกษาการอบแห้งของเมล็ดพริกไทยด้วยเครื่องฟลูอิดไชเบตทรงสี่เหลี่ยมแบบธรรมดาและที่ติดตั้งผนังผิวคลื่น ที่อุณหภูมิ  $T_m = 60^{\circ}\text{C}$ ,  $80^{\circ}\text{C}$  และ  $90^{\circ}\text{C}$  ความเร็วจำเพาะ  $U^* = 1.2$  และ  $2.0$  พบว่าเครื่องฟลูอิดไชเบตที่ติดตั้งผนังผิวคลื่นให้อัตราการทำแห้งสูงกว่าเครื่องฟลูอิดไชเบตแบบธรรมดา 29%, 36% และ 43% สำหรับ blockage ratios = 0.3125, 0.3750 and 0.4375 ตามลำดับ Özbey และ Söylemez [5] ศึกษาการอบแห้งเมล็ดข้าวสาลี ด้วยเทคนิคฟลูอิดไชเบตโดยตัวกลางในการอบแห้งมีลักษณะแบบหมุนวน พบว่าอิทธิพลของการหมุนแบบหมุนวนเพิ่มค่าสมรรถนะ 38 % การดูดซับความชื้นมีค่าเพิ่มมากขึ้น 5 - 25% เมื่อเปรียบเทียบกับกรอบแห้งที่ใช้เทคนิคทั่วไป Yujji และคณะ [6] ได้ทำการศึกษาวิธีการอบแห้งแครอท โดยทำการลดความชื้นเบื้องต้นเป็นปรับสภาพแครอทที่ อุณหภูมิต่ำกว่า  $-40^{\circ}\text{C}$  ความชื้นเริ่มต้น 9.8-10.2 kg-water/kg-dry solid เป็นเวลา 10 ชั่วโมง จึงนำมาด้วยเทคนิคฟลูอิดไชเบตแบบลมร้อนและไอน้ำร้อนยิ่งยวด โดยใช้ความดันที่ 101 kPa และ 12kPa ผลจากการทดลองปรากฏว่าภายใต้ความดันที่ลดลงโดยผลิตภัณฑ์ตัวอย่างไม่ละลายทำให้ประสบความสำเร็จในการปรับสภาพอัตราการอบแห้งแครอทได้ดีกว่าวิธีที่ไม่ได้รับการปรับสภาพ ซึ่ง 12 kPa มีอัตราการการอบแห้งสูงกว่าความดันบรรยากาศวิธีนี้สามารถนำมาใช้สำหรับกรอบแห้งวัสดุที่ไวต่อความร้อนเช่นอาหารและสินค้าเกษตร

จากงานวิจัยที่กล่าวมาข้างต้นพบว่าพฤติกรรมของของไหลส่งผลต่ออัตราการอบแห้งเป็นอย่างมากจึงทำการศึกษาและพัฒนาชุดสร้างการไหลแบบปั่นป่วนเพื่อติดตั้งในเครื่องอบแห้งฟลูอิดไชเบต เป็นการเพิ่ม

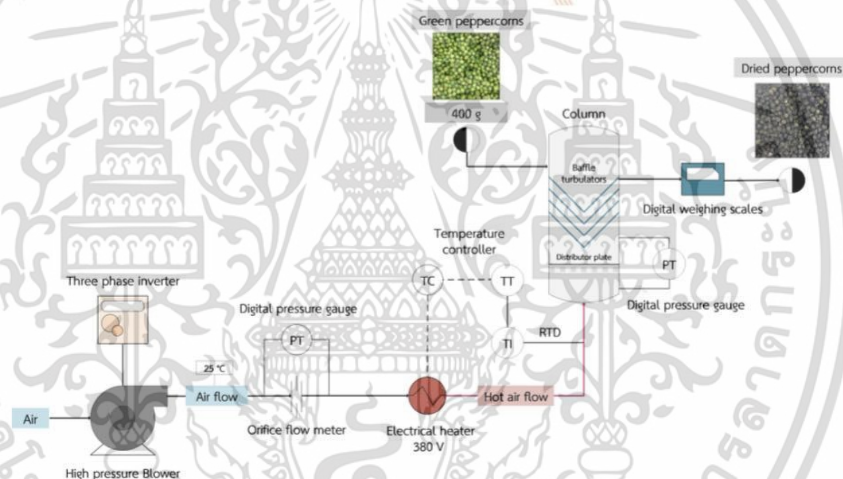


ความสามารถในการกระจายความร้อนและการถ่ายเทมวลภายในกับเครื่องอบแห้ง โดยศึกษาพฤติกรรมการอบแห้งเมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงความเร็วและอุณหภูมิของอากาศทางเข้าสำหรับเครื่องฟลูอิดซ์เบดแบบธรรมดาและนำมาเปรียบเทียบกับเทคนิคสร้างการไหลแบบปั่นป่วน

## 2. ทฤษฎี

การอบแห้งของวัตถุดิบเป็นกระบวนการที่เกี่ยวข้องกับการถ่ายเทความร้อนและมวลของปริมาณน้ำที่มีอยู่ในวัตถุดิบ Yilbas และคณะ [7] พิจารณาเฉพาะความ

ต้านทานภายนอกต่อการถ่ายโอนความร้อนระหว่างวัตถุดิบกับอากาศร้อน ในรูปแบบการอบแห้ง สำหรับการวิเคราะห์จะอาศัยสมการที่มีความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นและเวลาในการอบแห้ง ความชื้นมาตรฐานแห้ง ( $M_d$ ) เป็นค่าที่บ่งบอกถึงปริมาณของน้ำที่มีอยู่ในวัตถุดิบโดยมวลแห้งของวัตถุจะมีค่าคงที่ตลอดการอบแห้งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (1) อัตราส่วนความชื้น ( $MR$ ) คือ อัตราส่วนความชื้นที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาการอบแห้ง สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2) และความเร็วในการอบแห้งหรืออัตราการอบแห้ง ( $DR$ ) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (3) [7-8]



รูปที่ 1 แผนภาพชุดทดลองการอบแห้งของเมล็ดพริกไทยในเครื่องอบแห้งฟลูอิดซ์เบดที่ติดตั้งอุปกรณ์แผ่นสร้างความปั่นป่วน

$$M_d = \frac{(w-d)}{d} \times 100\% \quad (1)$$

$$MR = \frac{(M_t - M_c)}{(M_i - M_c)} \times 100\% \quad (2)$$

$$DR = \frac{dM}{dt} = \frac{(M_{i,M} - M_t)}{dt} \quad (3)$$

## 3. อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

### 3.1 เมล็ดพริกไทย

เมล็ดพริกไทยที่ใช้เป็นพันธุ์จันทบุรี ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ  $4.5 \pm 0.5$  มิลลิเมตร และมีความชื้นเริ่มต้นเท่ากับ  $450 \pm 5$  %db AAC [9] อบแห้งด้วยตู้อบ  $105^\circ\text{C}$  เป็นเวลา 48 ชั่วโมง ก่อนทดลองจะนำตัวอย่างที่



ถูกเก็บไว้ที่อุณหภูมิ 4°C ออกจากตู้เย็นและปล่อยให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง (ประมาณ 25°C)

### 3.2 อุปกรณ์การทดลอง

เครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดเบดแสดงดังรูปที่ 1 ประกอบไปด้วยอุปกรณ์ดังต่อไปนี้ (1) โบเวอร์, (2) ชุดควบคุมความเร็วอากาศ, (3) เครื่องวัดอัตราการไหลของอากาศ, (4) เครื่องวัดความแตกต่างของความดัน, (5) เครื่องให้ความร้อน, (6) เครื่องวัดอุณหภูมิ, (7) ชุดควบคุมอุณหภูมิ, (8) เครื่องวัดความแตกต่างของความดัน, (9) หอบแห้ง โดยมีลักษณะเป็นทรงกระบอกทำมาจากอะคริลิกใส เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน เท่ากับ 14 เซนติเมตร ความหนา 0.5 เซนติเมตร มีความสูงเท่ากับ 100 เซนติเมตร, (10) ชุดแผ่นสร้างความปั่นป่วน และ (11) เครื่องชั่งน้ำหนักแบบดิจิตอล



รูปที่ 2 อุปกรณ์แผ่นสร้างความปั่นป่วน

อุปกรณ์แผ่นสร้างความปั่นป่วนประกอบไปด้วยแผ่นกั้นที่จัดเรียงแบบขนานทำมุม 45° จำนวน 4 แผ่น วัสดุทำจากแผ่นอลูมิเนียมขึ้นหนา 0.5 mm เจาะรู กว้าง 20 mm ถูกลำมาพับที่มุม 45° จัดวางเรียงกันเป็นระยะห่าง 1.5 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางของหอบแห้ง

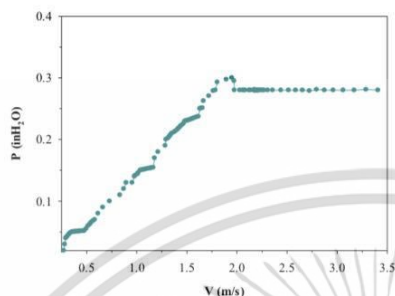
### 3.3 วิธีการทดลอง

#### 3.3.1 การหาค่าความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดเซชัน (Minimum velocity of fluidization : $U_{mf}$ )

ทำการสอบเทียบบอริฟิกโดยการวัดความแตกต่างของความดันด้วยเครื่องวัดความดันตกรวมแบบดิจิตอล และเครื่องวัดความเร็วลม เพื่อวัดความเร็วของอากาศ ใส่เมล็ดพริกไทยลงไปนหอบแห้ง เปิดโบเวอร์พร้อมปรับความเร็วรอบของมอเตอร์ไปที่ความเร็วรอบต่ำๆ ด้วยอินเวอร์เตอร์ เพื่อให้ความเร็วของอากาศที่จะเข้าสู่หอบแห้งต่ำที่สุด วัดความแตกต่างของความดันที่ตำแหน่งได้แผ่นกระจายลมและเหนือวัตถุภายในหอบแห้ง ด้วยเครื่องวัดความดันตกรวมแบบดิจิตอล เพิ่มความเร็วรอบมอเตอร์ครั้งละ 0.1 Hz เพื่อให้ได้ค่าความเร็วของอากาศทางเข้าละเอียดที่สุด และนำผลมาวิเคราะห์ระหว่างความแตกต่างของความดันและความเร็วของอากาศทางเข้าในหอบแห้งดังรูปที่ 3 เมื่อพิจารณาจากรูปที่ 3 จะพบว่าเมื่อความเร็วของอากาศเพิ่มขึ้นจะทำให้ความแตกต่างของความดันเพิ่มมากขึ้น จนกระทั่งถึงความเร็วเท่ากับ 1.97 m/s ความแตกต่างของความดันกลับมีค่าลดลง นั่นจึงเป็นความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดเซชัน

#### 3.3.2 ขั้นตอนการทดลองการอบแห้งเมล็ดพริกไทย

เปิดโบเวอร์พร้อมปรับอินเวอร์เตอร์เพื่อให้ได้ความเร็วของอากาศทางเข้าตามที่ต้องการ เปิดฮีตเตอร์และตั้งอุณหภูมิไว้ในช่วงการทดสอบ โดยเป็นอุณหภูมิที่วัดตรงทางเข้าของหอบแห้ง เมื่ออุณหภูมิถึงค่าที่ตั้งไว้แล้ว (ประมาณ 30-50 วินาที) ใส่เมล็ดพริกไทยลงในหอบแห้ง โดยชั่งน้ำหนักก่อนการทดลอง แล้ววางบนชุดทดลอง นำหอบแห้งออกมาชั่งน้ำหนักทุกๆ 5 นาที เป็นเวลา 120 นาที เพื่อหาปริมาณของน้ำที่หายไปด้วยเครื่องชั่งน้ำหนักดิจิตอลที่มีความละเอียด 0.05 กรัม ดำเนินการทดลองตามขั้นตอนที่กล่าวมาอีกครั้ง โดยแต่ละครั้งเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ความเร็ว อุปกรณ์ที่ติดตั้งเพื่อสร้างการไหลแบบปั่นป่วน และทำการทดลองซ้ำอีก 3 ครั้ง



รูปที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างความแตกต่างของความดันและความเร็วของอากาศทางเข้าหอบแห้ง

#### 4. ผลการทดลอง

สามารถแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ได้แก่ ผลของอิทธิพลของความเร็วลมของอากาศและผลของอุณหภูมิของอากาศที่ใช้ในการอบแห้งต่ออัตราการอบแห้ง

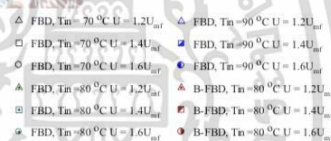
##### 4.1 อิทธิพลของความเร็วอากาศ

ในส่วนของการทดสอบความเร็วของอากาศที่แตกต่างกัน 3 ระดับ ( $U^* = 1.2U_{mf}$ ,  $1.4U_{mf}$  และ  $1.6U_{mf}$ ) ดังรูปที่ 4-6 สำหรับเครื่องอบแห้งฟลูอิดเบดแบบธรรมดา (FBD) พบว่า อิทธิพลของความเร็วไม่ส่งผลต่ออัตราการอบแห้งของเมล็ดพริกไทย แต่ในเครื่องอบแห้งฟลูอิดเบดที่ติดตั้งอุปกรณ์แผ่นสร้างความปั่นป่วน (B-FBD) พบว่าที่อุณหภูมิอบแห้ง  $80^\circ\text{C}$  ดังแสดงในรูปที่ 6 เมื่อความเร็วเพิ่มขึ้นทำให้ความชื้นของเมล็ดพริกไทยลดลง เนื่องจากการติดตั้งอุปกรณ์ที่ทำให้เกิดการปั่นป่วน จึงทำให้เกิดการผสมกันระหว่างวัตถุดิบกับกระแสของอากาศร้อนได้ดีขึ้น ทำให้น้ำในตัววัตถุดิบแพร่ออกมายังผิวและระเหยกลายเป็นไอ ซึ่งความเร็วในการอบแห้งที่เพิ่มมากขึ้น ทำให้เกิดการพาความร้อนออกจากผิวของวัตถุดิบได้ในปริมาณสูงในเวลาการอบแห้งที่เท่ากัน ความชื้นในตัววัตถุดิบจึงลดลง แต่ความเร็วที่ส่งผลต่อความชื้นมากที่สุดคือ  $1.4U_{mf}$  ให้ค่าความชื้นของเมล็ดพริกไทยต่ำที่สุด โดยต่ำกว่า  $1.2U_{mf}$  และ  $1.6U_{mf}$  เท่ากับ 35.7% และ 18.6% ตามลำดับ เนื่องจากเป็นความเร็วที่เหมาะสมที่สุดที่ทำให้เกิดการแลกเปลี่ยนความร้อนกับความชื้นจาก

อากาศร้อนและเมล็ดพริกไทย โดยความเร็วที่เหมาะสมจะทำให้ภายในหอบแห้งเกิดการไหลแบบปั่นป่วนและสามารถเหนี่ยวนำเอากระแสของอากาศร้อนจากบริเวณรอบเข้มายังรัศมีเพื่อทำการแลกเปลี่ยนพลังงาน

##### 4.2 อิทธิพลของอุณหภูมิอากาศทางเข้า

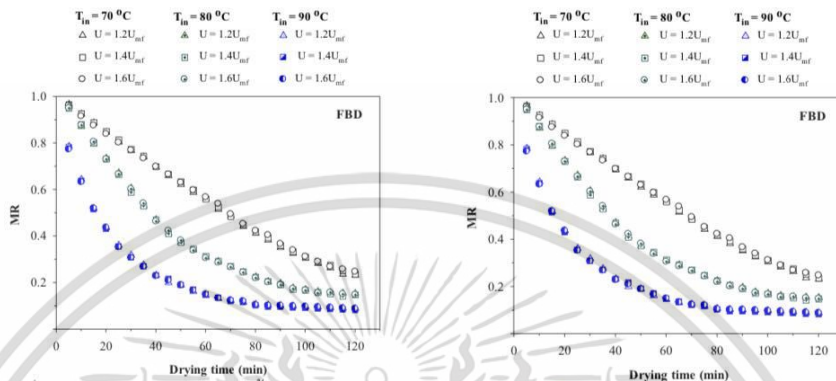
การเปรียบเทียบอิทธิพลของอุณหภูมิในการทดสอบด้วยเครื่องอบแห้งฟลูอิดเบดแบบธรรมดา (FBD) ที่  $T_{in}$  เท่ากับ  $70^\circ\text{C}$ ,  $80^\circ\text{C}$  และ  $90^\circ\text{C}$  ดังแสดงในรูปที่ 7-9 พบว่าที่อุณหภูมิของอากาศเพิ่มมากขึ้นทำให้ความชื้นของเมล็ดพริกไทยลดลง โดยที่อุณหภูมิ  $90^\circ\text{C}$  จะทำให้ความชื้นของเมล็ดพริกไทยต่ำสุดโดยต่ำกว่า 55% และ 29% สำหรับอุณหภูมิ  $70^\circ\text{C}$  และ  $80^\circ\text{C}$  ตามลำดับ เนื่องจากอุณหภูมิสูงทำให้วัตถุดิบมีพลังงานสะสมภายในตัวสูง จึงเกิดการสั่นที่รุนแรงหรือมีพลังงานจลน์สูงทำให้น้ำภายในตัววัตถุดิบเกิดการเคลื่อนที่ออกมาได้อย่างรวดเร็ว



รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นมาตรฐานแห้งและเวลา

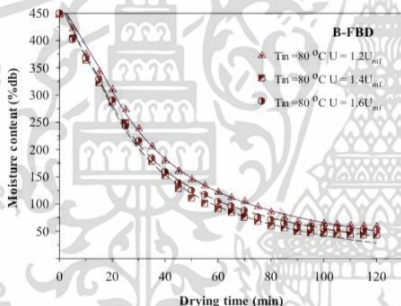
HTE – 004

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 32  
3 – 6 กรกฎาคม 2561 จังหวัดมุกดาหาร

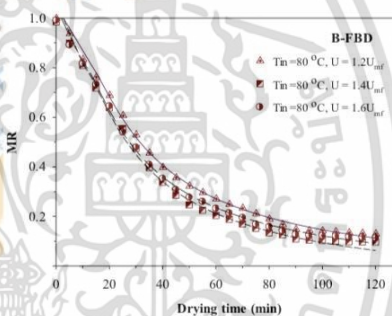


รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นมาตรฐานแห้งและเวลาที่ใช้ในการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งฟลูอิดซ์เบดแบบธรรมดา (FBD)

รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นต่อเวลาการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งฟลูอิดซ์เบดแบบธรรมดา



รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นมาตรฐานแห้งและเวลาที่ใช้ในการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งฟลูอิดซ์เบดที่ติดตั้งอุปกรณ์แผ่นสร้างความปั่นป่วน (B-FBD)

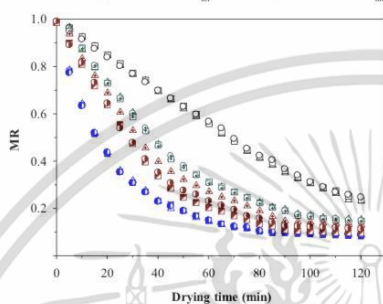


รูปที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นต่อเวลาการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งฟลูอิดซ์เบดที่ติดตั้งอุปกรณ์แผ่นสร้างความปั่นป่วน (B-FBD)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



$\Delta$  FBD,  $T_{in} = 70^\circ\text{C}$   $U = 1.2U_{mf}$      $\Delta$  FBD,  $T_{in} = 90^\circ\text{C}$   $U = 1.2U_{mf}$   
 $\square$  FBD,  $T_{in} = 70^\circ\text{C}$   $U = 1.4U_{mf}$      $\blacksquare$  FBD,  $T_{in} = 90^\circ\text{C}$   $U = 1.4U_{mf}$   
 $\circ$  FBD,  $T_{in} = 70^\circ\text{C}$   $U = 1.6U_{mf}$      $\bullet$  FBD,  $T_{in} = 90^\circ\text{C}$   $U = 1.6U_{mf}$   
 $\blacktriangle$  FBD,  $T_{in} = 80^\circ\text{C}$   $U = 1.2U_{mf}$      $\blacktriangle$  B-FBD,  $T_{in} = 80^\circ\text{C}$   $U = 1.2U_{mf}$   
 $\boxtimes$  FBD,  $T_{in} = 80^\circ\text{C}$   $U = 1.4U_{mf}$      $\boxtimes$  B-FBD,  $T_{in} = 80^\circ\text{C}$   $U = 1.4U_{mf}$   
 $\odot$  FBD,  $T_{in} = 80^\circ\text{C}$   $U = 1.6U_{mf}$      $\odot$  B-FBD,  $T_{in} = 80^\circ\text{C}$   $U = 1.6U_{mf}$



รูปที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นต่อเวลาการอบแห้ง

#### 5. สรุปผลการทดลอง

อิทธิพลของความเร็ว สำหรับความเร็วของอากาศเท่ากับ  $1.4U_{mf}$  เป็นความเร็วที่เหมาะสมในการอบแห้งเมล็ดพริกไทยด้วยเครื่องอบแห้งฟลูอิดไซเบดที่ติดตั้งอุปกรณ์แผ่นสร้างความปั่นป่วน (B-FBD) ทำให้ความชื้นต่ำสุดเท่ากับ 43% มาตรฐานแห้ง

ที่อุณหภูมิการอบแห้งเดียวกัน เครื่องอบแห้งฟลูอิดไซเบดที่ติดตั้งอุปกรณ์แผ่นสร้างความปั่นป่วน (B-FBD) ให้ความชื้นที่ต่ำกว่าเครื่องอบแห้งฟลูอิดไซเบดแบบธรรมดาทุกๆ กรณีและต่ำกว่า 35.7%

#### 6. สัญลักษณ์

$M_d$  คือ ความชื้นมาตรฐานแห้ง (%)

$w$  คือ มวลของวัตถุ (kg)

$d$  คือ มวลของวัตถุแห้ง (kg)

$MR$  คือ อัตราส่วนความชื้น (-)

$M_t$  คือ ความชื้นที่เวลาใดๆ (kg)

$M_i$  คือ ความชื้นเริ่มต้น (kg)

$T_{in}$  คือ อุณหภูมิอากาศร้อนทางเข้าเครื่องอบแห้ง ( $^\circ\text{C}$ )

$U^*$  คือ ความเร็วจำเพาะของอากาศ

$U_{mf}$  คือ ความเร็วต่ำสุดของการเกิดฟลูอิดไซเบด

#### 7. เอกสารอ้างอิง

- [1] ศูนย์วิจัยพืชสวนจันทบุรี สถาบันวิจัยพืชสวน กรมวิชาการเกษตร, เพิ่มประสิทธิภาพการผลิตพริกไทยเพื่อลดผลกระทบจากการเปิดเสรีทางการค้า (FTA), หน้า 2
- [2] PrincessFangy. คุณค่าทางด้านโภชนาการของพริกไทย [Online] Available: [www.thaihealth.or.th/Content/สืบค้นวันที่ 2 ส.ค. 2559](http://www.thaihealth.or.th/Content/สืบค้นวันที่ 2 ส.ค. 2559)
- [3] การถนอมอาหารในสมัยโบราณ. สารานุกรมไทยสำหรับเยาวชน โดยพระราชประสงค์ของพระบาทสมเด็จพระเจ้าอยู่หัว [Online] Available: <http://kanchanapisek.or.th/สืบค้นวันที่ 2 ส.ค. 2559>
- [4] Promvoge P., Boonloi A., Pisam M. and Thianpong C. (2011). Drying characteristics of percoms in a rectangular fluidized-bed with triangular wavy walls, International Communication in Heat and Mass Transfer, Vol. 38, 2011, pp. 1239-1246.
- [5] Özbeý M. and Söylemez M.S. (2005). Effect of swirling flow on fluidized bed drying of wheat grains, Energy Conversion and Management, Vol.46, June 2005, pp. 1495-1512.
- [6] Tatemotoa Y., Mibub T., Yokoib Y. and Hagimotoa A. (2016). Effect of freezing pretreatment on the drying characteristics and volume change of carrots immersed in a fluidized bed of inert particles under reduced pressure, Journal of Food

HTE – 004

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 32  
3 – 6 กรกฎาคม 2561 จังหวัดนุกดาหาร



Engineering, V. 173, March 2016, pp. 150-157.

- [7] Yilbas B.S., Hussain M.M. and Dincer I. (2003). Heat and moisture diffusion in slab products due to convective boundary condition, Heat and Mass Transfer 39, pp. 471–476.
- [8] Özdemir M. and Devres Y. O. (1999). The thin layer drying characteristics of hazelnuts during roasting, Journal of Food Engineering, vol. 42, pp. 225-233.
- [9] AACC -International, (1999). Method 44-15 Moisture--air Oven Methods. Approved Methods of the American Association of Cereal Chemists (St. Paul, MN, USA)

1710

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล	นางสาวเกษมณี บรรทมพร
วัน เดือน ปีเกิด	25 พฤษภาคม 2534
	199 หมู่ 8 บ้านหนองนาคำ ตำบลบ้านโคก อ.หนองนาคำ จ.ขอนแก่น 40150
ประวัติการศึกษา	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเคมี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร
ผลงานทางวิชาการ	ปี 2561 “จลศาสตร์การอบแห้งของเมล็ดพริกไทยในเครื่องอบแห้งฟลูอิดซ์เบดที่ติดตั้งอุปกรณ์แผ่นสร้างความปั่นป่วน” การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 32 (ME-NETT2018) วิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ปี 2559 “Drying Behavior of Fluidized Bed Dried Peppercorns” 4 <sup>th</sup> annual International Conference on Material Science and Environmental Engineering [MSEE2016], Walter de- Gruyter GmbH, Berlin/Munich/Boston