



การลดต้นทุนการผลิตพริกไทยผองระดับอุตสาหกรรม
ด้วยการสลับทิศทางการอบแห้ง

วิชา เทปินตา

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของความสมบูรณ์ของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอาหาร
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยแม่โจ้

พ.ศ. 2557

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยแม่โจ้



ใบรับรองวิทยานิพนธ์

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยแม่โจ้

ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอาหาร

ชื่อเรื่อง

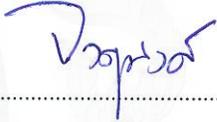
การลดต้นทุนการผลิตพริกไทยผงระดับอุตสาหกรรม
ด้วยการสลับทิศทางการอบแห้ง

โดย

วิภา เทพปิ่นตา

พิจารณาเห็นชอบโดย

ประธานกรรมการที่ปรึกษา


.....
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. จาคูพงศ์ วาฤทธิ)

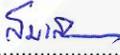
วันที่ 28 เดือน มี.ค. พ.ศ. 2557

กรรมการที่ปรึกษา


.....
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชนวัฒน์ นิตศน์วิจิตร)

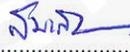
วันที่ 28 เดือน มี.ค. พ.ศ. 2557

กรรมการที่ปรึกษา


.....
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สมเกียรติ จตุรงค์กล้าเลิศ)

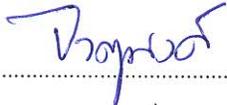
วันที่ 28 เดือน มี.ค. พ.ศ. 2557

ประธานอาจารย์ประจำหลักสูตร


.....
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สมเกียรติ จตุรงค์กล้าเลิศ)

วันที่ 28 เดือน มี.ค. พ.ศ. 2557

บัณฑิตวิทยาลัยรับรองแล้ว


.....
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. จาคูพงศ์ วาฤทธิ)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ 28 เดือน มี.ค. พ.ศ. 2557

ชื่อเรื่อง	การลดต้นทุนการผลิตพริกไทยผงระดับอุตสาหกรรม ด้วยการสลับทิศทางการลวร้อนระหว่างการอบแห้ง
ชื่อผู้เขียน	นางสาววิภา เทพปิ่นตา
ชื่อปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอาหาร
ประธานกรรมการที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จตุพงษ์ วาฤทธิ

บทคัดย่อ

การอบแห้งเป็นวิธีการหนึ่งที่สามารถช่วยยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อจุลินทรีย์ได้ สำหรับการอบแห้งพริกไทยผงในปัจจุบันนั้น เป็นการอบแห้งโดยใช้ลมร้อนที่มีทิศทางการไหลของลมร้อนทางเดียว คือ จากล่างขึ้นบน ซึ่งจำเป็นต้องใช้แรงงานคนในการพลิกกลับพริกไทยส่งผลให้ต้นทุนในการผลิตสูง ดังนั้นเพื่อเป็นการลดต้นทุนด้านแรงงาน งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษากระบวนการการอบแห้งพริกไทยด้วยวิธีการอบแห้งแบบสลับทิศทางการลวร้อน (สลับลมร้อนทุก ๆ 60 นาที) เปรียบเทียบกับวิธีการอบแห้งแบบปกติ (ใช้คนในการพลิกกลับทุก ๆ 30 นาที) ที่ขึ้นความหนา 20 30 และ 40 เซนติเมตร โดยอบแห้งพริกไทยดำที่ความชื้นเริ่มต้นประมาณร้อยละ 16-18 มาตรฐานแห้ง ให้มีความชื้นสุดท้ายร้อยละ 7 มาตรฐานแห้งอุณหภูมิลมร้อน 100 องศาเซลเซียส จากการศึกษาพบว่า เวลาในการอบแห้ง และอัตราการอบแห้งเฉลี่ยของการอบแห้งทั้ง 2 วิธีไม่แตกต่างกันทางสถิติ ($P \geq 0.05$) เวลาในการอบแห้งของวิธีการอบแห้งแบบปกติที่ขึ้นความหนาพริกไทยดำ 3 ระดับ คือ 20 30 และ 40 เซนติเมตร คือ 2.5 2.5 และ 3.5 ชั่วโมงตามลำดับ และเวลาในการอบแห้งของวิธีการอบแห้งแบบสลับทิศทางการลวร้อนที่ขึ้นความหนาพริกไทยดำ 3 ระดับ คือ 20 30 และ 40 เซนติเมตร คือ 2.5 3.0 และ 3.3 ชั่วโมง ตามลำดับ สมการแบบจำลองของ Page มีความเหมาะสมสำหรับการอบแห้งพริกไทยดำแบบสลับทิศทางการลวร้อน ซึ่งการอบแห้งแบบสลับทิศทางการลวร้อนสามารถลดต้นทุนลงได้ 73 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเทียบกับการอบแห้งแบบปกติ และเมื่อทำการวิเคราะห์จุดคุ้มทุน และระยะเวลาคืนทุน สำหรับการลงทุนในการตัดแปลงเตาอบแห้ง 100,000 บาท พบว่า จุดคุ้มทุน เท่ากับ 107.55 ต้นต่อปี และระยะเวลาคืนทุน 15 วัน

Title	Operation Cost Reduction for Industrial Pepper Powder Drying with Alternating Hot-Air during Drying Process
Author	Miss Wipa Teppinta
Degree of	Master of Engineering in Food Engineering
Advisory Committee Chairperson	Assistant Professor Dr. Jatuphong Varith

ABSTRACT

Drying is an important process to control microorganism in black pepper powdering process. In industry, hot-air drying is accomplished using one-direction air flow which requires stirring manual labor to generate uniform temperatures of pepper. To reduce labor cost, the alternating hot-air drying, which air-flow can be forced upward or downward is proposed. The objectives of this research were to study an alternating hot-air drying process for black pepper and to compare the operation cost between alternating and traditional hot-air drying process. The experiment was conducted to dry black pepper of 50-100 kg/batch from 16-18% to 7% (dry basis) using 100°C hot air in a hot-air drying cabinet which can alternate the hot-air flow in an upward or downward direction. Thickness of the pepper beds (20, 30 and 40 cm) and drying methods (hourly alternating air flow and traditional hot-air with every ½ hr stirring labor) were two important factors in this study. The result showed that drying times and drying rate of drying methods on black pepper were not significantly different ($P \geq 0.05$). The drying times of traditional hot-air of a thickness of pepper bed 20, 30 and 40 cm. were 2.5, 2.5 and 3.5 hrs. respectively, Drying times of alternating air flow of a thickness of pepper bed 20, 30 and 40 cm. were 2.5, 3.0 and 3.3 hrs. respectively. The alternating air flow being the Page model was found to be the best fitted model. The alternating air-flow drying employed less labor man-hour than one-direction hot air-flow drying by 73%, reflecting less operation cost per 600 kg, due to no need for a stirring process to uniform generate temperature of the black pepper during the drying process.

กิตติกรรมประกาศ

ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จตุพงศ์ วาฤทธิ์ ประธานกรรมการที่ปรึกษา ที่ได้ชี้แนะ และให้คำปรึกษาในการวางแผนการทดลอง และช่วยสนับสนุนเครื่องมือ อุปกรณ์ต่าง ๆ สำหรับใช้ในการดำเนินการทดลองจนกระทั่งงานทดลองสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี ตลอดจนให้คำแนะนำ ตรวจสอบแก้ไขจนเป็นวิทยานิพนธ์ที่สมบูรณ์

ขอขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชนวัฒน์ นิตส์นวิจิตร และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมเกียรติ จตุรงค์กล้าเลิศ กรรมการที่ปรึกษา ที่ได้คอยให้คำแนะนำในระหว่างการทดลอง และกรุณาตรวจสอบแก้ไขวิทยานิพนธ์เล่มนี้จนสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศรีสุวรรณ นฤนาทวงศ์สกุล รองคณบดี คณะอุตสาหกรรมเกษตร ฝ่ายวิชาการ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ที่กรุณารับเป็นประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และได้ให้คำแนะนำที่มีประโยชน์ในการปรับปรุงแก้ไขวิทยานิพนธ์

ขอขอบพระคุณทุนสนับสนุนงานวิจัยจากสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) สาขาวิทยาศาสตร์ และเทคโนโลยี และบริษัท นิธิฟู๊ดส์ จำกัด ภายใต้โครงการเชื่อมโยงภาคการผลิตกับงานวิจัย ทุน สกว.-อุตสาหกรรม ในโครงการ การลดต้นทุนการผลิตพริกไทยผงในระดับอุตสาหกรรมด้วยการสลับทิศทางการร่อน (MRG545E054)

ขอขอบพระคุณสมิต ทวีเลิศนิธิ กรรมการผู้จัดการ คุณวิเชียร เลี่ยมนาค ผู้ช่วยกรรมการผู้จัดการฝ่ายโรงงาน คุณสถิต ชอบพิมาย ผู้จัดการฝ่ายพัฒนาธุรกิจ คุณเปรมปรีดี ชูตระกูล ผู้จัดการฝ่ายวิศวกรรม คุณนิยนาฏ อินตะแก้ว เจ้าหน้าที่วิจัยพัฒนา คุณนัฐพงษ์ บุญทาชัย พนักงานฝ่ายผลิต และพนักงานบริษัท นิธิฟู๊ดส์ จำกัด ที่ให้ความช่วยเหลือ อำนวยความสะดวก และให้คำแนะนำ จนการทดลองสิ้นสุดไปด้วยดี

ขอขอบพระคุณคณาจารย์ เจ้าหน้าที่ประจำห้องปฏิบัติการ ภาควิชาวิศวกรรมเกษตรและอาหาร คณะวิศวกรรมและอุตสาหกรรมเกษตร ที่กรุณาอบรมสั่งสอน และมอบความรู้ อันมีค่ายิ่ง ให้ใช้สถานที่ และเครื่องมือต่าง ๆ ในการศึกษาทดลองครั้งนี้แก่ข้าพเจ้า ตลอดจนพี่น้อง ๆ ภาควิชาวิศวกรรมเกษตรและอาหารที่คอยช่วยเหลือ และมอบมิตรภาพที่ดีให้มาโดยตลอด

ขอขอบพระคุณ คุณพ่อภูษิต และคุณแม่สมหวัง เทพปินดา และญาติพี่น้องทุกคน ที่คอยอบรมสั่งสอน เป็นกำลังใจ และให้การศึกษาคิดที่ดีแก่ข้าพเจ้าเสมอมา

วิภา เทพปินดา

มีนาคม 2557

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	(3)
ABSTRACT	(4)
กิตติกรรมประกาศ	(5)
สารบัญ	(6)
สารบัญตาราง	(8)
สารบัญภาพ	(9)
สารบัญตารางผนวก	(11)
สารบัญภาพผนวก	(12)
บทที่ 1 บทนำ	1
ความสำคัญของปัญหา	1
วัตถุประสงค์	4
ประโยชน์ที่ได้รับ	5
ขอบเขตของการวิจัย	5
บทที่ 2 การตรวจสอบเอกสาร	6
ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับพริกไทย	6
การอบแห้ง	11
การอบแห้งด้วยลมร้อน	18
การวิเคราะห์เสถียรศาสตร์	23
งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	23
กรอบแนวคิด	28
บทที่ 3 อุปกรณ์และวิธีการ	29
วัสดุ และอุปกรณ์	29
วิธีดำเนินการ	30
ดัชนีชี้วัดความสำเร็จ	38
สถานที่ดำเนินการวิจัย	38
แผนภูมิดำเนินการทดลอง	39
ระยะเวลาทำโครงการ	40

บทที่ 4 ผลการวิจัยและวิจารณ์	41
ผลของชั้นความหนาพริกไทยต่อการอบแห้ง	41
การเปรียบเทียบวิธีการอบแห้งพริกไทยดำ	44
การกระจายความชื้นภายในชั้นพริกไทย	49
การกระจายอุณหภูมิภายในชั้นพริกไทย	52
แบบจำลองทางคณิตศาสตร์	55
การวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์ของการอบแห้งพริกไทยดำแบบสลับทิศทางลมร้อน	61
บทที่ 5 สรุปและข้อเสนอแนะ	68
สรุปผลการศึกษา	68
ข้อเสนอแนะ	69
บรรณานุกรม	70
ภาคผนวก	74
ภาคผนวก ก อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง	75
ภาคผนวก ข ข้อมูลการทดลองการอบแห้งพริกไทยดำ	82
ภาคผนวก ค การคำนวณจลนศาสตร์การอบแห้งของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์	90
ภาคผนวก จ ประวัติผู้วิจัย	98

สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า
1 ข้อมูลพื้นฐานเศรษฐกิจการเกษตร (พริกไทย)	1
2 องค์ประกอบเฉลี่ยที่มีอยู่ในพริกไทยดำ	6
3 มาตรฐานของพริกไทยป่น	11
4 ค่าเวอร์เตอแอกติวิตีขั้นต่ำสำหรับการเจริญเติบโตของเชื้อจุลินทรีย์	18
5 วิธีการเก็บข้อมูล และอุปกรณ์ที่ใช้ในการวัด	33
6 แบบจำลองการอบแห้งเอมไพริคัล	36
7 ระยะเวลาทำโครงการ	40
8 ค่าคงที่ของแบบจำลองการอบแห้งชนิดต่าง ๆ	56
9 ข้อมูล R^2 , RMSE และ %Error สำหรับใช้เปรียบเทียบแบบจำลองที่เหมาะสม	57
10 คุณสมบัติพริกไทยดำหลังการอบแห้ง	60
11 ต้นทุนปฏิบัติการอบแห้งพริกไทยดำต่อกิโลกรัมแห้ง ที่อบแห้งด้วยวิธีการอบแห้งแบบปกติ และแบบสลับทิศทางการลมร้อน ที่ชั้นความหนาในระดับต่าง ๆ โดยอบแห้งพริกไทยดำไม่เกิน 100 กิโลกรัม	62
12 ต้นทุนด้านแรงงานปฏิบัติการอบแห้งพริกไทยดำต่อกิโลกรัมแห้ง ที่อบแห้งด้วยวิธีการอบแห้งแบบปกติ และแบบสลับทิศทางการลมร้อน โดยอบแห้งพริกไทยดำไม่เกิน 600 กิโลกรัม	63

สารบัญภาพ

ภาพ	หน้า	
1	ลักษณะใบ ลำต้น และเมล็ดพริกไทย	7
2	ลักษณะของเมล็ดพริกไทยดำ	9
3	กระบวนการปรับปรุงวิธีการผลิตพริกไทยในภาคอุตสาหกรรม	10
4	กระบวนการการอบแห้งวัสดุ	12
5	ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นกับเวลาในการอบแห้ง	13
6	ช่วงอัตราการอบแห้งแบบต่าง ๆ	14
7	การเปลี่ยนแปลงความชื้นลำไย และอุณหภูมิการอบแห้งด้วยเตาอบแห้งแบบสลับทิศทางลมร้อน	15
8	อัตราการอบแห้งของลำไยที่อุณหภูมิใด ๆ ด้วยเตาอบแห้งแบบกระบะ	16
9	การจำแนกตามค่าแอกติวิตีของน้ำ	18
10	เตาอบแห้งสลับทิศทางลมร้อน ขนาด 1 ตัน	20
11	หลักการการทำงานของเตาอบแห้งแบบสลับทิศทางลมร้อน	20
12	หลักการการทำงานของเตาอบแบบสลับทิศทางลมร้อน	22
13	เตาอบแห้งแบบสลับทิศทางลมร้อน ก่อนและหลังการปรับปรุง	30
14	ลักษณะภายในห้องอบแห้งที่กั้นห้องอบ	31
15	ระบบการควบคุมของชุดควบคุมปริมาณแก๊ส	31
16	ลักษณะการติดตั้งเครื่องควบคุมปริมาณแก๊ส	32
17	ตำแหน่งการเก็บตัวอย่างพริกไทยดำ และอุณหภูมิภายในชั้นพริกไทยดำ	33
18	เครื่องวัดสีแบบ Spectrophotometer ยี่ห้อ Hunter Lab รุ่น Mini Scan XE Plus	34
19	การบรรยายสีตามระบบ CIE	35
20	แผนภูมิการดำเนินการทดลอง	39
21	กราฟการอบแห้งที่ขึ้นความหนาพริกไทย 3 ระดับ สำหรับวิธีการอบแห้งแบบปกติ	42
22	อัตราการอบแห้งที่ขึ้นความหนาพริกไทย 3 ระดับ สำหรับวิธีการอบแห้งแบบปกติ	42
23	กราฟการอบแห้งที่ขึ้นความหนาพริกไทย 3 ระดับ สำหรับวิธีการอบแห้งแบบสลับทิศทางลม	43
24	อัตราการอบแห้งที่ขึ้นความหนาพริกไทย 3 ระดับ สำหรับวิธีการอบแห้งแบบสลับทิศทางลมร้อน	44

ภาพ	หน้า
25 กราฟการอบแห้งเปรียบเทียบระหว่างการอบแห้งแบบปกติ และการอบแห้งแบบสลับทิศทางการอบแห้งที่ชั้นความหนา 20 เซนติเมตร	45
26 อัตราการอบแห้งเปรียบเทียบระหว่างการอบแห้งแบบปกติ และการอบแห้งแบบสลับทิศทางการอบแห้งที่ชั้นความหนา 20 เซนติเมตร	46
27 กราฟการอบแห้งเปรียบเทียบระหว่างการอบแห้งแบบปกติ และการอบแห้งแบบสลับทิศทางการอบแห้งที่ชั้นความหนา 30 เซนติเมตร	47
28 อัตราการอบแห้งเปรียบเทียบระหว่างการอบแห้งแบบปกติ และการอบแห้งแบบสลับทิศทางการอบแห้งที่ชั้นความหนา 30 เซนติเมตร	47
29 กราฟการอบแห้งเปรียบเทียบระหว่างการอบแห้งแบบปกติ และการอบแห้งแบบสลับทิศทางการอบแห้งที่ชั้นความหนา 40 เซนติเมตร	48
30 อัตราการอบแห้งเปรียบเทียบระหว่างการอบแห้งแบบปกติ และการอบแห้งแบบสลับทิศทางการอบแห้งที่ชั้นความหนา 40 เซนติเมตร	49
31 การกระจายความชื้นภายในชั้นความหนาพริกไทยที่ 20 30 และ 40 เซนติเมตร	51
32 การกระจายอุณหภูมิภายในชั้นพริกไทยที่ชั้นความหนา 20 30 และ 40 เซนติเมตร	53
33 อุณหภูมิ และปริมาณความชื้นในชั้นความหนาพริกไทย (ชั้นกลาง) ที่ชั้นความหนา 20 30 และ 40 เซนติเมตร	54
34 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้น และเวลา สำหรับแบบปกติ	58
35 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้น และเวลา สำหรับแบบสลับทิศทางการอบแห้ง	59

สารบัญตารางผนวก

ตารางผนวก	หน้า
1 ความชื้นเฉลี่ย (มาตรฐานแห้ง) สำหรับวิธีการอบแห้ง 2 วิธี ที่ขึ้นความหนา 3 ระดับ	83
2 อัตราการอบแห้งเฉลี่ย (เปอร์เซ็นต์มาตรฐานแห้งชั่วโมง) สำหรับวิธี การอบแห้ง 2 วิธี ที่ขึ้นความหนา 3 ระดับ	83
3 ความชื้นภายในชั้นพริกไทยที่ระดับขึ้นความหนาต่าง ๆ สำหรับวิธีการอบแห้ง แบบปกติ	84
4 ความชื้นภายในชั้นพริกไทยที่ระดับขึ้นความหนาต่าง ๆ สำหรับวิธีการอบแห้ง แบบสลับทิศทางลมร้อน	85
5 อุณหภูมิภายในชั้นพริกไทยที่ระดับขึ้นความหนาต่าง ๆ สำหรับวิธีการอบแห้ง แบบปกติ	86
6 อุณหภูมิภายในชั้นพริกไทยที่ระดับขึ้นความหนาต่าง ๆ สำหรับวิธีการอบแห้ง แบบสลับทิศทางลมร้อน	87
7 อุณหภูมิขาเข้า ขาออก และสภาพแวดล้อมอากาศ	88
8 ความชื้นสัมพัทธ์อากาศขาเข้า ขาออก และสภาพแวดล้อมอากาศ	89
9 ปริมาณความชื้น และอัตราส่วนความชื้น	91
10 การทำนาค่าอัตราส่วนความชื้นโดยใช้แบบจำลอง Page	92

สารบัญภาพผนวก

ภาพผนวก	หน้า	
1	พริกไทยดำ	76
2	เตาอบสลับทิศทางลมร้อน ขนาด 1 ตัน (บริษัท เลิศลานนาไทย จำกัด)	76
3	แก๊ส LPG ขนาด 48 กิโลกรัม เชื้อเพลิงที่ใช้สำหรับการทดลอง	77
4	ชุดอุปกรณ์เก็บข้อมูลอุณหภูมิ รุ่น 34970A (Agilent technology, Malaysia)	77
5	เครื่องวัดอุณหภูมิ และความชื้นสัมพัทธ์อากาศ รุ่น AP-104 (Sila, Thailand)	78
6	ชุดควบคุมปริมาณแก๊ส	78
7	เครื่องชั่งดิจิตอล รุ่น CP3202S (Sartorius AG, Germany)	79
8	ตู้อบลมร้อน รุ่น G407.1225 (Mettler, Germany)	79
9	อุปกรณ์ที่ใช้ในการพลิกกลับพริกไทย	80
10	อุปกรณ์เก็บข้อมูล	80
11	เครื่องปิดปากถุง และอลูมิเนียมฟรอยด์ที่ใช้เก็บตัวอย่าง	81
12	ลักษณะการวางตำแหน่งวัดอุณหภูมิภายในชั้นพริกไทย	81
13	การหาค่าคงที่การอบแห้ง โดยการสร้างสมการเส้นตรง	91
14	อัตราส่วนความชื้นที่ได้จากการทำนายเทียบกับข้อมูลที่ได้จากการทดลอง	93
15	อัตราส่วนความชื้นที่ได้จากการทำนายเทียบกับข้อมูลที่ได้จากการทดลอง ที่ชั้นความหนา 20 เซนติเมตร ด้วยการอบแห้งแบบปกติ	93
16	อัตราส่วนความชื้นที่ได้จากการทำนายเทียบกับข้อมูลที่ได้จากการทดลอง ที่ชั้นความหนา 30 เซนติเมตร ด้วยการอบแห้งแบบปกติ	94
17	อัตราส่วนความชื้นที่ได้จากการทำนายเทียบกับข้อมูลที่ได้จากการทดลอง ที่ชั้นความหนา 40 เซนติเมตร ด้วยการอบแห้งแบบปกติ	94
18	อัตราส่วนความชื้นที่ได้จากการทำนายเทียบกับข้อมูลที่ได้จากการทดลอง ที่ชั้นความหนา 20 เซนติเมตร ด้วยการอบแห้งแบบสลับทิศทางลมร้อน	95
19	อัตราส่วนความชื้นที่ได้จากการทำนายเทียบกับข้อมูลที่ได้จากการทดลอง ที่ชั้นความหนา 30 เซนติเมตร ด้วยการอบแห้งแบบสลับทิศทางลมร้อน	96
20	อัตราส่วนความชื้นที่ได้จากการทำนายเทียบกับข้อมูลที่ได้จากการทดลองที่ชั้น ความหนา 40 เซนติเมตร ด้วยการอบแห้งแบบสลับทิศทางลมร้อน	97

บทที่ 1

บทนำ

ความสำคัญของปัญหา

พริกไทยเป็นพืชเศรษฐกิจที่มีความสำคัญชนิดหนึ่งของประเทศไทย นิยมปลูกมากในภาคตะวันออก แหล่งปลูกพริกไทยที่สำคัญอยู่ที่จังหวัดจันทบุรี ซึ่งมีพื้นที่ปลูกร้อยละ 98 ของประเทศ โดยผลผลิตพริกไทยที่ได้ร้อยละ 73 ใช้บริโภคภายในประเทศ และการส่งออกพริกไทยร้อยละ 92 อยู่ในรูปของพริกไทยป่น มีการเปิดเขตการค้าเสรีภายใต้เขตการค้าเสรีอาเซียน (Asian Free Trade Area, AFTA) โดยลดภาษีเหลือร้อยละ 5 ในปี 2546 และเหลือร้อยละ 0 ในปี 2553 โดยในปี 2552 ประมาณการส่งออกพริกไทย 2,4489,138 กิโลกรัม คิดเป็นมูลค่า 101,615,722 บาท และในปี 2553 ประมาณการส่งออกพริกไทยเพิ่มขึ้น เป็น 3,179,757 กิโลกรัม คิดเป็นมูลค่าการส่งออก 124,542,987 บาท (สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร, 2552) โดยข้อมูลพื้นฐานเศรษฐกิจการเกษตรของพริกไทย แสดงในตาราง 1

ตาราง 1 ข้อมูลพื้นฐานเศรษฐกิจการเกษตร (พริกไทย)

รายการ	การผลิต		
	2551	2552	2553
1. จำนวนครัวเรือน (ครัวเรือน)	3,069	2,927	2,814
2. เนื้อที่ให้ผล (ไร่)	12,878	13,386	12,442
3. ผลผลิต (ตัน)	5,852	6,730	6,391
4. ผลผลิตต่อไร่ (กก.)	454	503	514
5. ต้นทุนการผลิตพริกไทยดำแห้ง (บาท/ตัน)	7,8818	73,799	73,850
6. ราคาที่เกษตรกรขายได้ (บาท/ตัน)			
- พริกไทยดำคละ	148,830	84,020	120,240
7. ผลตอบแทนสุทธิ	70,012	10,221	46,390
8. มาตรฐาน			
- มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมพริกไทย มอก. 297-2529			

ตาราง 1 (ต่อ)

รายการ	การค้า		
	2551	2552	2553
1. การค้าของโลก (ล้านตัน)	0.22	0.23	0.23
2. ส่วนแบ่งการตลาด (%)	0.74	1.09	0.90
3. ใช้ในประเทศ	4,063	3,784	4,069
4. นำเข้า			
- ปริมาณ (ตัน)	476	584	2,132
- มูลค่า (ล้านบาท)	57.29	73.93	328.61
5. ส่งออก			
- ปริมาณ (ตัน)	1,633	2,489	3,179
- มูลค่า (ล้านบาท)	82.89	101.62	124.54
6. ราคาส่งออก (บาท/กิโลกรัม)	50.80	42.42	39.16
7. คู่ค้าที่สำคัญ (เม็ด) (ปีน)		โปแลนด์ ออสเตรเลีย อินเดีย สาธารณรัฐเยอรมนี ฮ่องกง เนเธอร์แลนด์ สหราชอาณาจักร ไต้หวัน สหรัฐอเมริกา	
8. คู่แข่งที่สำคัญ		มาเลเซีย อินเดีย อินโดนีเซีย เวียดนาม ศรีลังกา	

ที่มา: สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร (2552)

พริกไทยที่นำมาบริโภคนั้นสามารถบริโภคได้ทั้งพริกไทยสด และพริกไทยแห้ง พริกไทยสดจะนำส่งขายตามท้องตลาดทั่วไป ส่วนพริกไทยแห้งนิยมบริโภคเป็นผง โดยการนำพริกไทยแห้งมาป่นเป็นผง แบ่งเป็น 2 ประเภท คือ พริกไทยดำ และพริกไทยขาว สำหรับการผลิตพริกไทยป่นนั้น เริ่มจากการปรับปรุงคุณภาพพริกไทย โดยการแยกเอาสิ่งปลอมปน และสิ่งที่เป็นอันตรายต่อผู้บริโภคออกไป เช่น การคัดแยกหิน ดิน และเศษฟาง เป็นต้น จากนั้นทำการมาเชื้อให้อยู่ในระดับที่ปลอดภัยตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (มอก.) ของพริกไทยป่น และลดปริมาณความชื้นของพริกไทยด้วยวิธีการอบแห้ง ซึ่งการอบแห้งเป็นเทคนิคที่ใช้ในการถนอมอาหารอย่างหนึ่ง โดยอาศัยหลักการการถ่ายเทความร้อน และการถ่ายเทมวลระหว่างวัสดุกับอากาศที่ใช้เป็นตัวกลาง ทำให้น้ำในวัสดุระเหยออกมา (ชมพูนุช และดิษฐพร, 2552)

ในปัจจุบัน ได้มีการพัฒนากระบวนการ และวิธีการอบแห้งหลายวิธี เพื่อให้ประสิทธิภาพการอบแห้ง และคุณภาพหลังการอบแห้งนั้นดีขึ้น อาทิเช่น อิทธิพล และคณะ (2550) ได้ศึกษาการอบแห้งพริกไทยด้วยเทคนิคฟลูอิดไดซ์แบบลมหมุนควง ภายในหอบแห้งมีการติดครีบ เปรียบเทียบกับเทคนิคฟลูอิดไดซ์แบบธรรมดา จากการศึกษาพบว่าเทคนิคลมหมุนควงจะช่วยให้ความชื้นที่อยู่ในเมล็ดพริกไทยระเหยออกมาได้เร็วขึ้น เนื่องจากการติดครีบทำให้อากาศภายในหอบแห้งเกิดการไหลแบบปั่นป่วน ซึ่งทำให้เมล็ดพริกไทยกับอากาศมีโอกาสในการสัมผัสกันมากขึ้น พื้นที่ในการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างเมล็ดพริกไทย และอากาศมากขึ้น อีกทั้งการติดครีบภายในหอบแห้งยังช่วยให้เกิดการกระจายตัวของเมล็ดพริกไทยในหอบแห้งเพิ่มขึ้น แต่เทคนิคนี้จะทำให้เกิดความเสียหายของเมล็ดพริกไทยได้

ชมพูนุช และศิษุพร (2552) ได้ศึกษาการเปรียบเทียบวิธีการอบแห้งเมล็ดพริกไทย 2 วิธี คือ การอบแห้งแบบสอง และแบบไมโครเวฟร่วมกับลมร้อน โดยช่วงแรกของการศึกษา ทำการอบแห้งด้วยลมร้อน และไมโครเวฟ เพื่อหาอุณหภูมิที่เหมาะสมเข้า อัตราการไหลเชิงมวล และกำลังไฟของคลื่นไมโครเวฟที่เหมาะสม จากการศึกษาพบว่า อุณหภูมิที่เหมาะสมในการอบแห้งพริกไทย 90 องศาเซลเซียส และอัตราการไหลเชิงมวล 100 กรัมต่อวินาที หลังจากนั้นนำผลการทดลองที่ได้มาทำการทดลองการอบแห้งเมล็ดพริกไทย 2 วิธี จากการศึกษาพบว่า การอบแห้งแบบไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนใช้เวลาในการอบแห้งสั้นกว่าการอบแห้งรูปแบบอื่น แต่เมล็ดพริกไทยเกิดความเสียหาย ส่วนการอบแห้งแบบสองขั้นตอนใช้เวลานานกว่า แต่ไม่ทำให้ผลิตภัณฑ์เกิดความเสียหาย และสามารถลดเวลาในการอบแห้งเมล็ดพริกไทยลงได้ 33 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเปรียบเทียบกับการอบแห้งแบบใช้ลมร้อน

แม้ว่าวิธีในการอบแห้งที่พัฒนาขึ้นจะช่วยให้เวลาในการอบแห้งนั้นสั้นลงได้ แต่ยังพบข้อจำกัดของวิธีเหล่านี้อยู่ อาทิเช่น การอบแห้งในแต่ละครั้งทำได้ในปริมาณน้อย การออกแบบอุปกรณ์บางอย่างซับซ้อน และวิธีการอบแห้งบางวิธีก่อให้เกิดความเสียหายกับเมล็ดพริกไทย เป็นต้น ซึ่งวิธีการอบแห้งที่ถูกพัฒนาขึ้นมาขึ้น ในระดับอุตสาหกรรมทำได้ค่อนข้างลำบาก เนื่องจากวิธีเหล่านี้ถูกจำกัดด้วยต้นทุนการผลิต ซึ่งวิธีการอบแห้งที่ระดับอุตสาหกรรมสามารถทำได้ง่าย และประหยัด คือ การอบแห้งด้วยลมร้อน โดยการอบแห้งลมร้อนที่ใช้ในปัจจุบันนั้น ใช้เวลาในการอบแห้งนาน อีกทั้งยังต้องใช้คนคอยพลิกกลับพริกไทย ทำให้สิ้นเปลืองพลังงาน ส่งผลให้ต้นทุนในการผลิตสูง ดังนั้นเพื่อลดปัญหานี้ งานวิจัยนี้จึงมีแนวคิดในการนำการอบแห้งด้วยวิธีการสลับลมร้อนมาใช้ในการอบแห้งพริกไทย อารีย์ และคณะ (2550) ได้ทำการศึกษาสมรรถนะของเครื่องอบแห้งแบบกระบะสำหรับการอบแห้งลำไยทั้งลูกด้วยลมร้อน โดยทำการเปรียบเทียบการอบแห้งลำไยระหว่างในกระบะแบบเดิม (ไม่มีการสลับทิศทางลมร้อน และไม่มีการนำลมทิ้งกลับมาใช้

ใหม่) และในกระบวนที่มีการปรับปรุงแล้ว (มีระบบสลับทิศทางลมร้อน และมีท่อนำลมทิ้งกลับมาใช้ใหม่) จากการวิเคราะห์พบว่า การอบแห้งด้วยเครื่องแบบเดิมมีค่าความสิ้นเปลืองพลังงานความร้อนจำเพาะมากกว่า และยังพบว่า การอบแห้งลำไยในกระบวนที่ปรับปรุงแล้วมีความสะดวกในการใช้งาน ไม่เสียเวลา และค่าใช้จ่ายในการพลิกกลับลำไยขณะอบแห้ง อีกทั้งยังสามารถลดการบวม-แตกของลำไยแห้งลง 50 เปอร์เซ็นต์ ต่อมา จากพงศ์ และคณะ (2552) ได้พัฒนาชุดสมองกลเพื่อควบคุมเตาอบแห้งลำไยแบบสลับทิศทางลมร้อน พบว่า เตาที่ติดตั้งชุดสมองกลสามารถลดระยะเวลาในการอบแห้งลงได้ 44 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเทียบกับเตาที่ไม่ติดตั้งชุดสมองกลฝังตัว ต้นทุนด้านแรงงานเมื่อใช้ชุดสมองกลฝังตัว จะต่ำกว่าแบบไม่ใช้ชุดสมองกลอยู่ประมาณ 50 เปอร์เซ็นต์

ในการนำเทคนิคการสลับทิศทางลมร้อนมาช่วยในการอบแห้งพริกไทย จะมีข้อดีมากกว่าการอบแห้งด้วยวิธีปกติ คือ

1. ประหยัดพลังงาน เนื่องจากไม่จำเป็นต้องเปิดเตาอบแห้งเพื่อพลิกกลับพริกไทยในขณะอบแห้ง ซึ่งจะทำให้สูญเสียอุณหภูมิในเตาอบ และเสียพลังงานในการทำให้อุณหภูมิกลับมาอยู่ในระดับอบแห้งเช่นเดิม
2. สามารถลดต้นทุนแรงงาน เนื่องจากในการพลิกกลับพริกไทยในเตาอบแห้งขนาด 1-2 ตัน จะต้องใช้แรงงานคนอย่างน้อย 4-5 คน ในการพลิกกลับ ซึ่งการลดต้นทุนแรงงานคนนี้จะส่งผลให้สามารถเพิ่มกำลังการผลิตอื่น ๆ ได้
3. ลดต้นทุนด้านเวลา ในการผลิต เนื่องจากไม่จำเป็นต้องเปิด-ปิดเตาอบแห้งเพื่อพลิกกลับ ซึ่งปกติจะทำการพลิกกลับไม่น้อยกว่า 6 รอบขณะอบแห้ง ดังนั้นหากลดระยะเวลาในการพลิกกลับ โดยใช้วิธีการสลับทิศทางลมร้อนแทน ก็จะทำให้ลดระยะเวลาการอบแห้งลงได้ อีกทั้งยังเป็นการปรับปรุงสภาวะแวดล้อมการอบแห้งได้ดีขึ้น ในการเปิดเตาอบแห้งเพื่อพลิกกลับพริกไทย จะทำให้ความร้อนจากเตาอบแห้งรั่วไหลออกสู่สายการผลิตภายนอกเป็นปริมาณมาก จึงทำให้เกิดความร้อนสะสมในสายงานการผลิต อีกทั้งกลิ่นพริกไทยขณะเปิดเตาอบ รบกวนการทำงานของผู้ผลิตในสายการผลิตอื่น ดังนั้นหากใช้วิธีการสลับทิศทางลมร้อนซึ่งเป็นระบบปิดแทนการพลิกกลับ ก็จะสามารถลดความร้อน และกลิ่นได้

วัตถุประสงค์

1. ศึกษากระบวนการการอบแห้งพริกไทยที่เหมาะสมด้วยเทคนิคการสลับทิศทางลมร้อน ด้วยเตาอบสลับทิศทางลมขนาด 1 ตัน
2. วิเคราะห์ผลทางเศรษฐศาสตร์ และแนวทางการดัดแปลงเครื่องอบแห้งระดับอุตสาหกรรมให้สามารถสลับทิศทางลมร้อนได้

ประโยชน์ที่ได้รับ

ภายหลังจากการทำวิจัย ผู้วิจัยได้รับความรู้พื้นฐานด้านการอบแห้งวัสดุเกษตรในระดับอุตสาหกรรม และความรู้เชิงเศรษฐศาสตร์วิศวกรรม เพื่อสามารถประเมินการลงทุนในระดับอุตสาหกรรมการอบแห้งได้ อีกทั้งยังเป็นการเพิ่มประสบการณ์การทำงานร่วมกับภาคอุตสาหกรรมในการลดต้นทุนการอบแห้งระดับอุตสาหกรรม

ขอบเขตของการวิจัย

การวิจัยในครั้งนี้ใช้พริกไทยดำ ซึ่งจะถูกเตรียมโดย บริษัท นิธิฟู๊ดส์ จำกัด จังหวัดเชียงใหม่ โดยเตาอบแห้งที่ใช้ในการทดลอง เป็นเตาอบแห้งสลับทิศทางลมขนาด 1 ตัน ของบริษัท เลิศลานนาไทย จำกัด ที่ถูกดัดแปลงให้เหมาะสมกับการอบแห้งพริกไทยดำ

บทที่ 2

การตรวจสอบเอกสาร

ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับพริกไทย

พริกไทย (*Piper Nigrum* Linn) เป็นเครื่องเทศที่มีรสชาติเผ็ดร้อน และมีกลิ่นฉุนชนิดหนึ่ง จึงทำให้พริกไทยนิยมบริโภคกันทั่วโลก ซึ่งประชากรส่วนใหญ่นิยมนำพริกไทยมาใช้เป็นเครื่องปรุงแต่งรสชาติอาหาร ทำให้อาหารนั้น นำรับประทานยิ่งขึ้น อีกทั้งยังมีสรรพคุณทางยา ใช้ขับเหงื่อ ขับลม และขับปัสสาวะ กระตุ้นปฏิกิริยาของคลื่น ระวังอาการปวดท้อง ช่วยกระตุ้นให้กล้ามเนื้อในกระเพาะ และลำไส้เคลื่อนไหวอย่างสม่ำเสมอ ทำให้อาหารถูกย่อยได้ง่าย เป็นต้น โดยองค์ประกอบเฉลี่ยที่มีอยู่ในพริกไทยดำ แสดงในตาราง 2 นอกจากนี้พริกไทยยังสามารถยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อจุลินทรีย์บางชนิดได้อีกด้วย

ตาราง 2 องค์ประกอบเฉลี่ยที่มีอยู่ในพริกไทยดำ

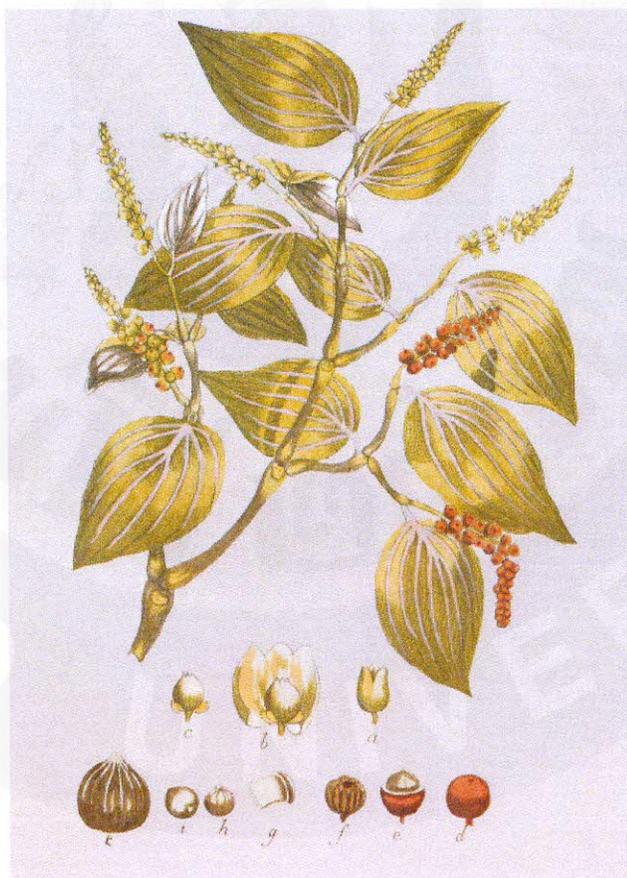
ส่วนประกอบ	องค์ประกอบ (%)
ความชื้น	8.7
แป้ง	28.0 - 49
ไฟเบอร์	8.7 - 18.0
พิเพอริน (Piperine)	1.7 - 7.4
ปริมาณเถ้าทั้งหมด	3.6 - 5.7
โอสีโอเรซิน (oleoresin)	3.9 - 11.5

หมายเหตุ Piperine เป็นสารต้านอนุมูลอิสระ (antioxidant) สามารถป้องกันและรักษาโรคอัลไซเมอร์ในผู้สูงอายุ

ที่มา: Dhas (2003)

ลักษณะทั่วไปของพริกไทย

พริกไทย (*Piper Nigrum* Linn) เป็นพันธุ์ไม้เนื้ออ่อน มีลักษณะเป็นเถา มีทั้งต้นตัวผู้และต้นตัวเมีย ลำต้นจะยึดเกาะกับสิ่งอื่นโดยอาศัยรากที่เรียกว่า ตีนตุ๊กแก มีข้อ และปล้องชัดเจน ใบเดี่ยวรูปร่างไข่ หรือ รี ออกสลับกันตามข้อของลำต้น โคนใบใหญ่ ฐานใบมีลักษณะหลายแบบ เช่น กลม มน หรือ รูปหอก ปลายใบแหลม ดอกมีสีขาวปนเหลืองเป็นช่อ ผลพริกไทยค่อนข้างกลม ออกเป็นช่อทรงกระบอกกลมยาว ในแต่ละช่อมีเมล็ดพริกไทยขนาด 3 - 4 มิลลิเมตร มีต้นอ่อนขนาดเล็กอยู่ภายใน เมล็ดมีกลิ่นฉุน และมีรสเผ็ด ผลพริกไทยอ่อนมีสีเขียว เมื่อผลแก่จะเป็นสีเหลืองและสีแดง พริกไทยจะเจริญเติบโตได้ดีในพื้นที่ที่เป็นดินร่วน ดินร่วนปนทราย หรือดินร่วนเหนียว มีความอุดมสมบูรณ์สูง ระบายน้ำได้ดี น้ำไม่ขัง และสภาพภูมิอากาศร้อนชื้น โดยลักษณะใบ ลำต้น และเมล็ดพริกไทย แสดงในภาพ 1



ภาพ 1 ลักษณะใบ ลำต้น และเมล็ดพริกไทย

ที่มา: Swahn (1992)

พันธุ์พริกไทยในประเทศไทย

พริกไทยที่ปลูกในประเทศไทยมีหลากหลายสายพันธุ์ แต่พันธุ์ที่นิยมปลูก ได้แก่ พันธุ์ซาราวัก หรือ พันธุ์คูซัง พันธุ์ซีลอนยอดแดง และพันธุ์ซีลอนยอดขาว ซึ่งเป็นสายพันธุ์ที่นำมาจากต่างประเทศ โดยจะให้ผลผลิตสูงกว่าพันธุ์พื้นเมือง โดยพันธุ์พื้นเมืองที่นิยมปลูก คือ พันธุ์จันทบุรี พันธุ์ปะเหลียน และพันธุ์พื้นเมืองกระบี่ (จิตติมณฑน์, 2549) ในปัจจุบันสถาบันวิจัยพืชสวน กรมวิชาการเกษตร ได้รวบรวมพันธุ์พริกไทยที่ปลูกในประเทศไทยไว้ 6 พันธุ์ ได้แก่

1. พันธุ์จันทบุรี เป็นพริกไทยพันธุ์พื้นเมืองของจังหวัดจันทบุรี ลักษณะของพันธุ์คือ ขอบใบหยิก หน้าใบค่อนข้างเรียบ ยาว ปลายแหลม ลักษณะของผลค่อนข้างกลม และใหญ่ พริกไทยพันธุ์นี้เหมาะแก่การทำพริกไทยขาว ผลผลิตที่ได้ปานกลาง ความต้านทานโรครากเน่า
2. พันธุ์ปะเหลียน เป็นพันธุ์พื้นเมืองของจังหวัดตรัง ใบมีลักษณะค่อนข้างป้อม ช่อดอกสั้น ช่อผลยาว ขนาดผลเล็กกว่าพันธุ์จันทบุรี ทนทานต่อโรครากเน่า
3. พันธุ์มาเลเซีย เป็นพันธุ์พริกไทยที่นำมาจากประเทศมาเลเซีย ขอบใบเรียบ และบาง ลักษณะผลค่อนข้างกลม และใหญ่ ให้ผลผลิตสูง ความต้านทานโรครากเน่า
4. พันธุ์พื้นเมืองกระบี่ เป็นพริกไทยพันธุ์ดั้งเดิมของจังหวัดกระบี่ ขอบใบเรียบ ช่อผลยาว ขนาดผลเล็ก ความต้านทานต่อโรครากเน่า ให้ผลผลิตต่ำ
5. พันธุ์ซาราวัก หรือพันธุ์คูซัง เป็นพริกไทยพันธุ์ที่นิยมปลูก และเป็นที่ยอมรับในตลาดต่างประเทศ เพราะมีกลิ่นฉุน รสเผ็ดจัด ในบางครั้งอาจเรียกว่า พันธุ์มาเลเซียใบใหญ่ ลักษณะผลกลม ขนาดใหญ่ สามารถต้านทานโรครากเน่าได้ดี เจริญเติบโตเร็ว และให้ผลผลิตสูง
6. พันธุ์ใบยาว ลักษณะใบเรียวยาว และหนา ใบมีขนาดใหญ่ ลักษณะผลกลม มีความต้านทานต่อโรครากเน่าดี แต่ให้ผลผลิตน้อย

กระบวนการผลิตพริกไทย

การเก็บเกี่ยวพริกไทย เกษตรกรจะเริ่มเก็บเกี่ยวเมื่อสังเกตเห็นว่าช่อพริกไทยเริ่มมีผลสุก โดยการบริโภค และการจำหน่ายพริกไทยในท้องตลาดมี 2 แบบ คือ พริกไทยสด และพริกไทยแห้ง พริกไทยแห้งนั้นนิยมบริโภคในรูปแบบผง แบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือพริกไทยขาว (white pepper) และพริกไทยดำ (black pepper) ซึ่งมีวิธีการเก็บ และวิธีการผลิต (เหมการี, 2545) ดังนี้

1. พริกไทยขาว

ในการผลิตพริกไทยขาวนั้น เกษตรกรจะเริ่มเก็บรวงพริกไทยที่มีผลสุกแล้ว โดยสังเกตได้จากเมล็ดจะมีสีเหลือง หรือ สีแดง ในกระบวนการผลิตเริ่มจากบรรจุพริกไทยลงในกระสอบที่สะอาด แล้วผูกปากกระสอบให้แน่น จากนั้นนำกระสอบที่บรรจุรวงพริกไทยลงแช่ในน้ำสะอาด โดยให้กระสอบจมน้ำจนมิด ประมาณ 5-7 วัน หรือ จนกว่าเปลือกเมล็ดนึ่ม และเปื่อยเพื่อให้ง่ายต่อการขัดเปลือกเมล็ดพริกไทย จากนั้นทำการแยกเมล็ดพริกไทยออกจากก้าน และขัดเปลือกเมล็ดพริกไทย นำเมล็ดพริกไทยตากแดด ประมาณ 5-6 วัน หรือ จนกว่าพริกไทยจะแห้งสนิท

2. พริกไทยดำ

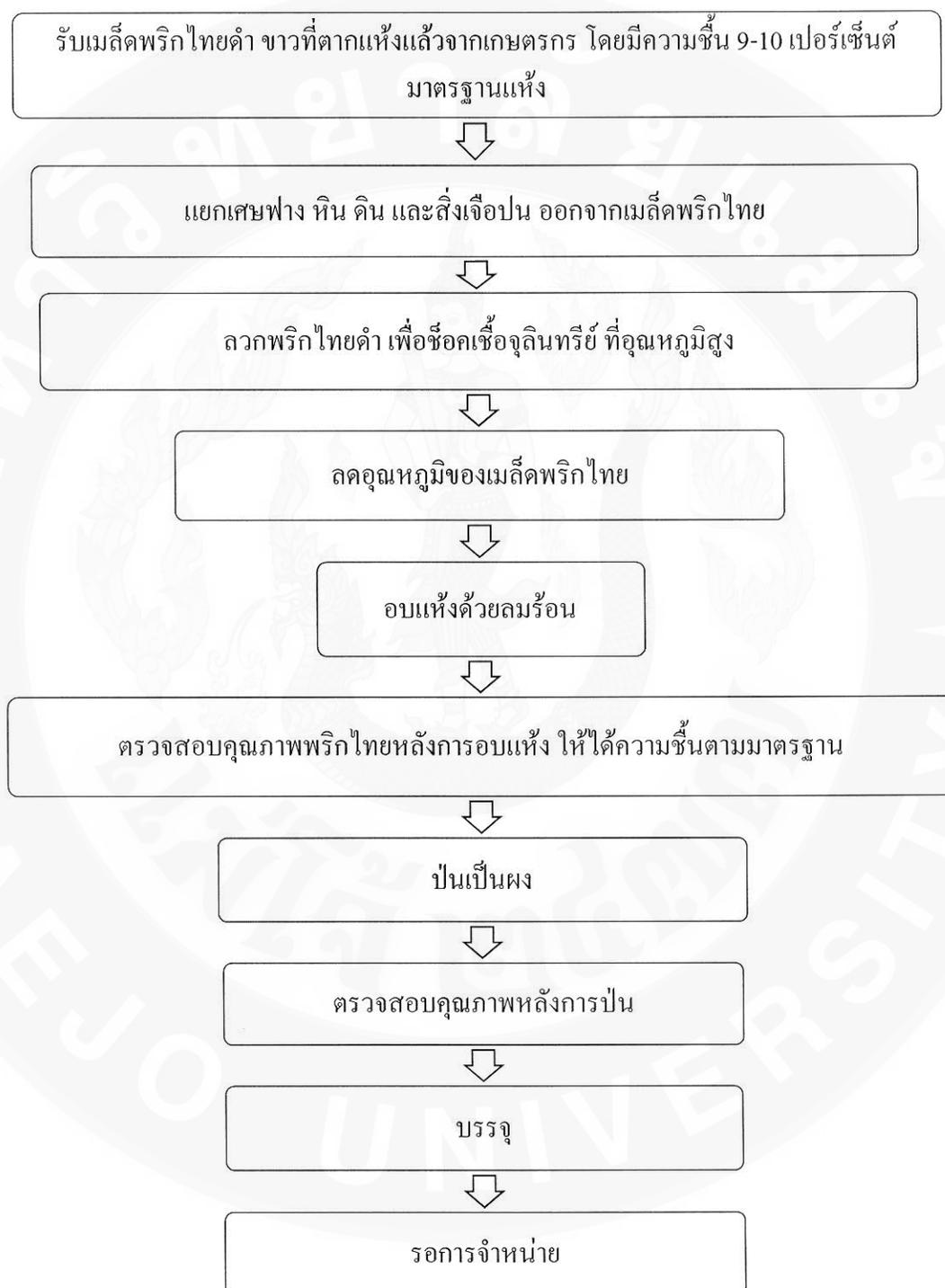
การผลิตพริกไทยดำ เกษตรกรจะเริ่มเก็บเกี่ยวผลพริกไทยที่โตเต็มที่ แต่ยังไม่สุก โดยเมล็ดพริกไทยที่โตเต็มที่นั้นจะมีสีเขียวเข้ม ในการเก็บจะต้องไม่มีผลสุกที่มีสีเหลือง หรือ สีแดงปะปน เพราะจะทำให้สีพริกไทยหลังจากการตากแห้งไม่สม่ำเสมอ จากนั้นนำรวงพริกไทยสดกองไว้เป็นกอง อย่างน้อย 24 ชั่วโมง เพื่อให้ง่ายต่อการนวดเมล็ดพริกไทยออกจากก้าน ทำการนวดพริกไทย เพื่อแยกเอาเมล็ดออกจากก้าน โดยใช้เครื่องนวด แช่วเมล็ดพริกไทยในน้ำร้อนจัดประมาณ 4 นาที เพื่อให้สีผิวของพริกไทยสวย และเป็นมัน นำเมล็ดออกตากแดด โดยเกลี่ยให้เป็นชั้นบาง ๆ จนพริกไทยแห้งสนิท ลักษณะเมล็ดพริกไทยดำ แสดงดังภาพ 2



ภาพ 2 ลักษณะของเมล็ดพริกไทยดำ

จากการผลิตพริกไทยในระดับเกษตรกรนั้น ทำให้คุณภาพหลังการตากแห้งไม่เหมาะสมแก่การทำเป็นพริกไทยป่น เนื่องจากไม่มีควบคุมคุณภาพในระหว่างการผลิต และการตรวจสอบคุณภาพหลังการผลิต ดังนั้นการผลิตพริกไทยป่นในภาคอุตสาหกรรมนั้นจึงต้องมีการ

ปรับปรุงวิธีการผลิตเพื่อให้ได้พริกไทยตามมาตรฐานที่กำหนดไว้ ซึ่งกระบวนการผลิตพริกไทยดำภาคอุตสาหกรรม ดังแสดงในภาพ 3



ภาพ 3 กระบวนการปรับปรุงวิธีการผลิตพริกไทยในภาคอุตสาหกรรม
ที่มา: นิยนาถ (2555)

สำหรับระดับอุตสาหกรรมนั้น การควบคุมคุณภาพของพริกไทยเป็นสิ่งสำคัญ เพื่อสามารถผลิตพริกไทยที่มีคุณภาพตรงตามมาตรฐานที่กำหนดไว้ อีกทั้งยังเป็นการสร้างความมั่นใจและความน่าเชื่อถือกับผู้บริโภค ว่าผลิตภัณฑ์ดังกล่าว สามารถผลิตได้ตรงตามมาตรฐานไม่เป็นอันตรายต่อผู้บริโภค โดยมาตรฐานพริกไทยปนที่ทางมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมกำหนดไว้ แสดงในตาราง 3

ตาราง 3 มาตรฐานของพริกไทยปน

รายการ	ปริมาณที่กำหนด	
	พริกไทยดำ	พริกไทยขาว
1. ปริมาณความชื้นสูงสุด ร้อยละของน้ำหนัก	12	12
2. ปริมาณเถ้าสูงสุด ร้อยละของน้ำหนักเมื่ออบแห้ง	7	3.5
3. ปริมาณเถ้าที่ไม่ละลายในกรดสูงสุด ร้อยละของน้ำหนักเมื่ออบแห้ง	1.4	0.2
4. ส่วนที่สกัดด้วยอีเทอร์ที่ไม่ระเหยต่ำสุด ร้อยละของน้ำหนักเมื่ออบแห้ง	6.6	6.6
5. ปริมาณกากสูงสุด ร้อยละของน้ำหนักเมื่ออบแห้ง	17.5	6.0

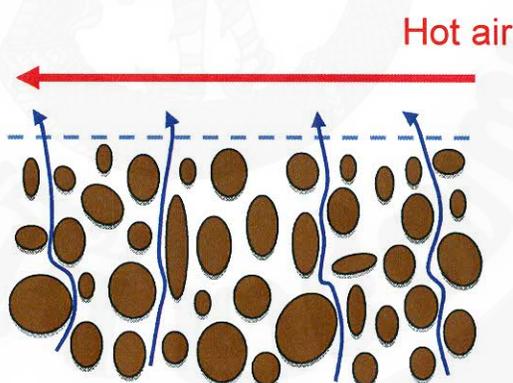
ที่มา: ผดุงศักดิ์ และคณะ (2548)

การอบแห้ง

การอบแห้งเป็นวิธีที่นิยมใช้ในการถนอมอาหาร หรือ วัสดุเกษตรวิธีหนึ่ง ที่ใช้ลดระดับปริมาณความชื้น และปริมาณน้ำอิสระที่มีอยู่ในวัสดุลง ให้อยู่ในระดับที่เชื้อจุลินทรีย์ไม่สามารถเจริญเติบโตได้ (Doymaz, 2012b) โดยอาศัยหลักการการถ่ายเทความร้อน และการถ่ายเทมวลระหว่างวัสดุกับของไหลที่ใช้เป็นตัวกลาง ทำให้น้ำในวัสดุระเหยออกมา (Maskan et al. 2002) เพื่อยืดอายุการเก็บรักษาของผลิตภัณฑ์ เนื่องจากการอบแห้งเป็นการลดปริมาณน้ำในวัสดุเพื่อยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อจุลินทรีย์ทุกชนิด เช่น รา ยีสต์ และแบคทีเรีย เป็นต้น ซึ่งเป็นสาเหตุให้เกิดการเน่าเสียในผลิตภัณฑ์ โดยการยับยั้งการทำงานของเอนไซม์ หรือ ชะลอปฏิกิริยาต่างๆ ทั้งทางเคมี และทางชีวเคมีที่ใช้น้ำเป็นส่วนหนึ่งของปฏิกิริยา ส่งผลให้อายุการเก็บรักษาอาหาร หรือ วัสดุเกษตรนั้นนาน ลดต้นทุนการขนส่ง มีความปลอดภัยจากเชื้อจุลินทรีย์ที่ก่อให้เกิดโรค อีกทั้งยังเป็น

การเพิ่มมูลค่าให้กับผลิตภัณฑ์ รวมถึงเพื่อสร้างผลิตภัณฑ์ใหม่ ๆ ที่เป็นทางเลือกของผู้บริโภคมากขึ้น

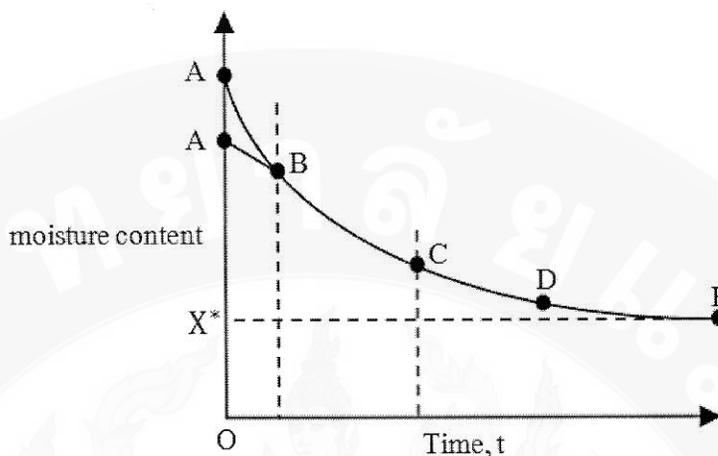
ในปัจจุบัน ได้มีการพัฒนาวิธีการอบแห้งหลายวิธี อาทิเช่น การอบแห้งเมล็ดพริกไทยโดยใช้ไมโครเวฟร่วมกับการอบแห้งแบบฟูอิดโคสเบค (Kaensup et al 1998) หรือ การอบแห้งจึงด้วยเทคนิคสุญญากาศร่วมกับอินฟราเรด (อำไพศักดิ์ และศักชัย จงจำ, 2553) เป็นต้น ซึ่งแต่ละวิธีการอบแห้งที่พัฒนาเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการอบแห้ง และลดเวลาการอบแห้งลง รวมถึงการปรับปรุงคุณภาพหลังการอบแห้งให้ดีขึ้น แต่การอบแห้งอาหาร หรือ วัสดุเกษตร ที่นิยมมากที่สุด และสามารถทำได้ง่าย คือ การอบแห้งด้วยลมร้อน โดยใช้อากาศเป็นตัวกลางในการอบแห้ง ความร้อนจะถ่ายเทจากอากาศไปยังพื้นผิววัสดุ พร้อมกับการถ่ายเทมวลจากวัสดุไปยังอากาศ โดยความร้อนจากอากาศจะเป็นตัวกลางในการระเหยน้ำออกจากวัสดุ น้ำจะเคลื่อนที่ด้วยการไหลผ่านช่องแคบ (capillary flow) ออกมายังผิว ทั้งนี้เป็นผลมาจากแรงตึงผิว (surface force) ส่วนไอน้ำในวัสดุจะเคลื่อนที่เนื่องจากความแตกต่างของความเข้มข้นของความชื้น (vapor diffusion) และความดันไอ (partial pressure of vapor) ระหว่างไอน้ำในวัสดุกับอากาศร้อน (เพชรรัตน์, 2549) ดังแสดงในภาพ 4



ภาพ 4 กระบวนการการอบแห้งวัสดุ

ที่มา: เพชรรัตน์ (2549)

ในการอบแห้งวัสดุเกษตรสามารถแบ่งการอบแห้งได้เป็น 3 ช่วง คือ ช่วงเริ่มต้นของการอบแห้ง (rising rate drying period) ช่วงอัตราการอบแห้งคงที่ (constant rate drying period) และ ช่วงอัตราการอบแห้งลดลง (falling rate drying period)

DRYING CURVE

ภาพ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นกับเวลาในการอบแห้ง

ที่มา: Brennan et al. (1990)

จากภาพ 5 AB เป็นช่วงเริ่มต้นของการอบแห้ง (rising rate drying period) มีการให้ความร้อนแก่วัสดุเบื้องต้น การถ่ายเทความร้อน และการถ่ายเทมวลจะเกิดขึ้นบริเวณรอบ ๆ ผิววัสดุ อัตราการอบแห้งของวัสดุในช่วงนี้จะมีค่าเพิ่มสูงขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น และความชื้นสัมพัทธ์ลดลง

ช่วง BC เป็นช่วงอัตราการอบแห้งคงที่ (constant rate drying period) ในช่วงนี้ บริเวณผิววัสดุยังมีความชื้นสูงอยู่ การถ่ายเทความร้อน และการถ่ายเทมวลเกิดขึ้นพร้อมกัน โดยการถ่ายเทความร้อนระหว่างผิววัสดุกับอากาศเป็นแบบการพาความร้อน ส่วนการถ่ายเทมวลเกิดจากการแพร่เนื่องจากความแตกต่างของความเข้มข้นของไอน้ำที่ผิวกับอากาศรอบนอก ดังสมการ 1

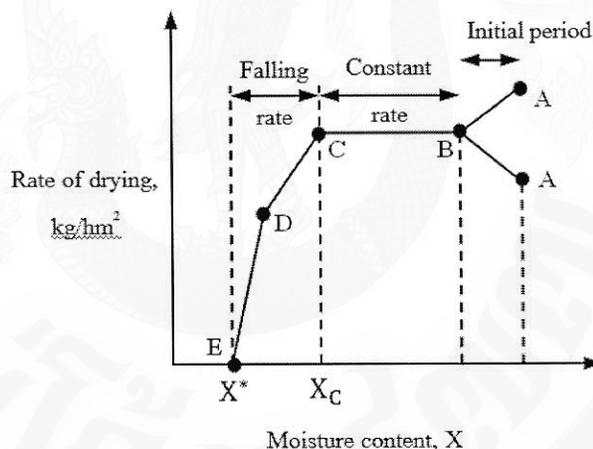
สมการ 1

$$DR = \frac{m_w}{DT}$$

เมื่อ	DR	คือ อัตราการอบแห้ง (กิโลกรัมต่อชั่วโมง, kg/hr)
	m_w	คือ มวลของน้ำที่ระเหย (กิโลกรัม, kg)
	DT	คือ เวลาที่ใช้ในการอบแห้ง (ชั่วโมง, hr)

ช่วง CD เป็นช่วงอัตราการอบแห้งลดลงช่วงแรก (falling rate drying period) ในช่วงนี้วัสดุมีปริมาณน้ำที่ผิวลดลงมาก การถ่ายเทความร้อน และมวลไม่เพียงเกิดขึ้นที่ผิวของวัสดุเท่านั้น แต่จะเกิดขึ้นภายในเนื้อวัสดุด้วย การเคลื่อนที่ของน้ำจากภายในวัสดุมายังผิวช้ากว่าการพาความชื้นจากผิววัสดุไปยังอากาศ โดยรูปแบบการเคลื่อนที่ของน้ำจะเป็นของเหลว หรือไอน้ำ แล้วระเหยเมื่อได้รับความร้อนจากอากาศร้อน เมื่อปริมาณความชื้นต่ำลงเรื่อย ๆ ระยะทางในการแพร่หรือการเคลื่อนที่ของความร้อน และมวลจะมากขึ้น (ช่วง DE) จนความชื้นของวัสดุลดต่ำลงจนถึงจุด ๆ หนึ่งจนไม่มีการเปลี่ยนแปลง ที่จุดนี้อุณหภูมิของวัสดุเท่ากับอุณหภูมิของอากาศรอบ ๆ ทำให้น้ำไม่สามารถระเหยออกจากวัสดุได้ เรียกความชื้นในขณะนั้นว่า ความชื้นสมดุล (จุด E) และเรียกช่วงการอบแห้งช่วงนี้ว่า ช่วงอัตราการอบแห้งลดลงช่วงที่สอง (อุมาพร, 2543) โดยความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการอบแห้ง กับ ปริมาณความชื้นต่าง ๆ สามารถสรุปได้ดังภาพ 6

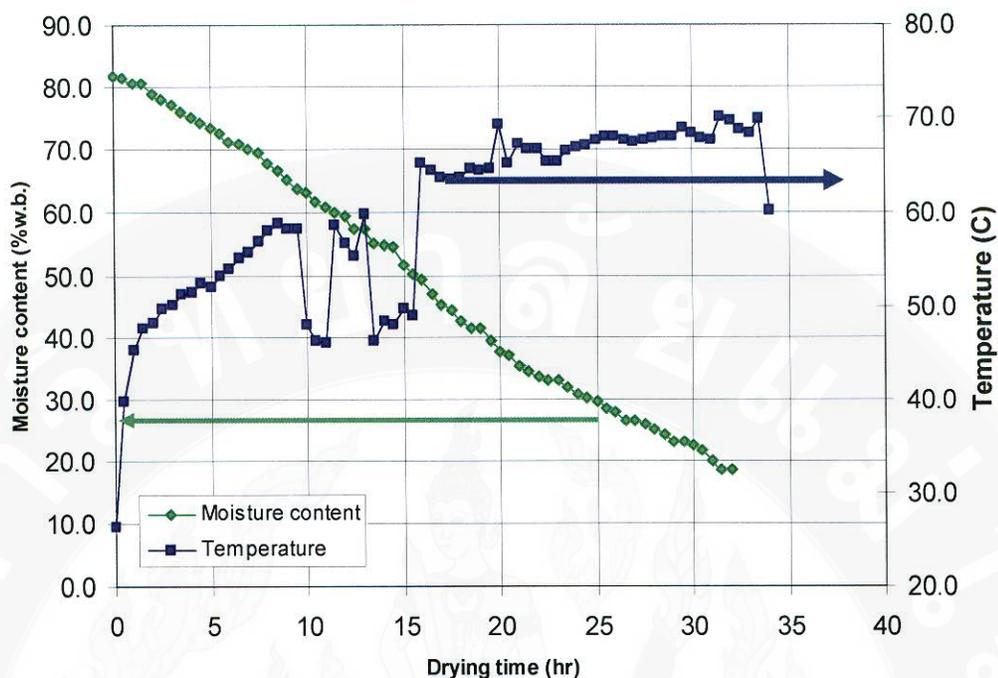
DRYING RATE CURVES



ภาพ 6 ช่วงอัตราการอบแห้งแบบต่าง ๆ

ที่มา: Brennan et al. (1990)

สำหรับกราฟการอบแห้งของการอบแห้งแบบ Fixed bed นั้น จากอุพงษ์ และคณะ (2552) ได้ใช้เตาอบแห้งแบบสลับทิศทางการอบแห้งขนาด 1 ตัน ทำการทดลองในระดับห้องปฏิบัติการ เพื่อวิเคราะห์กราฟการอบแห้งซึ่งแสดงในภาพ 7

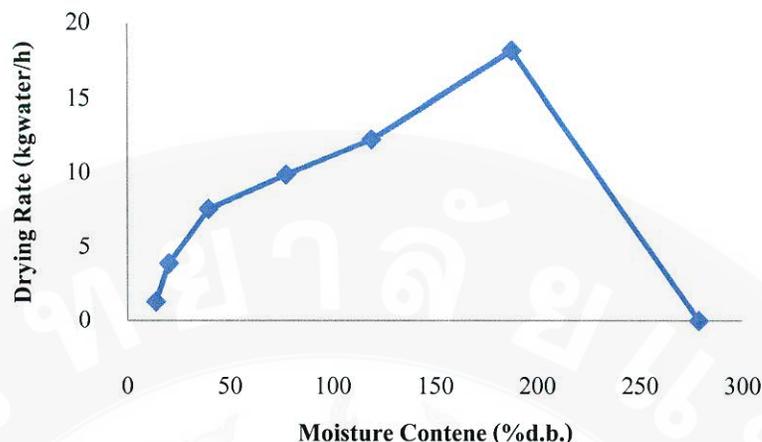


ภาพ 7 การเปลี่ยนแปลงความชื้นลำไย และอุณหภูมิการอบแห้งด้วยเตาอบแห้งแบบสลับทิศทางลมร้อน

ที่มา: จาตุพงษ์ และคณะ (2552)

จากภาพ 7 พบว่าการลดลงของความชื้นลำไยในระหว่างการอบแห้งมีแนวโน้มค่อนข้างเป็นเส้นตรง ซึ่งต่างจากในทฤษฎีที่คาดว่าจะเส้นโค้งลดลงแบบ Exponential โดยความชื้นของลำไยจะลดลง ในขณะที่อุณหภูมิของลมร้อนขาออกในการอบแห้งมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ในช่วง 3 ชั่วโมงแรก อุณหภูมิเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว แต่เมื่อเข้าสู่ชั่วโมงที่ 4 เป็นต้นไป อุณหภูมิจะเพิ่มขึ้นอย่างช้า ๆ หลังจากนั้นอุณหภูมิจะเริ่มคงที่เมื่อเข้าสู่ชั่วโมงที่ 17 และคงที่จนถึงสิ้นสุดกระบวนการ

สำหรับกราฟอัตราการอบแห้งของการอบแห้งแบบ Fixed bed กรรณิการ์ (2549) ได้ทำการศึกษาการอบแห้งลำไยทั้งลูกโดยใช้เครื่องอบแห้งแบบกระบะ ซึ่งลักษณะของกราฟอัตราการอบแห้งเทียบกับปริมาณความชื้น แสดงในภาพ 8 โดยอัตราการอบแห้งนั้นมีช่วงเริ่มต้นของการอบแห้งใน 12 ชั่วโมงแรกของการอบแห้ง จากนั้นจะเป็นช่วงอัตราการอบแห้งลดลงตลอดกระบวนการอบแห้ง



ภาพ 8 อัตราการอบแห้งของลำไยที่อุณหภูมิใดๆ ด้วยเตาอบแห้งแบบกระบะ
ที่มา: กรรณิการ์ (2549)

ความชื้น

ความชื้นที่มีในวัสดุเกษตร หรือ อาหาร เป็นตัวบ่งบอกถึงปริมาณน้ำที่มีอยู่ในผลผลิตเมื่อเทียบกับมวลของผลผลิต ซึ่งเป็นคุณสมบัติที่สำคัญอย่างหนึ่งของวัสดุ เนื่องจากความชื้นมีผลต่อการเน่าเสียของอาหาร หรือ วัสดุเกษตร โดยเฉพาะการเน่าเสียเนื่องจากเชื้อจุลินทรีย์ ซึ่งส่งผลกระทบต่ออายุการเก็บรักษา (shelf life) ความปลอดภัยทางอาหาร (food safety) สมบัติทางกายภาพ และสมบัติเชิงความร้อนของอาหารในด้านต่าง ๆ เช่น จุดหลอมเหลว จุดเดือด การนำความร้อน (thermal conductivity) ความร้อนจำเพาะ (specific heat) เป็นต้น คุณภาพทางประสาทสัมผัส ได้แก่ เนื้อสัมผัส (texture) เช่น ความกรอบ ความหนืด (viscosity) การเกาะติดกันเป็นก้อน (caking) และการเปลี่ยนสี เป็นต้น อัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมี ต่าง ๆ ที่มีผลกระทบทางลบต่ออาหารระหว่างการเก็บรักษา เช่น ปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาล (browning reaction) ปฏิกิริยาออกซิเดชันของไขมัน (lipid oxidation) และกลิ่น เป็นต้น รวมถึงมีผลต่อการกำหนดราคาสินค้า เช่น ข้าว เมล็ดธัญพืช ซึ่งกำหนดราคาซื้อขายตามปริมาณความชื้น โดยปริมาณความชื้นนั้นมีผลต่อน้ำหนักในวัสดุอีกด้วย

ปริมาณความชื้นนิยมบอกเป็นเปอร์เซ็นต์ มี 2 รูปแบบ คือ

1. ความชื้นมาตรฐานเปียก (wet basis) คือ อัตราส่วนน้ำหนักของน้ำในวัสดุต่อมวลของวัสดุทั้งหมด โดยเทียบสัดส่วนเป็นร้อยละ หรือ เปอร์เซ็นต์ทั้งหมด ดังแสดงในสมการ 2 เป็นความชื้นที่นิยมบอกในทางการค้า หรือการซื้อขายผลผลิตทางการเกษตรของเกษตรกร

สมการ 2

$$MC_{w.b.} = \frac{w - d}{w} \times 100$$

2. ความชื้นมาตรฐานแห้ง (dry basis) คือ อัตราส่วนน้ำหนักของน้ำในวัสดุต่อวัสดุแห้ง โดยเทียบสัดส่วนเป็นร้อยละ หรือ เปอร์เซ็นต์ ดังแสดงในสมการ 3 เป็นความชื้นที่นิยมใช้ในเอกสารวิชาการ เนื่องจากน้ำหนักแห้งจะมีค่าคงที่เสมอไม่เปลี่ยนแปลงไปตามระยะเวลาการอบแห้ง

สมการ 3

$$MC_{d.b.} = \frac{w - d}{d} \times 100$$

เมื่อ $MC_{w.b.}$ คือ เปอร์เซ็นต์มาตรฐานเปียก (เปอร์เซ็นต์, %)

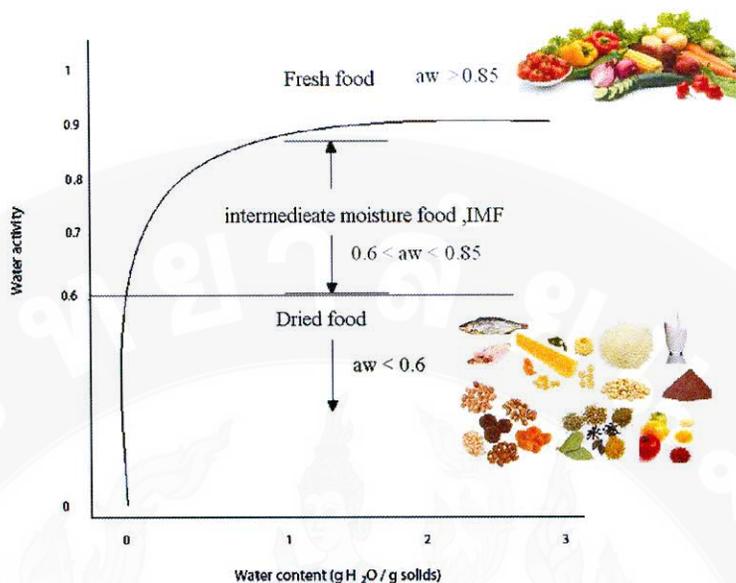
$MC_{d.b.}$ คือ เปอร์เซ็นต์มาตรฐานแห้ง (เปอร์เซ็นต์, %)

w คือ น้ำหนักวัสดุ (กิโลกรัม, kg)

d คือ น้ำหนักแห้งในวัสดุ (กิโลกรัม, kg)

วอเตอร์แอกติวิตี (water activity, a_w)

อีกปัจจัยที่สำคัญในการบ่งบอกอายุการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์ คือ ค่าวอเตอร์แอกติวิตี (water activity, a_w) คือ ปริมาณน้ำอิสระที่เป็นประโยชน์ต่อการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ และปฏิกิริยาเคมีต่าง ๆ สามารถหาได้จากอัตราส่วนความดันไอน้ำของอาหารต่อค่าความดันไอของน้ำบริสุทธิ์ที่อุณหภูมิเดียวกัน ถ้าค่าวอเตอร์แอกติวิตี (a_w) สูง โอกาสที่จุลินทรีย์จะเจริญในผลิตภัณฑ์สูง ส่งผลให้อายุการเก็บรักษาสั้น แต่ถ้ามีค่าต่ำกว่าที่จุลินทรีย์ที่สามารถเติบโตได้ จะสามารถควบคุมการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์นั้น ๆ ส่งผลให้อายุการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์นั้นนาน การจำแนกค่าวอเตอร์แอกติวิตีได้ตามภาพ 9 และค่าขั้นต่ำที่จุลินทรีย์สามารถเจริญเติบโตได้ ดังตาราง 4



ภาพ 9 การจำแนกตามค่าแอกติวิตีของน้ำ

ที่มา: พิมพ์เพ็ญ และนิริยา (2553)

ตาราง 4 ค่าแวกเตอร์แอกติวิตีขั้นต่ำสำหรับการเจริญเติบโตของเชื้อจุลินทรีย์

ชนิดของจุลินทรีย์	แวกเตอร์แอกติวิตี
แบคทีเรีย	0.90
ยีสต์	0.88
รา	0.80
แบคทีเรียชนิดทนเกลือเข้มข้น (halophilic bacteria)	0.75
ราชนิดทนสภาพแห้งแล้ง (xerophilic mold)	0.61
ยีสต์ชนิดทนน้ำตาลเข้มข้น (osmophilic yeast)	0.60

ที่มา: Jay (2000)

การอบแห้งด้วยลมร้อน

การอบแห้งด้วยลมร้อน (hot air drying) เป็นวิธีที่ง่าย และสะดวกในการปฏิบัติ โดยการใช้ลมร้อนเป่าผ่านผลผลิตที่กำลังอบแห้งอยู่ เป็นการเคลื่อนย้ายน้ำออกจากผลผลิตที่ต้องการอบแห้งโดยการพาความร้อน ซึ่งอาศัยอากาศร้อนเป็นตัวกลาง ซึ่งวิธีกำเนิดลมร้อนแบ่งออกเป็น 2 วิธี (Hall, 1980) คือ

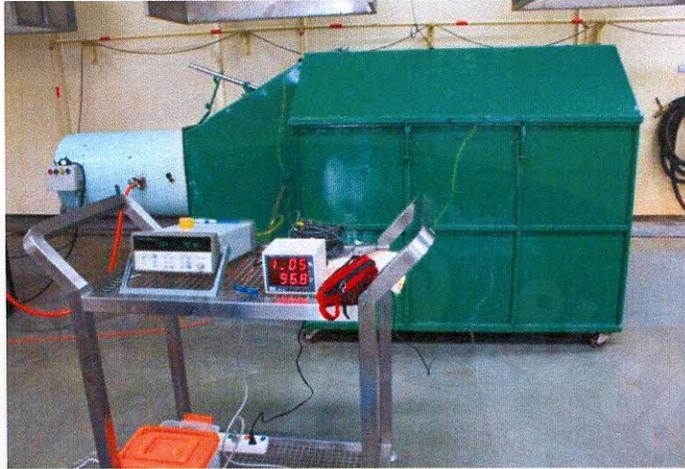
1. การเกิดความร้อนทางตรง โดยปราศจากเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน หมายถึง ผลผลิตที่ได้จากการสันดาปทั้งหมด เช่น ความร้อนจากก๊าซต่าง ๆ และเขม่า จะถูกเป่ารวมกับอากาศ ไปลดความชื้นผลผลิต วิธีนี้เป็นวิธีที่มีเปอร์เซ็นต์การใช้ความร้อนสูงเกือบ 100 เปอร์เซ็นต์ แต่ไม่สามารถใช้ได้กับเชื้อเพลิงหนัก เนื่องจากอาจส่งผลให้ผลผลิตเสียหาย จากควัน และเขม่าที่เกิดจากการเผาไหม้จะจับกับผลผลิตที่กำลังอบแห้งอยู่ ทำให้มีกลิ่น หรือ คราบสีดำ

2. การเกิดความร้อนทางอ้อม หมายถึง การให้ความร้อนผ่านเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน โดยการนำเอาอากาศภายนอกมาผ่านอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน แล้วนำเอาอากาศผ่านไปอบแห้งผลผลิต แต่เปอร์เซ็นต์การใช้ประโยชน์ความร้อนในการอบแห้งมีค่าประมาณ 40-60 เปอร์เซ็นต์ เท่านั้น

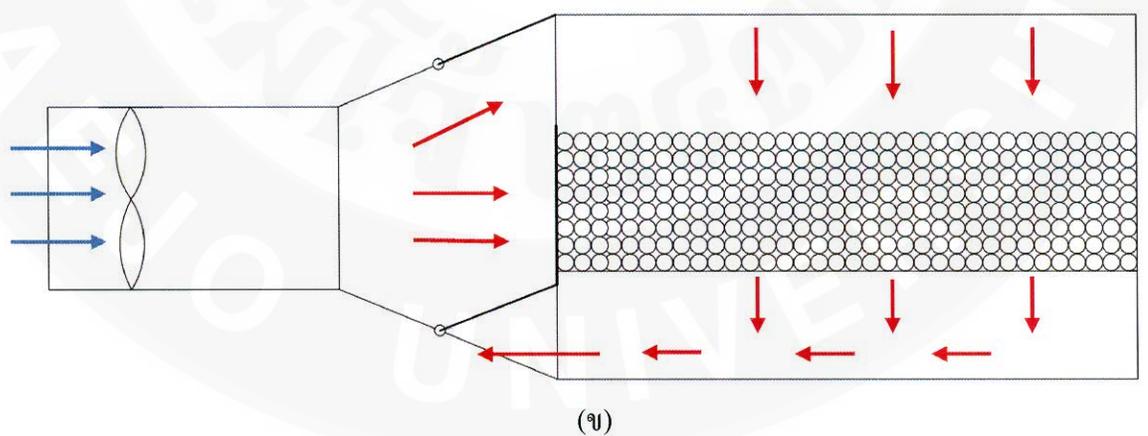
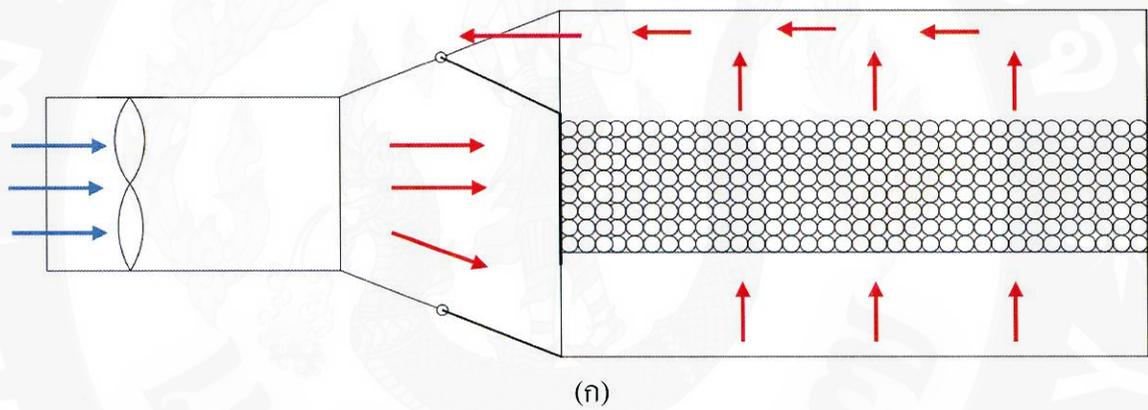
การอบแห้งแบบสลับทิศทางการลม

การอบแห้งแบบสลับทิศทางการลม ได้ถูกพัฒนามาจากการอบแห้งลมร้อนแบบธรรมดา (ลมไหลเข้า และออกทางเดียว) โดย ศุภศักดิ์ (2554) ได้พัฒนาเครื่องอบแห้งลำไยทิ้งเปลือกด้วยระบบหมุนเวียนลมร้อน เพื่อแก้ปัญหาความไม่สม่ำเสมอของความชื้นของลำไย และใช้แรงงานคนในการพลิกกลับ ซึ่งเครื่องอบแห้งที่ถูกพัฒนาขึ้นมาเป็นเครื่องอบแห้งแบบเป็นชุด (batch type) ถูกออกแบบให้ลมร้อนสามารถเข้า และออกได้ 2 ด้าน คือ หากลมร้อนเข้าทางด้านบนของห้องอบแห้ง ทางลมออกจะอยู่ทางด้านล่างของห้องอบแห้ง ในขณะเดียวกันก็สามารถสลับให้ลมเข้าด้านล่างของห้องอบแห้ง และออกด้านบนได้ โดยอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่สลับทิศทางการลม คือ วาล์วควบคุมทิศทางการลม หรือ แผ่นกั้นสำหรับบังคับลมให้ลมสามารถไหลขึ้น หรือ ลงทีละด้าน โดยทำการออกแบบห้องบรรจุวัตถุดิบเป็นลิ้นชัก ซึ่งแยกออกเป็น 3 ชั้น คือ บน กลาง และล่าง รวม 12 ลิ้นชัก ผลการพัฒนา พบว่า คุณภาพของการอบแห้งลำไยทิ้งเปลือกไม่แตกต่างจากการอบลำไยด้วยวิธีพลิกกลับผลลำไย แต่วิธีการสลับลมร้อนนี้สามารถทำงานได้สะดวก และไม่ทำให้เกิดการแตก หรือ บิดเบี้ยวเสียรูปของผลลำไย

โดยเครื่องอบแห้งที่พัฒนาขึ้นมานั้นมีข้อจำกัดในเรื่องปริมาณของวัสดุที่บรรจุลงในเตา เนื่องจากการออกแบบเป็นแบบลิ้นชัก ทำให้ไม่สามารถบรรจุวัสดุได้มาก อีกทั้งในการกลับลิ้นชักในแต่ละครั้งหากบรรจุในวัสดุมากเกินไป จะทำให้กลับลิ้นชักได้ลำบาก รูปแบบการอบแห้งแบบสลับทิศทางการลมร้อนในปริมาณมาก ได้มีการศึกษาโดย จาตุพงษ์ และคณะ (2552) ใช้เตาอบแห้งขนาด 1 ในระดับการทดลอง ดังแสดงภาพ 9 จากนั้นนำข้อมูลการทดลองที่ได้ไปพัฒนาชุดสมองกลเพื่อควบคุมเตาอบแห้งลำไยแบบสลับทิศทางการลมร้อน



ภาพ 10 เตาอบแห้งสลับทิศทางลมร้อน ขนาด 1 ตัน



ภาพ 11 หลักการทำงานของเตาอบแห้งแบบสลับทิศทางลมร้อน

(ก) ลมร้อนจากด้านล่างขึ้นบน

(ข) ลมร้อนจากด้านบนลงล่าง

ที่มา: จาตุพงษ์ และคณะ (2552)

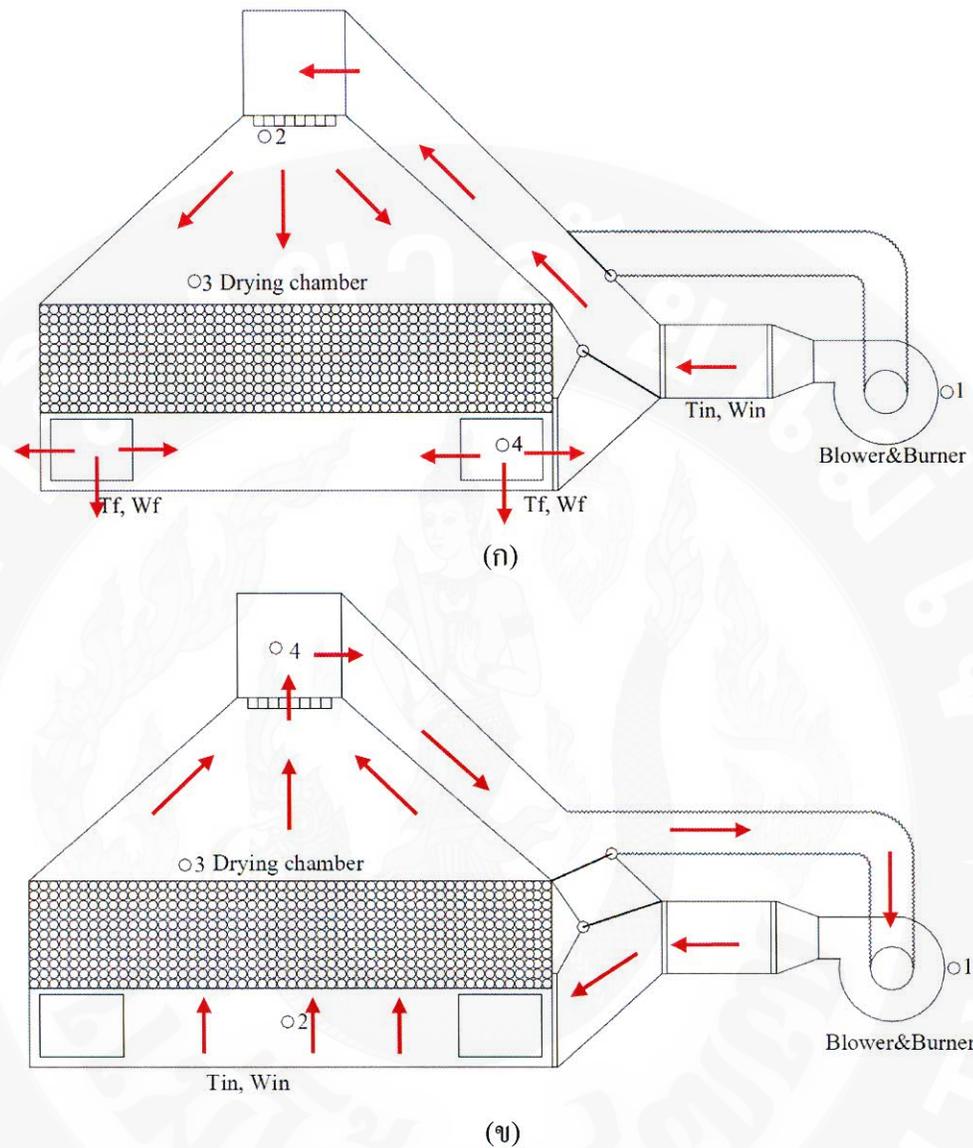
จากภาพ 11 หลักการทำงานของเตาอบแห้งแบบสลับทิศทางการลมร้อน คือ ลมจากภายนอกจะถูกดูดเข้าผ่านชุดกำเนิดความร้อนด้วยพัดลม และหัวเผาแบบแก๊ส LPG ให้เป็นลมร้อน จากนั้นลมร้อนจะถูกดันเข้าช่องรับลมทางด้านล่าง ผ่านช่องว่างใต้ชั้นลำไย จากนั้นลมร้อนจะดันผ่านรูตะแกรง ผ่านชั้นผลผลิตลำไย และความชื้นถูกระบายออกทางด้านบนของเตาอบแห้ง ในกรณีที่มีการสลับทิศทางการลมเป็น จากบนลงล่าง ลมร้อนจะถูกดันเข้าช่องรับลมร้อนทางด้านบนของชั้นลำไยสด ซึ่งลมร้อนจะถูกดันผ่านชั้นลำไย และพาความชื้นออกทางด้านล่างของเครื่อง

เครื่องอบแห้งประเภทนี้ เหมาะสำหรับเกษตรกรรายย่อย เนื่องจากสามารถเคลื่อนย้ายได้สะดวก ง่าย ประหยัดพลังงาน และประหยัดแรงงาน เนื่องจากไม่จำเป็นต้องใช้คนในการพลิกกลับลำไย ใช้งานง่าย มีกลไกการทำงานไม่ซับซ้อน อีกทั้งยังสามารถขยายขนาดให้สามารถบรรจุผลผลิตได้ในปริมาณมากขึ้นถึง 2.5 ตันได้อีกด้วย

ต่อมา วรรณิการ์ (2549) ได้ปรับปรุงเครื่องอบแห้งแบบได้วันให้น้ำลมร้อนที่กลับมาใช้ใหม่ โดยทำการเปรียบเทียบค่าพลังงานที่ใช้ในการอบแห้ง เปรียบเทียบการบอบ และแตกของลำไย และวิเคราะห์ผลทางเศรษฐศาสตร์ จากการปรับปรุงพบว่า เครื่องอบแห้งที่ปรับปรุงแล้วสามารถลดการบอบแตกของลำไยได้ถึง 50 เปอร์เซ็นต์

จากภาพ 12 หลักการทำงานของเครื่องอบแห้งแบบได้วันที่ปรับปรุงแล้ว ในกรณีที่ไม่มีลมกลับ พัดลมจะดูดอากาศเข้าทางตำแหน่งที่ 1 อากาศจะไหลผ่านหัวเผา และเข้าท่อลม จากนั้นอากาศจะถูกกระจายลมด้วยอุปกรณ์กระจายทิศทางการลมในตำแหน่ง 2 และเข้าห้องอบแห้งในตำแหน่ง 3 และลมจะถูกทิ้งออกสู่ภายนอกที่ตำแหน่ง 4

ในกรณีที่มีการนำลมกลับมาใช้ใหม่ พัดลมจะดูดอากาศเข้าทางตำแหน่งที่ 1 อากาศจะไหลผ่านหัวเผาเพื่อให้ลมมีอุณหภูมิสูงขึ้น จากนั้นลมร้อนจะเข้าทางด้านล่างของห้องอบแห้ง เมื่อลมร้อนไหลผ่านชั้นลำไย ลมร้อนส่วนหนึ่งจะถูกระบายออกในตำแหน่ง 4 และอีกส่วนหนึ่งจะวนกลับมาผสมกับอากาศตามสัดส่วนที่ต้องการในตำแหน่ง 1 แสดงในภาพ 11 (ข)



ภาพ 12 หลักการทำงานของเตาอบแบบสลับทิศทางการลมร้อน

- ตัวข้อ
- (ก) การไหลของอากาศร้อนจากบนลงล่าง โดยที่ไม่มีการนำลมที่กลับมาใช้ใหม่
 - (ข) การไหลของลมร้อนจากล่างขึ้นบน โดยมีการนำลมร้อนวนกลับมาผสมกับอากาศใหม่

ที่มา: อารีย์ และคณะ (2550)

การวิเคราะห์เศรษฐศาสตร์

การเปรียบเทียบศักยภาพการลงทุนของการอบแห้งพริกไทยด้วยเครื่องอบแห้งแบบสลับทิศทางลมร้อน และตัวควบคุม ใช้วิธีการวิเคราะห์ความคุ้มทุน และระยะคืนทุน ของโครงการ

1. การวิเคราะห์ความคุ้มทุน (breakeven analysis) เป็นวิธีการวิเคราะห์ที่ใช้เพื่อประเมินจำนวนของงาน หรือ ผลิตภัณฑ์ที่จำเป็นต้องผลิต และขาย โดยทำให้ผลการดำเนินงานของกิจการนั้นเท่ากับศูนย์ คือ ไม่เกิดผลกำไร หรือ ขาดทุน เนื่องจากรายได้เท่ากับค่าใช้จ่ายพอดี
2. วิธีการระยะคืนทุน (payback Period) หลักการของวิธีการวิเคราะห์โครงการ โดยใช้ระยะเวลาคืนทุนจะชี้ให้เห็นสภาพคล่องมากกว่าการทำกำไรของโครงการ การคำนวณหาระยะเวลาคืนทุนเป็นการคำนวณหาจำนวนของระยะเวลามีมูลค่าของกระแสเงินสดรับเท่ากับเงินที่จ่ายลงทุน ดังสมการ 4

สมการ 4

$$(\text{รายได้} - \text{รายจ่าย}) \times b = \text{การลงทุนของต้นทุนคงที่}$$

เมื่อ b คือ ระยะเวลาคืนทุน

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จาคุงศ์ และคณะ (2552) ได้พัฒนาชุดสมองกลเพื่อควบคุมเตาอบแห้งลำไยแบบสลับทิศทางลมร้อน โดยใช้เตาอบแห้งแบบสลับลมร้อนรุ่นบินวัน ของบริษัทเลิศลานนาไทย จำกัด ขนาด 1 ตัน ทำการทดลองในระดับห้องปฏิบัติการเพื่อเก็บข้อมูลความชื้นสัมพัทธ์ของการอบแห้ง ความชื้นลำไยขณะอบแห้ง และอุณหภูมิในการอบแห้ง เพื่อนำไปเป็นข้อมูลอ้างอิงในชุดสมองกลฝังตัว จากการทดลองในระดับห้องปฏิบัติการได้ข้อสังเกตว่า การเปิด-ปิดตู้อบลำไย เพื่อเก็บข้อมูลนั้นทำให้เกิดการลดของอุณหภูมิอย่างรวดเร็ว และต้องใช้เวลาานจึงจะเพิ่มอุณหภูมิให้กลับสู่อุณหภูมิเดิม และยังแนะนำการนำลมร้อนกลับมาใช้ใหม่นั้น ควรใช้หลังจากที่มีการสลับลมร้อนแล้ว เนื่องจากก่อนการสลับลมร้อนนั้นอุณหภูมิของลมร้อนยังไม่สูงพอที่จะนำไปวนกลับไปใช้

ใหม่ได้ หลังจากนั้นจึงทำการทดลองในการอบแห้งระดับอุตสาหกรรม เพื่อเปรียบเทียบเตาอบแห้ง ลำไยที่ติดตั้งชุดผสมองกล และเตาที่ไม่ติดตั้งชุดผสมองกล พบว่า ระยะเวลาในการอบแห้งของการอบแห้งด้วยเตาอบแห้งที่ใช้ชุดผสมองกลฝังดัวลดลง 40.6 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเทียบกับการอบแห้งที่ไม่ได้ติดตั้งชุดผสมองกลฝังดัว และมีอัตราการอบแห้งเฉลี่ยสูงกว่า 44.2 เปอร์เซ็นต์ ต้นทุนแรงกลดลง 50 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเทียบกับการอบแห้งที่ไม่ได้ติดตั้งชุดผสมองกลฝังดัว

ใจทิพย์ และคณะ (2549) ทำการวิจัย และพัฒนาเครื่องอบแห้งพริกไทยสำหรับเกษตรกร ได้ออกแบบเครื่องอบแห้งพริกไทยแบบถ้งหมุนสำหรับอบพริกไทยสดแบบถ้งช้อ โดยทำการเปรียบเทียบคุณภาพพริกไทยหลังการอบแห้ง กับค่าตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (มอก.297-2552) พบว่าคุณลักษณะทางเคมีของพริกไทยที่อบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับความร้อนจากก๊าซหุงต้มจะมีคุณลักษณะทางเคมีที่ดีกว่าพริกไทยที่ตากแดดตามธรรมชาติ อีกทั้งยังพบว่าการอบแห้งแบบต่อเนื่องมีต้นทุนมากกว่าการอบแห้งแบบไม่ต่อเนื่อง (มีการพักระหว่างอบ) โดยที่ต้นทุนของการอบแห้งแบบต่อเนื่อง และแบบไม่ต่อเนื่องประมาณ 2.43 และ 1.22 บาท ต่อกิโลกรัมสด ตามลำดับ

ณรงค์ และคณะ (2554) ได้ศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์เชิงความร้อนของเมล็ดพริกไทย พบว่าความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นกับความหนาแน่นปรากฏ ความร้อนจำเพาะ และร้อยละช่องว่างของอากาศของเมล็ดพริกไทยมีลักษณะเป็นเส้นตรง คือ เมื่อความชื้นของพริกไทยลดลงทำให้ความหนาแน่นปรากฏ ความร้อนจำเพาะ และร้อยละช่องว่างของอากาศของเมล็ดพริกไทยมีค่าลดลงตามไปด้วย โดยความหนาแน่นปรากฏ มีค่าเท่ากับ 439.44 ± 9.75 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ความร้อนจำเพาะ 1902.75 ± 125.33 จูลต่อกิโลกรัมองศาเซลเซียส และร้อยละช่องว่างของอากาศร้อยละ $32-17 \pm 0.29$ ของพริกไทยแห้ง

ธัญญ์ยศ และคณะ (2552) ได้ทำการศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการอบแห้งลำไยแบบคว้านเมล็ดออกแบบสองขั้นตอน ประกอบด้วยแบบจำลองการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง และตามด้วยแบบจำลองการอบแห้งด้วยลมร้อน ซึ่งผลที่ได้จากการจำลอง พบว่า อุณหภูมิไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่เปลี่ยนแปลงมีผลต่อเวลาการอบแห้งในช่วงแรกเท่านั้น ในขณะที่อุณหภูมิลมร้อนที่เปลี่ยนแปลงมีผลต่อเวลาการอบแห้งตลอดช่วงระยะเวลาการอบแห้ง และเมื่อเพิ่มสัดส่วนการนำความร้อนทิ้งกลับมาใช้ใหม่ มีผลให้ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะลดลง และเมื่ออัตราการไหลจำเพาะของอากาศน้อยลง มีผลทำให้เวลาในการอบแห้งเพิ่มขึ้น แต่ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะลดลง โดยอุณหภูมิอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่ 180 องศาเซลเซียส อุณหภูมิอบแห้งด้วยลมร้อนที่ 70 องศาเซลเซียส สัดส่วนการนำอากาศกลับมาใช้ใหม่ 90

เปอร์เซ็นต์ และอัตราการไหลเฉพาะของอากาศ 101 กิโลกรัมอากาศแห้งต่อชั่วโมงกิโลกรัมของแข็ง ($\text{kg}_{\text{dry air}}/\text{h}\cdot\text{kg}_{\text{dry solid}}$) ทำให้ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานต่ำสุด

พัฒนาภรณ์ (2542) ได้ทำการศึกษารอบพริกชี้หนูด้วยเครื่องอบแห้งระบบหมุนเวียนสลับลมร้อน เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการอบแห้งพริก และศึกษาผลกระทบของการลวกพริกก่อนการอบแห้ง พบว่า การสลับลมร้อนทุก ๆ 7 ชั่วโมง เป็นเวลาที่เหมาะสมกว่าทุก ๆ 3 และ 5 ชั่วโมง เนื่องจากอัตราการอบแห้งไม่แตกต่างกันทางสถิติ ($P \geq 0.05$) จึงไม่จำเป็นต้องเสียเวลาและแรงงานในการสลับลมร้อนบ่อยครั้ง และยังพบว่าการลวกพริกก่อนการอบแห้งนั้นไม่มีผลต่ออัตราการอบแห้ง คือ เวลาที่ใช้ในการอบแห้งนั้นไม่แตกต่างกันทางสถิติ เมื่อเปรียบเทียบกับการไม่ลวกพริกก่อนการอบแห้ง แต่การลวกพริกนั้นจะทำให้คุณภาพสีที่ดีกว่า และยังได้ข้อสังเกตอีกว่าการสลับลมร้อนนั้นไม่ควรทำในขณะที่การอบแห้งยังอยู่ในช่วงของอัตราการอบแห้งลดลงช่วงที่ 1

มนัสวี และคณะ (2545) ได้ศึกษารอบแห้งลำไยชนิดแกะเปลือกด้วยเครื่องลดความชื้นแบบสลับทิศทางอากาศร้อน โดยได้สร้างและทดสอบเครื่องอบแห้งแบบสลับทิศทางอากาศร้อน ซึ่งกำหนดให้อากาศร้อนไหลผ่านสลับกันจากด้านข้างทั้งผนังด้านซ้าย และขวา ทำการอบแห้งต่อเนื่อง ไม่มีการสลับชั้นถาดบรรจุ พบว่า ความเร็วลมร้อน 1.35 เมตรต่อวินาที การสลับทิศทางลมร้อนทุก ๆ 6 ชั่วโมง ทำให้มีอัตราการอบแห้งสูงที่สุด ทั้งนี้เนื่องจากการสลับทิศทางลมถี่เกินไปจะทำให้เนื้อลำไยที่ตำแหน่งด้านข้างทั้งสองได้รับความร้อนไม่เต็มที่ ทำให้ให้ความร้อนที่ลำไยได้รับไม่เพียงพอต่อการระเหยน้ำออกจากเนื้อลำไย แต่ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานเฉพาะที่ความเร็วลม 1.35 เมตรต่อวินาที มีค่าสูงกว่าความเร็วลม 0.75 เมตรต่อวินาที เนื่องจากความเร็วลมสูง จะทำให้อัตราการไหลของอากาศสูง

สนอง และคณะ (2554) ได้พัฒนาเครื่องอบแห้งลำไยทั้งเปลือก โดยการเพิ่มชุดสลับทิศทางลม ชุดกระจายลมร้อน ชุดกระบะ และชุดฝาครอบกระบะ แล้วนำมาเปรียบเทียบกับตู้อบแบบกระบะของเกษตรกร ผลจากการศึกษาพบว่า คุณภาพของลำไยหลังจากการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งที่พัฒนาขึ้นดีกว่าตู้อบแบบกระบะของเกษตรกร และยังพบว่าคุณภาพหลังการเก็บรักษาเป็นเวลา 12 เดือน ของการอบลำไยด้วยเครื่องอบแห้งสลับทิศทางลมร้อนนั้นดีกว่า ตู้อบแบบกระบะของเกษตรกร ซึ่งวิธีการเก็บรักษาที่ใช้ในการศึกษา เป็นวิธีเดียวกับการเก็บรักษาของเกษตรกร โดยที่ต้นทุนของการอบแห้งลำไยที่ด้วยเครื่องอบลำไยที่พัฒนาขึ้น คือ 1.77 บาทต่อกิโลกรัมสด ในขณะที่ต้นทุนของการอบแห้งลำไยด้วยเครื่องอบแห้งของเกษตรกร คือ 2.03 บาทต่อกิโลกรัมสด มีจุดคุ้มทุนอยู่ที่การใช้งาน 29 ครั้ง

สุนีย์รัตน์ (2544) ศึกษาการอบแห้งลำไยแบบแกะเปลือกด้วยเครื่องอบแห้งแบบสลับทิศทางลมร้อน โดยกำหนดให้ลมร้อนเข้าทางด้านซ้าย และขวา และพาความชื้นออกจาก

ด้านบน และล่าง (เมื่อมีการสลับทิศทางการหมุน) ของห้องอบแห้ง พบว่า วิธีที่เหมาะสมสำหรับการอบแห้งลำไยแบบแกะเปลือก คือ การใช้ความเร็วลม 0.88 เมตรต่อวินาที ซึ่งเมื่อเทียบกับเครื่องอบแห้งแบบถาดของเกษตรกรพบว่า การลดความชื้นของเครื่องอบแห้งแบบสลับทิศทางการหมุนในช่วงแรกเร็วกว่า แต่ในช่วงหลังของการอบแห้งมีการลดความชื้นที่ใกล้เคียงกัน โดยทั้ง 2 วิธีใช้เวลาในการอบแห้งเท่ากัน ซึ่งเครื่องอบแห้งของเกษตรกรจำเป็นต้องใช้แรงงานในการกลับถาดลำไย 2 คน ในขณะที่เครื่องอบแห้งแบบสลับทิศทางการหมุนไม่จำเป็นต้องใช้แรงงานในการสลับถาดในระหว่างอบ

เหมการ (2545) ศึกษาแบบจำลองการทำแห้งระบบสุญญากาศร่วมกับไมโครเวฟกับพริกไทย พบว่า ความดัน ปริมาณพริกไทย และความเร็วรอบในการหมุน โรตารี ไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ปริมาณความชื้น และอัตราการทำแห้ง อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ โดยแบบจำลอง Page สามารถทำนายสัดส่วนความชื้นได้ใกล้เคียงกับผลการทดลอง และสามารถหาความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนความชื้นกับเวลา

อัจฉรา และคณะ (2556) ศึกษาปัจจัยของการอบแห้งด้วยพลังงานความร้อนแบบการพา และการแผ่รังสีความร้อนที่มีต่ออุณหภูมิและคุณภาพพริกไทยดำ โดยใช้พริกไทยดำสดในการทดลอง จากการศึกษาก่อนอบแห้งแบบลมร้อน พบว่า การอบแห้งพริกไทยดำเกิดขึ้นในช่วงอัตราการอบแห้งลดลง โดยอุณหภูมิมอบแห้งมีผลต่ออัตราการอบแห้ง และระยะเวลาการอบแห้ง กล่าวคือ ที่อุณหภูมิมอบแห้งสูงส่งผลให้อัตราการอบแห้งสูง ระยะเวลาการอบแห้งสั้น นอกจากนี้ยังพบว่าค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะที่อุณหภูมิต่ำกว่าที่อุณหภูมิต่ำในทุกแหล่งพลังงานความร้อน ในกรณีการสร้างแบบจำลองทำนายอุณหภูมิผลสด พบว่าแบบจำลอง Page สามารถอธิบายการอบแห้งพริกไทยดำด้วยลมร้อนได้ดีที่สุด นอกจากนี้ยังพบว่าที่อุณหภูมิมอบแห้งต่ำการหดตัวของพริกไทยมีค่าสูงกว่าการอบแห้งที่อุณหภูมิต่ำ

อารีย์ และคณะ (2550) ศึกษาเปรียบเทียบสมรรถนะเครื่องอบแห้งแบบกระบะแบบเก่า (ลมเข้า และออกทางเดียว) กับเครื่องอบแห้งแบบแบบกระบะแบบใหม่ (สลับลมร้อน) โดยทำการวิเคราะห์การใช้พลังงานในการอบแห้ง ค่าใช้จ่ายในการอบแห้ง และคุณภาพ (การนุบ-แตก) ของลำไย จากการศึกษาพบว่า เครื่องอบแห้งแบบแบบกระบะแบบใหม่มีค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะน้อยกว่าแบบเก่า เนื่องจากเครื่องอบแห้งแบบเดิมจำเป็นต้องมีการเปิดฝาท้องอบในขณะที่อบแห้งเพื่อพลิกกลับลำไย ทั้งนี้เพื่อเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพการอบแห้ง โดยมีค่าความสิ้นเปลืองพลังงานความร้อนจำเพาะ 6.7 และ 6.3 เมกจูลต่อกิโลกรัม น้ำ ($\text{MJ}/\text{kg}_{\text{water}}$) ตามลำดับ อีกทั้งยังพบว่าเครื่องอบแห้งแบบกระบะที่ ใหม่มีความสะดวกในการใช้งาน ทำให้ไม่เสียเวลา และ

ค่าใช้จ่ายในการพลิกกลับลำไยขณะอบแห้ง และยังสามารถลดการบวม-แตกของลำไยแห้งลง 50 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเทียบกับเครื่องแบบเดิม

อิทธิพล และคณะ (2550) ได้ศึกษาคูณลักษณะการอบแห้งเมล็ดพริกไทยด้วยเทคนิคลมหมุนควงที่ภายในหอบมีการติดครีบบ เปรียบเทียบกับเทคนิคฟลูอิดไดซ์เบดธรรมดา โดยทำการศึกษา อิทธิพลของความเร็วลม อิทธิพลของอุณหภูมิ อัตราการอบแห้ง พบว่า ความเร็วลมไม่มีผลต่อการอบแห้งแบบฟลูอิดไดซ์เบดธรรมดา แต่จะมีผลต่อการอบแห้งด้วยเทคนิคลมหมุนควงที่ภายในหอบมีการติดครีบบ เนื่องจาก การติดครีบบภายในหอบแห้งทำให้อากาศภายในหอบเกิดการไหลอย่างปั่นป่วน ซึ่งจะช่วยให้เมล็ดพริกไทย และอากาศมีโอกาสการสัมผัสกันมากขึ้น ส่งผลให้เวลาในการอบแห้งสั้นลง

Hia et al. (2009) ได้ศึกษาจลศาสตร์การอบแห้งของโกโก้ และคุณภาพของโกโก้ หลังการอบแห้ง ทำการเปรียบเทียบระหว่างการอบแห้งแบบใช้พลังงานแสงอาทิตย์ และการอบแห้งด้วยลมร้อน โดยใช้แบบจำลองการแพร่ Fick's จากการศึกษาพบว่า ระยะเวลาในการอบแห้งของการอบแห้งแบบใช้พลังงานแสงอาทิตย์นานกว่าแบบลมร้อน

Janjai et al. (2011) ได้ศึกษาการอบแห้งลำไยด้วยเครื่องอบแห้งแบบสลับทิศทางลมร้อนโดยใช้ชีวมวลเป็นแหล่งความร้อน พบว่า ความชื้นสัมพัทธ์อากาศจะลดลงเมื่ออุณหภูมิ และเวลาการอบแห้งเพิ่มขึ้น ปริมาณลำไยมากเวลาการอบแห้งมาก เนื่องจากปริมาณลำไยมากต้องมีการระเหยปริมาณน้ำออกจากวัสดุมากขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่าต้นทุนในการอบแห้งลำไยในปริมาณมากต่ำกว่าต้นทุนในการอบแห้งลำไยในปริมาณน้อย

Maskan et al. (2002) ได้ศึกษาการเปรียบเทียบวิธีการอบแห้งงุ่น 2 วิธี คือ การอบแห้งด้วยลมร้อน และแสงอาทิตย์ พบว่า อิทธิพลของเวลาในการอบแห้ง อุณหภูมิ และชั้นของความหนาในระหว่างการอบแห้งงุ่นมีความสัมพันธ์อย่างนัยสำคัญ ($P < 0.05$) ส่วนความเร็วลมไม่มีความสัมพันธ์อย่างนัยสำคัญ ($P < 0.05$) เวลาในการอบแห้งด้วยลมร้อนนั้นใช้เวลาในการอบแห้งประมาณ 50–140 นาที ส่วนการอบแห้งด้วยแสงอาทิตย์นั้น จะใช้เวลาในการอบแห้งประมาณ 180–1500 นาที ค่าประสิทธิภาพการแพร่ความร้อน (ใช้แบบจำลองการแพร่ของ Fick) สำหรับการอบแห้งด้วยลมร้อนมีค่าระหว่าง $3.00 - 37.6 \times 10^{-11}$ ตารางเมตรต่อวินาที ส่วนการอบแห้งด้วยแสงอาทิตย์มีค่าระหว่าง $1.93 - 9.16 \times 10^{-11}$ ตารางเมตรต่อวินาที

กรอบแนวคิด

ในงานวิจัยนี้ได้ใช้เทคนิคการอบแห้งแบบสลับทิศทางลมร้อนเพื่ออบแห้งพริกไทยดำ เนื่องจากการอบแห้งพริกไทยในปัจจุบันต้องใช้คนคอยพลิกกลับพริกไทยส่งผลให้ต้นทุนในการผลิตสูง สำหรับการศึกษาในงานวิจัยนี้ เปรียบเทียบการอบแห้งแบบปกติ และการอบแห้งแบบสลับทิศทางลมร้อน ที่ระดับชั้นความหนา 20, 30 และ 40 เซนติเมตร จากนั้นทำการวิเคราะห์ลักษณะการอบแห้งพริกไทย วิเคราะห์คุณภาพพริกไทยหลังการอบแห้ง และวิเคราะห์ผลทางเศรษฐศาสตร์โดยเปรียบเทียบต้นทุนการผลิตระหว่างการอบแห้งแบบปกติ และการอบแห้งแบบสลับทิศทางลมร้อน

บทที่ 3

อุปกรณ์และวิธีการ

ในการวิจัยนี้ ได้มีการดำเนินการศึกษาการอบแห้งพริกไทยดำด้วยการสลับทิศทางลมร้อนเปรียบเทียบกับการอบแห้งแบบปกติโดยใช้วัสดุ และอุปกรณ์ มีวิธีการดำเนินงานดังต่อไปนี้

วัสดุ และอุปกรณ์

1. พริกไทยดำที่ผ่านการเตรียมโดย บริษัท นิธิฟู๊ดส์ จำกัด
2. เตอบแห้งสลับทิศทางลมร้อน ขนาด 1 ตัน
(บริษัท เลิศลานนาไทย จำกัด) 1 เครื่อง
3. ชุดควบคุมปริมาณแก๊ส LPG 1 เครื่อง
4. เครื่องชั่งดิจิตอล รุ่น CP3202S (Sartorius AG, Germany) 1 เครื่อง
5. เครื่อง Spectrophotometer รุ่น Mini Scan XE plus
(Hunter Lab, USA) 1 เครื่อง
6. เครื่องวัดวอเตอร์แอกติวิตี รุ่น Aqua lab 3TE
(Decagon Devices, USA) 1 เครื่อง
7. เครื่องวัดความชื้นสัมพัทธ์ รุ่น AP-104 (Sila, Thailand) 1 เครื่อง
8. ชุดอุปกรณ์เก็บข้อมูลอุณหภูมิ รุ่น 34970A
(Agilent Technology, USA) 1 เครื่อง
9. สายเทอร์โมคัปเปิล Type K 1 ม้วน
10. เครื่องคอมพิวเตอร์ตั้งโต๊ะ 1 เครื่อง
11. เครื่องปั่น รุ่น HB-34 (Ladyhouse, China) 1 เครื่อง
12. ตู้อบลมร้อน รุ่น G407.1225 (Mettler, Germany) 1 เครื่อง
13. เครื่องปิดปากถุง 1 เครื่อง
14. ถังฟรอยด์อูมิเนียม

วิธีดำเนินการ

การปรับปรุงเตาอบแห้งแบบสลับทิศทางลมร้อน

1. ปรับปรุงเตาอบแห้งสลับทิศทางลมร้อน ขนาด 1 ตัน ของบริษัทเลิศลานนาไทย จำกัด ให้เหมาะสมกับการอบแห้งพริกไทยดำ เนื่องจากเตาอบแห้งที่ใช้ในการทำวิจัยในครั้งนี้ เป็นเตาอบแห้งสำหรับอบแห้งลำไยแบบสลับทิศทางลมร้อน ผนังภายในห้องอบ และตะแกรงที่ใช้สำหรับรองรับวัสดุ ทำจากวัสดุที่เสี่ยงต่อการปนเปื้อน ดังนั้น เพื่อลดการปนเปื้อน และให้เหมาะสมกับการอบแห้งพริกไทยดำจึงทำการบุผนังเตาอบแห้งด้านในด้วยสแตนเลส และเปลี่ยนตะแกรงที่ใช้สำหรับรองรับวัสดุเป็นตะแกรงสแตนเลส ดังแสดงในภาพ 13



(ก)

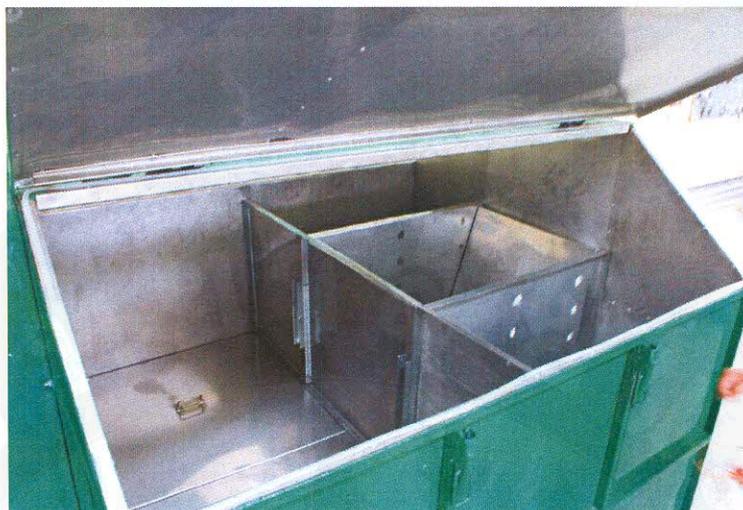
(ข)

ภาพ 13 เตาอบแห้งแบบสลับทิศทางลมร้อน ก่อนและหลังการปรับปรุง

(ก) ลักษณะของผนังห้องอบด้านใน และตะแกรงที่ใช้รองรับวัสดุ (ก่อนปรับปรุง)

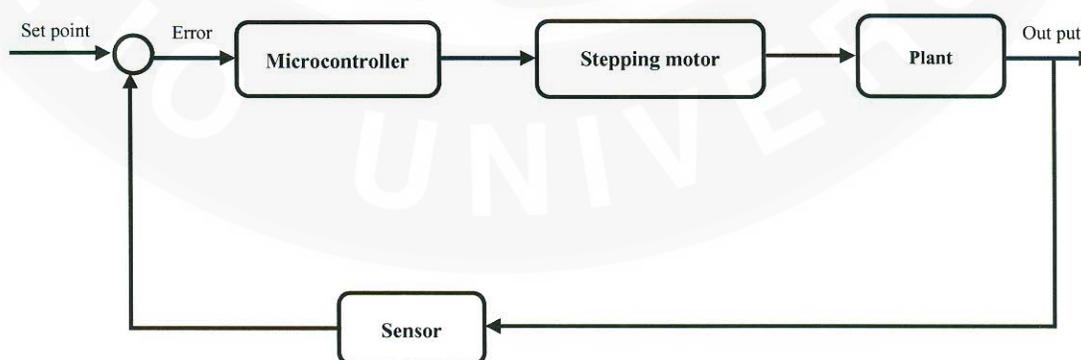
(ข) ลักษณะของผนังห้องอบด้านใน (หลังการปรับปรุง)

2. กั้นภายในห้องอบแห้ง เนื่องจากปริมาณพริกไทยที่ใช้ในการทำวิจัยในครั้งนี้มีต้นทุนสูง จึงจำเป็นต้องมีการจำกัดปริมาณลง เพื่อให้การทดลองบรรลุวัตถุประสงค์ที่ตั้งไว้ โดยการกั้นภายในห้องอบแห้ง เพื่อลดปริมาณการใช้วัสดุดิบที่ใช้ในการวิจัยลง ลักษณะของการกั้นภายในห้องอบแห้ง แสดงในภาพ 14

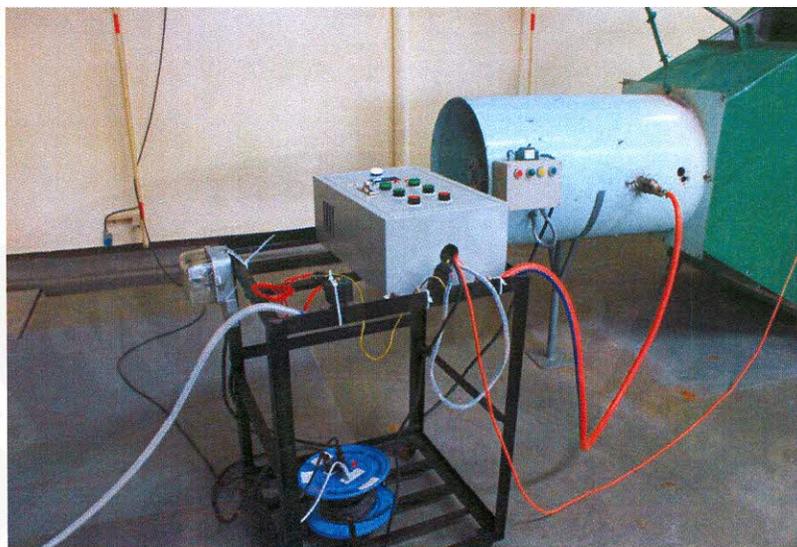


ภาพ 14 ลักษณะภายในห้องอบแห้งที่กั้นห้องอบ

3. ติดตั้งชุดควบคุมปริมาณแก๊สเพื่อควบคุมอุณหภูมิของลมร้อน เนื่องจากเครื่องอบแห้งแบบสลับทิศทางลมร้อนที่ใช้ไม่มีระบบควบคุมอุณหภูมิ จึงต้องติดตั้งชุดควบคุมปริมาณแก๊สเพื่อควบคุมอุณหภูมิของลมร้อน โดยหลักการทำงานของชุดควบคุมปริมาณแก๊ส (ภาพ 15) เริ่มจากการปรับตั้งค่าอุณหภูมิที่ต้องการควบคุม และเมื่อมีการควบคุมเกิดขึ้น เซนเซอร์ (sensor) จะวัดอุณหภูมิตามตำแหน่งที่ต้องการควบคุมอุณหภูมิ จากนั้นเซนเซอร์จะทำการส่งสัญญาณไปที่ตัวควบคุมเพื่อเปรียบเทียบค่าที่ได้จากการวัดกับค่าที่ตั้งไว้ (set point) หากค่า (error) ที่ได้น้อยกว่าค่าที่ตั้งไว้ ตัวควบคุม (microcontroller) จะส่งสัญญาณให้รีโมเตอร์ (stepping motor) เพื่อให้ปริมาณแก๊สเข้าหัวเผามากขึ้น แต่หากค่าที่ได้มากกว่าค่าที่ตั้งไว้ ตัวควบคุมจะส่งสัญญาณให้รีโมเตอร์เพื่อให้ปริมาณแก๊สเข้าหัวเผาน้อยลง โดยลักษณะการติดตั้งอุปกรณ์ควบคุมปริมาณแก๊สแสดงในภาพ 16



ภาพ 15 ระบบการควบคุมของชุดควบคุมปริมาณแก๊ส



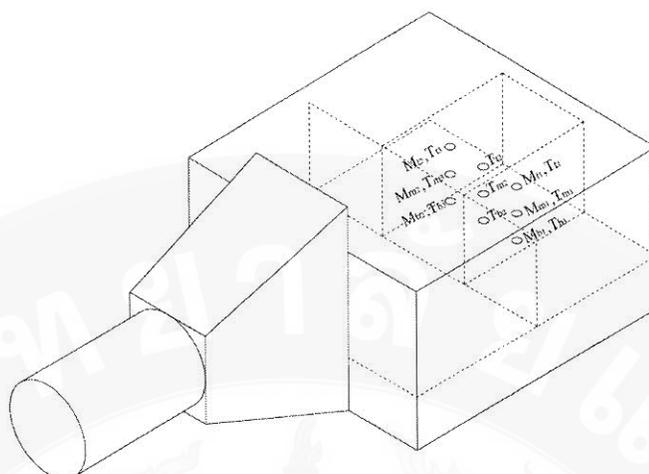
ภาพ 16 ลักษณะการติดตั้งเครื่องควบคุมปริมาณแก๊ส

การวางแผนการทดลอง

การทดลองเพื่อศึกษาการอบแห้งพริกไทยดำแบบสลับลมร้อน ใช้เตาอบแห้งแบบสลับทิศทางลมร้อน ขนาด 1 ตัน ที่ผ่านการปรับปรุงแล้วเป็นอุปกรณ์สำหรับอบแห้ง และติดตั้งอุปกรณ์เก็บข้อมูลอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ กำหนดตัวแปรต้น คือ วิธีการอบแห้ง 2 วิธี ได้แก่ การอบแห้งแบบสลับทิศทางลมร้อน (กำหนดให้ลมร้อนไหลจากล่างขึ้นบน และจากบนลงล่าง โดยการสลับทิศทางลมร้อนทุก ๆ 1 ชั่วโมง ตลอดการอบแห้ง) และการอบแห้งแบบปกติ (กำหนดให้ลมร้อนไหลจากล่างขึ้นบน โดยใช้คนในการพลิกกลับพริกไทย ทุก ๆ 30 นาที ตลอดการอบแห้ง) และชั้นความหนาของพริกไทย 3 ระดับ คือ 20 30 และ 40 เซนติเมตร ตัวแปรตาม คือ ค่าสี ความชื้นสุดท้าย ค่าวอเตอร์แอกติวิตี และพลังงานที่ใช้ และตัวแปร ควบคุม คือ อุณหภูมิลมร้อนที่ใช้ในการอบแห้ง 100 องศาเซลเซียส

การเก็บข้อมูล

การเก็บข้อมูล และค่าที่ต้องการวัด ได้แก่ อุณหภูมิ ความชื้น สี วอเตอร์แอกติวิตี และความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ โดยเริ่มจากการสูมตัวอย่างพริกไทยดำจากตำแหน่งที่กำหนดไว้ 9 ตำแหน่ง (ภาพ 17) โดยเก็บตัวอย่างพริกไทยดำที่ได้ในแต่ละตำแหน่งของแต่ละการทดลองลงในถุงออลูมิเนียมฟอยล์ ปิดผนึกออลูมิเนียมฟอยล์ด้วยเครื่องปิดปากถุง เพื่อลดการถ่ายเทความชื้นระหว่างสภาวะแวดล้อมภายนอกกับตัวอย่างทดลอง สามารถสรุปได้ตามตาราง 5



ภาพ 17 ตำแหน่งการเก็บตัวอย่างพริกไทยดำ และอุณหภูมิภายในชั้นพริกไทยดำ

หมายเหตุ M_t , T_t คือ ความชื้น อุณหภูมิ ตำแหน่งชั้นบนของเบด

M_m , T_m คือ ความชื้น อุณหภูมิ ตำแหน่งชั้นกลางของเบด

M_b , T_b คือ ความชื้น อุณหภูมิ ตำแหน่งชั้นล่างของเบด

ตาราง 5 วิธีการเก็บข้อมูล และอุปกรณ์ที่ใช้ในการวัด

ข้อมูลการทดลอง	วิธีการเก็บข้อมูล	อุปกรณ์ที่ใช้ในการวัด
อุณหภูมิ	วัดอุณหภูมิตามตำแหน่งต่าง ๆ ทุก ๆ 15 นาที	ชุดอุปกรณ์เก็บข้อมูลอุณหภูมิ ยี่ห้อ Agilent Technology รุ่น 34970A
ความชื้น	เก็บตัวอย่าง ก่อน และหลัง และทุก ๆ 30 นาที	ตู้อบลมร้อน ยี่ห้อ Memmert รุ่น G407.1225
สี	เก็บตัวอย่างพริกไทยดำหลังการอบแห้ง	เครื่องวัดสี ยี่ห้อ Hunter Lab รุ่น Mini Scan XE plus
วอเตอร์แอกติวิตี	เก็บตัวอย่างพริกไทยดำหลังการอบแห้ง	เครื่องวัดวอเตอร์แอกติวิตี ยี่ห้อ Decagon Devices รุ่น Aqua lab 3TE
ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ	บันทึกปริมาณไฟฟ้าก่อน และหลังการอบแห้ง	มิเตอร์วัดปริมาณไฟฟ้า (kW-hr)
	บันทึกน้ำหนักแก๊สก่อน และหลังการอบแห้ง	เครื่องชั่งดิจิตอลความละเอียด 2 ตำแหน่ง
	บันทึกน้ำหนักพริกไทยดำก่อน-หลังการอบแห้ง	ตำแหน่ง

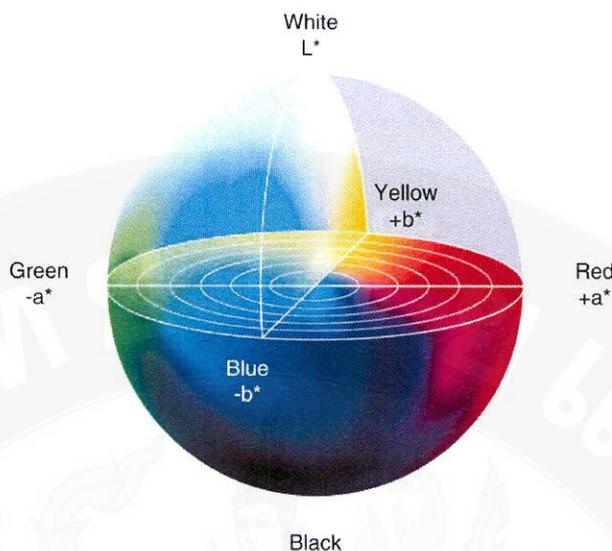
จากตาราง 5 สามารถนำข้อมูลที่ได้จากการทดลองมาวัดค่าได้ ดังนี้

1. ปริมาณความชื้น พริกไทยดำที่ได้จากการอบแห้งตามหน่วยการทดลองจะถูกปั่นด้วยเครื่องปั่น เป็นเวลานาน 1 นาที ใช้ตัวอย่างพริกไทยดำ 5 กรัม อบแห้งเพื่อวัดความชื้นเป็นเวลา 72 ชั่วโมง อุณหภูมิความร้อน 105 องศาเซลเซียส (AOAC, 1995) จากนั้นนำปริมาณน้ำที่หายไปมาคำนวณเพื่อหาความชื้น จากสมการ 2 และ 3 (หน้า 17)

2. ค่าสี พริกไทยดำที่ได้จากการอบแห้งตามหน่วยการทดลองจะถูกปั่นด้วยเครื่องปั่น เป็นเวลานาน 1 นาที หรือจนกว่าพริกไทยดำจะละเอียดเป็นผง จากนั้นทำการวัดค่าสีด้วยเครื่องวัดสี (Spectrophotometer) ยี่ห้อ Hunter Lab รุ่น Mini Scan XE Plus (ภาพ 18) ซึ่งใช้สเกล CIE ในการบรรยายสี โดยสเกล CIE เป็นระบบการบรรยายสีแบบ 3 มิติ โดยที่แกน L^* จะบรรยายถึงความสว่าง จากค่า $(+L^*)$ แสดงถึงสีขาวจนไปถึง $(-L^*)$ แสดงถึงสีดำ แกน a^* จะบรรยายถึงแกนสีเขียว $(-a^*)$ ไปจนถึงสีแดง $(+a^*)$ และแกน b^* จะบรรยายสีน้ำเงิน $(-b)$ ไปจนถึงสีเหลือง $(+b)$ ดังแสดงดังภาพ 19 โดยทำการวัด 3 ชั่วโมง โดยค่าความแตกต่างของสี สามารถคำนวณได้จากสมการ 6



ภาพ 18 เครื่องวัดสีแบบ Spectrophotometer ยี่ห้อ Hunter Lab รุ่น Mini Scan XE Plus



ภาพ 19 การบรรยายสีตามระบบ CIE

ที่มา: HunterLab (2008)

โดยค่าความแตกต่างของสีรวม สามารถหาได้จากสมการ 6

สมการ 6

$$\Delta E = \sqrt{(L^*_1 - L^*_0)^2 + (a^*_1 - a^*_0)^2 + (b^*_1 - b^*_0)^2}$$

เมื่อ ΔE คือ ค่าความแตกต่างของสีรวม

L^*_1 คือ ค่าความสว่างหลังอบแห้ง

L^*_0 คือ ค่าความสว่างก่อนอบแห้ง

a^*_1 คือ ค่าความเป็นสีเขียวกับสีแดงหลังอบแห้ง

a^*_0 คือ ค่าความเป็นสีเขียวกับสีแดงก่อนอบแห้ง

b^*_1 คือ ค่าความเป็นสีเหลืองกับสีน้ำเงินหลังอบแห้ง

b^*_0 คือ ค่าความเป็นสีเหลืองกับสีน้ำเงินก่อนอบแห้ง

3. ค่าวอเตอร์แอกติวิตี นำพริกไทยดำที่ได้จากการอบแห้งตามหน่วยการทดลอง จะถูกปั่นด้วยเครื่องปั่นประมาณ 1 นาที หรือจนกว่าพริกไทยจะละเอียดเป็นผง จากนั้นนำไปวัดค่าวอเตอร์แอกติวิตี โดยใช้เครื่องวัดค่าวอเตอร์แอกติวิตี รุ่น Aqua Lab 3TE ทำการวัด 3 ซ้ำ

4. ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (specific Energy Consumption, SEC) เป็นปริมาณของพลังงานที่ใช้ต่อหนึ่งหน่วยของมวลน้ำที่ระเหยออกจากวัสดุ โดยไม่คิดความสูญเสียที่เกิดขึ้น สมการที่ใช้คำนวณแสดงดังสมการ 7

สมการ 7

$$SEC = \frac{2.6(\sum E_{blower}) + \sum Q_h}{W_{in} - W_f}$$

เมื่อ SEC คือ ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (เมกะจูลต่อกิโลกรัมของน้ำ, MJ/kg_{water})

$\sum E_{blower}$ คือ พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการขับพัดลม (เมกะจูล, MJ)

$\sum Q_h$ คือ พลังงานความร้อนที่ใช้ในการอบแห้ง (เมกะจูล, MJ)

W_{in} คือ น้ำหนักพริกไทยคั่วก่อนอบ (กิโลกรัม, kg)

W_f คือ น้ำหนักพริกไทยคั่วหลังอบ (กิโลกรัม, kg)

การวิเคราะห์ผล

1. วิเคราะห์ลักษณะการอบแห้งพริกไทย โดยวิเคราะห์กราฟการอบแห้ง (drying curve) และกราฟอัตราการอบแห้ง (drying rate curve) คำนวณค่าคงที่ของการอบแห้งด้วยสมการ Newton Model, Page, Modified Page และ Henderson Model (ตาราง 6) ซึ่งทุกกรณีการทดสอบจะมีการวิเคราะห์ประเมินความถูกต้องแม่นยำในการทดลองโดยการวิเคราะห์ความแม่นยำทางสถิติ ได้แก่ R^2 , RMSE และ %Error

ตาราง 6 แบบจำลองการอบแห้งเอมไพริคัล

Model name	Model expression	Reference
Page Model	$MR = \exp(-kt^n)$	Doymaz (2012a)
Modified Page Model	$MR = \exp(-kt)^n$	Yaldiz et al (2001)
Newton Model	$MR = \exp(-kt)$	Akpınar and Bicer (2008)
Henderson and Pabis Model	$MR = a \exp(-kt)$	Kumar et al (2012)

- เมื่อ MR คือ อัตราส่วนความชื้น (ไม่มีหน่วย)
- a คือ ค่าคงที่ขึ้นอยู่กับวัสดุ
 - t คือ เวลาในการอบแห้ง (ชั่วโมง, h)
 - k คือ สัมประสิทธิ์การอบแห้ง (ชั่วโมง, h^{-1})

2. วิเคราะห์คุณภาพพริกไทยหลังการอบแห้ง ได้แก่ ค่าสี ค่าวอเตอร์แอคทีวิตี และความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ โดยเปรียบเทียบพริกไทยดำที่ได้จากการอบแห้งแบบปกติ และการอบแห้งแบบสลับทิศทางลมร้อน

3. วิเคราะห์ข้อมูลทางเศรษฐศาสตร์ เปรียบเทียบต้นทุนการผลิต ได้แก่ ต้นทุนด้านพลังงาน (แก๊ส และ ไฟฟ้า) และต้นทุนด้านแรงงาน ของการอบแห้งพริกไทยแบบปกติ และการอบแห้งแบบสลับทิศทางลมร้อน ในการอบแห้งพริกไทยดำไม่เกิน 100 กิโลกรัม จากนั้นทำการวิเคราะห์ต้นทุนการผลิตเปรียบเทียบระหว่าง การอบแห้งแบบปกติ และการอบแห้งแบบสลับทิศทางลมร้อน ในการอบแห้งพริกไทยดำไม่เกิน 600 กิโลกรัม จากนั้นวิเคราะห์จุดคุ้มทุน และระยะเวลาการคืนทุน (เมื่อมีการลงทุน) จากสมการ 4 แสดงในบทที่ 2

4. การวิเคราะห์ทางสถิติ ใช้วิธีการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียว (one-way ANOVA) ของแต่ละปัจจัย ได้แก่ ระดับชั้นความหนา และวิธีการอบแห้ง เพื่อศึกษาหาผลที่มีต่อคุณภาพของพริกไทยดำ ได้แก่ ค่าสี และต้นทุนการผลิต ได้แก่ ต้นทุนแรงงาน ต้นทุนแก๊ส LPG และต้นทุนไฟฟ้า แล้วหาความแตกต่างของค่าเฉลี่ยโดยวิธี Duncan ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

แนวทางในการออกแบบเตาอบแห้งในระดับอุตสาหกรรม

ในงานวิจัยนี้ ได้นำเสนอการออกแบบอุปกรณ์ และนำเสนอแนวทางการตัดแปลงเตาอบแห้งในระดับอุตสาหกรรม โดยการเพิ่มระบบสลับลมร้อน ซึ่งอ้างอิงจากผลการทดลองที่ได้พารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องในการตัดแปลงเครื่อง ได้แก่ กราฟอัตราการอบแห้ง (drying rate curve) กราฟการอบแห้ง (drying curve) ความเร็วลมที่ผ่านผิววัสดุ กำลังการผลิตของเครื่อง ปริมาณน้ำที่ต้องการระเหย ปริมาณความร้อนที่ใช้ในการระเหยน้ำ เนื่องจากข้อมูลบางส่วนของผู้ประกอบการไม่สามารถเปิดเผยได้ ดังนั้นการรายงานในส่วนนี้จึงไม่สามารถนำเสนอในรูปแบบของภาพเขียนแบบหรือภาพถ่ายได้

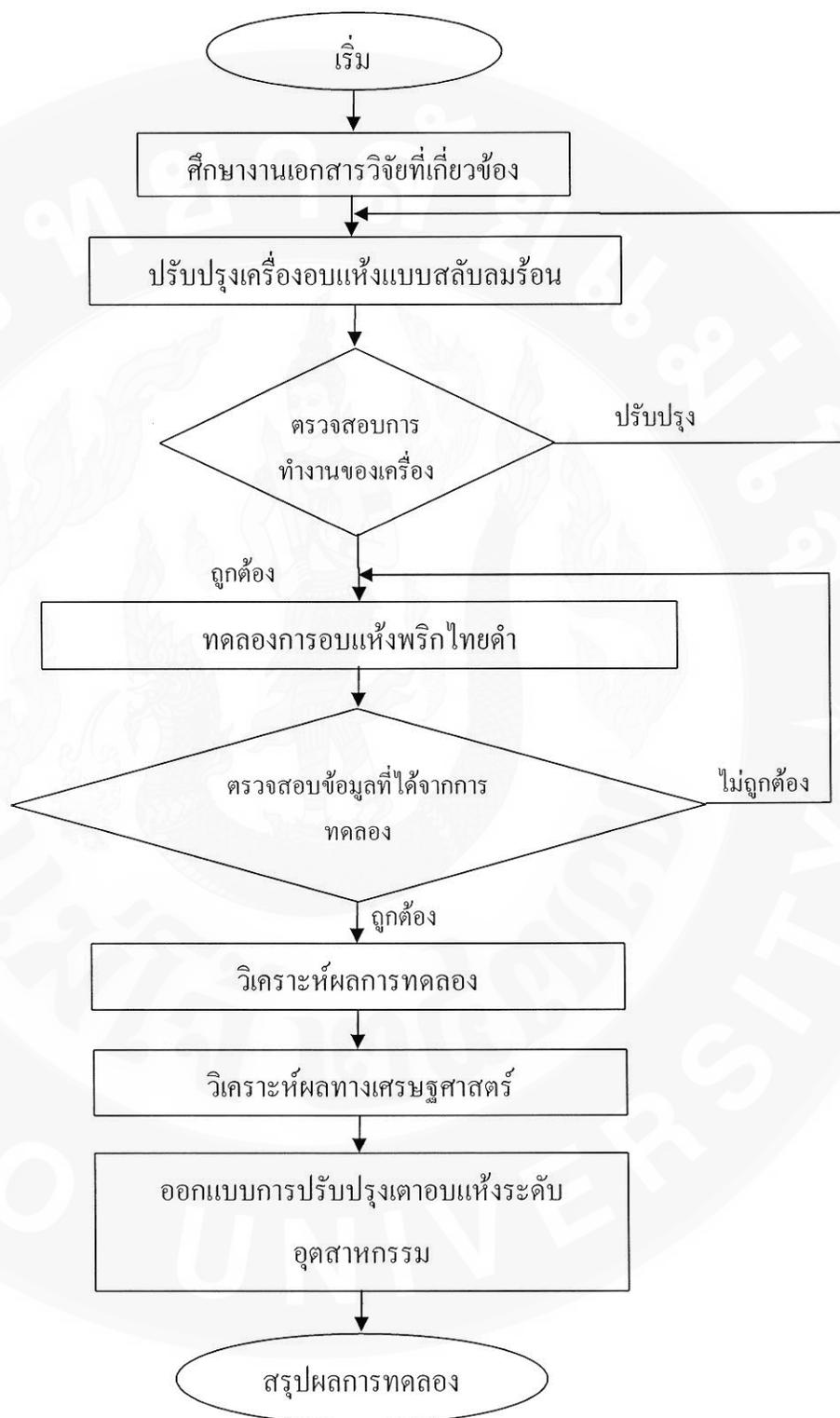
ดัชนีชี้วัดความสำเร็จ

ดัชนีชี้วัดความสำเร็จของงาน ได้แก่ ผลของการอบแห้งพริกไทยด้วยเตาอบแห้งแบบสลับทิศทางลมร้อนสามารถลดระยะเวลาในการอบแห้งลง คุณภาพหลังการอบแห้งของพริกไทยใกล้เคียงกับตัวควบคุม และผลการวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์เมื่อมีการตัดแปลงเครื่องสามารถลดต้นทุนในการผลิตลงได้ คือ ต้นทุนด้านแรงงาน และต้นทุนด้านพลังงาน

สถานที่ดำเนินการวิจัย

ดำเนินการทดลองอบแห้งพริกไทย ณ บริษัทนิธิฟู๊ดส์ จำกัด อำเภอสันป่าตอง จังหวัดเชียงใหม่ และทำการตรวจวัดคุณภาพหลังการอบแห้ง และวิเคราะห์ข้อมูล ณ อาคารเรียนรวม คณะวิศวกรรม และอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยแม่โจ้ เชียงใหม่

แผนภูมิดำเนินการทดลอง



ภาพ 20 แผนภูมิดำเนินการทดลอง

บทที่ 4

ผลการวิจัยและวิจารณ์

จากการศึกษาการอบแห้งพริกไทยดำ โดยเปรียบเทียบวิธีการอบแห้ง 2 แบบ คือ การอบแห้งแบบปกติ ใช้คนในการพลิกกลับพริกไทยทุก ๆ 30 นาที และการอบแห้งแบบสลับทิศทางลมร้อน สลับทิศทางลมร้อนทุก ๆ 1 ชั่วโมง ที่ชั้นความหนาพริกไทยดำ 3 ระดับ คือ 20 30 และ 40 เซนติเมตร เพื่อศึกษาเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงความชื้น อัตราการอบแห้ง การกระจายความชื้น และการกระจายอุณหภูมิ การวิเคราะห์ค่าคงที่การอบแห้ง วิเคราะห์คุณสมบัติหลังการอบแห้งของพริกไทยดำ ค่าความสัมพันธ์ของพลังงานจำเพาะ และแนวทางในการปรับปรุงเครื่องอบแห้งในระดับอุตสาหกรรม มีรายละเอียด ดังนี้

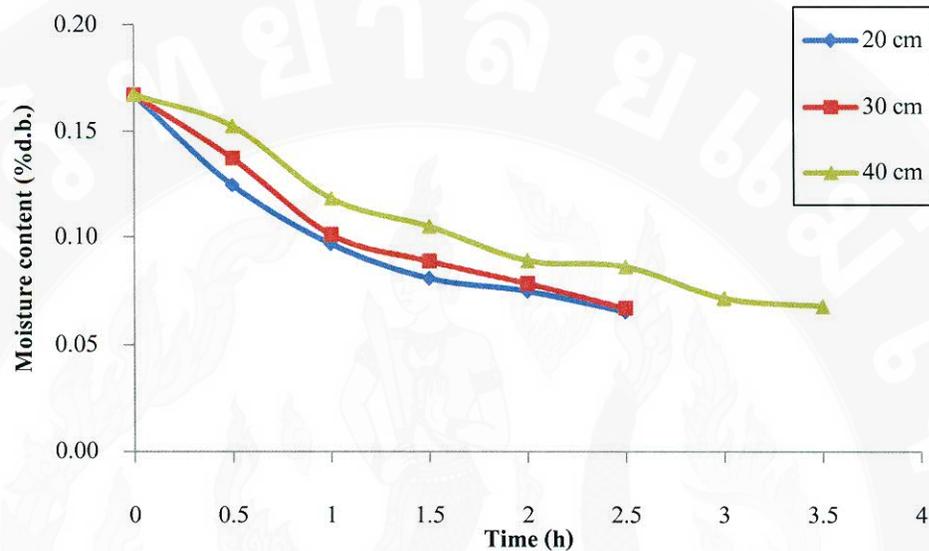
ผลของชั้นความหนาพริกไทยดำต่อการอบแห้ง

ผลของชั้นความหนาพริกไทยดำ เป็นการเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงความชื้น และอัตราการอบแห้ง ของวิธีการอบแห้งพริกไทย 2 วิธี คือ การอบแห้งแบบปกติ ใช้คนในการพลิกกลับพริกไทยทุก ๆ 30 นาที และการอบแห้งแบบสลับทิศทางลมร้อน ให้มีการสลับลมทิศทางร้อนทุก ๆ 1 ชั่วโมง โดยไม่ต้องมีการพลิกกลับพริกไทย ที่ชั้นความหนาของพริกไทย 3 ระดับ คือ 20 30 และ 40 เซนติเมตร อบแห้งพริกไทยดำที่มีความชื้นเริ่มต้นเฉลี่ย 16-17 เปอร์เซ็นต์มาตรฐานแห้ง จนมีความชื้นสุดท้าย 7 เปอร์เซ็นต์มาตรฐานแห้ง

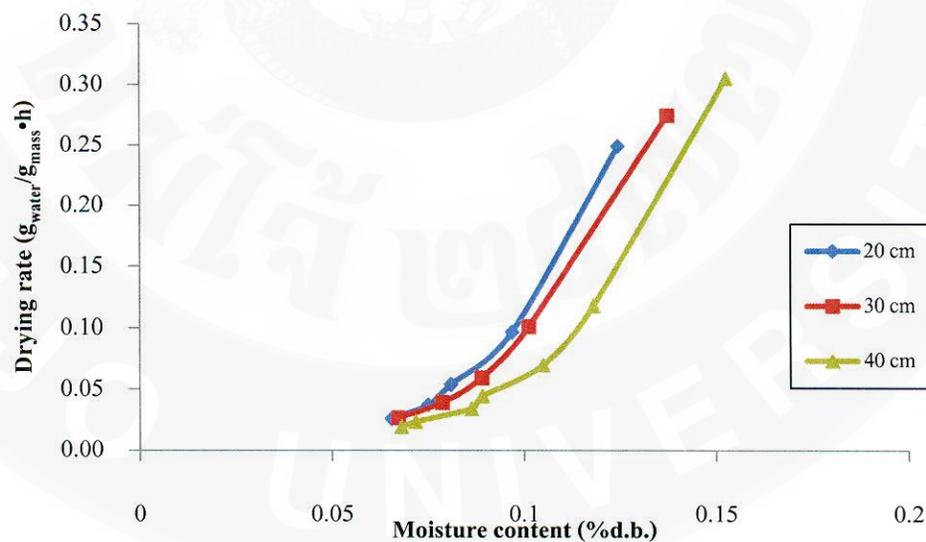
ผลของชั้นความหนาในการอบแห้งด้วยวิธีปกติ

การศึกษการเปลี่ยนแปลงความชื้นเฉลี่ยที่ชั้นความหนาพริกไทยดำระดับต่าง ๆ สำหรับการอบแห้งแบบธรรมดา แสดงดังภาพ 21 พบว่า ที่ชั้นความหนาน้อยทำให้การลดความชื้นของตำแหน่งต่าง ๆ เร็วกว่าชั้นความหนามาก กล่าวคือ การลดลงของความชื้นที่ชั้นความหนา 20 และ 30 เซนติเมตร เร็วกว่าที่ชั้นความหนา 40 เซนติเมตร เวลาในการอบแห้งที่ชั้นความหนา 20 30 และ 40 เซนติเมตร คือ 2.5 2.5 และ 3.5 ชั่วโมง ตามลำดับ ซึ่งการลดความชื้นที่ชั้นความหนา 20 และ 30 เซนติเมตร ในช่วงแรกของการอบแห้งแตกต่างกันเล็กน้อย โดยที่ชั้นความหนา 20 เซนติเมตร มีการเปลี่ยนแปลงความชื้นเร็วกว่า 30 เซนติเมตร แต่เมื่อทำการพลิกกลับพริกไทยที่เวลา 1 ชั่วโมง จะเห็นว่า ความชื้นของทั้ง 2 ชั้นความหนาไม่แตกต่างกัน เนื่องจากการพลิกกลับพริกไทย

ที่ชั้นความหนา 30 เซนติเมตร ยังสามารถทำได้ง่ายเหมือนที่ชั้นความหนา 20 เซนติเมตร จึงทำให้เวลาในการอบแห้งเท่ากัน และเมื่อเปรียบเทียบกับชั้นความหนา 40 เซนติเมตร การพลิกกลับพริกไทยนั้นทำได้ยากกว่าจึงส่งผลให้เวลาในการอบแห้งนานกว่าที่ชั้นความหนาอื่น ๆ



ภาพ 21 กราฟการอบแห้งที่ชั้นความหนาพริกไทย 3 ระดับ สำหรับวิธีการอบแห้งแบบปกติ



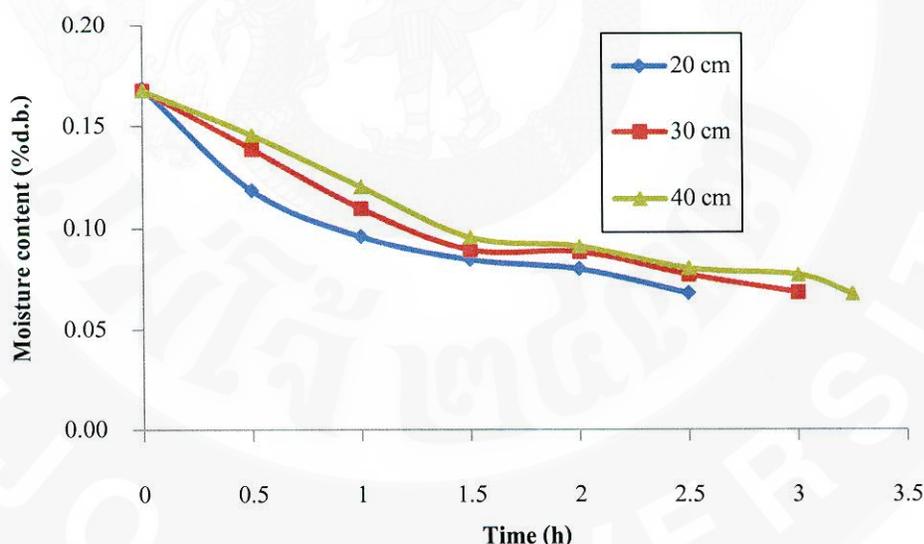
ภาพ 22 อัตราการอบแห้งที่ชั้นความหนาพริกไทย 3 ระดับ สำหรับวิธีการอบแห้งแบบปกติ

เมื่อพิจารณาอัตราการอบแห้ง (ภาพ 22) พบว่า อัตราการอบแห้งเฉลี่ยที่ชั้นความหนา 20 30 และ 40 เซนติเมตร คือ 0.093 0.100 และ 0.088 กรัม น้ำระเหยต่อหน่วยมวลแห้งชั่วโมง

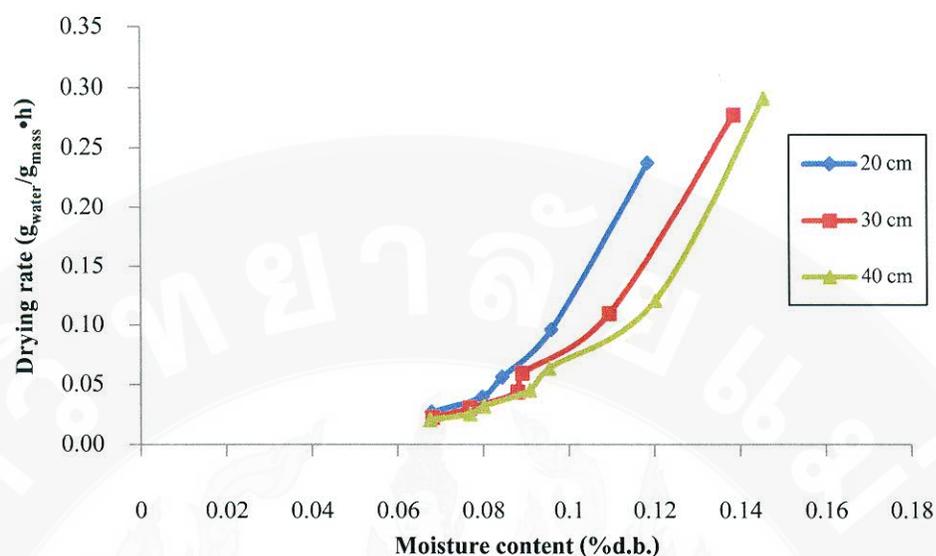
ตามลำดับ จะเห็นว่าที่ชั้นความหนา 30 เซนติเมตร อัตราการอบแห้งเร็วกว่าที่ชั้นความหนาอื่น ๆ เนื่องจากการพลิกกลับพริกไทยนั้นยังทำได้ง่ายอยู่ และที่ชั้นความหนา 20 เซนติเมตร อัตราการอบแห้งสูงกว่าที่ชั้นความหนา 40 เซนติเมตร เนื่องจากการพลิกกลับพริกไทยที่ชั้นความหนา 20 เซนติเมตร นั้นทำได้ง่ายกว่า

ผลของชั้นความหนาในการอบแห้งด้วยวิธีสลับทิศทางลมร้อน

การศึกษาผลของชั้นความหนาพริกไทยสำหรับการอบแห้งแบบสลับทิศทางลมร้อน แสดงในภาพ 23 พบว่าที่ชั้นความหนาน้อยการลดความชื้นที่ตำแหน่งต่าง ๆ เร็วกว่าชั้นความหนามาก กล่าวคือ การลดลงของความชื้นที่ชั้นความหนา 20 เซนติเมตร เร็วกว่าชั้นความหนา 30 และ 40 เซนติเมตร เนื่องจากที่ชั้นความหนาน้อยลมร้อนสามารถดันผ่านชั้นวัสดุได้ง่ายกว่าที่ชั้นความหนามาก ทำให้เวลาในการอบแห้งที่ชั้นความหนา 20 30 และ 40 เซนติเมตร คือ 2.5 3 และ 3.5 ชั่วโมง ตามลำดับ



ภาพ 23 กราฟการอบแห้งที่ชั้นความหนาพริกไทย 3 ระดับ สำหรับวิธีการอบแห้งแบบสลับทิศทางลม



ภาพ 24 อัตราการอบแห้งที่ชั้นความหนาพริกไทย 3 ระดับ สำหรับวิธีการอบแห้งแบบสลับทิศทางการลมร้อน

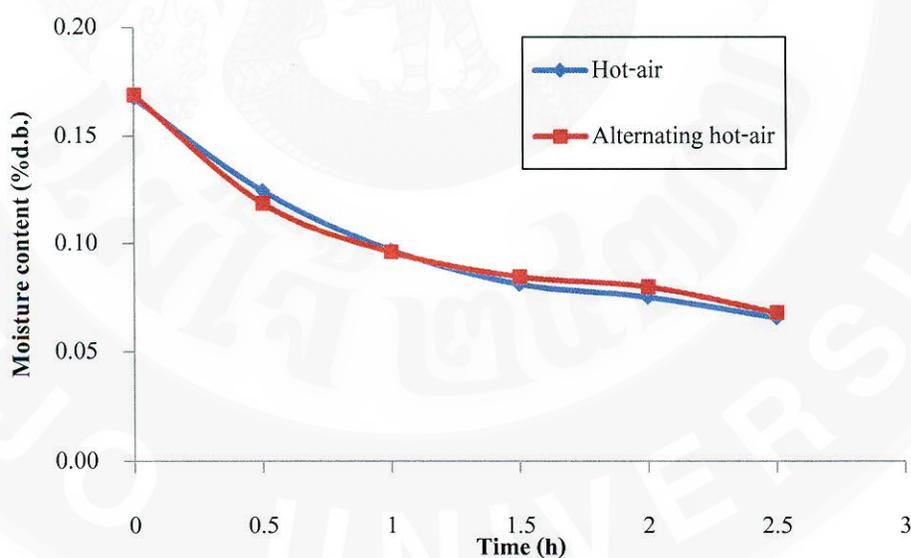
เมื่อพิจารณาอัตราการอบแห้ง (ภาพ 24) พบว่า เมื่อชั้นความหนาเพิ่มขึ้น ทำให้อัตราการอบแห้งลดลง โดยอัตราการอบแห้งเฉลี่ยที่ชั้นความหนา 20 30 และ 40 เซนติเมตร คือ 0.091 0.090 และ 0.086 กรัม น้ำระเหยต่อหน่วยมวลแห้งชั่วโมง ตามลำดับ ซึ่งที่ชั้นความหนา 20 เซนติเมตร อัตราการอบแห้งเฉลี่ยสูงกว่าที่ชั้นความหนา 30 และ 40 เซนติเมตร ทั้งนี้เนื่องจาก ที่ชั้นความหนาน้อยลมร้อนสามารถค้นผ่านชั้นวัสดุได้ง่ายกว่า การระบายความชื้นออกนั้นทำได้ง่ายกว่าที่ชั้นความหนามาก

การเปรียบเทียบวิธีการอบแห้งพริกไทยดำ

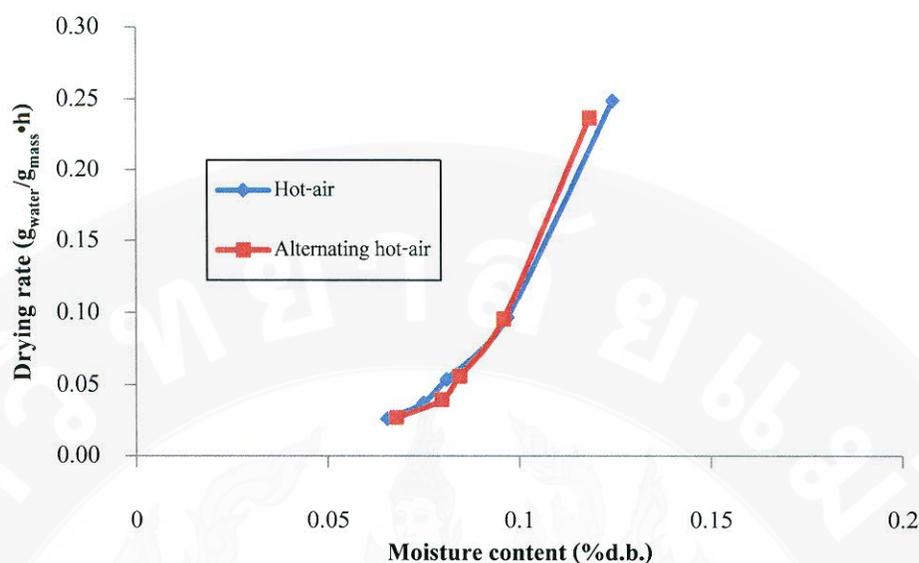
ผลของวิธีการอบแห้งพริกไทยดำ เพื่อเปรียบเทียบวิธีการอบแห้ง 2 วิธี คือ การอบแห้งปกติ ซึ่งใช้คนในการพลิกกลับพริกไทยทุก ๆ 30 นาที และการอบแห้งแบบสลับทิศทางการลมร้อน ซึ่งให้มีการสลับลมทิศทางการร้อนทุก ๆ 1 ชั่วโมง โดยไม่ต้องมีการพลิกกลับพริกไทย ที่ชั้นความหนาของพริกไทย 3 ระดับ คือ 20 30 และ 40 เซนติเมตร โดยทำการอบแห้งพริกไทยดำที่ความชื้นเริ่มต้น 16-17 เปอร์เซ็นต์มาตรฐานแห้ง จนมีความชื้นสุดท้าย 7 เปอร์เซ็นต์มาตรฐานแห้ง

การเปรียบเทียบวิธีการอบแห้งที่ชั้นความหนา 20 เซนติเมตร

การลดความชื้นของพริกไทยดำที่ชั้นความหนา 20 เซนติเมตรของทั้ง 2 วิธี คือ การอบแห้งแบบปกติ (ใช้คนพลิกกลับพริกไทย) และการสลับทิศทางลมร้อน ที่ตำแหน่งต่าง ๆ นั้นไม่แตกต่างกันทางสถิติ ($P \geq 0.05$) โดยทั้ง 2 วิธี ใช้เวลาในการอบแห้ง 2.5 ชั่วโมง เนื่องจากที่ชั้นความหนา 20 เซนติเมตร การพลิกกลับพริกไทยโดยใช้แรงงานคนนั้นสามารถทำได้ง่าย และสำหรับการอบแห้งแบบสลับทิศทางลมร้อน ลมร้อนสามารถไหลผ่านชั้นวัสดุได้ง่ายเช่นกัน ดังแสดงในภาพ 25 และเมื่อพิจารณาอัตราการอบแห้ง (ภาพ 26) พบว่า อัตราการอบแห้งเฉลี่ยของทั้ง 2 วิธี คือ 0.091 กรัม/น้ำระเหยต่อหน่วยมวลแห้งชั่วโมง ซึ่งไม่แตกต่างกันทางสถิติ ($P \geq 0.05$) โดยช่วงแรกอัตราการอบแห้งของวิธีการอบแห้งแบบปกติสูงกว่าเล็กน้อย เนื่องจากวิธีนี้ต้องเปิดเตาอบเพื่อทำการพลิกกลับพริกไทย ความชื้นจึงสามารถระบายออกได้เร็ว และคิดว่าวิธีการอบแห้งแบบสลับทิศทางลมร้อน แต่เมื่อวิธีการสลับทิศทางลมร้อนมีการสลับลมร้อนเกิดขึ้น จะเห็นว่าอัตราการอบแห้งของทั้ง 2 วิธีนั้น ไม่แตกต่างกัน เนื่องจากเมื่อมีการสลับทิศทางลมร้อนเกิดขึ้น ทำให้ภายในห้องอบแห้งมีการกระจายความชื้นได้ดี



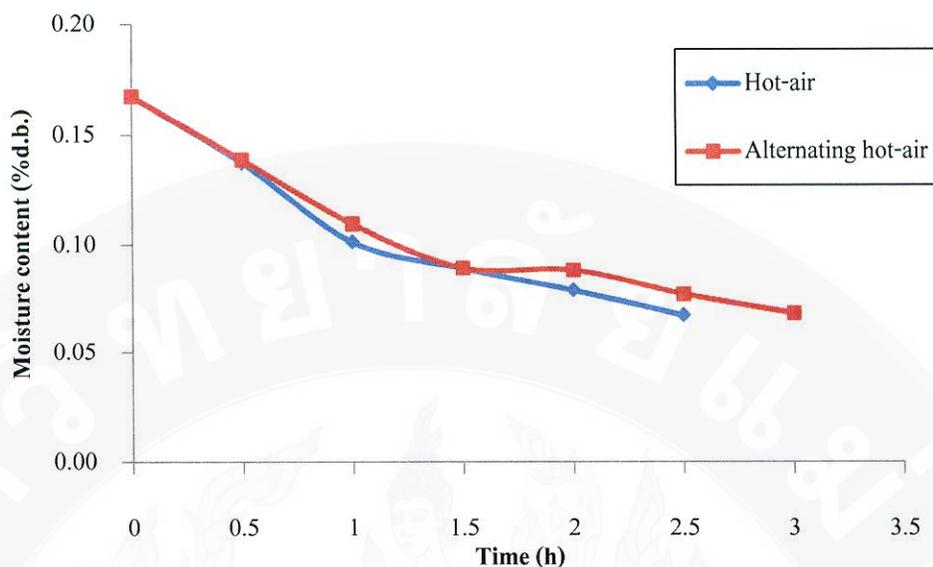
ภาพ 25 กราฟการอบแห้งเปรียบเทียบระหว่างการอบแห้งแบบปกติ และการอบแห้งแบบสลับทิศทางลมร้อน ที่ชั้นความหนา 20 เซนติเมตร



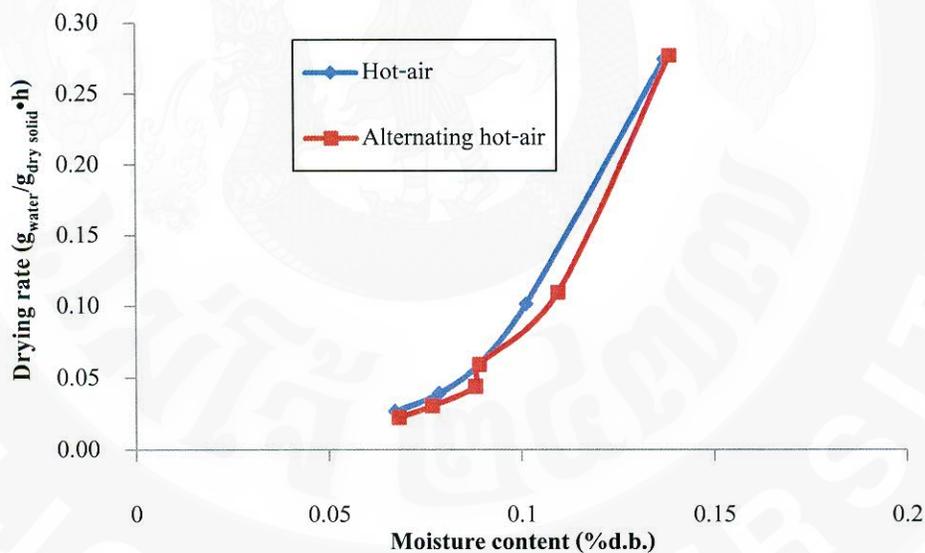
ภาพ 26 อัตราการอบแห้งเปรียบเทียบระหว่างการอบแห้งแบบปกติ และการอบแห้งแบบสลับทิศทางลมร้อน ที่ชั้นความหนา 20 เซนติเมตร

การเปรียบเทียบวิธีการอบแห้งที่ชั้นความหนา 30 เซนติเมตร

การอบแห้งพริกไทยดำที่ชั้นความหนา 30 เซนติเมตร พบว่า เวลาในการอบแห้งของวิธีการอบแห้งแบบปกติสั้นกว่าวิธีการอบแห้งแบบสลับทิศทางลมร้อน จากภาพ 27 พบว่า ช่วงแรกของการอบแห้งการลดความชื้นของทั้ง 2 วิธีนั้นไม่แตกต่างกัน แต่เมื่อเวลา 1 ชั่วโมง วิธีการอบแห้งแบบสลับทิศทางลมร้อนเริ่มมีการสลับทิศทางลมร้อน จากล่างขึ้นบน เป็นบนลงล่าง ลักษณะนี้ทำให้การระบายความชื้นนั้นช้ากว่า เมื่ออบแห้งต่อไป พบว่าการลดความชื้นของวิธีการอบแห้งแบบสลับทิศทางลมร้อนยังช้ากว่าการอบแห้งปกติ ทั้งนี้เนื่องจาก เมื่อมีการสลับทิศทางลมร้อนเป็นบนลงล่าง ลมร้อนสามารถค้นผ่านชั้นวัสดุได้น้อยกว่าทิศทางจากล่างขึ้นบน และเมื่อพิจารณาอัตราการอบแห้ง (ภาพ 28) พบว่า อัตราการอบแห้งเฉลี่ยของวิธีการอบแห้งแบบธรรมดา และวิธีการอบแห้งแบบสลับลมร้อน คือ 0.100 และ 0.091 กรัม น้ำระเหยต่อหน่วยมวลแห้งชั่วโมง ตามลำดับ ซึ่งวิธีการอบแห้งแบบธรรมดามีอัตราการอบแห้งเฉลี่ยสูงกว่า เนื่องจาก การอบแห้งที่ชั้นความหนา การพลิกกลับพริกไทยยังทำได้ง่ายอยู่ ในขณะที่วิธีการสลับทิศทางลมร้อนนั้นเมื่อชั้นความหนาเพิ่มขึ้นทำให้ลมร้อนค้นผ่านชั้นวัสดุน้อย จึงทำให้เกิดการระบายความชื้นได้ช้ากว่า



ภาพ 27 กราฟการอบแห้งเปรียบเทียบระหว่างการอบแห้งแบบปกติ และการอบแห้งแบบสลับทิศทางลมร้อน ที่ชั้นความหนา 30 เซนติเมตร

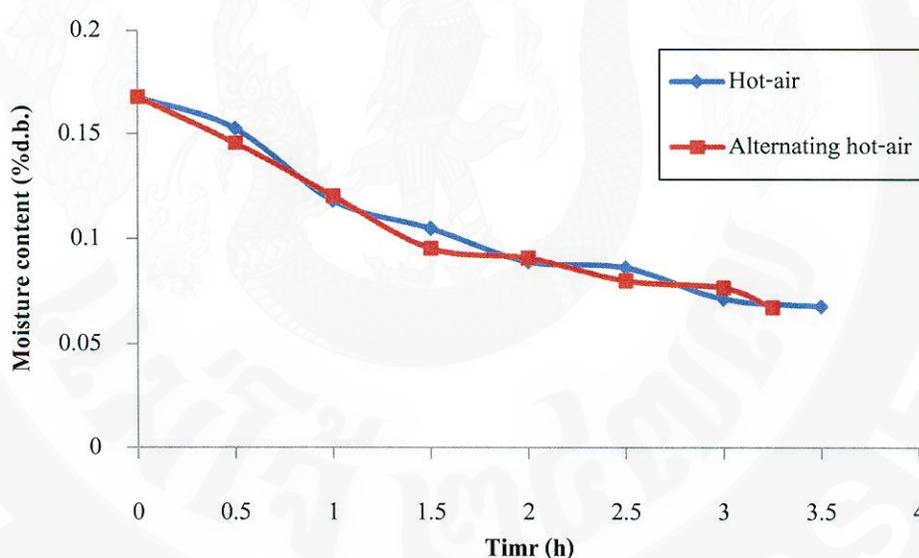


ภาพ 28 อัตราการอบแห้งเปรียบเทียบระหว่างการอบแห้งแบบปกติ และการอบแห้งแบบสลับทิศทางลมร้อน ที่ชั้นความหนา 30 เซนติเมตร

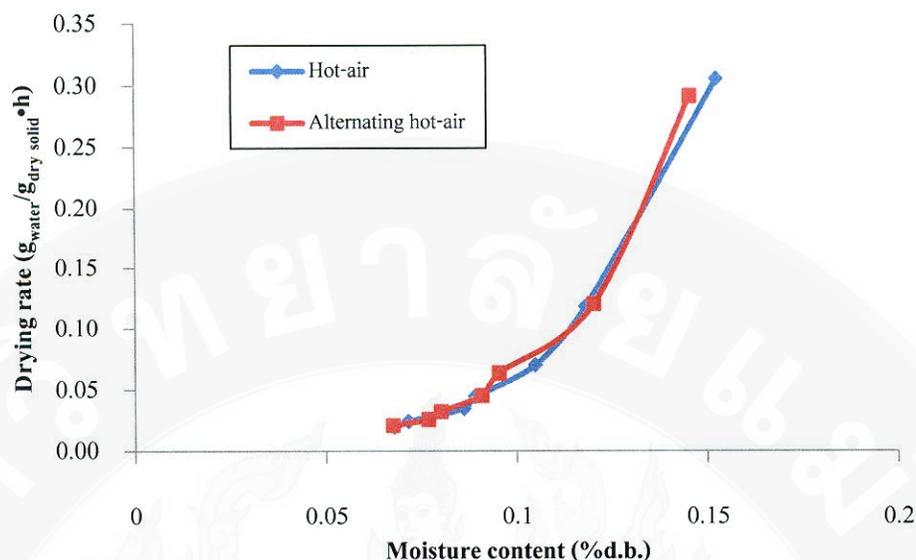
การเปรียบเทียบวิธีการอบแห้งที่ชั้นความหนา 40 เซนติเมตร

การลดความชื้นของการอบแห้งพริกไทยดำที่ชั้นความหนา 40 เซนติเมตร แสดงในภาพ 29 ทั้ง 2 วิธี ใช้เวลาในการอบแห้ง 3.25 และ 3.5 ชั่วโมง ตามลำดับ เวลาในการอบแห้งของ

วิธีการอบแห้งแบบปกติสูงกว่าการอบแห้งแบบสลับทิศทางลมร้อน ทั้งนี้เนื่องจาก ที่ชั้นความหนา 40 เซนติเมตร การพลิกกลับพริกไทยนั้นทำได้ยากกว่าที่ชั้นความหนา 20 และ 30 เซนติเมตร จึงทำให้การพลิกกลับพริกไทยนั้นไม่ทั่วถึง และใช้เวลาในการเปิดเตาเพื่อพลิกกลับพริกไทยนาน ในขณะที่การอบแห้งแบบสลับทิศทางลมร้อน ไม่จำเป็นต้องเปิดเตาเพื่อพลิกกลับพริกไทย และเมื่อพิจารณาอัตราการอบแห้ง (ภาพ 30) พบว่า อัตราการอบแห้งเฉลี่ยของการอบแห้งแบบปกติ และแบบสลับทิศทางลมร้อน คือ 0.088 และ 0.085 กรัม น้ำระเหยต่อหน่วยมวลแห้ง ชั่วโมง ตามลำดับ ช่วงแรกอัตราการอบแห้งของวิธีการอบแห้งแบบปกติสูงกว่าวิธีการอบแห้งแบบสลับทิศทางลมร้อนเล็กน้อย เนื่องจากการอบแห้งแบบปกตินั้นจะพลิกกลับพริกไทยที่ 0.5 ชั่วโมง ในขณะที่การสลับทิศทางลมร้อนจะสลับลมที่ 1 ชั่วโมง ทำให้การอบแห้งแบบปกติสามารถระบายความชื้นออกไปได้เร็วกว่าในช่วงแรก และเมื่ออบแห้งต่อไป พบว่า อัตราการอบแห้งของทั้ง 2 วิธีนั้น ไม่แตกต่างกัน



ภาพ 29 กราฟการอบแห้งเปรียบเทียบระหว่างการอบแห้งแบบปกติ และการอบแห้งแบบสลับทิศทางลมร้อน ที่ชั้นความหนา 40 เซนติเมตร



ภาพ 30 อัตราการอบแห้งเปรียบเทียบระหว่างการอบแห้งแบบปกติ และการอบแห้งแบบสลับทิศทางลมร้อน ที่ชั้นความหนา 40 เซนติเมตร

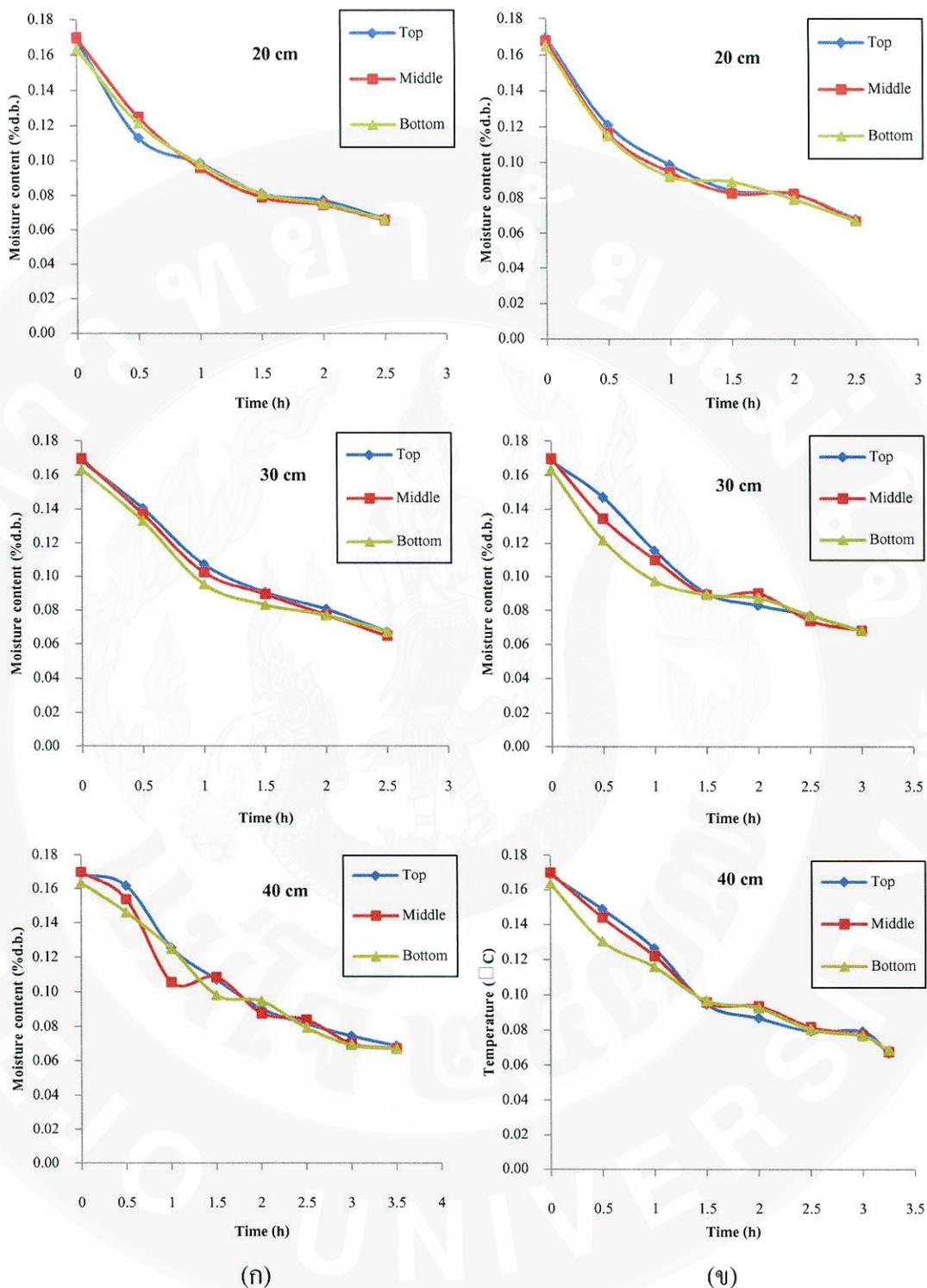
การกระจายความชื้นภายในชั้นพริกไทย

การกระจายความชื้นภายในชั้นพริกไทยที่ชั้นความหนา 20 30 และ 40 เซนติเมตร แสดงดังภาพ 31 พบว่า ที่ชั้นความหนา 20 เซนติเมตร ช่วงแรกของการอบแห้งการกระจายความชื้นภายในชั้นพริกไทยของการอบแห้งแบบปกติแตกต่างกันเล็กน้อย โดยที่ชั้นบนมีความชื้นลดลงมากกว่าชั้นกลาง และชั้นล่าง เนื่องจากที่เวลา 0.5 ชั่วโมง ได้มีการพลิกกลับพริกไทยทำให้เกิดการระบายความชื้นออกจากห้องอบได้เร็ว เมื่ออบแห้งต่อไปความชื้นภายในชั้นพริกไทยไม่แตกต่างกัน จนสิ้นสุดกระบวนการอบแห้ง สำหรับการอบแห้งแบบสลับทิศทางลมร้อน พบว่าช่วงแรกของการอบแห้ง การลดความชื้นของชั้นบน ช้ากว่า ชั้นกลาง และชั้นล่าง เนื่องจากช่วงแรกของการอบแห้งวิธีนี้จะกำหนดให้ลมไหลจากล่างขึ้นบน พริกไทยที่อยู่ชั้นล่างจึงได้รับลมร้อนก่อน แต่เมื่อเวลาผ่านไปพบว่าเกิดการแกว่งของความชื้นที่ 1.5 ชั่วโมง เนื่องจากการอบแห้งวิธีนี้กำหนดให้เวลาในการสลับลมร้อน 1 ชั่วโมง เมื่อมีการสลับลมร้อนทำให้พริกไทยชั้นบนได้รับความร้อนจากลมร้อนก่อน ชั้นกลาง และชั้นล่าง ส่งผลให้ความชื้นของพริกไทยในชั้นล่างเพิ่มขึ้นเล็กน้อย เนื่องจากได้รับความชื้นจากพริกไทย ชั้นกลาง และชั้นบน หลังจากนั้นความชื้นภายในชั้นพริกไทยไม่แตกต่างกัน จนสิ้นสุดกระบวนการอบแห้ง

สำหรับชั้นความหนา 30 เซนติเมตร จะเห็นความแตกต่างของการกระจายความชื้นของทั้ง 2 วิธีชัดเจนขึ้น โดยที่วิธีการอบแห้งแบบปกติ การลดความชื้นที่ชั้นล่าง เร็วกว่าชั้นกลาง

และชั้นบนในทุก ๆ ตำแหน่ง โดยเฉพาะการอบแห้ง 2 ชั่วโมงแรก หลังจากนั้นความชื้นภายในชั้น
 พริกไทยไม่แตกต่างกันจนสิ้นสุดกระบวนการ เมื่อพิจารณาการกระจายความชื้นของวิธีการอบแห้ง
 แบบสลับทิศทางลมร้อน พบว่า ในช่วงเวลา 1 ชั่วโมงแรกของการอบแห้ง การลดลงของความชื้น
 ชั้นล่าง เร็วกว่าชั้นกลาง และชั้นบน เนื่องจากชั้นล่างได้รับความร้อนก่อน และหลังจากที่มีการสลับ
 ทิศทางลมร้อนแล้ว พบว่า ความชื้นชั้นล่างสูงกว่าชั้นกลาง และบน เนื่องจากชั้นล่างได้รับความชื้น
 จากชั้นบน และชั้นกลาง เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบการกระจายความชื้นในชั้นความหนาแน่นแล้ว
 พบว่า วิธีการอบแห้งแบบสลับลมร้อนมีความแตกต่างของการลดความชื้นในช่วงแรกของการ
 อบแห้งมากกว่าวิธีการอบแห้งแบบปกติ เนื่องจาก การอบแห้งแบบปกติสามารถใช้คนในการพลิก
 กลับพริกไทยได้ง่าย อีกทั้งการระบายความชื้นออกจากเตาทำได้ง่ายกว่า เนื่องจากการเปิดเตา
 อบแห้งเพื่อพลิกกลับพริกไทยขณะอบแห้งนั้นสามารถระบายความชื้นออกได้เร็วกว่า ในขณะที่การ
 ระบายความชื้นของการอบแห้งแบบสลับทิศทางลมร้อน ทำได้ยากกว่า เนื่องจากเมื่อชั้นความหนา
 ของพริกไทยเพิ่มขึ้น ลมร้อนที่ผ่านชั้นวัสดุจะดันผ่านได้น้อย ส่งผลให้เวลาในการอบแห้งแบบสลับ
 ทิศทางลมร้อนยาวกว่าแบบปกติ

ชั้นความหนา 40 เซนติเมตร ช่วงแรกการกระจายความชื้นของวิธีการอบแห้งแบบ
 ปกติชั้นล่าง เร็วกว่าชั้นกลาง และชั้นบน แต่เมื่อมีการพลิกกลับพริกไทยที่ 1 ชั่วโมง ความชื้นของ
 ชั้นกลางค่อนข้างแตกต่างกับชั้นบน และชั้นกลางมาก เนื่องจากมีการพลิกกลับพริกไทยที่ไม่ทั่วถึง
 และเมื่อพิจารณาการกระจายความชื้นของการอบแห้งแบบสลับทิศทางลมร้อน ในช่วงเวลา 1
 ชั่วโมงแรกของการอบแห้ง การลดลงของความชื้นชั้นล่าง เร็วกว่าชั้นกลาง และชั้นบน หลังจากที่มี
 การสลับทิศทางลมร้อนแล้ว พบว่า ความชื้นชั้นล่างสูงกว่าชั้นกลาง และบน เนื่องจากชั้นบนได้รับ
 ความร้อนก่อน ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบการกระจายความชื้นของทั้ง 2 วิธีที่ชั้นความหนาแน่น พบว่า การ
 อบแห้งแบบสลับทิศทางลมร้อนมีการกระจายความชื้นดีกว่าแบบปกติ เนื่องเกิดการกระจาย
 ความชื้น 2 ทิศทาง ในขณะที่การอบแห้งแบบปกติการพลิกกลับพริกไทยนั้นทำได้ค่อนข้างลำบาก
 ทำให้โอกาสเมล็ดพริกไทยสัมผัสกับอากาศร้อนไม่ทั่วถึง ส่งผลให้เวลาในการอบแห้งสั้นกว่าแบบ
 ปกติ



ภาพ 31 การกระจายความชื้นภายในชั้นความหนาฟริกไทยที่ 20 30 และ 40 เซนติเมตร

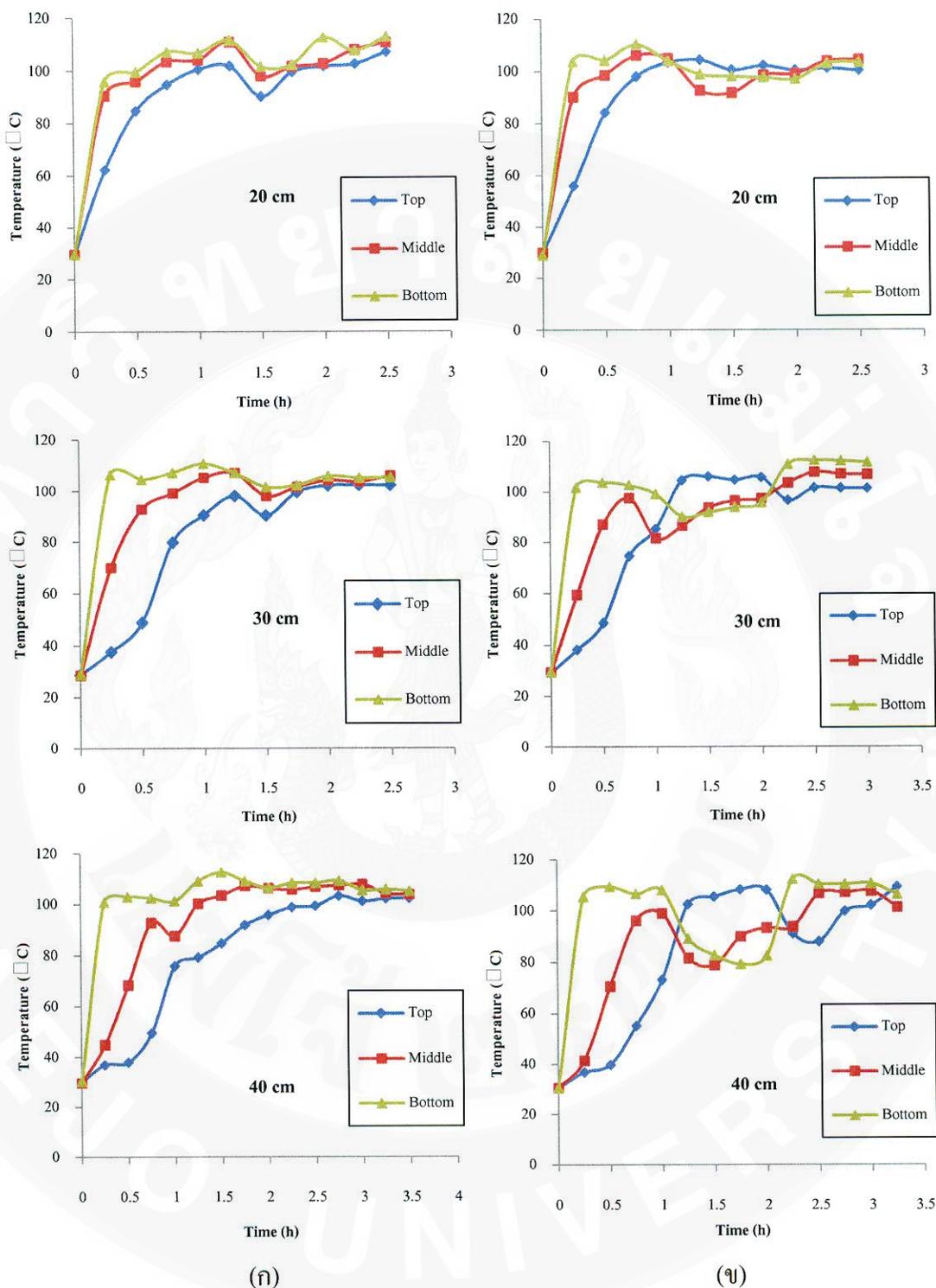
(ก) วิธีการอบแห้งแบบปกติ

(ข) วิธีการอบแห้งแบบสลับทิศทางลมร้อน

การกระจายอุณหภูมิภายในชั้นพริกไทย

การกระจายอุณหภูมิภายในชั้นพริกไทย (ภาพ 32) ที่ชั้นความหนา 20 30 และ 40 เซนติเมตร สำหรับวิธีการอบแห้งแบบปกติ อุณหภูมิของชั้นบนต่ำกว่าชั้นกลาง และชั้นล่าง ตลอดช่วงเวลาการอบแห้ง และจะใกล้เคียงกันเมื่อสิ้นสุดกระบวนการอบแห้ง โดยที่ชั้นความหนา 20 เซนติเมตรการกระจายอุณหภูมิในช่วงเวลา 1 ชั่วโมงแรกของการอบแห้งแบบปกติ และการอบแห้งแบบสลับทิศทางลมร้อนสอดคล้องกัน คือ อุณหภูมิชั้นบนต่ำกว่า อุณหภูมิชั้นกลาง และชั้นล่าง เนื่องจากพริกไทยชั้นล่างจะได้รับความร้อนก่อนชั้นอื่น แต่เมื่อวิธีการอบแห้งแบบสลับทิศทางลมร้อนมีการสลับทิศทางลมร้อนขึ้น ทำให้อุณหภูมิชั้นบนมีอุณหภูมิสูงกว่า ชั้นกลาง และชั้นล่าง ซึ่งการกระจายอุณหภูมิสอดคล้องกับการกระจายความชื้น กล่าวคือความชื้นชั้นบนในช่วงนี้ลดลงเร็วกว่าชั้นกลาง และชั้นล่าง และเมื่ออบแห้งต่อไปอุณหภูมิภายในชั้นพริกไทยของการอบแห้งทั้ง 2 วิธีจะใกล้เคียงกันจนกระทั่งสิ้นสุดกระบวนการอบแห้ง

การกระจายอุณหภูมิที่ชั้นความหนา 30 เซนติเมตรของการอบแห้งแบบปกติ สอดคล้องกับรูปแบบการกระจายที่ชั้นความหนา 20 เซนติเมตร คือ อุณหภูมิชั้นบนต่ำกว่าอุณหภูมิชั้นกลาง และชั้นล่างตลอดระยะเวลาการอบแห้ง เมื่อเปรียบเทียบการกระจายอุณหภูมิกับการอบแห้งแบบสลับทิศทางลมร้อนพบว่าในช่วง 0.5 ชั่วโมงแรกของการอบแห้งความแตกต่างของอุณหภูมิชั้นบน กลาง และล่างของทั้ง 2 วิธีเป็นไปในทิศทางเดียวกัน คือ อุณหภูมิชั้นบนต่ำกว่าที่อุณหภูมิชั้นอื่น ๆ แต่เมื่อการอบแห้งแบบสลับทิศทางลมร้อนมีการสลับทิศทางลมร้อนเกิดขึ้น ทำให้อุณหภูมิชั้นบนสูงกว่าชั้นอื่น ๆ ส่วนการกระจายอุณหภูมิที่ชั้นความหนา 40 เซนติเมตร การอบแห้งแบบธรรมดา สอดคล้องกับรูปแบบการกระจายที่ชั้นความหนา 30 และ 20 เซนติเมตร คือ อุณหภูมิชั้นบนต่ำกว่าอุณหภูมิชั้นกลาง และชั้นล่างตลอดระยะเวลาการอบแห้ง โดยอุณหภูมิทั้ง 3 ชั้นเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วง 1 ชั่วโมงแรกของการอบแห้ง และเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องจนกระทั่งเวลาการอบแห้งเป็น 2.5 ชั่วโมง และเพิ่มขึ้นอย่างช้า ๆ จนใกล้เคียงกันกระทั่งสิ้นสุดการอบแห้ง เมื่อเปรียบเทียบการกระจายอุณหภูมิกับวิธีการอบแห้งแบบสลับทิศทางลมร้อนพบว่าในช่วง 0.5 ชั่วโมงแรกของการอบแห้งความแตกต่างของอุณหภูมิชั้นบน กลาง และล่างของทั้ง 2 วิธีเป็นไปในทิศทางเดียวกัน คือ อุณหภูมิชั้นบนต่ำกว่าที่อุณหภูมิชั้นอื่น แต่เมื่อการอบแห้งแบบสลับทิศทางลมร้อนมีการสลับทิศทางลมร้อนเกิดขึ้น ทำให้อุณหภูมิชั้นบนสูงกว่าชั้นอื่น ๆ แต่เมื่อเปรียบเทียบกับที่ชั้นความหนา 30 และ 20 เซนติเมตร พบว่าในช่วง 0.5 ชั่วโมงแรกของการอบแห้งความแตกต่างของอุณหภูมิภายในชั้นความหนา 40 เซนติเมตร มากกว่าที่ 30 และ 20 เซนติเมตร เนื่องจากที่ชั้นความหนา 40 เซนติเมตรสามารถคั่นผ่านได้น้อย

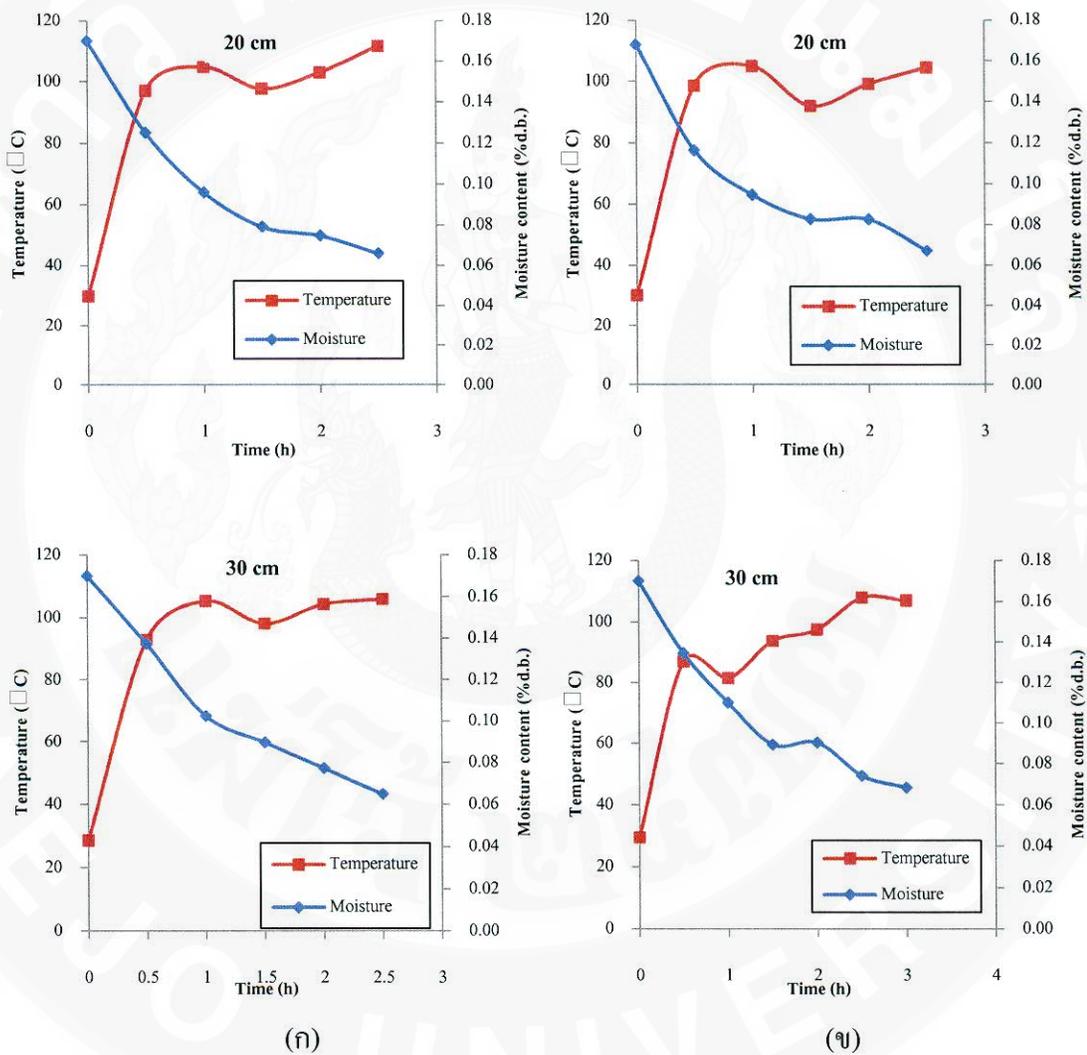


ภาพ 32 การกระจายอุณหภูมิภายในชั้นพริกไทยที่ชั้นความหนา 20 30 และ 40 เซนติเมตร

(ก) การอบแห้งแบบปกติ

(ข) การอบแห้งแบบสลับทิศทางลมร้อน

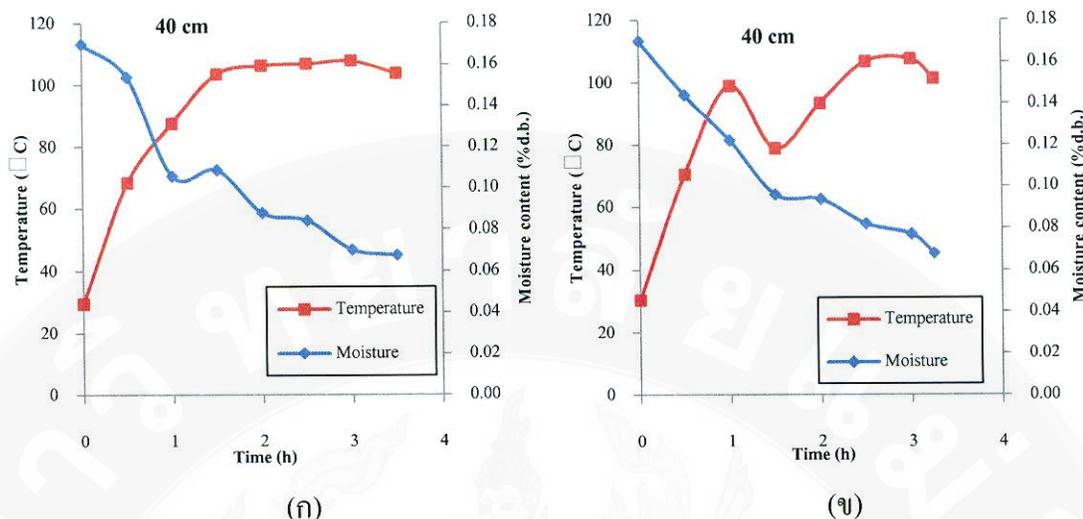
ความชื้น และอุณหภูมิที่เกิดขึ้นภายในชั้นพริกไทยดำ ในภาพ 33 พบว่า เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นความชื้นของพริกไทยดำลดลง โดยอุณหภูมิที่ 40 เซนติเมตรอุณหภูมิสำหรับการอบแห้งแบบปกติในช่วงแรกจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว และเริ่มคงที่เมื่อเวลาการอบแห้ง 2 ชั่วโมง ส่วนการอบแห้งแบบสลับทิศทางลมร้อนอุณหภูมิมีการแกว่งในช่วง 1 ชั่วโมง เนื่องจากวิธีนี้มีการสลับทิศทางลมร้อนเกิดขึ้น ทำให้การกระจายอุณหภูมิทำได้ดีกว่าวิธีการอบแห้งแบบปกติ



ภาพ 33 อุณหภูมิ และปริมาณความชื้นในชั้นความหนาพริกไทย (ชั้นกลาง) ที่ชั้นความหนา 20 30 และ 40 เซนติเมตร

(ก) การอบแห้งแบบปกติ และ

(ข) การอบแห้งแบบสลับทิศทางลมร้อน



ภาพ 33 (ต่อ)

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

จากผลการทดลองพบว่า การลดความชื้นของวิธีการอบแห้งพริกไทย 2 วิธี คือ การอบแห้งแบบปกติ และการอบแห้งแบบสลับทิศทางลมร้อน ที่แต่ละชั้นความหนาให้ผลไม่แตกต่างกันทางสถิติ ($P \geq 0.05$) การหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เหมาะสม โดยอาศัยแบบจำลองอัตรา การอบแห้งจากสมการเอมไพริคัล ได้แก่ แบบจำลอง Newton แบบจำลอง Modified Page แบบจำลอง Page และแบบจำลอง Henderson and Pabis ซึ่งทุกกรณีการทดสอบจะมีการวิเคราะห์ ประเมินความถูกต้องแม่นยำในการทดลองโดยการวิเคราะห์ความแม่นยำทางสถิติ ได้แก่ R^2 , RMSE และ %Error เป็นต้น ซึ่งจากการวิเคราะห์แบบจำลองสามารถสรุปได้ตามตาราง 8 พบว่าแบบจำลอง Modified Page และแบบจำลอง Page มีค่า R^2 RMSE และ %Error ที่ใกล้เคียงกัน โดยมีค่า R^2 สูงสุด มีค่า RMSE และ %Error ต่ำสุด ดังนั้นจึงนำทั้ง 2 แบบจำลองมาวิเคราะห์เพื่อหาแบบจำลองที่เหมาะสม โดยการนำค่า R^2 RMSE และ %Error มาวิเคราะห์ค่าเฉลี่ย (mean) ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (standard deviation) ค่าสูงสุด และค่าต่ำสุด โดยแสดงการวิเคราะห์ตามตาราง 9

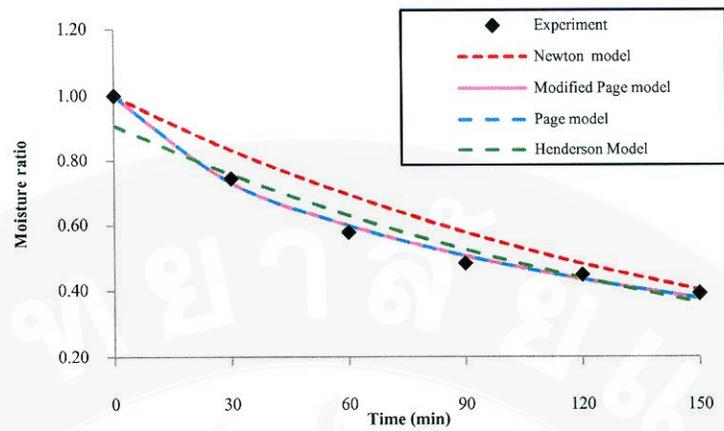
ตาราง 8 ค่าคงที่ของแบบจำลองการอบแห้งชนิดต่าง ๆ

		k	n	a	R ²	RMSE	%Error
วิธีปกติ	Newton	-0.00610			0.96276	0.07242	10.24930
20 เซนติเมตร	Modified Page	0.00646	0.70720		0.99721	0.01597	2.82251
	Page	0.02829	0.70720		0.99721	0.01597	2.82251
	Henderson and Pabis	-0.00610		0.90883	0.96820	0.04794	6.30660
วิธีปกติ	Newton	-0.00610			0.98716	0.04253	4.69323
30 เซนติเมตร	Modified Page	0.00647	0.91450		0.99316	0.02698	3.86975
	Page	0.00995	0.91450		0.99316	0.02698	3.86975
	Henderson and Pabis	-0.00610		0.95380	0.98642	0.03462	4.72963
วิธีปกติ	Newton	-0.00440			0.98941	0.03775	4.93687
40 เซนติเมตร	Modified Page	0.00497	1.10840		0.98666	0.01354	5.95473
	Page	0.00280	1.10840		0.98666	0.03830	5.95473
	Henderson and Pabis	-0.00440		0.97219	0.98730	0.03383	4.70395
วิธีสลับลมร้อน	Newton	-0.00560			0.75913	0.13732	22.89590
20 เซนติเมตร	Modified Page	0.00554	0.56390		0.99654	0.01169	1.81694
	Page	0.05341	0.56390		0.99654	0.01169	1.81694
	Henderson and Pabis	-0.00560		0.88161	0.87707	0.06011	7.56748
วิธีสลับลมร้อน	Newton	-0.00490			0.97618	0.05809	7.36533
30 เซนติเมตร	Modified Page	0.00527	0.83780		0.99218	0.02769	4.33506
	Page	0.01235	0.83730		0.99221	0.02766	4.27643
	Henderson and Pabis	-0.00490		0.93156	0.97830	0.04157	5.40552
วิธีสลับลมร้อน	Newton	-0.00450			0.98632	0.04260	5.51737
40 เซนติเมตร	Modified Page	0.00486	0.95150		0.99120	0.02961	3.85888
	Page	0.00629	0.95150		0.99120	0.02961	3.85888
	Henderson and Pabis	-0.00450		0.95466	0.98576	0.03420	4.37718

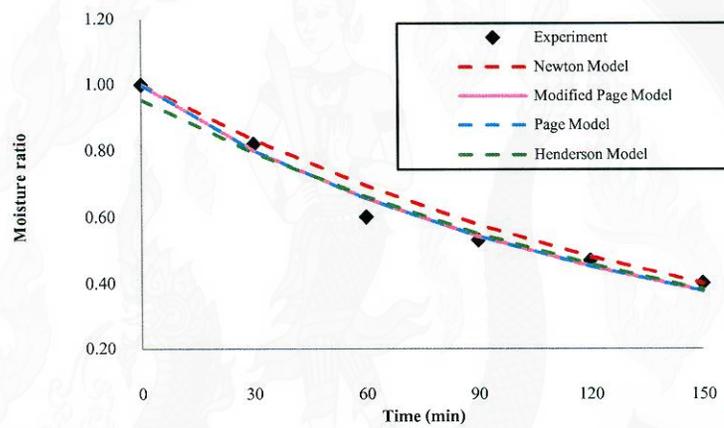
ตาราง 9 ข้อมูล R^2 , RMSE และ %Error สำหรับใช้เปรียบเทียบแบบจำลองที่เหมาะสม

		วิธีปกติ			วิธีสลับทิศทางลมร้อน		
		R^2	RMSE	%Error	R^2	RMSE	%Error
Mean	Page Model	0.99234	0.02708	4.21566	0.99331	0.02300	3.3200
	Modified Page Model	0.99234	0.01883	4.21566	0.99332	0.02300	3.3400
Standard deviation	Page Model	0.00435	0.00912	1.30191	0.00284	0.00983	1.3200
	Modified Page Model	0.00435	0.00584	1.30191	0.00284	0.00983	1.3400
Maximum value	Page Model	0.99721	0.03830	5.95473	0.99700	0.02960	4.2800
	Modified Page Model	0.99721	0.02698	5.95473	0.99700	0.02960	4.3400
Minimum value	Page Model	0.98666	0.01597	2.82251	0.99100	0.01170	1.8200
	Modified Page Model	0.98666	0.01354	2.82251	0.99100	0.01170	1.8200

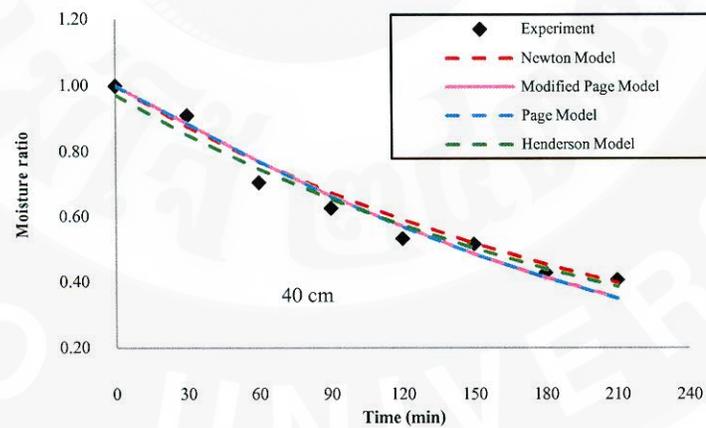
จากตาราง 8 พบว่า ค่า R^2 ของแบบจำลอง Page และแบบจำลอง Modified Page สำหรับการอบแห้งทั้ง 2 วิธี มีค่าเฉลี่ย ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน ค่าสูงสุด และค่าต่ำสุดเท่ากัน โดยค่า R^2 บ่งบอกถึงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต้น และตัวแปรตามว่ามีความสัมพันธ์กันมากน้อยเพียงใด หากมีค่ามากแสดงว่าตัวแปรต้นสามารถอธิบายตัวแปรตามได้ดี ค่า RMSE สำหรับวิธีการอบแห้งแบบปกติพบว่า แบบจำลอง Page มีค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานน้อยกว่า แสดงให้เห็นว่าข้อมูลของแบบจำลอง Page มีการกระจายตัวของข้อมูลน้อยกว่า สำหรับการอบแห้งแบบสลับลมร้อนทั้ง 2 แบบจำลองมีค่าเท่ากัน โดยค่า RMSE บ่งบอกถึงความแม่นยำของแบบจำลองหากมีค่าน้อยแสดงว่าค่าที่ได้จากการทดลองกับค่าที่ได้จากการทำนายนั้นใกล้เคียงกัน และเมื่อพิจารณาค่าความคลาดเคลื่อน (%Error) สำหรับการอบแห้งแบบปกติแบบจำลองทั้ง 2 มีค่าการวิเคราะห์เท่ากัน ส่วนการอบแห้งแบบสลับทิศทางลมร้อน พบว่า แบบจำลอง Page มีค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานน้อยที่สุด แสดงว่ามีช่วงการกระจายข้อมูลน้อย จึงได้ว่าแบบจำลองนี้มีความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุด เมื่อสังเกตจากภาพ 34 สำหรับการอบแห้งแบบปกติ พบว่า ค่าที่ได้จากการคำนวณอัตราส่วนความชื้นจากแบบจำลอง Modified Page มีความใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการอบแห้งจริง และเมื่อสังเกตภาพ 35 สำหรับการอบแห้งแบบสลับทิศทางลมร้อน พบว่า ค่าที่ได้จากการคำนวณอัตราส่วนความชื้นจากแบบจำลอง Page มีความใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการอบแห้งจริง



(ก)



(ข)



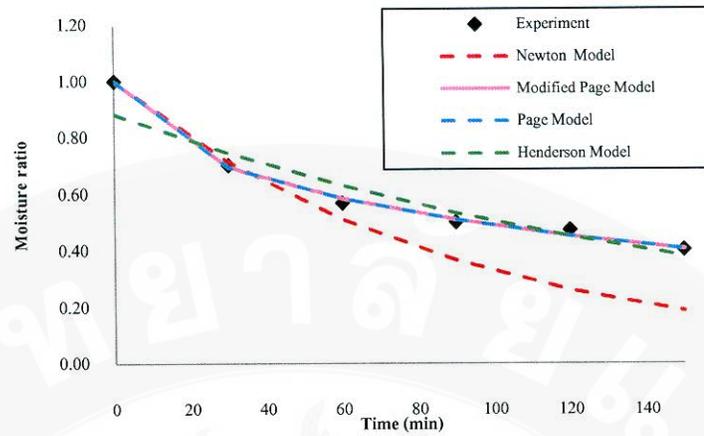
(ค)

ภาพ 34 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้น และเวลา สำหรับแบบปกติ

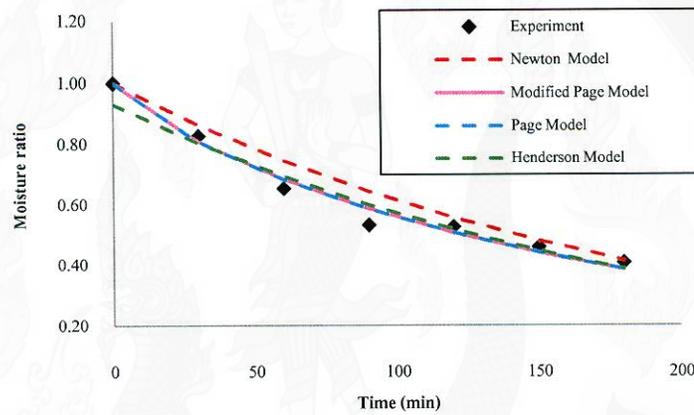
(ก) ชั้นความหนา 20 เซนติเมตร

(ข) ชั้นความหนา 30 เซนติเมตร

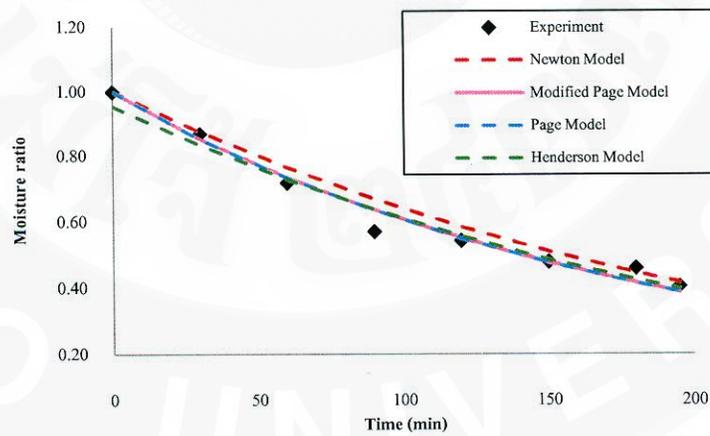
(ค) ชั้นความหนา 40 เซนติเมตร



(ก)



(ข)



(ค)

ภาพ 35 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้น และเวลา สำหรับแบบสลับทิศทางลมร้อน

(ก) ชั้นความหนา 20 เซนติเมตร

(ข) ชั้นความหนา 30 เซนติเมตร

(ค) ชั้นความหนา 40 เซนติเมตร

คุณสมบัติพริกไทยดำหลังการอบแห้ง

จากการศึกษาการอบแห้งพริกไทย 2 วิธี คือ การอบแห้งแบบธรรมดา และการอบแห้งแบบสลับลมร้อน สามารถวัดคุณสมบัติหลังการอบแห้งของพริกไทยได้ดังตาราง 9 โดยค่า L^* จะบรรยายถึงความสว่างจาก สีขาว ($+L^*$) ไปจนถึงสีดำ ($-L^*$) ค่า a^* จะบรรยายสีแดง ($+a^*$) ไปจนถึงสีเขียว ($-a^*$) และค่า b^* จะบรรยายสีเหลือง ($+b^*$) ไปจนถึงสีน้ำเงิน ($-b^*$) ซึ่งพริกไทยดำที่ได้จากการทดลองที่ขึ้นความหนาในระดับต่าง ๆ และวิธีการอบแห้ง 2 วิธีมีค่า L^* , a^* และ b^* ไม่แตกต่างกันทางสถิติ ($P \geq 0.05$) ส่วนค่าแอมพลิจูดของแอกติวิตี (a_w) ที่ขึ้นความหนา 20 และ 40 เซนติเมตร ของการอบแห้งทั้ง 2 วิธี มีค่าไม่เกิน 0.600 ซึ่งค่าแอมพลิจูดของแอกติวิตีค่านี้จะไม่ทำให้เกิดเชื้อจุลินทรีย์ได้ (Jay, 2000) แต่ที่ขึ้นความหนา 30 เซนติเมตร ของการอบแห้งทั้ง 2 วิธี ค่าแอมพลิจูดของแอกติวิตีมีค่ามากกว่า 0.600 ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากความชื้นสัมพัทธ์อากาศสูงถึง 72 %RH (ตารางภาคผนวก 8) ทำให้เกิดความคาดเคลื่อนได้

ตาราง 10 คุณสมบัติพริกไทยดำหลังการอบแห้ง

ชั้นความ หนา (cm)	วิธีการ	เวลา (h)	a_w	ค่าสี			ΔE	SEC (MJ/ kg _{water})
				L^*	a^*	b^*		
20	ปกติ	2.5	0.465	40.20±0.85	4.65±0.14	15.96±0.16	4.23	76.71
	สลับลมร้อน	2.5	0.403	36.81±0.17	5.24±0.14	14.40±0.99	2.41	84.42
30	ปกติ	3	0.663	39.44±0.44	4.23±0.24	14.98±0.41	2.93	54.26
	สลับลมร้อน	3	0.647	36.92±0.34	3.84±0.94	14.78±0.15	2.12	54.28
40	ปกติ	3.5	0.426	36.88±1.91	4.73±0.86	13.65±1.01	1.56	51.24
	สลับลมร้อน	3.25	0.494	37.18±1.45	4.77±0.43	14.66±0.54	2.24	54.57

สำหรับค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ จะสังเกตว่าค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของการอบแห้งด้วยวิธีการสลับทิศทางลมร้อนจากงานวิจัยนี้มีค่ามากกว่างานวิจัยอื่นที่ใช้วิธีการอบแห้งลักษณะเดียวกัน เนื่องจากในงานวิจัยนี้มีการกั้นห้องอบแห้ง ซึ่งส่วนที่ใช้ในการทำการทดลองมีขนาดเพียง 1/6 ของขนาดห้องอบเท่านั้น รวมถึง พริกไทยที่นำมาทำวิจัยเป็นพริกไทยดำที่แห้งแล้ว (ความชื้นเริ่มต้นประมาณ 10 เปอร์เซ็นต์มาตรฐานแห้ง) ทำให้เมื่อเปรียบเทียบพลังงานที่ใช้กับปริมาณน้ำที่ระเหยค่อนข้างแตกต่างกันมาก ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงมีการเปรียบเทียบ

ระหว่าง การอบพริกไทยดำด้วยวิธีการอบแห้งแบบปกติ และแบบสลับลมร้อนในการทดลอง เท่านั้น โดยไม่คิดความสูญเสียที่เกิดขึ้น ซึ่งจากการศึกษาพบว่า เมื่อชั้นความหนาของพริกไทย เพิ่มขึ้น ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะมีแนวโน้มลดลง เป็นไปตามทฤษฎีเมื่อปริมาณการใช้พลังงานใกล้เคียงกัน และปริมาณน้ำที่ต้องการระเหยเพิ่ม ทำให้ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะลดลง ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของวิธีการอบแห้งแบบสลับทิศทางลมร้อนมากกว่าวิธีการอบแห้งแบบปกติที่ทุกระดับชั้นความหนา ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของการอบแห้งแบบปกติที่ 20 30 และ 40 เซนติเมตร คือ 76.71 54.26 และ 51.24 เมกะจูลต่อกิโลกรัม น้ำ ($\text{MJ}/\text{kg}_{\text{water}}$) ตามลำดับ สำหรับค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของการอบแห้งแบบสลับลมร้อนที่ 20 30 และ 40 เซนติเมตร คือ 84.42 54.28 และ 54.57 เมกะจูลต่อกิโลกรัม น้ำ ($\text{MJ}/\text{kg}_{\text{water}}$) ตามลำดับ

การวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์ของการอบแห้งพริกไทยดำ แบบสลับทิศทางลมร้อน

การวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์ในงานทางวิศวกรรมศาสตร์ มีความสำคัญมาก สำหรับการลงทุน เนื่องจากผลการวิเคราะห์เป็นเกณฑ์การตัดสินใจในความเป็นไปได้ในการลงทุนของอุตสาหกรรมที่จะดำเนินการปรับเปลี่ยนการอบแห้งแบบปกติ เป็นแบบสลับทิศทางลมร้อน จากผลการทดลองการอบแห้งพริกไทยดำโดยทำการเปรียบเทียบการเวลาในการอบแห้งระหว่างการอบแห้งแบบปกติ และการอบแห้งแบบสลับทิศทางลมร้อนพบว่า การเวลา และอัตราการอบแห้งเฉลี่ยของการอบแห้งทั้ง 2 วิธีนั้น ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($P \geq 0.05$) จึงได้นำผลดังกล่าวมาเป็นข้อกำหนดในการวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์ โดยวิเคราะห์ให้แนวทางในการลดต้นทุนการอบแห้งในระดับอุตสาหกรรมที่เป็นไปได้ คือ การลดต้นทุนด้านพลังงาน และแรงงาน

การวิเคราะห์ต้นทุนในระดับการทดลอง

การวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์สำหรับงานวิจัยนี้จะวิเคราะห์ต้นทุนในการทดลองการอบแห้งพริกไทย โดยวิเคราะห์จากต้นทุนในการอบแห้งพริกไทยไม่เกิน 100 กิโลกรัม ดังแสดงในตาราง 11 พบว่า การอบแห้งพริกไทยแบบสลับทิศทางลมร้อนมีต้นทุนการผลิตต่ำกว่าการอบแห้งแบบปกติที่ทุกระดับชั้นความหนา ต้นทุนการผลิตของการอบแห้งแบบสลับทิศทางลมร้อนที่ 20 30 และ 40 เซนติเมตร คือ 5.03 4.06 3.80 บาทต่อกิโลกรัมแห้ง ส่วนต้นทุนการผลิตของการอบแห้งแบบปกติที่ 20 30 และ 40 เซนติเมตร คือ 6.21 4.95 และ 5.17 บาทต่อกิโลกรัมแห้ง เนื่องจาก

การอบแห้งแบบสลับทิศทางลมร้อนใช้จำนวนแรงงานในการสลับลมร้อนน้อยกว่าการใช้แรงงานคนในการพลิกกลับ จึงทำให้ต้นทุนในด้านแรงงานของวิธีการสลับลมร้อนน้อยกว่าวิธีการอบแห้งแบบปกติในทุก ๆ ชั้นความหนา และเมื่อทำการวิเคราะห์ต้นทุน โดยใช้วิธีการทางสถิติพบว่า ต้นทุนการใช้แก๊ส LPG และต้นทุนแรงงาน ไม่แตกต่างกันทางสถิติ($P \geq 0.05$) ดังนั้นข้อได้เปรียบในการอบแห้งพริกไทยดำด้วยวิธีการสลับทิศทางลมร้อนที่ดีกว่าการอบแห้งแบบปกติ คือ การลดต้นทุนด้วยการใช้แรงงานที่น้อยกว่านั่นเอง

ตาราง 11 ต้นทุนปฏิบัติการอบแห้งพริกไทยดำต่อกิโลกรัมแห้ง ที่อบแห้งด้วยวิธีการอบแห้งแบบปกติ และแบบสลับทิศทางลมร้อน ที่ชั้นความหนาระดับต่าง ๆ โดยอบแห้งพริกไทยดำไม่เกิน 100 กิโลกรัม

ต้นทุน	จำนวนเงิน (บาท/กิโลกรัมแห้ง)					
	20 cm		30 cm		40 cm	
	ปกติ	สลับลมร้อน	ปกติ	สลับลมร้อน	ปกติ	สลับลมร้อน
ค่าแก๊ส LPG	2.68 ^b	2.52 ^b	1.84 ^b	2.01 ^b	1.91 ^b	2.06 ^b
ค่าไฟฟ้า	0.05 ^a	0.05 ^a	0.03 ^a	0.04 ^a	0.03 ^a	0.03 ^a
ค่าแรงงาน	3.49 ^b	2.46 ^b	3.07 ^b	2.02 ^b	3.23 ^b	1.71 ^b
รวม	6.21	5.03	4.95	4.06	5.17	3.80

หมายเหตุ ตัวอักษรที่เหมือนกันในแนวตั้ง หมายถึง ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติเมื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ย ($P \geq 0.05$)

ผลการวิเคราะห์ในระดับปฏิบัติการ ผู้วิจัยได้ทำการประมาณการขยายขนาดกำลังการอบแห้ง โดยประมาณการจากข้อมูลที่ผู้ประกอบการกำหนดให้ มิได้ทำการทดลองจริงเนื่องจากติดข้อกำหนดในการไม่สามารถตัดแปลงเตาอบแห้งระดับอุตสาหกรรมของผู้ประกอบการ การวิเคราะห์ต้นทุนเมื่อมีการอบแห้งพริกไทยดำในระดับอุตสาหกรรมไม่เกิน 600 กิโลกรัม โดยใช้ชั่วโมงในการทำงานเป็นตัววิเคราะห์ กำหนดให้วิธีการอบแห้งแบบปกติมีการพลิกกลับทุก ๆ 30 นาที และการอบแห้งแบบสลับทิศทางลมร้อนมีการอบแห้งทุก ๆ 1 ชั่วโมง เวลาในการอบแห้ง 2.5 ชั่วโมง ค่าแรงงานขั้นต่ำ 300 บาทต่อวัน (กระทรวงแรงงาน, 2555) คิดเป็น 37.5 บาทต่อชั่วโมง เปรียบเทียบระหว่างการอบแห้งแบบปกติ และการอบแห้งแบบสลับทิศทางลมร้อน ดังแสดงในตาราง 11 พบว่า ต้นทุนแรงงานของวิธีการอบแห้งแบบปกติ และแบบสลับทิศทางลมร้อน คือ 0.318

และ 0.086 บาทต่อกิโกรัมแห้ง ตามลำดับ โดยการอบแห้งแบบปกติมีต้นทุนของแรงงานที่ใช้ในการพลิกกลับพริกไทยสูงกว่าการอบแห้งแบบสลับทิศทางลมร้อน เนื่องจาก วิธีการอบแห้งแบบปกติต้องใช้แรงงานในการพลิกกลับพริกไทย 6 คน ในขณะที่แรงงานที่ใช้ในการสลับทิศทางลมร้อนมีเพียง 1 คนเท่านั้น ซึ่งการอบแห้งแบบสลับลมร้อนสามารถลดต้นทุนแรงงานลงได้ 73 เปอร์เซ็นต์

ตาราง 12 ต้นทุนด้านแรงงานปฏิบัติการอบแห้งพริกไทยต่อกิโกรัมแห้ง ที่อบแห้งด้วยวิธีการอบแห้งแบบปกติ และแบบสลับทิศทางลมร้อน โดยอบแห้งพริกไทยค่าไม่เกิน 600 กิโกรัม

การทำงาน	Man hour (ชั่วโมง)		ต้นทุน (บาท)	
	ปกติ	สลับลมร้อน	ปกติ	สลับลมร้อน
บรรจุพริกไทย	0.50	0.50	18.75	18.75
แรงงานพลิกกลับ	3.50	-	131.25	-
แรงงานสลับลมร้อน	-	0.03	-	1.25
พริกไทยออกเตา	0.75	0.75	28.125	28.125
รวม	4.75	1.28	178.13	48.13
ต้นทุนแรงงานต่อหน่วย (บาท/กิโกรัมแห้ง)			0.318	0.086

การวิเคราะห์จุดคุ้มทุน และระยะเวลาคืนทุน

การวิเคราะห์หาจุดคุ้มทุน และระยะเวลาคืนทุน วิเคราะห์โดยสมมติฐานว่าหากมีการลงทุนเกิดขึ้น โดยตัดแปลงเตาอบแห้งระดับอุตสาหกรรมที่ผู้ประกอบการใช้อยู่ให้เป็นแบบสลับทิศทางลมร้อน รายละเอียดการวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์ดังกล่าวได้นำเสนอดังต่อไปนี้

กำหนดให้

1. สมมติฐานการวิเคราะห์ จากการทดลองต้นทุน การปรับปรุงกระบวนการอบแห้ง กระทำในส่วนเตาอบแห้งที่มีอยู่แล้ว ดังนั้นการวิเคราะห์จะคิดคำนวณเฉพาะส่วนสลับทิศทางลมร้อน และวิเคราะห์ในกระบวนการอบแห้งเท่านั้น

2. ไม่คิดค่าแก๊ส LPG และพลังงานไฟฟ้า เนื่องจากต้นทุนการใช้แก๊ส LPG และพลังงานไฟฟ้า ของการอบแห้งทั้ง 2 วิธี ไม่แตกต่างกันทางสถิติ (จากการทดลอง)

3. ไม่คิดค่าต้นทุนการตลาด ค่าโซห่วยการดำเนินงาน ค่าโรงเรือน และที่ดิน

4. ค่าใช้จ่ายในการดำเนินงานปรับปรุง 100,000 บาทต่อเครื่อง

5. อายุการใช้งาน 10 ปี

6. มูลค่าซากส่วนสลับลมร้อน ร้อยละ 5

7. ค่าซ่อมบำรุงรักษา 5,000 บาทต่อปี

8. ค่าดอกเบี้ยเงินกู้ร้อยละ 8 ต่อปี

9. ค่าแรงงาน 300 บาทต่อวัน (คิดเฉพาะแรงงานที่ใช้ในการพลิกกลับ)

10. กำตั้งการผลิตพริกไทยดำ 1 เตาอบขนาด 600 กิโลกรัม จะได้พริกไทยดำแห้ง 560 กิโลกรัมต่อเตา

10.1 มีการผลิต 2 รอบต่อวัน 1,120 กิโลกรัมแห้งต่อวัน

10.2 กำหนดให้มีการผลิต 2 วันต่อสัปดาห์ 2,240 กิโลกรัมแห้งต่อสัปดาห์

10.3 กำตั้งผลิตใน 1 ปี หรือ 104 วันต่อปี 116,480 กิโลกรัมแห้งต่อปี

11. ราคารับซื้อเมล็ดพริกไทยดำ 232 บาทต่อกิโลกรัม

12. ราคาขายเมล็ดพริกไทยดำแห้ง 270 บาทต่อกิโลกรัม (กระทรวงพาณิชย์, 2556)

จากข้อกำหนดข้างต้น นำข้อมูลดังกล่าวมาวิเคราะห์หาต้นทุนคงที่ ต้นทุนผันแปร จุดคุ้มทุน ระยะเวลาการคืนทุน ดังรายละเอียดต่อไปนี้

1. ต้นทุนคงที่ วิเคราะห์จากผลรวมของต้นทุน 2 ส่วน ได้แก่

1.1 ค่าเสื่อมราคา อุปกรณ์สลับทิศทางลมร้อน คำนวณจากค่าใช้จ่ายในการปรับปรุงลมด้วยราคาซากหารด้วยอายุการใช้งาน ดังแสดงในสมการ 8

สมการ 8

$$\text{ค่าเสื่อมราคา} = (P - L) / N$$

เมื่อ P คือ ค่าใช้จ่ายการปรับปรุงห้อง (บาท)

L คือ ราคาซากอุปกรณ์สลับทิศทางลมร้อน (บาท)

N คือ อายุการใช้งาน (ปี)

$$\begin{aligned}\text{ดังนั้น ค่าเสื่อมราคาส่วนสลับลมร้อน} &= (100,000 - 5,000) / 10 \\ &= 9,500 \text{ บาทต่อปี}\end{aligned}$$

1.2 ค่าดอกเบี้ยการลงทุน คำนวณจากเงินลงทุนทั้งหมดคูณด้วยอัตราดอกเบี้ย โดยสมมติให้เป็นอัตราดอกเบี้ยคงที่ ดังสมการ 9

สมการ 9

$$\text{อัตราดอกเบี้ย} = P \times (8/100)$$

เมื่อ i คือ อัตราดอกเบี้ยต่อปี (ร้อยละ)

$$\begin{aligned}\text{ดังนั้น ค่าดอกเบี้ยการลงทุน} &= 100,000 \times (8/100) \\ &= 8,000 \text{ บาทต่อปี}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{ดังนั้น ต้นทุนคงที่รวม} &= \text{ค่าเสื่อมราคาส่วนสลับทิศทางลมร้อน} + \text{ค่าดอกเบี้ย} \\ &= 9,500 + 8,000 \text{ บาทต่อปี} \\ &= 17,500 \text{ บาทต่อปี}\end{aligned}$$

2 ต้นทุนผันแปร ได้แก่ ค่าวัตถุดิบพริกไทยดำ ค่าแรงงาน และค่าซ่อมบำรุงรักษา มีรายละเอียด ดังนี้

2.1 ค่าวัตถุดิบพริกไทยดำ 1,200 กิโลกรัมต่อวัน ราคา 232 บาทต่อกิโลกรัม

$$\begin{aligned}\text{ดังนั้น ค่าวัตถุดิบ} &= (1,200 \times 232) \times 104 \text{ บาทต่อปี} \\ &= 28,953,600 \text{ บาทต่อปี}\end{aligned}$$

2.2 ค่าแรงงานในการพลิกกลับ โดยคำนวณจาก จำนวนคน×ค่าแรง×จำนวนวันการทำงาน

$$\begin{aligned}\text{ดังนั้น ค่าแรงงาน} &= (2 \times 300) \times 104 \text{ บาทต่อปี} \\ &= 62,400 \text{ บาทต่อปี}\end{aligned}$$

2.3 ค่าซ่อมบำรุงรักษา 5,000 บาทต่อปี

ดังนั้น ต้นทุนผันแปรรวม = ค่าวัตถุดิบ + ค่าแรงงานในการพลิกกลับ + ค่าซ่อมบำรุงรักษา

$$= 28,953,600 + 62,400 + 5,000 \text{ บาทต่อปี}$$

$$= 29,021,000 \text{ บาทต่อปี}$$

ดังนั้น ต้นทุนในการผลิตทั้งหมด = ต้นทุนคงที่ + ต้นทุนผันแปร

$$= 17,500 + 29,021,000$$

$$= 29,038,500 \text{ บาทต่อปี}$$

3 จุดคุ้มทุน (n) วิเคราะห์จากปริมาณพริกไทยดำที่อบได้ ซึ่งทำให้เกิดรายได้เทียบเท่ากับต้นทุนรวม (ต้นทุนคงที่ + ต้นทุนผันแปร) เป็นรายปี มีค่าเท่ากับ

$$\text{รายได้ต่อปี} = \text{ต้นทุนรวมต่อปี}$$

ดังนั้น จุดคุ้มทุน (n) เท่ากับ

$$270 \text{ บาทต่อกิโลกรัม} \times n \text{ กิโลกรัมต่อปี} = 29,038,500 \text{ บาทต่อปี}$$

$$n = (29,038,500 / 270) \text{ กิโลกรัมต่อปี}$$

$$n = 107,550 \text{ กิโลกรัมต่อปี}$$

หรือ = 107.55 ตันต่อปี

4 ระยะเวลาคืนทุน (b) วิเคราะห์จาก จำนวนวัน ณ กำไรรวมสุทธิ ที่เกิดขึ้นจากการอบแห้งพริกไทยดำ เท่ากับมูลค่าการลงทุนของต้นทุนคงที่ มีค่าเท่ากับ

$$(\text{รายได้} - \text{รายจ่าย}) \times b = \text{การลงทุนของต้นทุนคงที่}$$

โดย

$$\text{รายได้จากการอบแห้งพริกไทยดำ} = 31,449,600 \text{ บาทต่อปี}$$

$$\text{รายจ่ายอบแห้งพริกไทยดำ} = 29,038,500 \text{ บาทต่อปี}$$

$$\text{รายได้} - \text{รายจ่าย} = 2,411,100 \text{ บาทต่อปี}$$

$$\text{ดังนั้น } 2,411,100 \text{ บาทต่อปี} \times b = 100,000 \text{ บาทต่อปี}$$

$$= (100,000 \text{ บาท}) / 2,411,100 \text{ บาทต่อปี}$$

$$= 0.041 \text{ ปี หรือ } = 15 \text{ วัน}$$

สรุปการวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์

จากการวิเคราะห์ต้นทุนในระดับการทดลอง พบว่า ต้นทุนการผลิต (ต้นทุนแก๊ส LPG ต้นทุนแรงงาน และต้นทุนไฟฟ้า) ของการอบแห้งแบบสลับทิศทางลมทิศทางร้อนน้อยกว่า ต้นทุนการผลิตของการอบแห้งแบบปกติ และเมื่อทำการวิเคราะห์ค่าสถิติ F-test ด้วยวิธีวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 พบว่า ต้นทุนอย่างน้อย 2 ต้นทุนไม่แตกต่างกัน และเมื่อทำการทดสอบต่อเนื่องด้วยวิธีการทดสอบแบบจับคู่พหุคูณ (Multiple comparison test) ด้วยวิธี Duncan พบว่า ต้นทุนแก๊ส LPG และต้นทุนแรงงาน ไม่แตกต่างกันทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ดังนั้นในทางปฏิบัติแล้วการลดต้นทุนที่สามารถทำได้ง่าย คือ การลดต้นทุนด้านแรงงาน

หลังจากนั้นผู้วิจัยได้ทำการประมาณการขยายขนาดกำลังการอบแห้ง โดยประมาณการจากข้อมูลของผู้ประกอบการกำหนดให้ มิได้ทำการทดลองจริง ในการอบแห้งการอบแห้งพริกไทยดำไม่เกิน 600 กิโลกรัม เพื่อวิเคราะห์ต้นทุนการใช้แรงงาน โดยใช้ชั่วโมงการทำงานของแรงงานเป็นตัววิเคราะห์ พบว่าการอบแห้งแบบสลับทิศทางลมร้อนสามารถลดต้นทุนด้านแรงงานลงได้ 73 เปอร์เซ็นต์ และเมื่อทำการวิเคราะห์จุดคุ้มทุน และระยะเวลาคืนทุน สำหรับการลงทุนในการดัดแปลงเตาอบแห้ง 100,000 บาท พบว่าจุดคุ้มทุน เท่ากับ 107.55 ต้นต่อปี และระยะเวลาคืนทุน 15 วัน

บทที่ 5

สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุปผลการศึกษา

จากการศึกษาการอบแห้งพริกไทยดำเปรียบเทียบวิธีการอบแห้ง 2 วิธี คือ การอบแห้งแบบปกติ (ใช้คนในการพลิกกลับพริกไทยทุก ๆ 30 นาที) และการอบแห้งแบบสลับทิศทางลมร้อน (สลับทิศทางลมร้อนทุก ๆ 1 ชั่วโมง) ที่ชั้นความหนาพริกไทยดำ 3 ระดับ คือ 20 30 และ 40 เซนติเมตร พบว่า เวลาอบแห้งของการอบแห้งทั้ง 2 วิธี ไม่แตกต่างกันทางสถิติ ($P \geq 0.05$) โดยเวลาในการอบแห้งของวิธีการอบแห้งแบบปกติที่ชั้นความหนาพริกไทยดำ 3 ระดับ คือ 20 30 และ 40 เซนติเมตร คือ 2.5 2.5 และ 3.5 ชั่วโมง ตามลำดับ และเวลาในการอบแห้งของวิธีการอบแห้งแบบสลับทิศทางลมร้อนที่ชั้นความหนาพริกไทยดำ 3 ระดับ คือ 20 30 และ 40 เซนติเมตร คือ 2.5 3 และ 3.25 ชั่วโมง ตามลำดับ โดยสมการแบบจำลองของ Page มีความเหมาะสมสำหรับการอบแห้งพริกไทยดำแบบสลับทิศทางลมร้อน สำหรับค่าสีของพริกไทยดำที่ได้จากการทดลองที่ชั้นความหนาระดับต่าง ๆ ด้วยการอบแห้ง 2 วิธีมีค่า L^* , a^* และ b^* ไม่แตกต่างกันทางสถิติ ($P \geq 0.05$) ค่าแอดอร์แอกติวิตี (a_w) มีค่าประมาณ 0.600 ทุกการทดลอง ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของการอบแห้งแบบปกติที่ 20 30 และ 40 เซนติเมตร คือ 76.71 54.26 และ 51.24 เมกะจูลต่อกิโลกรัมน้ำ ($\text{MJ}/\text{kg}_{\text{water}}$) ตามลำดับ สำหรับค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของการอบแห้งแบบสลับลมร้อนที่ 20 30 และ 40 เซนติเมตร คือ 84.42 54.28 และ 54.57 เมกะจูลต่อกิโลกรัมน้ำ ($\text{MJ}/\text{kg}_{\text{water}}$) ตามลำดับ

จากการวิเคราะห์ต้นทุนในระดับการทดลอง พบว่า ต้นทุนการผลิต (ต้นทุนแก๊ส LPG ต้นทุนแรงงาน และต้นทุนไฟฟ้า) ของการอบแห้งแบบสลับทิศทางลมร้อนน้อยกว่าต้นทุนการผลิตของการอบแห้งแบบปกติ และเมื่อทำการวิเคราะห์ทางสถิติพบว่า ต้นทุนแก๊ส LPG และต้นทุนแรงงานไม่แตกต่างกันทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ดังนั้นในทางปฏิบัติแล้วการลดต้นทุนที่สามารถทำได้ง่าย คือ การลดต้นทุนด้านแรงงาน

จากการประมาณการขยายขนาดกำลังการอบแห้งในการอบแห้งการอบแห้งพริกไทยดำไม่เกิน 600 กิโลกรัม เพื่อวิเคราะห์ต้นทุนการใช้แรงงาน โดยใช้ชั่วโมงการทำงานของแรงงานเป็นตัววิเคราะห์ พบว่า การอบแห้งแบบสลับลมร้อนสามารถลดต้นทุนด้านแรงงานลงได้ 73 เปอร์เซ็นต์ และเมื่อทำการวิเคราะห์จุดคุ้มทุน และระยะเวลาคืนทุน เมื่อมีการลงทุนในการ

ดัดแปลงเตาอบแห้ง 100,000 บาท พบว่า จุดคุ้มทุน เท่ากับ 107.55 ต้นต่อปี และระยะเวลาคืนทุน 15 วัน

ข้อเสนอแนะ

จากการทดลองการอบแห้งพริกไทยดำแบบสลับทิศทางลมร้อน มีการทดลองเพื่อเปรียบเทียบวิธีการอบแห้งเท่านั้น เนื่องจากมีข้อจำกัดเรื่องวัตถุดิบที่ใช้ในการทดลอง ดังนั้นควรมีการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการอบแห้งพริกไทยดำเพิ่มเติม เช่น ความเร็วลม อุณหภูมิ และระยะเวลาในการสลับลมร้อน เป็นต้น

บรรณานุกรม

- กรรณิการ์ มณีบุญ. 2549. การจัดการพลังงานของเครื่องอบแห้งลำไยแบบได้หวั่น. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท. มหาวิทยาลัยเชียงใหม่. 158 น.
- กระทรวงพาณิชย์. 2556. ราคาสินค้าเกษตรในพื้นที่กรุงเทพฯ (พริกไทยดำ อย่างดี). [ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา http://www.dit.go.th/pricelist/showannual_all.asp (22 พฤศจิกายน 2555).
- กระทรวงแรงงาน. 2555. ประกาศคณะกรรมการค่าจ้าง เรื่อง อัตราค่าจ้างขั้นต่ำ (ฉบับที่ ๗). [ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา <http://www.ftijob.com/news/detail.aspx?id=1879> (16 ตุลาคม 2556).
- จาดุพงษ์ วาฤทธิ รัชฎ เชื้อวิโรจน์ อานันท์ สีห์พิทักษ์เกียรติ และเจดศักดิ์ พิงพราวลี. 2552. การพัฒนาชุดสมองกลเพื่อควบคุมเตาอบแห้งลำไยแบบสลับทิศทางลมร้อน. เชียงใหม่: คณะวิศวกรรมและอุตสาหกรรมเกษตร. มหาวิทยาลัยแม่โจ้. 108 น.
- จิตติมณฑน์ วงศ์ษา. 2549. การปรับปรุงเครื่องสีเปลือกแบบจานหมุนสำหรับพริกไทยดำ. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี. 56 น.
- ใจทิพย์ วานิชชัง ผดุงศักดิ์ วานิชชัง มานพ ลีโกมลชัย และไพโรจน์ รัตนนัย. 2549. การพัฒนาเครื่องอบแห้งพริกไทยสำหรับเกษตรกร. วารสารวิทยาศาสตร์เกษตร 37(2). 166-169.
- ชัยยนต์ ชีโนกุล. 2549. การวิเคราะห์การลงทุนทางอุตสาหกรรม 2. กรุงเทพฯ: ห้างหุ้นส่วนจำกัด วี.เจ. พรินติ้ง. 206 น.
- ชมพูนุช กุลเกตุวงศ์ และดิษฐพร คงโสธานนท์. 2552. การเปรียบเทียบวิธีการอบแห้งเมล็ดพริกไทย. ใน การประชุมวิชาการสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 10 ประจำปี 2552. 1 - 3 เมษายน 2552. ณ สุรสัมมนาการ. นครราชสีมา: มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- ณรงค์ อึ้งกิมบัววน อรุมา หนูทอง และ ภาณุพงศ์ บุญเพียร. 2554. สมบัติทางฟิสิกส์เชิงความร้อนของเมล็ดพริกไทย (*Piper nigrum L.*). วารสารวิทยาศาสตร์เกษตร 42(1): 326-329.
- ธัญญ์ยศ สมใจ ศิวะ อัจฉริยวิริยะ อารีย์ อัจฉริยวิริยะ และกอดขวัญ นามสงวน. 2552. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการอบแห้งลำไยแบบคว้านเมล็ดออกแบบสองขั้นตอนด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งและลมร้อน. ใน การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 23. 4 - 7 พฤศจิกายน 2552. เชียงใหม่: มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.

- นียนานู อินตะแก้ว (Niyanat@nithifoods.co.th). 2555. การอบแห้งพริกไทยดำ. จดหมายอิเล็กทรอนิกส์ ถึง วิชา เทพปินดา (micky-min-ny@hotmail.com). 22 สิงหาคม.
- ผดุงศักดิ์ วานิชชัง ใจทิพย์ วานิชชัง และนฤมล บุญกระจ่าง. 2548. การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการขัดขาวพริกไทย. ชลบุรี: คณะเกษตรศาสตร์บางพระ สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล ตะวันออก. 60 น.
- พัฒนาภรณ์ ใจอุดม. 2542. การอบแห้งพริกขี้หนูด้วยเครื่องอบแห้งระบบสลับหมุนเวียนลมร้อน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท. มหาวิทยาลัยเชียงใหม่. 76 น.
- พิมพ์เพ็ญ พรเฉลิมพงศ์ และนิธิยา รัตนานพนธ์. 2553. **Water activity / แอคติวิตีของน้ำ**. [ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา <http://www.foodnetworksolution.com/wiki/word/0551/water-activity> (16 ตุลาคม 2556).
- เพชรรัตน์ ใจบุญ. 2549. การศึกษาเปรียบเทียบการอบแห้งลำไยด้วยเทคนิคแบบต่าง ๆ. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี. 171 น.
- มนัสวี สุกุลแก้ว สุกศักดิ์ ลิมปิติ และทวิชัย นิมาแสง. 2545. การอบแห้งลำไยชนิดแกะเปลือกด้วยเครื่องลดความชื้นแบบสลับทิศทางอากาศร้อน. วารสารวิทยาศาสตร์เกษตร 6(พิเศษ): 150-154.
- วิวัฒน์ อภิสัทธีภิญโญ. 2549. เศรษฐศาสตร์วิศวกรรม. กรุงเทพฯ: โอเดียนออฟต์แวร์เทคโนโลยี. 416 น.
- สุกศักดิ์ ลิมปิติ. 2544. การพัฒนาเครื่องอบลำไยทั้งเปลือกแห้งด้วยระบบสลับหมุนเวียนลมร้อน. เชียงใหม่: คณะเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่. 39 น.
- สนอง อมฤกษ์ ชัยวัฒน์ เผ่าสันต์พาศนิชย์ ปรีชา ชมเชียงคำ และเวียง อากรจี. 2554. การพัฒนาเครื่องอบแห้งลำไยทั้งเปลือกระดับเกษตรกร. วารสารวิทยาศาสตร์เกษตร 42(1): 517-520.
- สุนิษฐ์รัตน์ ดุ้ยดา. 2544. การศึกษาการอบแห้งลำไยแบบแกะเปลือกด้วยเครื่องอบแห้งแบบสลับทิศทางลมร้อน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท. มหาวิทยาลัยเชียงใหม่. 96 น.
- สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร. 2552. **พริกไทย**. [ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา <http://www.it.doa.go.th/vichakan/news.php?newsid=27> (16 สิงหาคม 2555).
- เหมการ์ จินดาวงศ์. 2545. การศึกษาแบบจำลองการทำแห้งระบบสุญญากาศร่วมกับไมโครเวฟกับพริกไทย. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี. 132 น.
- อภิรักษ์ เพ็ชรมงคล. 2551. **ปฏิบัติการด้านวิศวกรรมอาหาร**. พิมพ์ครั้งที่ 2. เชียงใหม่: หน่วยพิมพ์และผลิตเอกสาร สำนักงานเลขาธิการ คณะเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่. 177 น.

- อัจฉรา แซ่ไคว์ สุภรรณ ฐิระวณิชย์กุล และยุทธนา ฐิระวณิชย์กุล. 2556. ปัจจัยของการอบแห้งด้วยพลังงานความร้อนแบบการพา และการแผ่รังสีความร้อนที่มีต่ออุณหภูมิศาสตร์ และคุณภาพพริกไทยดำ. *วารสารวิทยาศาสตร์บูรพา* 8(1): 166-180.
- อารีย์ อัจฉริยวิริยะ กรรณิการ์ มณีบุญ และวิจิตร เจริญธง. 2550. สมรรถนะของเครื่องอบแห้งแบบกระบอกสำหรับการอบแห้งลำไย. ใน *การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 21*. 17-19 ตุลาคม 2550. ชลบุรี: โรงเรียนนายเรืออากาศ.
- อำไพศักดิ์ ทีบุญมา และ ศักชัย จงจำ. 2553. การอบแห้งจึงด้วยเทคนิคสุญญากาศร่วมกับอินฟราเรด. *วารสารวิทยาศาสตร์บูรพา* 15(2): 76-86.
- อิทธิพล แก่งสันเทียะ อำนาจ บุญลอย ประสิทธิ์ คำพันธ์ิม และพงษ์เจต พรหมวงศ์. 2550. การอบแห้งพริกไทยในห่อมีกริบแบบฟลูอิดไดซ์หมุนควง. ใน *การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 21*. 17-19 ตุลาคม 2550. ชลบุรี: โรงเรียนนายเรืออากาศ.
- อุมาพร สีวิสัย. 2543. ผลของชั้นความหนาและขนาดของผลลำไยต่อคุณภาพหลังการอบแห้งทั้งผล. *วิทยานิพนธ์ปริญญาโท*. มหาวิทยาลัยเชียงใหม่. 82 น.
- Akpinar, E. K. and Y. Bicer. 2008. Mathematical modelling of thin layer drying process of long green pepper in solar dryer and under open sun **Energy Conversion and Management** 49 (2008): 1367–1375.
- Association of Official Analytical Chemists (AOAC). 1995. **Official methods of analysis of AOAC international**. Washington: Association of Official Analytical Chemists. 995 p.
- Brennan, J.G., J. R. Butters, N. D. Cowel and A. E. V. Lilley. 1990. **Food Engineering Operations**. 3rd ed. London: Elsevier Applied Science. 706 p.
- Dhash, P. H. A. and V. S. Korikanthinmayh. 2003. Processing and quality of black pepper. **Journal of Spices and Aromatic Crops** 12(1): 1-13.
- Doymaz, İ. 2012a. Air-drying characteristics of tomatoes **Journal of Food Engineering** 78 (2007): 1291–1297.
- _____. 2012b. Sun drying of seedless and seeded grapes **Journal of Food Science and Technology** 49(2): 214–220.
- Hall, C. W. 1980. **Drying and storage of agricultural crops**. USA: Westport. 381 p.
- Hiia, C. L., C. L. Lawb, M. Clokea and S. Suzannahb. 2009. Thin layer drying kinetics of cocoa and dried product quality. **Biosystems Engineering** 102 (2): 153–161.

- HunterLab. 2008. **Hunter L,a,b Color Scale**. [Online]. Available <http://202.28.24.44/department/fe/elearning/315Col11.PDF> (7 September 2012).
- Janjai, S., N. Lamlert, B. Mahayothee, P. Srumsiri, M. Precoppe, B.K. Bala. and J. Muller. 2011. Experimental and simulated performances of a batch-type longan dryer with air flow reversal using biomass burner as a heat source. **Drying Technology** 29(12): 1439-1451.
- Jay, J. M. 2000. **Modern Food Microbiology**. 6th ed. USA: Aspen Publisher, Inc. 679 p.
- Kaensup, W., S. Wongwises and S.Chutima. 1998. Drying of pepper seeds using a combined microwave/fluidized bed dryer. **Drying Technology** 16(3-5): 853-862.
- Kumar, N., B. C. Sarkar., H. K. Sharma. 2012. Mathematical modelling of thin layer hot air drying of carrot pomace **Journal of Food Science and Technology** 49(1): 33-41.
- Lewicki, P. P. 2006. Design of hot air drying for better foods. **Journal of Food Science and Technology** 17 (2006): 153-163.
- Maskan, A., S. Kaya and M. Maskan. 2002. Hot air and sun drying of grape leather (pestil). **Journal of Food Engineering** 54 (2002): 81-88.
- Swahn, J. O. 1992. **Black pepper (*piper nigrum*)**. London: Grange Books. 208 p.
- Yaldiz, O., C. Ertekin., H. I. Uzun. 2001. Mathematical modeling of thin layer solar drying of sultana grapes. **Energy** 26: 457-465.
- Zhao, H. W. and G. Chen. 2009. Heat and mass transfer in fixed-bed drying. **Chemical Engineering Science** 54 (1999): 4233-4243.



ภาคผนวก



ภาคผนวก ก

วัสดุ และอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง



ภาพผนวก 1 พริกไทยดำ



ภาพผนวก 2 เตาอบแห้งแบบสลับทิศทางลมร้อน ขนาด 1 ตัน (บริษัท เลิศลานนาไทย จำกัด)



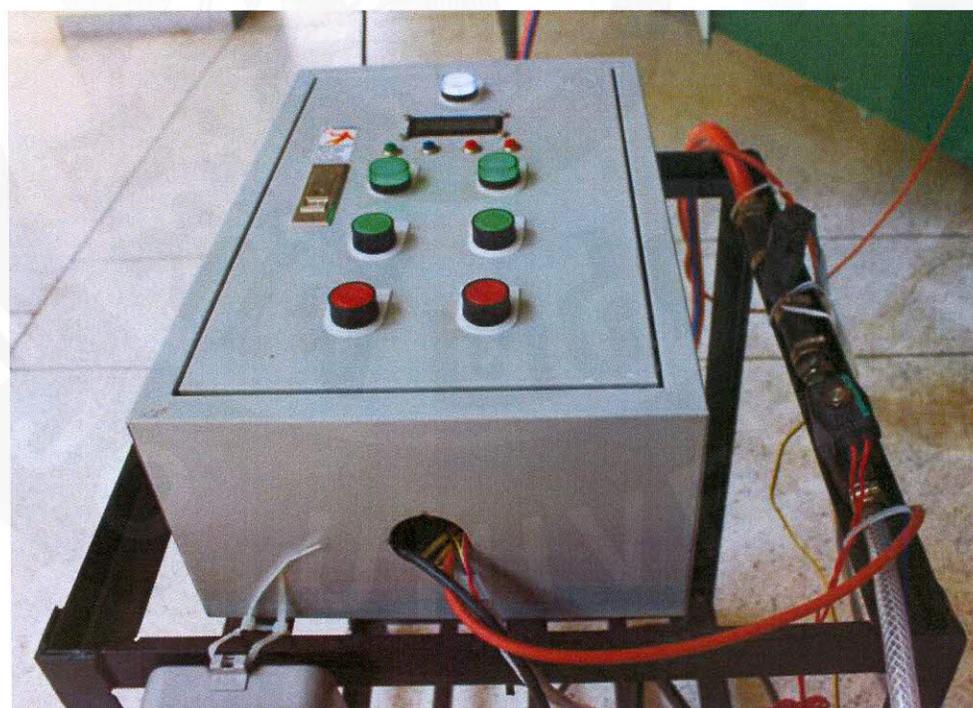
ภาพผนวก 3 แก๊ส LPG ขนาด 48 กิโลกรัม เชื้อเพลิงที่ใช้สำหรับการทดลอง



ภาพผนวก 4 ชุดอุปกรณ์เก็บข้อมูลอุณหภูมิ รุ่น 34970A (Agilent technology, Malaysia)



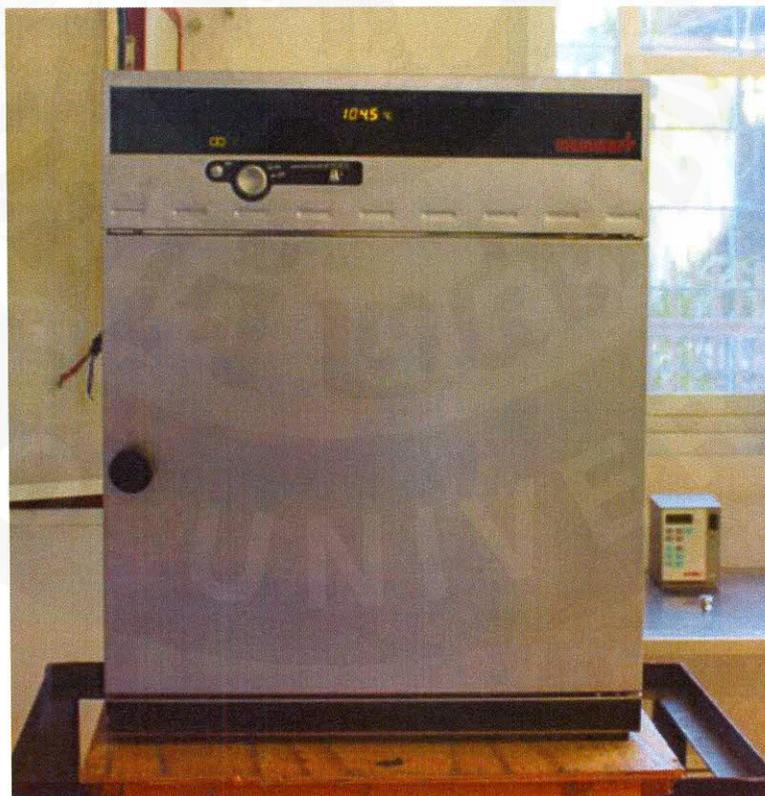
ภาพผนวก 5 เครื่องวัดอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์อากาศ รุ่น AP-104 (Sila, Thailand)



ภาพผนวก 6 ชุดควบคุมปริมาณแก๊ส



ภาพผนวก 7 เครื่องชั่งดิจิทัลรุ่น CP3202S (Sartorius AG, Germany)



ภาพผนวก 8 ตู้อบไล่ความชื้นแบบลมร้อน รุ่น G407.1225 (Mettler, Germany)



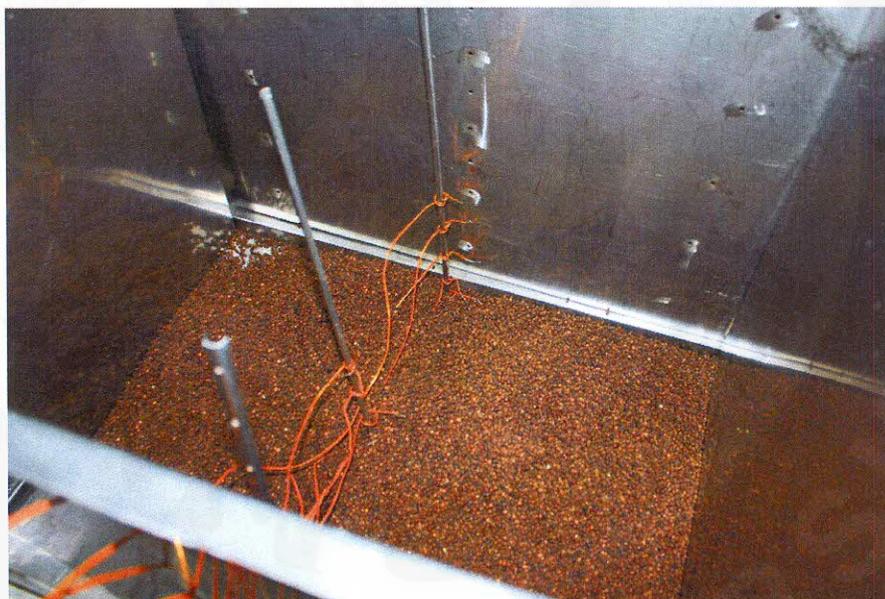
ภาพผนวก 9 อุปกรณ์ที่ใช้ในการพลิกกลับพริกไทย



ภาพผนวก 10 อุปกรณ์สูมตัวอย่างเม็ดพริกไทยดำเพื่อหาความชื้น



ภาพผนวก 11 เครื่องปิดปากถุง และอลูมิเนียมฟรอยที่ใช้เก็บตัวอย่าง



ภาพผนวก 12 ลักษณะการวางตำแหน่งวัดอุณหภูมิภายในชั้นพริกไทย



ภาคผนวก ข

ข้อมูลการทดลองการอบแห้งพริกไทยดำ

ตารางผนวก 1 ความชื้นเฉลี่ย (มาตรฐานแห้ง) สำหรับวิธีการอบแห้ง 2 วิธี ที่ชั้นความหนา 3 ระดับ

เวลา (ชั่วโมง)	20 cm		30 cm		40 cm	
	ปกติ	สลับลมร้อน	ปกติ	สลับลมร้อน	ปกติ	สลับลมร้อน
0	0.168	0.169	0.168	0.168	0.168	0.168
0.5	0.125	0.119	0.137	0.139	0.153	0.143
1	0.097	0.096	0.101	0.109	0.118	0.120
1.5	0.081	0.084	0.089	0.089	0.105	0.095
2	0.075	0.080	0.079	0.088	0.089	0.091
2.5	0.066	0.068	0.067	0.077	0.086	0.080
3				0.068	0.072	0.077
3.25					-	0.068
3.5					0.068	

ตารางผนวก 2 อัตราการอบแห้งเฉลี่ย (เปอร์เซ็นต์มาตรฐานแห้งชั่วโมง) สำหรับวิธีการอบแห้ง 2 วิธี ที่ชั้นความหนา 3 ระดับ

เวลา (ชั่วโมง)	20 cm		30 cm		40 cm	
	ปกติ	สลับลมร้อน	ปกติ	สลับลมร้อน	ปกติ	สลับลมร้อน
0.5	0.249	0.237	0.275	0.277	0.305	0.286
1	0.097	0.096	0.101	0.109	0.118	0.120
1.5	0.054	0.056	0.059	0.059	0.070	0.064
2	0.038	0.040	0.039	0.044	0.045	0.045
2.5	0.026	0.027	0.027	0.031	0.035	0.032
3				0.023	0.024	0.026
3.25						0.021
3.5					0.019	
เฉลี่ย	0.093	0.091	0.100	0.091	0.088	0.085

ตารางผนวก 4 ความชื้นภายในชั้นพริกไทยที่ระดับชั้นความหนาต่างๆ สำหรับวิธีการอบแห้งแบบสลับทิศทางลมร้อน

เวลา (ชั่วโมง)	20 เซนติเมตร			30 เซนติเมตร			40 เซนติเมตร		
	บน	กลาง	ล่าง	บน	กลาง	ล่าง	บน	กลาง	ล่าง
0	0.170	0.168	0.165	0.169	0.170	0.164	0.174	0.170	0.164
0.5	0.121	0.116	0.115	0.147	0.135	0.122	0.143	0.144	0.130
1	0.099	0.095	0.092	0.116	0.110	0.098	0.128	0.122	0.116
1.5	0.084	0.083	0.089	0.090	0.089	0.089	0.098	0.096	0.097
2	0.082	0.083	0.079	0.083	0.090	0.087	0.088	0.094	0.093
2.5	0.068	0.067	0.067	0.077	0.074	0.077	0.079	0.082	0.081
3				0.068	0.068	0.068	0.082	0.077	0.077
3.25							0.068	0.068	0.069

ตารางผนวก 3 ความชื้นภายในชั้นพริกไทยที่ระดับชั้นความหนาต่าง ๆ สำหรับวิธีการอบแห้งแบบปกติ

เวลา (ชั่วโมง)	20 เซนติเมตร			30 เซนติเมตร			40 เซนติเมตร		
	บน	กลาง	ล่าง	บน	กลาง	ล่าง	บน	กลาง	ล่าง
0	0.169	0.170	0.164	0.169	0.170	0.164	0.169	0.170	0.164
0.5	0.113	0.125	0.122	0.141	0.137	0.133	0.162	0.154	0.146
1	0.099	0.096	0.098	0.107	0.103	0.095	0.126	0.106	0.125
1.5	0.081	0.079	0.081	0.091	0.090	0.083	0.107	0.109	0.098
2	0.077	0.075	0.076	0.081	0.077	0.077	0.090	0.088	0.095
2.5	0.067	0.066	0.067	0.068	0.065	0.068	0.082	0.084	0.079
3							0.079	0.080	0.072
3.25							0.74	0.75	0.069
3.5							0.069	0.068	0.067

ตารางผนวก 5 อุณหภูมิภายในชั้นพริกไทยที่ระดับชั้นความหนาต่างๆ สำหรับวิธีการอบแห้งแบบปกติ

เวลา (ชั่วโมง)	20 เซนติเมตร			30 เซนติเมตร			40 เซนติเมตร		
	บน	กลาง	ล่าง	บน	กลาง	ล่าง	บน	กลาง	ล่าง
0	28.7	28.6	29.0	28.7	28.6	29.0	30.0	29.6	30.2
0.25	37.7	70.1	106.5	37.7	70.1	106.5	36.9	44.9	100.8
0.5	48.9	92.9	104.6	48.9	92.9	104.6	38.0	68.4	103.0
0.75	79.9	99.2	107.3	79.9	99.2	107.3	49.6	92.7	102.5
1	90.5	105.3	110.8	90.5	105.3	110.8	75.9	87.6	101.3
1.25	98.2	107.2	107.1	98.2	107.2	107.1	79.3	100.2	109.1
1.5	90.3	98.1	101.7	90.3	98.1	101.7	84.8	103.5	112.7
1.75	99.6	101.7	102.4	99.6	101.7	102.4	91.9	107.3	109.3
2	102.2	104.3	105.9	102.2	104.3	105.9	95.8	106.3	106.5
2.25	102.3	103.8	105.2	102.3	103.8	105.2	98.9	105.9	108.5
2.5	102.3	106.0	105.3	102.3	106.0	105.3	99.4	106.9	108.5
2.75							103.3	107.5	109.3
3							101.2	107.8	105.5
3.25							102.2	104.3	105.9
3.5							102.3	103.8	105.2

ตารางผนวก 6 อุณหภูมิภายในชั้นพริกไทยที่ระดับชั้นความหนาต่าง ๆ สำหรับวิธีการอบแห้งแบบสลับทิศทางการลมร้อน

เวลา (ชั่วโมง)	20 เซนติเมตร			30 เซนติเมตร			40 เซนติเมตร		
	บน	กลาง	ล่าง	บน	กลาง	ล่าง	บน	กลาง	ล่าง
0	29.4	29.7	29.6	29.1	29.5	29.5	30.5	30.4	30.3
0.25	62.4	90.7	96.1	38.2	59.4	101.7	36.7	41.4	105.4
0.5	84.9	96.1	99.7	48.5	87.0	103.7	39.8	70.5	109.4
0.75	94.9	103.6	107.2	74.5	97.5	102.7	55.1	96.1	106.6
1	100.6	104.2	106.8	85.2	81.5	99.1	73.2	98.9	108.1
1.25	101.9	111.0	111.7	104.5	86.5	90.1	102.5	81.5	89.2
1.5	90.3	98.1	101.7	106.1	93.7	91.9	105.5	78.9	82.7
1.75	99.6	101.7	102.4	104.8	96.6	93.9	108.3	90.0	79.3
2	101.8	102.8	112.6	105.8	97.5	95.8	108.2	93.4	82.5
2.25	102.6	108.1	107.6	96.6	103.6	111.0	91.1	93.7	112.4
2.5	107.1	110.7	112.9	101.6	107.9	112.5	88.1	106.7	110.6
2.75				101.5	107.1	112.3	99.9	107.2	110.5
3				101.4	106.9	111.8	102.2	107.6	110.8
3.25							109.5	101.3	106.4

ตารางผนวก 7 อุณหภูมิขาเข้า ขาออก และสภาพแวดล้อมอากาศ

เวลา (ชั่วโมง)	20 เซนติเมตร						30 เซนติเมตร						40 เซนติเมตร					
	ปกติ		สลับทิศทางลมร้อน				ปกติ		สลับทิศทางลมร้อน				ปกติ		สลับทิศทางลมร้อน			
	in	out	abm	in	out	abm	in	out	abm	in	out	abm	in	out	abm	in	out	abm
0	30.4	30.4	30.4	29.1	29.1	29.1	30.1	30.1	30.1	30.0	30.0	30.0	31.0	31.0	31.0	31.3	31.3	31.3
0.25	102.9	68.9	32.2	100.0	54.4	30.5	100.0	41.0	31.3	100.0	41.4	31.1	100.0	38.4	32.8	100.0	39.3	32.7
0.5	104.2	85.3	33.2	100.0	80.3	31.2	100.0	51.4	32.3	100.0	59.6	31.6	100.0	40.6	33.8	100.0	43.0	33.5
0.75	110.6	91.9	33.7	100.0	95.7	32.9	100.0	78.0	33.4	100.0	85.0	32.5	100.0	59.6	35.5	100.0	51.6	34.4
1	110.5	95.6	34.4	100.0	99.9	33.6	100.0	90.4	35.8	100.0	88.7	32.9	100.0	69.6	35.7	100.0	69.4	35.3
1.25	111.0	99.9	36.3	100.0	93.9	33.7	100.0	97.4	36.4	100.0	86.7	34.1	100.0	77.9	36.5	100.0	94.3	36.9
1.5	111.0	103.5	36.6	100.0	93.1	34.4	100.0	99.8	36.6	100.0	88.8	34.4	100.0	81.5	37.2	100.0	90.7	37.7
1.75	111.1	102.4	37.9	100.0	92.9	35.2	104.5	100.2	37.0	100.0	81.0	35.4	100.0	88.7	38.1	100.0	89.4	38.4
2	112.5	102.1	37.8	100.0	92.7	34.9	104.5	102.0	37.1	100.0	92.1	35.1	100.0	92.6	38.4	100.0	90.7	38.8
2.25	112.9	102.6	37.8	100.0	99.1	36.5	104.5	103.0	37.4	100.0	97.0	35.8	100.0	96.3	39.1	100.0	89.8	39.0
2.5	112.8	102.9	37.9	100.0	99.5	36.6	104.5	104.5	37.5	104.0	103.4	36.3	100.0	96.9	39.0	100.0	86.4	39.3
2.75										103.4	102.5	36.4	100.0	98.2	39.5	100.0	99.9	39.7
3										103.4	101.0	36.9	100.0	98.8	39.8	102.0	101.3	39.9
3.25													100.0	99.4	40.0	100.0	97.3	40.8
3.5													100.0	99.0	40.2			

ตารางผนวก 8 ความชื้นสัมพัทธ์อากาศขาเข้า ขาออก และสภาพแวดล้อมอากาศ

เวลา (ชั่วโมง)	20 เซนติเมตร						30 เซนติเมตร						40 เซนติเมตร					
	ปกติ		สลับทิศทางลมร้อน				ปกติ		สลับทิศทางลมร้อน				ปกติ		สลับทิศทางลมร้อน			
	in	out	abm	in	out	abm	in	out	abm	in	out	abm	in	out	abm	in	out	abm
0	60	60	60	60	60	60	70	70	70	72	72	72	52	52	52	50	50	50
0.25	N/A	12	51	N/A	35	51	61	52	61	N/A	65	62	N/A	64	47	N/A	68	47
0.5	N/A	N/A	48	N/A	18	48	34	25	60	N/A	26	60	N/A	61	45	N/A	61	44
0.75	N/A	N/A	47	N/A	N/A	46	N/A	N/A	54	N/A	N/A	56	N/A	23	41	N/A	38	42
1	N/A	N/A	45	N/A	N/A	44	N/A	N/A	50	N/A	N/A	54	N/A	12	42	N/A	15	39
1.25	N/A	N/A	41	N/A	N/A	40	N/A	N/A	50	N/A	N/A	51	N/A	N/A	39	N/A	N/A	37
1.5	N/A	N/A	40	N/A	N/A	40	N/A	N/A	50	N/A	N/A	51	N/A	N/A	37	N/A	N/A	35
1.75	N/A	N/A	35	N/A	N/A	36	N/A	N/A	50	N/A	N/A	49	N/A	N/A	36	N/A	N/A	32
2	N/A	N/A	35	N/A	N/A	36	N/A	N/A	47	N/A	N/A	46	N/A	N/A	35	N/A	N/A	34
2.25	N/A	N/A	35	N/A	N/A	35	N/A	N/A	47	N/A	N/A	47	N/A	N/A	34	N/A	N/A	32
2.5	N/A	N/A	35	N/A	N/A	35	N/A	N/A	45	N/A	N/A	45	N/A	N/A	34	N/A	N/A	27
2.75										N/A	N/A	45	N/A	N/A	35	N/A	N/A	25
3										N/A	N/A	44	N/A	N/A	33	N/A	N/A	25
3.25													N/A	N/A	32	N/A	N/A	24
3.5													N/A	N/A	32			

หมายเหตุ 1. N/A หมายถึง เซ็นเซอร์วัดความชื้นสัมพัทธ์อากาศแสดงค่า error เนื่องจากอุณหภูมิที่วัด 100 องศาเซลเซียส สูงเกินพิกัดการวัดค่า

2. ที่ 30 เซนติเมตร ขณะที่ทำการทดลองเกิดฝนตก ทำให้ค่าความชื้นสัมพัทธ์สูงกว่าที่ขึ้นความหนาอื่นตลอดช่วงการทดลอง



ภาคผนวก ค

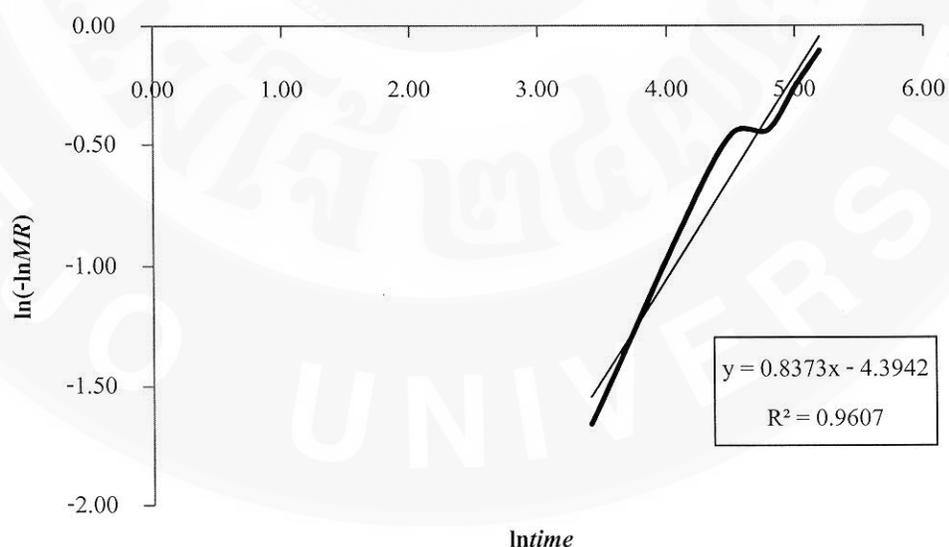
การคำนวณจุดนศาสตร์การอบแห้งของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการอบแห้งพริกไทยดำ

การทดลองการอบแห้งพริกไทยดำ ข้อมูลที่นำมาใช้ในการหาจลนศาสตร์การอบแห้งประกอบด้วย ปริมาณความชื้น และเวลาการอบแห้ง จากนั้นนำมาคำนวณหาอัตราส่วนความชื้น ดังแสดงในตารางผนวก 9 โดยยกตัวอย่างแบบจำลอง Page

ตารางผนวก 9 ปริมาณความชื้น และอัตราส่วนความชื้น

เวลา (นาที)	ปริมาณความชื้น (ทศนิยมมาตรฐานแห้ง)	อัตราส่วนความชื้น (ไร้หน่วย)
0	0.168	1.00
30	0.139	0.83
60	0.109	0.65
90	0.089	0.53
120	0.088	0.53
150	0.077	0.46
180	0.068	0.41



ภาพผนวก 13 การหาค่าคงที่การอบแห้งโดยการสร้างสมการเส้นตรง

ภาพผนวก 13 ทำการแปลงแบบจำลอง Page ให้เป็นสมการเส้นตรง ซึ่งจากความสัมพันธ์ของกราฟสามารถหาค่าคงที่ของการอบแห้งได้ ($k = 0.01235$) เมื่อนำค่าดังกล่าวมาทำนายอัตราส่วนความชื้นจะมีค่าดังตารางผนวก 10 โดยมีรูปแบบสมการแบบจำลอง Page ดังนี้

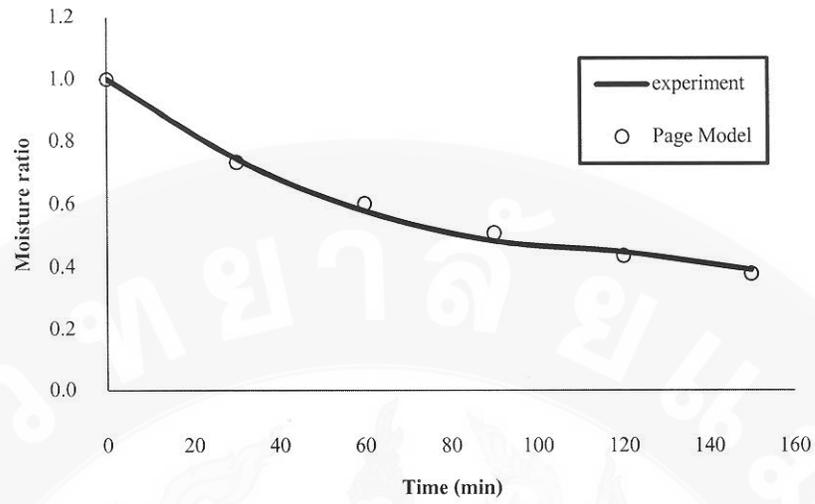
$$MR = \exp\left(\frac{10}{k}\right)(-kt^n)$$

$$\ln(-\ln MR) = (\ln k) + n(\ln \text{time})$$

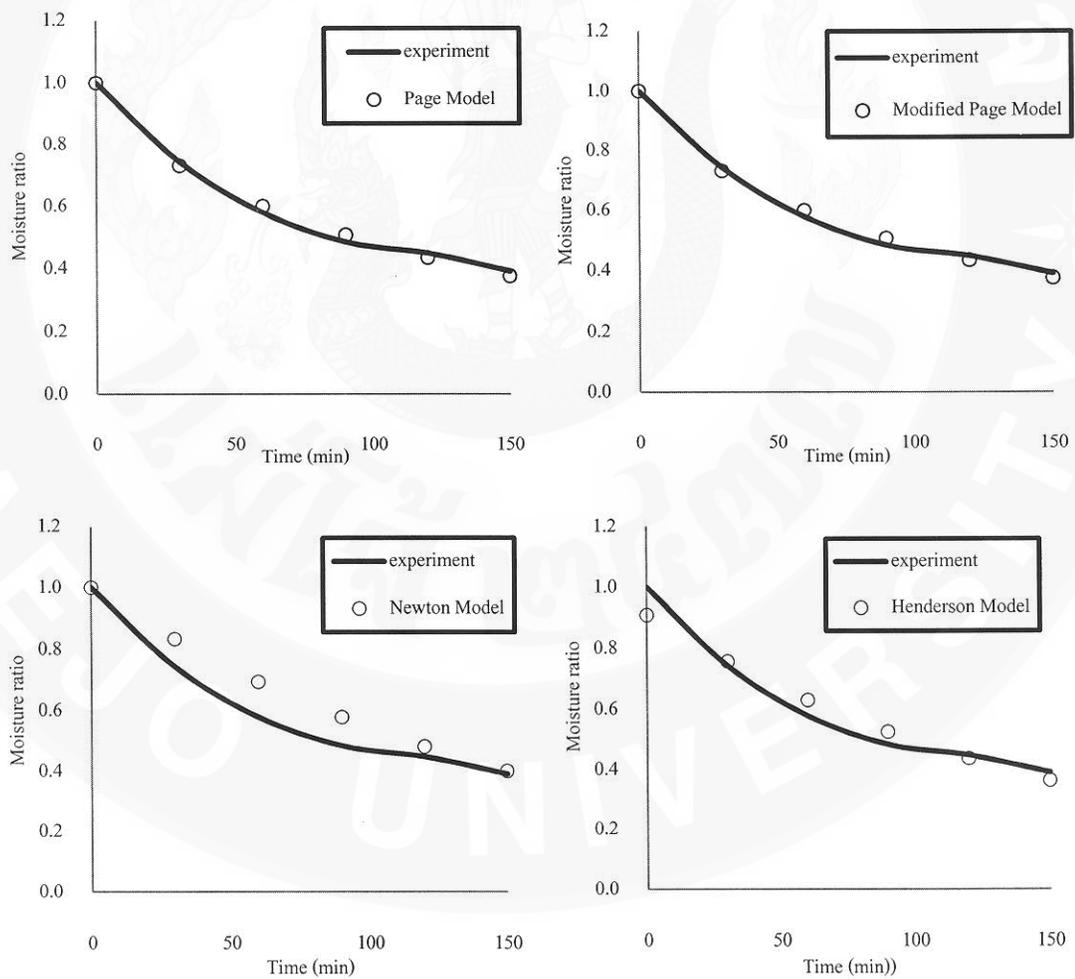
ตารางผนวก 10 การทำนายค่าอัตราส่วนความชื้น โดยใช้แบบจำลอง Page

แกน Y	แกน X	แบบจำลอง Page
Ln (-ln (MR))	Ln (Time)	MR
-	-	1.00
-1.66	3.40	0.81
-0.85	4.09	0.68
-0.46	4.50	0.59
-0.44	4.79	0.51
-0.25	5.01	0.44
-0.11	5.19	0.38

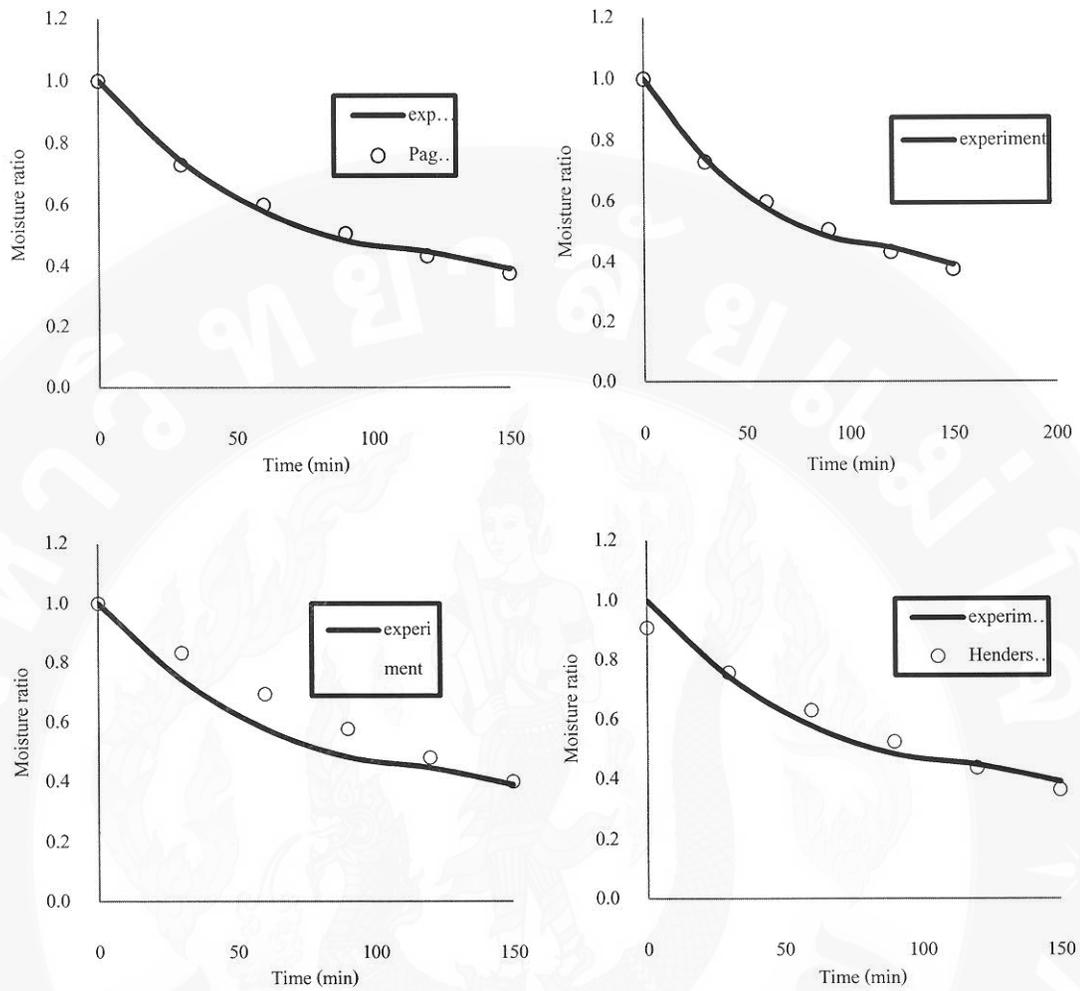
ทำการเปรียบเทียบอัตราส่วนความชื้นที่ได้จากข้อมูลการทดลองกับอัตราส่วนความชื้นที่ได้จากการทำนายของแบบจำลอง Page ดังแสดงในภาพผนวก 14 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าอัตราส่วนความชื้นที่ได้จากการทำนายมีแนวโน้มใกล้เคียงกับข้อมูลจากการทดลอง โดยอัตราส่วนความชื้นที่ได้จากการทำนายเทียบกับข้อมูลที่ได้จากการทดลองที่ขึ้นความหนา 20 30 และ 40 เซนติเมตร ด้วยการอบแห้งแบบปกติ แสดงในภาพผนวก 15 16 และ 17 ตามลำดับ แบบสลับทิศทางลมร้อน แสดงในภาพผนวก 18 19 และ 20



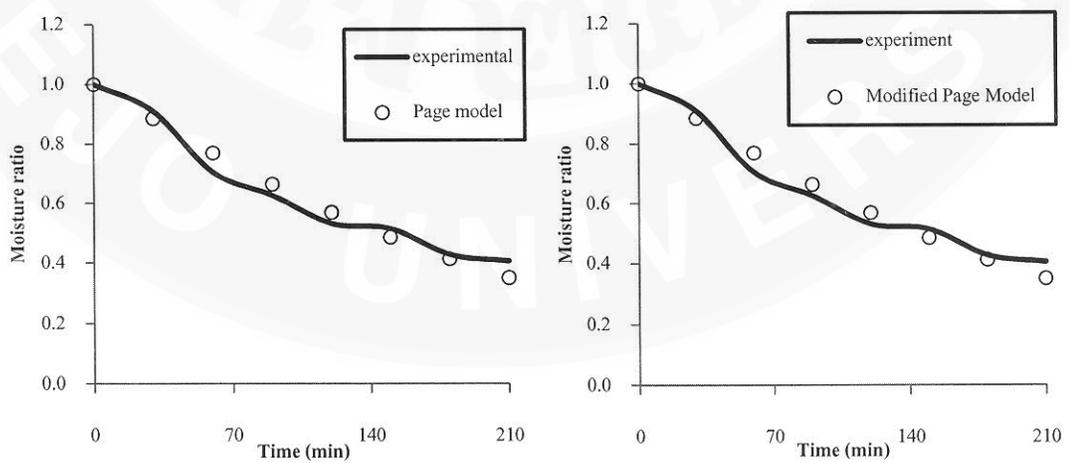
ภาพผนวก 14 อัตราส่วนความชื้นที่ได้จากการทำนายเทียบกับข้อมูลที่ได้จากการทดลอง



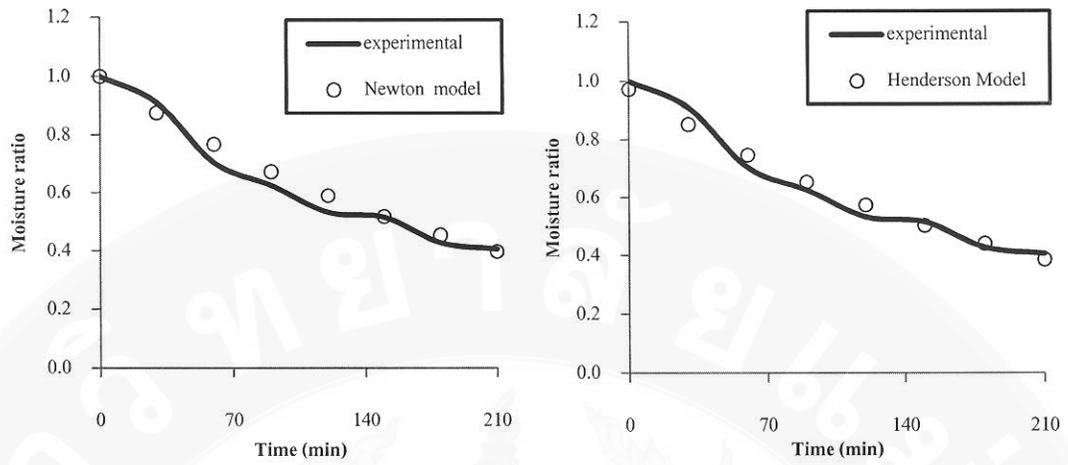
ภาพผนวก 15 อัตราส่วนความชื้นที่ได้จากการทำนายเทียบกับข้อมูลที่ได้จากการทดลองที่ชั้นความหนา 20 เซนติเมตร ด้วยการอบแห้งแบบปกติ



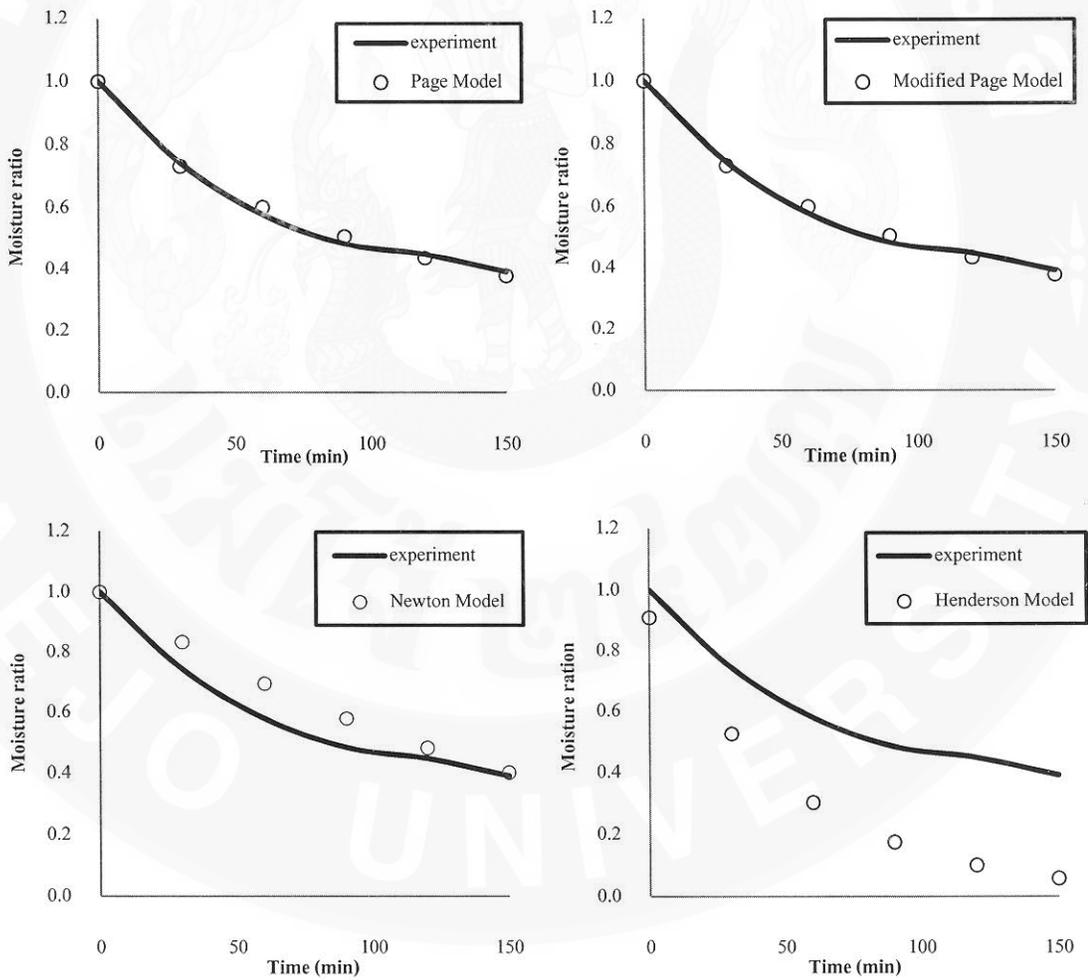
ภาพผนวก 16 อัตราส่วนความชื้นที่ได้จากการทำนายเทียบกับข้อมูลที่ได้จากการทดลองที่ขึ้น ความหนา 30 เซนติเมตร ด้วยการอบแห้งแบบปกติ



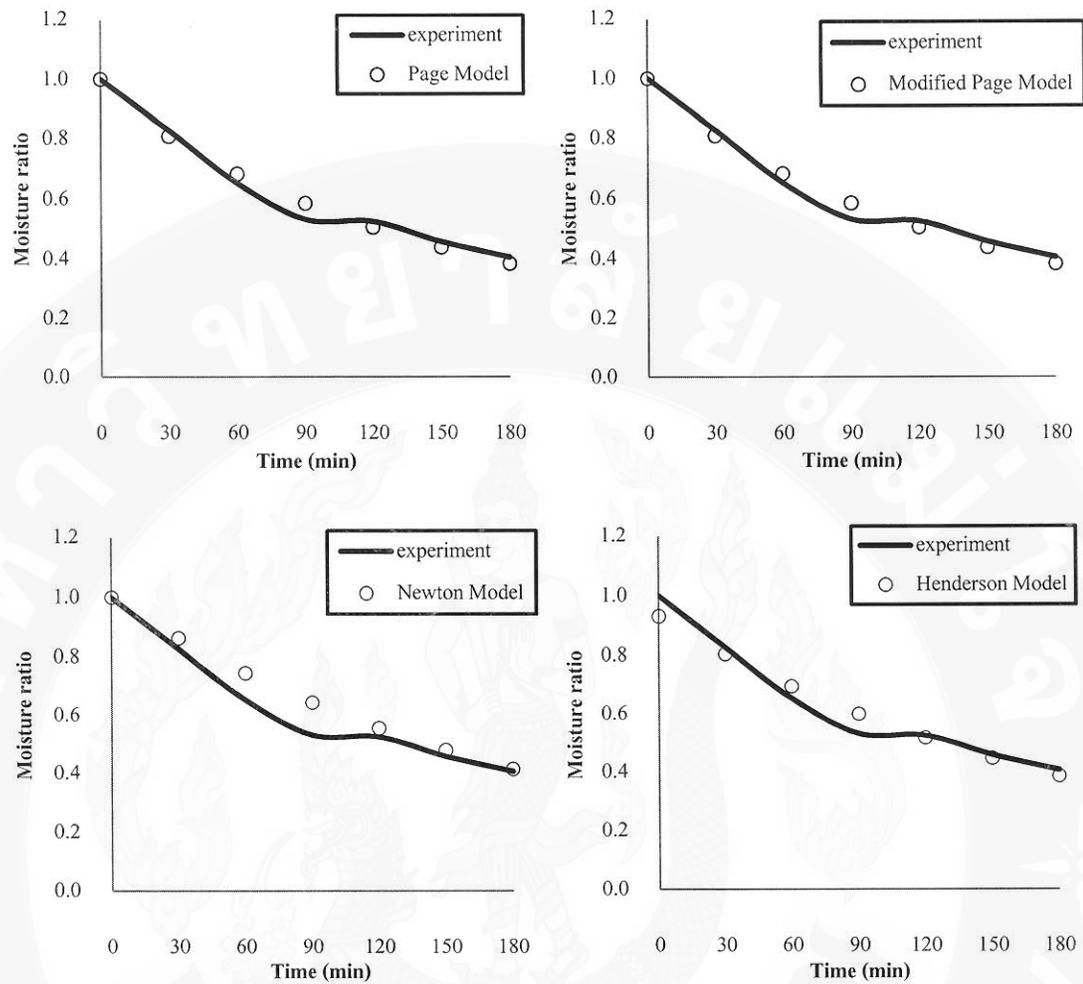
ภาพผนวก 17 อัตราส่วนความชื้นที่ได้จากการทำนายเทียบกับข้อมูลที่ได้จากการทดลองที่ขึ้น ความหนา 30 เซนติเมตร ด้วยการอบแห้งแบบปกติ



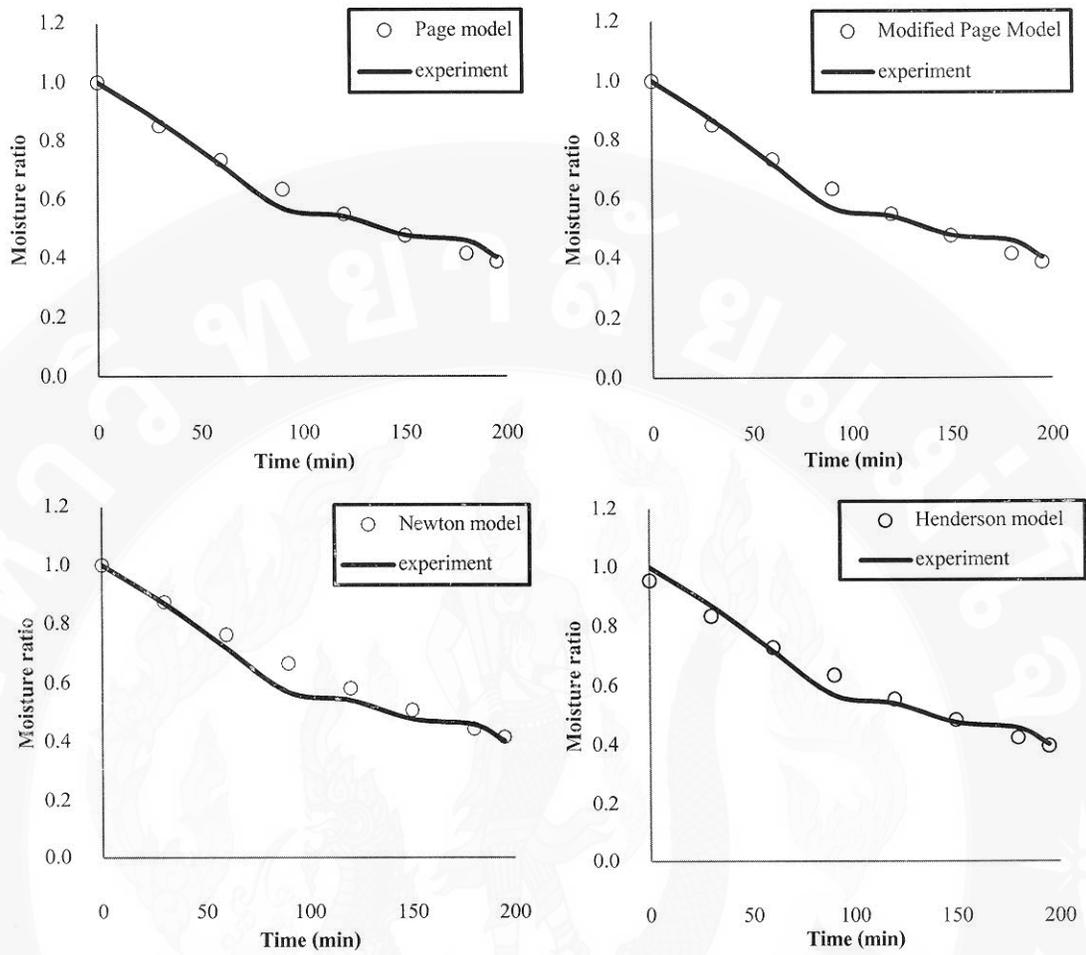
ภาพผนวก 17 (ต่อ)



ภาพผนวก 18 อัตราส่วนความชื้นที่ได้จากการทำนายเทียบกับข้อมูลที่ได้จากการทดลองที่ขึ้นความหนา 20 เซนติเมตร ด้วยการอบแห้งแบบสลับทิศทางลมร้อน



ภาพผนวก 19 อัตราส่วนความชื้นที่ได้จากการทำนายเทียบกับข้อมูลที่ได้จากการทดลองที่ขึ้น
ความหนา 30 เซนติเมตร ด้วยกรอบแห้งแบบสลับทิศทางลมร้อน



ภาพผนวก 20 อัตราส่วนความชื้นที่ได้จากการทำนายเทียบกับข้อมูลที่ได้จากการทดลองที่ชั้น
ความหนา 40 เซนติเมตร ด้วยการอบแห้งแบบสลับทิศทางลมร้อน



ภาคผนวก จ

ประวัติผู้วิจัย

ประวัติผู้วิจัย

ชื่อ-สกุล	นางสาววิภา เทพปิ่นตา
เกิดเมื่อ	27 สิงหาคม 2531
ประวัติการศึกษา	พ.ศ. 2549 มัธยมศึกษาตอนปลาย โรงเรียนอัสสัมชัญลำปาง จังหวัดลำปาง
ผลงานทางวิชาการ	พ.ศ. 2554 ปริญญาตรี มหาวิทยาลัยแม่โจ้ จังหวัดเชียงใหม่
	พ.ศ. 2553 การศึกษาพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องสำหรับการออกแบบ เครื่องอบแห้งสำหรับกล้วยตากแบบต่อเนื่องด้วย อินฟราเรด
	พ.ศ. 2556 Teppinta, W., J. Varith, S. Jaturonglumlert, P. Thaisamak and C. Nitatwichit. 2013. Operation Cost Reduction for Industrial Pepper Powder Drying with Alternative Hot-Air during Drying Process. Journal of Agricultural Research and Extension 3(30): 81-88
พ.ศ. 2556 Thaisamak , P., W. Teppinta, C. Nitatwichit, J. Varith and S. Jaturonglumlert. 2013. Fixed Deep Beds Drying of Black Pepper: A Comparative Study Between a Normal Airflow and Reverse Airflow. Journal of Agricultural Research and Extension 3(30): 69-80	