

การอบแห้งพริกไทยในเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไรซ์เบดที่ติดตั้ง
อุปกรณ์สร้างความปั่นป่วน: การศึกษาเชิงทดลอง

PEPPER DRYING IN A FLUIDIZED BED DRYER INSTALLED
WITH TURBULATORS: AN EXPERIMENTAL STUDY



การค้นคว้าอิสระนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมอาหารและเกษตรอัจฉริยะ
คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2566

KMITL-2023-EN-M-270-130

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

PEPPER DRYING IN A FLUIDIZED BED DRYER INSTALLED
WITH TURBULATORS: AN EXPERIMENTAL STUDY



ATHIWAT THANATESIRIPONG

AN INDEPENDENT STUDY SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF ENGINEERING IN FOOD AND AGRICULTURAL INTELLIGENCE ENGINEERING
SCHOOL OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
YEAR 2023

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2023

SCHOOL OF ENGINEERING

KING MONKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อการค้นคว้าอิสระ	การอบแห้งพริกไทยในเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไชน์เบดที่ติดตั้งอุปกรณ์สร้างความปั่นป่วน: การศึกษาเชิงทดลอง
นักศึกษา	นายอริวัฒน์ ธเนศสิริพงศ์
รหัสประจำตัว	63601164
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมอาหารและเกษตรอัจฉริยะ
พ.ศ.	2566
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วริสา ชูวัฒนกุล

บทคัดย่อ

การศึกษาผลการทดลองที่เปลี่ยนแปลงไปของพริกไทยเมื่อติดตั้งอุปกรณ์สร้างความปั่นป่วนในเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไชน์เบด การทดลองกำหนดความเร็วของอากาศภายในหอเบดที่ $1.2U_{mf}$ $1.4U_{mf}$ และ $1.6U_{mf}$ โดย U_{mf} คือ ความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดไชน์เซชัน เท่ากับ 14.2 เมตร/วินาที อัตราส่วนระยะห่างของอุปกรณ์สร้างความปั่นป่วนต่อความสูงของเบด (P/h) เท่ากับ 0.5 1.0 และ 1.5 การทดลองแต่ละครั้งใช้เมล็ดพริกไทยอ่อนปริมาณ 400 กรัม ความชื้นเริ่มต้น 393% (มาตรฐานแห้ง) อุณหภูมิของอากาศเข้า 80 °C ระยะเวลาการอบแห้ง 180 นาที ซึ่งน้ำหนักเมล็ดพริกไทยทุก 10 นาที เพื่อหาปริมาณความชื้น พิจารณาคุณภาพของพริกไทยหลังการอบแห้งดังนี้ ค่าสี ค่าวอเตอร์แอกติวิตี และปริมาณพิเพอริน จากการทดลองพบว่า ที่ P/h เท่ากับ 0.5 ให้อัตราการอบแห้งสูงที่สุด ส่วนความเร็วของอากาศที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้อัตราการอบแห้งในช่วงแรกเพิ่มขึ้น เมื่อผ่านไประยะเวลาหนึ่ง อัตราการอบแห้งจะลดลงไปตามระยะเวลา จากการวิเคราะห์ค่าสี (L^* a^* b^*) พบว่า P/h และความเร็วของอากาศที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่า L^* และ a^* มีแนวโน้มลดลง ส่วน ค่า b^* มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ค่าวอเตอร์แอกติวิตี (a_w) มีเพียง P/h เท่ากับ 0.5 เท่านั้น ที่ค่า a_w ต่ำกว่า 0.6 โดยที่ความเร็วของอากาศไม่ส่งผลต่อค่า a_w สุดท้ายของพริกไทย ในส่วนของปริมาณพิเพอริน มีเพียง P/h เท่ากับ 0.5 ที่มีปริมาณร้อยละของน้ำหนักพริกไทยน้อยกว่า 4.0 ตามที่มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมพริกไทยกำหนด เมื่อ P/h เพิ่มขึ้น ปริมาณพิเพอรินจะเพิ่มขึ้น สวนทางกับความเร็วของอากาศที่เพิ่มขึ้น จากการทดลองการอบแห้งด้วยเทคนิคฟลูอิดไชน์เบด ผลปรากฏว่า การติดตั้งอุปกรณ์สร้างความปั่นป่วนแสดงให้เห็นว่าได้ประสิทธิภาพในการลดความชื้น มีอัตราการอบแห้งที่เร็วกว่าเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไชน์เบดแบบดั้งเดิมสูงสุดถึง 33.3%

Independent Study PEPPER DRYING IN A FLUIDIZED BED DRYER INSTALLED WITH TURBULATORS: AN EXPERIMENTAL STUDY

Student Mr. Athiwat Thanatesiripong

Student ID 63601164

Degree Master of Engineering

Program Food and Agricultural Intelligence Engineering

Year 2023

Independent Study Advisor Asst. Prof. Dr. Varesa Chuwattanakul

ABSTRACT

This research investigates the effects of turbulators installation in a fluidized bed dryer on the drying characteristics and quality attributes of pepper seeds. The experiment involves determining the air velocities within the bed chamber at $1.2U_{mf}$, $1.4U_{mf}$ and $1.6U_{mf}$, where U_{mf} corresponds to the minimum fluidization velocity of 14.2 m/s. Additionally, three different pitch ratios per bed height (P/h) of 0.5, 1.0 and 1.5 were employed for each trial. The initial moisture content of the 400 grams of pepper seeds was 393% (dry basis) and the inlet air temperature was maintained at 80 °C for a duration of 180 minutes. Moisture content was monitored by weighing the pepper seeds every 10 minutes during the drying process. The investigation revealed that a P/h of 0.5 resulted in the highest drying rate among the different P/h tested. Furthermore, increasing the air velocity led to an elevated initial drying rate, followed by a gradual decline over time. The color analysis (L^* , a^* , b^*) indicated that higher P/h and air velocities contributed to a decrease in L^* and a^* values, while b^* values tended to increase. Water activity (a_w) measurements indicated that only at P/h of 0.5, the a_w was below 0.6, and air velocity did not significantly affect the final a_w value of the dried pepper. However, with respect to piperine content, P/h of 0.5 resulted in a level below the pepper industry standards (less than 4.0% by weight). As P/h increased, the piperine content in the pepper also increased, irrespective of air velocity variations. Comparing the fluidized bed dryer that installed turbulators with

the traditional fluidized bed dryer, the results showed that the installation of the turbulators significantly improved the dehumidification efficiency, achieving up to 33.3% faster drying rates.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

การค้นคว้าอิสระฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.วรีสา ชูวัฒนกุล ที่ให้ความอนุเคราะห์รับเป็นอาจารย์ที่ปรึกษา ให้คำปรึกษา แนะนำ และให้การช่วยเหลือในการทำ การค้นคว้าอิสระ รวมถึงสอนวิธีการทำงานที่ดีทำให้ผู้วิจัยรู้จักพัฒนาตนเองในด้านการงานให้ดียิ่งขึ้น

ขอขอบคุณคณะกรรมการสอบการค้นคว้าอิสระที่ให้คำแนะนำและแนวทางในการปรับปรุง รายงานการค้นคว้าให้มีความสมบูรณ์มากขึ้น ขอขอบคุณคณาจารย์คณะวิศวกรรมศาสตร์สถาบัน เทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังทุกท่าน ที่สั่งสอนวิชาความรู้ถ่ายทอดประสบการณ์ ต่าง ๆ และนำความรู้เหล่านั้นมาใช้ในการทำวิจัยนี้ ขอขอบคุณรศ.ดร.สมิทธิ์ เอี่ยมสอาด ผศ.ดร.อาณัติ พิลา และผศ.ดร.ปรัชญา สรรวยสินธุ์ อาจารย์มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร สาขาวิศวกรรมเครื่องกลที่ได้กรุณาให้คำแนะนำตลอดจนข้อชี้แนะที่เป็นประโยชน์ต่อการทำวิจัย กระทั่งการค้นคว้าอิสระสำเร็จลุล่วง

ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมอาหาร สำหรับคุณประโยชน์และคุณงามความดีอันใดที่เกิดจาก การค้นคว้าอิสระฉบับนี้ข้าพเจ้าขอบใจให้อาจารย์ที่ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ให้แก่ข้าพเจ้ามาตลอด จนถึงทุกวันนี้

อธิวัฒน์ ธเนศสิริพงศ์

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	IV
สารบัญ.....	V
สารบัญตาราง.....	VIII
สารบัญรูป.....	IX
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	2
1.3 ขอบเขตการศึกษา.....	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 การทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1.1 พริกไทย.....	4
2.1.2 พิเพอร์รีน.....	5
2.2 การอบแห้ง.....	5
2.2.1 เครื่องอบแห้งแบบถัง.....	6
2.2.2 เครื่องอบแห้งแบบถาด.....	6
2.2.3 เครื่องอบแห้งแบบอุโมงค์.....	6
2.2.4 เครื่องอบแห้งแบบลูกกลิ้ง.....	6
2.2.5 เครื่องอบแห้งแบบสกรู.....	6
2.2.6 เครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไชน์เบด.....	7
2.3 การถ่ายเทความร้อน.....	8

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
2.3.1 การนำความร้อน.....	8
2.3.2 การพาความร้อน.....	8
2.4 การถ่ายโอนมวล.....	8
2.4.1 การถ่ายโอนมวลโดยการแพร่ของโมเลกุล.....	8
2.4.2 การถ่ายโอนมวลสารโดยการพา.....	9
2.5 วอเตอร์แอกติวิตี.....	9
2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	9
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	12
3.1 วัตถุประสงค์และอุปกรณ์.....	12
3.2 วิธีการดำเนินงานวิจัย.....	12
3.3 กระบวนการอบแห้งของเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดซ์เบด.....	14
3.4 ขอบเขตของการวิจัย.....	16
3.5 ปัจจัยที่ศึกษา.....	16
3.6 การตรวจวัดคุณภาพของพริกไทย.....	16
3.6.1 ความชื้นในวัสดุ.....	16
3.6.2 อัตราส่วนความชื้น.....	17
3.6.3 อัตราการอบแห้ง.....	17
3.6.4 ค่าสี.....	17
3.6.5 ค่าวอเตอร์แอกติวิตี.....	18
3.6.6 ปริมาณฟิเพอริน.....	18
3.7 การวิเคราะห์ทางสถิติ.....	19

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4 ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง	20
4.1 ความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดไซเคชัน	20
4.2 ผลกระทบของความเร็วของอากาศต่อการลดลงของความชื้นในเครื่องอบแห้ง ฟลูอิดเบดแบบดั้งเดิม	21
4.3 ผลกระทบของระยะห่างอุปกรณ์สร้างความปั่นป่วนและความเร็วของอากาศต่อการลดลง ของความชื้นในเครื่องอบแห้งฟลูอิดไซเคชัน	22
4.4 อัตราการอบแห้งของเมล็ดพริกไทย	24
4.5 ผลกระทบของระยะห่างอุปกรณ์สร้างความปั่นป่วนและความเร็วของอากาศต่อคุณสมบัติ ทางเคมีและกายภาพ	29
4.5.1 ค่าสี	29
4.5.2 ค่าวอเตอร์แอกติวิตี	30
4.5.3 ปริมาณพีเพอริน	31
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง	33
5.1 สรุปผลการทดลอง	33
5.2 ข้อเสนอแนะ	34
บรรณานุกรม	35
ภาคผนวก ก ผลการสอบเทียบความเร็วของอากาศ	38
ภาคผนวก ข คุณสมบัติทางเคมีและกายภาพ	42
ประวัติผู้เขียน	48

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 คุณลักษณะของพริกไทยเมล็ด	5
4.1 คุณภาพทางกายภาพของพริกไทยหลังผ่านกระบวนการอบแห้งที่ P/h และความเร็ว ของอากาศต่างกัน	30
4.2 ค่า a_w ของพริกไทยที่ผ่านกระบวนการอบแห้งโดยเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดซ์เบด	31
4.3 ตารางแสดงปริมาณพิเพอรินของเมล็ดพริกไทยที่ผ่านกระบวนการอบแห้ง	32



สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 พริกไทยสายพันธุ์จันทบุรีที่นำมาใช้ในการศึกษา	4
2.2 โครงสร้างของพีเพอริน.....	5
3.1 ขั้นตอนการอบแห้งเมล็ดพริกไทยโดยใช้เครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไคซ์เบด	13
3.2 แผนผังการทำงานของเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไคซ์เบดที่ติดตั้งอุปกรณ์สร้างความปั่นป่วน	15
3.3 รายละเอียดของอุปกรณ์สร้างความปั่นป่วน	15
4.1 ความเร็วของอากาศเริ่มต้นที่ทำให้เกิดฟลูอิดไคซ์เซชัน	20
4.2 อัตราส่วนของความชื้นที่ลดลงด้วยเครื่องอบแห้งฟลูอิดไคซ์เบดแบบดั้งเดิมที่อุณหภูมิ 80 °C ความเร็วของอากาศ 1.2U _{mf} 1.4U _{mf} และ 1.6U _{mf}	21
4.3 ความชื้นที่ลดลงตามระยะเวลาการอบแห้งที่ความเร็วของอากาศ 1.2U _{mf}	22
4.4 ความชื้นที่ลดลงตามระยะเวลาการอบแห้งที่ความเร็วของอากาศ 1.4U _{mf}	23
4.5 ความชื้นที่ลดลงตามระยะเวลาการอบแห้งที่ความเร็วของอากาศ 1.6U _{mf}	23
4.6 ความสัมพันธ์อัตราการอบแห้งเทียบกับเวลา ที่ 1.2U _{mf}	25
4.7 ความสัมพันธ์อัตราการอบแห้งเทียบกับเวลา ที่ 1.4U _{mf}	25
4.8 ความสัมพันธ์อัตราการอบแห้งเทียบกับเวลา ที่ 1.6U _{mf}	26
4.9 ความสัมพันธ์ของอัตราการอบแห้งเทียบกับอัตราส่วนความชื้น ที่ 1.2U _{mf}	27
4.10 ความสัมพันธ์ของอัตราการอบแห้งเทียบกับอัตราส่วนความชื้น ที่ 1.4U _{mf}	28
4.11 ความสัมพันธ์ของอัตราการอบแห้งเทียบกับอัตราส่วนความชื้น ที่ 1.6U _{mf}	28
4.12 ความสัมพันธ์ของปริมาณความชื้นเทียบระยะเวลาการอบแห้ง TFD.....	29

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา

พริกไทย (Pepper) มีชื่อทางวิทยาศาสตร์ว่า *Piper nigrum* Linn. เป็นพืชเศรษฐกิจชนิดหนึ่งของประเทศไทยที่ทำรายได้ส่งออกประมาณ 50-70 ล้านบาทต่อปี กำลังการผลิตพริกไทยเฉลี่ย 3.5 ล้านตันต่อปี ในปี พ.ศ. 2564 ประเทศไทยมีปริมาณการส่งออกพริกไทย 925,188 กิโลกรัม มีมูลค่าการส่งออกประมาณ 186,744,461 บาท (สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร, 2564) มีแหล่งกำเนิดอยู่บริเวณเทือกเขาทางตะวันออกเฉียงใต้ของประเทศอินเดีย ปัจจุบันเป็นพืชเศรษฐกิจของประเทศที่มีอากาศร้อน เช่น บราซิล อินเดีย อินโดนีเซีย มาเลเซีย และไทย เป็นต้น พริกไทยเป็นเครื่องเทศที่ให้รสเผ็ดร้อน มีกลิ่นหอม เป็นส่วนประกอบของอาหารเอเชียและยุโรป รวมไปถึงการผลิตน้ำมันหอมระเหย และยา (Srinivasan, 2007) ผู้คนดื่มชาพริกไทยเพื่อบรรเทาอาการปวดหัวและคออักเสบและปรับปรุงระบบย่อยอาหาร (Parthasarathy et al., 2008) นำพริกไทยมาทำแห้งทั้งเปลือกจะได้พริกไทยดำ (Black pepper) เนื่องจากผนังของเปลือกมีสีดำปนอยู่ ถ้าลอกเปลือกออกก่อนทำเป็นผงจะได้เป็นพริกไทยขาว (White pepper) นอกจากนี้ พริกไทยแห้งยังสามารถเก็บไว้ได้นานโดยไม่เน่าเสีย (ฐานข้อมูลส่งเสริมและยกระดับคุณภาพสินค้า OTOP, 2563)

พริกไทยประกอบด้วยคาร์โบไฮเดรต โปรตีน และไฟเบอร์ มีส่วนประกอบย่อยต่างๆ เช่น ความชื้นและไขมัน (Al-Jasass and Al-Jasser. 2012) พิเพอรินเป็นสารที่แสดงลักษณะเฉพาะของกลิ่นและความฉุนและของพริกไทย รวมไปถึงมีส่วนสำคัญในการต่อต้านอนุมูลอิสระ (Lee et al., 2020) มีฤทธิ์ต้านเนื้องอกและการอักเสบ ลดการอักเสบหรือบวม (Mujumdar et al., 1990; Pradeep and Kuttan, 2002; Sabina et al., 2010; Sunila and Kuttan, 2004; Vijayakumar et al., 2004) มีการนำไปผสมในตัวยาหลายชนิด (Khajuria et al., 1998) พริกไทยประเภทต่างๆ มีปริมาณพิเพอรินแตกต่างกันไป เช่น *Piper nigrum* Linn. และ *P. longum* มี 30-66.5 และ 6-16 มิลลิกรัม/กรัม ตามลำดับ ดังนั้นจึงเป็นเรื่องสำคัญสำหรับอุตสาหกรรมในการกำหนดปริมาณของพิเพอรินในพริกไทยดำเพื่อประเมินคุณภาพของผลิตภัณฑ์ (Hu et al., 1996; Ko, 1995; Mukherjee, 2002; Santosh et al., 2005)

กระบวนการทำแห้งคือการถ่ายโอนความร้อนและมวลพร้อมกัน ความร้อนจะถูกส่งไปยังอนุภาคของวัสดุและไอความชื้นถูกกำจัดออกจากวัสดุไปสู่ตัวกลางที่ทำแห้ง ในปัจจุบันนี้ การทำแห้งอย่าง

เหมาะสมมีความสำคัญต่อการรักษาคุณภาพของพริกไทยและป้องกันการเน่าเสีย มีวิธีการทำแห้งหลายวิธีสำหรับพริกไทย รวมถึงการตากแดด การทำให้แห้งด้วยลมร้อน และการทำให้แห้งด้วยฟลูอิดไคซ์เบด การทำแห้งโดยอาศัยแหล่งความร้อนจากแสงอาทิตย์เป็นวิธีการอบแห้งพริกไทยทั่วไปในประเทศไทย มีข้อเสีย เช่น ปัญหาด้านสุขอนามัย ไม่สามารถควบคุมอุณหภูมิในการอบแห้ง และสภาพอากาศที่ไม่เอื้ออำนวย เป็นต้น การทำแห้งโดยใช้เครื่องอบแห้งสามารถจัดความชื้นโดยการระเหยน้ำออกจากอนุภาคของวัตถุดิบที่ต้องการ และควบคุมสภาพแวดล้อมระหว่างกระบวนการอบแห้ง เช่น อุณหภูมิและความดัน เพื่อรักษาคุณภาพของผลิตภัณฑ์ ช่วยยับยั้งการเจริญเติบโตของแบคทีเรีย ยีสต์ และรา ที่ทำให้อาหารเสื่อมเสีย การทำแห้งแบบฟลูอิดไคซ์เบดเป็นหนึ่งในเทคนิคทางเลือกที่มีแนวโน้มว่าจะรวดเร็ว ง่าย ใช้เวลาน้อย และเป็นเนื้อเดียวกันที่ใช้กับผลิตภัณฑ์อาหารขนาดเล็ก เครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไคซ์เบดเหมาะสมที่สุดสำหรับการอบแห้งพริกไทยที่มีลักษณะทรงกลม (Ergun, 1952)

เครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไคซ์เบด (Fluidized bed dryer) คือ อุปกรณ์ทำแห้งที่ใช้ลมร้อนเป่าผ่านชั้นวัสดุ (Bed) ทำให้วัสดุลอยตัวเป็นอิสระ เกิดการคลุกเคล้าและสัมผัสกับลมร้อนอย่างสม่ำเสมอ มีอัตราการถ่ายเทความร้อนและมวลสูง สามารถลดความชื้นของวัสดุลงได้อย่างรวดเร็วเหมาะสมกับใช้ทำแห้งวัสดุที่เป็นเม็ดเล็กที่มีรูปทรงและขนาดสม่ำเสมอ เครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไคซ์เบดได้รับการพัฒนาโดยใช้การไหลแบบหมุนวนเพื่อส่งเสริมความปั่นป่วนและปรับปรุงการกระจายลมร้อน ทำให้การสัมผัสระหว่างตัวกลางให้ความร้อนกับวัสดุที่กำลังทำให้แห้งดีขึ้น (อาณัติ พิลา และคณะ, 2565)

ในงานวิจัยนี้ทำการศึกษาถึงลักษณะการอบแห้งพริกไทยด้วยเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไคซ์เบดที่มีการติดตั้งอุปกรณ์สร้างความปั่นป่วน โดยมีอัตราส่วนระยะห่างของอุปกรณ์สร้างความปั่นป่วนต่อความสูงของเบด (P/h) เท่ากับ 0.5 1.0 และ 1.5 มีความเร็วของอากาศภายในหอเบดที่ $1.2U_{mf}$ $1.4U_{mf}$ และ $1.6U_{mf}$ ในระหว่างกระบวนการอบแห้ง ทำการตรวจหาความชื้นโดยการชั่งน้ำหนักของพริกไทยทุกๆ 10 นาที ตลอดระยะเวลาการทดลอง 180 นาที เมื่อสิ้นสุดกระบวนการอบแห้ง ทำการตรวจสอบคุณภาพของพริกไทยโดยการวัดค่าสี ค่าวอเตอร์แอกติวิตี และปริมาณพิเพอริน

1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา

- 1.2.1 เพื่อศึกษาลักษณะการอบแห้งพริกไทยในเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไคซ์เบดที่ติดตั้งอุปกรณ์สร้างความปั่นป่วน
- 1.2.2 เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของผลิตภัณฑ์พริกไทย

- 1.2.3 เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพระหว่างกรอบแห้งพริกไทยในเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดซ์เบดแบบดั้งเดิมกับเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดซ์เบดที่ติดตั้งอุปกรณ์สร้างความปั่นป่วน

1.3 ขอบเขตการศึกษา

- 1.3.1 วัตถุประสงค์ คือ พริกไทยอ่อนสายพันธุ์จันทบุรี จากตลาดไท จังหวัดปทุมธานี
- 1.3.2 เครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดซ์เบดที่ติดตั้งอุปกรณ์สร้างความปั่นป่วน
- 1.3.3 ปัจจัยที่ศึกษาทั้งหมด 2 ปัจจัย
- 1.3.3.1 อัตราส่วนระยะห่างระหว่างแผ่นกั้นของอุปกรณ์สร้างความปั่นป่วนต่อความสูงของเบด (P/h) 3 ระดับ คือ 0.5 1.0 และ 1.5
- 1.3.3.2 ความเร็วของอากาศขาเข้า 3 ระดับ คือ $1.2U_{mf}$ $1.4U_{mf}$ และ $1.6U_{mf}$
- 1.3.4 ค่าคุณภาพที่วิเคราะห์ทางกายภาพและทางเคมีของพริกไทย ได้แก่
- 1.3.4.1 การลดลงของปริมาณความชื้น
- 1.3.4.2 อัตราการอบแห้ง
- 1.3.4.3 ค่าสี
- 1.3.4.4 ค่าวอเตอร์แอกติวิตี (a_w)
- 1.3.4.5 ปริมาณฟิเพอริน

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.4.1 เข้าใจและทราบถึงกระบวนการการอบแห้งพริกไทยในเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดซ์เบดที่ติดตั้งอุปกรณ์สร้างความปั่นป่วน
- 1.4.2 ทราบถึงผลกระทบของตัวแปรที่ส่งผลต่อสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของพริกไทย
- 1.4.3 ทราบความแตกต่างของประสิทธิภาพระหว่างกรอบแห้งพริกไทยในเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดซ์เบดแบบดั้งเดิมกับเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดซ์เบดที่ติดตั้งอุปกรณ์สร้างความปั่นป่วน

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 การทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง (Literature review)

2.1.1 พริกไทย

พริกไทยมีชื่อวิทยาศาสตร์ *Piper Nigrum* Linn. เป็นเครื่องเทศชนิดหนึ่งที่มีรสชาติเผ็ดร้อนและมีกลิ่นที่ฉุนเฉพาะตัว ซึ่งได้รับความนิยมจากผู้บริโภคทั่วโลก เป็นเครื่องปรุงที่เป็นส่วนประกอบสำคัญสำหรับอาหารเอเชียและอาหารยุโรป อีกทั้งยังมีสรรพคุณทางยา เช่น ใช้ขับลม ขับของเสียออกจากร่างกาย กระตุ้นปฏิกิริยาของลีน เป็นต้น ลักษณะทางพฤกษศาสตร์เป็นไม้เถาเนื้อแข็ง อายุหลายปี ขอบใบขนุน มีรากฝอยตามข้อเถาเพื่อใช้ยึดเกาะ เถายาว 2-4 เมตร มีข้อปล้องเห็นได้ชัด ใบเป็นใบเดี่ยว ออกสลับใบตามข้อหรือยอดเถา ใบรูปไข่กว้าง 5-8 เซนติเมตร ยาว 8-11 เซนติเมตร ก้านใบยาว 2-3 เซนติเมตร โคนมนหรือเบี้ยวไม่เท่ากัน ปลายแหลม ขอบใบเรียบ ผิวเรียบมัน เนื้อใบหนา ท้องใบอาจพบสารเคลือบใบสีขาวปกคลุม เส้นใบขนุน หลังใบสีเขียวเข้ม ดอกออกเป็นช่อตรงข้ามกับใบที่ข้อเถา ไม่มีก้านดอก ช่อแกนยาว 7-15 เซนติเมตร แต่ละช่อมี 50-150 ดอก ดอกย่อยสมบูรณ์เพศ มีเกสรตัวผู้ 2 อัน ดอกลักษณะกลม ไม่มีกลีบรองดอกและกลีบดอก เริ่มบานจากส่วนโคนไปปลายช่อ ช่อดอกอ่อนมีสีเหลืองอมเขียว เมื่อแก่จะมีสีเขียวและปลายช่อดอกจะห้อยลงดิน ผลเป็นผลสดรูปกลม ขนาด 0.3-0.5 เซนติเมตร ออกเป็นพวง ผลอ่อนสีเขียว ภายในผลหนึ่งๆจะมี 1 เมล็ด เมล็ดสีขาวนวล แข็งค่อนข้างกลม เส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 3-4 มิลลิเมตร เมล็ดมีกลิ่นฉุนและมีรสเผ็ด (Dhas, 2003) องค์ประกอบทางเคมีของพริกไทย พบสารอัลคาลอยด์ 5-9% โดยมีพิเพอริน (ทำให้เกิดกลิ่นฉุนและเผ็ด) เป็นองค์ประกอบหลัก (อารยา ข้อคำ, 2560)

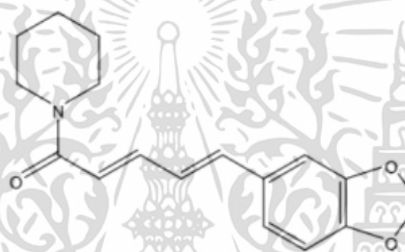


รูปที่ 2.1 พริกไทยสายพันธุ์จันทบุรีที่นำมาใช้ในการศึกษา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.2 พิเพอร์ริน

สารพิเพอร์ริน (Piperine) ในพริกไทยเป็นอัลคาลอยด์เอไมด์สี่เหลี่ยมที่เป็นผลึก ช่วยให้ระบบย่อยอาหารและลำไส้ทำงานดีขึ้น และกระตุ้นให้ระบบทางเดินอาหารหลั่งน้ำย่อย เพื่อย่อยโปรตีน ไขมัน และแป้ง โดยเฉพาะกลุ่มที่ย่อยโปรตีนได้จะมีมากพิเศษ ซึ่งสารพิเพอร์รินนี้ ยังเพิ่มการดูดซึมแร่ธาตุที่สำคัญ เช่น ซีลีเนียม วิตามินบี บีตาแคโรทีน เคอร์คูมิน รวมทั้งสารอาหารอื่นๆ และเนื่องจากเป็นสารให้ความร้อน จึงช่วยให้เลือดหมุนเวียนดีขึ้น เพิ่มการเผาผลาญอาหารต่างๆทำให้ร่างกายได้พลังงานมากขึ้น เพิ่มการผลิตสารในสมองที่ทำให้รู้สึกผ่อนคลายและมีความสุข ยังรวมถึงการต้านการอักเสบ ต้านการชัก ต้านมะเร็ง และช่วยป้องกันโรคสมองเสื่อมในผู้สูงอายุ (สุภาภรณ์ ปิติพร, 2557)



รูปที่ 2.2 โครงสร้างของพิเพอร์ริน

ที่มา: Shingate et al. (2013)

ตารางที่ 2.1 คุณลักษณะของพริกไทยเมล็ด

คุณลักษณะ	พริกไทยเมล็ดชนิดดำ
ปริมาณความชื้น ร้อยละของน้ำหนัก ไม่เกิน	13.0
ปริมาณพิเพอร์ริน ร้อยละของน้ำหนักเมื่ออบแห้งไม่น้อยกว่า	4.0

ที่มา: มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมพริกไทย (มอก.297-2556)

2.2 การอบแห้ง

รูปแบบการบริโภคพริกไทย ส่วนใหญ่เป็นผลิตภัณฑ์ที่ผ่านกระบวนการอบแห้ง การอบแห้งเป็นวิธีการถนอมอาหารที่นิยมใช้ลดปริมาณความชื้นและปริมาณน้ำอิสระที่มีอยู่ในวัตถุดิบลงในระดับที่เชื้อจุลินทรีย์ไม่สามารถเจริญเติบโตได้ โดยอาศัยหลักการถ่ายเทความร้อนและการถ่ายเทมวลระหว่าง

วัตถุดิบกับตัวกลางที่เป็นของไหล ทำให้น้ำเกิดการระเหยออกมาจากวัตถุดิบ เพื่อยืดอายุการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์ (Maskan et al., 2002) การอบแห้งผลผลิตทางเกษตรแบ่งเป็น 2 วิธี ได้แก่การตากแดดตามธรรมชาติ (Natural Sun Drying) และการใช้เครื่องอบแห้งเชิงกล (Mechanical Dryer) เทคโนโลยีการอบแห้งได้มีการพัฒนาเพิ่มมากขึ้น จึงได้มีการเลือกใช้แหล่งพลังงานที่เหมาะสมมาใช้ในการอบแห้ง เพื่อเป็นทางเลือกหนึ่งสำหรับผู้ประกอบการในการเลือกใช้ และลดต้นทุนค่าใช้จ่ายสำหรับกระบวนการผลิต โดยยังคงรักษาคุณภาพของผลิตภัณฑ์ไว้ได้นาน (สมชาติ โสภณธนฤทธิ, 2540) สำหรับกระบวนการอบแห้งนั้นสามารถทำได้โดยใช้แหล่งกำเนิดพลังงานหลายชนิด และใช้เทคนิคการอบแห้งได้หลายอย่าง อาทิเช่นการอบแห้งแบบฟลูอิดไดเซชัน การอบแห้งแบบความดันต่ำกว่าบรรยากาศ การอบแห้งด้วยลมร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์ การเร่งกระบวนการอบแห้งด้วยสนามไฟฟ้า การอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟ การอบแห้งด้วยความร้อนจากชีวมวล เป็นต้น

2.2.1 เครื่องอบแห้งแบบถัง มักใช้ในการอบแห้งวัตถุดิบทางการเกษตรต่างๆไป โดยนำวัตถุดิบมาวางไว้ในห้องอบแห้ง จากนั้นใช้ลมร้อนผ่านจากด้านล่าง ลมร้อนจะทำให้วัตถุดิบที่อยู่ด้านล่างแห้งก่อน ส่วนวัตถุดิบที่ยังไม่แห้งจะอยู่ด้านบน ซึ่งจะได้รับความร้อนจากวัตถุดิบที่แห้งแล้ว โดยมีชั้นกั้นกลางเรียกว่า ชั้นของการลดความชื้น (drying front)

2.2.2 เครื่องอบแห้งแบบถาด เป็นเครื่องอบแห้งขนาดเล็กมักใช้กับพืชผักผลไม้ มีลักษณะเป็นชั้นๆประกอบกัน ซึ่งผลิตภัณฑ์ที่อบแห้งจะถูกนำมาเรียงบนชั้น และมีลมร้อนหมุนเวียนอยู่ในเครื่องอบแห้งใช้วิธีการให้ลมผ่านขดลวดร้อนจึงเป็นวิธีที่ประหยัดพลังงานกว่า 50% เนื่องจากการถ่ายเทความร้อนที่มีประสิทธิภาพมากกว่าอบแห้งแบบถัง

2.2.3 เครื่องอบแห้งแบบอุโมงค์ เป็นเครื่องอบแห้งที่ได้พัฒนามาจากเครื่องอบแห้งแบบถาด ส่วนใหญ่ใช้ในอุตสาหกรรมอาหารขนาดใหญ่ที่ต้องการผลิตภัณฑ์อย่างต่อเนื่อง โดยผลิตภัณฑ์ที่ต้องการอบแห้งจะถูกเรียงบนชั้นแต่ละอัน ซึ่งจะถูกลำเลียงผ่านอุโมงค์ร้อนที่มีอากาศร้อนไหลสวนทางหรือตามทางของการลำเลียง ผลิตภัณฑ์จะถูกอบแห้งเมื่อเคลื่อนที่ถึงบริเวณปลายทางของอุโมงค์

2.2.4 เครื่องอบแห้งแบบลูกกลิ้ง มักใช้ในการอบแห้งผลิตภัณฑ์ที่มีลักษณะเป็นของเหลวที่มีปริมาณของแข็งอยู่สูง มีลักษณะชั้นหนืด เพื่อทำให้เป็นของแข็งหรือบิดเป็นผงต่อไป มีการทำงานโดยวัตถุดิบจะเคลื่อนที่ผ่านลูกกลิ้งที่มีอุณหภูมิสูง จะเกิดการถ่ายเทความร้อนบริเวณลูกกลิ้งจากนั้นจะมีใบมีดขูดเอาผลิตภัณฑ์ที่แห้งแล้วออกจากลูกกลิ้ง เพื่อนำไปแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ที่ต้องการต่อไป

2.2.5 เครื่องอบแห้งแบบสกรู ใช้ในการอบแบบต่อเนื่อง มีการสัมผัสทางอ้อมกับตัวให้ความร้อน ประกอบด้วยสกรูหมุนอยู่ในตัวถัง และมีตัวถังอีกชั้นทำหน้าที่หล่อด้วยไอน้ำ เมื่อของแข็งถูกป้อนเข้า

ด้านหนึ่งและถูกขับเคลื่อนไปข้างหน้าด้วยการหมุนของสกรู ไอน้ำที่เกิดขึ้นจะถูกดูดออกทางท่อที่อยู่ด้านบนของตัวถัง เครื่องอบแบบนี้เหมาะสำหรับอบของแข็งที่ละเอียดมาก หรือติดเป็นระบบปิดที่สามารถทำให้เป็นสูญญากาศได้ จึงทำให้ใช้กับระบบที่ต้องการสารละลายที่ควบแน่นได้ เพื่อนำกลับมาใช้ใหม่

2.2.6 เครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไอซ์เบด เป็นเครื่องอบแห้งที่ใช้ได้ดีกับวัสดุของแข็งที่มีลักษณะเป็นเม็ดหรือเป็นชิ้นสัมผัสกับของไหล เมล็ดหรืออนุภาคของแข็งจะมีคุณสมบัติคล้ายของไหล เริ่มจากวางอนุภาคของแข็งไว้บนตะแกรงหรือตัวกระจายในหอทดลอง และให้ของไหลหรือก๊าซไหลผ่านขึ้นไปทางด้านล่างของตัวกระจายที่รองรับ และไหลผ่านชั้นอนุภาคของแข็งและขยับตัวลอยไปพร้อมกับของไหลหรือเรียกว่าชั้นเบด และแยกตัวเป็นอิสระในที่สุด พฤติกรรมจึงคล้ายของไหล จึงเรียกอนุภาคของแข็งในสถานะนี้ว่าฟลูอิดไอซ์เซชัน (fluidization) ขณะที่ของไหลไหลผ่านเบดด้วยความเร็วที่ต่ำกว่าความเร็วต่ำสุดของการเกิดฟลูอิดไอซ์เซชัน (minimum fluidization velocity, U_{mf}) (อาทิตยา พัฒนิบูลย์ และอมรชัย อภรณ์วิชานพ, 2557)

ในปัจจุบัน วิธีการอบแห้งได้พัฒนาเพิ่มขึ้นเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการอบแห้ง และลดระยะเวลาของกระบวนการอบแห้งลง การอบแห้งด้วยลมร้อนเป็นวิธีการอบแห้งที่นิยมมากที่สุดและสามารถทำได้ง่าย โดยอาศัยอากาศเป็นตัวกลางในการอบแห้ง เกิดการถ่ายเทความร้อนจากอากาศไปยังพื้นผิววัตถุเปียกพร้อมกับการถ่ายเทมวลจากวัตถุเปียกไปยังอากาศ ในการอบแห้งวัตถุเปียกสามารถแบ่งออกเป็น 3 ช่วง คือ ช่วงเริ่มต้นการอบแห้ง (Rising rate drying period) ช่วงอัตราการอบแห้งคงที่ (Constant rate drying period) และช่วงอัตราการอบแห้งลดลง (Falling rate drying period) ช่วงเริ่มต้นของการอบแห้งที่บริเวณพื้นผิววัตถุเกิดการถ่ายเทความร้อนและการถ่ายเทมวล อัตราการอบแห้งของวัตถุเปียกจะมีค่าเพิ่มสูงขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ช่วงอัตราการอบแห้งคงที่ ความชื้นบริเวณพื้นผิววัตถุเปียกจะยังสูงอยู่ เกิดการถ่ายเทความร้อนและการถ่ายเทมวลขึ้นพร้อมกัน โดยการถ่ายเทความร้อนระหว่างพื้นผิววัตถุเปียกกับอากาศเป็นแบบการพาความร้อน ส่วนความแตกต่างระหว่างความเข้มข้นของไอน้ำที่ผิววัตถุเปียกกับอากาศทำให้เกิดการถ่ายเทมวล ช่วงอัตราการอบแห้งลดลงช่วงแรก ปริมาณน้ำที่ผิวของวัตถุจะลดลงอย่างมาก การถ่ายเทความร้อนและมวลจะเกิดขึ้นทั้งที่ผิววัตถุเปียกและภายในเนื้อวัตถุเปียกด้วย การเคลื่อนที่ของน้ำจากภายในวัตถุเปียกมายังพื้นผิวช้ากว่าการพาความร้อนขึ้นจากพื้นผิววัตถุเปียกไปยังอากาศ โดยรูปแบบการเคลื่อนที่ของน้ำจะเป็นของเหลวหรือไอน้ำ เมื่อปริมาณความชื้นลดลงเรื่อยๆ ระยะทางในการแพร่หรือการเคลื่อนที่ของความร้อนและมวลจะมากขึ้น ช่วงอัตราการอบแห้งลดลง ช่วงที่สองเป็นช่วงที่ความชื้นลดลงถึงจุดๆ หนึ่งจนไม่มีการเปลี่ยนแปลง อุณหภูมิวัตถุเปียกเท่ากับอุณหภูมิอากาศโดยรอบทำให้ไม่สามารถระเหยออกจากตัววัตถุเปียกได้ เรียกว่าความชื้นสมดุล (Brennan et al., 1990)

2.3 การถ่ายเทความร้อน

กระบวนการอบแห้งเกิดจากกระบวนการถ่ายเทความร้อน พื้นฐานของการถ่ายเทความร้อน คือ ความแตกต่างของอุณหภูมิ (Temperature different) ถ้าตัวกลางสองตัวมีอุณหภูมิเท่ากันจะไม่เกิดการถ่ายเทความร้อน ดังนั้น ความแตกต่างของอุณหภูมิจึงเป็นแรงขับเคลื่อนเพื่อให้เกิดการถ่ายเท

2.3.1 การนำความร้อน (Conduction heat transfer)

การถ่ายเทความร้อนโดยการนำความร้อน เป็นการถ่ายเทความร้อนที่เกิดในวัตถุที่เป็นตัวกลาง ทึบแสงเมื่อเกิดความแตกต่างของอุณหภูมิ สามารถเกิดได้ทั้งในของแข็ง ของเหลวและแก๊ส ความสามารถในการนำความร้อนของสาร วัดด้วยปริมาณที่เรียกว่า ค่าการนำความร้อน (Thermal conductivity) หรือ k (W/m K) ซึ่งเป็นคุณสมบัติทางกายภาพของตัวกลางที่มีความร้อนเคลื่อนที่ผ่าน

2.3.2 การพาความร้อน (Convection)

การถ่ายเทความร้อนโดยการพาประกอบด้วยกลไก 2 อย่างคือ พลังงานเกิดการถ่ายเทจากการเคลื่อนที่หรือการแพร่แบบสุ่มของโมเลกุล และการเคลื่อนที่ของของไหล การถ่ายเทลักษณะนี้เกิดขึ้นได้ เช่น ในระบบที่มีความแตกต่างของอุณหภูมิจะมีการถ่ายเทความร้อนได้ และเนื่องจากโมเลกุลในกลุ่มของไหลจะมีการเคลื่อนที่แบบสุ่มอยู่ด้วย แบ่งออกได้เป็น 2 ลักษณะคือ การพาความร้อนแบบธรรมชาติและการพาความร้อนแบบบังคับ (Maskan et al., 2002)

2.4 การถ่ายโอนมวล

การถ่ายโอนมวลสาร (Mass transfer) เกิดจากการถ่ายโอนมวลสารตั้งแต่ 2 องค์ประกอบขึ้นไปที่มีความเข้มข้นแตกต่างกัน โมเลกุลเคลื่อนที่จากความเข้มข้นมากไปยังความเข้มข้นน้อย เพื่อให้เกิดความสมดุลของโมเลกุลในระบบ ซึ่งกลไกนี้ทำให้เกิดการแลกเปลี่ยนของมวลสาร

2.4.1 การถ่ายโอนมวลโดยการแพร่ของโมเลกุล (Molecular diffusion)

การถ่ายโอนมวลโดยการแพร่ของโมเลกุล เป็นการเคลื่อนที่ของโมเลกุลแต่ละโมเลกุลผ่านสสาร ด้วยพลังงานความร้อน (Thermal energy) ที่มีอยู่ในโมเลกุลที่มีอุณหภูมิสูงกว่าศูนย์สัมบูรณ์ (Absolute zero) โดยที่โมเลกุลแต่ละโมเลกุลจะเคลื่อนที่เป็นเส้นตรงแบบไม่เป็นระเบียบ (Random motion) ด้วยความเร็วคงที่ เมื่อมีการชนกันของโมเลกุล ความเร็วและทิศทางการเคลื่อนที่จะเปลี่ยนไป ระยะทางเฉลี่ยของการเคลื่อนที่ของโมเลกุลโดยที่ไม่มีการชนกับโมเลกุลอื่นเรียกว่าเส้นทางการอิสระเฉลี่ย (Mean free path) และความเร็วเฉลี่ยในการเคลื่อนที่จะขึ้นกับอุณหภูมิ

2.4.2 การถ่ายโอนมวลสารโดยการพา (Convective mass transfer)

การถ่ายโอนมวลสารโดยการพา เป็นกระบวนการถ่ายโอนมวลสารที่ต้องอาศัยตัวกลางของสารในการเคลื่อนที่ และเกี่ยวข้องกับการไหลของของไหล เช่น การไหลของของไหลผ่านพื้นผิว หรือระหว่าง การไหลของของไหล 2 ชนิดที่ไม่ละลายกัน (Immiscible moving fluids) ส่วนใหญ่เกิดขึ้นจากการรบกวนหรือการไหลแบบปั่นป่วน (Turbulent flow) ที่เรียกว่าการแพร่แบบคลื่น (Eddy diffusion) หรือการแพร่แบบปั่นป่วน (Turbulent diffusion) (Whitman, 1962)

2.5 วอเตอร์แอกติวิตี

ค่าวอเตอร์แอกติวิตี (water activity, a_w) เป็นปัจจัยสำคัญในการบ่งบอกอายุการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์ คือ ปริมาณน้ำอิสระที่เป็นประโยชน์ต่อการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์และปฏิกิริยาเคมีต่างๆ สามารถหาได้จากอัตราส่วนความดันไอของอาหารต่อค่าความดันไอน้ำบริสุทธิ์ที่อุณหภูมิเดียวกัน ถ้าค่า a_w สูง โอกาสที่จุลินทรีย์จะเจริญในผลิตภัณฑ์สูง อายุการเก็บรักษาจะสั้นลง แต่ถ้ามีค่าต่ำกว่า จุลินทรีย์ที่สามารถเจริญเติบโตได้ ก็จะทำให้ควบคุมการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์นั้นๆ ที่ส่งผลต่ออายุการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์ต่างๆได้ (ชนพัฒน์ เหมเมือง และคณะ, 2564)

2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (Literature review)

Ozbeý and Soylemez (2005) ศึกษาผลกระทบของการไหลแบบหมุนวนของอากาศต่อการอบแห้งข้าวสาลีในเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดซ์เบด โดยใช้ใบพัดเป็นอุปกรณ์สร้างความปั่นป่วน การไหลแบบหมุนวน ใช้อัตราการไหลของอากาศ 0.028 0.045 0.064 และ 0.073 เมตร/วินาที และอุณหภูมิอากาศขาเข้า 40 50 60 และ 70 °C พบว่าการกำจัดความชื้นขึ้นอยู่กับอัตราการไหลของอากาศ อุณหภูมิของอากาศที่ไหลเข้าและลักษณะการไหล อุณหภูมิมีอิทธิพลต่ออัตราการทำให้แห้งมากกว่าอัตราการไหลของอากาศ การไหลเวียนแบบหมุนวนช่วยเพิ่มอัตราการลดลงของความชื้นได้มากถึง 25% เมื่อเทียบกับเครื่องอบแห้งที่ไม่ได้ติดตั้งอุปกรณ์สร้างความปั่นป่วน

Boon-Loi and Promvong (2006) ทำการศึกษาคุณลักษณะของการอบแห้งเมล็ดพริกไทย ด้วยเทคนิคฟลูอิดซ์เบดที่มีแผ่นกระจายแบบเกลียวภายในหอตลอดที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 0.13 เมตร สูง 1 เมตร ด้านล่างหอตลอดจะมีแผ่นกระจายเกลียว ซึ่งจะเป็นตัวทำให้เกิดการหมุนควงของลมร้อนภายในหอ โดยในการทดลองแต่ละครั้งใช้เมล็ดพริกไทยที่มีความชื้นเริ่มต้นประมาณ 80% (มาตรฐานเปียก) มวล 0.2 กิโลกรัม ทำการทดลองที่อุณหภูมิ 80 °C และใช้ความเร็วของอากาศภายใน

หอดทดลอง $1.3U_{mf}$ $1.6U_{mf}$ และ $2U_{mf}$ พบว่า ในการอบแห้งด้วยเทคนิคฟลูอิดไชน์เบดแบบดั้งเดิม ความเร็วของอากาศไม่มีผลต่อการอบแห้งของเมล็ดพริกไทย แต่ในการอบแห้งด้วยเทคนิคแบบฟลูอิดไชน์เบดที่มีแผ่นกระจายแบบเกลียว ความเร็วของอากาศมีผลต่อการลดความชื้นของเมล็ดพริกไทย เมื่อเปรียบเทียบระหว่าง 2 รูปแบบ พบว่าการอบแห้งเมล็ดพริกไทยด้วยเทคนิคแบบฟลูอิดไชน์เบดที่มีแผ่นกระจายแบบเกลียวให้ผลที่ดีกว่าแบบฟลูอิดไชน์เบดแบบดั้งเดิม โดยสามารถลดเวลาในการอบแห้งได้ถึง 30%

Kangsanthia et al. (2007) ทำการศึกษาการอบแห้งเมล็ดพริกไทยด้วยเทคนิคลมหมุนควงที่ภายในหอบมีการติดครีบ โดยทำการทดลองในหอดทดลองขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 0.17 เมตร ความสูง 1 เมตร ที่มีการติดตั้งครีบตามแนวตั้งภายใน พบว่า ในการอบแห้งด้วยเทคนิคฟลูอิดไชน์เบดแบบดั้งเดิมนั้น ความเร็วของอากาศไม่มีผลต่อการอบแห้งของเมล็ดพริกไทย แต่ในการอบแห้งด้วยเทคนิคลมหมุนควงที่มีการใส่ครีบตามแนวตั้งในหอดทดลอง พบว่า ความเร็วของอากาศมีผลต่อการลดลงของความชื้นในเมล็ดพริกไทยและช่วยให้ความชื้นที่มีอยู่ในเมล็ดพริกไทยระเหยออกได้เร็วขึ้นเนื่องจากการติดครีบทำให้เมล็ดพริกไทยมีการสั่นและไหลอย่างปั่นป่วนของลมร้อน และช่วยให้เกิดการกระจายตัวของเมล็ดพริกไทยในหอดทดลองเพิ่มมากขึ้น ทำให้เพิ่มพื้นที่ในการถ่ายเทความร้อน ส่งผลให้ระยะเวลาการอบแห้งลดลง เมื่อเปรียบเทียบระหว่าง 2 เทคนิคจะพบได้ว่าการอบแห้งเมล็ดพริกไทยด้วยเทคนิคลมหมุนควงที่มีการติดครีบให้ผลที่ดีกว่าแบบเทคนิคฟลูอิดไชน์เบดแบบดั้งเดิม

Boonloi et al. (2008) ทำการศึกษาเปรียบเทียบถึงคุณลักษณะของการอบแห้งพริกไทยด้วยเทคนิคฟลูอิดไชน์เบดกับเทคนิคฟลูอิดไชน์แบบหอบผิวคลื่น ในการทดลองแต่ละครั้งจะใช้พริกไทย 200 กรัม มีความชื้นเริ่มต้นประมาณ 400% (มาตรฐานแห้ง) ทดลองที่อุณหภูมิ 80 °C โดยใช้ความเร็วของอากาศภายในหอดทดลอง 1.7 2.1 และ 2.6 เมตร/วินาที และใช้เวลาการทดลองในแต่ละกรณีเท่ากับ 180 นาที โดยทำการวัดความชื้นที่ลดลงของเมล็ดพริกไทย ทุกๆ 10 นาที นำผลที่ได้จากการทดลองมาเปรียบเทียบกับกรอบแห้งแบบฟลูอิดไชน์เบดแบบดั้งเดิม พบว่า ความเร็วของอากาศมีผลต่อการลดค่าความชื้นของเมล็ดพริกไทย โดยช่วยให้ความชื้นที่อยู่ในพริกไทยสามารถระเหยออกได้เร็วขึ้น เนื่องจากหอบผิวคลื่นทำให้เมล็ดมีการเคลื่อนที่ลักษณะของไหลแบบปั่นป่วน เกิดการสั่นและกระจายตัวในหอดทดลองเพิ่มมากกว่าเทคนิคฟลูอิดไชน์เบดแบบดั้งเดิม ทำให้เพิ่มค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนและทำให้ระยะเวลาในการอบแห้งลดลงประมาณ 50%

Batcha and Raghavan (2011) ตรวจสอบประสิทธิภาพของเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไชน์เบดแบบหมุนวนในแง่ของค่าความดันตกคร่อม ความเร็วขั้นต่ำที่ทำให้เกิดฟลูอิดไชน์และคุณภาพฟลูอิดไชน์ สำหรับอัตราการไหลของอากาศ 1–7 เมตร/วินาที ติดตั้งอุปกรณ์เสริมความปั่นป่วนเป็น

ใบมีดรูปวงแหวนที่มีระยะห่างระหว่างใบมีดต่อพื้นที่หน้าตัดเท่ากับ 12.9 และ 17.2% มุมของใบมีดคือ 9° และ 12° และน้ำหนักเบตอยู่ในช่วง 500–2000 กรัม ถูกนำมาใช้ ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าใบมีดกระจาย 60 ใบที่มีมุมเหลื่อมกัน 12° ทำงานกับอนุภาคขนาด 9.84 มิลลิเมตร ให้การหมุนเวียนและแรงดันที่ตกคร่อมที่เหมาะสม

Promvong et al. (2011) ทำการศึกษาการอบแห้งพริกไทยโดยใช้หลักการอบแห้งแบบฟลูอิดซ์เบต 2 รูปแบบ คือ การอบแห้งด้วยฟลูอิดซ์เบตทรงสี่เหลี่ยมและการอบแห้งด้วยฟลูอิดซ์เบตแบบผนังหักสามเหลี่ยม 2 ด้าน ผลของการทดลองพบว่า อุณหภูมิอากาศและความเร็วของอากาศแสดงให้เห็นผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญต่ออัตราการอบแห้งทั้งสองชนิด โดยเฉพาะอย่างยิ่งที่อุณหภูมิภายในเบตมีค่า 100°C การอบแห้งด้วยฟลูอิดซ์เบตแบบผนังหักสามเหลี่ยม 2 ด้านให้ผลที่ดีกว่าการอบแห้งด้วยฟลูอิดซ์เบตทรงสี่เหลี่ยม เนื่องจากใช้เวลาในการอบแห้งที่เร็วและค่าเฉลี่ยของเวลาในการอบแห้งของเครื่องฟลูอิดซ์เบตแบบผนังหักสามเหลี่ยม 2 ด้าน ที่อัตราส่วนปิดล้อม (e/H) เท่ากับ 0.3125 0.375 และ 0.4375 จะมีค่าเท่ากับ 29% 36% และ 43% ตามลำดับ

อานันต์ พิลา และคณะ (2565) ทำการศึกษาลักษณะการอบแห้งของพริกไทยโดยใช้เครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดซ์เบตที่ติดตั้งแผ่นกั้นสร้างความปั่นป่วนที่มีการปรับเปลี่ยนอัตราส่วนระยะห่างของแผ่นกั้นเท่ากับ 0.5 0.55 และ 0.6 ความเร็วของอากาศในหอบเท่ากับ $1.5U_{mf}$ $1.7U_{mf}$ และ $1.9U_{mf}$ (U_{mf} เท่ากับ 1.5 m/s) ทำการอบแห้งพริกไทยมวล 200 กรัม ด้วยอุณหภูมิของอากาศขาเข้าเท่ากับ 80°C เป็นเวลา 180 นาที พบว่า ความเร็วของอากาศไม่มีผลต่อการอบแห้งเมล็ดในเครื่องอบแห้งฟลูอิดซ์เบตแบบดั้งเดิม เครื่องอบแห้งฟลูอิดซ์เบตที่ติดตั้งแผ่นกั้นสร้างความปั่นป่วน (FBT) ที่อัตราส่วนระยะห่างแผ่นกั้น (P/D) เท่ากับ 0.6 ให้อัตราการอบแห้งสูงที่สุด เครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดซ์เบตที่ติดตั้งแผ่นกั้นสร้างความปั่นป่วนสามารถลดความชื้นได้สูงกว่าแบบดั้งเดิมประมาณ 20%

จากการศึกษางานวิจัยที่ผ่านมาทำให้ทราบว่า การใช้วิธีสร้างความปั่นป่วนภายในหอบเบตสามารถทำให้เพิ่มอัตราการอบแห้งได้รวดเร็วและระยะเวลาในการอบแห้งสั้นลงและจะสังเกตได้ว่า ผลการทดลองในทุกๆ เงื่อนไขจะให้ผลลัพธ์ที่ดีกว่ากรณีที่ไม่มีตัวสร้างความปั่นป่วน ดังนั้น ผู้วิจัยมีแนวคิดที่จะออกแบบชิ้นงานให้มีให้มีความแตกต่างภายใต้ความสอดคล้องและเป็นไปอย่างถูกต้อง ตามแนวทางของผู้วิจัยท่านอื่นๆ ที่ผ่านมา

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

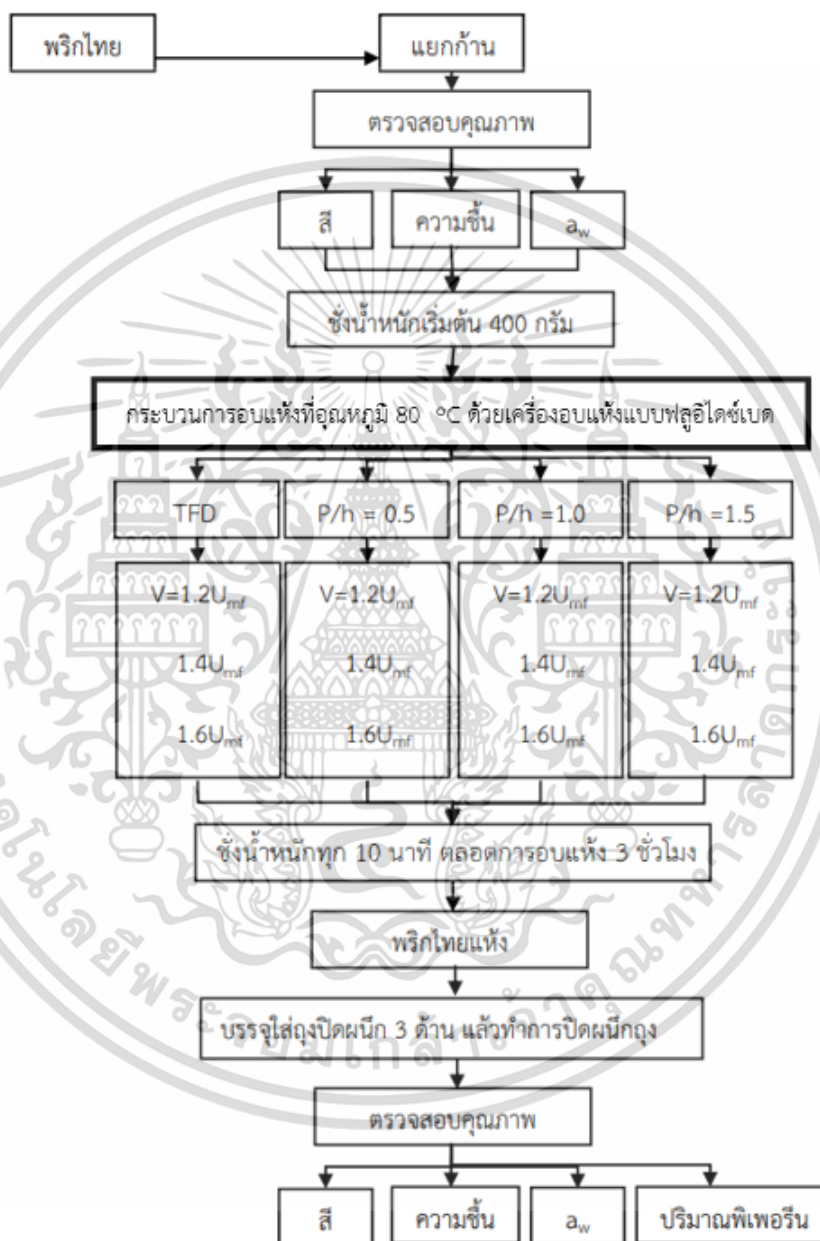
3.1 วัสดุและอุปกรณ์

- 3.1.1 พริกไทยอ่อนสายพันธุ์จันทบุรี
- 3.1.2 เครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไชน์เบด
- 3.1.3 อุปกรณ์สร้างความปั่นป่วน
- 3.1.4 ภาชนะกว้าง
- 3.1.5 กล้องดูความชื้น ถังอลูมิเนียมฟอยล์ และ เครื่องปิดผนึก
- 3.1.4 เครื่องชั่ง SUNFORD (รุ่น KAH500)
- 3.1.5 เครื่องวัดสี Hunter Lab (รุ่น Colourflex EZ)
- 3.1.6 เครื่องวัดปริมาณน้ำ AQUA LAB (รุ่น 4TE)
- 3.1.7 ชุดสกัด Soxhlet
- 3.1.8 UV-VIS Spectrophotometer (รุ่น GENESYS 10S)
- 3.1.9 ตู้อบลมร้อน Memmert (รุ่น UM400)
- 3.1.10 เครื่องชั่ง OHAUS (รุ่น Pioneer PA214)

3.2 วิธีการดำเนินงานวิจัย

- 3.2.1 นำพริกไทยอ่อนมาขนาดเพื่อแยกก้านออก ทำความสะอาดโดยคัดขนาดเมล็ดพริกไทย สมบูรณ์ให้มีขนาดใกล้เคียงกัน
- 3.2.2 สร้างตารางสอบเทียบความดันตกคร่อมเบดที่ความเร็วต่างๆของอากาศ เพื่อนำไปหาความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดไชน์เซชัน (U_{mf})
- 3.2.3 ตรวจสอบค่าสีและ a_w เริ่มต้นของพริกไทย
- 3.2.4 ทำการหาความชื้นเริ่มต้นของพริกไทย ด้วยการชั่งน้ำให้แห้งจากพริกไทยที่เตรียมไว้สำหรับทดลอง และชั่งน้ำหนัก 10 กรัม ด้วยเครื่องชั่งดิจิตอล ใส่ใน Moisture can จำนวน 3 ชุด เพื่อทำการอบหาความชื้นเริ่มต้นด้วยตู้อบลมร้อน (hot air oven) ยี่ห้อ MEMMERT

รุ้น UM400 ที่อุณหภูมิ 105 °C ในระยะเวลา 72 ชั่วโมง หลังจากนั้นนำมาชั่งน้ำหนักเพื่อ
คำนวณหาค่าความชื้นเริ่มต้น (initial moisture content)



รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการอบแห้งเมล็ดพริกไทยโดยใช้เครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดซ์เบด

3.2.5 ในการอบแห้งแต่ละครั้งใช้เมล็ดพริกไทยน้ำหนัก 400 กรัม (ความสูงเบด 5 เซนติเมตร)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.6 ทำการอบแห้งพริกไทยที่อุณหภูมิ 80 °C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง

3.2.6.1 ไม่มีการติดตั้งอุปกรณ์สร้างความปั่นป่วน ความเร็วของอากาศเท่ากับ $1.2U_{mf}$

$1.4U_{mf}$ และ $1.6U_{mf}$

3.2.6.2 ติดตั้งอุปกรณ์สร้างความปั่นป่วนที่มี P/h เท่ากับ 0.5 ความเร็วของอากาศเท่ากับ $1.2U_{mf}$ $1.4U_{mf}$ และ $1.6U_{mf}$

3.2.6.3 ติดตั้งอุปกรณ์สร้างความปั่นป่วนที่มี P/h เท่ากับ 1.0 ความเร็วของอากาศเท่ากับ $1.2U_{mf}$ $1.4U_{mf}$ และ $1.6U_{mf}$

3.2.6.4 ติดตั้งอุปกรณ์สร้างความปั่นป่วนที่มี P/h เท่ากับ 1.5 ความเร็วของอากาศเท่ากับ $1.2U_{mf}$ $1.4U_{mf}$ และ $1.6U_{mf}$

3.2.7 ทำการบันทึกค่ามวลเมล็ดพริกไทยทุก 10 นาที อบแห้ง ทำซ้ำ 3 ครั้ง แล้วนำมาหาค่าเฉลี่ย

3.2.8 บรรจุผลิตภัณฑ์พริกไทยใส่ถุง แล้วทำการปิดผนึกถุง

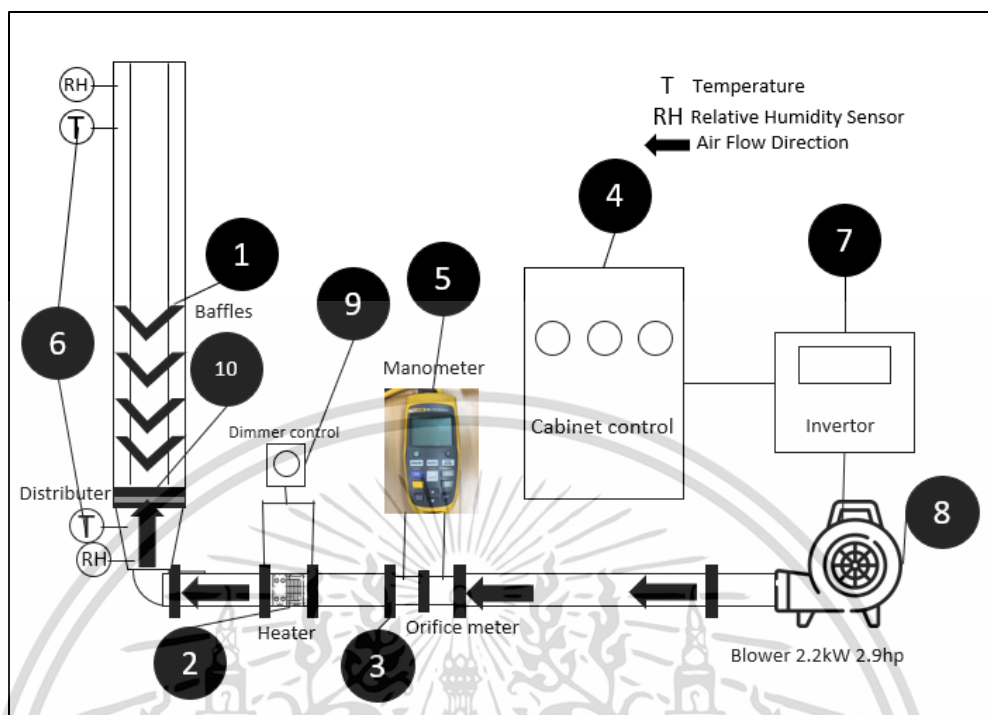
3.2.9 ทำการตรวจสอบคุณภาพสุดท้ายของผลิตภัณฑ์ วัดปริมาณความชื้น ค่าสี a_w และทำการตรวจสอบปริมาณพิเพอริน

3.3 กระบวนการอบแห้งของเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไชน์เบด

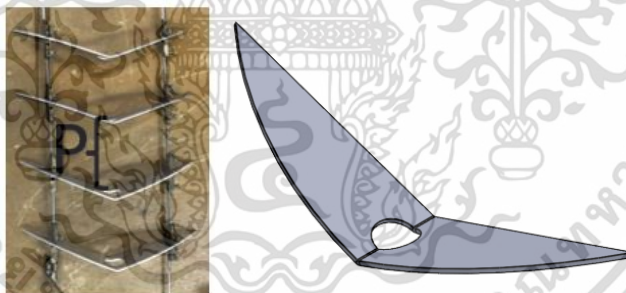
ชุดการทดลองและวิธีการทดลอง ในหัวข้อนี้จะนำเสนออุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย รายละเอียดขั้นตอนการออกแบบชุดอุปกรณ์สร้างความปั่นป่วน วิธีการทดลอง และหลักการทำงานเบื้องต้น โดยเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไชน์เบดที่ติดตั้งอุปกรณ์สร้างความปั่นป่วน จะประกอบไปด้วยอุปกรณ์หลักๆ ดังนี้

- 1) อุปกรณ์สร้างความปั่นป่วน (Fitted baffle turbulator)
- 2) ชุดให้ความร้อน (Electrical heater)
- 3) ชุดวัดอัตราการไหลของอากาศ (Orifice flow meter)
- 4) ตู้ควบคุม (Cabinet control)
- 5) อุปกรณ์วัดความดันตกคร่อม (Pressure differential gage)
- 6) ชุดวัดความชื้นและอุณหภูมิอากาศ
- 7) ชุดควบคุมมอเตอร์ (Inverter)
- 8) โบลเวอร์ (Blower)
- 9) ชุดควบคุมความร้อน (Dimmer control)
- 10) แผ่นกระจายลม (Distributor plate)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.2 แผนผังการทำงานของเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไดซ์เบดที่ติดตั้งอุปกรณ์สร้างความปั่นป่วน



รูปที่ 3.3 รายละเอียดของอุปกรณ์สร้างความปั่นป่วน

การทำงานจะเริ่มจากการเปิดพัดลม (โบว์เวอร์) สร้างอากาศให้ไหลเวียนในระบบ อากาศจะไหลผ่านชุดวัดอัตราการไหลของอากาศที่มีการแสดงผลผ่านอุปกรณ์วัดความดันตกคร่อมแบบดิจิตอล และใช้อุปกรณ์ปรับความเร็วรอบมอเตอร์ (อินเวอร์เตอร์) ในการปรับความถี่ของพัดลมตามที่กำหนดไว้ (มีการสอบเทียบเพื่อหาความสัมพันธ์ของค่าความถี่ระดับต่างๆ กับปริมาณความเร็วของอากาศที่ต้องการ) โดยเครื่องวัดความเร็วของอากาศที่ใช้ในการทดลองจะมี ช่วงของการวัดอยู่ที่ 0-30 เมตร/วินาที (ความแม่นยำ $\pm 2\%$) จากนั้น อากาศไหลผ่านท่อที่ติดตั้งขดลวดความร้อน (ฮีตเตอร์) ขนาด 2.5 กิโลวัตต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งความร้อนสามารถควบคุมได้โดยการใช้ชุดควบคุมอุณหภูมิให้ปริมาณความร้อนอย่างมีค่าคงที่และสามารถตั้งค่าตามอุณหภูมิที่กำหนด ในการวัดอุณหภูมิจะใช้อุปกรณ์วัดอุณหภูมิ RTD Pt100 เพื่อผลของอุณหภูมิที่แม่นยำ (ความแม่นยำในการวัด $\pm 0.15 + 0.02$ °C) เมื่ออากาศไหลผ่านท่อขดลวดความร้อนจะทำให้อากาศที่ไหลผ่านเข้าไปในเบตมีอุณหภูมิสูงขึ้น

3.4 ขอบเขตของการวิจัย

กลุ่มตัวอย่างที่ใช้ในการศึกษา คือ พริกไทยอ่อนสายพันธุ์จันทบุรี (*Piper Nigrum* Linn.) ปริมาณ 400 กรัม ออกแบบการทดลองด้วยวิธี full factorial design โดยมีตัวแปรอิสระ 2 ตัว 3 ระดับ และวัดคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมี ได้แก่ ความชื้น ค่าสี ค่าวอเตอร์แอกติวิตี และปริมาณฟิเพอริน

3.5 ปัจจัยที่ศึกษา

3.5.1 อุปกรณ์สร้างความปั่นป่วนที่มี P/h 3 ระดับ คือ 0.5 1.0 และ 1.5

3.5.2 ความเร็วของอากาศขาเข้า 3 ระดับ คือ $1.2U_{mf}$ $1.4U_{mf}$ และ $1.6U_{mf}$

3.6 การตรวจวัดคุณภาพของพริกไทย

3.6.1 ความชื้นในวัสดุ (Moisture Content, M)

นิยามความชื้นในวัสดุจะสามารถหาได้ 2 แบบ คือ ความชื้นมาตรฐานเปียกและความชื้นมาตรฐานแห้ง การหาค่าความชื้นของวัสดุโดยวิธีตรงด้วยการใช้ตู้อบ ตามมาตรฐานของ AACC (1995) ด้วยตู้อบลมร้อน (hot air oven) ที่อุณหภูมิ 105 °C เป็นเวลา 72 ชั่วโมง โดยความชื้นมาตรฐานแห้ง (M_d) นิยมใช้ในการวิเคราะห์ ดังสมการ (1)

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

เมื่อ w คือ มวลของวัสดุ (กิโลกรัม)

d คือ มวลของวัสดุแห้ง (ไม่มีความชื้นอยู่ภายในเมล็ด) (กิโลกรัม)

ความชื้นมาตรฐานแห้งนี้เป็นที่นิยมใช้กัน มวลของวัสดุแห้งจะมีค่าคงที่หรือเกือบคงที่ระหว่างการอบแห้ง โดยเฉพาะผลผลิตทางการเกษตร (ชนพัฒน์ เหมเมือง และคณะ, 2564)

3.6.2 อัตราส่วนความชื้น (Moisture Ratio, MR)

ค่าที่บ่งบอกถึงอัตราการเปลี่ยนแปลงมวลน้ำในวัสดุเมื่อเทียบความชื้นเริ่มต้นเมื่อเวลาการอบแห้งดำเนินต่อไปในเวลาใดๆ เขียนเป็นสมการ (2)

$$MR = \frac{M_t}{M_i} \quad (2)$$

เมื่อ	MR	คือ อัตราส่วนความชื้น
	M_t	คือ ปริมาณความชื้นฐานแห้งที่เวลาใดๆ (%มาตรฐานแห้ง)
	M_i	คือ ปริมาณความชื้นฐานแห้งเริ่มต้นของตัวอย่าง (%มาตรฐานแห้ง)

3.6.3 อัตราการอบแห้ง (Drying Rate, DR)

อัตราการอบแห้ง คือ ความชื้นที่ระเหยออกจากวัสดุต่อช่วงเวลาการอบแห้ง สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ช่วง คือ ช่วงอัตราการอบแห้งคงที่และช่วงอัตราการอบแห้งลดลง หรือเป็นอัตราส่วนของการเปลี่ยนแปลงความชื้นในวัสดุอบแห้งต่อเวลาในหน่วย กิโลกรัม/ชั่วโมง หาได้ดังสมการ (3)

$$DR = \frac{M_t - M_f}{t} \quad (3)$$

เมื่อ	DR	คือ อัตราการอบแห้ง (กิโลกรัม/ชั่วโมง)
	M_t	คือ ปริมาณความชื้นที่เวลาใดๆ (%มาตรฐานแห้ง)
	M_f	คือ ปริมาณความชื้นสุดท้ายของวัสดุ (%มาตรฐานแห้ง)
	t	คือ เวลา (ชั่วโมง)

3.6.4 ค่าสี (Color)

ตรวจวัดด้วยเครื่อง spectrophotometer ยี่ห้อ Hunter Lab (รุ่น Colourflex EZ , USA) ทำการสอบเทียบก่อนทำการทดสอบคุณภาพ โดยการนำแผ่นสีมาตรฐานสีมืดและขาวมาอ่านค่า บันทึกค่าในระบบ CIE L* a* b* ค่า L* บ่งบอกความสว่างของสี ในช่วงความสว่าง (0) ถึง (100) ค่า a* แสดงค่าสีในช่วงสีแดง (+) ถึงสีเขียว (-) และค่า b* แสดงค่าสีในช่วงสีเหลือง (+) ถึง สีน้ำเงิน (-)

3.6.5 ค่าวอเตอร์แอกติวิตี (a_w)

วิเคราะห์ปริมาณ a_w โดยการนำตัวอย่าง 3-5 กรัม ใส่ในภาชนะเพื่อนำไปวัดหาค่า a_w อัตโนมัตินในเครื่อง AQUA LAB model 4TE ตั้งอุณหภูมิไว้ที่ 25 °C โดยวัดทั้งหมด 3 ครั้ง แล้วนำมาหาค่าเฉลี่ย

3.6.6 ปริมาณฟิเพอริน

เตรียมสารละลายโดยนำพริกไทยที่ผ่านการอบแห้ง 10 กรัม มาสกัดในเครื่องสกัดแบบ Soxhlet ด้วยเอทานอล 95% 150 มิลลิลิตร เป็นเวลา 2 ชั่วโมง สารละลายถูกรองและทำให้เข้มข้นบนเครื่องกวนสารละลายพร้อมให้ความร้อนที่ 60°C เติม 10% ethanolic potassium hydroxide ปริมาตร 10 มิลลิลิตร พร้อมกวนอย่างต่อเนื่อง 90 นาที กรองสิ่งตกค้างและเก็บสารละลายไว้ในตู้เย็น 24 ชั่วโมง (Shingate et al., 2013)

ซึ่งสารละลาย 0.5 กรัม ผสมกับเอทานอล 50 มิลลิลิตร ในขวดแก้วก้นกลม นำไปต่อเข้ากับเครื่องควบแน่นกลั่นกลับในที่มืด นำไปต้มเป็นเวลา 3 ชั่วโมง ปล่อยให้เย็น แล้วจึงนำมารองสารละลายใส่ในขวดปรับปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร ล้างขวดแก้วก้นกลมและกระดาษกรองด้วยเอทานอลครั้งละประมาณ 10 มิลลิลิตร และปรับปริมาตรด้วยเอทานอลให้ถึงขีดปริมาตร ใช้ปิเปตต์ดูดสารละลายที่เตรียมไว้ก่อนหน้า 5 มิลลิลิตร ลงในขวดปรับปริมาตร 50 มิลลิลิตร หลังจากนั้นเติมเอทานอลลงไปให้ปริมาตรถึงขีดปริมาตร ต่อมาใช้ปิเปตต์ดูดสารละลายที่เตรียมไว้ก่อนหน้า 5 มิลลิลิตร จากขวดปรับปริมาตร 50 มิลลิลิตร ใส่ในขวดปรับปริมาตร 25 มิลลิลิตร แล้วทำการเติมเอทานอลลงไปจนถึงขีดปริมาตร

ทำการวัดค่าความดูดกลืน (A) ของสารละลายโดยใช้เครื่อง UV-VIS Spectrophotometer ที่ 343 นาโนเมตรโดยใช้ ตามมาตรฐาน ISO 5564 หาปริมาณฟิเพอรินได้จากสมการที่ (4) ทำการวัด 3 ซ้ำ แล้วหาค่าเฉลี่ย

$$\% \text{dry basis} = \frac{A}{A_{1\text{cm}}^{1\%}} \times \frac{50}{5} \times \frac{25}{5} \times \frac{100}{m} \times \frac{100}{100-H} \quad (4)$$

เมื่อ	m	คือ	มวลของตัวอย่าง (กรัม)
	H	คือ	ปริมาณความชื้นของตัวอย่าง (% _{wet basis})
	A	คือ	ค่าความดูดกลืนที่ได้จากการอ่านค่า
	$A_{1\text{cm}}^{1\%}$	คือ	ค่าความดูดกลืนที่ 343 นาโนเมตร ของสารละลายฟิเพอริน 1% ในคิวเวทที่มีความยาวเส้นทางเดินแสง 1 เซนติเมตร มีค่าเท่ากับ 1.238

3.7 การวิเคราะห์ทางสถิติ (Analysis of Statistic)

การวิจัยนี้ได้วางแผนการทดลองแบบ full factorial design ทำการทดลอง 3 ซ้ำ วิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูล (ANOVA) เปรียบเทียบความแตกต่างค่าเฉลี่ยของข้อมูลด้วยวิธี Turkey's range test ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 โดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป Minitab® 21



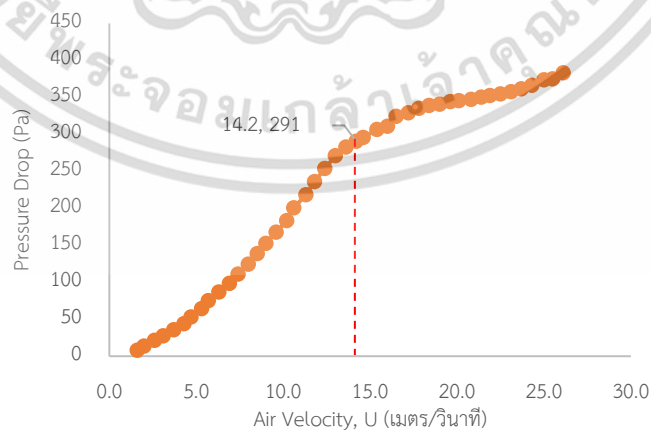
บทที่ 4

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

4.1 ความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดเซชัน

จากการทำการทดสอบเบื้องต้นเพื่อหาความเร็วต่ำสุดที่มีความเหมาะสมในการนำมาใช้กับการทดลองการอบแห้งเมล็ดพริกไทย โดยได้ความเร็วของอากาศที่ 14.2 เมตร/วินาที ซึ่งในช่วงนี้เบดของพริกไทยเกิดการสั่นและเคลื่อนที่เนื่องจากแรงในการไหลของอากาศ มากกว่าแรงต้านน้ำหนักของเมล็ดพริกไทย เรียกค่านี้อ่า ความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดเซชัน (Minimum fluidization velocity, U_{mf})

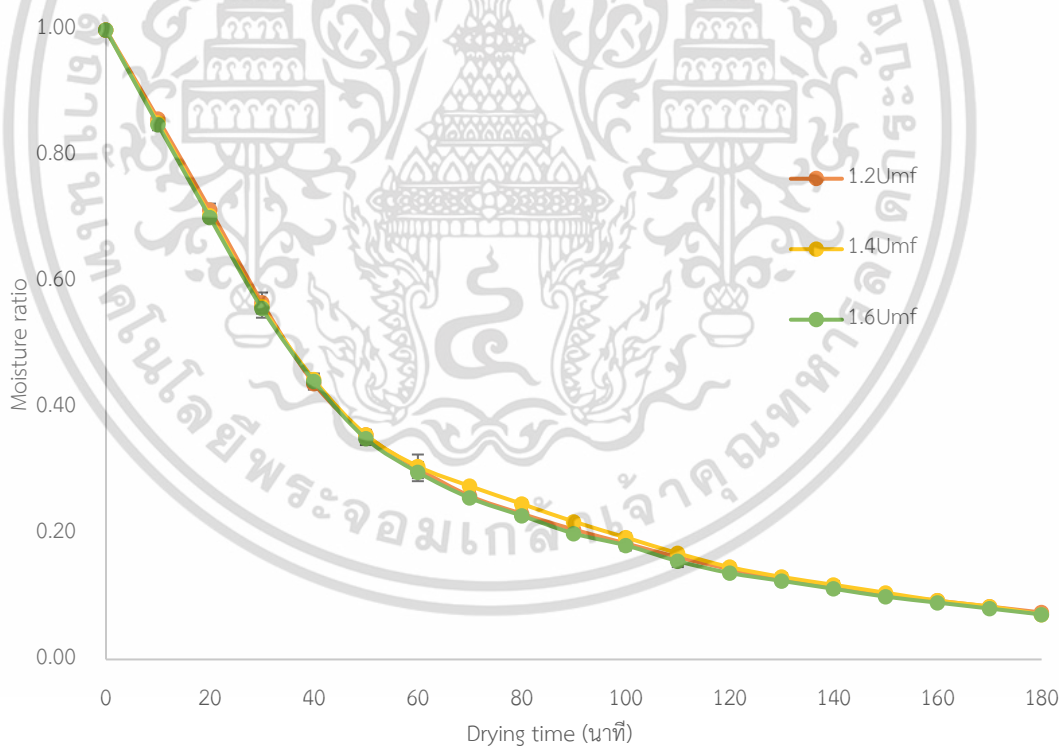
ผลการทดลองหาค่าความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดเซชัน แสดงอยู่ในรูปที่ 4.1 ในช่วงแรกความดันตกคร่อมยังไม่คงที่ จะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มความเร็วของอากาศมีค่าเพิ่มขึ้น เมล็ดพริกไทยจะยังไม่ขยับตัว เรียกว่า เบดนิ่ง (Fixed bed) เมื่อเพิ่มความเร็วของอากาศขึ้น จะทำให้เมล็ดพริกไทยเริ่มมีการขยับตัวจนกระทั่งที่ความเร็วของอากาศ 14.2 เมตร/วินาที การขยายตัวของเบดเป็นไปอย่างสม่ำเสมอ และทำให้เมล็ดพริกไทยเริ่มเคลื่อนที่แบบอิสระ ซึ่งจากผลการทดลองดังกล่าว จึงเลือกใช้ความเร็วเริ่มต้นที่ทำให้เกิดฟลูอิดเซชันที่ความเร็วของอากาศ 14.2 เมตร/วินาที ทำการทดลองเพิ่มความเร็วขึ้นโดยกำหนดช่วงไว้คือตั้งแต่ $1.0U_{mf}$ ถึง $1.8U_{mf}$ ที่มีช่วงความเร็วของอากาศที่ 14.2 ถึง 25.6 เมตร/วินาที (ค่าความดันตกคร่อมเบดมีค่าคงที่) จึงกำหนดความเร็วเริ่มต้นห่างกันช่วงละ $0.2U_{mf}$ คือ $1.2U_{mf}$ $1.4U_{mf}$ และ $1.6U_{mf}$ โดยผลการทดลองหาความเร็วต่ำสุดหาได้จากผลการทดลอง ดังแสดงในรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 ความเร็วของอากาศเริ่มต้นที่ทำให้เกิดฟลูอิดเซชัน

4.2 ผลกระทบของความเร็วของอากาศต่อการลดลงของความชื้นในเครื่องอบแห้งฟลูอิดไรซ์เบดแบบดั้งเดิม

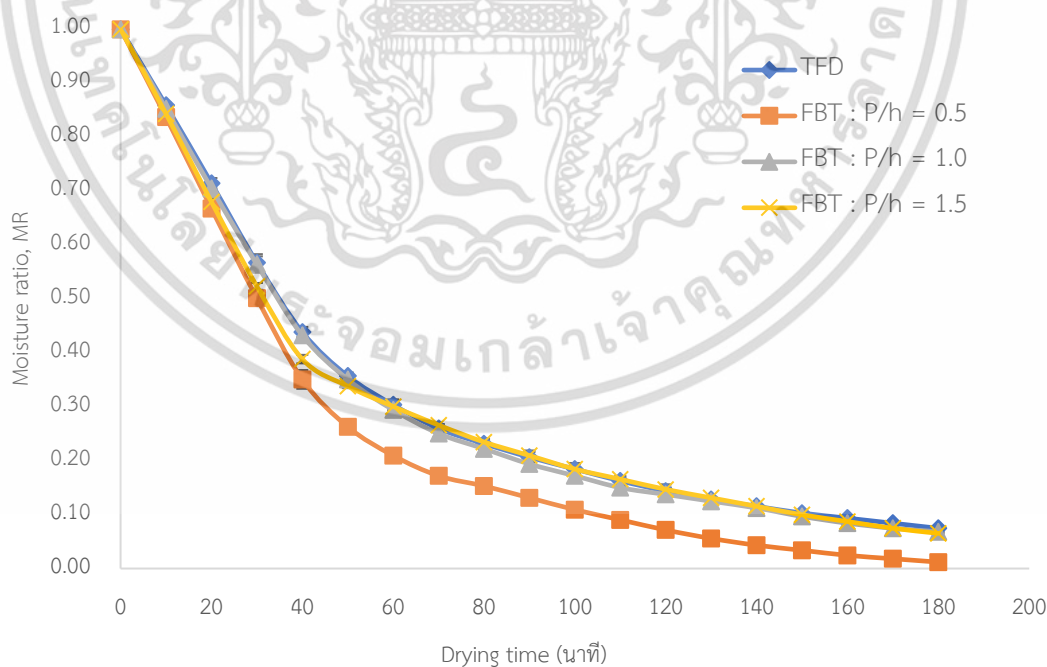
จากการทดลองการศึกษาอิทธิพลของความเร็วของอากาศเข้าในการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไรซ์เบดแบบดั้งเดิม (Typical fluidized bed dryer, TFD) ที่มีอุณหภูมิของอากาศเข้าเท่ากับ $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ และทำการปรับความเร็วของอากาศที่ $1.2U_{mf}$ $1.4U_{mf}$ และ $1.6U_{mf}$ พบว่าอัตราส่วนความชื้นของพริกไทยที่ผ่านกระบวนการอบแห้งอยู่ที่ 0.0746 0.0715 และ 0.0715 ตามลำดับ จากการวิเคราะห์ทางสถิติพบว่า ความเร็วของอากาศทั้ง 3 ระดับ ส่งผลต่อการลดลงของความชื้นของเมล็ดพริกไทยใกล้เคียงกัน อย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) ในช่วง 0-60 นาที อัตราส่วนการลดลงของความชื้นในเมล็ดพริกไทยอย่างรวดเร็ว เนื่องจากที่พื้นผิวของเมล็ดพริกไทยมีความชื้นสูง ทำให้การถ่ายเทมวลของน้ำมายังผิวนอกเป็นไปอย่างรวดเร็ว มากกว่าในช่วง 70-180 นาที แล้วค่อยๆ ลดอัตราเร็วในการถ่ายเทความชื้นลง แสดงในรูปที่ 4.2



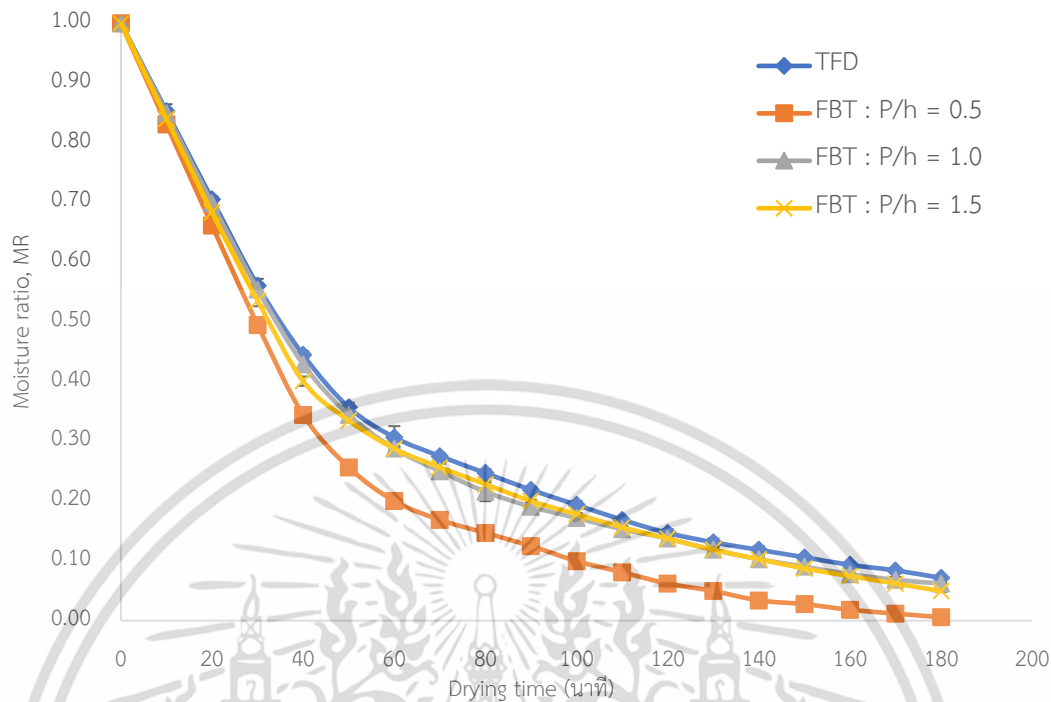
รูปที่ 4.2 อัตราส่วนของความชื้นที่ลดลงด้วยเครื่องอบแห้งฟลูอิดไรซ์เบดแบบดั้งเดิมที่อุณหภูมิ $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ ความเร็วของอากาศ $1.2U_{mf}$ $1.4U_{mf}$ และ $1.6U_{mf}$

4.3 ผลกระทบของระยะห่างอุปกรณ์สร้างความปั่นป่วนและความเร็วของอากาศต่อการลดลงของความชื้นในเครื่องอบแห้งฟลูอิดไคซ์เบด

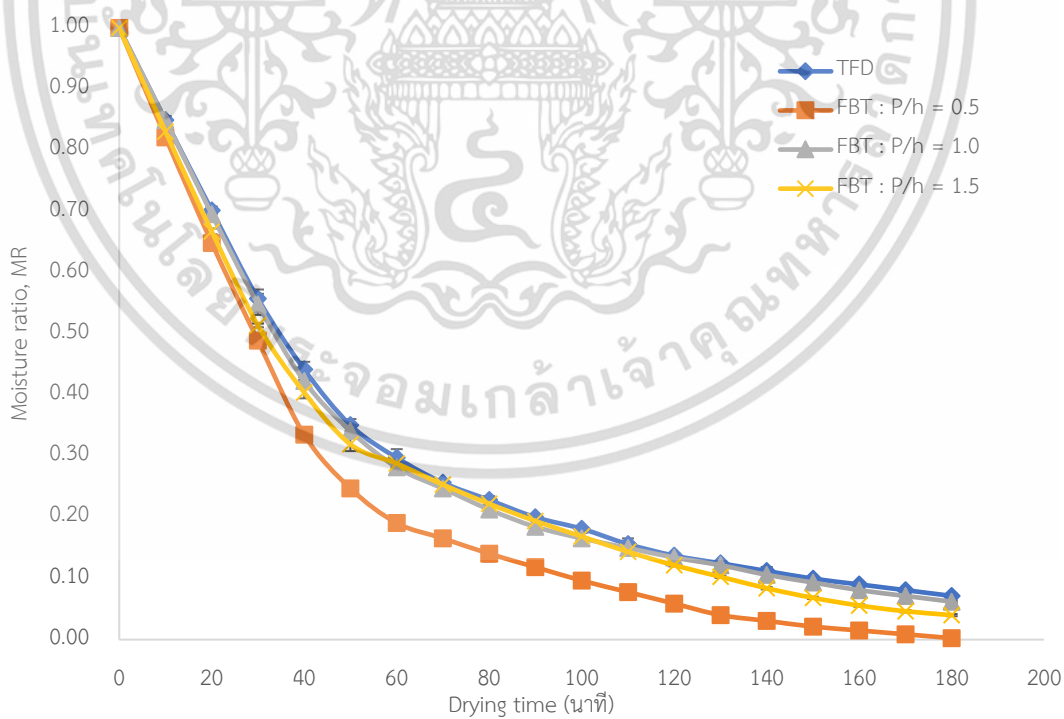
อิทธิพลของอัตราส่วนระยะห่างอุปกรณ์ต่อความสูงของเบด (P/h เท่ากับ 0.5 1.0 และ 1.5) ต่อการลดลงของความชื้นในเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไคซ์เบดที่ติดตั้งอุปกรณ์สร้างความปั่นป่วน (Fluidized bed dryer with baffle turbulator, FBT) นำเสนอดังรูปที่ 4.3 ภายใต้เงื่อนไขที่ความเร็วของอากาศ $1.2U_{mf}$ และอุณหภูมิอบแห้ง $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ จากผลการทดลอง ปรากฏว่า เมื่อเสร็จสิ้นกระบวนการอบแห้ง 180 นาที อัตราส่วนระยะห่างอุปกรณ์ต่อความสูงของเบด (P/h) เท่ากับ 0.5 สามารถลดความชื้นของเมล็ดพริกไทยได้มากที่สุด อัตราส่วนความชื้นเหลือเพียง 0.0119 โดยที่อัตราส่วนของความชื้นของ P/h ที่ 1.0 และ 1.5 เท่ากับ 0.0683 และ 0.0652 ตามลำดับ มีความใกล้เคียงกันอย่างมาก มีนัยสำคัญ ในส่วนของฟลูอิดไคซ์เบดแบบดั้งเดิม (TFD) มีอัตราส่วนของความชื้นสูงเท่ากับ 0.0746 สูงสุดอย่างมีนัยสำคัญ จากรูปที่ 4.4 ภายใต้เงื่อนไขที่ความเร็วของอากาศ $1.4U_{mf}$ และอุณหภูมิอบแห้ง $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ จากผลการทดลอง ปรากฏว่า ที่ P/h เท่ากับ 0.5 สามารถลดความชื้นของเมล็ดพริกไทยได้มากที่สุด อัตราส่วนความชื้นเหลือเพียง 0.0056 โดยที่อัตราส่วนของความชื้นที่ P/h 1.0 และ 1.5 เท่ากับ 0.0621 และ 0.0495 ตามลำดับ



รูปที่ 4.3 ความชื้นที่ลดลงตามระยะเวลาการอบแห้งที่ความเร็วของอากาศ $1.2U_{mf}$



รูปที่ 4.4 ความชื้นที่ลดลงตามระยะเวลาการอบแห้งที่ความเร็วของอากาศ 1.4U_{mf}



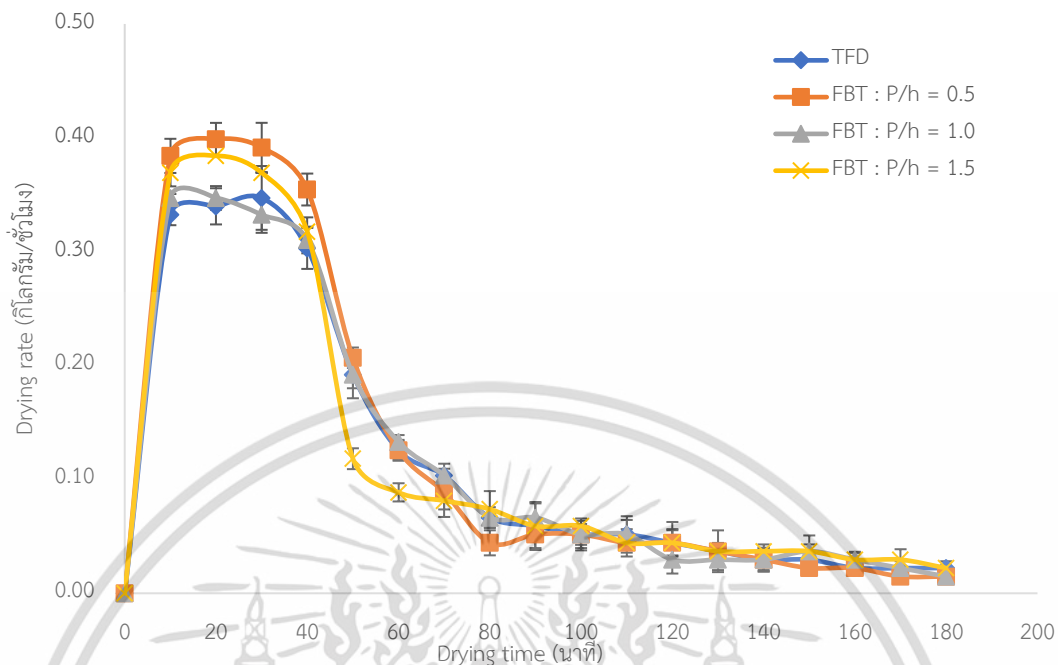
รูปที่ 4.5 ความชื้นที่ลดลงตามระยะเวลาการอบแห้งที่ความเร็วของอากาศ 1.6U_{mf}

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

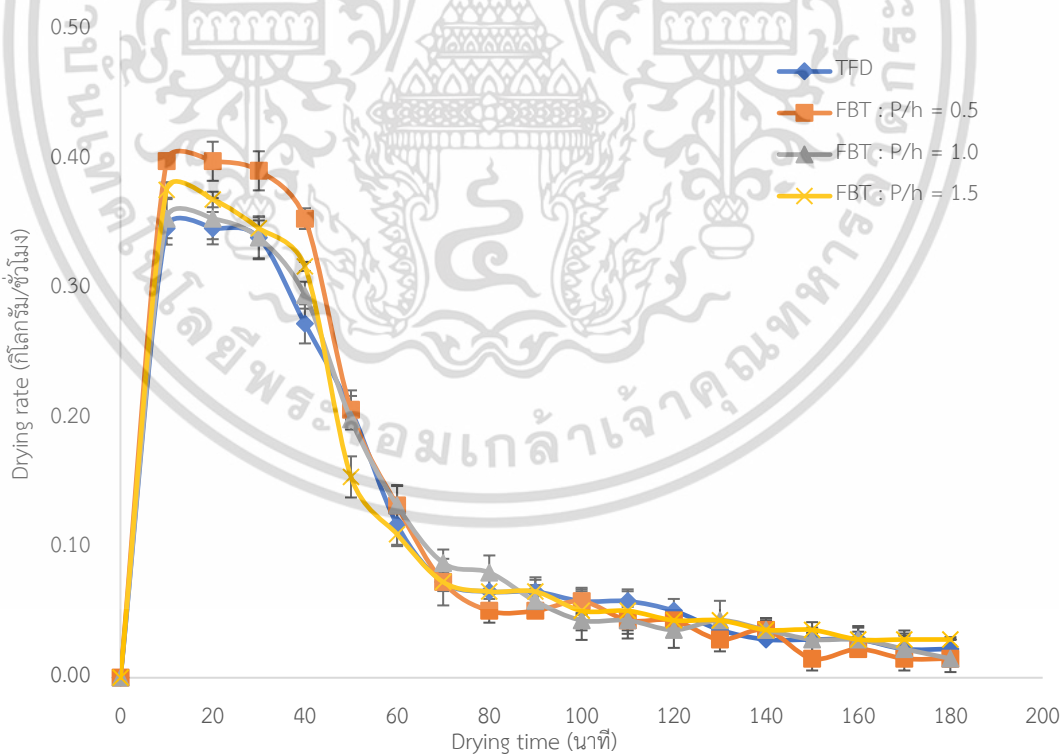
จากรูปที่ 4.5 ภายใต้เงื่อนไขที่ความเร็วของอากาศ $1.6U_{mf}$ และอุณหภูมิอบแห้ง $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ จากผลการทดลอง ปรากฏว่า ที่ P/h เท่ากับ 0.5 สามารถลดความชื้นของเมล็ดพริกไทยได้มากที่สุด อัตราส่วนความชื้นเหลือเพียง 0.0025 โดยที่อัตราส่วนของความชื้น P/h 1.0 และ 1.5 เท่ากับ 0.0621 และ 0.0401 ตามลำดับ ความเร็วของอากาศที่เพิ่มขึ้นมีผลกระทบต่ออัตราการลดลงของความชื้น มีเพียงที่ P/h เท่ากับ 0.5 และ 1.5 ที่มีการลดลงของอัตราส่วนของความชื้น ซึ่งจะเห็นได้ว่าการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไชน์เบดที่ติดตั้งอุปกรณ์สร้างความปั่นป่วน (FBT) ในชุดการทดลองสามารถลดความชื้นได้ดีกว่าเครื่องอบแห้งฟลูอิดไชน์เบดแบบดั้งเดิม (TFD) จากมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมของพริกไทย (มอก.297-2556) กำหนดคุณลักษณะที่ต้องการของพริกไทยชนิดเมล็ดไว้ว่า ปริมาณความชื้นจะต้องไม่เกิน 13.0% (มาตรฐานเปียก) ซึ่งจะเท่ากับ 7.7% (มาตรฐานแห้ง) พบว่า การติดตั้งอุปกรณ์สร้างความปั่นป่วนสามารถลดระยะเวลาการอบแห้งลงจากเครื่องอบแห้งฟลูอิดไชน์เบดแบบดั้งเดิม โดย P/h ที่ 0.5 1.0 และ 1.5 เท่ากับ 33.3% 5.6% และ 11.1% ตามลำดับที่สภาวะความเร็วของอากาศเดียวกัน ส่วนความเร็วของอากาศที่สูงขึ้นทุกๆ $0.2U_{mf}$ ส่งผลต่อระยะเวลาการอบแห้งลดลง 5.6% เฉพาะที่ P/h เท่ากับ 0.5 และ 1.5

4.4 อัตราการอบแห้งของเมล็ดพริกไทย

จากการศึกษาอัตราการเปลี่ยนแปลงความชื้นของเมล็ดพริกไทยเป็นอีกวิธีการหนึ่งที่สำคัญเพื่อศึกษาประสิทธิภาพของเครื่องอบแห้งว่ามีผลการลดความชื้นที่ดีหรือไม่ จากสมมุติฐานงานวิจัยนี้จะกล่าวว่าถ้าออกแบบเครื่องอบแห้งที่ติดตั้งอุปกรณ์สร้างความปั่นป่วนแล้วจะสามารถส่งผลให้อัตราการอบแห้งเมล็ดพริกไทยอยู่ในระดับที่น่าพึงพอใจโดยวัดจากอัตราการลดลงของความชื้น โดยเปรียบเทียบระหว่างเครื่องอบแห้งฟลูอิดไชน์เบดแบบธรรมดา (TFD) กับโดยเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไชน์เบดที่ติดตั้งอุปกรณ์สร้างความปั่นป่วน (FBT) จากรูปที่ 4.6 พบว่า ในช่วงเวลา 10-30 นาทีแรกนั้น ที่ P/h เท่ากับ 0.5 1.0 และ 1.5 มีอัตราการอบแห้งที่สูงสุดที่ 0.3989 0.3472 และ 0.3842 กิโลกรัม/ชั่วโมงตามลำดับ หลังจากนั้นอัตราการอบแห้งจะลดลงตามระยะเวลาที่ใช้ในการอบแห้ง และจะลดลงอย่างช้าเมื่อระยะเวลาการอบแห้งผ่านไปมากกว่า 80 นาที



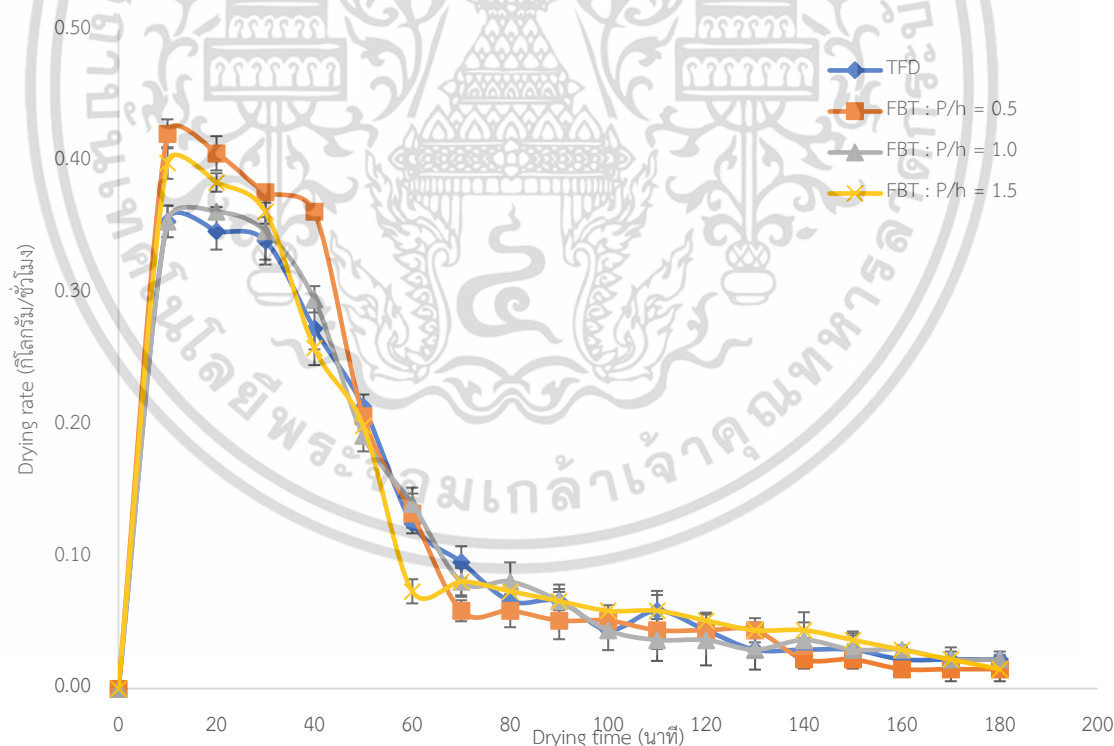
รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์อัตราการอบแห้งเทียบกับเวลา ที่ 1.2U_{mf}



รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์อัตราการอบแห้งเทียบกับเวลา ที่ 1.4U_{mf}

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

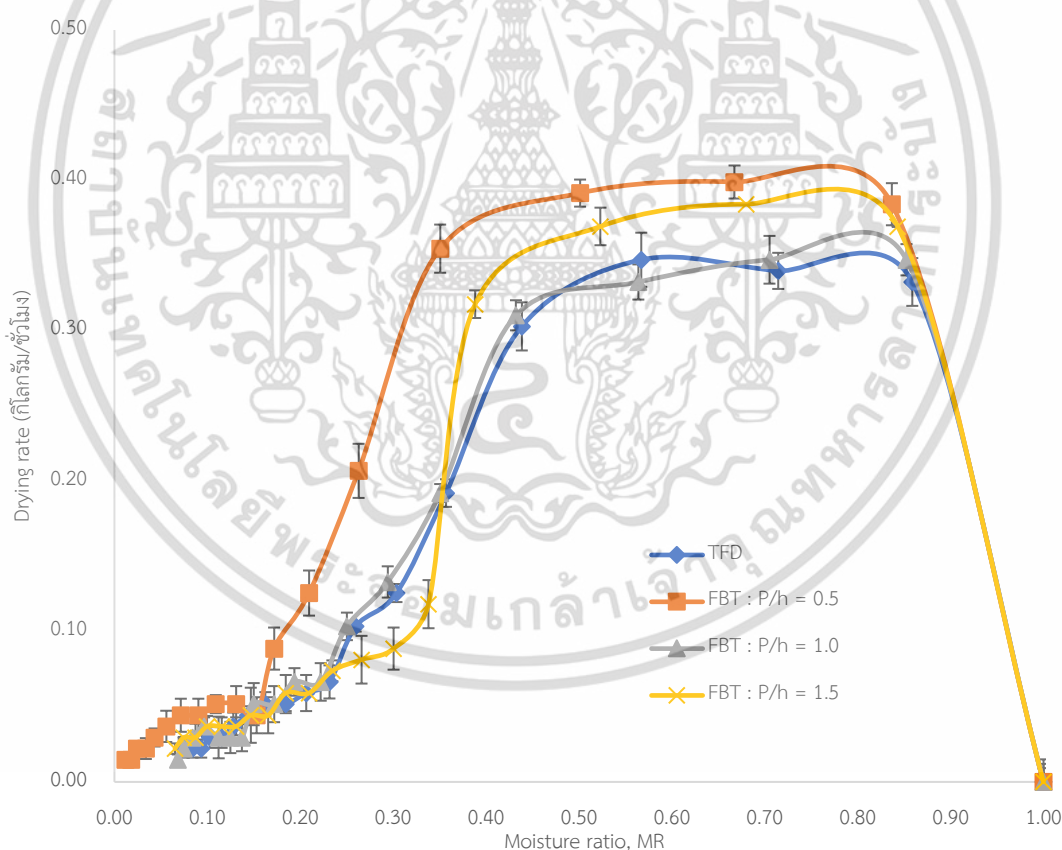
เมื่อทำการเปรียบเทียบผลที่ได้จากการทดลองของเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดซ์เบดแบบดั้งเดิม (TFD) ที่ไม่ได้ติดตั้งอุปกรณ์สร้างความปั่นป่วนกับเครื่องอบแห้งฟลูอิดซ์เบดที่ติดตั้งอุปกรณ์สร้างความปั่นป่วน ผลการทดลองอธิบายได้ว่า ในช่วงแรกที่เวลา 0-10 นาที อัตราการเปลี่ยนแปลงของความชื้นความข้างสูงเนื่องจากมีความชื้นสูงที่ปริมาณผิวของเมล็ดพริกไทยค่อนข้างสูง และเริ่มคงที่ในช่วง 10-40 นาที อัตราการเปลี่ยนแปลงของความชื้นลดลงเพียงเล็กน้อย หลังจากนั้นจะเกิดการลดลงของอัตราการเปลี่ยนแปลงของความชื้นอย่างรวดเร็ว จนถึงนาทีที่ 70-80 นาที หลังจากผ่านไปเป็นเวลา 80 นาที จนถึงเวลา 180 นาที อัตราการอบแห้งจะค่อยๆ ลดลงเล็กน้อย อัตราส่วนระยะห่าง (P/h) จะไม่ค่อยส่งผลต่อการลดความชื้นภายในเมล็ดพริกไทย ซึ่งในช่วงอัตราการอบแห้งลดลงจะขึ้นอยู่กับปัจจัยของการแพร่ความชื้นภายในวัสดุแทน จึงทำให้เมล็ดพริกไทยยังคงมีความชื้นลดลงเพียงเล็กน้อย ในส่วนของความเร็วของอากาศที่เพิ่มขึ้น ในช่วงแรกจะทำให้อัตราการอบแห้งสูงขึ้น แต่เมื่อผ่านไปในช่วงเวลาหนึ่ง ความเร็วของอากาศจะมีผลต่ออัตราการอบแห้งน้อยลง ทำให้อัตราการอบแห้งในช่วงหลังๆ ของการทดลอง มีค่าใกล้เคียงกัน ดังแสดงในรูปที่ 4.6 4.7 และ 4.8



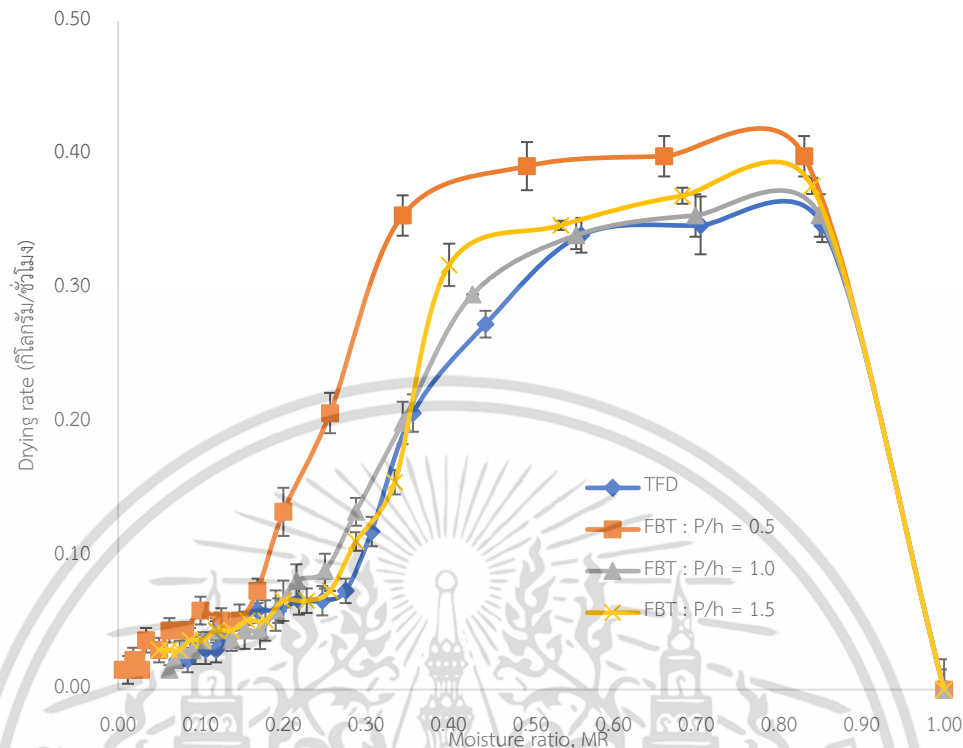
รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์อัตราการอบแห้งเทียบกับเวลา ที่ $1.6U_{mf}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

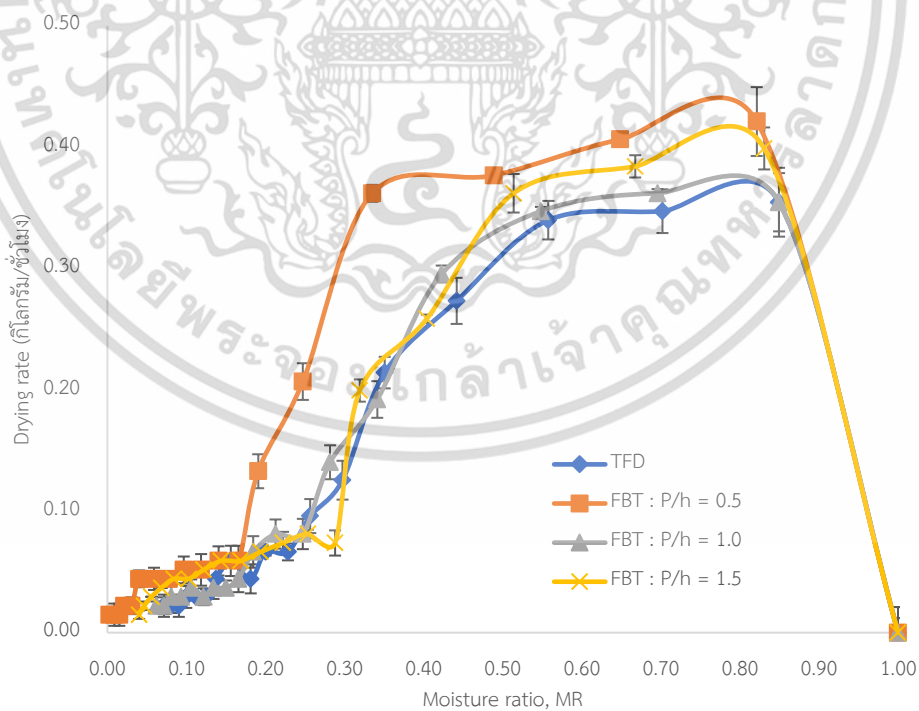
รูปที่ 4.9 ผลการอบแห้งในเครื่องฟลูอิดเบดที่ติดตั้งอุปกรณ์สร้างความปั่นป่วน (FBT) ที่มี P/h เท่ากับ 0.5 1.0 และ 1.5 พบว่า ในช่วงเริ่มต้นของเวลาเฉลี่ยที่ 0-10 นาที มีอัตราการเปลี่ยนแปลงของความชื้นของเมล็ดพริกไทยสูงและมีค่าคงที่จนถึงเวลาเฉลี่ย เนื่องจากมีความชื้นสูงที่ปริมาณผิวของเมล็ดพริกไทยค่อนข้างสูง จนถึงช่วงเวลา 10-40 นาที ซึ่งจะสังเกตเห็นที่ P/h เท่ากับ 0.5 มีอัตราการเปลี่ยนแปลงของความชื้นสูงที่สุด รองลงมาคือที่ P/h เท่ากับ 1.5 และ 1.0 ตามลำดับ โดยในช่วงนี้ ค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงของความชื้นจะค่อนข้างคงที่ (constant rate) เมื่อระยะเวลาเฉลี่ยผ่านไปเป็น 40-80 นาที อัตราการเปลี่ยนแปลงความชื้นจะลดลงเป็นอย่างมาก และเมื่อเวลาเฉลี่ยเข้าสู่ 50 นาที สุดท้าย อัตราการเปลี่ยนแปลงความชื้นจะเริ่มลดลงเล็กน้อยจนถึงเวลาเฉลี่ยที่ 180 นาที ดังนั้น ที่ P/h เท่ากับ 0.5 มีอัตราการอบแห้งสูงสุดเมื่อเทียบกับที่เงื่อนไขอื่นๆ เนื่องจากการเพิ่มความปั่นป่วนของเมล็ดพริกไทยภายในหอบ จึงส่งผลให้การถ่ายเทความร้อนมีค่าเพิ่มขึ้น



รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ของอัตราการอบแห้งเทียบกับอัตราส่วนความชื้น ที่ $1.2U_{mf}$



รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ของอัตราการอบแห้งเทียบกับอัตราส่วนความชื้น ที่ $1.4U_{mf}$



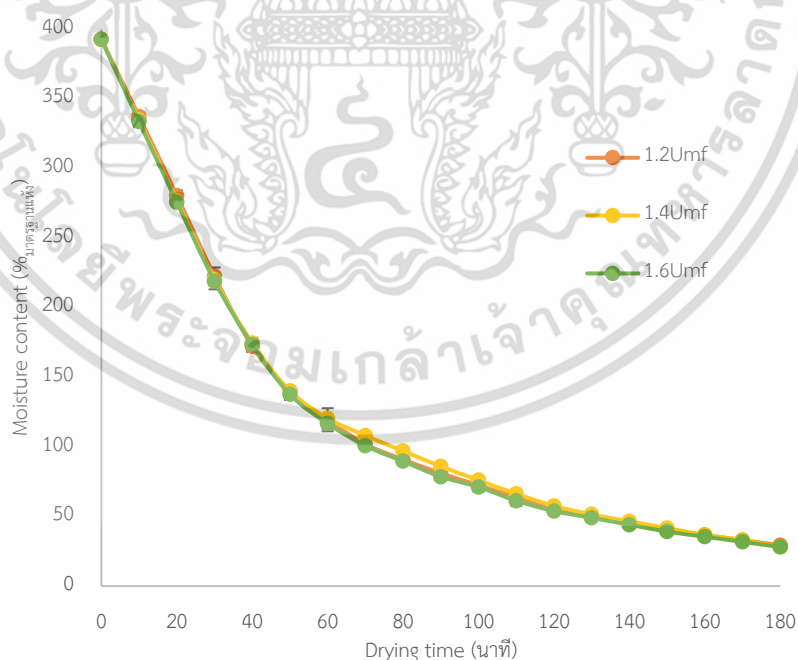
รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ของอัตราการอบแห้งเทียบกับอัตราส่วนความชื้น ที่ $1.6U_{mf}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.5 ผลกระทบของระยะห่างอุปกรณ์สร้างความปั่นป่วนและความเร็วของอากาศต่อคุณสมบัติทางเคมีและกายภาพ

4.5.1 ค่าสี (Color)

จากการวัดค่าสีด้วยเครื่อง spectrophotometer ซึ่งได้ผลดังตารางที่ 4.1 เป็นค่าสีที่ความชื้นของพริกไทยที่ผ่านกระบวนการอบแห้งมาเป็นเวลา 180 นาที ค่า L^* ของพริกไทยหลังผ่านกระบวนการอบแห้ง มีค่าสูงที่สุดเท่ากับ 18.60 ± 0.83 มีอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ค่า P/h เท่ากับ 0.5, 1.0 และ 1.5 ความเร็วของอากาศเท่ากับ $1.2U_{mf}$ และ $1.4U_{mf}$ พบว่าค่า L^* ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ที่ความเร็วของอากาศเท่ากับ $1.6U_{mf}$ ที่ TFD และ P/h เท่ากับ 1.5 พบว่าค่า L^* มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น สวนเท่ากับ P/h เท่ากับ 0.5 ที่พบว่าค่า L^* มีแนวโน้มลดลง ค่า a^* ของพริกไทยหลังผ่านกระบวนการอบแห้ง มีค่าต่ำที่สุดเท่ากับ 0.56 ± 0.10 ซึ่งมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ที่ P/h เท่ากับ 0.5 และ 1.5 เมื่อความเร็วของอากาศมีค่าสูงขึ้น ทำให้ค่า a^* มีแนวโน้มลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ค่า b^* ของพริกไทยหลังผ่านกระบวนการอบแห้ง มีค่าสูงที่สุดเท่ากับ 4.46 ± 0.09 และที่ P/h เท่ากัน ค่าความเร็วของอากาศที่เพิ่มขึ้นทำให้ค่า b^* มีแนวโน้มสูงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)



รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ของปริมาณความชื้นเทียบระยะเวลาการอบแห้ง TFD

ตารางที่ 4.1 คุณภาพทางกายภาพของพริกไทยหลังผ่านกระบวนการอบแห้งที่ P/h และความเร็วของอากาศต่างกัน

P/h	Air flow	MC (%มาตรฐานแห้ง)	L*	a*	b*
TFD	1.2U _{mf}	29.29	14.03 ± 0.08 ^d	0.80 ± 0.02 ^{ab}	3.08 ± 0.04 ^{bcd}
	1.4U _{mf}	28.05	15.26 ± 0.17 ^{bcd}	0.74 ± 0.12 ^{ab}	3.71 ± 0.33 ^{abc}
	1.6U _{mf}	28.05	17.93 ± 0.21 ^a	0.69 ± 0.05 ^{ab}	3.96 ± 0.01 ^{ab}
0.5	1.2U _{mf}	4.66	15.07 ± 0.26 ^{bcd}	0.90 ± 0.04 ^a	2.68 ± 0.26 ^{cd}
	1.4U _{mf}	2.20	16.29 ± 0.26 ^b	0.78 ± 0.03 ^{ab}	2.98 ± 0.10 ^{bcd}
	1.6U _{mf}	0.97	14.59 ± 0.27 ^d	0.69 ± 0.09 ^{ab}	2.16 ± 0.31 ^d
1.0	1.2U _{mf}	26.82	14.88 ± 0.45 ^{cd}	0.74 ± 0.17 ^{ab}	3.07 ± 0.80 ^{bcd}
	1.4U _{mf}	24.36	16.33 ± 0.62 ^c	0.72 ± 0.05 ^{ab}	3.68 ± 0.29 ^{abc}
	1.6U _{mf}	24.36	16.17 ± 0.60 ^c	0.70 ± 0.03 ^{ab}	4.46 ± 0.35 ^a
1.5	1.2U _{mf}	25.59	15.14 ± 0.59 ^{bcd}	0.77 ± 0.16 ^{ab}	2.66 ± 0.48 ^d
	1.4U _{mf}	19.44	16.19 ± 0.15 ^{bc}	0.57 ± 0.14 ^b	3.66 ± 0.60 ^{cd}
	1.6U _{mf}	15.74	18.60 ± 0.83 ^a	0.56 ± 0.10 ^b	3.84 ± 0.64 ^{abc}

หมายเหตุ ค่าเฉลี่ย ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานจากการวิเคราะห์ 3 ซ้ำ

ค่าเฉลี่ยที่มีตัวอักษรที่ต่างกันในแถวตั้งเดียวกัน แสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$)

4.5.2 ค่าวอเตอร์แอกติวิตี (a_w)

ค่าวอเตอร์แอกติวิตี (Water activity) จากการวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์ที่ได้พบว่าค่าวอเตอร์แอกติวิตีที่ได้จากการทดลองมีค่าอยู่ในช่วง 0.5521 ถึง 0.7209 ถ้ามีค่าวอเตอร์แอกติวิตี น้อยกว่า 0.6 แสดงถึงความปลอดภัยทางด้านจุลินทรีย์ (Jay, 2000) ซึ่งมีเพียง P/h เท่ากับ 0.5 เท่านั้น ดังแสดงในตารางที่ 4.2 ที่ P/h ต่างกันจะมีค่าความชื้นต่างกัน ส่งผลให้ค่า a_w มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ค่าความชื้นที่สูงขึ้นส่งผลให้ค่า a_w สูงขึ้นเช่นกันในระดับที่แตกต่างกันไป เมื่อความเร็วของอากาศในแต่ละระดับของระยะห่างของอุปกรณ์สร้างความปั่นป่วน P/h เท่ากับ 1.5 ค่า a_w จะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญที่ความเร็วของอากาศเท่ากับ 1.6U_{mf}

ตารางที่ 4.2 ค่า a_w ของพริกไทยที่ผ่านกระบวนการอบแห้งโดยเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดซ์เบด

P/h	Air flow	MC (%มาตรฐานแห้ง)	a_w
TFD	1.2U _{mf}	29.29	0.7209 ± 0.0078 ^a
	1.4U _{mf}	28.05	0.6950 ± 0.0054 ^b
	1.6U _{mf}	28.05	0.6929 ± 0.0031 ^b
0.5	1.2U _{mf}	4.66	0.5527 ± 0.0008 ^f
	1.4U _{mf}	2.20	0.5523 ± 0.0003 ^f
	1.6U _{mf}	0.97	0.5521 ± 0.0002 ^f
1.0	1.2U _{mf}	26.82	0.6815 ± 0.0014 ^c
	1.4U _{mf}	24.36	0.6794 ± 0.0004 ^c
	1.6U _{mf}	24.36	0.6849 ± 0.0054 ^{bc}
1.5	1.2U _{mf}	25.59	0.6351 ± 0.0009 ^e
	1.4U _{mf}	19.44	0.6290 ± 0.0033 ^e
	1.6U _{mf}	15.74	0.6461 ± 0.0004 ^d

หมายเหตุ ค่าเฉลี่ย ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานจากการวิเคราะห์ 3 ซ้ำ

ค่าเฉลี่ยที่มีตัวอักษรที่ต่างกันในแถวตั้งเดียวกัน แสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ (p<0.05)

4.5.3 ปริมาณพิเพอริน

ปริมาณพิเพอรินร้อยละของน้ำหนักพริกไทยที่ตรวจวัดได้อยู่ในช่วงร้อยละของน้ำหนัก 2.2 – 6.8% แสดงในตารางที่ 4.3 พบว่า เมื่อ P/h เพิ่มขึ้นปริมาณพิเพอรินจะเพิ่มขึ้นด้วยเช่นกันลดลงเช่นเดียวกันกับเมื่อความเร็วของอากาศเพิ่มขึ้น ที่ P/h 1.0 และ 1.5 ที่ระดับความเร็วของอากาศเท่ากันจะมีปริมาณพิเพอรินที่ใกล้เคียงกันอย่างมีนัยสำคัญ และเมื่อความเร็วของอากาศเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ปริมาณพิเพอรินมีแนวโน้มลดลงอย่างมีนัยสำคัญ มีเพียงที่ P/h เท่า 0.5 ที่มีปริมาณพิเพอรินต่ำกว่า 4% ตามมาตรฐาน มอก.297-2556 อาจเกิดมาจากปริมาณความชื้นของพริกไทยหลังกระบวนการอบแห้งที่มีปริมาณน้อย

ตารางที่ 4.3 ตารางแสดงปริมาณพิเพอรินของเมล็ดพริกไทยที่ผ่านกระบวนการอบแห้ง

P/h	Air flow	MC (%มาตรฐานแห้ง)	Abs _{343nm}	Piperine content (%มาตรฐานแห้ง)
TFD	1.2Umf	29.29	0.0084	6.8 ± 0.44 ^a
	1.4Umf	28.05	0.0077	6.2 ± 0.46 ^{ab}
	1.6Umf	28.05	0.0067	5.4 ± 0.46 ^{bc}
0.5	1.2Umf	4.66	0.0043	3.6 ± 0.46 ^{de}
	1.4Umf	2.20	0.0037	3.0 ± 0.46 ^e
	1.6Umf	0.97	0.0027	2.2 ± 0.48 ^e
1	1.2Umf	26.82	0.0073	6.0 ± 0.48 ^{abc}
	1.4Umf	24.36	0.0073	6.0 ± 0.46 ^{abc}
	1.6Umf	24.36	0.0067	5.4 ± 0.46 ^{bc}
1.5	1.2Umf	25.59	0.0073	6.0 ± 0.48 ^{abc}
	1.4Umf	19.44	0.0063	5.2 ± 0.46 ^{bc}
	1.6Umf	15.74	0.0057	4.6 ± 0.46 ^{cd}

หมายเหตุ ค่าเฉลี่ย ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานจากการวิเคราะห์ 3 ซ้ำ

ค่าเฉลี่ยที่มีตัวอักษรที่ต่างกันในแต่ละแถวเดียวกัน แสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ (p≤0.05)

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง

5.1 สรุปผลการทดลอง

จากผลการทดลองอบแห้งและทดสอบคุณภาพพริกไทยในแต่ละกรณี สามารถสรุปผลได้ดังนี้

การอบแห้งพริกไทยในเครื่องอบแห้งฟลูอิดเบดแบบดั้งเดิม ที่มีการปรับเปลี่ยนค่าความเร็วของอากาศอยู่ที่ $1.2U_{mf}$ $1.4U_{mf}$ และ $1.6U_{mf}$ พบว่า ความเร็วของอากาศไม่มีผลต่อการอบแห้งเมล็ดพริกไทย

ผลของการอบแห้งในเครื่องอบแห้งฟลูอิดเบดที่ติดตั้งอุปกรณ์สร้างความปั่นป่วน (FBT) ที่มีอัตราส่วนระยะห่าง (P/h) เท่ากับ 0.5 1.0 และ 1.5 ความเร็วของอากาศอยู่ที่ $1.2U_{mf}$ $1.4U_{mf}$ และ $1.6U_{mf}$ อุณหภูมิของอากาศขาเข้า $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ จากการทดลอง พบว่า ที่อัตราส่วนระยะห่างอุปกรณ์สร้างความปั่นป่วน (P/h) เท่ากับ 0.5 ให้อัตราการอบแห้งสูงสุดในทุกระดับความเร็วของอากาศ รองลงมา เป็น P/h เท่ากับ 1.5 ในส่วนของ P/h เท่ากับ 1.0 นั้น มีอัตราการอบแห้งที่ใกล้เคียงกับแบบ TFD มาก แต่ยังมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ส่วนความเร็วของอากาศที่เพิ่มขึ้นในเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดเบดที่ทำการติดตั้งอุปกรณ์สร้างความปั่นป่วน จะส่งผลให้อัตราการอบแห้งเพิ่มสูงขึ้น คุณภาพด้านสีของพริกไทย ที่ความเร็วของอากาศเท่ากับ $1.6U_{mf}$ ที่ TFD และ P/h เท่ากับ 1.5 พบว่าค่า L^* มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น สวนเท่ากับ P/h เท่ากับ 0.5 ที่พบว่าค่า L^* มีแนวโน้มลดลง อาจเป็นเพราะเมื่อความเร็วของอากาศเพิ่มสูงขึ้น ลักษณะการปั่นป่วนภายในหอบส่งผลต่อการถ่ายโอนความร้อนแตกต่างกัน ทำให้ค่าความสว่างเกิดการเปลี่ยนแปลงในทิศทางตรงข้าม ค่าความเร็วของอากาศที่เพิ่มขึ้น ค่าสีแดง ($+a^*$) มีแนวโน้มลดลงที่ P/h เท่ากับ 0.5 และ 1.5 ส่วนค่าสีเหลือง ($+b^*$) มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ค่าออเตอร์แอกติวิตี (a_w) มีเพียง P/h เท่ากับ 0.5 เท่านั้น ที่มีค่าน้อยกว่า 0.6 ความเร็วของอากาศนั้น ไม่ส่งผลต่อค่า a_w สุดท้ายของพริกไทย ส่วนของปริมาณพิเพอรินนั้น เมื่อ P/h เพิ่มขึ้น ปริมาณพิเพอรินจะเพิ่มขึ้น เช่นเดียวกับเมื่อความเร็วของอากาศเพิ่มขึ้น แต่การทดลองที่เหลือแสดงให้เห็นว่ามีปริมาณพิเพอรินในตัวอย่างอย่างไม่น้อยกว่าร้อยละ 4.0 ตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมพริกไทย เครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดเบดที่ติดตั้งอุปกรณ์สร้างความปั่นป่วนสามารถลดความชื้นได้สูงกว่าเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดเบดแบบดั้งเดิมประมาณสูงสุดถึง 33% ในสภาวะเงื่อนไขของการทำงานที่ความเร็วของอากาศเดียวกัน ส่วนความเร็วของอากาศที่สูงขึ้นทุกๆ $0.2U_{mf}$ ส่งผลต่อระยะเวลาการอบแห้งลดลง 5.6% เฉพาะที่ P/h เท่ากับ 0.5 และ 1.5

5.2 ข้อเสนอแนะ

ก่อนเริ่มกระบวนการอบแห้งทุกครั้ง ควรเปิดให้ลมร้อนได้ไหลผ่านหอบอบ ให้วัสดุต่างๆภายในได้เกิดการแลกเปลี่ยนความร้อน ให้มีอุณหภูมิใกล้เคียงกับอุณหภูมิของลมขาเข้า



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บรรณานุกรม

- ฐานข้อมูลส่งเสริมและยกระดับคุณภาพสินค้า OTOP. (2563). *พริกไทย*. <http://otop.dss.go.th/index.php/2014-09-18-12-50-24/food/114-peppers>
- สมชาติ โสภณรณฤทธิ์. (2540). *การอบแห้งเมล็ดธัญพืช* (พิมพ์ครั้งที่ 5, น. 338). คณะพลังงานและวัสดุ. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร. (2564). *สถิติการส่งออกพริกไทยดำหรือขาว ปี 2564*. http://impexp.oae.go.th/service/export.php?S_YEAR=2564&E_YEAR=2564&PRODUCT_GROUP=5251&PRODUCT_ID=3826&wf_search=&WF_SEARCH=Y
- สุภาภรณ์ ปิติพร. (2557). พริกไทย สมุนไพรป้องกันโรคอัลไซเมอร์. *หมอชาวบ้าน*, 36(435), 23.
- ชนพัฒน์ เหมเมือง และคณะ. (2564). *การประยุกต์ใช้เทคนิคฟลูอิดไดเซชันในการอบแห้งชิ้นผักทองแบบลูกเต๋า*. การประชุมวิชาการบัณฑิตศึกษาระดับชาติ ครั้งที่ 19. กรุงเทพฯ, ประเทศไทย.
- อาณัติ พิลลา และคณะ. (2565). ผลกระทบของแผ่นกั้นต่ออัตราการอบแห้งเมล็ดพริกไทยในเครื่องอบแห้งฟลูอิดไดเซชัน. *engineering transactions*, 1(25), 64-72.
- อาทิตยา พัฒนิบูลย์ และ อมรชัย อภรณ์วิชานพ. (2557). เทคโนโลยีการอบแห้ง. *Production Technology*, 234(41), 64-67.
- อารยา ซ้อคำ. (2560). สารพฤกษเคมีจากพริกไทยดำและฤทธิ์ทางเภสัชวิทยา. *PKRU SciTech Journal*, 1(2), 28-39.
- Al-Jasass, F. M., and Al-Jasser, M. S. (2012). Chemical Composition and Fatty Acid Content of Some Spices and Herbs under Saudi Arabia Conditions. *Scientific World Journal*, 1-5.
- American Association of Cereal Chemists, AACC. (1995). *Approved Method of the American Association of Cereal Chemists*, 9th ed. St. Paul, Minnesota, USA.
- Boonloi, A., Panyakan, P., and Promvongse, P. (2008). Drying comparison between fluidized bed and fluidized wavy-surface bed. *The 22nd Conference on Mechanical Engineering Network of Thailand*. Bangkok: KMITL.
- Brennan, J. G., Butters, J. R., Cowel, N. D., and Lilley, A. E. V. (1990). *Food Engineering Operations* (3rd ed.). Elsevier Applied Science.

- Dhas, P. H. A., and Korikanthinmayh, V. S. (2003). Processing and quality of black pepper. *Journal of Spices and Aromatic Crops*, 12(1), 1-13.
- Ergun, S. (1952). Fluid flow through packed columns, *Journal of Chemical Engineering Progress*, 48, 89-94.
- Hu, S., Ao, P., and Liu, D. (1996). Pharmacognostical studies on the roots of *Piper nigrum* L. III: Determination of essential oil and piperine. *Acta Horticulturae*, 426, 179-182.
- Jay, J. M. (2000). Modern Food Microbiology (6th Edition). <http://dx.doi.org/10.1007/978-1-4615-4427-2>.
- Khajuria, A., Zutshi, U., and Bedi, K. (1998). Permeability characteristics of piperine on oral absorption: an active alkaloid from peppers and a bioavailability enhancer. *Indian Journal of Experimental Biology*, 36, 46-50.
- Ko, J. M. (1995). A study on quantitative method of piperine in pure ground black pepper. *Journal of Food Hygiene and Safety*, 10, 169-174.
- Lee, J. G., Kim, D. W., Shin, Y., and Kim, Y. J. (2020) Comparative study of the bioactive compounds, favours and minerals present in black pepper before and after removing the outer skin. *LWT-Food Science and Techenology*, 125, 109356.
- Maskan, A., Kaya, S., and Maskan, M. (2002). Hot air and sun drying of grape leather (pestil). *Journal of Food Engineering*, 54(202), 81-88.
- Mujumdar, A. M., Dhuley, J. N., Deshmukh, V. K., Raman, P. H., and Naik, S. R. (1990). Anti-inflammatory activity of piperine. *Japanese Journal of Medical Science and Biology*, 43, 95-100.
- Mukherjee, P. K. (2002). Quality control of herbal drugs, Business Horizons. *New Delhi*, 755-760.
- Ozbey, M., and Soylemez, M. S., (2005). Effect of swirling flow on fluidized bed drying of wheat grains, *Energy Conversion and Management*, 46, 1495-1512.
- Pradeep, C., and Kuttan, G. (2002). Effect of piperine on the inhibition of lung metastasis industry of induced B16F-10 melanoma cells in mice. *Clinical & Experimental Metastasis*, 19, 703-708.

- Promvongse, P., Boonloi, A., Pimsarn, M., and 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.
- Parthasarathy, V. A., Chempakam, B., and Zachariah, T. J. (2008). Chemistry of spices, London: CABI.
- Sabina, E. P., Souriyani, A. D. H., Jackline, D., and Rasool, M. K. (2010). Piperine, an active ingredient of black pepper attenuates acetaminophen-induced hepatotoxicity in mice. *Asian Pacific Journal of Tropical Medicine*, 3, 971-976.
- Santosh, M. K., Shaila, D., Rajyalakshmi, I., and Rao, I. S. (2005). RP-HPLC Method for determination of piperine from *Piper longum* Linn, and *Piper nigrum* Linn. *E-Journal of Chemistry*, 2, 131-135.
- Shingate, P. N., Dongre, P. P., and Kannur, D. M. (2013). NEW METHOD DEVELOPMENT FOR EXTRACTION AND ISOLATION OF PIPERINE FROM BLACK PEPPER. *IJPSR*. 4(8): 3165-3170.
- Srinivasan, K. (2007). Black pepper and its pungent principle-piperine: A review of diverse physiological effects. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 47, 735-748
- Sunila, E., and Kuttan, G. (2004). Immunomodulatory and antitumor activity of piper longum Linn. and piperine. *Journal of Ethnopharmacology*. 90, 339-346.
- Vijayakumar, R., Surya, D., and Nalini, N., (2004). Antioxidant efficacy of black pepper (*Piper nigrum* L.) and piperine in rats with high-fat-diet-induced oxidative stress. *Redox Report*, 9, 105-110.
- Whitman, (1962). Pioneer papers in convective mass transfer. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 5, 429-433.

ภาคผนวก ก

ผลการทดสอบเทียบความเร็วของอากาศ

ตารางผลการทดสอบเทียบความเร็วของอากาศ

f (Hz)	ΔP (Pa)	v (m/s)
28.0	4108.7	35.3
27.5	3951.7	34.2
27.0	3802.0	33.6
26.5	3660.3	32.9
26.0	3516.3	32.1
25.5	3369.3	31.2
25.0	3233.0	30.8
24.5	3113.0	30.2
24.0	3001.7	29.5
23.5	2881.3	28.8
23.0	2759.7	28.2
22.5	2655.7	27.6
22.0	2542.3	27.0
21.5	2438.0	26.4
21.0	2333.7	25.8
20.5	2225.3	25.1
20.0	2124.3	24.5
19.5	2029.3	23.8
19.0	1927.7	23.2
18.5	1831.0	22.6
18.0	1738.7	21.9
17.5	1648.3	21.3
17.0	1557.7	20.8
16.5	1476.3	20.2
16.0	1390.7	19.6
15.5	1307.0	19.0
15.0	1231.0	18.3
14.5	1151.7	17.8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางผลการสอบเทียบความเร็วของอากาศ (ต่อ)

f (Hz)	ΔP (Pa)	v (m/s)
14.0	1075.0	17.1
13.5	1000.3	16.4
13.0	934.7	15.9
12.5	861.0	15.3
12.0	797.7	14.4
11.5	735.0	14.0
11.0	672.3	13.4
10.5	617.0	12.8
10.0	555.7	12.1
9.5	508.0	11.5
3.5	66.3	4.3
3.0	48.0	3.6
2.5	34.3	3.0
2.0	19.7	2.5
1.5	10.7	1.8
1.0	3.3	1.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางหา U_{mf}

$\Delta P_{\text{chamber}}$ (Pa)	ΔP (Pa)	v (m/s)
8	6	1.6
14	14	2.0
22	22	2.6
28	36	3.1
36	51	3.7
44	68	4.3
53	87	4.7
64	108	5.3
75	131	5.7
87	158	6.3
99	186	6.9
111	216	7.4
125	248	8.0
139	283	8.5
153	318	9.0
168	357	9.6
183	398	10.2
201	441	10.6
218	487	11.3
236	533	11.8
254	581	12.4
271	636	13.0
283	691	13.6
291	751	14.2
296	813	14.6
307	878	15.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางหา U_{mf} (ต่อ)

$\Delta P_{\text{chamber}}$ (Pa)	ΔP (Pa)	v (m/s)
311	944	16.0
324	1012	16.5
329	1082	17.2
335	1154	17.8
339	1228	18.4
341	1311	19.0
344	1388	19.6
346	1468	20.1
347	1558	20.8
350	1642	21.4
353	1734	21.9
355	1826	22.5
358	1914	23.1
362	2004	23.7
366	2099	24.3
374	2201	25.0
375	2297	25.5
383	2396	26.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข
คุณสมบัติทางเคมีและกายภาพ

ตารางค่าสี

P/h	Air flow	L*	a*	b*
TFD	1.2Umf (1)	14.11	0.82	3.11
	1.2Umf (2)	14.02	0.80	3.10
	1.2Umf (3)	13.95	0.79	3.03
	1.4Umf (1)	14.89	0.60	4.08
	1.4Umf (2)	15.10	0.83	3.61
	1.4Umf (3)	15.78	0.79	3.45
	1.6Umf (1)	18.17	0.64	3.95
	1.6Umf (2)	17.79	0.73	3.97
	1.6Umf (3)	17.82	0.72	3.95
0.5	1.2Umf (1)	15.14	0.89	2.41
	1.2Umf (2)	14.78	0.94	2.71
	1.2Umf (3)	15.29	0.86	2.93
	1.4Umf (1)	16.59	0.75	3.10
	1.4Umf (2)	16.14	0.81	2.90
	1.4Umf (3)	16.15	0.78	2.95
	1.6Umf (1)	14.43	0.62	1.95
	1.6Umf (2)	14.90	0.65	2.02
	1.6Umf (3)	14.45	0.79	2.52

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางค่าสี (ต่อ)

P/h	Air flow	L*	a*	b*
1	1.2Umf (1)	15.30	0.94	3.98
	1.2Umf (2)	14.41	0.65	2.69
	1.2Umf (3)	14.94	0.63	2.53
	1.4Umf (1)	16.82	0.62	3.36
	1.4Umf (2)	15.63	0.72	3.92
	1.4Umf (3)	16.55	0.64	3.76
	1.6Umf (1)	16.21	0.69	4.17
	1.6Umf (2)	16.56	0.68	4.36
	1.6Umf (3)	18.75	0.74	4.85
1.5	1.2Umf (1)	15.03	0.95	3.05
	1.2Umf (2)	15.78	0.73	2.81
	1.2Umf (3)	14.61	0.64	2.12
	1.4Umf (1)	16.24	0.74	3.31
	1.4Umf (2)	16.02	0.48	2.12
	1.4Umf (3)	16.31	0.50	2.55
	1.6Umf (1)	17.97	0.47	3.78
	1.6Umf (2)	18.30	0.56	3.24
	1.6Umf (3)	19.54	0.66	4.51

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางบันทึกค่า water activity

P/h	Air flow	a_w			AVG	SD
TFD	1.2Umf	0.712	0.7267	0.7239	0.7209	0.0078
	1.4Umf	0.6888	0.6983	0.698	0.6950	0.0054
	1.6Umf	0.6894	0.6954	0.694	0.6929	0.0031
0.5	1.2Umf	0.552	0.5527	0.5535	0.5527	0.0008
	1.4Umf	0.5523	0.5526	0.5521	0.5523	0.0003
	1.6Umf	0.5521	0.5519	0.5523	0.5521	0.0002
1	1.2Umf	0.6801	0.6828	0.6817	0.6815	0.0014
	1.4Umf	0.6795	0.6798	0.679	0.6794	0.0004
	1.6Umf	0.688	0.6883	0.6785	0.6849	0.0056
1.5	1.2Umf	0.6342	0.636	0.6351	0.6351	0.0009
	1.4Umf	0.6324	0.6258	0.6288	0.6290	0.0033
	1.6Umf	0.6465	0.6458	0.646	0.6461	0.0004

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางบันทึกค่าเฉลี่ยความชื้น

t (นาที)	MC (%db)											
	No baffle			P/h = 0.5			P/h = 1.0			P/h = 1.5		
	1.2U _{mf}	1.4U _{mf}	1.6U _{mf}	1.2U _{mf}	1.4U _{mf}	1.6U _{mf}	1.2U _{mf}	1.4U _{mf}	1.6U _{mf}	1.2U _{mf}	1.4U _{mf}	1.6U _{mf}
0	392.52	392.52	392.52	392.52	392.52	392.52	392.52	392.52	392.52	392.52	392.52	392.52
10	343.26	342.03	340.80	328.49	327.26	323.56	340.80	339.57	337.11	330.95	329.72	327.26
20	284.16	282.93	281.70	263.23	260.77	257.07	280.47	278.01	276.77	266.92	263.23	260.77
30	223.83	222.60	221.37	205.36	201.67	196.74	218.90	217.67	213.98	209.05	206.59	202.90
40	190.58	189.35	188.12	156.11	153.65	148.72	173.35	172.12	172.12	161.03	158.57	154.88
50	170.88	168.42	167.19	131.48	129.02	125.33	151.18	149.95	149.95	133.95	129.02	125.33
60	153.65	152.41	149.95	110.55	108.09	104.39	132.71	131.48	129.02	114.24	108.09	104.39
70	137.64	136.41	132.71	95.78	90.85	89.62	115.48	113.01	110.55	99.47	95.78	85.92
80	121.63	120.40	120.40	83.46	79.77	77.31	99.47	94.54	92.08	85.92	83.46	73.61
90	106.86	108.09	108.09	71.15	68.69	66.22	88.39	83.46	81.00	74.84	72.38	62.53
100	94.54	95.78	95.78	60.07	57.61	55.14	78.54	73.61	72.38	64.99	61.30	51.45
110	83.46	84.69	84.69	50.22	47.75	44.06	69.92	66.22	63.76	55.14	51.45	40.37
120	74.84	76.07	76.07	40.37	37.90	34.21	61.30	58.84	57.61	45.29	41.60	31.75
130	67.46	67.46	66.22	31.75	28.05	24.36	53.91	51.45	51.45	36.67	31.75	25.59
140	61.30	60.07	58.84	23.13	20.67	18.20	47.75	45.29	45.29	29.29	24.36	19.44
150	56.37	55.14	53.91	15.74	13.28	12.05	42.83	40.37	40.37	23.13	16.97	13.28
160	51.45	50.22	48.99	9.58	7.12	5.89	39.14	36.67	35.44	19.44	12.05	8.35
170	47.75	46.52	45.29	7.12	4.66	3.43	35.44	32.98	31.75	15.74	8.35	5.89
180	44.06	42.83	41.60	4.66	2.20	0.97	32.98	30.52	29.29	12.05	4.66	3.43

ตารางบันทึกค่าอัตราส่วนความชื้น

t (นาที)	MR											
	TFD			P/h = 0.5			P/h = 1.0			P/h = 1.5		
	1.2U _{mf}	1.4U _{mf}	1.6U _{mf}	1.2U _{mf}	1.4U _{mf}	1.6U _{mf}	1.2U _{mf}	1.4U _{mf}	1.6U _{mf}	1.2U _{mf}	1.4U _{mf}	1.6U _{mf}
0	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
10	0.8588±0.013 ^{abc}	0.8526±0.003 ^{abcd}	0.8494±0.011 ^{cd}	0.8369±0.002 ^{bcd}	0.8306±0.008 ^{cd}	0.8212±0.006 ^d	0.8526±0.006 ^a	0.8494±0.003 ^{ab}	0.8494±0.006 ^{abc}	0.8432±0.005 ^{abcd}	0.8400±0.012 ^{bcd}	0.8306±0.006 ^{cd}
20	0.7145±0.005 ^{bcd}	0.7051±0.07 ^{fs}	0.7020±0.006 ^{def}	0.6675±0.007 ^{fs}	0.6612±0.005 ^{efs}	0.6487±0.007 ^g	0.7051±0.006 ^a	0.6989±0.006 ^{abc}	0.6957±0.005 ^{ab}	0.6800±0.010 ^{bcde}	0.6832±0.005 ^{cdef}	0.6675±0.006 ^{cdef}
30	0.5671±0.006 ^{ab}	0.5608±0.005 ^{bcde}	0.5577±0.007 ^{bdcde}	0.5012±0.015 ^{cde}	0.4950±0.010 ^{de}	0.4887±0.017 ^e	0.5640±0.006 ^a	0.5546±0.009 ^{ab}	0.5483±0.003 ^{ab}	0.5232±0.016 ^a	0.5357±0.011 ^{abc}	0.5138±0.005 ^{bcd}
40	0.4385±0.017 ^a	0.4448±0.012 ^{cd}	0.4416±0.006 ^{bc}	0.3507±0.010 ^{de}	0.3444±0.012 ^{de}	0.3350±0.002 ^e	0.4322±0.008 ^a	0.4291±0.008 ^{ab}	0.4228±0.009 ^{ab}	0.3883±0.010 ^{bc}	0.4008±0.007 ^{cd}	0.4040±0.013 ^{cd}
50	0.3569±0.009 ^a	0.3569±0.006 ^{bc}	0.3507±0.007 ^{cd}	0.2628±0.009 ^{de}	0.2566±0.012 ^{de}	0.2471±0.010 ^e	0.3507±0.004 ^a	0.3444±0.002 ^{ab}	0.3412±0.011 ^a	0.3381±0.007 ^{cde}	0.3350±0.008 ^{de}	0.3193±0.010 ^e
60	0.3036±0.011 ^a	0.3067±0.007 ^{abc}	0.2973±0.003 ^{abc}	0.2095±0.010 ^{cd}	0.2001±0.004 ^{cd}	0.1907±0.003 ^d	0.2942±0.011 ^a	0.2879±0.004 ^{ab}	0.2816±0.006 ^a	0.3005±0.010 ^{abc}	0.2879±0.019 ^{bcd}	0.2879±0.014 ^{cd}
70	0.2597±0.013 ^{ab}	0.2754±0.007 ^{abc}	0.2566±0.007 ^{cde}	0.1719±0.007 ^{fg}	0.1687±0.002 ^{efg}	0.1656±0.009 ^g	0.2503±0.002 ²	0.2503±0.006 ^{abcd}	0.2471±0.003 ^a	0.2660±0.008 ^{bcde}	0.2566±0.005 ^{def}	0.2534±0.005 ^{efg}
80	0.2315±0.007 ^{ab}	0.2471±0.002 ^{abc}	0.2283±0.013 ^{bcd}	0.1530±0.002 ^{efg}	0.1468±0.016 ^{fg}	0.1405±0.005 ^g	0.2220±0.007 ^a	0.2158±0.006 ^{abc}	0.2126±0.002 ^a	0.2346±0.008 ^{bcd}	0.2283±0.006 ^{cde}	0.2220±0.006 ^{def}
90	0.2064±0.013 ^a	0.2189±0.002 ^{ab}	0.2001±0.002 ^{bc}	0.1311±0.008 ^{ef}	0.1248±0.009 ^f	0.1185±0.002 ^f	0.1938±0.009 ^a	0.1907±0.002 ^{ab}	0.1844±0.006 ^{ab}	0.2095±0.010 ^{bc}	0.2001±0.005 ^{cd}	0.1938±0.004 ^{de}
100	0.1844±0.007 ^a	0.1938±0.006 ^{abc}	0.1813±0.012 ^{bcd}	0.1091±0.004 ^{ef}	0.0997±0.008 ^{ef}	0.0966±0.009 ^f	0.1719±0.009 ^{ab}	0.1719±0.009 ^{abc}	0.1656±0.006 ^{abc}	0.1844±0.011 ^{bcd}	0.1781±0.007 ^{cd}	0.1687±0.003 ^{de}
110	0.1624±0.010 ^a	0.1687±0.003 ^{bc}	0.1562±0.006 ^{bc}	0.0903±0.008 ^e	0.0809±0.005 ^e	0.0777±0.006 ^f	0.1499±0.003 ^{ab}	0.1530±0.002 ^{bc}	0.1499±0.002 ^{bc}	0.1656±0.009 ^{bc}	0.1562±0.002 ^c	0.1436±0.009 ^d
120	0.1436±0.009 ^a	0.1468±0.003 ^{ab}	0.1373±0.003 ^{bc}	0.0715±0.008 ^e	0.0621±0.003 ^f	0.0589±0.007 ^f	0.1373±0.009 ^{bc}	0.1373±0.003 ^{bc}	0.1342±0.002 ^{bc}	0.1468±0.007 ^{bc}	0.1373±0.006 ^c	0.1217±0.004 ^d
130	0.1279±0.005 ^a	0.1311±0.002 ^b	0.1248±0.002 ^{bc}	0.0558±0.003 ^e	0.0495±0.007 ^f	0.0401±0.005 ^g	0.1248±0.002 ²	0.1185±0.003 ^{bc}	0.1217±0.002 ^{bc}	0.1311±0.005 ^{bc}	0.1185±0.006 ^c	0.1028±0.004 ^d
140	0.1154±0.002 ^a	0.1185±0.003 ^{ab}	0.1123±0.002 ^{bc}	0.0432±0.006 ^e	0.0338±0.006 ^{ef}	0.0307±0.006 ^{ef}	0.1123±0.002 ^{bc}	0.1028±0.002 ^{bc}	0.1060±0.002 ^{bc}	0.1154±0.002 ^{bc}	0.1028±0.006 ^c	0.0840±0.007 ^d
150	0.1028±0.003 ^a	0.1060±0.002 ^{ab}	0.0997±0.002 ^{bc}	0.0338±0.005 ^g	0.0276±0.002 ^g	0.0213±0.002 ^h	0.0966±0.004 ^{cd}	0.0903±0.002 ^a	0.0934±0.002 ^{de}	0.0997±0.002 ^{bcd}	0.0872±0.002 ^e	0.0683±0.002 ^f
160	0.0934±0.002 ^a	0.0934±0.005 ^{ab}	0.0903±0.004 ^{ab}	0.0244±0.002 ^g	0.0181±0.002 ^h	0.0150±0.002 ^h	0.0840±0.002 ^{cd}	0.0777±0.002 ^{de}	0.0809±0.002 ^{cde}	0.0872±0.003 ^{bc}	0.0746±0.003 ^e	0.0558±0.002 ^f
170	0.0840±0.002 ^a	0.0840±0.002 ^a	0.0809±0.002 ^{ab}	0.0181±0.002 ^f	0.0119±0.004 ^{fg}	0.0087±0.005 ^g	0.0746±0.002 ²	0.0683±0.005 ^{cd}	0.0715±0.002 ^c	0.0746±0.002 ^{bc}	0.0621±0.002 ^d	0.0464±0.002 ^e
180	0.0746±0.002 ^a	0.0715±0.003 ^a	0.0715±0.004 ^{ab}	0.0119±0.002 ^f	0.0056±0.002 ^g	0.0025±0.002 ^g	0.0683±0.002 ^{abc}	0.0621±0.002 ^c	0.0621±0.002 ^c	0.0652±0.002 ^{bc}	0.0495±0.002 ^d	0.0401±0.002 ^e

หมายเหตุ ค่าเฉลี่ย ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานจากการวิเคราะห์ 3 ซ้ำ

ค่าเฉลี่ยที่มีตัวอักษรที่ต่างกันในแถวอนเดียวกัน แสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$)

ตารางบันทึกค่าเฉลี่ยอัตราการอบแห้ง

t (นาที)	Drying Rate (kg/hr)											
	TFD			P/h = 0.5			P/h = 1.0			P/h = 1.5		
	1.2U _{mf}	1.4U _{mf}	1.6U _{mf}	1.2U _{mf}	1.4U _{mf}	1.6U _{mf}	1.2U _{mf}	1.4U _{mf}	1.6U _{mf}	1.2U _{mf}	1.4U _{mf}	1.6U _{mf}
0	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
10	0.3324	0.3472	0.3546	0.3842	0.3989	0.4211	0.3472	0.3546	0.3546	0.3694	0.3768	0.3989
20	0.3398	0.3472	0.3472	0.3989	0.3989	0.4063	0.3472	0.3546	0.3620	0.3842	0.3694	0.3842
30	0.3472	0.3398	0.3398	0.3916	0.3916	0.3768	0.3324	0.3398	0.3472	0.3694	0.3472	0.3620
40	0.3029	0.2733	0.2733	0.3546	0.3546	0.3620	0.3103	0.2955	0.2955	0.3177	0.3177	0.2586
50	0.1921	0.2069	0.2142	0.2069	0.2069	0.2069	0.1921	0.1995	0.1921	0.1182	0.1551	0.1995
60	0.1256	0.1182	0.1256	0.1256	0.1330	0.1330	0.1330	0.1330	0.1404	0.0887	0.1108	0.0739
70	0.1034	0.0739	0.0960	0.0887	0.0739	0.0591	0.1034	0.0887	0.0813	0.0813	0.0739	0.0813
80	0.0665	0.0665	0.0665	0.0443	0.0517	0.0591	0.0665	0.0813	0.0813	0.0739	0.0665	0.0739
90	0.0591	0.0665	0.0665	0.0517	0.0517	0.0517	0.0665	0.0591	0.0665	0.0591	0.0665	0.0665
100	0.0517	0.0591	0.0443	0.0517	0.0591	0.0517	0.0517	0.0443	0.0443	0.0591	0.0517	0.0591
110	0.0517	0.0591	0.0591	0.0443	0.0443	0.0443	0.0517	0.0443	0.0369	0.0443	0.0517	0.0591
120	0.0443	0.0517	0.0443	0.0443	0.0443	0.0443	0.0296	0.0369	0.0369	0.0443	0.0443	0.0517
130	0.0369	0.0369	0.0296	0.0369	0.0296	0.0443	0.0296	0.0443	0.0296	0.0369	0.0443	0.0443
140	0.0296	0.0296	0.0296	0.0296	0.0369	0.0222	0.0296	0.0369	0.0369	0.0369	0.0369	0.0443
150	0.0296	0.0296	0.0296	0.0222	0.0148	0.0222	0.0369	0.0296	0.0296	0.0369	0.0369	0.0369
160	0.0222	0.0296	0.0222	0.0222	0.0222	0.0148	0.0296	0.0296	0.0296	0.0296	0.0296	0.0296
170	0.0222	0.0222	0.0222	0.0148	0.0148	0.0148	0.0222	0.0222	0.0222	0.0296	0.0296	0.0222
180	0.0222	0.0222	0.0222	0.0148	0.0148	0.0148	0.0148	0.0148	0.0222	0.0222	0.0296	0.0148

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล นายอิวัฒน์ ธเนศสิริพงศ์
 วัน เดือน ปีเกิด 27 พฤษภาคม 2541
 ที่อยู่ 1/838 คอนโดนศุภาลัย ปาร์ค ราชพฤกษ์-เพชรเกษม ถ. เพชรเกษม
 แขวงปากคลองภาษีเจริญ เขตภาษีเจริญ กรุงเทพฯ 10160
 ประวัติการศึกษา วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต 2562 สาขาวิชาวิศวกรรมอาหาร
 สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้