

การพัฒนาเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ด้วยท่อลมร้อน  
ร่วมกับตัวรับรังสีดวงอาทิตย์แบบรางพาราโบลา  
สำหรับกระบวนการอบแห้งผลผลิตทางการเกษตร



ธิวพร ศิริปัญญา

ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมอาหาร  
มหาวิทยาลัยแม่โจ้  
พ.ศ. 2566

การพัฒนาเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ด้วยท่อลมร้อน  
ร่วมกับตัวรับรังสีดวงอาทิตย์แบบรางพาราโบลา  
สำหรับกระบวนการอบแห้งผลผลิตทางการเกษตร



ธิวพร ศิริปัญญา

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของความสมบูรณ์ของการศึกษาตามหลักสูตร  
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมอาหาร  
สำนักบริหารและพัฒนาระบบอาหาร มหาวิทยาลัยแม่โจ้  
พ.ศ. 2566

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยแม่โจ้

การพัฒนาเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ด้วยท่อลมร้อน  
ร่วมกับตัวรับรังสีดวงอาทิตย์แบบรางพาราโบลา  
สำหรับกระบวนการอบแห้งผลผลิตทางการเกษตร

ธิวาพร ศิริปัญญา

วิทยานิพนธ์นี้ได้รับการพิจารณาอนุมัติให้เป็นส่วนหนึ่งของความสมบูรณ์ของการศึกษา  
ตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมอาหาร

พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษา

อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก .....  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชนวัฒน์ นิตศน์วิจิตร)  
วันที่.....เดือน.....พ.ศ. ....

อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม .....  
(รองศาสตราจารย์ ดร.จตุรภัทร วาฤทธิ์)  
วันที่.....เดือน.....พ.ศ. ....

อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม .....  
(รองศาสตราจารย์ ดร.สมเกียรติ จตุรงค์กล้าเลิศ)  
วันที่.....เดือน.....พ.ศ. ....

ประธานอาจารย์ผู้รับผิดชอบหลักสูตร .....  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.หยาดฝน ทนงการกิจ)  
วันที่.....เดือน.....พ.ศ. ....

สำนักบริหารและพัฒนาวิชาการรับรองแล้ว .....  
(รองศาสตราจารย์ ดร.ญาณิน โอภาสพัฒนกิจ)  
รองอธิการบดี  
วันที่.....เดือน.....พ.ศ. ....

<b>ชื่อเรื่อง</b>	การพัฒนาเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ด้วยท่อลมร้อนร่วมกับตัวรับรังสีดวงอาทิตย์แบบรางพาราโบลาสำหรับกระบวนการอบแห้งผลผลิตทางการเกษตร
<b>ชื่อผู้เขียน</b>	นางสาวธิดาพร ศิริปัญญา
<b>ชื่อปริญญา</b>	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอาหาร
<b>อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก</b>	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชนวัฒน์ นิตศน์วิจิตร

### บทคัดย่อ

การวิจัยครั้งนี้มีจุดมุ่งหมายเพื่อพัฒนาเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ด้วยท่อลมร้อนร่วมกับตัวรับรังสีดวงอาทิตย์แบบรางพาราโบลาสำหรับกระบวนการอบแห้งผลผลิตทางการเกษตรในกระบวนการอบแห้งผลิตภัณฑ์ทางการเกษตร เพื่อส่งเสริมให้เกษตรกรพัฒนาวิธีการถนอมอาหารและเพื่อสร้างมูลค่าเพิ่มในการแปรรูปผลิตภัณฑ์ทางการเกษตร ซึ่งแนวคิดในการออกแบบและสร้างขึ้นมีห้องอบแห้งขนาด  $0.7 \times 0.7 \times 0.9$  ลูกบาศก์เมตร ภายในบรรจุถาดอบแห้งจำนวน 3 ถาดสำหรับวางผลิตภัณฑ์ รวมถึงเพิ่มตัวรับพลังงานแสงอาทิตย์ด้วยท่อลมร้อนจำนวน 4 เส้น ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 นิ้ว ยาว 2 เมตร ติดตั้งรางพาราโบลาสะท้อนแสง เพื่อเพิ่มอุณหภูมิให้อากาศที่ไหลผ่านท่อลมเข้าสู่ห้องอบ ปัจจัยที่ศึกษาคือ การอบแห้งผลผลิตทางการเกษตร 3 ชนิดที่คุณสมบัติทางกายภาพที่แตกต่างกัน ได้แก่ ใบเตย ชিং และ กระจับแดง ด้วยการแปรเปลี่ยนความเร็วการไหลในท่อที่ความเร็วลม 1, 2 และ 3 เมตรต่อวินาที เนื้อหาผลลัพธ์สภาวะที่เหมาะสมในการอบแห้ง และประสิทธิภาพของระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ จากผลการทดสอบพบว่า เมื่อการเพิ่มอัตราการไหลของอากาศ ทำให้อุณหภูมิภายในเครื่องอบแห้งเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ความชื้นลดลงอย่างต่อเนื่อง โดยที่ความเร็วลม 2 เมตรต่อวินาที ให้ค่าอัตราการลดความชื้น และอัตราการอบแห้งผลิตภัณฑ์สูงสุด นอกจากนี้เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ด้วยท่อลมร้อนร่วมกับตัวรับรังสีดวงอาทิตย์แบบรางพาราโบลามีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้น 26.0 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเทียบกับการอบแห้งแบบทั่วไป

คำสำคัญ : การอบแห้งด้วยพลังงานแสงอาทิตย์, เครื่องกักเก็บอากาศร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ ท่อลมร้อน, ผลิตภัณฑ์เกษตรอบแห้ง

<b>Title</b>	DEVELOPMENT OF HOT-AIR DUCT COMBINED WITH SOLAR PARABOLIC TROUGH FOR AGRICULTURAL PRODUCTS DRYING PROCESS
<b>Author</b>	Miss Tiwaporn Siripunya
<b>Degree</b>	Master of Engineering in Food Engineering
<b>Advisory Committee Chairperson</b>	Assistant Professor Dr. Chanawat Nitatwichit

### ABSTRACT

The objective of this study was to develop a hot-air duct combined with a solar parabolic trough for agricultural product dryers in the drying process of agricultural products. To encourage farmers to develop food preservation methods and add value to agricultural product processing. The drying chamber was 0.7 x 0.7 x 0.9 cu.m. There were 3 drying trays within the drying chamber for placing products. The drying system consisted of a solar collector, 4 hot air pipes (4-inch diameter) 2 meters long, and a reflective parabolic trough made of aluminum sheet to increase the temperature of the air that flows through the air pipe into the drying chamber. Three types with different physical properties of agricultural products were studied: pandanus leaves, ginger, and roselle. The experiments were conducted with air velocities of 1, 2, and 3 m/s to find out the appropriate condition of the drying and the efficiency of the solar drying system. The results were the increasing air flow rate gave higher air drying temperature and decreased moisture content continuously. The air velocity of 2 m/s gave the highest values of dehumidification rate and drying rate. Moreover, a hot-air duct combined with a solar parabolic trough had an efficiency increase of 26.0 % compared to conventional drying.

Keywords : Solar dryer, Solar air collector, Hot air duct, Dried agricultural product

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นผลงานที่ผู้วิจัยได้ทุ่มเทความตั้งใจ สติปัญญา กำลังกายและกำลังใจ จนกระทั่งสำเร็จลุล่วงไปด้วยดีโดยได้รับความอนุเคราะห์คำแนะนำและความช่วยเหลือจากบุคคลหลายฝ่าย โดยเฉพาะอย่างยิ่งขอขอบคุณท่าน ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชนวัฒน์ นิตศน์วิจิตร ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ซึ่งได้สละเวลาอันมีค่า ให้ความรู้คำแนะนำ และคำปรึกษา งานวิจัยสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีตลอดจนตรวจสอบและแก้ไขวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้ถูกต้องและสมบูรณ์ และขอขอบคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. สมเกียรติ จตุรงค์กล้าเลิศ และรองศาสตราจารย์ ดร. จตุรภัทร วาฤทธิ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ที่อบรมสั่งสอน ให้ความรู้คำแนะนำ แนวทางในการทำงานวิจัยและตรวจสอบความบกพร่องในการเขียนวิทยานิพนธ์จึงขอขอบคุณไว้ ณ ที่นี้เป็นอย่างสูง

ขอขอบคุณ คณาจารย์ ข้าราชการและเจ้าหน้าที่ของคณะวิศวกรรมและอุตสาหกรรมเกษตร ที่ให้ความอนุเคราะห์ใช้สถานที่ เครื่องมือต่างๆ และอำนวยความสะดวกในการทำงานตลอดระยะเวลาที่เข้าทำการทดลอง และให้คำปรึกษา แนะนำ งานวิจัยสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบคุณทุนสนับสนุนงานวิจัย "ทุนวิจัยโครงการวิจัยด้านวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม (ววน.) จากสำนักวิจัยและส่งเสริมวิชาการการเกษตร มหาวิทยาลัยแม่โจ้ ประจำปี 2565" ที่สนับสนุนเงินทุนในการทำงานวิจัยให้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อคุณแม่ และครอบครัว ที่ส่งเสริมการศึกษา เป็นพลังเป็นกำลังใจที่ดีให้การสนับสนุนในทุก ๆ ด้าน จนทำให้ประสบความสำเร็จในการเรียนในครั้งนี้ และขอขอบคุณพี่ ๆ น้อง ๆ และผู้เกี่ยวข้องทุกคนที่คอยช่วยเหลือให้กำลังใจในการทำโครงการวิจัยจนสำเร็จ ขอขอบคุณไว้ ณ ที่นี้

ธิวพร ศิริปัญญา

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ค
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ง
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญภาพ.....	ฌ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	3
1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
1.4 ขอบเขตงานวิจัย.....	3
บทที่ 2 การตรวจเอกสาร.....	4
2.1 วัตถุประสงค์.....	4
2.2 การอบแห้งด้วยเครื่องพลังงานรังสีอาทิตย์ – แบบมีตัวเก็บรังสีอาทิตย์.....	8
2.3 ทฤษฎีการอบแห้ง.....	8
2.4 ความชื้นในวัสดุ.....	10
2.5 การถ่ายเทความร้อนเบื้องต้น.....	11
2.6 พัดลมและท่อลม.....	16
2.7 เซลล์แสงอาทิตย์.....	18
2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	20
บทที่ 3 อุปกรณ์และวิธีการทดลอง.....	29

3.1 วัสดุและอุปกรณ์ .....	29
3.2 การพัฒนาเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ด้วยท่อลมร้อนร่วมกับตัวรับรังสีดวงอาทิตย์แบบ รางพาราโบลา .....	30
3.3 วิธีการเตรียมวัตถุดิบ .....	31
3.4 การทดสอบและประเมินสมรรถนะในการอบแห้งของเครื่องอบแห้ง .....	31
3.5 งบประมาณที่ใช้ในการวิจัย.....	38
3.6 สถานที่ดำเนินการวิจัย .....	38
3.7 แผนภาพขั้นตอนการดำเนินงาน.....	39
3.8 แผนการดำเนินงาน .....	40
บทที่ 4 ผลการศึกษาและวิจารณ์.....	41
4.1 ผลการพัฒนาเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์.....	41
4.2 ผลการทดสอบอบแห้งผลิตภัณฑ์ของเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ .....	52
4.3 ผลการหาสภาวะที่เหมาะสมในการอบแห้งของระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ .....	75
4.4 ผลการทดสอบประสิทธิภาพของระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ .....	77
4.5 ผลของจุดคุ้มทุนเชิงเศรษฐศาสตร์ .....	81
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง.....	84
ข้อเสนอแนะ.....	85
บรรณานุกรม.....	87
ภาคผนวก.....	93
ประวัติผู้วิจัย.....	103



## สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 1 สรุปผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง .....	25
ตารางที่ 2 ส่วนประกอบและรายละเอียดของเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ .....	51
ตารางที่ 3 การเปรียบเทียบสี และค่าปริมาณน้ำอิสระของใบเตยอบแห้ง .....	55
ตารางที่ 4 การเปรียบเทียบสี และค่าปริมาณน้ำอิสระของขิง .....	63
ตารางที่ 5 การเปรียบเทียบสี และค่าปริมาณน้ำอิสระของกระเจี๊ยบแดงอบแห้ง .....	70
ตารางที่ 6 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของห้องอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ที่ ความเร็วลม 1, 2 และ 3 เมตรต่อวินาที และการอบแห้งแบบธรรมชาติ ของการอบแห้งใบเตย ขิง และกระเจี๊ยบแดง .....	80
ตารางที่ 7 รายละเอียดและการคำนวณจุดคุ้มทุนเชิงเศรษฐศาสตร์ .....	82
ตารางที่ 8 ผลการวิเคราะห์ประสิทธิภาพการอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ด้วยหลักเศรษฐศาสตร์ วิศวกรรม .....	83

## สารบัญภาพ

	หน้า
ภาพที่ 1 เครื่องอบแห้งผลผลิตทางการเกษตรด้วยท่อลมร้อนร่วมกับพัดลมพลังงานแสงอาทิตย์ ต้นแบบ .....	2
ภาพที่ 2 ลักษณะของใบเตย.....	4
ภาพที่ 3 ลักษณะของขิง.....	6
ภาพที่ 4 ลักษณะของกระเจี๊ยบแดง.....	7
ภาพที่ 5 (ก) ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและความชื้นในการอบแห้ง (ข) ความสัมพันธ์ระหว่าง ความชื้นและอัตราการอบแห้ง.....	10
ภาพที่ 6 หลักการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์.....	18
ภาพที่ 7 ลักษณะการอบแห้งแบบธรรมชาติ .....	31
ภาพที่ 8 การอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ด้วยท่อลมร้อนร่วมกับตัวรับรังสีดวงอาทิตย์ แบบรางพาราโบลา.....	32
ภาพที่ 9 แผนภาพการดำเนินงาน.....	39
ภาพที่ 10 ไดอะแกรมการต่ออุปกรณ์ต่าง ๆ ของระบบเซลล์แสงอาทิตย์และพัดลม.....	48
ภาพที่ 11 ส่วนประกอบและกระบวนการทำงานของชุดอบแห้ง.....	50
ภาพที่ 12 เครื่องอบแห้งผลผลิตทางการเกษตรด้วยท่อลมร้อนร่วมกับพัดลมพลังงานแสงอาทิตย์ที่ได้ พัฒนาขึ้น .....	51
ภาพที่ 13 การแปรค่าของความเข้มรังสีดวงอาทิตย์เฉลี่ย ความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ย อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม เฉลี่ย อุณหภูมิของตัวสะสมความร้อนเฉลี่ย และอุณหภูมิของห้องอบแห้งเฉลี่ย ของการทดลองอบแห้งใบเตย .....	53
ภาพที่ 14 ปริมาณความชื้นเทียบกับเวลาของการอบแห้งใบเตย.....	54
ภาพที่ 15 ผลลิตกัณฑ์ใบเตยอบแห้งด้วยการอบแห้งแบบบังคับ และการอบแห้งแบบธรรมชาติ .....	56
ภาพที่ 16 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการอบแห้งเทียบกับเวลาของการอบแห้งใบเตย .....	57
ภาพที่ 17 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นเทียบกับเวลาของการอบแห้งใบเตย .....	58

ภาพที่ 18 การแปรค่าของความเข้มรังสีดวงอาทิตย์เฉลี่ย ความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ย อุณหภูมิสิ่งแวดล้อมเฉลี่ย อุณหภูมิของตัวสะสมความร้อนเฉลี่ย และอุณหภูมิของห้องอบแห้งเฉลี่ย ของการทดลองอบแห้งชิง.....	60
ภาพที่ 19 ปริมาณความชื้นเทียบกับเวลาของการอบแห้งชิง.....	61
ภาพที่ 20 ผลิตกัณฑ์ชิงอบแห้งด้วยการอบแห้งแบบบังคับ และการอบแห้งแบบธรรมชาติ.....	63
ภาพที่ 21 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการอบแห้งเทียบกับเวลาของการอบแห้งชิง.....	64
ภาพที่ 22 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นเทียบกับเวลาของการอบแห้งชิง.....	65
ภาพที่ 23 การแปรค่าของความเข้มรังสีดวงอาทิตย์เฉลี่ย ความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ย อุณหภูมิสิ่งแวดล้อมเฉลี่ย อุณหภูมิของตัวสะสมความร้อนเฉลี่ย และอุณหภูมิของห้องอบแห้งเฉลี่ย ของ การทดลองอบแห้งกระเจียบแดง.....	67
ภาพที่ 24 ปริมาณความชื้นเทียบกับเวลาของการอบแห้งกระเจียบแดง.....	68
ภาพที่ 25 ผลิตกัณฑ์กระเจียบแดงอบแห้งด้วยการอบแห้งแบบบังคับ และการอบแห้งแบบธรรมชาติ.....	70
ภาพที่ 26 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการอบแห้งเทียบกับเวลาของการอบแห้งกระเจียบแดง.....	71
ภาพที่ 27 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นเทียบกับเวลาของการอบแห้งกระเจียบแดง.....	72
ภาพที่ 28 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการอบแห้งกับความชื้นที่เปลี่ยนไปของการอบแห้งใบเตย ชิง และกระเจียบแดง.....	73
ภาพที่ 29 ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนแบบพาความร้อนของเครื่องอบแห้งพลังแสงอาทิตย์ที่ ความเร็วลม 1, 2 และ 3 เมตรต่อวินาที.....	74
ภาพที่ 30 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพของท่อลมร้อนร่วมกับตัวรับรังสีดวงอาทิตย์แบบราง พาราโบลาของเครื่องอบแห้งกับเวลาในการอบแห้งของการอบแห้งใบเตย ชิง และกระเจียบแดง....	78

## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ความสำคัญของปัญหา

การแปรรูปผลผลิตทางการเกษตรเป็นการช่วยป้องกันปัญหาผลผลิตล้นตลาด หรือผลผลิตตกเกรดไม่ได้ขนาดตามที่ลูกค้าต้องการทำให้สามารถยกระดับราคาผลผลิตไม่ให้ตกต่ำ และการสร้างเพิ่มมูลค่าให้แก่ผลผลิตทางการเกษตร การแปรรูปผลผลิตทางการเกษตรให้เป็นผลิตภัณฑ์อาหารหรือวัตถุดิบอาหารจะทำให้สามารถขยายตลาดการค้าออกไปสู่ต่างประเทศจะช่วยเพิ่มพูนรายได้ให้แก่ประเทศได้เป็นอย่างดี และประเทศไทยนับเป็นประเทศที่มีการส่งออกผลผลิตทางการเกษตรรายสำคัญของโลก สำหรับผลิตภัณฑ์ทางการเกษตรแปรรูปนั้นประเทศไทยมีมูลค่าการส่งออกเท่ากับ 3,824.87 ล้านบาท ในปี พ.ศ. 2564 และมีมูลค่าเพิ่มขึ้นเป็น 5,652.3 ล้านบาท ในปีพ.ศ. 2565 ซึ่งพบว่ามีแนวโน้มการขยายตัวเพิ่มขึ้นทุก ๆ ปี (สำนักส่งเสริมการค้าสินค้าเกษตรและอุตสาหกรรม, 2565)

การอบแห้งผักและผลไม้ในประเทศยังประสบปัญหาหลายประการ ส่วนใหญ่การอบแห้งโดยการตากแดดตามธรรมชาติทำให้ผลิตภัณฑ์อบแห้งที่ได้มีการปนเปื้อนจากการรบกวนของแมลงต่าง ๆ และฝุ่นละอองที่ฟุ้งกระจายในอากาศมีผลทำให้ผลิตภัณฑ์ไม่ได้มาตรฐาน นอกจากนี้ในฤดูฝนทำให้ผลิตภัณฑ์เกิดการเน่าเสียไม่สามารถเก็บผลิตผลไว้ได้นาน นอกจากนี้ทำให้ผู้บริโภคอาจเจ็บป่วยจากการบริโภคสินค้าที่ไม่สะอาด และในปัจจุบันการแปรรูปผลิตภัณฑ์ทางการเกษตรจะนิยมใช้เครื่องอบแห้งแบบใช้เชื้อเพลิงน้ำมันหรือแก๊สเป็นเชื้อเพลิงซึ่งในปัจจุบันราคาเชื้อเพลิงน้ำมันหรือแก๊สมีราคาสูงทำให้ต้นทุนการผลิตสูงขึ้นและการใช้เครื่องอบแห้งดังกล่าวยังก่อให้เกิดมลพิษต่อสิ่งแวดล้อม ด้วยเหตุนี้เพื่อลดค่าใช้จ่ายจากเครื่องอบแห้งที่ใช้ น้ำมันเป็นเชื้อเพลิงหรือแก๊สจึงมีการใช้พลังงานแสงอาทิตย์เป็นแหล่งพลังงานในการให้ความร้อนในกระบวนการอบแห้ง และการอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์เป็นระบบที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม

เดิมได้สร้างเครื่องอบแห้งผลผลิตทางการเกษตรด้วยท่อลมร้อนร่วมกับพัดลมพลังงานแสงอาทิตย์ต้นแบบดังแสดงในรูปที่ 1 โดยใช้หลักการพื้นฐานในการออกแบบการอบแห้งด้วยท่อลมร้อนร่วมกับพัดลมพลังงานแสงอาทิตย์ เมื่อความร้อนจากแสงอาทิตย์กระทบต่อท่อเหล็กเกิดความร้อนภายในท่อและใช้พลังงานจากแสงอาทิตย์ขับให้พัดลมทำงานเพื่อนำความร้อนในท่อเหล็ก (ลมร้อน) ไปใช้ในการอบแห้งผลิตภัณฑ์ทางการเกษตร ซึ่งใช้ทฤษฎีการอบแห้ง ทฤษฎีการพาความร้อน

และกระบวนการถ่ายเทความร้อน ข้อจำกัดของเครื่องตั้งเดิมคือ ไม่สามารถควบคุมความเร็วลมได้ เซลล์แสงอาทิตย์หยุดการทำงานหากมีความเข้มแสงน้อยกว่า 300 วัตต์ต่อตารางเมตร และความเร็วของพัดลมขึ้นอยู่กับความเข้มแสง เนื่องจากไม่ได้ใช้แบตเตอรี่ในการเก็บพลังงานไฟฟ้าจึงทำให้ลมที่ออกมาจากพัดลมมีความไม่สม่ำเสมอ (พิทักษ์ชัย พรพันธ์, 2562) และต่อมา พิมลรัตน์ สัตโยภาส (2563) ได้การพัฒนาเครื่องอบแห้งผลผลิตทางการเกษตรด้วยท่อลมร้อนร่วมกับพัดลมพลังงานแสงอาทิตย์อีกครั้งโดยเพิ่มความเสถียรในการทำงานของพัดลม โดยได้มีการเพิ่มโมดูลควบคุมความเร็วรอบการหมุนของพัดลม เปลี่ยนเซลล์แสงอาทิตย์ และคอนโทรลเลอร์จเจอร์ แต่ข้อจำกัดของเครื่องต้นแบบที่พัฒนาแล้วคือ พื้นที่รับแสงมีขนาดเล็ก ภายในตู้อบแห้งจะเกิดการรวมแสงของตู้อะคริลิกทำให้ผลิตภัณฑ์เกิดการชำรุด และภายในชุดพัดลมไม่สามารถทำงานได้เต็มประสิทธิภาพ 100 เปอร์เซ็นต์



ภาพที่ 1 เครื่องอบแห้งผลผลิตทางการเกษตรด้วยท่อลมร้อนร่วมกับพัดลมพลังงานแสงอาทิตย์ต้นแบบ

การวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อที่จะพัฒนาเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ด้วยท่อลมร้อนร่วมกับตัวรับรังสีดวงอาทิตย์แบบรางพาราโบลา เพื่อจะเพิ่มประสิทธิภาพทางความร้อนให้กับท่อลม เพิ่มประสิทธิภาพการทำงานให้กับตู้อบแห้งและลดการเกิดการรวมแสงภายในตู้อบแห้ง สามารถทำงานได้ด้วยระบบควบคุมอัตโนมัติสำหรับกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์ทางการเกษตรอบแห้งที่ประหยัดพลังงาน เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม ลดต้นทุนในการอบแห้ง และยังสามารถนำไปใช้ในถิ่นทุรกันดารที่ไม่มีไฟฟ้าใช้ได้อีกด้วย

## 1.2 วัตถุประสงค์

1. เพื่อพัฒนาเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ด้วยท่อลมร้อนร่วมกับตัวรับรังสีดวงอาทิตย์แบบรางพาราโบลาที่มีสมรรถนะในการให้ความร้อนในการอบแห้งผลิตภัณฑ์ทางการเกษตร
2. เพื่อหาประสิทธิภาพของเครื่องอบแห้งโดยใช้ท่อลมร้อนร่วมกับตัวรับรังสีดวงอาทิตย์แบบรางพาราโบลา และหาสภาวะที่เหมาะสมในการอบแห้งผลผลิตทางการเกษตรที่มีลักษณะทางกายภาพต่างกัน

## 1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้นวัตกรรมใหม่คือการพัฒนาเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ด้วยท่อลมร้อนร่วมกับตัวรับรังสีดวงอาทิตย์แบบรางพาราโบลาที่ไม่มีการใช้พลังงานไฟฟ้า เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม ลดต้นทุนในการอบแห้ง สามารถควบคุมการทำงานของระบบได้อย่างอัตโนมัติ และสามารถนำไปใช้ในถิ่นทุรกันดารได้อีกด้วย
2. สร้างมูลค่าและคุณประโยชน์ให้กับพืชสมุนไพรและผลิตภัณฑ์ทางการเกษตร และเพิ่มรายได้ให้แก่เกษตรกรจากการแปรรูปผลิตภัณฑ์สมุนไพรและผลิตภัณฑ์ทางการเกษตรอบแห้งที่มีความปลอดภัยและเป็นที่ยอมรับของผู้บริโภค
3. ได้ข้อมูลสภาวะที่เหมาะสมในการทดลองอบแห้งผลผลิตทางการเกษตร เพื่อนำไปใช้ในการติดตั้งระบบควบคุมของเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ด้วยท่อลมร้อนร่วมกับตัวรับรังสีดวงอาทิตย์แบบรางพาราโบลาในกระบวนการอบแห้งผลผลิตทางการเกษตรให้เหมาะกับการอบแห้งผลผลิตที่มีลักษณะทางกายภาพที่ต่างกัน

## 1.4 ขอบเขตงานวิจัย

1. วัตถุประสงค์ที่ใช้ในการศึกษาคือ ใบเตย ชিং และกระเจี๊ยบแดงเท่านั้น
2. ทำการเก็บผลการทดลองอบแห้งโดยใช้เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ด้วยท่อลมร้อนร่วมกับตัวรับรังสีดวงอาทิตย์แบบรางพาราโบลาที่พัฒนาขึ้นมาเท่านั้น
3. ทำการทดลองอบแห้งในสภาวะบรรยากาศปกติ

## บทที่ 2

### การตรวจเอกสาร

#### 2.1 วัสดุทดลอง

พืชเป็นกลุ่มของสิ่งมีชีวิตจำนวนมากและมีความหลากหลายสูง ส่วนประกอบต่าง ๆ ของพืชสามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้ส่วน ได้แก่ ราก ลำต้น ตา ใบ ดอก และผล โดยในงานวิจัยจะแบ่งลักษณะพืชที่นิยมนำมาแปรรูปขายในท้องตลาดออกเป็น 3 ลักษณะ ได้แก่ (1) เหง้า หรือลำต้นใต้ดิน คือ ลำต้นที่ทอดขนาดไปกับผิวดิน มีปมปล้องให้เห็นชัดเจน เช่น ขิง ข่า ขมิ้น (2) ผล คือ รังไข่ที่ได้รับการปฏิสนธิแล้วเจริญเติบโตเต็มที่ เช่น มะตูม กระจับปี่ พุทราจีน มะระขี้นก ฝักมะขามแขก มะกรูด (3) ใบ คือ อวัยวะของพืชที่เจริญออกมาจากข้อของลำต้นและกิ่ง เช่น หญ้าหวาน พลูดาว ใบย่านาง ใบเตย ฟ้าทะลายโจร จากตัวอย่างพืชดังกล่าวข้างต้น จึงได้เลือกใช้พืช 3 ชนิด ได้แก่ ใบเตย ขิง และ กระจับปี่แดง มาใช้ในการทดลอง เนื่องจากพืชทั้ง 3 ชนิด มีลักษณะทางกายภาพที่แตกต่างกัน เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการอบแห้งพืชแต่ละประเภท

#### ใบเตย

เป็นพืชใบเลี้ยงเดี่ยวลักษณะแตกออกเป็นพุ่มขนาดเล็ก ลำต้นเป็นข้อ ใบออกเป็นพุ่มบริเวณปลายยอด ใบเป็นใบเดี่ยวเรียงสลับเวียนเป็นเกลียวขึ้นไปจนถึงยอด ลักษณะใบยาวเรียวยาวคล้ายใบหอก ปลายใบแหลม ขอบใบเรียบ ผิวใบเป็นมัน เส้นกลางใบเว้าลึกเป็นแฉ่ง ใบมีกลิ่นหอม โดยลักษณะของใบเตยแสดงดังภาพที่ 2



ภาพที่ 2 ลักษณะของใบเตย

ที่มา : (โรงพยาบาลสำโรงการแพทย์, 2015)

ใบเตย

ชื่อวงศ์ Pandanaceae

ชื่อวิทยาศาสตร์ Pandanus amaryllifolius Roxb.

ชื่อสามัญ Pandom wangi

ชื่อท้องถิ่น เตย ต้นเตย ใบเตย (ทุกภาค) เตยหอม เตยหอมเล็ก เตยหอมใหญ่ (ภาคกลาง) หวานข้าวไหม้ ส้มพอดี ผักแก้งเค็ง (ภาคเหนือ) ส้มตะเลงเครง (ตาก) ส้มปู้ (แม่ฮ่องสอน) ส้มม่า (ระนอง) ปาแนะวอริง ปาแฉะออริง ปาแป๊ะออริง (ภาคใต้และแถบมลายู)

ใบเตยมีฤทธิ์เป็นยาเย็นใช้ดื่มจะช่วยดับความกระหายน้ำได้เป็นอย่างดี รุ้สึกสดชื่นมากขึ้น แก้อาการร่างกายอ่อนเพลีย บำรุงหัวใจ และทำให้อัตราการเต้นของหัวใจลดลง ช่วยแก้ไข้ ดับพิษร้อนในร่างกาย แก้ร้อนใน เหมาะสำหรับผู้ที่มีธาตุเจ้าเรือนเป็นธาตุไฟ รักษาโรคหัด โรคอีสุกอีใส แก้อาการท้องอืดหรืออาหารไม่ย่อย (พีชเกษตร, 2016) จากการศึกษาวิจัยที่เกี่ยวข้อง รัตนา เฟ็งเพราะ และคณะ (2562) ศึกษาสารต้านอนุมูลอิสระและฤทธิ์การยับยั้งเชื้อแบคทีเรียก่อโรคของสมุนไพรร 4 ชนิด (เนียมหอม ตะไคร้ ใบเตย และรางจืด) จากการทดสอบสารต้านอนุมูลอิสระ พบว่าสารสกัดจากใบเตยมีฤทธิ์ในการต้านอนุมูลอิสระดีที่สุด และผลการทดสอบสารสกัดจากสมุนไพรรและชาสมุนไพรรในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียก่อโรครบชนิด พบว่าสารสกัดมีฤทธิ์ในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียแกรมบวกมากกว่าแบคทีเรียแกรมลบ

มูลค่าทางการตลาดของใบเตยอบแห้งจะมีราคา 1,000 บาทต่อ 1 กิโลกรัม ชาใบเตยหอม (ชนิดซองชง) ราคา 150 บาทต่อ 20 ซอง และผลใบเตยอบแห้งราคา 350 บาทต่อ 180 กรัม

## ขิง

ขิงเป็นพืชที่มีลำต้นขึ้นแน่นเป็นกอ โดยมีลำต้นแท้ที่เป็นรากอยู่ใต้ดิน ซึ่งมักเรียก แง่งขิงหรือหัวขิง (Rhizome) ซึ่งเป็นส่วนที่ใช้นำมาบริโภค หัวขิงมีรูปร่างเป็นแท่งสั้น แตกแขนงออกเป็นแง่งย่อย เนื้อด้านในมีสีเหลือง มีกลิ่นหอมเฉพาะ ส่วนลำต้นเทียมที่โผล่เหนือดินจะประกอบด้วยแกนลำที่มีลักษณะเป็นปล้อง ถูกหุ้มด้วยกาบใบเรียงตามความสูง โดยลักษณะของขิงแสดงดังภาพที่ 3





ภาพที่ 3 ลักษณะของขิง

ที่มา : (มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี, 2551)

ขิง

ชื่อวงศ์ Zingiberaceae

ชื่อวิทยาศาสตร์ Zingiber officinale Roscoe.

ชื่อสามัญ Ginger, Zingiber

ชื่อท้องถิ่น ขิงแกลง ขิงแดง (จันทบุรี) ขิงเผือก (เชียงใหม่) สะเอ (แม่ฮ่องสอน) ขิงบ้าน

ขิงแครง ขิงป่า ขิงเขา ขิงดอกเดี่ยว (ภาคกลาง) เกีย (จีนแต้จิ๋ว)

ขิงมีแคลอรีต่อ 100 กรัม อยู่ที่ประมาณ 25 กิโลแคลอรี ในเหง้าขิงมีน้ำมันหอมระเหยอยู่ประมาณ 1-3 % มีคุณสมบัติเป็นยาแก้ปวด กันเหิน สำหรับข้อมูลทางเภสัชวิทยาของขิงแห้งมีสรรพคุณช่วยแก้ไข้ แก้ไอ ขับเสมหะ ขับเหงื่อ แก้หอบ แก้ลม แก้จุกเสียด แก้เสมหะ บำรุงธาตุ แก้คลื่นเหียน อาเจียน ส่วนขิงสด ใช้แก้ปวดท้อง บำรุงธาตุ ขับลมในลำไส้ให้ผายลมและเรอ แก้อาเจียน ยาขมเจริญอาหาร ขับน้ำดีช่วยย่อยอาหาร แก้ปากคอบเปื่อย แก้ท้องผูก ลดความดัน จากการศึกษาวิจัยที่เกี่ยวข้อง วทันยา ลิมปพยอม และคณะ (2557) ได้ศึกษาองค์ประกอบทางเคมีและฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระของน้ำมันหอมระเหยขิงที่ได้จากการสกัดด้วยวิธีต้มกลั่นและการสกัดด้วยเอทานอล ผลการทดลองพบว่าความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระ ไฮดรอกซิลของน้ำมันหอมระเหยจากขิงแก่แห้งจากการต้มกลั่นมีค่ามากที่สุด คือ 99.18 เปอร์เซ็นต์ รองลงมา คือ น้ำมันหอมระเหยจากขิงแก่สดที่ได้จากการต้มกลั่น 82.54 เปอร์เซ็นต์ ดังนั้นน้ำมันหอมระเหยในขิงมีฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระได้

โดยมูลค่าทางการตลาดของขิงอบแห้งจะมีราคา 800 บาทต่อ 1 กิโลกรัม ขาขิงอบแห้ง (ชนิดของขง) ราคา 150 บาทต่อ 20 ของ หัวขิงอ่อนอบแห้งราคา 180 บาทต่อ 250 กรัม และผงขิงอบแห้งบดราคา 250 บาทต่อ 180 กรัม

### กระเจี๊ยบแดง

ไม้ล้มลุกสูง 1-2 เมตร ใบของต้นที่ยังเล็กและใบที่อยู่ใกล้ดอกบางใบมีแผ่นใบคล้ายรูปไข่ ขอบใบหยักเว้าลึก 3-5 หยัก ปลายหยักแหลม โคนมน ผลมีลักษณะทรงกลมรี มีกลีบเลี้ยงหนาสีแดง เนื้อฉ่ำน้ำหุ้มอยู่ มีรสชาติเปรี้ยวจัด ผลอ่อนมีสีเขียว ผลแก่มีสีน้ำตาลจะแห้งแตก มีเมล็ดกลมรีเล็กๆ ข้างใน โดยลักษณะของกระเจี๊ยบแดง แสดงดังภาพที่ 4



ภาพที่ 4 ลักษณะของกระเจี๊ยบแดง

ที่มา : (ศุภยวิจิตรและพัฒนาศักดิ์, 2562)

กระเจี๊ยบแดง

ชื่อวงศ์ MALVACEAE

ชื่อวิทยาศาสตร์ Hibiscus sabdariffa L.

ชื่อสามัญ Jamaica Sorrel, Red Sorrel, Roselle, Rozelle

ชื่อท้องถิ่น กระเจี๊ยบ กระเจี๊ยบแดง กระเจี๊ยบเปรี้ยว (ภาคกลาง) ผักเเกงเฆง ส้มเเกงเคง

ส้มพอเหมาะ (ภาคเหนือ) ส้มตะเลงเคง (ตาก) ส้มปู้ (แม่ฮ่องสอน) ส้มพอดี (ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ)

สำหรับข้อมูลทางเภสัชวิทยาของผลกระเจี๊ยบแดงแห้งมีสรรพคุณช่วยบำรุงธาตุและร่างกายให้แข็งแรง แก้เหน็บชา แก้ไอ ช่วยขับเสมหะ แก้อ่อนใน ช่วยป้องกันโรคเบาหวาน ช่วยลดความดันเลือด ช่วยลดไขมันในเลือด รักษาแผลในกระเพาะอาหาร และนำมาคั้นดื่มเพื่อแก้กระหายได้ จากการศึกษาวิจัยที่เกี่ยวข้อง ฝนทิพย์ บุตรระมี และคณะ (2565) ศึกษาผลของกระเจี๊ยบแดงต่อความดันโลหิต พบว่าหลักฐานที่พบมีความแน่นอนในระดับต่ำมากที่สุดที่บ่งชี้ว่ากระเจี๊ยบแดงอาจลดความดันโลหิต ส่วนบนและส่วนล่าง และ พรรณภัทร อินทฤทธ และคณะ (2555) ศึกษาประสิทธิภาพและผลข้างเคียง

ของสารสกัดกระเจี๊ยบแดงขนาด 1,000 มิลลิกรัมกับ Simvastatin ในการลดระดับไขมันในเลือด ผลการทดลองพบว่าทั้งสารสกัดกระเจี๊ยบแดงและ Simvastatin สามารถลดคอเลสเตอรอลและแอลดีแอลได้อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

มูลค่าทางการตลาดของกระเจี๊ยบอบแห้งจะมีราคา 850 บาทต่อ 1 กิโลกรัม ซากกระเจี๊ยบอบแห้ง (ชนิดซองซอง) ราคา 140 บาทต่อ 20 ซอง และกระเจี๊ยบอบแห้งบดราคา 380 บาทต่อ 180 กรัม

## 2.2 การอบแห้งด้วยเครื่องพลังงานรังสีอาทิตย์ – แบบมีตัวเก็บรังสีอาทิตย์

เครื่องอบแห้งพลังงานรังสีอาทิตย์ถูกพัฒนาเพื่อใช้อบแห้งผลิตภัณฑ์ทางการเกษตรทดแทนการตากแดดตามธรรมชาติ หรือทดแทนการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งเชิงกล (Mechanical dryer) ทั้งนี้เพื่อแก้ปัญหาความเสียหาย และการปนเปื้อนที่เกิดจากการตากแดดตามธรรมชาติ หรือเพื่อลดค่าใช้จ่ายด้านพลังงาน การออกแบบเครื่องอบแห้งพลังงานรังสีอาทิตย์จะออกแบบให้มีประสิทธิภาพสูงกว่าการตากแดดตามธรรมชาติ และสามารถแก้ปัญหาความเสียหายของผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากการตากแดดตามธรรมชาติ โดย เสริม จันทร์ฉาย (2560) ได้กล่าวว่าเครื่องอบแห้งพลังงานรังสีอาทิตย์จะประกอบด้วยส่วนสำคัญ 2 ส่วน ได้แก่ ส่วนสำหรับรับรังสีอาทิตย์ และส่วนสำหรับวางผลิตภัณฑ์ การทำงานทั่วไปคือ รังสีอาทิตย์จะถูกเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อนแล้วนำพลังงานความร้อนที่ได้ไปใช้ระเหยน้ำออกจากผลิตภัณฑ์

เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบมีตัวเก็บรังสีอาทิตย์ เป็นระบบอบแห้งแบบพาความร้อนโดยการบังคับอากาศแบบผสม หลักการทำงานของเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบมีตัวเก็บรังสีอาทิตย์ คือรังสีอาทิตย์ส่องผ่านตัวเก็บรังสีอาทิตย์จะเกิดการสะสมความร้อนขึ้นจากนั้นจะนำอากาศแห้งภายนอกตู้อบแห้ง โดยใช้พัดลมดูดอากาศเข้ามารับความร้อนบริเวณตัวเก็บรังสีอาทิตย์ เมื่ออากาศได้รับความร้อนจะไหลเข้าไปยังพื้นที่อบแห้งผ่านตะแกรงวางผลิตภัณฑ์ จากนั้นผลิตภัณฑ์เมื่อได้รับความร้อนจะเกิดการระเหยของน้ำในตัวผลิตภัณฑ์ และระเหยออกไปยังปล่องระบายความชื้นด้านบน

## 2.3 ทฤษฎีการอบแห้ง

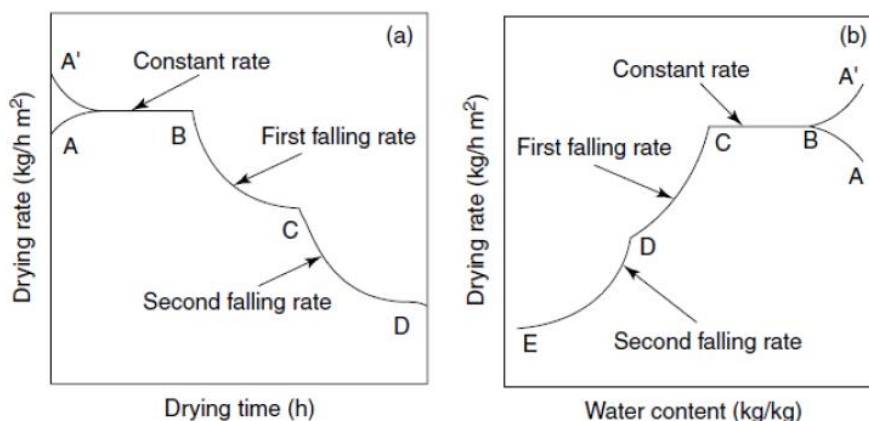
การอบแห้ง (Drying) คือการกำจัดความชื้นหรือน้ำที่มีอยู่ในวัสดุให้ลดลงจนมีความชื้นอยู่ในปริมาณที่ปลอดภัยต่อการเก็บรักษา การอบแห้งเป็นกระบวนการหลังการเก็บเกี่ยวที่สำคัญ กระบวนการหนึ่งเพื่อให้ผลผลิตทางการเกษตรมีความเหมาะสมต่อการเก็บรักษา สามารถยืดอายุการ

เก็บรักษาไว้ได้นานโดยไม่เสียหาย เนื่องจากการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ การอบแห้งส่วนใหญ่ใช้อากาศร้อนเป็นตัวกลางในการอบแห้ง ความร้อนจะถ่ายเทจากกระแสอากาศไปยังผิวของวัสดุ โดยส่วนใหญ่จะถูกนำไปใช้ในการระเหยน้ำซึ่งไอน้ำจะเคลื่อนที่จากผิววัสดุมายังกระแสอากาศ และถ้าวัสดุมีปริมาณน้ำอยู่มาก อุณหภูมิและความเข้มข้นของไอน้ำที่ผิวจะคงที่ ส่งผลให้อัตราการถ่ายเทความร้อนและอัตราการอบแห้งคงที่ เมื่อผิววัสดุมีปริมาณน้ำลดลงเหลือน้อย อุณหภูมิและความเข้มข้นของไอน้ำจะลดลงส่งผลให้อัตราการอบแห้งลดลง (กองถ่ายทอดและเผยแพร่เทคโนโลยี, 2560) การอบแห้งสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ช่วง (ดังแสดงในรูปที่ 2) ดังนี้

1. ช่วงการปรับสภาวะเบื้องต้น (Initial adjustment period -AB) เป็นช่วงเริ่มต้นที่อาหารที่ใช้ในการอบแห้ง มีความชื้นเริ่มต้น (A) ของอาหารยังสูงอยู่ ผิวของอาหารจะมีลักษณะเปียกชื้นมาก เกิดการถ่ายเทความร้อนระหว่างตัวกลางลมร้อนกับอาหาร ทำให้อุณหภูมิพื้นผิวอาหาร มีค่าใกล้เคียงกับอุณหภูมิกระเปาะเปียก (Wet bulb temperature) ของกระแสลมร้อนที่ใช้เป็นตัวกลาง อัตราการทำแห้งค่อยๆ เพิ่มขึ้น จนถึงช่วงอัตราทำแห้งคงที่ (Constant rate)

2. การอบแห้งในช่วงอัตราการอบแห้งคงที่ (Constant rate period-BC) เป็นช่วงที่อัตราการถ่ายเทความร้อนและมวลระหว่างวัสดุและอากาศเกิดขึ้นเฉพาะที่รอบๆ ผิววัสดุเท่านั้น และมีลักษณะคล้ายกับการระเหยของน้ำจากผิว (Free water surface) อัตราการลดความชื้นในช่วงนี้จะถูกจำกัดด้วยการระเหยของน้ำบนผิวผลผลิต ปริมาณความชื้นจะลดลงอย่างมากด้วยอัตราคงที่

3. การอบแห้งในช่วงอัตราการอบแห้งลดลง (Falling rate period CD และ DE) หลังจากความชื้นลดลงถึงปริมาณความชื้นวิกฤต (Critical moisture content) กระบวนการอบแห้งจะดำเนินต่อไปในลักษณะอัตราลดลง เพราะการเคลื่อนที่ของน้ำออกสู่ผิวจะต่ำกว่าการระเหยของน้ำออกสู่บรรยากาศภายนอก อัตราการอบแห้งจะลดลงความชื้นจะลดลงเรื่อย ๆ จนถึงค่าความชื้นสมดุล (Equilibrium moisture content, XE) ซึ่งเป็นความชื้นที่ต่ำสุด ภายใต้สภาวะที่ใช้อยู่ในขณะนั้น ที่ความชื้นนี้ อัตราการทำแห้งเป็นศูนย์ น้ำในอาหารไม่สามารถระเหยออกมาได้อีก ซึ่งเป็นช่วงที่มีความสำคัญมากเพราะการลดความชื้นส่วนใหญ่อยู่ในช่วงนี้



ภาพที่ 5 (ก) ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและความชื้นในการอบแห้ง (ข) ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นและอัตราการอบแห้ง

ที่มา: (Sodha et al., 1987)

## 2.4 ความชื้นในวัสดุ

โดยทั่วไปในผลิตภัณฑ์อาหารและเมล็ดพืชมีความชื้นที่เกาะติดที่ผิววัสดุ ความชื้นนี้สามารถกำจัดออกไปได้เกือบทั้งหมดโดยการให้ความร้อน นอกจากความชื้นที่เกาะติดที่ผิววัสดุแล้วยังมีความชื้นที่เกาะติดอยู่ภายในผนังด้านในท่อเล็กๆ (Capillaries) และที่อยู่ภายในเนื้อวัสดุ (Bound moisture) ที่ไม่สามารถกำจัดออกไปได้หมด ซึ่งจะเป็นความชื้นที่หลงเหลืออยู่ในวัสดุและจะเป็นตัวบอกปริมาณน้ำที่มีอยู่ในวัสดุ ปริมาณความชื้นของวัสดุสามารถวัดได้ตามมาตรฐาน 2 แบบคือ

1. ปริมาณความชื้นฐานเปียก (Wet basis) อัตราส่วนน้ำหนักของน้ำในวัสดุต่อน้ำหนักวัสดุ ซึ่งเมื่อคูณด้วย 100 จะมีค่าเป็นเปอร์เซ็นต์ แสดงดังสมการที่ 1

$$M_w = [(w-d)/w] \times 100 \quad \dots (1)$$

โดยที่

$M_w$	คือ ปริมาณความชื้นฐานเปียก (เปอร์เซ็นต์ฐานเปียก)
$w$	คือ มวลของวัสดุเปียก (กิโลกรัม)
$d$	คือ มวลของวัสดุแห้ง (กิโลกรัม)

2. ปริมาณความชื้นมาตรฐานแห้ง (Dry basis) อัตราส่วนน้ำหนักของน้ำในวัสดุต่อน้ำหนักวัสดุแห้ง ซึ่งเมื่อคูณด้วย 100 จะมีค่าเป็นเปอร์เซ็นต์ ดังสมการที่ 2

$$M_d = [(w-d)/d] \times 100 \quad \dots (2)$$

โดยที่  $M_d$  คือ ปริมาณความชื้นฐานแห้ง (เปอร์เซ็นต์ฐานแห้ง)

โดยทั่วไปการอบแห้งวัสดุสามารถแบ่งออกเป็นช่วงคือ ช่วงอัตราการอบแห้งคงที่ ซึ่งปริมาณความชื้นภายในวัสดุมีค่าสูงกว่าความชื้นวิกฤตที่ผิวของวัสดุมีน้ำอยู่จำนวนมาก เมื่อความร้อนจากอากาศถ่ายเทไปยังวัสดุ การถ่ายเทความร้อนและมวลจะเกิดขึ้นเฉพาะที่ผิวของวัสดุ ช่วงนี้อุณหภูมิผิวของวัสดุอบแห้งและอัตราการอบแห้งจะมีค่าคงที่และช่วงอัตราการอบแห้งลดลง ซึ่งปริมาณความชื้นภายในวัสดุ มีค่าต่ำกว่าความชื้นวิกฤตเมื่อความร้อนจากอากาศถ่ายเทไปยังวัสดุ น้ำจะเคลื่อนที่จากภายในเนื้อวัสดุมาที่ผิวของวัสดุในลักษณะของเหลวหรือไอน้ำและน้ำที่ผิวจึงจะระเหยไปกับอากาศ

## 2.5 การถ่ายเทความร้อนเบื้องต้น

เนื่องจากโครงการนี้เป็นการนำพลังงานแสงอาทิตย์มาใช้งาน จึงจำเป็นต้องศึกษาทฤษฎีการถ่ายเทความร้อน ทฤษฎีการหาประสิทธิภาพของตัวเก็บรังสีอาทิตย์และห้องอบแห้ง ทฤษฎีการอบแห้งและหลักการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งการศึกษาพื้นฐานของทฤษฎีก่อนเพื่อที่จะเสริมความเข้าใจและนำความรู้ไปใช้ในการออกแบบเครื่องอบแห้งผลผลิตทางการเกษตรด้วยท่อลมร้อนร่วมกับพัดลมพลังงานแสงอาทิตย์ให้มีประสิทธิภาพสูงสุด

การอบแห้งด้วยพลังงานรังสีอาทิตย์เป็นการใช้พลังงานรังสีอาทิตย์ในรูปความร้อน โดยพลังงานของรังสีอาทิตย์จะเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อน แล้วนำไประเหยน้ำในวัสดุที่ต้องการอบแห้ง ความร้อนดังกล่าวจะถ่ายเทจากตัวกลางที่มีอุณหภูมิสูงไปยังตัวกลางที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า (สมเกียรติ จตุรงค์กล้าเลิศ, 2553) โดยการถ่ายเทความร้อนมีได้ 3 วิธี ได้แก่ การนำความร้อน (Conduction) การพาความร้อน (Convection) และการแผ่รังสี (Radiation) ในการวิจัยด้านการอบแห้งด้วยพลังงานรังสีอาทิตย์จำเป็นต้องมีความรู้ด้านการถ่ายเทความร้อน

1. การนำความร้อน (Conduction) เป็นการถ่ายเทความร้อนจากโมเลกุลไปสู่อีกโมเลกุลหนึ่งที่อยู่ติดกันไปเรื่อย ๆ จากอุณหภูมิสูงไปสู่อุณหภูมิต่ำ การนำความร้อนสามารถเกิดขึ้นได้ใน

ตัวกลางที่เป็นของแข็ง ของเหลว และก๊าซ โดยการถ่ายเทความร้อนสำหรับการนำความร้อนสามารถหาได้จากสมการที่ 3

$$q_k = -kA \frac{dT}{dx} \quad \dots (3)$$

โดยที่	$q_k$	คือ ค่าการถ่ายเทความร้อนแบบการนำความร้อน (วัตต์)
	$k$	คือ ค่าสภาพการนำความร้อนของตัวกลาง (วัตต์ต่อเมตรเคลวิน)
	$A$	คือ พื้นที่ในการรับความร้อนของตัวกลาง (ตารางเมตร)
	$dT$	คือ ค่าความแตกต่างของอุณหภูมิ (เคลวิน)
	$dx$	คือ ค่าความหนาของวัสดุที่เป็นตัวกลาง (เมตร)

2. การพาความร้อน (Convection) จะเกิดขึ้นเมื่อของไหลสัมผัสผิวของวัตถุที่มีอุณหภูมิแตกต่างกันก็จะมี การแลกเปลี่ยนพลังงานความร้อนระหว่างของไหลกับวัตถุ การพาความร้อนนั้นยังสามารถแบ่งลักษณะได้อีก 2 ประเภท คือ ก) การพาความร้อนแบบธรรมชาติ (Natural convection) ข) การพาความร้อนแบบบังคับ (Forced convection) ลักษณะการพาความร้อนแบบธรรมชาตินั้นจะเป็นการเคลื่อนที่ของของไหล ไหลผ่านวัตถุที่มีอุณหภูมิต่างกันแล้วทำการถ่ายเทความร้อนซึ่งกันและกัน โดยอาศัยแรงลอยตัวของตัวของไหลเองแตกต่างกับการพาความร้อนแบบบังคับจะต้องอาศัยแรงภายนอกมากระทำเพื่อให้ของไหลสามารถเคลื่อนที่ได้โดยแรงภายนอกที่มากระทำนั้นอาจจะมาจากพัดลม เป็นต้น ทั้งนี้สามารถหาการถ่ายเทความร้อนลักษณะการพาความร้อนได้จากสมการที่ 4

$$q_c = hA (T_s - T_\infty) \quad \dots (4)$$

โดยที่	$q_c$	คือ ค่าการถ่ายเทความร้อนแบบการพาความร้อน (วัตต์)
	$h$	คือ ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน (วัตต์ต่อตารางเมตรเคลวิน)
	$A$	คือ พื้นที่ในการรับความร้อน (ตารางเมตร)
	$T_s$	คือ ค่าอุณหภูมิที่ผิวของวัตถุ (เคลวิน)
	$T_\infty$	คือ ค่าอุณหภูมิของของไหล (เคลวิน)

3. การแผ่รังสี (Radiation) เป็นการถ่ายเทความร้อนออกรอบตัวทุกทิศทาง โดยไม่ต้องอาศัยตัวกลางในการส่งถ่ายพลังงานดังเช่นการนำความร้อนและการพาความร้อน การแผ่รังสีจึงสามารถถ่ายเทความร้อนผ่านอวกาศได้ วัตถุทุกชนิดที่มีอุณหภูมิสูงกว่า  $-273$  องศาเซลเซียส หรือ  $0$  เคลวิน ย่อมมีการแผ่รังสี ซึ่งสามารถหาการถ่ายเทความร้อนลักษณะการแผ่รังสีความร้อนได้จากสมการที่ 5

$$q_r = \sigma \epsilon A (T_1^4 - T_2^4) \quad \dots (5)$$

โดยที่	$q_r$	คือ ค่าการถ่ายเทความร้อนแบบการแผ่รังสีความร้อน (วัตต์)
	$\sigma$	คือ ค่าคงที่สเตฟาน-โบลต์ซมันน์ มีค่าเท่ากับ $5.67 \times 10^{-8}$ (วัตต์ต่อตารางเมตร-เคลวินยกกำลังสี่)
	$\epsilon$	คือ สัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อน (ไร้หน่วย)
	$A$	คือ พื้นที่ในการรับความร้อน (ตารางเมตร)
	$T_1$	คือ ค่าอุณหภูมิของวัตถุ (เคลวิน)
	$T_2$	คือ ค่าอุณหภูมิของสิ่งแวดล้อม (เคลวิน)

#### การคำนวณปริมาณความร้อนสำหรับอบแห้งผลิตภัณฑ์

ปริมาณความร้อนที่ใช้ออบแห้งผลิตภัณฑ์ จะมาจากความร้อนที่ต้องนำไปใช้ในการทำให้ผลิตภัณฑ์มีอุณหภูมิสูงขึ้น จากอุณหภูมิบรรยากาศไปยังอุณหภูมิที่ใช้ออบแห้ง โดยปริมาณความร้อนทั้งหมดที่ใช้ในการอบแห้งจะมีทั้งหมด 4 ส่วนได้แก่ ปริมาณความร้อนสัมผัสสำหรับอบแห้งผลิตภัณฑ์ ( $Q_{\text{SENSIBLE}}$ ) ปริมาณความร้อนแฝงสำหรับระเหยความชื้นที่มีอยู่ในผลิตภัณฑ์ ( $Q_{\text{LATENT}}$ ) ปริมาณความร้อนที่ทำให้วัสดุต่างๆภายในอุปกรณ์อบแห้งที่อุณหภูมิสูง ( $Q_{\text{OTHER}}$ ) และปริมาณความร้อนที่สูญเสียให้บรรยากาศโดยรอบ ( $Q_{\text{LOSS}}$ ) (ปรรรณกิต เลิศพยัค, 2553) โดยสมการคำนวณหาปริมาณความร้อนในแต่ละส่วนสามารถหาได้ดังนี้

1. การคำนวณหาปริมาณความร้อนสัมผัสสำหรับอบแห้งผลิตภัณฑ์ ( $Q_{\text{SENSIBLE}}$ ) ปริมาณความร้อนสัมผัสจะทำให้มวลอากาศมีอุณหภูมิเปลี่ยนแปลงไปแต่สถานะยังคงเดิม โดยปริมาณความร้อนที่ใช้ระเหยความชื้นออกจากผลิตภัณฑ์จะต้องมีอุณหภูมิที่สูงกว่าอุณหภูมิบรรยากาศ สำหรับการหาปริมาณความร้อนสัมผัสสำหรับอบแห้งผลิตภัณฑ์สามารถหาได้จากสมการที่ 6



$$Q_{\text{SENSIBLE}} = m_{\text{PRODUCT}} \times C_p \times (T_{\text{DRYING}} - T_{\text{AMB}}) \quad \dots (6)$$

โดยที่	$Q_{\text{SENSIBLE}}$	คือ ปริมาณความร้อนสัมผัสสำหรับอบแห้งผลิตภัณฑ์ (กิโลจูล)
	$m_{\text{PRODUCT}}$	คือ มวลของผลิตภัณฑ์ที่ต้องการอบแห้ง (กิโลกรัม)
	$C_p$	คือ ค่าความร้อนจำเพาะของผลิตภัณฑ์ (กิโลจูลต่อกิโลกรัมเคลวิน)
	$T_{\text{DRYING}}$	คือ อุณหภูมิของลมร้อนที่ใช้ในการอบแห้ง (เคลวิน)
	$T_{\text{AMB}}$	คือ อุณหภูมิของอากาศ (เคลวิน)

2. การคำนวณหาปริมาณความร้อนแฝงสำหรับระเหยความชื้นที่มีอยู่ในผลิตภัณฑ์ ( $Q_{\text{LATENT}}$ ) ปริมาณความร้อนแฝงที่ใช้ระเหยความชื้นภายในผลิตภัณฑ์ จะนำมาใช้หาปริมาณการระเหยน้ำ ระหว่างการอบแห้งผลิตภัณฑ์ที่มีปริมาณเท่าใด ปริมาณความร้อนแฝงสำหรับระเหยความชื้นที่มีอยู่ในผลิตภัณฑ์สามารถหาได้ด้วยสมการที่ 7

$$Q_{\text{LATENT}} = M_{\text{MOISTURE}} \times h_{fg} \quad \dots (7)$$

โดยที่	$Q_{\text{LATENT}}$	คือ ปริมาณความร้อนสำหรับการระเหยความชื้น (กิโลจูล)
	$M_{\text{MOISTURE}}$	คือ ปริมาณความชื้นที่ต้องการระเหย (กิโลกรัม)
	$h_{fg}$	คือ ค่าเอนทัลปีของการระเหยน้ำที่อุณหภูมิคงที่

(จากการทดลองเครื่องอบแห้งต้นแบบพบว่า อุณหภูมิเฉลี่ยที่ใช้ในอบแห้งทั้งวันเท่ากับ 42 องศาเซลเซียส และในการพัฒนาเครื่องอบแห้งได้เพิ่มตัวรับตัวรับรังสีดวงอาทิตย์แบบรางพาราโบลาที่เพิ่มความร้อนให้เครื่องอบแห้ง 15% ดังนั้นจึงทำให้อุณหภูมิของเครื่องอบแห้งสามารถทำความร้อนได้สูงสุดอย่างน้อยที่ 50 องศาเซลเซียส ซึ่งหาค่าเอนทัลปีได้จากตารางอิมตัวของน้ำทางเทอร์โมไดนามิกส์ (กิโลจูลต่อกิโลกรัม))

3. การคำนวณปริมาณความร้อนที่ทำให้วัสดุต่างๆ ภายในอุปกรณ์อบแห้งมีอุณหภูมิสูง ( $Q_{OTHER}$ ) ความร้อนในส่วนอื่นๆ นอกจากเหนือจากผลิตภัณฑ์ที่ต้องการทำให้อุณหภูมิสูงขึ้น เช่น ภาตสำหรับบรรจุผลิตภัณฑ์ ผนังของตู้อบ และวัสดุที่ใช้ในการสร้างตู้อบ โดยสามารถหาปริมาณความร้อนในส่วนนี้ได้จากสมการที่ 8

$$Q_{OTHER} = M_{OTHER} \times C_p \times (T_{DRYING} - T_{AMB}) \quad \dots (8)$$

โดยที่	$Q_{OTHER}$	คือ ปริมาณความร้อนที่สูญเสียให้กับวัสดุต่างๆ (กิโลจูล)
	$M_{OTHER}$	คือ มวลของวัสดุต่างๆ (กิโลกรัม)
	$C_p$	คือ ค่าความร้อนจำเพาะของวัสดุส่วนต่างๆ (กิโลจูลต่อ กิโลกรัมเคลวิน)
	$T_{DRYING}$	คือ อุณหภูมิของลมร้อนที่ใช้ในการอบแห้ง (เคลวิน)
	$T_{AMB}$	คือ อุณหภูมิของอากาศ (เคลวิน)

4. การคำนวณปริมาณความร้อนที่สูญเสียให้บรรยากาศโดยรอบ ( $Q_{LOSS}$ ) เมื่ออุปกรณ์อบแห้งผ่านการทำงานมาระยะหนึ่งพื้นที่ผิวของอุปกรณ์จะมีอุณหภูมิสูงขึ้น การสูญเสียความร้อนนี้จะสูญเสียเท่ากับหรือใกล้เคียงอุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้ง โดยการสูญเสียมักเกิดจากการเปิดปิดประตูของอุปกรณ์อบแห้ง หรือการรั่วซึมของอุปกรณ์อบแห้ง ซึ่งจากการศึกษาของ Carneiro et al. (2016) จะพบว่าอุณหภูมิของอากาศระหว่างการเปิด - ปิดประตูบานเลื่อนของห้องเย็นในช่วงเวลา 3 - 11 วินาที จะทำให้อุณหภูมิอากาศเฉลี่ยภายในห้องเย็นเพิ่มขึ้น 17% ดังนั้นในการทดลองจะเกิดการสูญเสียความร้อนจากการเปิด-ปิดตู้อบแห้งเพื่อนำวัตถุดิบไปชั่งน้ำหนักทุกๆ 1 ชั่วโมงจะใช้เวลาในการนำวัตถุดิบออกจากตู้อบแห้ง 25-30 วินาที จึงกำหนดปริมาณความร้อนที่สูญเสียโดยรอบเท่ากับ 0.2 ในการคำนวณ ได้จากสมการที่ 9

$$Q_{LOSS} = 0.2 \times (Q_{SENSIBLE} + Q_{LATENT} + Q_{OTHER}) \quad \dots (9)$$

โดยที่	$Q_{LOSS}$	คือ ปริมาณความร้อนที่สูญเสียให้กับบรรยากาศโดยรอบ (กิโลจูล)
--------	------------	--

5. การคำนวณปริมาณความร้อนรวม ( $Q_{TOTAL}$ ) ปริมาณความร้อนทั้งหมดที่ใช้ในการอบแห้ง จะมาจากปริมาณความร้อนที่ได้ศึกษาเป็นส่วนๆ ดังกล่าวข้างต้น ซึ่งสามารถเขียนเป็นสมการสำหรับหาปริมาณความร้อนรวม ได้จากสมการที่ 10

$$Q_{TOTAL} = Q_{SENSIBLE} + Q_{LATENT} + Q_{OTHER} + Q_{LOSS} \quad \dots (10)$$

## 2.6 พัดลมและท่อลม

พัดลม (Fan or blower) หรือเครื่องสูบลมที่ใช้อากาศเป็นของไหลทำงาน (Working Fluid) โดยจะทำการขับเคลื่อนอากาศหรือก๊าซต่างๆที่เป็นของไหลทำงานให้เคลื่อนที่ด้วยความกดดันต่างๆ จนถึงความดันที่ 6.9 กิโลปาสคาล (1 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว) ด้วยปริมาตรของอากาศที่ถูกขับเคลื่อนต่อหน่วยเป็นจำนวนที่มากๆ พัดลมที่ใช้ในงานต่างๆ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในงานวิศวกรรมส่วนใหญ่แล้วจะใช้งานเกี่ยวกับการอบแห้งวัสดุทางการเกษตร การระบายอากาศ การทำความเย็นของระบบปรับอากาศ การลำเลียง และการให้ความร้อน เป็นต้น (ชนวัฒน์ นิตศน์วิจิตร, 2553) การจำแนกพัดลมสามารถแบ่งได้เป็นประเภทใหญ่ๆ ตามลักษณะการเคลื่อนที่ของอากาศได้ 2 ลักษณะดังนี้

1. พัดลมแบบหมุนแรงเหวี่ยง (Centrifugal flow or radial fans) มีการไหลของอากาศในแนวรัศมี จะประกอบด้วยใบพัดหมุนอยู่ภายในตัวเรือนของพัดลม (Fan house) ชุดใบพัดจะประกอบด้วยแผ่นใบเล็กๆประกอบเข้าด้วยกันเป็นลักษณะกบฏ ความดันของอากาศจะถูกทำให้มีค่าสูงขึ้นภายในตัวเรือนของพัดลม อากาศจะไหลผ่านเข้าไปในช่องทางเข้าโดยมีทิศทางขนานกับแกนของใบพัด และไหลออกในทิศทางตั้งฉากกับแกนของเพลลาใบพัดในช่องทางออก

2. พัดลมแบบอากาศไหลตามแนวแกน (Axial flow fans) พัดลมแบบนี้อากาศจะไหลขนานกับแกนของใบพัด และตั้งฉากกับระนาบการหมุนของใบพัด ชุดใบพัดจะถูกติดตั้งบนแกนเพลลาขับของมอเตอร์ต้นกำลัง ซึ่งอยู่ภายในตัวพัดลม ทำให้มอเตอร์สามารถระบายความร้อนออกไปกับอากาศที่ถูกขับเคลื่อน

การคำนวณหาขนาดของพัดลม สามารถคำนวณหาได้จากอัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศที่ต้องใช้ในการอบแห้ง ซึ่งสามารถคำนวณหาขนาดพัดลมได้ดังสมการที่ 11

$$Q = \frac{\dot{m}_{AIR}}{\rho} \quad \dots (11)$$

โดยที่  $Q$  คือ อัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศ (ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที)

$\dot{m}_{\text{AIR}}$  คือ อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศ (กิโลกรัม/วินาที)  
 $\rho$  คือ ความหนาแน่นของอากาศ (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)

และปริมาณลมร้อนที่ใช้สำหรับการอบแห้งผลิตภัณฑ์สามารถที่จะพิจารณาได้จากกระบวนการคิดที่ว่า ปริมาณความร้อนรวมที่ใช้ในการอบแห้งจะต้องได้รับจากลมร้อนเท่านั้น โดยสามารถเขียนสมการการคำนวณปริมาณลมร้อนที่ใช้ในการอบได้ดังสมการที่ 12

$$Q_{\text{TOTAL}} = m_{\text{AIR}} \times C_p \times (T_{\text{DRYING}} - T_{\text{AMB}}) \quad \dots (12)$$

โดยที่

$Q_{\text{TOTAL}}$	คือ ปริมาณลมร้อนที่ใช้สำหรับการอบแห้งผลิตภัณฑ์ (กิโลจูล)
$m_{\text{AIR}}$	คือ ปริมาณความร้อนที่ต้องการสำหรับอบแห้ง (กิโลกรัม)
$C_p$	คือ ค่าความร้อนจำเพาะของอากาศ (กิโลจูลต่อกิโลกรัมเคลวิน)
$T_{\text{DRYING}}$	คือ อุณหภูมิของลมร้อนที่ใช้ในการอบแห้ง (เคลวิน)
$T_{\text{AMB}}$	คือ อุณหภูมิของอากาศ (เคลวิน)

ท่อลม (Duct) ทำหน้าที่หลักในการพาอากาศจากจุดหนึ่งไปยังจุดต่างๆ ซึ่งสามารถเป็นการลำเลียงอากาศในทิศทางเดียวหรือหลายทิศทางได้ ซึ่งรูปร่างของท่อลมมีทั้งท่อแบบกลมและท่อแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้า การออกแบบท่อลมต้องคำนึงถึงการสูญเสียความเสียดทานในท่อ (Frictional Loss) เป็นผลมาจากความเสียดทานของอากาศกับผิวท่อ และความปั่นป่วนของอากาศขณะเคลื่อนที่ เกิดขึ้นตลอดความยาวของเส้นท่อ Friction Loss จะมากหรือน้อยเพียงใดนั้นขึ้นอยู่กับความเร็วของลมในท่อ ความหยาบของผิวด้านในท่อ และความยาวของท่อ การหาขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางท่อสามารถหาได้จากสมการที่ 13

$$D = 13.54 \sqrt{A} \quad \dots (13)$$

โดยที่

$D$	คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ (นิ้ว)
$A$	คือ พื้นที่หน้าตัดของท่อ (ตารางฟุต)

และพื้นที่หน้าตัดของท่อ สามารถหาได้จากสมการที่ 14

$$A = \frac{Q}{v} \quad \dots (14)$$

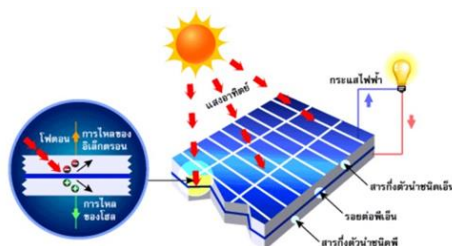
โดย  $Q$  คือ อัตราการไหลของอากาศ (ลูกบาศก์ฟุตต่อนาที)  
 $v$  คือ ความเร็วการไหลของอากาศ (ฟุตต่อนาที)

## 2.7 เซลล์แสงอาทิตย์

เซลล์แสงอาทิตย์ คือ สิ่งประดิษฐ์ที่ทำจากสารกึ่งตัวนำ เช่น ซิลิคอน (Silicon), แกลเลียมอาร์เซไนด์ (Gallium arsenide), อินเดียม ฟอสไฟด์ (Indium Phosphide) และคอปเปอร์ อินเดียม ไดเซเลไนด์ (Copper indium di selenide) เป็นต้น ซึ่งเมื่อได้รับแสงอาทิตย์โดยตรงก็จะเปลี่ยนเป็นพาหะนำไฟฟ้า และจะถูกแยกเป็นประจุไฟฟ้าบวกและลบเพื่อให้เกิดแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วทั้งสองของเซลล์แสงอาทิตย์ เมื่อนำขั้วไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ต่อเข้ากับอุปกรณ์ไฟฟ้ากระแสตรง กระแสไฟฟ้าจะไหลเข้าสู่อุปกรณ์เหล่านั้นทำให้สามารถทำงานได้

### หลักการทำงานทั่วไปของเซลล์แสงอาทิตย์

เซลล์แสงอาทิตย์จะทำงานเมื่อมีแสงอาทิตย์ตกกระทบเซลล์แสงอาทิตย์ จะเกิดการสร้างพาหะนำไฟฟ้าประจุลบและบวกขึ้น ได้แก่ อิเล็กตรอน และโฮล โครงสร้างรอยต่อพีเอ็นจะทำหน้าที่สร้างสนามไฟฟ้าภายในเซลล์ เพื่อแยกพาหะนำไฟฟ้าชนิดอิเล็กตรอนไปที่ขั้วลบ และพาหะนำไฟฟ้าชนิดโฮลไปที่ขั้วบวก (ปกติพื้นฐานจะใช้สารกึ่งตัวนำชนิดมี ขั้วไฟฟ้าด้านหลังจึงเป็นขั้วบวก ส่วนด้านรับแสงใช้สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น ขั้วไฟฟ้าจึงเป็นขั้วลบ) ทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าแบบกระแสตรงที่ขั้วไฟฟ้าทั้งสอง เมื่อต่อให้ครบวงจรไฟฟ้าจะเกิดกระแสไฟฟ้าไหลขึ้นดังรูปที่ 6



ภาพที่ 6 หลักการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์

ที่มา : (อำภา สารศิริ, 2561)

### ระบบการผลิตกระแสไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์

เซลล์แสงอาทิตย์จะผลิตไฟฟ้ากระแสตรงออกมา จึงนำกระแสไฟฟ้าไปใช้ได้เฉพาะกับอุปกรณ์ไฟฟ้ากระแสตรงได้เท่านั้น หากนำกระแสไฟฟ้าไปใช้กับอุปกรณ์ไฟฟ้าที่ใช้ไฟฟ้ากระแสสลับหรือเก็บสะสมพลังงานไว้ในแบตเตอรี่เพื่อใช้ครั้งต่อไปจะต้องใช้ร่วมกับอินเวอร์เตอร์แปลงไฟ และอุปกรณ์อื่นๆ โดยรวมอุปกรณ์ต่างๆเข้าด้วยกันให้เป็นระบบที่ผลิตกระแสไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ (กองถ่ายทอดและเผยแพร่เทคโนโลยี) อุปกรณ์สำคัญๆ มีดังนี้

1. แผงเซลล์แสงอาทิตย์ (Solar module) มีหน้าที่ในการเปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์ให้เป็นพลังงานไฟฟ้า ซึ่งไฟฟ้ากระแสตรงและกระแสสลับมีหน่วยเป็นวัตต์ (Watt) ในกรณีที่ต้องการใช้พลังงานแสงอาทิตย์ขนาดใหญ่จะมีการนำแผงเซลล์แสงอาทิตย์หลายๆ เซลล์มาต่อกันเป็นแถวหรือเป็นชุด (Solar array) เพื่อให้ได้พลังงานไฟฟ้าใช้งานตามที่ต้องการ โดยการเชื่อมต่อระบบจะมี 2 แบบคือ แบบอนุกรมจะเพิ่มแรงดันไฟฟ้า และการต่อกันแบบขนานจะเพิ่มพลังงานไฟฟ้า การหาขนาดของเซลล์แสงอาทิตย์ให้เพียงพอต่อการใช้งานจะคำนวณได้จากสมการที่ 15

$$\text{ขนาดของแผงเซลล์แสงอาทิตย์} = \frac{\text{ความจุของแบตเตอรี่ที่ต้องการ}}{\text{Peak Sun Hour (hr)}} \quad \dots (15)$$

โดยที่ Peak Sun Hour (PSH) คือ จำนวนชั่วโมงที่มีค่าแสงแดดดีมากและไม่มีเมฆต่อหนึ่งวัน (ชั่วโมง)

2. เครื่องควบคุมการอัดประจุ (Charging controller) ทำหน้าที่ประจุกระแสไฟฟ้าที่ผลิตได้จากแผงเซลล์แสงอาทิตย์เข้าสู่แบตเตอรี่ และควบคุมการประจุกระแสไฟฟ้าให้มีปริมาณเหมาะสมกับแบตเตอรี่ เพื่อยืดอายุการใช้งานของแบตเตอรี่ รวมถึงการจ่ายกระแสไฟฟ้าออกจากแบตเตอรี่ด้วย ดังนั้น การทำงานของเครื่องควบคุมการประจุ คือเมื่อประจุกระแสไฟฟ้าเข้าสู่แบตเตอรี่จนเต็มแล้วจะหยุดหรือลดการประจุกระแสไฟฟ้า (และมักจะมีคุณสมบัติในการตัดการจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับอุปกรณ์ไฟฟ้า กรณีแรงดันของแบตเตอรี่ลดลงด้วย) ระบบพลังงานแสงอาทิตย์จะใช้เครื่องควบคุมการประจุกระแสไฟฟ้าในกรณีที่มีการเก็บพลังงานไฟฟ้าไว้ในแบตเตอรี่เท่านั้น ขนาดของเครื่องควบคุมการอัดประจุสามารถหาได้จากสมการที่ 16

$$\text{ขนาดของตัวควบคุมการชาร์จประจุ} = \frac{\text{ขนาดของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (Watt)}}{\text{แรงดันไฟฟ้าของระบบ}} \quad \dots (16)$$

3. แบตเตอรี่ (Battery) เป็นตัวเก็บพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ไว้ใช้เวลาที่ต้องการ เช่น เวลาที่ไม่มีแสงอาทิตย์ เวลากลางคืน หรือนำไปประยุกต์ใช้งานอื่นๆ แบตเตอรี่มีหลายชนิดและหลายขนาดให้เลือกใช้งานตามความเหมาะสม การหาขนาดของแบตเตอรี่สามารถหาได้จากสมการที่ 17

$$\text{ความจุแบตเตอรี่} = \frac{\text{ความจุพลังงานของแบตเตอรี่ที่ต้องการ}}{\text{แรงดันไฟฟ้าของระบบ}} \quad \dots (17)$$

## 2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

กระวี ตรีอำนาจ และคณะ (2555) ศึกษาประสิทธิภาพการรับพลังงานแสงอาทิตย์ อัตราการระเหยน้ำอิสระ และอัตราการทำแห้ง ด้วยการอบแห้งพริกด้วยเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบตัวรับพาราโบลา เครื่องอบแห้งประกอบด้วย จานรับทำจากเหล็กแผ่นอบสังกะสีทรงพาราโบลา ขนาด 80 x 120 ตารางเซนติเมตร จำนวน 3 จาน ตัวจานรับถูกวางให้หันไปทางทิศใต้และทำมุมยก 15 องศา กับระนาบเพื่อรับรังสีจากดวงอาทิตย์ ติดตั้งท่อเหล็กสีดำขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 8 เซนติเมตร สำหรับสร้างลมร้อนบนแนวโพกัสของแต่ละจานและส่งลมร้อนเข้าสู่ห้องอบแห้งขนาด 100 x 60 x 75 ลูกบาศก์เซนติเมตร โดยการทดสอบอบแห้งพริกปริมาณ 400 กรัม ต่อครั้ง ในช่วงเวลาการทดสอบคือ 10.00 น. - 16.00 น. ของแต่ละวัน และอัตราการไหลอากาศ 3 ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที ผลการทดสอบพบว่า การรับพลังงานแสงอาทิตย์ของตัวรับพาราโบลามีค่าสูงสุดที่เวลา 13.00 น. ของวัน ค่าประสิทธิภาพตัวรับพาราโบลาเท่ากับ 51 เปอร์เซ็นต์ และทำอุณหภูมิอากาศอบแห้งได้สูงสุดเท่ากับ 60 องศาเซลเซียส ค่าอัตราการระเหยน้ำอิสระจำเพาะ (SMER) เป็น 0.098 กิโลกรัมน้ำต่อกิโลวัตต์ชั่วโมง และสามารถลดความชื้นของพริกให้เหลือน้อยที่สุดได้ 5.49 เปอร์เซ็นต์ความชื้นมาตรฐานแห้ง ที่อัตราการทำแห้ง 9.84 กรัมต่อชั่วโมง

Sekyere et al. (2016) ทำการออกแบบและสร้างเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบพาความร้อนธรรมชาติแบบผสมพร้อมฮีตเตอร์สำรอง เครื่องอบแห้งมีส่วนประกอบหลัก 4 ส่วนคือ แผ่นคอนกรีตดูดซับความร้อนและขึ้นหิน ทำหน้าที่เป็นสื่อเก็บความร้อนชั่วคราวเมื่อใช้ฮีตเตอร์สำรอง ขนาด 400 x 275 x 100 ลูกบาศก์มิลลิเมตร ฮีตเตอร์ต้านทานไฟฟ้า 1800 วัตต์ ติดอยู่ที่ฐานของตู้อบแห้งเพื่อสร้างความร้อน ห้องอบแห้งมีรูปทรงสี่เหลี่ยมคางหมูขนาด 141 x 367 มิลลิเมตร มีพัดตาข่ายโลหะที่จำนวน 3 ผัด และช่องระบายอากาศซึ่งอากาศขึ้นจะถูกระบายออกไปโดยรอบ การศึกษานี้เพื่อตรวจสอบปริมาณความชื้นของวัสดุอย่างต่อเนื่องจนกว่าจะได้รับความชื้นที่ต้องการระหว่าง 106 ถึง 184 เปอร์เซ็นต์ความชื้นมาตรฐานแห้ง และหาค่าประสิทธิภาพของเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบพาความร้อนแบบธรรมชาติใน 4 โหมดการทดลอง ได้แก่ โหมดที่หนึ่งเป็น

การอบแห้งอย่างต่อเนื่องที่มีการใช้พลังงานแสงอาทิตย์พลังงานในตอนกลางวันและฮีตเตอร์สำรองในตอนกลางคืน โหมดที่สองเป็นการอบแห้งด้วยความร้อนโดยใช้ฮีตเตอร์สำรองเท่านั้น โหมดที่สามเป็นการอบแห้งแบบไฮบริด และโหมดที่สี่เป็นใช้พลังงานแสงอาทิตย์เพียงอย่างเดียวในการอบแห้ง การทดสอบการอบแห้งทั้ง 4 โหมดเป็นการทดลองด้วยเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบพาความร้อนแบบธรรมชาติในระดับห้องปฏิบัติการ ผลการทดลองพบว่า เวลาในการอบแห้งเครื่องอบแห้งลดความชื้นของชิ้นสับปะรดจาก 1,049 เป็น 144 เปอร์เซ็นต์ความชื้นมาตรฐานแห้ง ใน 23 ชั่วโมง ภายใต้สถานการณ์ที่ 4, 924 เป็น 106 เปอร์เซ็นต์ความชื้นมาตรฐานแห้ง ใน 19 ชั่วโมง ภายใต้สถานการณ์ที่ 1, 1049 เป็น 184 เปอร์เซ็นต์ความชื้นมาตรฐานแห้ง ใน 10 ชั่วโมง ภายใต้สถานการณ์ที่ 2 และ 912 เป็น 155 เปอร์เซ็นต์ความชื้นมาตรฐานแห้ง ใน 7 ชั่วโมง ภายใต้สถานการณ์ที่ 3 ค่าเฉลี่ยของประสิทธิภาพการลดความชื้นคือ 27, 24, 11 และ 32 เปอร์เซ็นต์ สำหรับสถานการณ์ที่ 1, 2, 3 และ 4 ตามลำดับ

Vijayan et al. (2016) ศึกษาอัตราการไหลของมวล ประสิทธิภาพการอบแห้งของเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์สำหรับการอบแห้งมะระ และสร้างแบบจำลองการอบแห้งที่เหมาะสมสำหรับการอธิบายพฤติกรรมขั้นบาง ๆ ของมะระชั้นบาง ๆ ในการอบแห้งด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ทางอ้อมและการตากแดดแบบเปิด ชุดทดลองประกอบด้วย เครื่องเป่าลมขนาด 0.6 แรงม้า ถูกใช้เพื่อบังคับอากาศไปยังตัวเก็บพลังงานแสงอาทิตย์และห้องอบแห้ง แผ่นดูดซับพลังงานแสงอาทิตย์ลูกฟูกมีขนาด  $2 \times 1 \times 0.15$  ลูกบาศก์เมตร สื่อเก็บความร้อน (ก้อนกรวด) วางอยู่ด้านล่างแผ่นดูดซับลูกฟูกในทางเดินของอากาศเป็นสื่อที่มีรูพรุน และห้องอบแห้งขนาด  $0.75 \times 0.75 \times 1.05$  ลูกบาศก์เมตร ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า ความชื้นเริ่มต้น 92 เปอร์เซ็นต์ความชื้นมาตรฐานเปียก ของมะระลดลงเหลือ 9 เปอร์เซ็นต์ความชื้นมาตรฐานเปียกใน 7 ชั่วโมง ในระบบอบแห้งที่เสนอ ในขณะที่ 10 ชั่วโมง สำหรับการตากแดดแบบเปิด อัตราการลดความชื้นจำเพาะสูงสุดที่ 0.215 กิโลกรัมต่อกิโลวัตต์ชั่วโมง ที่อัตราการไหลของมวล 0.0636 กิโลกรัมต่อวินาที ใช้พลังงานจำเพาะที่สอดคล้องกันคือ 4.44 กิโลวัตต์ต่อชั่วโมงต่อกิโลกรัม และประสิทธิภาพการสะสมและการอบแห้งของระบบเท่ากับ 22 และ 19 ชั่วโมง ตามลำดับ

วิจิตรา ภูมิสวัสดิ์ (2560) ศึกษาประสิทธิภาพการอบแห้งโดยรางพาราโบลา โดยเปรียบเทียบประสิทธิภาพการอบแห้งด้วยพลังงานแสงอาทิตย์อีก 2 วิธีคือ เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์โดยไม่ใช้รางพาราโบลา และการตากแห้งบนลานตาก ชุดอบแห้งประกอบด้วยห้องอบแห้งปริมาตร  $0.9 \times 1.2 \times 2.4$  ลูกบาศก์เมตร แผ่นสแตนเลสโค้งรูปพาราโบลา มีระยะห่างจากผิวโค้ง และจุดโฟกัส 0.7 เมตร และขนาดหน้าตัดของจานมีขนาด  $1 \times 4$  ตารางเมตร ความเร็วอากาศในเครื่องอบแห้งโดยเฉลี่ย 0.5 เมตรต่อวินาที โดยการทดลองอบแห้งไขมันสำปะหลังสด 4 กิโลกรัม ตั้งแต่เวลา 9.00 - 16.00 นาฬิกา เพื่อลดความชื้นของไขมันสำปะหลังให้เหลือประมาณ 12 เปอร์เซ็นต์ความชื้นมาตรฐานเปียก



ผลการทดลองพบว่า อุณหภูมิในห้องอบแห้งโดยรางพาราโบลาตลอดทั้งวันเฉลี่ย 52 องศาเซลเซียส ซึ่งสูงกว่าเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์โดยไม่มีรางพาราโบลาซึ่งมีอุณหภูมิในห้องอบแห้งตลอดทั้งวันเฉลี่ย 43 องศาเซลเซียส และอุณหภูมিবนลานตากตลอดทั้งวันเฉลี่ย 36 องศาเซลเซียส อัตราการอบแห้งเฉลี่ย มีค่า 0.36, 0.23 และ 0.16 กิโลกรัมต่อชั่วโมง เวลาในการลดความชื้น 9, 13 และ 20 ชั่วโมง สำหรับเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์มีโดยใช้รางพาราโบลา เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์มีโดยไม่มีรางพาราโบลา และการตากแห้งโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์โดยตรง ตามลำดับ ดังนั้นประสิทธิภาพเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์โดยใช้รางพาราโบลามีประสิทธิภาพมากที่สุด คือ 16.4 เปอร์เซ็นต์ รองลงมาคือ เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์มีโดยไม่มีรางพาราโบลา คือ 10.7 เปอร์เซ็นต์ และประสิทธิภาพของการอบแห้งโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์โดยตรงมีค่าน้อยที่สุด 7.4 เปอร์เซ็นต์

Ullah and Kang (2017) ศึกษาประสิทธิภาพของตัวเก็บพลังงานแสงอาทิตย์แบบรางพาราโบลาสำหรับกระบวนการคายน้ำของผลไม้ตามฤดูกาล (แอปเปิล) ชุดทดสอบประกอบด้วยรางพาราโบลาเป็นแผ่นสะท้อนแสงทำจากแผ่นอะลูมิเนียมขนาด  $152.4 \times 121.92$  ตารางเซนติเมตร ตัวดูดซับประกอบด้วยท่อเหล็กพันสีดำพร้อมกระจกใสหนา 0.5 เซนติเมตร เพื่อป้องกันตัวดูดซับและได้รับประสิทธิภาพสูง ห้องอบแห้งทำจากวัสดุไม้ที่มีชั้นวาง 3 ชั้นและอากาศร้อนจากตัวดูดซับจะเข้าสู่ห้องอบแห้งจากด้านล่างจะติดกับพัดลมที่เชื่อมต่อกับทางเข้าของตัวดูดซับซึ่งรับอากาศร้อนจากตัวดูดซับและถ่ายโอนไปยังห้องอบแห้งเพื่อให้แอปเปิลแห้ง และผ่านออกอีกด้านหนึ่ง การทดลองดำเนินการโดยใช้อัตราการไหลของมวลอากาศ 3 ระดับได้แก่ 3.5, 2.7 และ 1.5 กิโลกรัม/นาที่ และเส้นผ่านศูนย์กลางของตัวดูดซับ 2 ระดับ ได้แก่ 5.08 และ 6.35 เซนติเมตร การอบแห้งเป็นเวลา 9 ชั่วโมง ตั้งแต่ 07:00 น. ถึง 16:00 น. ประสิทธิภาพของระบบได้รับการประเมินโดยจากอุณหภูมิของเครื่องอบแห้ง และประสิทธิภาพของตัวเก็บพลังงานแสงอาทิตย์ ผลการทดลองจะพบว่า อุณหภูมิของเครื่องอบแห้งสูงสุดคือ 45 องศาเซลเซียส เวลา 01:00 น. และอากาศภายในตัวดูดซับสูงสุดอยู่ที่ 65 องศาเซลเซียส ในเวลา 01:00 น. ประสิทธิภาพของตัวเก็บพลังงานแสงอาทิตย์เฉลี่ยที่เส้นผ่านศูนย์กลาง 5.08 เซนติเมตร เท่ากับ 23.0, 20.7 และ 19.6 เปอร์เซ็นต์ ที่อัตราการไหล 3.5, 2.7 และ 1.5 กิโลกรัมต่อนาที่ ตามลำดับ และประสิทธิภาพของตัวเก็บพลังงานแสงอาทิตย์เฉลี่ยที่เส้นผ่านศูนย์กลาง 6.35 เซนติเมตรเท่ากับ 22.5, 20.0 และ 17.9 เปอร์เซ็นต์ ที่อัตราการไหล 3.5, 2.7 และ 1.5 กิโลกรัมต่อนาที่ ตามลำดับ

Abubakar et al. (2018) ศึกษาและพัฒนาประสิทธิภาพของเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบผสมที่มีและไม่มีที่เก็บความร้อน ชุดทดสอบประกอบด้วยตัวเก็บแสงอาทิตย์สร้างโดยใช้แผ่นเหล็กชุบสังกะสี ตัวเก็บรวบรวมประกอบด้วยตัวดูดซับแผ่นปิดโปร่งใส (กระจก) และวัสดุกักเก็บความร้อน (หิน) ขนาด  $0.65 \times 0.43$  ตารางเมตร ห้องอบแห้งประกอบด้วยปล่องไฟ ถาด 3 ชั้น และกระจกโปร่งใสหนา 2 มิลลิเมตร ขนาด  $0.50 \times 0.43$  ตารางเมตร และปล่องไฟอิสระที่แยกออก

จากห้องอบแห้งทั้งสามห้องมีความสูง 0.70 เมตร ประสิทธิภาพของระบบได้รับการประเมินโดยจาก อัตราการอบแห้ง และประสิทธิภาพการอบแห้งของระบบ โดยทดสอบการอบแห้งมันเทศความหนาเฉลี่ย 5 มิลลิเมตร และเครื่องอบแห้งแต่ละชั้นใส่มันแกว 2 กิโลกรัม ใช้เวลาในการอบแห้ง 2 วัน การทดลองจะพบว่าอัตราการอบแห้งโดยเฉลี่ย ประสิทธิภาพการสะสม และประสิทธิภาพการอบแห้งของระบบอบแห้งที่มีการกักเก็บความร้อนเท่ากับ  $2.82 \times 10^{-5}$  กิโลกรัมต่อวินาที, 78.25 และ 29.15 เปอร์เซ็นต์ และ  $2.71 \times 10^{-5}$  กิโลกรัมต่อวินาที, 67.30 และ 28.20 เปอร์เซ็นต์ ที่วันที่ 1 และ 2 ตามลำดับ และอัตราการอบแห้งโดยเฉลี่ย ประสิทธิภาพการสะสม และประสิทธิภาพการอบแห้งของระบบอบแห้งที่ไม่มีการกักเก็บความร้อนเท่ากับ  $2.55 \times 10^{-5}$  กิโลกรัมต่อวินาที, 42.20 และ 25.35 เปอร์เซ็นต์ และ  $2.35 \times 10^{-5}$  กิโลกรัมต่อวินาที, 40.10 และ 23.1 เปอร์เซ็นต์ ที่วันที่ 1 และ 2 ตามลำดับ

Das and Akpinar (2020) ทำการศึกษาประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์พร้อมระบบติดตามแสงอาทิตย์ ตัวเก็บอากาศพลังงานแสงอาทิตย์ (SAC) มาพร้อมกับคุณสมบัติการติดตามแสงอาทิตย์ ชุดทดลองที่พัฒนาขึ้นประกอบด้วยตู้อบแห้งสองตู้ทำจากอะลูมิเนียมหนา 2 มิลลิเมตร ขนาด  $1000 \times 500 \times 100$  ลูกบาศก์มิลลิเมตร ตัวเก็บอากาศพลังงานแสงอาทิตย์ (SAC) คงที่และเคลื่อนที่พร้อมระบบควบคุมทำจากอะลูมิเนียมหนา 4 มิลลิเมตร ขนาด  $1400 \times 800 \times 150$  ลูกบาศก์มิลลิเมตร ระบบอบแห้งทั้งสองยังมีพัดลมหมุนเวียนขนาด 0.35 กิโลวัตต์ เชื่อมต่อเกลียวกับท่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 มิลลิเมตร การทดลองนี้เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการอบแห้งขึ้นแอปเปิลถูกทำให้แห้งพร้อมกันในระบบอบแห้งอาหารที่มีตัวเก็บอากาศพลังงานแสงอาทิตย์แบบคงที่และเคลื่อนที่ได้ ทำให้แห้งในทั้งสองระบบสำหรับความเร็วพัดลมที่แตกต่างกัน 1690, 1400 และ 840 รอบต่อนาที ผลการทดลองพบว่า อุณหภูมิอากาศที่ทางออกของตัวเก็บอากาศพลังงานแสงอาทิตย์แบบคงที่และเคลื่อนที่มีค่า 51.7 ถึง 81.7 องศาเซลเซียส และ 73.2 ถึง 86.6 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ประสิทธิภาพของตัวสะสมอากาศแสงอาทิตย์เฉลี่ยคำนวณเป็น 75.7 และ 51.7 เปอร์เซ็นต์ โดยประสิทธิภาพสูงสุดของระบบอบแห้งทั้งสองที่ความเร็วพัดลม 1690 รอบต่อนาที

Malakar et al. (2021) ศึกษาประสิทธิภาพการเก็บพลังงานแสงอาทิตย์ประสิทธิภาพของเครื่องอบแห้ง และระยะเวลาคืนทุนของเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบท่อส่งความร้อนที่พัฒนาขึ้น เครื่องอบแห้งที่สร้างขึ้นประกอบด้วย ท่อส่งความร้อนมีความยาวรวมของท่อรวมคือ 1.8 เมตร และหุ้มด้วยใยแก้วที่มีความหนา 30 มิลลิเมตร เพื่อลดการสูญเสียความร้อน ความจุของบอลเวอร์ 0.05 แรงม้า และห้องอบแห้งถูกสร้างขึ้นจากไม้อัดความหนา 4 มิลลิเมตร ขนาด 4 ตารางเมตร ทดสอบในสภาวะที่ไม่มีไหลและไหลเต็มที่ความเร็วการไหลของอากาศที่แตกต่างกัน (1, 2 และ 3 เมตร / วินาที) และประเมินด้วยการทดลองอบแห้งกานพลูกระเทียมจำนวน 10 กก. ถูกทำให้แห้ง

จาก 69 ถึง 8 เปอร์เซ็นต์ความชื้นมาตรฐานเปียก ภายในระยะเวลาแสงแดด 8 ชั่วโมง จากการทดลองพบว่า ประสิทธิภาพของการเก็บพลังงานแสงอาทิตย์ที่ไม่มีสภาวะโหลดได้รับการประเมินโดยพิจารณาจากอุณหภูมิที่ทำได้ภายในห้องอบแห้งพบว่าอุณหภูมิห้องอบแห้งมีความแตกต่างกันตั้งแต่ 55 – 79.5 องศาเซลเซียส, 52 – 86.7 องศาเซลเซียส และ 58 – 82.5 องศาเซลเซียส ที่ความเร็วลม 1, 2 และ 3 เมตรต่อวินาที ตามลำดับ และการวิเคราะห์ประสิทธิภาพพร้อมเงื่อนไขที่มีโหลดพบว่า ปริมาณความชื้นเริ่มต้นโดยเฉลี่ยของกานพลูกระเทียมอยู่ที่ 69 เปอร์เซ็นต์ความชื้นมาตรฐานเปียก ซึ่งลดลงเหลือ 19.5, 10 และ 14 เปอร์เซ็นต์ความชื้นมาตรฐานเปียก ภายใน 8 ชั่วโมง ที่ความเร็วลม 1, 2 และ 3 เมตรต่อวินาที ตามลำดับ อัตราการอบแห้งสูงสุดเท่ากับ 1.24, 1.56 และ 1.28 กิโลกรัมต่อชั่วโมง ที่ความเร็วลม 1, 2 และ 3 เมตรต่อวินาที ตามลำดับ ประสิทธิภาพการเก็บพลังงานแสงอาทิตย์โดยเฉลี่ยอยู่ที่ 23.78, 39.91 และ 34.57 เปอร์เซ็นต์ ที่ 1, 2 และ 3 เมตรต่อวินาที ตามลำดับ ประสิทธิภาพของเครื่องอบแห้งสูงสุดเท่ากับ 43, 56 และ 48 เปอร์เซ็นต์ ที่ความเร็วลม 1, 2 และ 3 เมตรต่อวินาที ตามลำดับ และระยะเวลาคืนทุนของเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบท่อส่งความร้อนที่พัฒนาขึ้นคือ 1.3 ปี

ดังนั้นจึงนำข้อมูลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องสรุปเพื่อเปรียบเทียบดังแสดงในตารางที่ 1



ตารางที่ 1 สรุปผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ผู้แต่ง	ชื่อเรื่อง	ผลิตภัณฑ์ ที่ศึกษา	สิ่งที่ศึกษา	การทดสอบ	ผลการศึกษา
กร ชวี และคณะ (2555)	การออกแบบห้องพริกด้วยเครื่อง อบแห้งแสงอาทิตย์แบบตัวรับ พาราโบลา	พริก ที่ศึกษา	ศึกษาประสิทธิภาพการรับ พลังงานแสงอาทิตย์ด้วยเครื่อง อบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบ ตัวรับพลังงานแสงอาทิตย์รูปทรง พาราโบลา	ทดสอบอบแห้งพริก ปริมาณ 400 กรัม ต่อ ครั้ง และอัตราการไหล อากาศ 3 ลูกบาศก์เมตร ต่อวินาที	ค่าประสิทธิภาพตัวรับ พาราโบลาเท่ากับ 51 เปอร์เซ็นต์ และลด ความชื้นของพริก 5.49 เปอร์เซ็นต์ความชื้น มาตรฐานแห้ง
Sekyere และคณะ (2016)	การทดลองตรวจสอบ ลักษณะการอบแห้งของ เครื่องอบแห้งพลังงาน แสงอาทิตย์แบบพาคามร้อน ธรรมชาติแบบผสมพรีมอีดี เตอร์สำรอง	สับปรด	ออกแบบเครื่องอบแห้งพลังงาน แสงอาทิตย์ด้วยแผ่นคอนกรีตดูด ซับความร้อนและชั้นหิน เพื่อ ตรวจสอบปริมาณความชื้นของ วัสดุ ระหว่าง 106 ถึง 184 เปอร์เซ็นต์ความชื้นมาตรฐาน แห้ง และหาค่าประสิทธิภาพของ เครื่องอบแห้ง	การทดสอบการอบแห้ง 4 โทมต	ค่าเฉลี่ยของ ประสิทธิภาพคือ 27, 24, 11 และ 32 เปอร์เซ็นต์ สำหรับ สถานการณ์ที่ 1, 2, 3 และ 4 ตามลำดับ

ตารางที่ 1 สรุปผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (ต่อ)

ผู้แต่ง	ชื่อเรื่อง	ผลิตภัณฑ์ ที่ศึกษา	สิ่งที่ศึกษา	การทดสอบ	ผลการศึกษา
Vijayan และคณะ (2016)	การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และการวิเคราะห์ประสิทธิภาพของการอบแห้งชิ้นบาง ๆ ของมะระในเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ทางอ้อมที่มีการจัดเก็บที่เหมาะสม	มะระ	ศึกษาประสิทธิภาพการอบแห้งของเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์สำหรับการอบแห้งมะระ ด้วยเครื่องอบแห้งที่มีแผ่นดูดซับพลังงานแสงอาทิตย์คู่ทุก	การอบแห้งด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ทางอ้อมและการตากแดดแบบเปิด	ค่าประสิทธิภาพตัวเก็บพลังงานแสงอาทิตย์และเครื่องอบแห้งโดยเฉลี่ยเท่ากับ 22 และ 19 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ
วิจิตร ภูมิสวัสดิ์ (2560)	การเพิ่มประสิทธิภาพเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ด้วยรางพาราโบลา	ใบมันสำปะหลัง	ศึกษาประสิทธิภาพการอบแห้งของเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์โดยใช้รางพาราโบลา	การอบแห้งโดยใช้รางพาราโบลา เปรียบเทียบกับการอบแห้งโดยไม่ใช้รางพาราโบลา และการตากแห้งโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์โดยตรง	ประสิทธิภาพเครื่องอบแห้งแสงอาทิตย์เท่ากับ 16.4, 10.7 และ 7.4 เปอร์เซ็นต์

ตารางที่ 1 สรุปผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (ต่อ)

ผู้แต่ง	ชื่อเรื่อง	ผลิตภัณฑ์ ที่ศึกษา	สิ่งที่ศึกษา	การทดสอบ	ผลการศึกษา
Fahim	ผลกระทบของอัตราการไหล	แอปเปิล	ศึกษาประสิทธิภาพของตัวเก็บ	ทดลองอัตราการไหล	ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพ
Ullah	ของอากาศต่อการอบแห้ง		พลังงานแสงอาทิตย์แบบราง	ของมวลอากาศ 3	สูงสุด และต่ำสุด
และ Min	ของแอปเปิลและการ	พาราโบล่า		ระดับได้แก่ 3.5, 2.7	เท่ากับ 23 และ 19.6 ที่
Kang	ประเมินประสิทธิภาพของตัว			และ 1.5 กิโลกรัมต่อ	อัตราการไหล 3.5 และ
(2017)	เก็บพลังงานแสงอาทิตย์แบบ			นาที่	1.5 กิโลกรัมต่อนาที่
	รางพาราโบล่า				
Abubakar	การพัฒนาและเปรียบเทียบ	มันเทศ	ศึกษาอัตราการอบแห้ง และ	การอบแห้งแบบผสมที่มี	ประสิทธิภาพที่เก็บ
และคณะ	ประสิทธิภาพของเครื่อง		ประสิทธิภาพการอบแห้งของ	และไม่มีการอบแห้ง	พลังงาน และ
(2018)	อบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์		ระบบ ด้วยเครื่องอบแห้งที่ตัวดูด	และไม่มีที่เก็บความร้อน	
	แบบผสมที่มีและไม่มีที่เก็บ		ซับทำจากแผ่นปิดโปร่งใส		ประสิทธิภาพการ
	ความร้อน		(กระจก) และวัสดุที่เก็บความ		อบแห้งของเครื่องอบ
			ร้อน (หิน)		แห้งที่มีและไม่มีการเก็บ
					ความร้อน 67.25 และ
					28.75 เปอร์เซ็นต์
					ตามลำดับ

ตารางที่ 1 สรุปผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (ต่อ)

ผู้แต่ง	ชื่อเรื่อง	ผลิตภัณฑ์ ที่ศึกษา	สิ่งที่ศึกษา	การทดสอบ	ผลการศึกษา
Mehmet Das และ คณ (2020)	การศึกษาประสิทธิภาพความ ร้อนและการอบแห้งของ เครื่องอบแห้งพลังงาน แสงอาทิตย์พร้อมระบบ ติดตามแสงอาทิตย์	แอปเปิ้ล	ศึกษาประสิทธิภาพเชิงความ ร้อนของเครื่องอบแห้งพลังงาน แสงอาทิตย์พร้อมระบบติดตาม ต่อหน้าที่ แสงอาทิตย์	ความเร็วพัดลมที่ 1690, 1400 และ 840 รอบ	ประสิทธิภาพของตัว สะสมอากาศจาก แสงอาทิตย์ 75.7 และ 51.7 เปอร์เซ็นต์ สำหรับแบบเคลื่อนที่ และแบบคงที่
Santanu Malakar และคณะ (2021)	การออกแบบและการ ประเมินประสิทธิภาพของ เครื่องอบแห้งพลังงาน แสงอาทิตย์แบบท่ออพยพ สำหรับการอบแห้งกานพลู กระเทียม	กานพลู	ศึกษาประสิทธิภาพการเก็บ พลังงาน แสงอาทิตย์ ประสิทธิภาพของเครื่องอบแห้ง และระยะเวลาคืนทุนของเครื่อง อบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบ ท่อส่งความร้อน	ทดสอบในสภาวะที่ไม่มี โหลดและโหลดเต็มที่ ความเร็วลม 1, 2 และ 3 เมตรต่อวินาที	ประสิทธิภาพที่เก็บ พลังงานสูงสุดและ ประสิทธิภาพของเครื่อง อบแห้ง 45.86 และ 56 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ที่ ความเร็วลม 2 เมตรต่อ วินาที

## บทที่ 3

### อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

#### 3.1 วัสดุและอุปกรณ์

ในการศึกษาวิจัยเพื่อพัฒนาเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ด้วยท่อลมร้อนร่วมกับตัวรับรังสีดวงอาทิตย์แบบรางพาราโบลาได้ใช้วัสดุและอุปกรณ์ดังนี้

##### 1. วัสดุที่ใช้ในการทดลอง

- ใบเตย
- ชিং
- กระเจียบแดง

2. อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ด้วยท่อลมร้อนร่วมกับตัวรับรังสีดวงอาทิตย์แบบรางพาราโบลา

- |  |           |
|--|-----------|
| - เครื่องอบแห้งผลผลิตทางการเกษตรด้วยท่อลมร้อนร่วมกับพัดลมพลังงานแสงอาทิตย์                             | 1 เครื่อง |
| - เครื่องวัดสี (Spectrophotometer) ยี่ห้อ Hunterlab รุ่น MiniScan XE plus                              | 1 เครื่อง |
| - เครื่องชั่งละเอียด (Analytical Balance) ทศนิยม 2 ตำแหน่ง 1 เครื่อง ยี่ห้อ Sartorius รุ่น BSA3202S-CW |           |
| - เครื่องวัดค่าปริมาณน้ำอิสระ ( $a_w$ meter) ยี่ห้อ AQUA lab รุ่น 3TE                                  | 1 เครื่อง |
| - เครื่องวัดอุณหภูมิและความเร็วลม (Anemometer) ยี่ห้อ Testo รุ่น Testo 425                             | 1 เครื่อง |
| - เครื่องวัดความชื้น (Thermo hygrometer) ยี่ห้อ Graigar รุ่น 87799                                     | 1 เครื่อง |
| - เครื่องวัดความเข้มแสง (Lux meter) ยี่ห้อ Solar power meter รุ่น SPM-1116SD                           | 1 เครื่อง |



### 3.2 การพัฒนาเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ด้วยท่อลมร้อนร่วมกับตัวรับรังสีดวงอาทิตย์แบบรางพาราโบลา

ข้อมูลเบื้องต้นที่ใช้ในการออกแบบเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ด้วยท่อลมร้อนร่วมกับตัวรับรังสีดวงอาทิตย์แบบรางพาราโบลาสำหรับการอบแห้งผลผลิตทางการเกษตรที่มีลักษณะทางกายภาพแตกต่างกัน 3 ชนิด ในแต่ละครั้งจะอบครั้งละ 1.5 กิโลกรัม โดยมีความชื้นก่อนเข้าสู่ตู้อบแห้ง 90 ความชื้นมาตรฐานเปียก ถึงความชื้นสุดท้าย 10 ความชื้นมาตรฐานเปียก อุณหภูมิอากาศก่อนเข้าสู่ตู้อบแห้ง 25 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้ง 50 องศาเซลเซียส โดยมีระยะเวลาในการอบแห้ง 7 ชม. (09.00 – 16.00 นาฬิกา) การออกแบบองค์ประกอบแต่ละส่วนของของเครื่องอบแห้งผลผลิตทางการเกษตรด้วยท่อลมร้อนร่วมกับพัดลมพลังงานแสงอาทิตย์จะถูกคำนวณโดยขั้นตอนต่อไปนี้

1. การคำนวณปริมาณความร้อนที่ใช้อบแห้ง มักจะมาจากอุณหภูมิบรรยากาศไปยังอุณหภูมิที่ใช้สำหรับอบแห้ง โดยปริมาณความร้อนทั้งหมดที่จำเป็นต้องใช้ในการอบแห้งจะหามาจากปริมาณความร้อนทั้งหมด 4 ส่วนได้แก่  $Q_{\text{SENSIBLE}}$ ,  $Q_{\text{LATENT}}$ ,  $Q_{\text{OTHER}}$  และ  $Q_{\text{LOSS}}$

2. การคำนวณหาปริมาณความร้อนที่ใช้ในการอบแห้งผลิตภัณฑ์ โดยความร้อนที่นำมาใช้คือลมร้อนที่ไหลผ่านท่อ โดยคำนวณจากค่าปริมาณความร้อนรวม  $Q_{\text{TOTAL}}$

3. การคำนวณหาขนาดของพัดลม คำนวณได้จากอัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศ เมื่อทราบค่าอัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศจึงสามารถนำไปเลือกขนาดของพัดลมได้

4. การหาขนาดท่อ เมื่อเราทราบค่าอัตราการไหลของพัดลมแล้ว จากนั้นจะต้องหาขนาดของท่อลมที่ใช้ในการส่งลมร้อนไปยังห้องอบแห้ง จึงคำนวณหาขนาดท่อลมด้วยวิธีความเร็วคงที่

5. การหาพื้นที่ระบบแลกเปลี่ยนความร้อนจากแสงอาทิตย์ของท่อลมร้อน เพื่อความเหมาะสมและความสมดุลในการวางท่อลมร้อน จึงต้องคำนวณหาพื้นที่รับความร้อนทั้งหมดภายในท่อจากสมการที่ 4 แต่เมื่อต้องการทราบค่า A จึงย้ายข้างสมการ

6. การคำนวณระบบเซลล์แสงอาทิตย์ ประกอบด้วยอุปกรณ์ 3 ส่วนคือ แผงเซลล์แสงอาทิตย์ ตัวควบคุมการชาร์จประจุ และแบตเตอรี่ การคำนวณหาขนาดของอุปกรณ์ต่างๆสามารถหาได้จากสมการที่ 15 - 17

### 3.3 วิธีการเตรียมวัตถุดิบ

1. การเตรียมใบเตย นำใบเตยมาล้างทำความสะอาดด้วยน้ำสะอาด เพื่อแยกสิ่งที่ปนเปื้อน หลังจากนั้นหั่นใบเตยให้ได้ขนาดประมาณ 1 – 1.5 เซนติเมตร พร้อมสะเด็ดน้ำให้แห้ง บรรจุใส่ถุงพลาสติกเก็บรักษาที่อุณหภูมิ  $10 \pm 0.5$  องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

2. การเตรียมขิง ล้างทำความสะอาดด้วยน้ำสะอาด เพื่อแยกสิ่งที่ปนเปื้อน หลังจากนั้นหั่นหรือซอยขิงให้มีความหนาประมาณ 3 – 4 มิลลิเมตร พร้อมสะเด็ดน้ำให้แห้ง บรรจุใส่ถุงพลาสติกเก็บรักษาที่อุณหภูมิ  $10 \pm 0.5$  องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

3. การเตรียมกระเจี๊ยบแดง ล้างทำความสะอาดด้วยน้ำสะอาด เพื่อแยกสิ่งที่ปนเปื้อน หลังจากนั้นวางบนตะแกรงเพื่อสะเด็ดน้ำ และบรรจุใส่ถุงพลาสติกเก็บรักษาที่อุณหภูมิ  $10 \pm 0.5$  องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

### 3.4 การทดสอบและประเมินสมรรถนะในการอบแห้งของเครื่องอบแห้ง

#### การทดสอบอบแห้งผลผลิตทางการเกษตร

ในการทดลองนี้ได้ทดลองเพื่อเปรียบเทียบหาประสิทธิภาพและหาสภาวะที่เหมาะสมในการอบแห้งที่แตกต่างกันไปในแต่ละการทดลอง โดยมีชุดการทดลองดังนี้

1. การหาความร้อนแบบธรรมชาติ เพื่อนำมาเปรียบเทียบประสิทธิภาพทางความร้อน โดยทุกการทดลองจะมีตัวแปรควบคุมคือ วัตถุดิบจำนวน 1.5 กิโลกรัม ทดสอบภายใต้สภาวะบรรยากาศปกติ โดยไม่ได้ควบคุมอุณหภูมิและความชื้นของอากาศ การทดสอบการอบแห้งดำเนินการระหว่างเวลา 9.00 น. ถึง 16.00 นาฬิกา และบันทึกข้อมูลทุกชั่วโมง ในวันที่แสงแดดแจ่มใส โดยลักษณะการอบแห้งแบบธรรมชาติแสดงดังภาพที่ 7



ภาพที่ 7 ลักษณะการอบแห้งแบบธรรมชาติ

2. การพาความร้อนแบบบังคับ คือการทดลองเครื่องอบแห้งที่มีการทำงานร่วมกับพัดลมพลังงานแสงอาทิตย์ที่มีการเปลี่ยนความเร็วลม โดยการประเมินลักษณะทางความร้อนที่แตกต่างกัน ในระหว่างการอบแห้งผลิตภัณฑ์ การทดลองดำเนินการด้วยความเร็วลมที่แตกต่างกัน ได้แก่ 1, 2 และ 3 เมตรต่อวินาที เพื่อตรวจสอบพารามิเตอร์การออกแบบและประสิทธิภาพของเครื่องอบแห้งที่พัฒนาขึ้น ประสิทธิภาพของเครื่องอบแห้งที่พัฒนาขึ้นได้รับการประเมินโดยพิจารณาจากอัตราการอบแห้ง อัตราส่วนความชื้น ประสิทธิภาพของตัวเก็บพลังงานแสงอาทิตย์ และประสิทธิภาพของเครื่องอบแห้ง โดยลักษณะการอบแห้งแบบธรรมชาติแสดงดังภาพที่ 8



ภาพที่ 8 การอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ด้วยท่อลมร้อนร่วมกับตัวรับรังสีดวงอาทิตย์แบบรางพาราโบลา

#### การวิเคราะห์คุณภาพหลังการอบแห้งผลิตภัณฑ์

1. ค่าปริมาณน้ำอิสระ (Water activity,  $a_w$ ) ค่า  $a_w$  วัดค่าโดยใช้เครื่องวัด  $a_w$  meter ยี่ห้อ AQUA lab รุ่น 3 TE หลักการทำงานเป็นแบบอัตโนมัติ โดยการแสดงผลออกมาเป็นตัวเลขไม่มีหน่วย มีค่าตั้งแต่ 0 ถึง 1 โดยสุ่มตัวอย่างแต่ละชนิดออกมาจากตู้อบแห้งในแต่ละชั้น ชั้นละ 2 กรัม เครื่องวัด  $a_w$  จะทำการอ่านค่า  $a_w$  ออกมา โดยมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน มผช. 136/2558 กำหนดว่าผักและผลไม้อบแห้งมีค่าวอเตอร์แอกทีวิตี้ไม่เกิน 0.6 (สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, 2558)

2. การทดสอบคุณภาพด้านสี วัดค่าสีโดยใช้เครื่องวัดสี Spectrophotometer ยี่ห้อ Hunterlab รุ่น MiniScan XE plus การตรวจวัดค่าสีตรวจโดยใช้ระบบ CIE Lab scale โดยการตรวจวัดค่าสีจะ เป็นการแสดงผลออกมาในระบบการบรรยายสีแบบ 3 มิติ โดยแกน  $L^*$  จะบรรยายถึงค่า

ความสว่าง(Lightness) แกน  $a^*$  จะบรรยายถึงแกนสีเขียวและสี ส่วนแกน  $b^*$  จะบรรยายถึงแกนสีน้ำเงินและสีเหลือง

### การประเมินประสิทธิภาพของการอบแห้ง

1. อัตราการอบแห้ง (Drying rate, DR) เป็นสัดส่วนกับความแตกต่างของปริมาณความชื้นของวัสดุที่จะทำให้แห้งในช่วงเวลาหนึ่งหน่วย สามารถบอกให้ทราบถึงระยะเวลาที่ใช้ในการอบแห้งหรือค่าความชื้นที่ระเหยออกไปได้ต่อหน่วยเวลา โดยสามารถหาได้จากสมการที่ 18

$$DR = \frac{W_i - W_f}{t} \quad \dots (18)$$

โดยที่	DR	คือ อัตราการอบแห้ง (กิโลกรัมต่อชั่วโมง)
	$W_i$	คือ น้ำหนักเริ่มต้นของวัตถุดิบ (กิโลกรัม)
	$W_f$	คือ น้ำหนักสุดท้ายของผลิตภัณฑ์อบแห้ง (กิโลกรัม)
	t	คือ ระยะเวลาที่ใช้ในการอบแห้ง (ชั่วโมง)

2. อัตราส่วนความชื้น (Moisture ratio, MR) คืออัตราส่วนของความแตกต่างระหว่างความชื้นเริ่มต้นเมื่อเวลาการอบแห้งดำเนินต่อไปในเวลาใดๆ ค่าอัตราส่วนความชื้นบ่งบอกถึงอัตราการเปลี่ยนแปลงมวลน้ำในวัสดุ สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 19

$$MR = \frac{M_t - M_e}{M_i - M_e} \quad \dots (19)$$

โดยที่	$M_t$	คือ ความชื้นที่เวลาใด ๆ ของวัสดุ (เปอร์เซ็นต์)
	$M_i$	คือ ความชื้นเริ่มต้นของวัสดุ (เปอร์เซ็นต์)
	$M_e$	คือ ความชื้นสมดุลของวัสดุ (เปอร์เซ็นต์)

### การประเมินประสิทธิภาพของระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์

1. ประสิทธิภาพของท่อลมร้อนร่วมกับตัวรับรังสีดวงอาทิตย์แบบรางพาราโบลา (Solar collector) มีหน้าที่เปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์ให้เป็นความร้อน เพื่อใช้แลกเปลี่ยนความร้อนให้อากาศที่ดูดเข้ามาให้มีอุณหภูมิสูงขึ้นก่อนที่จะไหลเข้าสู่ห้องอบแห้งของเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ โดยประสิทธิภาพของตัวเก็บพลังงานแสงอาทิตย์เป็นอัตราส่วนของความร้อนที่ได้รับจากอากาศที่ปล่อยให้ตัวสะสมกับพลังงานแสงอาทิตย์ตกกระทบในช่วงเวลาหนึ่งสำหรับการทำให้ผลิตภัณฑ์อาหารแห้งอย่างมีประสิทธิภาพ สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 20

$$\eta_c = \frac{\dot{m}_a c_p (\Delta T)}{G_t A_c} \times 100 \quad \dots (20)$$

โดยที่	$\eta_c$	คือ ประสิทธิภาพของตัวเก็บรังสีความร้อน (เปอร์เซ็นต์)
	$\dot{m}_a$	คือ อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศ (กิโลกรัมต่อวินาที)
	$C_p$	คือ ค่าความจุความร้อนจำเพาะของอากาศ (กิโลจูลต่อกิโลกรัมเคลวิน)
	$\Delta T$	คือ ความแตกต่างของอุณหภูมิขาเข้าและขาออก (เคลวิน)
	$G_t$	คือ ความเข้มแสงอาทิตย์ (กิโลวัตต์ต่อตารางเมตร)
	$A_c$	คือ พื้นที่รับแสงอาทิตย์ (ตารางเมตร)

2. ประสิทธิภาพเครื่องอบแห้ง ห้องอบแห้ง (Drying chamber) มีหน้าที่บรรจุมวลผลิตในการอบแห้ง และช่วยป้องกันผลผลิตจากการ ระบายของแมลงและสัตว์ตลอดจนป้องกันการปนเปื้อนของฝุ่นและน้ำฝน ประสิทธิภาพทางความร้อนเป็นตัวบอกระสิทธิภาพของเครื่องอบแห้งได้ ซึ่งสามารถหาได้จากสัดส่วนของพลังงานความร้อนที่ใช้ในการระเหยต่อพลังงานที่ให้กับระบบอบแห้งด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 21

$$\eta_{th} = \frac{\dot{m} h_{fg}}{G_t A_c + G_t A_{ch} + E_{fan}} \times 100 \quad \dots (21)$$

โดยที่	$\eta_{th}$	คือ ประสิทธิภาพของห้องอบแห้ง (เปอร์เซ็นต์)
	$\dot{m}$	คือ อัตราการไหลของมวลน้ำที่ระเหย (กิโลกรัม/วินาที)

$h_{fg}$	คือ ความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอของน้ำ (กิโลจูลต่อกิโลกรัม)
$A_{ch}$	คือ พื้นที่ของห้องอบแห้ง (ตารางเมตร)
$t$	คือ เวลาที่ใช้ระเหยน้ำออกจากวัสดุอบแห้ง (ชั่วโมง)
$E_{fan}$	คือ พลังงานไฟฟ้าที่ให้กับพัดลม (จูล)

### การวิเคราะห์ต้นทุนผลตอบแทนทางด้านเศรษฐศาสตร์

การวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ จากการประเมินต้นทุน หรือค่าใช้จ่าย (Cost) ประกอบด้วย ค่าใช้จ่ายในการลงทุน (Investment costs) และค่าใช้จ่ายในการดำเนินการผลิต (Operating costs) ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1. ค่าใช้จ่ายในการลงทุน (Investment costs) ค่าใช้จ่ายที่เกิดขึ้นเพื่อเตรียมความพร้อมที่จะดำเนินการผลิต ซึ่งค่าใช้จ่ายนี้ไม่ผันตามขนาดการผลิตเรียกว่า ต้นทุนคงที่ (Fixed cost) ต้นทุนคงที่จะประกอบไปด้วย ค่าใช้ที่ดิน ค่าเสื่อมเครื่องมืออุปกรณ์ สำหรับโครงการผลิตเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ด้วยท่อลมร้อนร่วมกับตัวรับรังสีดวงอาทิตย์แบบรางพาราโบล่าเป็นการผลิตขนาดเล็ก

1.1 ค่าเสื่อมราคาตู้อบแห้ง การคิดค่าเสื่อมราคาของทรัพย์สินจะต้องทราบราคาของทรัพย์สินที่ซื้อมาครั้งแรก มูลค่าซาก (Salvage value หรือ Scrap value) หลังจากที่ไม่สามารถใช้ประโยชน์ในการผลิตผลิตภัณฑ์ได้ต่อไป ดังนั้นค่าเสื่อมราคาของตู้อบแห้งมีสูตรการคำนวณดังสมการที่ 22

$$A = \frac{(V - S)}{Y \times W_D} \quad \dots (22)$$

โดยที่	A	คือ ต้นทุนค่าใช้จ่ายตู้อบแห้ง/กิโลกรัมแห้ง (บาท/กิโลกรัมแห้ง)
	V	คือ ราคาตู้อบแห้ง (บาท)
	S	คือ มูลค่าซาก (บาท)
	Y	คือ อายุการใช้งาน
	$W_D$	คือ น้ำหนักผลผลิตทางการเกษตรอบแห้งที่ผลิตได้ใน 1 ปี (กิโลกรัม)

2. ค่าใช้จ่ายในการดำเนินการ (Operating costs) ค่าใช้จ่ายที่เกิดขึ้นในกระบวนการผลิต ซึ่งค่าใช้จ่ายนี้จะแปรผันตามขนาดกำลังการผลิต ในการคำนวณต้นทุนส่วนนี้จึงคิดไปตามขนาดของกำลังการผลิตเรียกว่า ต้นทุนแปรผัน (Variable costs)

2.1 ค่าวัตถุดิบ (Raw Materials) ค่าวัตถุดิบที่นำมาใช้ในการผลิตผลิตภัณฑ์ ซึ่งในการทดลองนี้หมายถึง ใบเตย ชিং และเจียบแดง ค่าวัตถุดิบหาได้จากสมการที่ 23

$$P_m = \frac{W_m \times P}{W_d} \quad \dots (23)$$

โดยที่	$P_m$	คือ ค่าวัตถุดิบ (บาท/กิโลกรัมแห้ง)
	$W_m$	คือ น้ำหนักสดของเนื้อขิงสดที่ใช้อบแห้งแต่ละครั้ง (กิโลกรัม)
	$P$	คือ ราคาวัตถุดิบต่อหน่วย (บาท/กิโลกรัมสด)
	$W_d$	คือ น้ำหนักแห้งของขิงอบแห้งที่ผลิตได้แต่ละครั้ง (กิโลกรัม)

2.2 ค่าแรงงานในการอบแห้งผลิตภัณฑ์ เป็นค่าใช้จ่ายที่ใช้ในการจ้างแรงงานคนเพื่อดำเนินงานตั้งแต่เริ่มกระบวนการอบแห้งจนไปถึงขั้นตอนสุดท้ายในการอบแห้ง ดังนั้นค่าแรงงานในการอบแห้งผลิตภัณฑ์หาได้จากสมการที่ 24

$$P_L = \frac{L}{W_d} \quad \dots (24)$$

โดยที่	$P_L$	คือ ค่าแรงงานในการอบแห้ง (บาท/กิโลกรัมแห้ง)
	$L$	คือ ค่าจ้างแรงงาน (บาท/วันทำงาน)

2.3 ค่าใช้จ่ายในการดำเนินการรวม (Operating costs) คือผลรวมของค่าใช้จ่ายทั้งหมดในการดำเนินการอบแห้ง โดยหาผลรวมของค่าใช้จ่ายนี้จากสมการที่ 25

$$O = P_m + P_L \quad \dots (25)$$

โดยที่	$O$	คือ ค่าใช้จ่ายในการดำเนินการ (บาท/กิโลกรัมแห้ง)
--------	-----	---

ต้นทุนการผลิตเชิงอบแห้งรวม เป็นการรวมต้นทุนค่าใช้จ่ายผู้อบแห้งเข้ากับ ค่าใช้จ่ายในการดำเนินงานรวม โดยมีสูตรการคำนวณดังสมการที่ 26

$$C = A + O \quad \dots (26)$$

โดยที่ C คือ ต้นทุนการผลิตรวม (บาท/กิโลกรัมแห้ง)

3. การวิเคราะห์ต้นทุนผลตอบแทน เป็นการวิเคราะห์ต้นทุนผลตอบแทนที่ได้รับการผลิตผลิตภัณฑ์ทางการเกษตรอบแห้ง ในที่นี้ใช้ตัวชี้วัด คือกำไรสุทธิ ( $\pi$ ) ซึ่งหาได้จากสมการที่ 27

$$\text{กำไรสุทธิ } (\pi) = B - C \quad \dots (27)$$

โดยที่ B คือ รายรับจากการผลิตเชิงอบแห้ง 1 กิโลกรัม หรือราคาเชิงแห้ง (บาท/กิโลกรัมแห้ง)

4. ระยะเวลาคืนทุน ในการดำเนินงานควรได้รับผลตอบแทนให้มากกว่าจำนวนเงินที่ลงทุน โดยผลตอบแทนได้รับคืนรวดเร็วเท่าไรก็จะเป็นการดีมากชิ้นเท่านั้น เพราะโอกาสเสี่ยงต่อการขาดทุนในอนาคตน้อยลง และผู้ลงทุนสามารถนำเงินทุนหรือกำไรที่ได้จากการลงทุนหาผลประโยชน์ในกิจการอื่นต่อไป การหาค่าระยะเวลาคืนทุนสามารถหาได้จากสมการที่ 28

$$\text{ระยะเวลาคืนทุน} = \frac{\text{เงินสดจ่ายลงทุนสุทธิ (Total Investment)}}{\text{กระแสเงินสดไหลหารายปี}} \quad \dots (28)$$

5. มูลค่าปัจจุบันสุทธิ (Net Present Value: NPV) ผลต่างระหว่างมูลค่าปัจจุบันของผลตอบแทนและมูลค่าปัจจุบันของต้นทุนของโครงการ เพื่อชี้ให้เห็นว่าโครงการนี้จะให้ผลตอบแทนคุ้มค่าหรือไม่ การหาค่ามูลค่าปัจจุบันสุทธิสามารถหาได้จากสมการที่ 29

$$NPV = \sum_{t=1}^n \frac{(R_t - C_t)}{(1+i)^t} - I_0 \quad \dots (29)$$



โดยที่	$R_t$	คือ ผลตอบแทนของโครงการในปี ที่ $t$
	$C_t$	คือ ต้นทุนของโครงการในปี ที่ $t$
	$l$	คือ อัตราคิดลด (Discount Rate)
	$n$	คือ อายุของโครงการ
	$t$	คือ ปีของโครงการ

### 3.5 งบประมาณที่ใช้ในการวิจัย

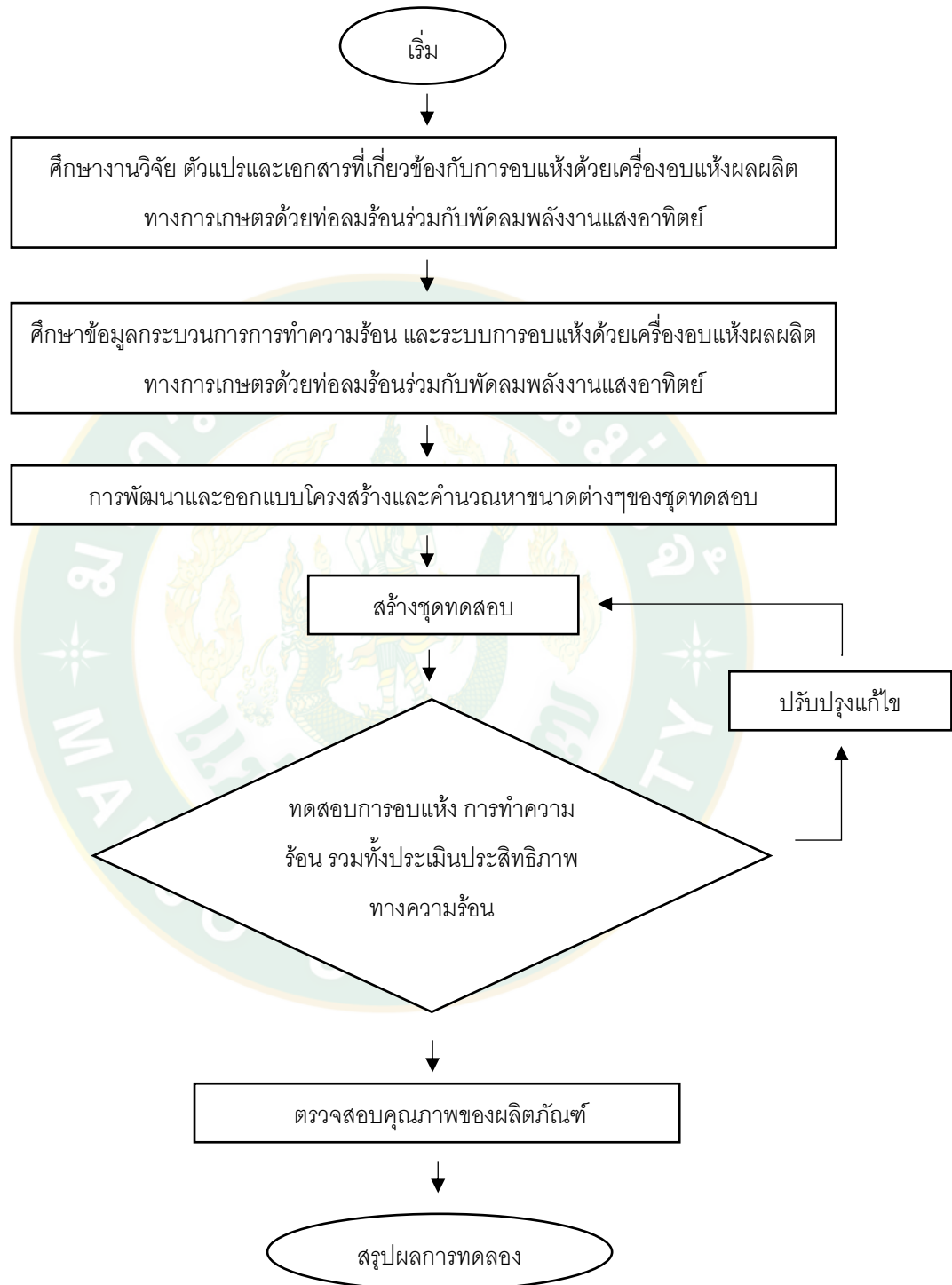
การวิจัยครั้งนี้คาดว่าจะใช้งบประมาณมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

- ค่าวัสดุดิบ ใบบัตร ขิง และกระเจี๊ยบแดง	3,000 บาท
- ค่าชุดพัฒนาและระบบเซลล์แสงอาทิตย์	5,300 บาท
- ค่าอุปกรณ์ประกอบตู้อบแห้ง และท่อลมร้อน (อะลูมิเนียมแผ่น ท่อเหล็ก ตะแกรงสแตนเลส และสีก้านสนิม)	11,000 บาท
- ค่าจ้างเหมาประกอบชุดทดสอบ	5,000 บาท
งบประมาณรวม	24,300 บาท

### 3.6 สถานที่ดำเนินการวิจัย

ดำเนินการทดสอบที่ ชั้น 5 อาคารเรียนรวมสาขาวิศวกรรมศาสตร์ คณะวิศวกรรมและอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยแม่โจ้

### 3.7 แผนภาพขั้นตอนการดำเนินงาน



ภาพที่ 9 แผนภาพการดำเนินงาน



## บทที่ 4

### ผลการศึกษาและวิจารณ์

ผู้วิจัยได้ดำเนินการวิจัยตามขั้นตอนที่ได้กำหนดไว้ โดยผลการวิเคราะห์ข้อมูลจากการออกแบบสร้างและทดสอบการทำงานของเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์นำเสนอตามลำดับดังนี้

- 4.1 ผลการพัฒนาเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์
  - 4.1.1 ผลการออกแบบเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์
  - 4.1.2 ผลการสร้างเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์
- 4.2 ผลการทดสอบอบแห้งผลิตภัณฑ์ของเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์
  - 4.2.1 ผลการอบแห้งใบเตย
  - 4.2.2 ผลการอบแห้งขิง
  - 4.2.3 ผลการอบแห้งกระเจี๊ยบแดง
  - 4.2.4 ผลการศึกษาอัตราการอบแห้งกับความชื้นที่เปลี่ยนไป
  - 4.2.5 ผลการศึกษาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนแบบพาความร้อนที่ส่งผลต่อการอบแห้ง
- 4.3 ผลการหาสภาวะที่เหมาะสมในการอบแห้งของระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์
- 4.4 ผลการทดสอบประสิทธิภาพของระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์
  - 4.4.1 ผลประสิทธิภาพของตัวเก็บพลังงานแสงอาทิตย์
  - 4.4.2 ผลประสิทธิภาพของเครื่องอบแห้ง
- 4.5 ผลของจุดคุ้มทุนเชิงเศรษฐศาสตร์

#### 4.1 ผลการพัฒนาเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์

##### 4.4.1 ผลการออกแบบเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์

โดยการออกแบบเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ด้วยท่อลมร้อนร่วมกับตัวรับรังสีดวงอาทิตย์แบบรางพาราโบลามีส่วนประกอบหลัก 3 ส่วน คือ ตู้อบแห้ง ท่อลมร้อน และชุดพัดลม โดยจะมีการคำนวณและออกแบบโครงสร้างดังนี้

ก) การคำนวณปริมาณความร้อน การหาปริมาณความร้อนรวมที่ใช้ในระบบนั้น พิจารณาจากอัตราการใช้พลังงานทั้งหมดของระบบ โดยมีเงื่อนไขทั้งหมดดังนี้

- ค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้นมาตรฐานเปียกเริ่มต้น	=	90
เปอร์เซ็นต์ความชื้นมาตรฐานเปียก		
- ค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้นมาตรฐานเปียกสุดท้าย	=	10
เปอร์เซ็นต์ความชื้นมาตรฐานเปียก		
- อุณหภูมิอากาศก่อนเข้าตู้อบแห้ง (25 °C) ( $T_{AMB}$ )	=	298.15
เคลวิน		
- อุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้ง (50 °C) ( $T_{DRYING}$ )	=	323.15
เคลวิน		
- ปริมาณผลิตภัณฑ์ในการอบแห้ง 1 ครั้ง ( $m_{PRODUCT}$ )	=	1.5 กิโลกรัม
- มวลของวัสดุส่วนต่างๆ ( $m_{OTHER}$ )	=	40 กิโลกรัม
- เวลาที่ใช้ในการอบแห้ง	=	7 ชั่วโมง
- ค่าเอนทัลปีของน้ำที่อุณหภูมิใช้ในการอบแห้ง ( $h_{fg}$ )	=	2383
กิโลจูลต่อกิโลกรัม		
- การหาความร้อนจำเพาะของผลิตภัณฑ์ ( $C_p$ )	=	3.75
กิโลจูลต่อกิโลกรัมเคลวิน		
(ซึ่งในการคำนวณผลิตภัณฑ์ที่เลือกใช้คือ ชিং)		
- ค่าความร้อนจำเพาะของวัสดุ ( $C_p$ )	=	0.88
กิโลจูลต่อกิโลกรัมเคลวิน		
(วัสดุที่เลือกใช้ในการประกอบเครื่องอบแห้งคือ อะลูมิเนียม)		
- ปริมาณความร้อนที่สูญเสียโดยรอบ	=	0.2

(การทดลองจะเกิดการสูญเสียความร้อนจากการเปิด-ปิดตู้อบแห้งเพื่อนำวัตถุดิบไปชั่งน้ำหนักทุกๆ 1 ชั่วโมง จะใช้เวลาในการนำวัตถุดิบออกจากตู้อบแห้ง 25-30 วินาที จึงกำหนดปริมาณความร้อนที่สูญเสียโดยรอบเท่ากับ 0.2 ในการคำนวณ Carneiro et al. (2016))

การคำนวณปริมาณความร้อนสำหรับการอบแห้งผลิตภัณฑ์ ( $Q_{SENSIBLE}$ ) ในการระเหยความชื้นออกจากผลิตภัณฑ์นั้น จะต้องทำให้อุณหภูมิที่ใช้อบแห้งสูงกว่าอุณหภูมิบรรยากาศ สำหรับการหาปริมาณความร้อนสัมผัสสำหรับอบแห้งผลิตภัณฑ์สามารถหาได้จากสมการที่ 6

$$\begin{aligned} \text{ปริมาณความร้อนสัมผัสสำหรับอบแห้งผลิตภัณฑ์} &= 1.5 \times 3.75 (323.15 - 298.15) \\ &= 140.6 \text{ กิโลจูล} \end{aligned}$$

การคำนวณปริมาณความร้อนแฝงสำหรับระเหยความชื้นที่มีอยู่ในผลิตภัณฑ์ ( $Q_{\text{LATENT}}$ ) นำมาพิจารณาปริมาณการระเหยน้ำระหว่างการอบแห้ง ปริมาณความร้อนแฝงสำหรับระเหยความชื้นที่มีอยู่ในผลิตภัณฑ์สามารถหาได้ด้วยสมการที่ 7

$$\begin{aligned} \text{ปริมาณความร้อนแฝงสำหรับระเหยความชื้น} &= 1.5 (0.9 - 0.1) \times 2383 \\ &= 2859.6 \text{ กิโลจูล} \end{aligned}$$

การคำนวณปริมาณความร้อนที่ทำให้วัสดุต่างๆภายในอุปกรณ์อบแห้งที่อุณหภูมิสูง ( $Q_{\text{OTHER}}$ ) ปริมาณความร้อนที่ต้องการทำให้อุณหภูมิสูงขึ้น เช่น ถาดสำหรับบรรจุผลิตภัณฑ์ ผงของตู้อบ และวัสดุที่ใช้ในการสร้างตู้อบ โดยสามารถหาปริมาณความร้อนในส่วนนี้ได้จากสมการที่ 8

$$\begin{aligned} \text{ปริมาณความร้อนที่สูญเสียให้กับวัสดุต่างๆ} &= 40 \times 0.88 \times (323.15 - 298.15) \\ &= 880 \text{ กิโลจูล} \end{aligned}$$

การคำนวณปริมาณความร้อนที่สูญเสียให้บรรยากาศโดยรอบ ( $Q_{\text{LOSS}}$ ) เมื่อพื้นที่ผิวของเครื่องอบแห้งมีอุณหภูมิสูงขึ้น จะเกิดการสูญเสียความร้อนให้กับบรรยากาศ จึงกำหนดปริมาณความร้อนที่สูญเสียโดยรอบเท่ากับ 0.2 ในการคำนวณ ได้จากสมการที่ 9

$$\begin{aligned} \text{ปริมาณความร้อนที่สูญเสียให้บรรยากาศโดยรอบ} &= 0.2 \times (140.6 + 2859.6 + 880) \\ &= 776.0 \text{ กิโลจูล} \end{aligned}$$

การคำนวณปริมาณความร้อนรวม ( $Q_{\text{TOTAL}}$ ) ปริมาณความร้อนทั้งหมดที่ต้องใช้ในการอบแห้ง จะเกิดจากผลรวมปริมาณความร้อนทั้ง 4 ส่วน ซึ่งสามารถเขียนเป็นสมการสำหรับหาปริมาณความร้อนรวม ได้จากสมการที่ 10

$$\begin{aligned} \text{ปริมาณความร้อนรวม} &= 140.6 + 2859.6 + 880 + 776.04 \\ &= 4656.4 \text{ กิโลจูล} \\ \text{ปริมาณความร้อนที่ต้องใช้} &= 665.2 \text{ กิโลจูลต่อชั่วโมง} \\ \text{Safety Factor ของปริมาณความร้อน} &= 1.5 \\ \text{Actual Load} &= 997.8 \text{ กิโลจูลต่อชั่วโมง} \end{aligned}$$

ดังนั้นปริมาณความร้อนทั้งหมดที่จำเป็นต้องใช้จริงเท่ากับ 997.8 กิโลจูลต่อชั่วโมง ทางผู้วิจัยจึงเลือกใช้ค่าปริมาณความร้อนที่ 1,000 กิโลจูลต่อชั่วโมง (277.8 วัตต์) เพื่อใช้ในการหาขนาดของท่อลมร้อน

ข) การคำนวณปริมาณอากาศสำหรับอบแห้ง เป็นปริมาณลมร้อนทั้งหมดที่ใช้ในอบแห้งผลิตภัณฑ์ โดยกำหนดให้ ค่าความร้อนจำเพาะของอากาศประมาณ 1.007 กิโลจูลต่อกิโลกรัม-เคลวิน คำนวณได้จากสมการที่ 11

$$\begin{aligned} \text{ปริมาณความร้อนที่ต้องการ} &= \frac{1000}{1.007 \times (323.15 - 298.15)} \\ &= 39.72 \text{ กิโลกรัมต่อชั่วโมง} \\ &= 11.03 \times 10^{-3} \text{ กิโลกรัมต่อวินาที} \end{aligned}$$

ดังนั้นต้องใช้อากาศร้อนสำหรับอบแห้งเท่ากับ  $11.03 \times 10^{-3}$  กิโลกรัมต่อวินาที

ค) การคำนวณหาขนาดของพัดลม กำหนดให้ความหนาแน่นของอากาศประมาณ 1.184 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ดังนั้นอัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศ คำนวณได้ดังนี้

$$\begin{aligned} \text{อัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศ} &= \frac{11.03 \times 10^{-3}}{1.184} \\ &= 9.32 \times 10^{-3} \text{ ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที} \\ &= 19.73 \text{ ลูกบาศก์ฟุตต่อนาที} \end{aligned}$$

จากการออกแบบต้องการติดตั้งพัดลมบริเวณทางเข้าของท่อลม อากาศจะไหลขนานกับแกนของใบพัด และตั้งฉากกับระนาบการหมุนของใบพัด ดังนั้นพัดลมที่เลือกใช้คือ พัดลมกรงกระรอกชนิด In-Line axial Flow Fan ขนาด 270 ลูกบาศก์ฟุตต่อนาที 12 โวลต์ 6 แอมป์ 72 วัตต์ เพื่อป้องกันการแปรปรวนและการสูญเสียประสิทธิภาพของพัดลมจึงเลือกใช้ปริมาณลม (CFM) ที่ 60% ดังนั้นพัดลมจะมีปริมาณลมเท่ากับ 162 ลูกบาศก์ฟุตต่อนาที

ง) การหาขนาดท่อ เมื่อเราทราบค่าอัตราการไหลของพัดลมแล้ว จากนั้นจะต้องหาขนาดของท่อลมที่ใช้ในการส่งลมร้อนไปยังห้องอบแห้ง จึงคำนวณหาขนาดท่อลมด้วยวิธีความเร็วคงที่ โดยพื้นที่หน้าตัดของท่อ และขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ สามารถหาได้จากสมการที่ 11 และ 12

การคำนวณขนาดของท่อลมร้อนกำหนดให้

$$\begin{aligned} \text{อัตราการไหลของลม} &= 162 \text{ ลูกบาศก์ฟุตต่อนาที} \\ \text{ความเร็วในท่อลม (V)} &= 590 \text{ ฟุตต่อนาที} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{จำนวนท่อ} &= 4 \text{ เส้น} \\ \text{พื้นที่หน้าตัดของท่อ สามารถหาได้จากสมการที่ 12} & \\ \text{พื้นที่หน้าตัดของท่อ} &= \frac{162}{590} \\ &= 0.275 \text{ ตารางฟุต} \\ \text{ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ สามารถหาได้จากสมการที่ 11} & \\ \text{ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ (D)} &= 13.54 \sqrt{\frac{0.275}{4}} \\ &= 3.547 \text{ นิ้ว} \\ \text{ดังนั้นเลือกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ} &= 4 \text{ นิ้ว} \end{aligned}$$

จ) การหาพื้นที่ระบบแลกเปลี่ยนความร้อนจากแสงอาทิตย์ของท่อลมร้อน เป็นการคำนวณหาขนาดความยาวของท่อลมร้อน ที่ต้องใช้ในการแลกเปลี่ยนความร้อนแบบการไหลภายในท่อ การออกแบบระบบแลกเปลี่ยนความร้อนจากแสงอาทิตย์ของท่อลมร้อน โดยมีเงื่อนไขทั้งหมดดังนี้

- ลักษณะของการพาความร้อน = การพาความร้อนแบบบังคับ
- ลักษณะของท่อ = ท่อกลมผิวเรียบ
- ของไหลภายในท่อ = อากาศ
- ลักษณะของการทำความร้อน = ทางอ้อม (Indirect)
- ความเร็วในท่อลม = 3 เมตรต่อวินาที
- ความร้อนที่ถ่ายเท ( $Q_c$ ) = 277.78 วัตต์
- ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ = 4 นิ้ว
- ค่าคงที่สำหรับการให้ความร้อนออกจากของไหล ( $n$ ) = 0.4
- คุณสมบัติของอากาศที่ความดันบรรยากาศ ที่นำไปใช้คำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนสำหรับท่อกลม โดยใช้อุณหภูมิตั้งแต่สูงสุดของการอบแห้งคือ 50 องศาเซลเซียส ได้คุณสมบัติต่างๆ ดังนี้

$$\begin{aligned} \text{ค่า } \rho &= 1.092 && \text{กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร} \\ \text{ค่า } k &= 0.02735 && \text{วัตต์ต่อเมตร.เคลวิน} \\ \text{ค่า } \mu &= 1.963 \times 10^{-5} && \text{กิโลกรัมต่อเมตร.วินาที} \\ \text{ค่า } Pr &= 0.7228 \end{aligned}$$



วิเคราะห์รูปแบบการไหลในท่อ โดยการใช้จำนวนเลขเรย์โนลด์ (Reynolds Number) เป็นเลขดัชนีที่ชี้บอกสภาพปรากฏการณ์การไหลของของไหล ซึ่งเป็นสัดส่วนของ inertia/viscous จำนวนเลขเรย์โนลด์จะมีค่าขึ้นอยู่กับความเร็วการไหล ความหนืด ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางท่อ และความหนาแน่นของของไหล

$$\begin{aligned} \text{ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ (Re)} &= \frac{1.092 \times 3 \times (4 \times 0.0254)}{0.00001963} \\ &= 16956 \end{aligned}$$

จากการคำนวณพบว่า รูปแบบการไหลในท่อเป็นการไหลแบบปั่นป่วน เนื่องจาก ค่า  $Re > 10000$  ดังนั้นจึงเป็นการพาความร้อนแบบบังคับในการไหลของท่อปั่นป่วนจึงต้องคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนสำหรับท่อกลม โดยเลือกใช้สมการ Dittus-Boelter สำหรับการไหลแบบปั่นป่วน เนื่องจากท่อที่เลือกใช้เป็นท่อกลมผิวเรียบ และคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของวัตถุ (h)

$$\begin{aligned} \text{ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนสำหรับท่อกลม} &= 0.023 (16956)^{0.8} (0.7228)^{0.4} \\ &= 48.84 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{และคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของวัตถุ (h)} &= \frac{0.02735}{(4 \times 0.0254)} \times 48.84 \\ &= 13.15 \end{aligned}$$

วัตต์ต่อตารางเมตรเคลวิน

การหาพื้นที่ผิวของเส้นท่อ เพื่อความเหมาะสมและความสมดุลในการวางท่อลมร้อน จึงต้องคำนวณหาพื้นที่รับความร้อนทั้งหมดภายในท่อ

$$\begin{aligned} \text{พื้นที่ผิวของเส้นท่อ (A)} &= \frac{277.78}{13.15 (50-25)} \\ &= 0.845 \text{ ตารางเมตร} \end{aligned}$$

จากการเลือกขนาดท่อลมร้อนมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 นิ้ว จำนวน 4 เส้น แต่ละเส้นวางห่างกันเส้นละ 2 นิ้ว กำหนดให้พื้นที่รับความร้อนจากแสงอาทิตย์ 2 ด้าน ของท่อ 4 เส้น เนื่องจากท่อลมร้อนเป็นท่อกลม พื้นที่รับความร้อนจากแสงอาทิตย์จึงเป็นส่วนด้านบนของท่อลม และด้านล่างของท่อลมได้รับความร้อนจากพาราโบลาสะท้อนแสง ดังนั้นความยาวของท่อลมจึงคำนวณได้ดังนี้

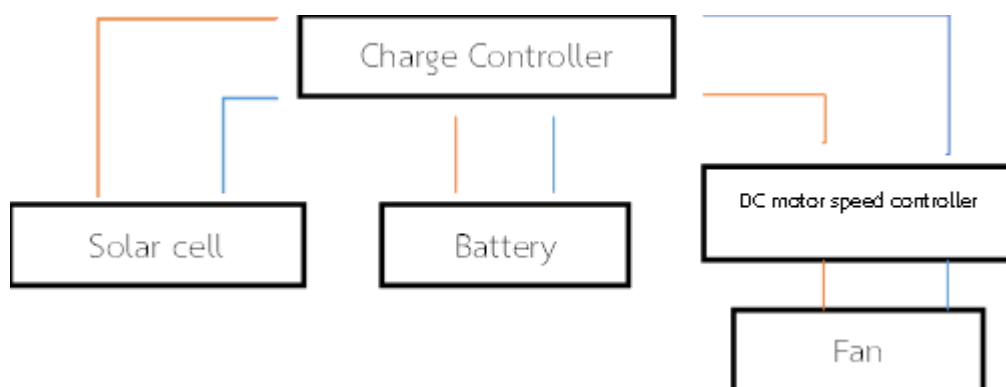
$$\begin{aligned} \text{ความยาวของเส้นท่อ (L)} &= \frac{0.845}{(2 \times 3.142 \times 0.0254) \times 4} \end{aligned}$$

= 1.33 เมตร

ดังนั้นจากการคำนวณหาความยาวของเส้นท่อที่ต้องใช้ในการแลกเปลี่ยนความร้อนแบบการไหลภายในท่อมี่ค่าเท่ากับ 1.33 เมตร ทางผู้วิจัยจึงเลือกใช้ท่อกลมขนาด 4 นิ้ว ยาวเส้นละ 2 เมตร จำนวน 4 เส้น ซึ่งเป็นค่าที่ใกล้เคียงที่สุดจากการคำนวณ

ฉ) การออกแบบพาราโบลาสะท้อนแสง เป็นตัวรวมพลังงานแสงอาทิตย์สะท้อนไปยังที่ตั้งขนาดกึ่งแนวราบรวมแสง เพื่อถ่ายเทความร้อนให้กับอากาศที่ไหลผ่านท่อ โดยการแลกเปลี่ยนความร้อน และความร้อนจะถูกถ่ายเทให้อากาศ จากการศึกษาการออกแบบตัวรับรังสีดวงอาทิตย์แบบรางพาราโบลา ประกอบ สุรพัฒน์วารรณ และธีรภัทร หลิมบุญเรือง (2551) ได้วิเคราะห์แบบฟังก์ชันไฮเพอร์โบลิกของรางพาราโบลาพบว่าระยะโฟกัสของรางพาราโบลาเท่ากับ 0.3 เมตร ที่ความกว้างของช่องรับรังสี 1.2 เมตร พบว่าระบบรางพาราโบลาสามารถสร้างอุณหภูมิสูงสุดได้โดยเฉลี่ย 55 องศาเซลเซียส ดังนั้นจากการศึกษาจึงนำมาพัฒนาพาราโบลาสะท้อนแสงของเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ โดยกำหนดระยะโฟกัสของรางพาราโบลาเท่ากับ 0.3 เมตร ความกว้าง 1.2 เมตร และความยาว 2 เมตร ตามความยาวของท่อลมร้อนที่ได้คำนวณ

ซ) การออกแบบชุดพัฒน เซลล์แสงอาทิตย์จะผลิตไฟฟ้ากระแสตรงออกมา จึงนำกระแสไฟฟ้าไปใช้ได้เฉพาะกับอุปกรณ์ไฟฟ้ากระแสตรงได้เท่านั้น หากนำกระแสไฟฟ้าเก็บสะสมพลังงานไว้ในแบตเตอรี่เพื่อใช้ครั้งต่อไปจะต้องใช้ร่วมกับคอนโทรลชาร์จเจอร์ และแบตเตอรี่ โดยรวมอุปกรณ์ต่างๆ เข้าด้วยกันให้เป็นระบบที่ผลิตกระแสไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ จากการออกแบบระบบเซลล์แสงอาทิตย์ และพัฒนแบบฮิวฟริตจะประกอบด้วย แผงเซลล์แสงอาทิตย์ คอนโทรลชาร์จเจอร์ แบตเตอรี่ และพัฒน ระบบเซลล์แสงอาทิตย์แบบฮิวฟริตจะมีการต่อวงจรดังภาพที่ 10



ภาพที่ 10 ไดอะแกรมการต่ออุปกรณ์ต่าง ๆ ของระบบเซลล์แสงอาทิตย์และพัดลม

การเลือกขนาดระบบเซลล์แสงอาทิตย์ เพื่อให้อบแห้งได้เสร็จภายใน 1 วัน ระบบเซลล์แสงอาทิตย์จะให้พลังงานกับพัดลม เพื่อให้พัดลมทำงาน ดังนั้นจะต้องหาความต้องการพลังงานไฟฟ้าเฉลี่ยต่อวัน (Load) ซึ่งมอเตอร์พัดลมมีกำลังไฟฟ้า 72 วัตต์ จำนวน 1 ตัว และเวลาใช้งาน 7 ชั่วโมง ปริมาณไฟต่อวันที่ใช้ทั้งหมดเท่ากับ 504 วัตต์ชั่วโมง

โดยแบตเตอรี่ที่ใช้ในงานวิจัยจะเก็บสะสมพลังงานไว้ เพื่อใช้ในเวลาที่แสงอาทิตย์มีความเข้มแสงต่ำกว่า 300 วัตต์ต่อตารางเมตร ซึ่งการหาขนาดของแบตเตอรี่สามารถหาได้จากสมการที่ 17

จากการคำนวณต้องใช้ไฟต่อวันเท่ากับ 504 วัตต์ชั่วโมง ปริมาณการใช้แบตเตอรี่ต่อ 1 รอบ หรือเรียกว่า Depth of Discharge (DOD) ซึ่งค่า DOD ของแบตเตอรี่จะอยู่ราว ๆ 80% ดังนั้นความจุของแบตเตอรี่ที่ต้องการเท่ากับ 630 วัตต์ชั่วโมง

ถ้าเลือกใช้แรงดันไฟฟ้าของระบบ 12 โวลต์

ความจุแบตเตอรี่ = 52.5 แอมป์ชั่วโมง

ดังนั้นเลือกใช้แบตเตอรี่ขนาด = 60 แอมป์ชั่วโมง

แผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้ในการเปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์ให้เป็นพลังงานไฟฟ้า เพื่อให้ได้พลังงานไฟฟ้าใช้งานตามที่ต้องการ ดังนั้นจึงได้พัฒนาขนาดของแผงเซลล์แสงอาทิตย์จะคำนวณได้จากสมการที่ 15

ถ้าระยะเวลาที่แสงแดดจัดในประเทศไทยคือ 5 ชั่วโมง

ขนาดของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ = 126 วัตต์

ดังนั้นเลือกขนาดของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ = 170 วัตต์

เครื่องควบคุมการอัดประจุใช้ในการอัดประจุกระแสไฟฟ้าที่ผลิตได้จากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ เข้าสู่แบตเตอรี่ และควบคุมการประจุกระแสไฟฟ้าให้มีปริมาณเหมาะสมกับแบตเตอรี่ ขนาดของเครื่องควบคุมการอัดประจุสามารถหาได้จากสมการที่ 16

ถ้าเลือกใช้แรงดันไฟฟ้าของระบบ 12 โวลต์

ขนาดตัวควบคุมชาร์จประจุที่ต้องการ = 10.833 แอมป์

ดังนั้นเลือกขนาดเครื่องควบคุมการชาร์จ = 10 แอมป์

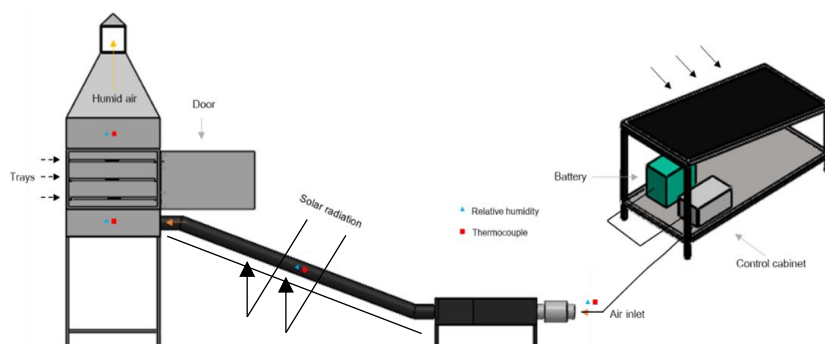
#### 4.1.2 การสร้างเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์

ผู้วิจัยได้พัฒนาและสร้างเครื่องอบแห้ง โดยแบ่งออกเป็นส่วนต่างๆ คือ

- ศึกษาหลักการและทฤษฎี รายละเอียดที่ใช้ในการพัฒนาและสร้างเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์
- รายละเอียดของเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์

โดยมีรายละเอียดดังนี้

1. ศึกษาหลักการและทฤษฎี รายละเอียดที่ใช้ในการพัฒนาและสร้างเครื่องอบแห้งพลังงานอาทิตย์ จากการออกแบบและคำนวณเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ด้วยท่อลมร้อนร่วมกับตัวรับรังสีดวงอาทิตย์แบบรางพาราโบลามีหลักการทำงานดังนี้ แสงจากดวงอาทิตย์เกิดการแผ่รังสีความร้อน (Radiation heat transfer) มาสู่เส้นท่อ เมื่อเส้นท่อได้รับความร้อนแล้วจะทำให้เกิดการนำความร้อน (Conduction heat transfer) จากผนังผิวท่อด้านนอกและด้านในมาสู่อากาศภายในท่อ โดยที่การแผ่รังสีความร้อนนั้นจะเกิดอีก 2 ส่วนคือ 1. เซลล์แสงอาทิตย์ทำให้เกิดการเปลี่ยนจากพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้ากระแสตรง (Direct current) ซึ่งไฟฟ้านี้จะเป็นต้นกำลังของพัดลมที่อยู่ปลายท่อ เพื่อพัดพาอากาศเข้าสู่เส้นท่อและเคลื่อนที่ไปยังตู้อบแห้งเพื่อใช้ในการอบแห้งต่อไป กระบวนการนี้จะเรียกว่า กระบวนการพาความร้อนแบบบังคับ (Forced convection) และ 2. พาราโบลาสะท้อนแสง ทำให้เกิดการสะสมความร้อนบริเวณใต้ผิวท่อและสะท้อนความร้อนกลับไปให้ท่อ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพทางความร้อนกับท่อ เมื่อกระบวนการทำความร้อนเริ่มขึ้นจะแสดงการทำงานดังภาพที่ 11 จากนั้นอากาศร้อนจะพาความร้อนขึ้นจากตัวอย่างอบแห้งลอยขึ้นไปยังปล่องระบายความร้อน โดยความร้อนและอากาศร้อนจะถูกปล่อยทิ้งทั้งหมด



ภาพที่ 11 ส่วนประกอบและกระบวนการทำงานของชุดอบแห้ง

2. โครงสร้างและส่วนประกอบของเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ด้วยท่อลมร้อนร่วมกับตัวรับรังสีดวงอาทิตย์แบบรางพาราโบลามีทั้งหมด 3 ส่วน คือ ท่อลมร้อน ชุดพัดลม และตู้อบแห้ง โดยการออกแบบและติดตั้งของเครื่องอบแห้งแสดงดังตารางที่ 2 และภาพที่ 12 ติดตั้งพัดลมบริเวณทางเข้าของท่อลม เพื่อเป็นการพาลมร้อนให้ไหลตามท่อลมจึงเลือกใช้พัดลมแบบอากาศไหลตามแนวแกน (Axial flow fan) จึงเลือกใช้พัดลมกรงกระรอก ขนาด 270 ลูกบาศก์ฟุตต่อนาที 72 วัตต์ พื้นที่ระบบแลกเปลี่ยนความร้อนจากแสงอาทิตย์ของท่อลมร้อนกำหนดใช้ท่อเหล็กกลมดำขนาด 4 นิ้ว ยาว 2 เมตร จำนวน 4 เส้น ติดตั้งพาราโบลาสะท้อนแสงทำจากแผ่นอะลูมิเนียม (Parabolic Troughs) ขนาด 1.2 x 2.0 ตารางเมตร และปลายทางด้านหนึ่งของท่อลมเชื่อมต่อเข้ากับห้องอบแห้ง เพื่อกระจายลมร้อนเข้าไปใช้ในการอบแห้งผลิตภัณฑ์ภายในห้องอบแห้ง ลักษณะของตู้อบแห้งมีขนาดเท่ากับ 0.7 x 0.7 x 2.4 ลูกบาศก์เมตร ถ้านับเฉพาะส่วนของตู้อบแห้งจะมีส่วนสูงของตู้อบแห้ง 0.9 เมตร ตู้อบแห้งสามารถอบแห้งผลผลิตทางการเกษตรสดได้ครั้งละ 1.5 กิโลกรัม โดยการบรรจุผลผลิตทางการเกษตรใส่ตู้อบแห้งจะใส่ในถาดอบแห้งทั้งหมด 3 ถาด แต่แต่ละถาดมีขนาด 0.69 x 0.69 x 0.5 ลูกบาศก์เมตร มีระยะห่างกันถาดละ 0.14 เมตร ถาดอบแห้งทำจากตะแกรงสแตนเลสพื้นที่ 0.47 ตารางเมตร ช่วยให้อากาศหมุนเวียนได้ดีขึ้น สามารถถอดถาดออกได้ง่ายเพื่อใส่และขนผลิตภัณฑ์อบแห้งออกทางประตู



ภาพที่ 12 เครื่องอบแห้งผลผลิตทางการเกษตรด้วยท่อลมร้อนร่วมกับพัฒนาระบบผลิตพลังงานแสงอาทิตย์ที่  
พัฒนาขึ้น

ตารางที่ 2 ส่วนประกอบและรายละเอียดของเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์

รายละเอียด	ขนาด	หน่วย
<b>ท่อลมร้อน</b>		
เส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ	4	นิ้ว
ความยาวของท่อ	2	เมตร
จำนวนท่อ	4	เส้น
ขนาดของพาราโบลา	1.2 x 2.0	ตารางเมตร
<b>ห้องอบแห้ง</b>		
ขนาดของห้องอบแห้ง	0.7 x 0.7 x 2.4	ลูกบาศก์เมตร
ขนาดของถาดอบแห้ง	0.69 x 0.69 x 0.5	ลูกบาศก์เมตร
จำนวนของถาดอบแห้ง	3	ถาด
<b>พัฒนาระบบเซลล์แสงอาทิตย์</b>		
ขนาดของพัฒนาระบบ	270	ลูกบาศก์ฟุตต่อนาที
ประเภทของเซลล์แสงอาทิตย์	Polycrystalline Silicon	
ขนาดของเซลล์แสงอาทิตย์	170	วัตต์
ขนาดของแบตเตอรี่	60	แอมป์ชั่วโมง

## 4.2 ผลการทดสอบอบแห้งผลิตภัณฑ์ของเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์

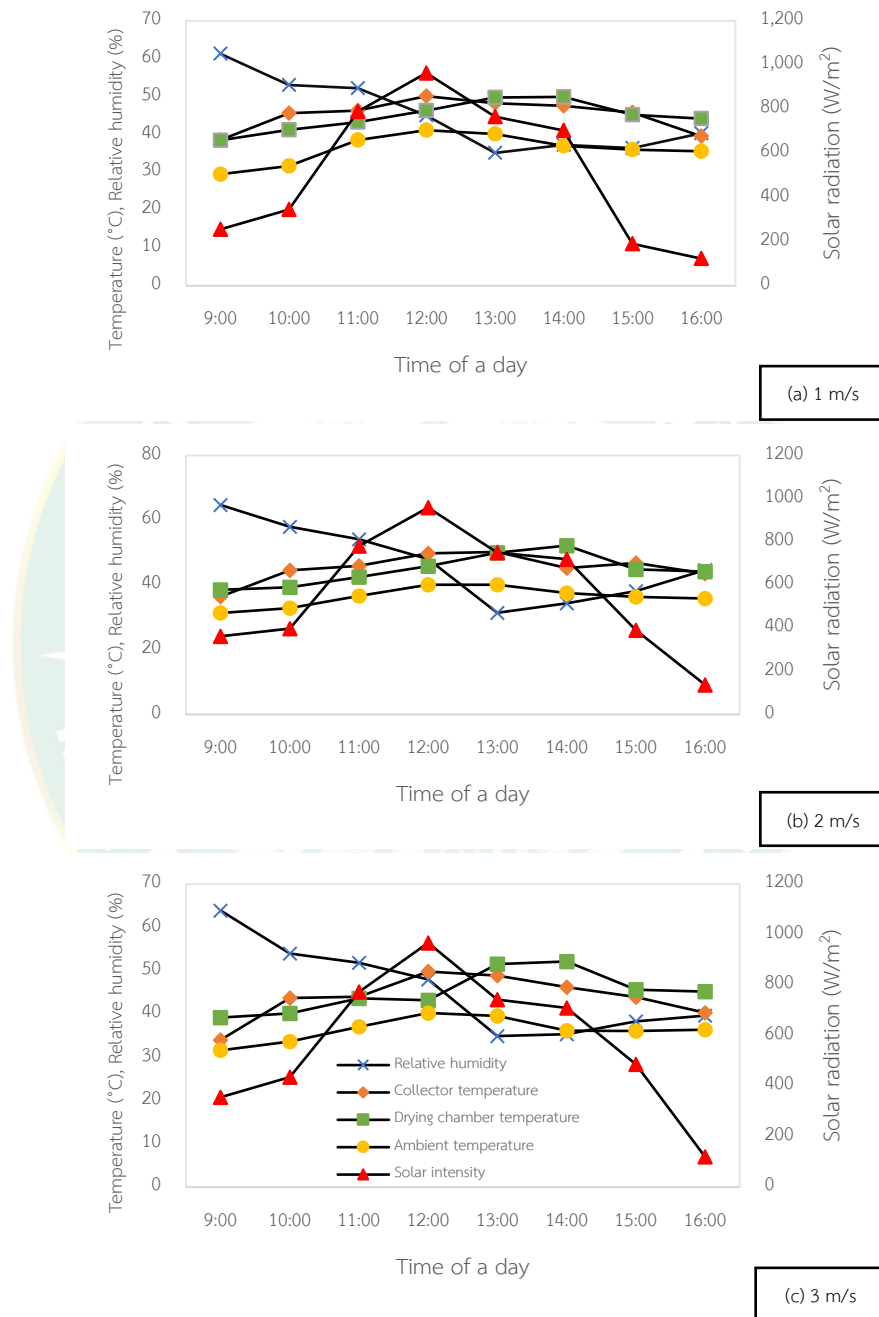
ผู้วิจัยได้ทำการทดสอบสมรรถนะของเครื่องอบแห้งที่ออกแบบ สร้าง และประเมินผล ณ ดาดฟ้าชั้น 5 ของอาคารเรียนรวมสาขาวิศวกรรมศาสตร์ คณะวิศวกรรมและอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยแม่โจ้ โดยการใช้เครื่องอบแห้งดังกล่าวอบแห้งใบเตย ชিং และ กระเจี๊ยบแดง ทดสอบ ภายใต้เงื่อนไขเดียวกันคือ การอบแห้งแบบธรรมชาติ และการอบแห้งแบบบังคับ

### 4.2.1 ผลการอบแห้งใบเตย

การทดสอบอบแห้งใบเตย ได้ทดสอบอบแห้งใบเตยจำนวน 1.5 กิโลกรัม ด้วยความเร็วลม 1, 2 และ 3 เมตรต่อวินาที และอบแห้งแบบธรรมชาติ ในแต่ละการทดลองทั้งหมด 3 ชั่วโมง โดยผู้วิจัยได้ดำเนินการทดสอบสมรรถนะของการอบแห้ง ได้แก่ ผลการเปรียบเทียบอุณหภูมิของเครื่องอบแห้ง พลังงานแสงอาทิตย์ ผลการเปลี่ยนแปลงความชื้นของใบเตย และผลการวิเคราะห์คุณภาพหลังการอบแห้งใบเตย

การทดลองที่ความเร็วลม 1 เมตรต่อวินาที ท้องฟ้าช่วงเช้าอากาศสดใส แต่ในช่วงบ่ายเริ่มมีเมฆมากบางส่วน จากภาพที่ 10(a) มีค่าความเข้มรังสีดวงอาทิตย์สูงสุด 963.5 วัตต์ต่อตารางเมตร ที่อุณหภูมิสิ่งแวดล้อมสูงสุด 41.1 องศาเซลเซียส ช่วงเวลา 12.00 นาฬิกา ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศมีค่าเฉลี่ย 45.06 เปอร์เซ็นต์ เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์มีอุณหภูมิของตัวสะสมความร้อนสูงสุดและอุณหภูมิของห้องอบแห้งสูงสุดเท่ากับ 50.1 และ 49.9 องศาเซลเซียส ในช่วงเวลาประมาณ 12.00 – 14.00 นาฬิกา ในการทดลองที่ความเร็วลม 2 เมตรต่อวินาที เป็นวันที่มีแดดตลอดวัน ไม่มีเมฆมาบดบังแสงอาทิตย์ ทำให้ความเข้มรังสีดวงอาทิตย์สูงสุด 958.5 วัตต์ต่อตารางเมตร ที่ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศเฉลี่ย 46.65 เปอร์เซ็นต์ จากภาพที่ 10(b) แสดงค่าอุณหภูมิของตัวสะสมความร้อนสูงสุดและอุณหภูมิของห้องอบแห้งสูงสุดเท่ากับ 50.2 และ 52.2 องศาเซลเซียส เมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมสูงสุด 40.1 องศาเซลเซียส จะเห็นได้ว่าอุณหภูมิของห้องอบแห้งสูงกว่าอุณหภูมิสิ่งแวดล้อม และในการทดลองที่ความเร็วลม 3 เมตรต่อวินาที วันนี้มีแดดเกือบตลอดวัน ช่วงเช้าอากาศแจ่มใส และช่วงบ่ายจะมีเมฆปกคลุมเป็นช่วงๆ จากกราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงความเข้มรังสีดวงอาทิตย์ และอุณหภูมิ โดยค่าอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมสูงสุด 40.2 องศาเซลเซียส ที่ความเข้มรังสีดวงอาทิตย์สูงสุด 967.6 วัตต์ต่อตารางเมตร ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศเฉลี่ย 45.73 เปอร์เซ็นต์ และจากการทดสอบจะพบว่าอุณหภูมิของตัวสะสมความร้อนสูงสุดและอุณหภูมิของห้องอบแห้งสูงสุดเท่ากับ 49.8 และ 52.1 องศาเซลเซียส ในช่วงเวลาประมาณ 12.00 – 13.00 นาฬิกา ซึ่งเป็นช่วงเวลาที่ร้อนสุดของวัน โดยค่าการแปรค่าของความเข้มรังสีดวงอาทิตย์ ความชื้นสัมพัทธ์ อุณหภูมิ

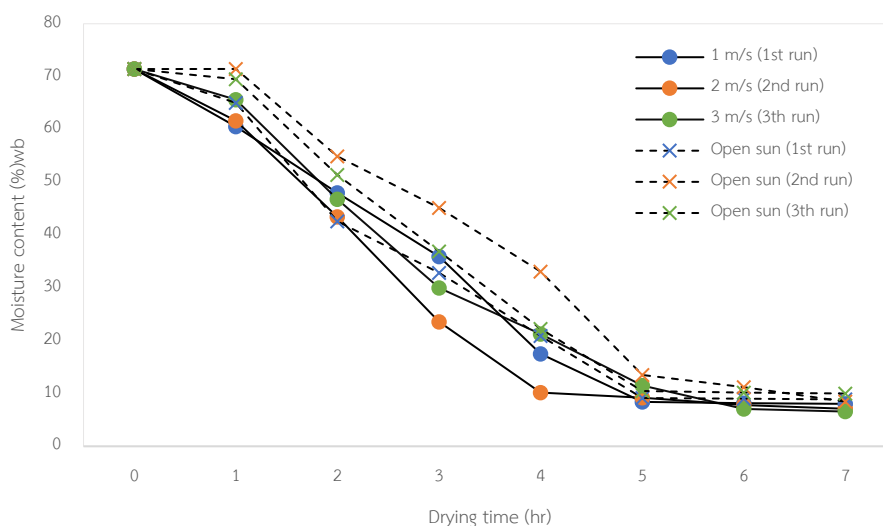
สิ่งแวดล้อม อุณหภูมิของตัวสะสมความร้อน และอุณหภูมิของห้องอบแห้งของการทดลองอบแห้ง  
ใบเตยแสดงดังภาพที่ 13



ภาพที่ 13 การแปรค่าของความเข้มข้นสีดวงอาทิตย์เฉลี่ย ความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ย อุณหภูมิสิ่งแวดล้อมเฉลี่ย อุณหภูมิของตัวสะสมความร้อนเฉลี่ย และอุณหภูมิของห้องอบแห้งเฉลี่ยของการทดลองอบแห้งใบเตย



กราฟแสดงค่าความชื้นมาตรฐานเปียกเทียบกับเวลาของการอบแห้งใบเตยระหว่างผลการทดสอบด้วยการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งพลังแสงอาทิตย์ที่ความเร็วลม 1, 2 และ 3 เมตรต่อวินาที และการอบแห้งแบบธรรมชาติ โดยใช้ใบเตยน้ำหนัก 1.5 กิโลกรัม และเก็บข้อมูลทุก ๆ 1 ชั่วโมง จากภาพที่ 14 ใบเตยถูกทำให้แห้งด้วยความชื้นเริ่มต้นที่ 71.43 ความชื้นมาตรฐานเปียกจนถึงความชื้นสุดท้ายที่ต่ำกว่า 12 ความชื้นมาตรฐานเปียก ภายใน 7 ชั่วโมง จากการอบแห้งใบเตยด้วยความเร็วลม 1, 2 และ 3 เมตรต่อวินาที พบว่าความชื้นสุดท้ายลดลงเหลือขั้นต่ำ 7.12, 6.58 และ 8.88 เปอร์เซ็นต์ความชื้นมาตรฐานเปียก ตามลำดับ โดยใช้เวลาลดความชื้นสุดท้ายต่ำกว่า 12 ความชื้นมาตรฐานเปียก เร็วที่สุด 5 ชั่วโมง ด้วยความเร็วลมที่ 2 เมตรต่อวินาที เมื่อเปรียบเทียบกับ การอบแห้งแบบธรรมชาติสามารถความชื้นสุดท้ายลดลงเหลือขั้นต่ำ 8.88 8.46 และ 10.00 ความชื้นมาตรฐานเปียก ตามลำดับ ต้องใช้เวลาอบแห้งอย่างน้อย 6 ชั่วโมง จากการศึกษาทางสถิติของการอบแห้งใบเตยพบว่า อนุสรานาดี (2555) ทดสอบอบแห้งใบเตยด้วยลมร้อนเปรียบเทียบกับพลังงานแสงอาทิตย์ พบว่า ใบเตยใช้เวลาในการอบแห้งรวม 195 และ 410 นาที ตามลำดับ ดังนั้นเมื่อระยะเวลาอบแห้งอบแห้ง อุณหภูมิ และความเร็วลมเพิ่มมากขึ้น จะส่งผลให้ความชื้นของใบเตยมีแนวโน้มลดลงเรื่อย ๆ



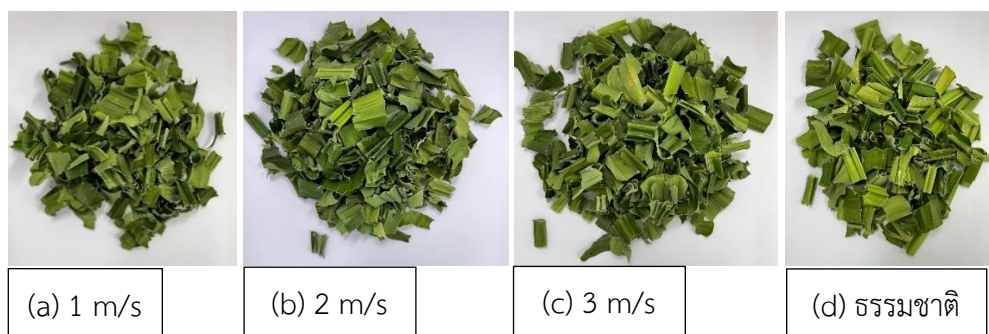
ภาพที่ 14 ปริมาณความชื้นเทียบกับเวลาของการอบแห้งใบเตย

จากการทดสอบคุณภาพของใบเตยหลังการอบแห้ง โดยวัดค่าสีของใบเตยและค่าปริมาณน้ำอิสระ ดังแสดงในตารางที่ 3 และ ภาพที่ 15 พบว่า การทดลองที่ความเร็วลม 1 เมตรต่อวินาที ค่าเฉลี่ยของแกน  $L^*$  เท่ากับ 58.02 แกน  $a^*$  เท่ากับ -8.74 แกน  $b^*$  เท่ากับ 21.37 การทดลองที่

ความเร็วลม 2 เมตรต่อวินาที ค่าเฉลี่ยของแกน L\* เท่ากับ 64.30 แกน a\* เท่ากับ -9.33 แกน b\* เท่ากับ 27.77 และการทดลองที่ความเร็วลม 3 เมตรต่อวินาที ค่าเฉลี่ยของแกน L\* เท่ากับ 63.87 แกน a\* เท่ากับ -9.94 แกน b\* เท่ากับ 24.76 สำหรับการพิจารณาสีหลังผ่านการอบแห้งด้วยความเร็วลม 3 ระดับ ค่า L\* มีค่าความสว่างของใบเตยใกล้เคียงกัน ค่า a\* มีค่าความเป็นสีเขียว และค่า b\* มีค่าความเป็นสีเหลือง และเมื่อเปรียบเทียบกับกรอบแห้งแบบธรรมชาติค่าเฉลี่ยของแกน L\* เท่ากับ 40.87 แกน a\* เท่ากับ -7.15 แกน b\* เท่ากับ 18.92 จะพบว่ากรอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ที่พัฒนาขึ้นมีค่าความสว่าง และค่าความเป็นสีเขียวได้อย่างแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งแสดงว่าการที่ใบเตยได้รับแสงโดยตรงมีผลต่อความสว่างของผลิตภัณฑ์ ซึ่งสอดคล้องกับ Anfal Al-Hamdani et al. (2022) เวลาและกระบวนการอบแห้งมีอิทธิพลต่อค่าความสว่าง (L\*) และค่าสีเขียว (-b\*) อย่างมีนัยสำคัญ โดยการอบแห้งด้วยแสงแดดโดยตรงแสดงการเปลี่ยนแปลงค่าสีอย่างมาก เมื่อเทียบกับการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ทางอ้อม ซึ่งการสูญเสียสีเขียวเกิดจากการสลายตัวของคลอโรฟิลล์ระหว่างการอบแห้ง และ Derya Arslan and Mehmet Musa Özcan (2012) รายงานว่าอุณหภูมิสูงและเวลาอบแห้งที่นานส่งผลต่อคุณภาพสีของผลิตภัณฑ์ นอกจากนี้จากการศึกษาค่าปริมาณน้ำอิสระของใบเตยที่ผ่านการอบแห้ง พบว่า ค่าปริมาณน้ำอิสระของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการอบแห้งด้วยความเร็วลมที่ 1, 2 และ 3 เมตรต่อวินาที เท่ากับ 0.370, 0.336 และ 0.335 ตามลำดับ ทั้งนี้การอบแห้งด้วยความเร็วลม 3 ระดับ มีค่าปริมาณน้ำอิสระน้อยกว่า 0.60 ซึ่งเป็นไปตามมาตรฐานอาหารแห้งที่กำหนดไว้

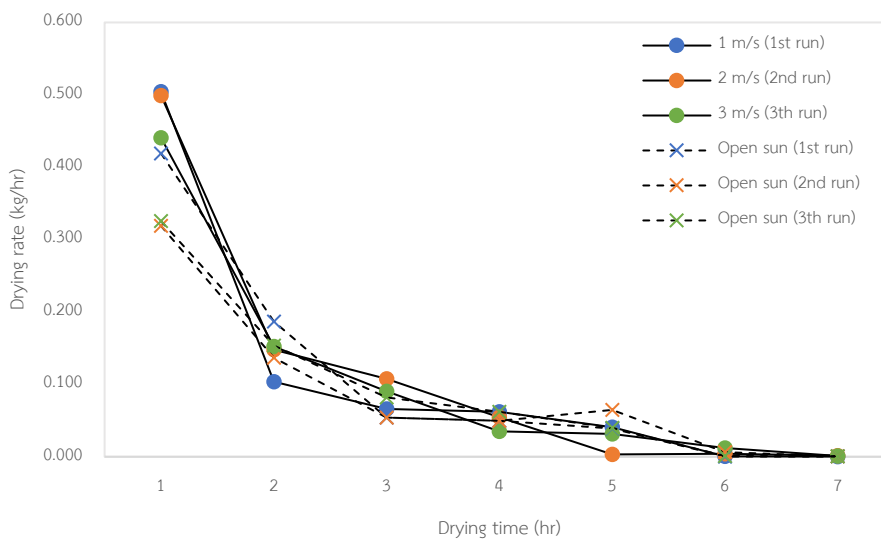
ตารางที่ 3 การเปรียบเทียบสี และค่าปริมาณน้ำอิสระของใบเตยอบแห้ง

Air velocities (m/s)	Color			Water activity (a <sub>w</sub> )
	L*	a*	b*	
1	58.02	-8.74	21.37	0.370
2	64.30	-9.33	27.77	0.336
3	63.87	-9.94	24.76	0.335
ธรรมชาติ	40.87	-7.15	18.92	0.806



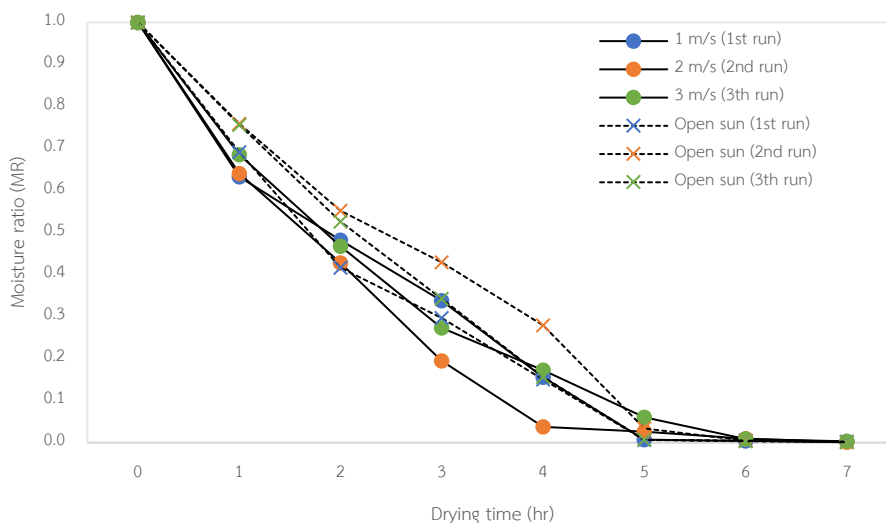
ภาพที่ 15 ผลผลิตทันทีใบเตยอบแห้งด้วยการอบแห้งแบบบังคับ และการอบแห้งแบบธรรมชาติ

ในช่วงเริ่มต้นของการอบแห้งใบเตยจะมีปริมาณการอุ้มน้ำในตัวสูง จึงส่งผลให้ค่าอัตราการอบแห้งสูง โดยอัตราการอบแห้งเริ่มต้นเท่ากับ 0.504, 0.499 และ 0.440 กิโลกรัมต่อชั่วโมง ที่ความเร็วลม 1, 2 และ 3 เมตรต่อวินาที ณ เวลาทำให้แห้ง 1 ชั่วโมง หลังจากผ่านจุดสูงสุดของอัตราการอบแห้งแล้วค่าอัตราการอบแห้งจะลดลงเรื่อย ๆ อัตราการอบแห้งคงที่ในช่วงเวลา 5 ชั่วโมง และอัตราการอบแห้งคงที่ในช่วงเวลา 6 ชั่วโมง ด้วยความเร็วลมที่ 1 และ 3 เมตรต่อวินาที เนื่องจากอุณหภูมิและความเร็วลมที่สูงขึ้นมีอิทธิพลต่ออัตราการอบแห้ง เมื่อเพิ่มความเร็วลมที่ไหลผ่านใบเตย จะทำให้ความหนาแน่นของฟิล์มอากาศบนผิวใบเตยลดลง จากการศึกษา Pedro Cerezal Mezquita et al. (2020) กล่าวว่าอัตราการอบแห้งนั้นถูกควบคุมด้วยอุณหภูมิ และสภาวะการไหลของอากาศเป็นส่วนใหญ่ โดยอัตราการทำให้แห้งจะลดลงพร้อมกับปริมาณความชื้นที่ลดลงและเวลาในการทำให้แห้งที่มากขึ้น และเมื่อเปรียบเทียบอัตราการอบแห้งด้วยการอบแห้งแบบธรรมชาติใช้เวลา 6 ชั่วโมง เพื่อเข้าสู่ช่วงอัตราการอบแห้งคงที่ ดังนั้นผลการทดลองสอดคล้องกับ M. Chandrasekar et al. (2018) และ Jasinta Poonam Ekka et al. (2020) อัตราการอบแห้งด้วยการตากแดดจะช้ากว่าการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแสงอาทิตย์ อัตราการอบแห้งจะสูงขึ้นในชั่วโมงเริ่มต้น และหลังจากการอบแห้งอัตราการอบแห้งจะช้าลง เนื่องจากการขจัดความชื้นที่เกาะบนผิวผลิตภัณฑ์ออก โดยกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการอบแห้งเทียบกับเวลาในอบแห้งแสดงดังภาพที่ 16



ภาพที่ 16 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการอบแห้งเทียบกับเวลาของการอบแห้งใบเตย

กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นเทียบกับเวลาของการอบแห้งใบเตยที่ความเร็วลมต่าง ๆ ที่แตกต่างกัน และการอบแห้งแบบธรรมชาติแสดงดังภาพที่ 17 อัตราส่วนความชื้นสุดท้าย (ความชื้นสุดท้ายต่ำกว่า 12 ความชื้นมาตรฐานเปียก) ลดลงประมาณ  $2.41 \times 10^{-3}$ ,  $1.23 \times 10^{-3}$  และ  $3.12 \times 10^{-3}$  สำหรับการอบแห้งแบบบังคับด้วยความเร็วลม 1, 2 และ 3 เมตรต่อวินาที เมื่อเปรียบเทียบกราฟของความเร็วลม 3 ระดับ สังเกตได้ว่าเส้นกราฟมีแนวโน้มคล้ายคลึงกัน นั่นคือ ในช่วงต้นเมื่อตูบแห้งได้รับความร้อนจะเกิดการแผ่ความร้อนไปยังพื้นผิวของใบเตย ซึ่งเป็นการกระตุ้นให้น้ำภายในวัสดุเกิดการถ่ายเทมายังผิวของวัสดุ แต่การอบแห้งด้วยความเร็วลม 2 เมตรต่อวินาที ใช้ระยะเวลาในการอบแห้ง 4 ชั่วโมง เมื่อเทียบกับการอบแห้งด้วยความเร็วลม 1 และ 3 เมตรต่อวินาที ที่ใช้เวลา 5 ชั่วโมง



ภาพที่ 17 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นเทียบกับเวลาของการอบแห้งใบเตย

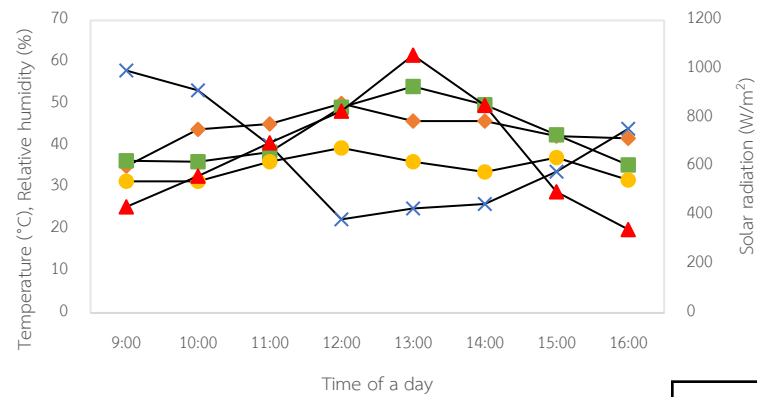
#### 4.2.2 ผลการอบแห้งซิง

การวิเคราะห์คุณภาพของซิงด้วยเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ที่พัฒนาขึ้น เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ได้ทดสอบอบแห้งซิงจำนวน 1.5 กิโลกรัม ภายในตู้อบบรรจุซิงจำนวนสามภาคด้วยความหนาแน่นและจำนวนเท่ากัน ด้วยความเร็วลม 1, 2 และ 3 เมตรต่อวินาที และอบแห้งแบบธรรมชาติ ในแต่ละการทดลองทั้งหมด 3 ซ้ำ โดยผู้วิจัยได้ดำเนินการทดสอบสมรรถนะของการอบแห้งได้แก่ ผลการเปรียบเทียบอุณหภูมิของเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ ผลการเปลี่ยนแปลงความชื้นของซิง และผลการวิเคราะห์คุณภาพหลังการอบแห้งซิง

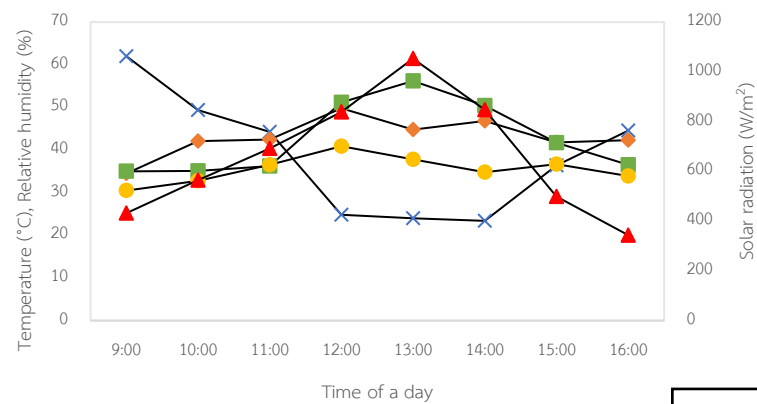
การทดลองด้วยความเร็วลม 1 เมตรต่อวินาที วันนี้อุณหภูมิสิ่งแวดล้อมอยู่ในช่วงตั้งแต่ 31.5 ถึง 39.5 องศาเซลเซียส เนื่องจากอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมสูงขึ้นส่งผลให้อุณหภูมิของตัวสะสมความร้อนและอุณหภูมิของห้องอบแห้งสูงขึ้นตั้งแต่ 35.1 ถึง 50.4 และ 36.4 ถึง 54.2 องศาเซลเซียสตามลำดับ ในระหว่างการทดลองการอบแห้งความเข้มรังสีดวงอาทิตย์อยู่ในช่วง 435.3 ถึง 1057.5 วัตต์ต่อตารางเมตร ที่ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ 22.4 ถึง 58 เปอร์เซ็นต์ ในการทดลองด้วยความเร็วลม 2 เมตรต่อวินาที วันนี้อุณหภูมิสิ่งแวดล้อมอยู่ในช่วงตั้งแต่ 30.5 ถึง 40.9 องศาเซลเซียสด้วยความเข้มรังสีดวงอาทิตย์อยู่ในช่วง 432.5 ถึง 1053.4 วัตต์ต่อตารางเมตร ที่ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ 23.4 ถึง 62.0 เปอร์เซ็นต์ โดยค่าความเข้มรังสีดวงอาทิตย์สูงสุดในช่วงเวลา 13.00 นาฬิกา ส่งผลให้อุณหภูมิของตัวสะสมความร้อนและอุณหภูมิของห้องอบแห้งสูงขึ้นตั้งแต่ 35.1 ถึง

50.1 และ 35.0 ถึง 56.1 องศาเซลเซียส ตามลำดับ สังเกตได้ว่าอากาศที่ถ่ายไปยังห้องอบแห้งนั้นสูงกว่าอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมประมาณ 15 องศาเซลเซียส และการทดลองด้วยความเร็วลม 3 เมตรต่อวินาที วันนี้ความเข้มรังสีดวงอาทิตย์อยู่ในช่วง 427.4 ถึง 1055.0 วัตต์ต่อตารางเมตร ที่ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ 22.10 ถึง 63.0 เปอร์เซ็นต์ และอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมอยู่ในช่วงตั้งแต่ 30.7 ถึง 39.3 องศาเซลเซียสสอดคล้องกับอุณหภูมิของตัวสะสมความร้อนในช่วง 33.0 ถึง 46.7 องศาเซลเซียส ซึ่งมีค่าสูงกว่าอุณหภูมิแวดล้อม 7 °C เมื่ออุณหภูมิของตัวสะสมความร้อนก็ส่งผลให้อุณหภูมิของห้องอบแห้งสูงขึ้นตั้งแต่ 34.2 ถึง 55.5 องศาเซลเซียส ดังนั้นจากการสังเกตจะพบว่า ความเข้มรังสีดวงอาทิตย์มีค่าสูงสุดในช่วงเวลา 13.00 นาฬิกา เสมอและต่ำสุดในเวลา 16.00 นาฬิกา ของวันที่ทำการทดลอง แต่ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศมีค่าสูงสุดในช่วงเช้า และต่ำสุดในช่วงเที่ยงของการทดลองเสมอ โดยค่าการแปรค่าของความเข้มรังสีดวงอาทิตย์ ความชื้นสัมพัทธ์ อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม อุณหภูมิของตัวสะสมความร้อน และอุณหภูมิของห้องอบแห้งของการทดลองอบแห้งใบเตยแสดงดังภาพที่ 18

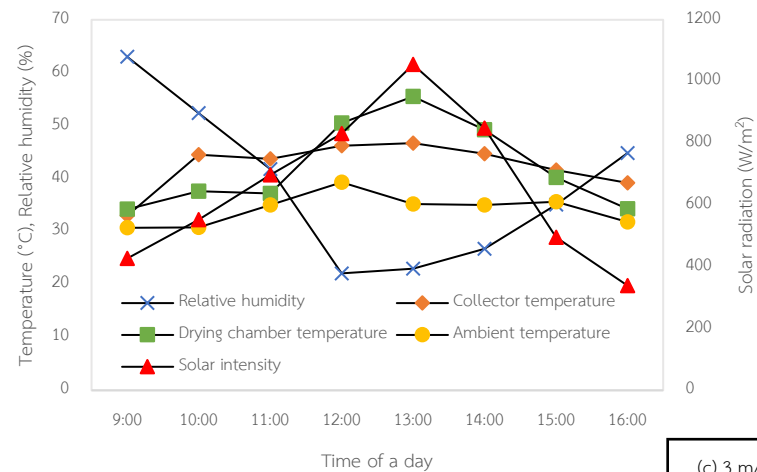




(a) 1 m/s



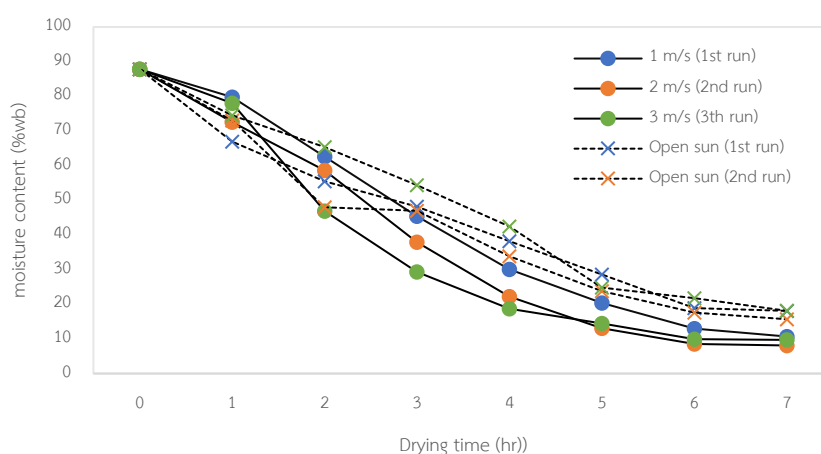
(b) 2 m/s



(c) 3 m/s

ภาพที่ 18 การแปรค่าของความเข้มข้นสีกดวงอาทิตย์เฉลี่ย ความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ย อุณหภูมิสิ่งแวดล้อมเฉลี่ย อุณหภูมิของตัวสะสมความร้อนเฉลี่ย และอุณหภูมิของห้องอบแห้งเฉลี่ย ของการทดลองอบแห้งขิง

จากภาพที่ 19 แสดงกราฟค่าความชื้นมาตรฐานเปียกเทียบกับเวลาของการอบแห้งซึ่ง โดยการเปรียบเทียบระหว่างการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ที่ความเร็วลม 1, 2 และ 3 เมตรต่อวินาที และการอบแห้งแบบธรรมชาติ โดยทั่วไปการอบแห้งด้วยอุณหภูมิและความเร็วลมที่สูงขึ้นทำให้ความชื้นลดลงอย่างต่อเนื่องตามเวลา (Suherman Suherman et al., 2021 และ Waheed Deshmukh et al., 2014) ระหว่างการอบแห้งซึ่ง ความชื้นที่ถูกกำจัดออกโดยการอบแห้งซึ่งด้วยความเร็วลม 1, 2 และ 3 เมตรต่อวินาทีที่มีความชื้นเริ่มต้น 87.83 ความชื้นมาตรฐานเปียกจนถึงความชื้นสุดท้ายที่ต่ำกว่า 12 ความชื้นมาตรฐานเปียก พบว่าความชื้นสุดท้ายลดลงเหลือ 13.01, 8.57 และ 9.88 เปอร์เซ็นต์ความชื้นมาตรฐานเปียก ตามลำดับ ใช้ระยะเวลาการอบแห้งสูงสุด 6 ชั่วโมง ซึ่งใช้เวลาในการอบแห้งน้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการอบแห้งแบบธรรมชาติที่ต้องใช้เวลาอบแห้งมากกว่า 7 ชั่วโมง (1 – 2 วัน) จากการศึกษา Ramesh Harajibhai Chaudhari et al. (2018) พิจารณาเวลาที่ใช้ในการอบแห้งผลิตภัณฑ์ให้มีปริมาณความชื้นอยู่ในระดับมาตรฐานความปลอดภัยในการเก็บผลิตภัณฑ์อบแห้ง พบว่าการเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ใช้เวลาอบแห้งเร็วกว่าการอบแห้งแบบธรรมชาติ จากกราฟจะเห็นว่า ระยะเวลาในการอบแห้งด้วยความเร็ว 3 ระดับการอบแห้งด้วยความเร็วลมที่ 2 เมตรต่อวินาที สามารถลดความชื้นในขิงได้มากที่สุด ซึ่งสอดคล้องกับรายงานวิจัยของ Hamid Reza Gazor and Saeid Minaei (2005) และ V. Sabareesh et al. (2021) ทดสอบการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ที่มีการเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลของอากาศที่แตกต่างกัน พบว่าเมื่ออัตราการไหลของอากาศเพิ่มขึ้น จะใช้เวลาในการอบแห้งลดลง



ภาพที่ 19 ปริมาณความชื้นเทียบกับเวลาของการอบแห้งขิง



จากการศึกษา A. BORAH et al. (2015) รายงานว่าการอบแห้งด้วยลมร้อนส่งผลต่อสีของวัสดุชีวภาพ เนื่องจากเม็ดสีมีความไวต่อความร้อน และสีพื้นผิวของอาหารเป็นพารามิเตอร์คุณภาพขั้นพื้นฐานที่ผู้บริโภคให้ความสำคัญ ด้วยเหตุนี้สีจึงเป็นปัจจัยที่สำคัญในการยอมรับผลิตภัณฑ์ สำหรับผลการเปรียบเทียบสีของซิงแห้งแสดงในตารางที่ 4 และภาพที่ 20 สังเกตว่าซิงที่ผ่านความร้อนด้วยเครื่องอบแห้งพลังแสงอาทิตย์ที่ความเร็วลม 1, 2 และ 3 เมตรต่อวินาที และการอบแห้งแบบธรรมชาติ พบว่าการทดลองที่ความเร็วลม 1 เมตรต่อวินาที ค่าเฉลี่ยของแกน  $L^*$  เท่ากับ 68.82 แกน  $a^*$  เท่ากับ 9.84 แกน  $b^*$  เท่ากับ 26.86 การทดลองที่ความเร็วลม 2 เมตรต่อวินาที ค่าเฉลี่ยของแกน  $L^*$  เท่ากับ 69.39 แกน  $a^*$  เท่ากับ 9.44 แกน  $b^*$  เท่ากับ 32.08 และการทดลองที่ความเร็วลม 3 เมตรต่อวินาที ค่าเฉลี่ยของแกน  $L^*$  เท่ากับ 76.46 แกน  $a^*$  เท่ากับ 9.39 แกน  $b^*$  เท่ากับ 24.30 เมื่อเปรียบเทียบกับการอบแห้งแบบธรรมชาติค่าเฉลี่ยของแกน  $L^*$  เท่ากับ 60.31 แกน  $a^*$  เท่ากับ 5.75 แกน  $b^*$  เท่ากับ 24.65 สำหรับการพิจารณาค่าความสว่างของซิงแต่ละการทดลองมีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ แต่มีความสว่างมากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับการอบแห้งแบบธรรมชาติ ค่าสีแดงมีแนวโน้มสูงขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับการอบแห้งแบบธรรมชาติ และค่าสีเหลืองของซิงทุกการทดลองมีค่าใกล้เคียงกันอย่างชัดเจน ซึ่งการทดลองสอดคล้องกับ Busarakorn Mahayothee et al. (2020) ตัวอย่างซิงที่อบแห้งจากเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์มีค่าความเป็นสีเหลืองกว่าตัวอย่างที่ตากแดดโดยตรง เนื่องจากการได้รับแสงจากแสงแดดโดยตรงช่วยเร่งการย่อยสลายเคอร์คูมินซึ่งเป็นเม็ดสีเหลืองในซิง และจากการศึกษาค่าปริมาณน้ำอิสระของซิงที่ผ่านการอบแห้ง พบว่า ค่าปริมาณน้ำอิสระของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการอบแห้งด้วยความเร็วลมที่ 1, 2 และ 3 เมตรต่อวินาที เท่ากับ 0.489 0.505 และ 0.505 ตามลำดับ ทั้งนี้การอบแห้งทุกเงื่อนไขการทดลองมีค่าปริมาณน้ำอิสระน้อยกว่า 0.60 ซึ่งเป็นไปตามมาตรฐานอาหารแห้งที่กำหนดไว้

ตารางที่ 4 การเปรียบเทียบสี และค่าปริมาณน้ำอิสระของชิง

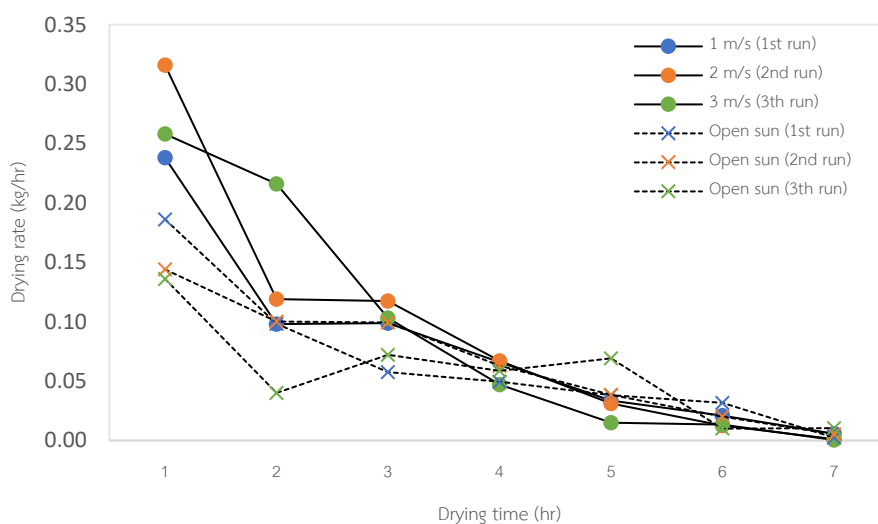
Air velocities (m/s)	Color			Water activity (a <sub>w</sub> )
	L*	a*	b*	
1	68.82	9.84	26.86	0.489
2	69.39	9.44	32.08	0.505
3	76.46	9.39	24.30	0.505
ธรรมชาติ	60.31	5.75	24.65	0.645



ภาพที่ 20 ผลิตภัณฑ์ชิงอบแห้งด้วยการอบแห้งแบบบังคับ และการอบแห้งแบบธรรมชาติ

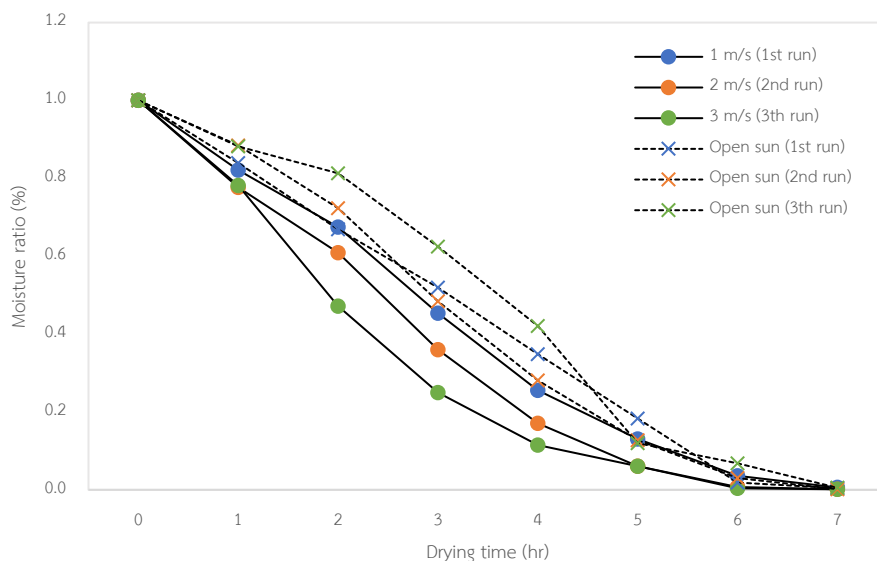
จากเส้นโค้งของอัตราการอบแห้งชิงด้วยเครื่องอบแห้งพลังแสงอาทิตย์ที่ความเร็วลม 1, 2 และ 3 เมตรต่อวินาที และการอบแห้งแบบธรรมชาติ แสดงดังภาพที่ 21 สังเกตได้ว่าการเพิ่มอุณหภูมิ การอบแห้งในช่วงเริ่มต้นให้สูงขึ้นจะทำให้อัตราการอบแห้งเพิ่มขึ้นตาม โดยงานวิจัยยังสอดคล้องกับ งานวิจัยการอบแห้งชิงด้วยเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ Priti P Lad et al. (2019) อัตราการอบแห้งเทียบกับเวลาในการอบแห้ง พบว่า อัตราการอบแห้งลดลงอย่างคงที่ในระยะเวลาที่กำหนด แสดงให้เห็นว่าไม่มีน้ำเหลืออยู่บนพื้นผิววัสดุ นอกจากนี้จะสรุปได้ว่าเมื่อเวลาในการอบแห้งเพิ่มขึ้นจะทำให้อัตราการอบแห้งก็ลดลง จากค่าอัตราการอบแห้งชิงเริ่มต้นเท่ากับ 0.238, 0.316 และ 0.258 กิโลกรัมต่อชั่วโมง ที่ความเร็วลม 1, 2 และ 3 เมตรต่อวินาที ณ เวลาทำให้แห้ง 1 ชั่วโมง หลังจากนั้น ค่าอัตราการอบแห้งจึงค่อยๆลดลงเมื่อกระบวนการอบแห้งดำเนินการต่อไป เมื่อเปรียบเทียบการอบแห้งแบบธรรมชาติจะสังเกตได้ว่าการอบแห้งทุกการทดลองมีค่าจะให้ค่าอัตราการอบแห้งที่

ใกล้เคียงกันเสมอ หลังจากอัตราการอบแห้งจึงลดลงในขั้นตอนสุดท้ายของกระบวนการอบแห้งในช่วงเวลา 5 ชั่วโมง บันทึกได้  $5.71 \times 10^{-3}$ ,  $1.14 \times 10^{-3}$  และ  $4.29 \times 10^{-4}$  กิโลกรัมต่อชั่วโมง ด้วยความเร็วลมที่ 1, 2 และ 3 เมตรต่อวินาที



ภาพที่ 21 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการอบแห้งเทียบกับเวลาของการอบแห้งซึ่ง

การเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนความชื้นของขิงที่อบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ด้วยความเร็วลมต่าง ๆ ที่แตกต่างกัน และการอบแห้งแบบธรรมชาติ แสดงดังภาพที่ 22 จากกราฟระหว่างอัตราส่วนความชื้นเทียบกับเวลาของการอบแห้ง เห็นได้ชัดว่ากระบวนการอบแห้งทั้งหมดทุกการทดลองอัตราส่วนความชื้นลดลงอย่างรวดเร็วในช่วง 1 ถึง 2 ชั่วโมง ของการอบแห้ง หลังจากนั้นอัตราส่วนความชื้นจึงลดลงอย่างช้าๆ จนถึงอัตราส่วนความชื้นสุดท้าย (ความชื้นสุดท้ายต่ำกว่า 12 ความชื้นมาตรฐานเปียก) ลดลงประมาณ  $5.99 \times 10^{-3}$ ,  $1.41 \times 10^{-3}$  และ  $1.44 \times 10^{-3}$  สำหรับการอบแห้งแบบบังคับด้วยความเร็วลม 1, 2 และ 3 เมตรต่อวินาที ในช่วง 7 ชั่วโมง โดยผลการทดลองสอดคล้องกับ N C Shahi et al. (2022) กล่าวว่าอัตราส่วนความชื้นลดลงเรื่อยๆ เมื่อเวลาผ่านไป ปริมาณความชื้นจะเข้าใกล้ปริมาณความชื้นสมดุล (EMC) และอัตราส่วนความชื้นจึงลดลงอย่างช้าๆ ตลอดการทดลอง ดังนั้นจะพบว่า การเคลื่อนที่ของความชื้นในขิงถูกควบคุมโดยการแพร่กระจาย ซึ่งเป็นกลไกทางกายภาพของการอบแห้ง



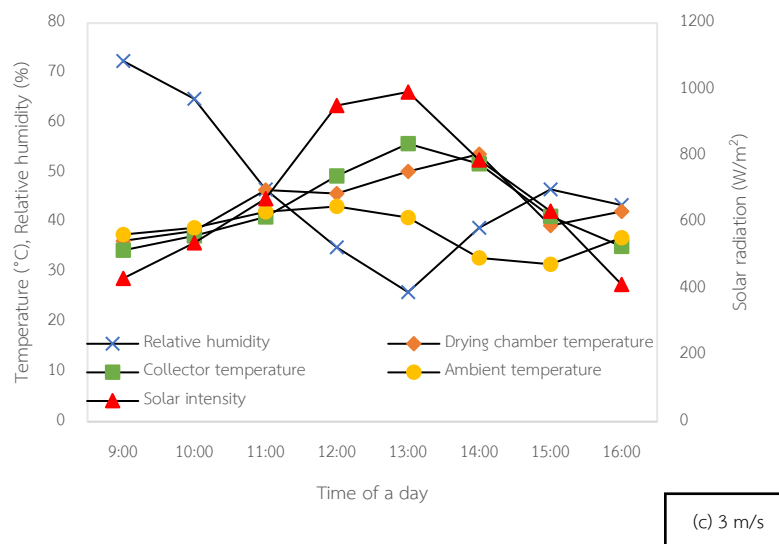
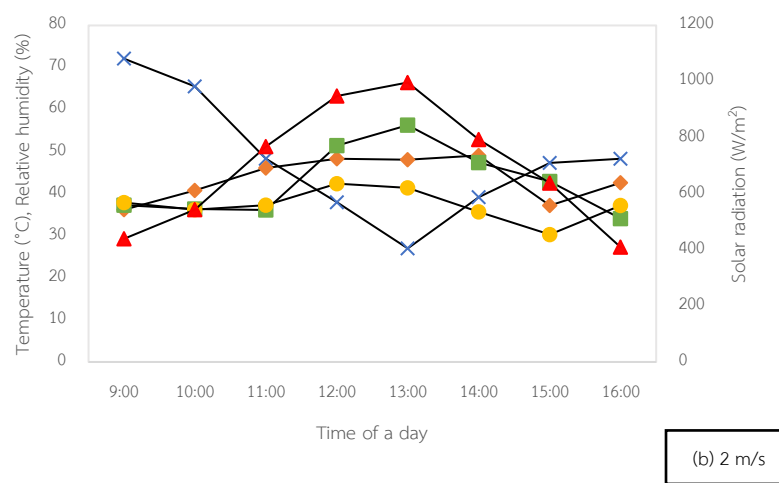
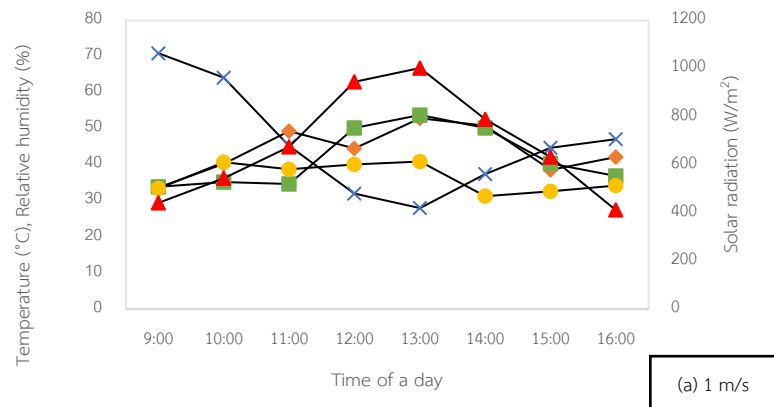
ภาพที่ 22 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นเทียบกับเวลาของการอบแห้งชิง

#### 4.2.3 ผลการอบแห้งกระเจียบแดง

ผลการทดลองเพื่อวิเคราะห์คุณภาพของชิงด้วยเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ที่พัฒนาขึ้น โดยผู้วิจัยได้ดำเนินการทดสอบสมรรถนะของการอบแห้ง ได้แก่ ผลการเปรียบเทียบอุณหภูมิของเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ ผลการเปลี่ยนแปลงความชื้นของชิง และผลการวิเคราะห์คุณภาพหลังการอบแห้งชิง ภายใต้สภาวะการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ที่ความเร็วลม 1, 2 และ 3 เมตรต่อวินาที และการอบแห้งแบบธรรมชาติ

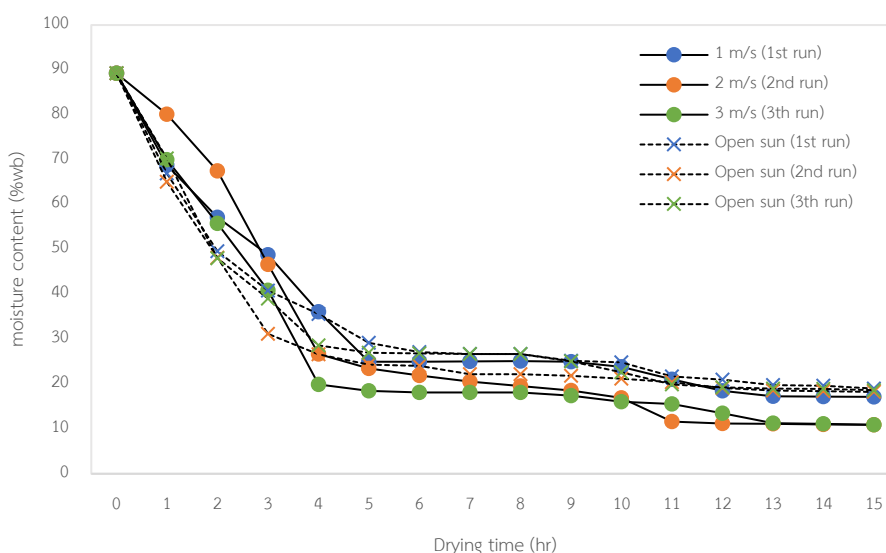
การศึกษาค่าของความเข้มรังสีดวงอาทิตย์ ความชื้นสัมพัทธ์ อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม อุณหภูมิของตัวสะสมความร้อน และอุณหภูมิของห้องอบแห้งของการทดลองอบแห้งกระเจียบแดงด้วยเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แสดงดังภาพที่ 23 จากการทดลองด้วยความเร็วลม 1 เมตรต่อวินาที อุณหภูมิสิ่งแวดล้อมและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศเปลี่ยนแปลงตั้งแต่ 31.3 ถึง 40.9 องศาเซลเซียส และ 28.0 ถึง 70.9 เปอร์เซ็นต์ ในขณะที่ความเข้มรังสีดวงอาทิตย์เปลี่ยนแปลงระหว่าง 411.9 ถึง 1002.3 วัตต์ต่อตารางเมตร เมื่ออากาศภายนอกสูงขึ้นจะส่งผลให้อุณหภูมิของตัวสะสมความร้อนและอุณหภูมิของห้องอบแห้งสูงขึ้นตั้งแต่ 33.7 ถึง 52.9 และ 33.9 ถึง 53.8 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ในการทดลองด้วยความเร็วลม 2 เมตรต่อวินาที วันนี้อุณหภูมิสิ่งแวดล้อมอยู่ในช่วงตั้งแต่ 30.3 ถึง 42.4 องศาเซลเซียส ด้วยความเข้มรังสีดวงอาทิตย์อยู่ในช่วง 409.1 ถึง 996.7 วัตต์ต่อตารางเมตร ที่

ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ 21.0 ถึง 72.10 เปอร์เซ็นต์ เมื่ออุณหภูมิสิ่งแวดล้อมสูงขึ้นส่งผลให้อุณหภูมิของตัวสะสมความร้อนและอุณหภูมิของห้องอบแห้งสูงขึ้นตั้งแต่ 36.2 ถึง 48.3 และ 36.1 ถึง 56.3 องศาเซลเซียส และการทดลองด้วยความเร็วลม 3 เมตรต่อวินาที เป็นวันที่มีแดดตลอดวัน ไม่มีเมฆมาบดบังแสงอาทิตย์ทำให้ความเข้มรังสีดวงอาทิตย์และอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมแปรผันจาก 413.2 ถึง 992.9 วัตต์ต่อตารางเมตร และ 31.6 ถึง 43.2 องศาเซลเซียส ที่ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ 26.15 ถึง 72.40 เปอร์เซ็นต์ จากภาพที่ 10(c) แสดงค่าอุณหภูมิของตัวสะสมความร้อนสูงสุดและอุณหภูมิของห้องอบแห้งเปลี่ยนแปลงตลอดทั้งวันเท่ากับ 36.3 ถึง 53.7 และ 34.4 ถึง 55.8 องศาเซลเซียส เมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมสูงสุด 40.1 องศาเซลเซียส จากการทดลองอบแห้งกระเจี๊ยบแดงทั้ง 3 วันพบว่า ความเข้มรังสีดวงอาทิตย์มีค่าสูงสุดเฉลี่ย 997.3 วัตต์ต่อตารางเมตร ในระหว่างการอบแห้งความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศลดลงตามอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมที่เพิ่มขึ้นตามเวลาในทุกการทดลอง อุณหภูมิสิ่งแวดล้อมสูงสุดในระหว่าง 11.00 ถึง 14.00 นาฬิกา ของวัน โดยอุณหภูมิของอากาศสิ่งแวดล้อมเปลี่ยนแปลงตลอดระยะเวลาการอบแห้ง หลังจากผ่านช่วงเวลา 14.00 นาฬิกา อุณหภูมิจะค่อยๆ ลดลง และอุณหภูมิของห้องอบแห้งสูงสุดเฉลี่ย 55.3 องศาเซลเซียส ในช่วงเวลา 13.00 นาฬิกา หลังจากนั้นอุณหภูมิของห้องอบแห้งจะเริ่มลดลง เนื่องจากความเข้มรังสีดวงอาทิตย์ลดลง แต่ตรงกันข้ามกับความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศที่เพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมที่ลดลง ซึ่งปรากฏการณ์นี้จะเกิดขึ้นตลอดกระบวนการอบแห้ง



ภาพที่ 23 การแปรค่าของความเข้มข้นสีดวงอาทิตย์เฉลี่ย ความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ย อุณหภูมิสิ่งแวดล้อมเฉลี่ย อุณหภูมิของตัวสะสมความร้อนเฉลี่ย และอุณหภูมิของห้องอบแห้งเฉลี่ย ของ การทดลองอบแห้งกระเจียบแดง

จากกราฟแสดงค่าความชื้นมาตรฐานเปียกเทียบกับเวลาของการอบแห้งกระเจี๊ยบแดงที่สภาวะการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งพลังแสงอาทิตย์ที่ความเร็วลม 1, 2 และ 3 เมตรต่อวินาที และการอบแห้งแบบธรรมชาติแสดงดังภาพที่ 24 กระเจี๊ยบแดงอบแห้งด้วยความชื้นเริ่มต้นที่ 89.22 เปอร์เซ็นต์ความชื้นมาตรฐานเปียก หลังจากผ่านกระบวนการอบแห้งปริมาณความชื้นสุดท้ายของกระเจี๊ยบแดงที่ความเร็วลม 1, 2 และ 3 เมตรต่อวินาที เท่ากับ 17.14, 10.92 และ 11.60 เปอร์เซ็นต์ความชื้นมาตรฐานเปียก ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบปริมาณความชื้นสุดท้ายของการอบแห้งกระเจี๊ยบแดงกับค่ามาตรฐานการอบแห้งของประเทศไทยกำหนด (สูงสุด 12 เปอร์เซ็นต์ความชื้นมาตรฐานเปียก) พบว่า การอบแห้งกระเจี๊ยบแดงที่ความเร็วลม 2 และ 3 เมตรต่อวินาที เท่านั้นที่สามารถลดปริมาณความชื้นได้ตามมาตรฐานกำหนด โดยใช้ระยะเวลาเร็วที่สุดในการอบแห้ง 13 ชั่วโมง จากการสังเกตผลการอบแห้งเห็นได้ว่าเวลาที่ใช้ในการอบแห้งขึ้นอยู่กับอุณหภูมิที่ใช้ออบแห้งและโดยทั่วไปแล้วจะพบว่า การอบแห้งจะใช้เวลาน้อยลงเมื่ออุณหภูมิการอบแห้งสูงขึ้น ดังนั้นเมื่อพิจารณาค่าปริมาณความชื้นสุดท้ายและเวลาในการอบแห้ง การอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งพลังแสงอาทิตย์สามารถลดปริมาณความชื้นได้เร็วกว่าการอบแห้งแบบธรรมชาติที่ต้องใช้เวลาอบแห้งมากกว่า 15 ชั่วโมง ( 2- 3 วัน)



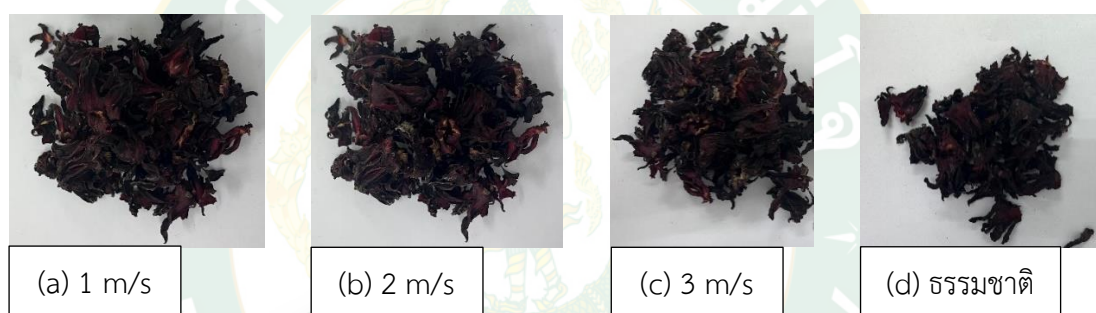
ภาพที่ 24 ปริมาณความชื้นเทียบกับเวลาของการอบแห้งกระเจี๊ยบแดง

การเปรียบเทียบสีของกระเจี๊ยบแดงในระหว่างกระบวนการอบแห้งแสดงในตารางที่ 5 และ ภาพที่ 25 สีเป็นพารามิเตอร์คุณภาพที่สำคัญที่สุดในการกำหนดคุณภาพของผลิตภัณฑ์ประเภทต่างๆ จากการอบแห้งกระเจี๊ยบแดงที่ผ่านกระบวนการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งพลังแสงอาทิตย์ที่ความเร็วลม 1, 2 และ 3 เมตรต่อวินาที และการอบแห้งแบบธรรมชาติ พบว่าการทดลองที่ความเร็วลม 1 เมตรต่อวินาที ค่าเฉลี่ยของแกน  $L^*$  เท่ากับ 58.02 แกน  $a^*$  เท่ากับ 18.74 แกน  $b^*$  เท่ากับ 21.37 การทดลองที่ความเร็วลม 2 เมตรต่อวินาที ค่าเฉลี่ยของแกน  $L^*$  เท่ากับ 64.30 แกน  $a^*$  เท่ากับ 19.33 แกน  $b^*$  เท่ากับ 27.77 และการทดลองที่ความเร็วลม 3 เมตรต่อวินาที ค่าเฉลี่ยของแกน  $L^*$  เท่ากับ 63.87 แกน  $a^*$  เท่ากับ 19.94 แกน  $b^*$  เท่ากับ 24.76 เมื่อเปรียบเทียบกับกรอบแห้งแบบธรรมชาติค่าเฉลี่ยของแกน  $L^*$  เท่ากับ 40.87 แกน  $a^*$  เท่ากับ 9.94 แกน  $b^*$  เท่ากับ 24.76 เมื่อพิจารณาค่าความสว่างของกระเจี๊ยบแดงแต่ละการทดลองได้รับผลกระทบจากการอบแห้ง โดยกระเจี๊ยบแดงที่ผ่านกระบวนการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งพลังแสงอาทิตย์มีค่าความสว่างมากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับกรอบแห้งแบบธรรมชาติ แกน  $a^*$  มีแนวโน้มเป็นสีแดง ค่าสีแดงมีแนวโน้มสูงขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับกรอบแห้งแบบธรรมชาติ และแกน  $b^*$  มีแนวโน้มเป็นสีเหลือง ค่าสีเหลืองทุกการทดลองมีค่าใกล้เคียงกันอย่างชัดเจน ดังนั้นการสูญเสียค่าความสว่าง และ ค่า  $a^*$  เกิดจากการอบแห้งที่อุณหภูมิและเวลาอบแห้งที่สูงขึ้น เนื่องจากความร้อนส่งผลต่อสารประกอบแอนโทไซยานิน ซึ่งเป็นสารสีแดงในกระเจี๊ยบแดง จึงทำให้เกิดการจางลงของสีที่เปลี่ยนจากสีแดงเป็นสีน้ำตาลที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่กว่า เมื่อความเข้มของสีแดงลดลงเป็นผลทำให้สีของแอนโทไซยานินในกระเจี๊ยบแดงลดลงด้วย ซึ่งการศึกษาสอดคล้องกับ Zeynep Hazal Tekin and Mehmet Baslar (2018) พบว่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจะส่งผลต่อการสูญเสียสารประกอบที่ไวต่อความร้อน จากการอบแห้งที่อุณหภูมิสูงจะเกิดการออกซิเดชันของสารประกอบแคโรทีนอยด์ ทำให้สารสีแดงในพริกกลดลงเช่นกัน และจากการศึกษาค่าปริมาณน้ำอิสระของกระเจี๊ยบแดงที่ผ่านการอบแห้ง พบว่า ค่าปริมาณน้ำอิสระของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการอบแห้งด้วยความเร็วลมที่ 1, 2 และ 3 เมตรต่อวินาที เท่ากับ 0.770 0.436 และ 0.435 ตามลำดับ ทั้งนี้การอบแห้งการทดลองด้วยความเร็วลมที่ 2 และ 3 เมตรต่อวินาที มีค่าปริมาณน้ำอิสระน้อยกว่า 0.60 ซึ่งเป็นไปตามมาตรฐานอาหารแห้งที่กำหนดไว้ แต่การอบแห้งด้วยความเร็วลมที่ 1 เมตรต่อวินาที มีค่าปริมาณน้ำอิสระมากกว่า 0.60 ซึ่งเป็นไม่ไปตามมาตรฐานอาหารแห้งที่กำหนดไว้ เนื่องจากเสี่ยงต่อการเจริญเติบโตของแบคทีเรีย ( $a_w$  มากกว่า 0.8) ยีสต์และเชื้อราเจริญเติบโตในช่วง  $a_w$  มากกว่า 0.6



ตารางที่ 5 การเปรียบเทียบสี และค่าปริมาณน้ำอิสระของกระเจี๊ยบแดงอบแห้ง

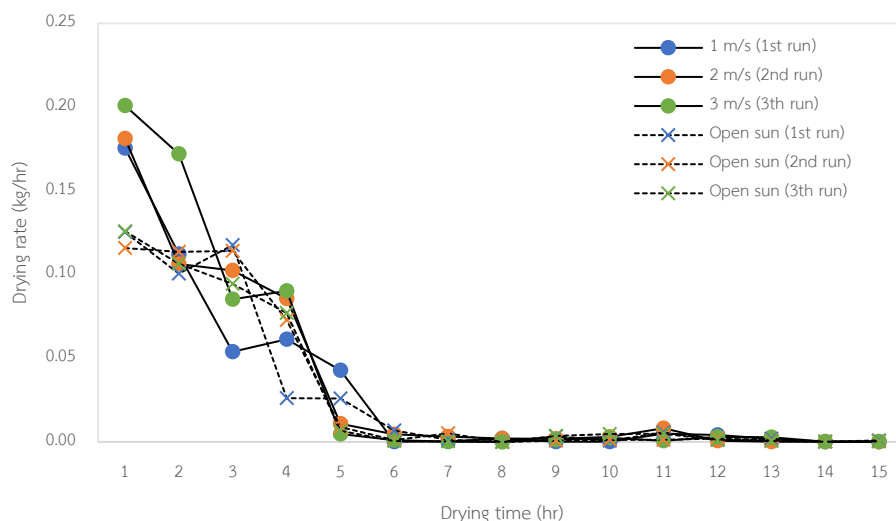
Air velocities (m/s)	Color			Water activity (a <sub>w</sub> )
	L*	a*	b*	
1	58.02	18.74	21.37	0.770
2	64.30	19.33	27.77	0.436
3	63.87	19.94	24.76	0.435
ธรรมชาติ	40.87	7.15	18.92	0.806



ภาพที่ 25 ผลิตภัณฑ์กระเจี๊ยบแดงอบแห้งด้วยการอบแห้งแบบบังคับ และการอบแห้งแบบธรรมชาติ

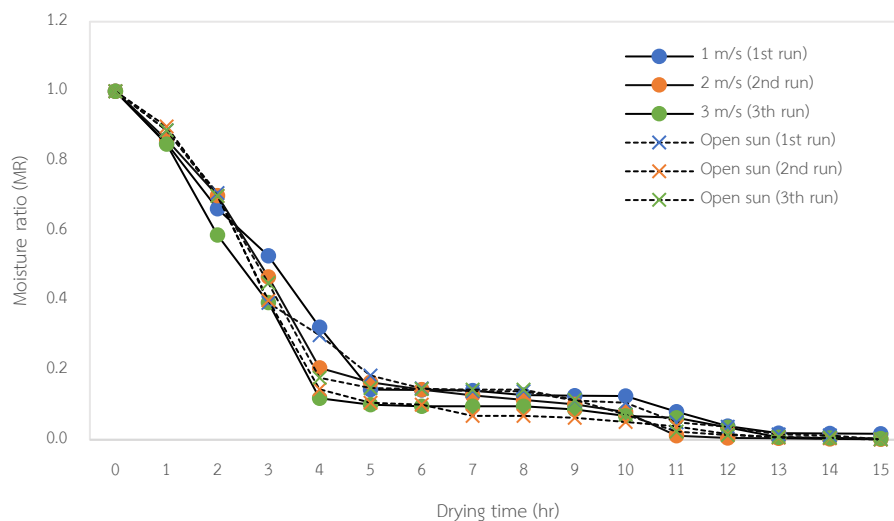
ผลการศึกษาอัตราการอบแห้งและเวลาในการอบแห้งแสดงดังภาพที่ 26 สำหรับการอบแห้งกระเจี๊ยบแดงด้วยเครื่องอบแห้งพลังแสงอาทิตย์ที่ความเร็วลม 1, 2 และ 3 เมตรต่อวินาที และการอบแห้งแบบธรรมชาติ จากการศึกษาพบว่า ช่วงเริ่มต้นของอัตราการอบแห้งกระเจี๊ยบแดงเท่ากับ 0.175, 0.181 และ 0.201 กิโลกรัมต่อชั่วโมง ที่ความเร็วลม 1, 2 และ 3 เมตรต่อวินาที ณ เวลาทำให้แห้ง 1 ชั่วโมง และลดลงอย่างรวดเร็วในช่วง 5 ชั่วโมงแรกของการอบแห้ง สังเกตได้ว่าอัตราการอบแห้งจะสูงขึ้นอย่างมากในระยะแรกของการอบแห้ง เนื่องจากการระเหยปริมาณน้ำอิสระออกจากผลิตภัณฑ์ได้ง่าย จากนั้นอัตราการอบแห้งมีแนวโน้มลดลงเมื่อเวลาผ่านไป โดยอัตราการอบแห้งลดลงในขั้นตอนสุดท้ายของกระบวนการอบแห้งในช่วงเวลา 15 ชั่วโมง บันทึกได้  $4.67 \times 10^{-5}$ ,  $8.00 \times 10^{-5}$  และ  $1.11 \times 10^{-5}$  กิโลกรัมต่อชั่วโมง ด้วยความเร็วลมที่ 1, 2 และ 3 เมตรต่อวินาที จากการศึกษา งานวิจัยยังสอดคล้องกับ Aymen ELkhadraoui et al. (2015) กล่าวว่าอัตราการอบแห้งลดลงอย่าง

ต่อเนื่องตามระยะเวลาการอบแห้ง ไม่พบระยะเวลาการอบแห้งด้วยอัตราคงที่ โดยปริมาณความชื้นลดลงอย่างมากในระยะแรกของการอบแห้ง และจะลดลงเรื่อยๆในระยะต่อมา



ภาพที่ 26 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการอบแห้งเทียบกับเวลาของการอบแห้งกระเจียบแดง

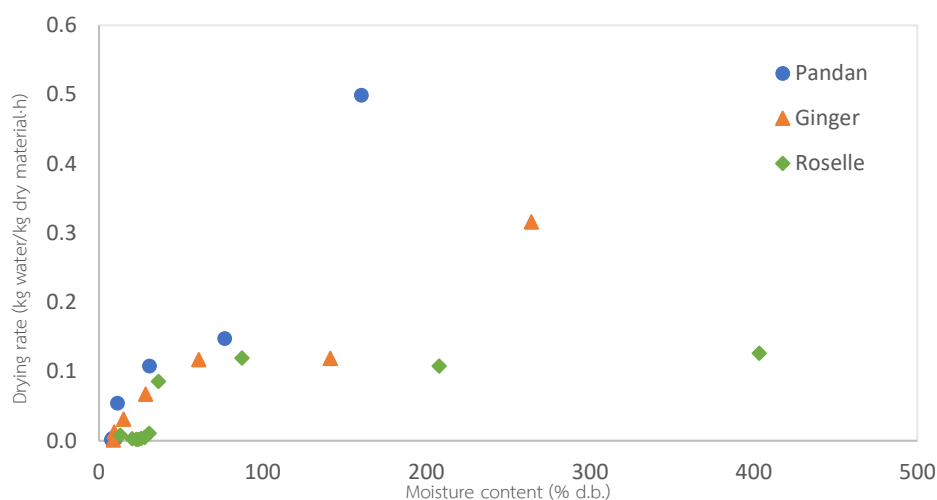
การแปรผันของอัตราส่วนความชื้นกับเวลาของการอบแห้งแสดงดังภาพที่ 27 สำหรับการอบแห้งกระเจียบแดงด้วยเครื่องอบแห้งพลังแสงอาทิตย์ที่ความเร็วลม 1, 2 และ 3 เมตรต่อวินาที และการอบแห้งแบบธรรมชาติ จากกระบวนการอบแห้งจะพบว่า อัตราส่วนความชื้นเริ่มต้นแปรผันจาก 1 ถึงอัตราส่วนความชื้นสุดท้าย (ความชื้นสุดท้ายต่ำกว่า 12 ความชื้นมาตรฐานเปียก) ลดลงประมาณ  $1.72 \times 10^{-2}$ ,  $1.67 \times 10^{-3}$  และ  $3.80 \times 10^{-3}$  สำหรับการอบแห้งแบบบังคับด้วยความเร็วลม 1, 2 และ 3 เมตรต่อวินาที กระบวนการอบแห้งใช้เวลา 15 ชั่วโมง ซึ่งจากการศึกษาอัตราส่วนความชื้นสอดคล้องกับผลการศึกษา การอบแห้งพริกแดง Olajire AS et al. (2018) และการอบแห้งมะเขือเทศ Mavis Owureku-Asare et al. (2012) พบว่าการเปลี่ยนแปลงเส้นกราฟของอัตราส่วนความชื้นในช่วงแรกจะลดลงอย่างรวดเร็วขึ้น เนื่องจากการระเหยของความชื้นออกจากพื้นผิว ต่อมาอัตราส่วนความชื้นจะลดลงตามระยะเวลาในการอบแห้งที่เพิ่มขึ้น ดังนั้นอัตราส่วนความชื้นที่ลดลงอย่างต่อเนื่อง บ่งชี้ว่าการแพร่กระจายของความชื้นจากภายในผลิตภัณฑ์ได้รับการควบคุมการถ่ายโอนมวลภายใน



ภาพที่ 27 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นเทียบกับเวลาของการอบแห้งกระเจียบแดง

#### 4.2.4 ผลการศึกษาอัตราการอบแห้งกับความชื้นที่เปลี่ยนไป

จากการศึกษาการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ด้วยท่อลมร้อนร่วมกับตัวรับรังสีดวงอาทิตย์แบบรางพาราโบลา โดยศึกษาผลผลิตทางการเกษตรที่มีคุณสมบัติทางกายภาพแตกต่างกัน 3 ชนิด คือ ใบเตย ชিং และ กระเจียบแดง ด้วยความเร็วลมคงที่ 1 เมตรต่อวินาที ผลการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ที่ความเร็วลม 1 เมตรต่อวินาทีพบว่า ใบเตยถูกทำให้แห้งด้วยความชื้นเริ่มต้นที่ 71.43 เปอร์เซ็นต์ความชื้นมาตรฐานเปียก มีปริมาณความชื้นสุดท้าย 7.66 เปอร์เซ็นต์ความชื้นมาตรฐานแห้ง ใช้เวลาในการอบแห้ง 4 ชั่วโมง ชิงมีความชื้นเริ่มต้น 87.83 เปอร์เซ็นต์ความชื้นมาตรฐานเปียก หลังการอบแห้งมีปริมาณความชื้นสุดท้าย 8.81 เปอร์เซ็นต์ความชื้นมาตรฐานแห้ง ใช้เวลาในการอบแห้ง 6 ชั่วโมง และกระเจียบแดงอบแห้งด้วยความชื้นเริ่มต้นที่ 89.22 เปอร์เซ็นต์ความชื้นมาตรฐานเปียก หลังจากผ่านกระบวนการอบแห้งมีปริมาณความชื้นสุดท้าย 12.26 เปอร์เซ็นต์ความชื้นมาตรฐานแห้ง ใช้เวลาในการอบแห้ง 15 ชั่วโมง จะเห็นว่าผลผลิตทางการเกษตรแต่ละชนิดมีความชื้นเริ่มต้นแตกต่างกัน จึงส่งผลต่อเวลาในการอบแห้ง และอัตราการอบแห้ง โดยผลการศึกษา นำมาสร้างกราฟการอบแห้ง (Drying curve) ดังภาพที่ 28



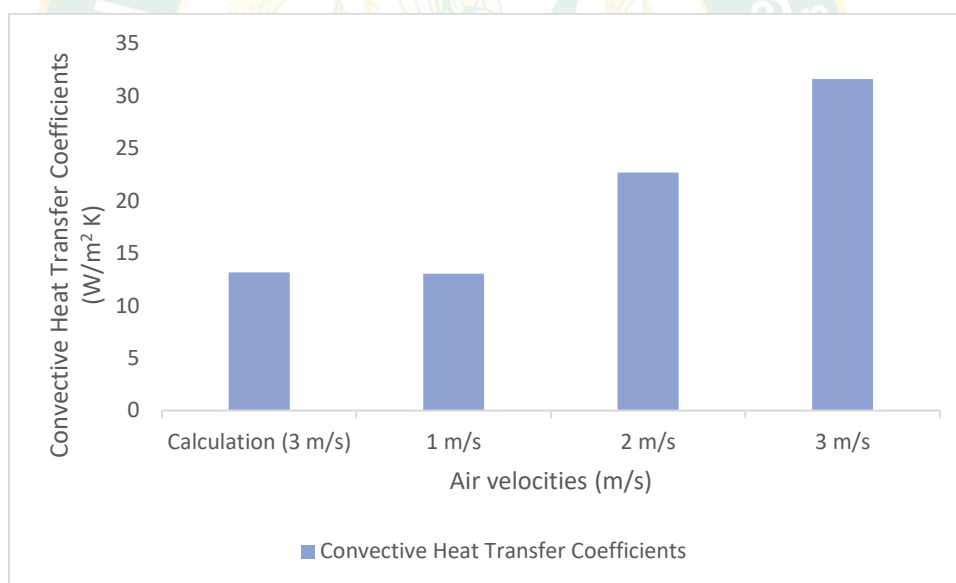
ภาพที่ 28 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการอบแห้งกับความชื้นที่เปลี่ยนไปของการอบแห้งใบเตย ชিং และกระเจี๊ยบแดง

จากการวิเคราะห์กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการอบแห้งกับความชื้นที่เปลี่ยนไปของการอบแห้งใบเตย ชিং และกระเจี๊ยบแดง ที่ความเร็วลมคงที่ 1 เมตรต่อวินาที พบว่า การอบแห้งใบเตย และชিং อัตราการอบแห้งเป็นแบบลดลง (Falling rate) โดยช่วงแรกอัตราการอบแห้งจะลดลงอย่างรวดเร็วในช่วงแรก เนื่องจากเป็นช่วงที่ผลิตภัณฑ์ยังมีความชื้นสูง และลดลงเรื่อย ๆ จนอัตราการอบแห้งเป็น 0 เมื่อน้ำในอาหารไม่สามารถระเหยออกมาได้อีก แต่การอบแห้งกระเจี๊ยบแดงมีอัตราการอบแห้งเป็นแบบลดลง การกำจัดความชื้นจะสูงขึ้นในช่วงแรกเนื่องจากการระเหยของความชื้นออกจากพื้นผิว อัตราการอบแห้งจะค่อยๆ ลดลง และหยุดในช่วงระยะเวลาอัตราการอบแห้งคงที่ ค่าความชื้นที่ลดลงเกิดขึ้นจากพลังงานที่จ่ายให้กับการถ่ายเทความชื้นจากภายในห้องอบแห้งสู่พื้นผิวของผลิตภัณฑ์ เมื่ออัตราการไหลของมวลอากาศเพิ่มขึ้น จะเกิดการพาความร้อนระหว่างลมร้อนและผลิตภัณฑ์ จึงช่วยลดเวลาในการอบแห้ง ซึ่งเวลาในการอบแห้งที่ลดลง เนื่องมาจากอุณหภูมิของห้องอบแห้งนั้นสูงกว่าอุณหภูมิโดยรอบ และความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศในห้องอบแห้งน้อยกว่าบรรยากาศ หลังจากนั้นอัตราการอบแห้งคงที่สิ้นสุดลง ทำให้อุณหภูมิพื้นผิวผลิตภัณฑ์จะสูงขึ้น และอัตราการอบแห้งลดลงอย่างรวดเร็ว โดยที่ใบเตยเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีรูพรุน ทำให้อัตราการอบแห้งลดลงเร็วกว่าชিং และกระเจี๊ยบแดง อัตราการอบแห้งจะลดลงตามปริมาณความชื้นที่ลดลง ในช่วงสุดท้าย

อัตราการอบแห้งจะลดลงอย่างช้าๆ เนื่องจากอุณหภูมิขาเข้าห้องอบแห้งลดลง และอัตราการไหลของอากาศที่เพิ่มขึ้น ทำให้เวลาในการสัมผัสกับผลิตภัณฑ์น้อยลง

#### 4.2.5 ผลการศึกษาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนแบบพาความร้อนที่ส่งผลต่อการอบแห้ง

จากการศึกษาอัตราการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งพลังแสงอาทิตย์ที่ความเร็วลม 1, 2 และ 3 เมตรต่อวินาที พบว่าลักษณะการลดลงของอัตราอบแห้งจะแสดงช่วงอัตราการลดลง แต่ไม่มีช่วงอัตราการอบแห้งคงที่ให้เห็นได้อย่างชัดเจน ที่อัตราอบแห้งคงที่อุณหภูมิพื้นผิวของผลิตภัณฑ์จะเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการอบแห้งที่เพิ่มขึ้น และในช่วงอัตราการอบแห้งตกผลิตภัณฑ์จะรักษาอุณหภูมิไว้เกือบคงที่แล้วจึงอยู่ในกระบวนการอบแห้งต่อไป โดยอัตราการอบแห้งที่ความเร็วลม 2 และ 3 เมตรต่อวินาที จะมีค่าสูงกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับการอบแห้งที่ความเร็วลม 1 เมตรต่อวินาที เนื่องจากอัตราการกำจัดความชื้นจะเพิ่มขึ้นตามการลดลงของมวลผลิตภัณฑ์เสมอ



ภาพที่ 29 ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนแบบพาความร้อนของเครื่องอบแห้งพลังแสงอาทิตย์ที่ความเร็วลม 1, 2 และ 3 เมตรต่อวินาที

จากการศึกษาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนแบบพาความร้อน พบว่าตัวเลขแพรนต์เทิล ตัวเลขเรย์โนลด์ และค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนแบบพาความร้อนแปรผันตามการเพิ่มขึ้นของความเร็วลมและอุณหภูมิของการอบแห้ง ตัวเลขแพรนต์เทิลลดลงตามอุณหภูมิของลมร้อนที่เพิ่มขึ้น

แต่ตัวเลขเรย์โนลด์ลดลงตามอุณหภูมิของลมร้อนที่เพิ่มขึ้น และเพิ่มขึ้นตามความเร็วของอากาศที่เพิ่มขึ้น จากภาพที่ 29 ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนแบบพาความร้อนความเร็วลม 1, 2 และ 3 เมตรต่อวินาที มีค่าเท่ากับ 13.04, 22.68 และ 31.59 วัตต์ต่อตารางเมตร-เคลวิน เมื่อเปรียบเทียบกับ การออกแบบ 13.15 วัตต์ต่อตารางเมตร-เคลวิน โดยค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนแบบพาความร้อนลดลงตามอุณหภูมิของลมร้อนที่เพิ่มขึ้น และเพิ่มขึ้นตามความเร็วลม โดยค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนที่มากขึ้น จะส่งผลให้ค่าอัตราการอบแห้งสูงขึ้นตาม อย่างไรก็ตามหากค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนมากเกินไปก็ส่งผลให้การส่งถ่ายความร้อน และการสะสมความร้อนของท่อลม ทำให้ อุณหภูมิลมร้อนที่ส่งไปยังห้องอบแห้งน้อยตาม

#### 4.3 ผลการหาสภาวะที่เหมาะสมในการอบแห้งของระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์

การทดลองการอบแห้งดำเนินการ โดยพิจารณาการอบแห้งที่มีเงื่อนไขการอบแห้งดังนี้ ผลผลิตทางการเกษตร 3 ชนิดที่คุณสมบัติทางกายภาพที่แตกต่างกัน ได้แก่ ใบเตย ชিং และ กระจับแดง และการเปลี่ยนแปลงความเร็วลม 1, 2 และ 3 เมตรต่อวินาที โดยทั่วไปอุณหภูมิของห้องอบแห้งสูงสุดจะเพิ่มขึ้นจากทางเข้าของเครื่องอบแห้ง เนื่องจากอากาศสัมผัสกับพื้นที่ระบบแลกเปลี่ยนความร้อนจากแสงอาทิตย์ของท่อลม และลดลงทางช่องระบายอากาศหลังจากที่ลมร้อนได้ดูดซับความชื้นจากผลิตภัณฑ์ในห้องอบแห้ง จากผลการทดลองพบว่า ความเข้มข้นสีดวงอาทิตย์อยู่ในช่วง 620.0 ถึง 1055.0 วัตต์ต่อตารางเมตร ที่ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ 22.10 ถึง 72.40 เปอร์เซ็นต์ และอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมอยู่ในช่วงตั้งแต่ 30.7 ถึง 42.3 องศาเซลเซียส สอดคล้องกับอุณหภูมิของตัวสะสมความร้อนอยู่ในช่วง 33.0 ถึง 53.7 องศาเซลเซียส ซึ่งมีค่าสูงกว่าอุณหภูมิแวดล้อม 11 องศาเซลเซียส เมื่ออุณหภูมิของตัวสะสมความร้อนก็ส่งผลให้อุณหภูมิของห้องอบแห้งสูงขึ้นอุณหภูมิของห้องอบแห้งสูงสุดเฉลี่ย 54.5, 56.2 และ 52.6 องศาเซลเซียส ที่ความเร็วลม 1, 2 และ 3 เมตรต่อวินาที โดยอุณหภูมิห้องอบแห้งแปรผันตามค่าความเข้มแสงดวงอาทิตย์เสมอ อุณหภูมิภายในห้องอบแห้งเพิ่มขึ้นเมื่อความเร็วลมเพิ่มขึ้นจาก 1 เมตรต่อวินาที เป็น 2 เมตรต่อวินาที เนื่องจากท่อลมร้อนสามารถดูดซับพลังงานความร้อนในปริมาณที่มากขึ้น ทำให้พลังงานความร้อนที่ส่งไปยังห้องอบแห้ง สามารถลดปริมาณความชื้นในระหว่างกระบวนการทำให้แห้งตามระยะเวลาการอบแห้งที่เพิ่มขึ้น ผลการศึกษาคล้ายกับ Malakar et al. (2021) รายงานว่าอุณหภูมิภายในห้องอบแห้งเพิ่มขึ้นตามความเร็วลมที่เพิ่มขึ้นจาก 1 เมตรต่อวินาที เป็น 2 เมตรต่อวินาที และหลังจากนั้นก็ลดลงเนื่องจากปริมาณความร้อนที่ได้รับจากคอนเดนเซอร์ของท่อความร้อนที่ความเร็วการไหลของอากาศ 2 เมตรต่อวินาที

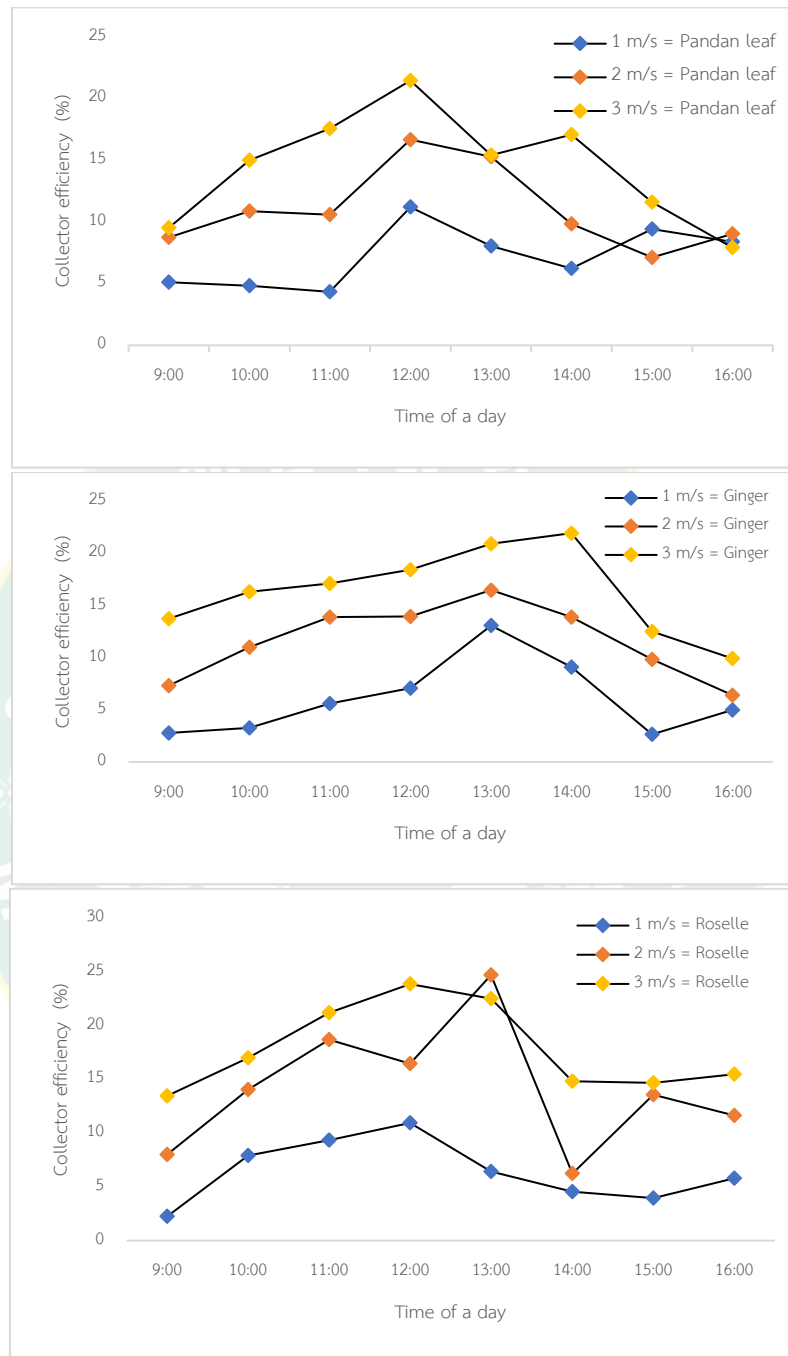
การลดความชื้นของผลิตภัณฑ์ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและความเร็วลม จากการเปลี่ยนแปลงค่าความชื้นของการอบแห้งผลผลิตทางการเกษตร 3 ชนิด พบว่าใบเตยถูกทำให้แห้งด้วยความชื้นเริ่มต้นที่ 71.43 ความชื้นมาตรฐานเปียกจนถึงความชื้นสุดท้ายที่ต่ำกว่า 12 ความชื้นมาตรฐานเปียก ใบเตยลดความชื้นสุดท้ายลดลงเหลือขั้นต่ำ 6.58 เปอร์เซ็นต์ความชื้นมาตรฐานเปียก โดยใช้เวลาลดความชื้นเร็วที่สุด 5 ชั่วโมง ด้วยความเร็วลมที่ 2 เมตรต่อวินาที ซึ่งถูกทำให้แห้งด้วยความชื้นเริ่มต้นที่ 87.83 ความชื้นมาตรฐานเปียกจนถึงความชื้นสุดท้ายที่ต่ำกว่า 12 ความชื้นมาตรฐานเปียก จึงลดความชื้นสุดท้ายลดลงเหลือขั้นต่ำ 8.57 เปอร์เซ็นต์ความชื้นมาตรฐานเปียก โดยใช้ระยะเวลาการอบแห้งสูงสุด 6 ชั่วโมง ด้วยความเร็วลมที่ 2 เมตรต่อวินาที และกระเจียบแดงถูกทำให้แห้งด้วยความชื้นเริ่มต้นที่ 89.22 ความชื้นมาตรฐานเปียก กระเจียบแดงลดความชื้นสุดท้ายลดลงเหลือขั้นต่ำ 11.66 เปอร์เซ็นต์ความชื้นมาตรฐานเปียก โดยใช้ระยะเวลาการอบแห้งสูงสุด 11 ชั่วโมง ด้วยความเร็วลมที่ 2 เมตรต่อวินาที ดังนั้นเห็นได้ว่าที่ความเร็วลม 2 เมตรต่อวินาที มีค่าอุณหภูมิของห้องอบแห้งสูงสุดและใช้เวลาในการอบแห้งน้อยที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับความเร็วลม 1 และ 3 เมตรต่อวินาที และการอบแห้งแบบธรรมชาติ เนื่องจากท่อลมร้อนสามารถดูดซับพลังงานความร้อนในปริมาณที่มากขึ้น ทำให้พลังงานความร้อนที่ส่งไปยังห้องอบแห้ง สามารถลดปริมาณความชื้นในระหว่างกระบวนการทำให้แห้งตามระยะเวลาการอบแห้งที่เพิ่มขึ้น

#### 4.4 ผลการทดสอบประสิทธิภาพของระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์

##### 4.4.1 ผลประสิทธิภาพของท่อลมร้อนร่วมกับตัวรับรังสีดวงอาทิตย์แบบรางพาราโบลา

ประสิทธิภาพของท่อลมร้อนร่วมกับตัวรับรังสีดวงอาทิตย์แบบรางพาราโบลา ในช่วงเวลา 1 ชั่วโมง ภายใต้การพาความร้อนด้วยเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ที่ความเร็วลม 1, 2 และ 3 เมตรต่อวินาที ของการอบแห้ง ใบเตย ชিং และกระเจี๊ยบแดงแสดงดังภาพที่ 30 พบว่าค่าประสิทธิภาพของท่อลมร้อนร่วมกับตัวรับรังสีดวงอาทิตย์แบบรางพาราโบลา เพิ่มขึ้นตั้งแต่ช่วงเช้าถึงเที่ยงวัน และลดลงช่วงเที่ยงวันถึงเย็น เนื่องจากแนวโน้มความเข้มรังสีดวงอาทิตย์เพิ่มขึ้นและลดลงในหนึ่งวัน จากรายงานประสิทธิภาพของท่อลมร้อนร่วมกับตัวรับรังสีดวงอาทิตย์แบบรางพาราโบลาสูงสุดระหว่างเวลา 11.00 น. ถึง 14.00 น. เนื่องจากความเข้มรังสีดวงอาทิตย์มีค่าสูงขึ้นในช่วงเวลาเดียวกัน ดังนั้นอิทธิพลของความเข้มรังสีดวงอาทิตย์ และความเร็วลมของมวลอากาศ มีผลต่อประสิทธิภาพของท่อลมร้อนร่วมกับตัวรับรังสีดวงอาทิตย์แบบรางพาราโบลาเป็นอย่างมาก (I. Montero a et al., 2010 และ S. K. Sansaniwal and M. Kumar, 2015) จากการทดลองพบว่าประสิทธิภาพของท่อลมร้อนร่วมกับตัวรับรังสีดวงอาทิตย์แบบรางพาราโบลาสูงสุดของการอบแห้งใบเตยเท่ากับ 11.19, 16.66 และ 21.45 เปอร์เซ็นต์ ประสิทธิภาพของท่อลมร้อนร่วมกับตัวรับรังสีดวงอาทิตย์แบบรางพาราโบลาสูงสุดของการอบแห้งชিংเท่ากับ 13.09, 16.50 และ 21.95 เปอร์เซ็นต์ และประสิทธิภาพของท่อลมร้อนร่วมกับตัวรับรังสีดวงอาทิตย์แบบรางพาราโบลาสูงสุดของการอบแห้งกระเจี๊ยบแดงเท่ากับ 10.95, 24.70 และ 23.86 เปอร์เซ็นต์ ที่ความเร็วลม 1, 2 และ 3 เมตรต่อวินาที ตามลำดับ ดังนั้นจากการทดลองจะเห็นได้ว่าการให้ความสำคัญของการเลือกค่าที่เหมาะสมสำหรับความเร็วลมของมวลอากาศ เพื่อให้ค่าประสิทธิภาพของท่อลมร้อนร่วมกับตัวรับรังสีดวงอาทิตย์แบบรางพาราโบลามีความเหมาะสม และการใช้พลังงานของระบบอบแห้งไม่เพิ่มขึ้นมากเกินไป เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของท่อลมร้อนร่วมกับตัวรับรังสีดวงอาทิตย์แบบรางพาราโบลาของเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบรางพาราโบลาพบว่า Ullah and Kang (2017) ศึกษาประสิทธิภาพของตัวเก็บพลังงานแสงอาทิตย์แบบรางพาราโบลาสำหรับอบแห้งแอปเปิล พบว่าประสิทธิภาพของตัวเก็บพลังงานแสงอาทิตย์เท่ากับ 23.0 เปอร์เซ็นต์ ที่อัตราการไหลสูงสุดของการทดลอง และ Malakar et al. (2021) ศึกษาประสิทธิภาพการเก็บพลังงานแสงอาทิตย์ของเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบท่อส่งความร้อนเต็มที่มีความเร็วการไหลของอากาศที่แตกต่างกัน (1, 2 และ 3 เมตรต่อวินาที) พบว่าประสิทธิภาพการเก็บพลังงานแสงอาทิตย์โดยเฉลี่ยเท่ากับ 23.78, 39.91 และ 34.57 เปอร์เซ็นต์ ที่ 1, 2 และ 3 เมตรต่อวินาที ตามลำดับ





ภาพที่ 30 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพของท่อลมร้อนร่วมกับตัวรับรังสีดวงอาทิตย์แบบราง พาราโบลาของเครื่องอบแห้งกับเวลาในการอบแห้งของการอบแห้งใบเตย ชিং และกระเจี๊ยบแดง

#### 4.4.2 ประสิทธิภาพของเครื่องอบแห้ง

ประสิทธิภาพของเครื่องอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งพลังแสงอาทิตย์ที่ความเร็วลม 1, 2 และ 3 เมตรต่อวินาที และการอบแห้งแบบธรรมชาติ แสดงไว้ในตารางที่ 6 การอบแห้งที่มีการเปลี่ยนแปลงความเร็วลมที่แตกต่างกัน พบว่าประสิทธิภาพของเครื่องอบแห้งสูงสุดของการอบแห้งใบเตยเท่ากับ 30.33 เปอร์เซ็นต์ ที่ความเร็วลม 1 เมตรต่อวินาที ประสิทธิภาพของเครื่องอบแห้งสูงสุดของการอบแห้งขิงเท่ากับ 23.86 เปอร์เซ็นต์ ที่ความเร็วลม 2 เมตรต่อวินาที และประสิทธิภาพของเครื่องอบแห้งสูงสุดของการอบแห้งกระเจี๊ยบแดงเท่ากับ 21.59 เปอร์เซ็นต์ ที่ความเร็วลม 2 เมตรต่อวินาที เพื่อชี้ให้เห็นว่าระบบการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งพลังแสงอาทิตย์นี้สามารถอบแห้งผลผลิตทางการเกษตรได้อย่างมีประสิทธิภาพ จึงมีการเปรียบเทียบกับเครื่องอบแห้งแบบธรรมชาติ พบว่าประสิทธิภาพของเครื่องอบแห้งสูงสุดเท่ากับ 13.90 เปอร์เซ็นต์ ที่ความเร็วลม 1 เมตรต่อวินาที สำหรับการอบแห้งใบเตย ดังนั้นการเพิ่มอุณหภูมิและความเร็วลมในห้องอบแห้งด้วยท่อลมร้อนร่วมกับตัวรับรังสีดวงอาทิตย์แบบรางพาราโบลามีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นประมาณ 25.99 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเทียบกับการอบแห้งแบบธรรมชาติ เนื่องจากกระบวนการถ่ายเทความร้อนในห้องอบแห้งด้วยท่อลมร้อนร่วมกับตัวรับรังสีดวงอาทิตย์แบบรางพาราโบลาก่อเกิดขึ้นจากความร้อนที่ถ่ายเทในห้องอบแห้งด้วยการพาความร้อนจากผิวท่อลมร้อนที่มีพาราโบลาสะท้อนแสง ทำให้เกิดการสะสมความร้อนบริเวณใต้ผิวท่อและสะท้อนความร้อนกลับไปให้ท่อ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพทางความร้อนกับท่อ และความร้อนที่ได้รับจากพลังงานแสงอาทิตย์โดยตรงที่ตกกระทบกับห้องอบแห้ง เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของเครื่องอบแห้งของเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบรางพาราโบล วิจิตรา ภูมิสวัสดิ์ (2560) พบว่าประสิทธิภาพเครื่องอบแห้งแสงอาทิตย์โดยใช้รางพาราโบลามีประสิทธิภาพมากที่สุด 16.4 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเปรียบเทียบกับเครื่องอบแห้งแสงอาทิตย์โดยไม่ใช้รางพาราโบล่า 10.7 เปอร์เซ็นต์ และประสิทธิภาพของการอบแห้งโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์โดยตรงมีค่าน้อยที่สุด 7.4 เปอร์เซ็นต์ และ

ตารางที่ 6 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของห้องอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งพลังแสงอาทิตย์ที่  
ความเร็วลม 1, 2 และ 3 เมตรต่อวินาที และการอบแห้งแบบธรรมชาติ ของการอบแห้งใบเตย ชিং  
และกระเจี๊ยบแดง

วิธีการอบแห้ง	ประสิทธิภาพของเครื่องอบแห้ง	
	บ่งคับ (เปอร์เซ็นต์)	ธรรมชาติ (เปอร์เซ็นต์)
การอบแห้งใบเตย		
- 1 เมตรต่อวินาที	30.33	13.90
- 2 เมตรต่อวินาที	27.07	11.52
- 3 เมตรต่อวินาที	26.84	11.42
การอบแห้งชিং		
- 1 เมตรต่อวินาที	23.38	8.35
- 2 เมตรต่อวินาที	23.86	9.04
- 3 เมตรต่อวินาที	22.79	8.38
การอบแห้งกระเจี๊ยบแดง		
- 1 เมตรต่อวินาที	19.28	7.88
- 2 เมตรต่อวินาที	21.59	8.04
- 3 เมตรต่อวินาที	21.59	7.95

#### 4.5 ผลของจุดคุ้มทุนเชิงเศรษฐศาสตร์

การวิเคราะห์ทางด้านเศรษฐศาสตร์ของเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ด้วยท่อลมร้อนร่วมกับตัวรับรังสีดวงอาทิตย์แบบรางพาราโบลาสำหรับกระบวนการอบแห้งผลผลิตทางการเกษตรนั้น เป็นการวิเคราะห์ถึงความคุ้มค่าในการลงทุนเชิงเศรษฐศาสตร์ และหาระยะเวลาคืนทุน โดยคำนึงถึงประโยชน์ในการทำงานมากที่สุด ดังนั้นในการหาต้นทุนเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์เพื่ออบแห้งผลิตภัณฑ์อย่างเต็มความสามารถของเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ โดยการอบแต่ละครั้งจะสามารถอบแห้งผลผลิตทางการเกษตรได้ครั้งละ 1.5 กิโลกรัม ต่อ 1 รอบต่อวัน และ 1 รอบการอบแห้งเท่ากับ 8 ชั่วโมง ระยะเวลา 1 ปี สามารถอบแห้งทั้งหมด 240 วัน รายละเอียดการคำนวณจุดคุ้มทุนเชิงเศรษฐศาสตร์แสดงดังตารางที่ 7

ผลกำไรสุทธิในการดำเนินการผลิตผลผลิตทางการเกษตรอบแห้ง โดยการใช้เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ด้วยท่อลมร้อนร่วมกับตัวรับรังสีดวงอาทิตย์แบบรางพาราโบลา เมื่อเปรียบเทียบผลกำไรสุทธิ และระยะเวลาคืนทุนของผลิตภัณฑ์ 3 ชนิด จากการคำนวณจุดคุ้มทุนเชิงเศรษฐศาสตร์พบว่า ไบเดียมมีกำไรสุทธิใน 1 ปี 4026 บาท ใช้ระยะเวลาคืนทุน 6 ปี จึงมีกำไรสุทธิใน 1 ปี 26,126 บาท ต้องใช้ระยะเวลาคืนทุนทั้งหมด 0.9 ปี หรือ 13 เดือน และกระเจี๊ยบแดงมีกำไรสุทธิใน 1 ปี 14,346 บาท ใช้ระยะเวลาคืนทุน 1.7 ปี ดังนั้นผลการวิเคราะห์จุดคุ้มทุนเชิงเศรษฐศาสตร์เห็นได้ชัดเจนว่าการอบแห้งซึ่งได้กำไรสุทธิต่อปี และมีระยะเวลาคืนทุนเร็วที่สุด

ตารางที่ 7 รายละเอียดและการคำนวณจุดคุ้มทุนเชิงเศรษฐศาสตร์

รายละเอียด	จำนวน			หน่วย
ต้นทุนวัสดุสำหรับการสร้างเครื่อง อบแห้ง	24,300			บาท
อายุการใช้งาน	5			ปี
มูลค่าซาก คิดเป็น 10% ของต้นทุน การสร้างเครื่อง	2,430			บาท
ค่าจ้างแรงงานต่อ 1 วัน	50			บาท
จำนวนวันอบแห้งต่อ 1 ปี	240			วัน
ราคาวัตถุดิบต่อกิโลกรัม	ใบเตย	ขิง	กระเจี๊ยบแดง	
ราคาต่อกิโลกรัม	10	25	45	บาท
ค่าใช้จ่ายในการลงทุน	91.1	72.9	79.2	บาทต่อกิโลกรัม
ค่าใช้จ่ายในการดำเนินการ				
- ค่าวัตถุดิบ	75	125	293.5	บาทต่อกิโลกรัม
- ค่าแรงงาน	250	167	217.4	บาทต่อกิโลกรัม
- ค่าใช้จ่ายในการ ดำเนินการรวม	325	292	510.9	บาทต่อกิโลกรัม
ต้นทุนการผลิตรวม	416.1	435.4	590.1	บาทต่อกิโลกรัม
การวิเคราะห์ต้นทุนผลตอบแทน	83.9	435.4	259.9	บาทต่อกิโลกรัม
- กำไรสุทธิใน 1 ปี	4026	26126	14,346	บาท
ระยะเวลาคืนทุน	6	0.9	1.7	ปี

การวิเคราะห์ประสิทธิภาพการอบแห้งโดยเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ด้วยท่อลมร้อน ร่วมกับตัวรับรังสีดวงอาทิตย์แบบรางพาราโบลาด้วยหลักเศรษฐศาสตร์วิศวกรรม ประกอบด้วย มูลค่าปัจจุบันสุทธิของโครงการ อัตราผลตอบแทนของโครงการ และระยะเวลาคืนทุน ดังตารางที่ 8 พบว่า มูลค่าปัจจุบันสุทธิของโครงการเท่ากับ 77,321.03 บาท ซึ่งมีค่าเป็นบวกแสดงว่าการลงทุนในการพัฒนาเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ด้วยท่อลมร้อนร่วมกับตัวรับรังสีดวงอาทิตย์แบบรางพาราโบลามีความคุ้มค่า อัตราผลตอบแทนของโครงการที่เหมาะสมที่สุดมีค่าเท่ากับ 105.1 เปอร์เซ็นต์ จากการศึกษาความเป็นไปได้ภายในระยะเวลา 5 ปี อัตราผลตอบแทน กระแสเงินสดในปีที่ 1 เท่ากับ 13,750 บาท กระแสเงินสดในปีที่ 2 เท่ากับ 7,237 บาท กระแสเงินสดในปีที่ 3 เท่ากับ 3,809 บาท กระแสเงินสดในปีที่ 4 เท่ากับ 2,004 บาท และกระแสเงินสดในปีที่ 5 เท่ากับ 1,055 บาท ดังนั้นจากการศึกษาความเป็นไปได้ในการลงทุน เนื่องจากระยะเวลาคืนทุนนั้นมีระยะเวลายาว โดยวิธีธรรมชาติมีกำลังในการผลิตได้น้อย และมูลค่าปัจจุบันสุทธิของโครงการน้อยกว่า โดยวิธีการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์มีกำลังในการผลิตที่มากกว่า และมีอัตราการคืนทุนภายในระยะเวลา 1 ปี ทำให้การพัฒนาเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์มีความเป็นไปได้ที่จะลงทุน

ตารางที่ 8 ผลการวิเคราะห์ประสิทธิภาพการอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ด้วยหลักเศรษฐศาสตร์วิศวกรรม

ลำดับ	การคำนวณทางเศรษฐศาสตร์	วิธีการอบแห้ง		หน่วย
		บังคับ	ธรรมชาติ	
	ผลิตภัณฑ์	จิง	จิง	
1	PB	9	1	เดือน
2	NPV	77,321.03	50,054.43	บาท

## บทที่ 5

### สรุปผลการทดลอง

การทดลองเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ด้วยท่อลมร้อนร่วมกับตัวรับรังสีดวงอาทิตย์แบบรางพาราโบลาในกระบวนการอบแห้งผลิตภัณฑ์ทางการเกษตร ซึ่งการศึกษาการทำวิจัยนี้ผู้วิจัยได้ออกแบบ และพัฒนาเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์เพิ่มประสิทธิภาพในการอบแห้ง โดยมีขอบเขตในการออกแบบโดยใช้พลังงานความร้อนจากรังสีอาทิตย์ จากนั้นทำการทดลองและเก็บข้อมูลของเครื่องอบแห้ง และใช้ใบเตย ชিং และกระเจี๊ยบแดงเป็นผลิตภัณฑ์ในการอบแห้ง ในงานวิจัยการออกแบบและพัฒนาเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ด้วยท่อลมร้อนร่วมกับตัวรับรังสีดวงอาทิตย์แบบรางพาราโบลาโดยทำการทดลองที่ความเร็วลมต่างกันคือ 1, 2 และ 3 เมตรต่อวินาที ในช่วงเวลาระหว่าง 9.00 - 16.00 น. ได้ข้อสรุปดังต่อไปนี้

1. เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ที่ได้พัฒนาขึ้นมีห้องอบแห้งขนาด  $0.7 \times 0.7 \times 0.9$  ลูกบาศก์เมตร ภายในบรรจุถาดอบแห้งจำนวน 3 ถาด สำหรับวางผลิตภัณฑ์ รวมถึงเพิ่มตัวรับพลังงานแสงอาทิตย์ด้วยท่อลมร้อนขนาด 4 นิ้ว ยาว 2 เมตร ติดตั้งรางพาราโบลาสะท้อนแสงทำจากแผ่นอลูมิเนียม เพื่อเพิ่มอุณหภูมิให้อากาศที่ไหลผ่านท่อลมเข้าสู่ห้องอบ

2. ความชื้นในผลผลิตทางการเกษตรจะลดลงตามระยะเวลาในการอบแห้ง โดยทั่วไปการอบแห้งด้วยอุณหภูมิและความเร็วลมที่สูงขึ้นทำให้ความชื้นลดลงอย่างต่อเนื่อง จากการทดลองพบว่าการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ช่วยให้ความชื้นของผลผลิตทางการเกษตรลดลงเร็วกว่าการอบแห้งแบบธรรมชาติ โดยการทดสอบอบแห้งใบเตยอบแห้งด้วยความชื้นเริ่มต้น 71.43 ความชื้นมาตรฐานเปียก เหลือความชื้นสุดท้ายลดลงเหลือ 6.58 เปอร์เซ็นต์ความชื้นมาตรฐานเปียก ใช้เวลาเวลาอบแห้งอย่างน้อย 4 ชั่วโมง จึงมีความชื้นเริ่มต้น 87.83 ความชื้นมาตรฐานเปียก ถูกอบแห้งจนความชื้นสุดท้ายลดลงเหลือ 8.57 เปอร์เซ็นต์ความชื้นมาตรฐานเปียก ใช้ระยะเวลาการอบแห้งสูงสุด 6 ชั่วโมง กระเจี๊ยบแดงอบแห้งด้วยความชื้นเริ่มต้นที่ 89.22 เปอร์เซ็นต์ความชื้นมาตรฐานเปียก หลังจากผ่านกระบวนการอบแห้งปริมาณความชื้นสุดท้ายเท่ากับ 10.92 เปอร์เซ็นต์ความชื้นมาตรฐานเปียก ใช้ระยะเวลาเร็วที่สุดในการอบแห้ง 11 ชั่วโมง เมื่อเปรียบเทียบกับการอบแห้งแบบธรรมชาติที่ต้องใช้เวลาอบแห้งมากกว่า 15 ชั่วโมง และจากการวิเคราะห์ค่าวอเตอร์แอกติวิตีของผลผลิตทางการเกษตรอบแห้งมีความสัมพันธ์กับค่าความชื้น ซึ่งได้ลดลงตามอุณหภูมิการอบแห้งที่เพิ่มขึ้น อยู่ในช่วง 0.335 - 0.505 ทั้งนี้การอบแห้งทุกเงื่อนไขการทดลองซึ่งเป็นไปตาม

มาตรฐานอาหารแห้งที่กำหนดไว้ โดยที่ความชื้นต้องไม่เกินร้อยละ 12 โดยน้ำหนัก และวอเตอร์แอกทีวิตีต้องไม่เกิน 0.6

3. การทดสอบการอบแห้งใบเตยมีค่าประสิทธิภาพของท่อลมร้อนร่วมกับตัวรับรังสีดวงอาทิตย์แบบรางพาราโบลาสูงสุดเท่ากับ 21.45 เปอร์เซ็นต์ ที่ความเร็วลม 3 เมตรต่อวินาที การทดสอบการอบแห้งซึ่งมีค่าประสิทธิภาพของท่อลมร้อนร่วมกับตัวรับรังสีดวงอาทิตย์แบบรางพาราโบลาสูงสุดเท่ากับ 21.95 เปอร์เซ็นต์ ที่ความเร็วลม 3 เมตรต่อวินาที และการทดสอบการอบแห้งกระเจี๊ยบแดงมีค่าประสิทธิภาพของท่อลมร้อนร่วมกับตัวรับรังสีดวงอาทิตย์แบบรางพาราโบลาสูงสุดเท่ากับ 24.70 เปอร์เซ็นต์ ที่ความเร็วลม 2 เมตรต่อวินาที และประสิทธิภาพของเครื่องอบแห้งสูงสุดของการอบแห้งใบเตย ชিং และกระเจี๊ยบแดงเท่ากับ 30.33, 23.86 และ 21.59 เปอร์เซ็นต์ เปรียบเทียบกับการอบแห้งแบบธรรมชาติ พบว่าประสิทธิภาพของเครื่องอบแห้งสูงสุดเท่ากับ 13.90 เปอร์เซ็นต์ ด้วยเหตุนี้ชี้ให้เห็นว่าระบบการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งพลังแสงอาทิตย์นี้สามารถอบแห้งผลผลิตทางการเกษตรได้อย่างมีประสิทธิภาพ

4. ด้านจุดคุ้มทุนเชิงเศรษฐศาสตร์ของเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ด้วยท่อลมร้อนร่วมกับตัวรับรังสีดวงอาทิตย์แบบรางพาราโบลา มีค่าใช้จ่ายในการสร้าง 24,300 บาท ใช้แรงงานในการปฏิบัติงาน 1 คน ในการอบแห้ง 1 ครั้งใช้เวลาทั้งหมด 7 ชั่วโมง ปีละ 240 วัน มีต้นทุนการผลิต กิโลกรัมละ 72.9 บาท เมื่อขายผลผลิตทางการเกษตรอบแห้งในราคา กิโลกรัมละ 800 บาท จะได้กำไร กิโลกรัมละ 377.1 บาท คิดเป็นกำไรสุทธิใน 1 ปี เท่ากับ 26,126 บาท และมีระยะเวลาคืนทุนทั้งหมด 0.9 ปี หรือ 9 เดือน

### ข้อเสนอแนะ

เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ด้วยท่อลมร้อนร่วมกับตัวรับรังสีดวงอาทิตย์แบบรางพาราโบลาที่สร้างขึ้นทางผู้จัดทำได้ดำเนินการสร้างและทดสอบอย่างเต็มที่แล้ว แต่ก็พบข้อจำกัดหลายอย่าง ดังนั้นทางผู้จัดทำได้เสนอแนวความคิดที่จะนำไปพัฒนาและปรับปรุงให้ดีขึ้นกว่าเดิมดังนี้

1. โครงสร้างของเครื่องอบแห้งบางส่วนเป็นโลหะทำให้ส่วนเชื่อมต่อของเครื่องอบแห้งเกิดสนิมได้ เนื่องจากการวางเครื่องอบแห้งไว้กลางแจ้ง และภายในเครื่องอบแห้งมีความร้อนสูญเสียสู่ภายนอก ควรมีการบุนนกันความร้อนออก



2. เครื่องอบแห้งยังบรรจุผลผลิตทางการเกษตรได้ปริมาณไม่มากนัก ในเชิงพาณิชย์ควรจะขยายขนาดเครื่องอบแห้งให้มีความจุมากขึ้น โดยอาศัยหลักการคิดและคำนวณจากโครงการนี้เป็นแนวทางกำหนดขนาดของอุปกรณ์และโครงสร้างต่างๆ

3. การวัดค่าการเปลี่ยนแปลงของน้ำหนัก ความชื้น และอุณหภูมิของอากาศภายในเครื่องอบแห้ง ควรเป็นแบบเซนเซอร์ควบคุมอัตโนมัติ และจากการศึกษาเครื่องอบแห้งทำให้ทราบว่าความเร็วลมมีผลต่อการอบแห้ง ควรเพิ่มระบบควบคุมอัตโนมัติของเครื่องอบแห้ง เพื่อให้ควบคุมความเร็วลมได้อย่างเสถียร



## บรรณานุกรม

- กระวี ตรีอำนรรค, เทวรัตน์ ทิพย์วิมล, ชนินทร์ จิตรเจริญ และดวงพร วงษ์วัฒนพงษ์. 2555. การออกแบบห้องพริกด้วยเครื่องอบแห้งแสงอาทิตย์แบบตัวรับพาราโบลา. ว.วิทยาศาสตร์เกษตร, 43(3), 143-146.
- กองถ่ายทอดและเผยแพร่เทคโนโลยี. คู่มือการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์. กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน: กระทรวงพลังงาน.
- กองถ่ายทอดและเผยแพร่เทคโนโลยี. 2560. การผลิตความร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์ การถ่ายทอดและการเผยแพร่การใช้พลังงานแสงอาทิตย์. กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน: กระทรวงพลังงาน.
- จตุรงค์ล้ำเลิศ, สมเกียรติ. 2553. การถ่ายเทความร้อน. คณะวิศวกรรมและอุตสาหกรรมเกษตร: มหาวิทยาลัยแม่โจ้.
- ชนวัฒน์ นิตน์วิจิตร. 2553. เครื่องสูบลมและพัดลม. คณะวิศวกรรมและอุตสาหกรรมเกษตร: มหาวิทยาลัยแม่โจ้.
- นิตยา รัตนานพนธ์ และพิมพ์เพ็ญ พรเฉลิมพงศ์. 2552. **Phase diagram/แผนภาพเฟส.** [ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา <http://www.foodnetworksolution.com> (5 กุมภาพันธ์ 2564).
- ปรรรณกิต เลิศพยัค. 2553. การออกแบบและสร้างเครื่องต้นแบบระบบอบแห้งเนื้อหมากแว่นสด. มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- ประกอบ สุรวัฒนาวรรณ และธีรภัทร หล้าบุญเรือง. 2551. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์และการออกแบบตัวรับรังสีดวงอาทิตย์แบบรางพาราโบลา. สมาคมวิศวกรรมปรับอากาศแห่งประเทศไทย, 16(1), 116-125.
- ฝนทิพย์ บุตรระมี, พอใจ พัทธนิษฐ์ธรรม และเชษฐา งามจรัส. 2565. ประสิทธิภาพของกระเจี๊ยบแดงต่อความดันโลหิตในผู้ใหญ่ในวารสาร ทางการแพทย์และสาธารณสุขไทย: การทบทวนวรรณกรรมอย่างเป็นระบบและการวิเคราะห์เมตต้า. วารสารสำนักงานป้องกันควบคุมโรคที่ 7 จังหวัดขอนแก่น, 29(1), 57-70.
- พรรณภัทร อินทฤทธ, กัมมาล กุมาร ปาวา, อรุณพร อัฐรัตน์ และพินิต ชินสร้อย. 2555. การศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิผลและผลข้างเคียงของสารสกัดกระเจี๊ยบแดงกับ simvastatin ในการลดระดับไขมันในเลือดในผู้ป่วยโรคไขมันในเลือดสูง: การวิจัยทางคลินิกระยะที่ 2. ธรรมชาติศาสตร์เวชสาร, 12(1), 506-517.

- พิทักษ์ชัย พรพันธ์. 2562. การอบแห้งผลผลิตทางการเกษตรด้วยท่อลมร้อนร่วมกับพัดลมพลังงานแสงอาทิตย์. มหาวิทยาลัยแม่โจ้.
- พิมลรัตน์ สัตโยภาส. 2563. การพัฒนาเครื่องอบแห้งผลผลิตทางการเกษตรด้วยท่อลมร้อนร่วมกับพัดลมพลังงานแสงอาทิตย์. มหาวิทยาลัยแม่โจ้.
- พืชเกษตร. 2016. เตย/ใบเตย สรรพคุณ และการปลูกเตย. [ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา <https://puechkaset.com> (7 มิถุนายน 2565).
- มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี, ฐานข้อมูลเครื่องยาสมุนไพร คณะเภสัชศาสตร์. 2551. ชิง. [ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา <https://apps.phar.ubu.ac.th/thaicrudedrug/> (7 มิถุนายน 2565).
- รัตนา เพ็งเพราะ, ภาวิณี ศิลาเกษ, สันธยา บุญรุ่ง และปกฉัตร กุศลกรรมภ. 2562. ผลของสารต้านอนุมูลอิสระและสารสกัดหยาบเนื้อมหอมร่วมกับสมุนไพรพื้นบ้านต่อการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียก่อโรคบางชนิด. วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี, 21(3), 208-224.
- โรงพยาบาลสำโรงการแพทย์. 2015. กลิ่นใบเตย หอมชื่นใจ. [ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา <http://www.samrong-hosp.com> (7 มิถุนายน 2565).
- วทันยา ลิมปพยอม, ณีภูฐา เลาทกุลจิตต์, ภรณ์ทิพย์ ดุษฎีลาวัณย และเกษรา วามะศิริ. 2557. องค์ประกอบทางเคมีและฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระของน้ำมันหอมระเหยชิง. วารสารวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 37(3), 297-312.
- วิจิตรา ภูมิสวัสดิ์. 2560. การเพิ่มประสิทธิภาพเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ด้วยรางพาราโบลา. วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 6(2), 46-56.
- ศูนย์วิจัยและพัฒนาพืชผักเขตร้อน. 2562. กระเจี๊ยบแดง. [ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา <https://www3.rdi.ku.ac.th> (7 มิถุนายน 2565).
- สำนักส่งเสริมการค้าสินค้าเกษตรและอุตสาหกรรม. 2565. สินค้าผัก ผลไม้สด แช่เย็น แช่แข็งและแห้ง. กรมส่งเสริมการค้าระหว่างประเทศ: กระทรวงพาณิชย์.
- เสริม จันทร์ฉาย. 2560. เทคโนโลยีการอบแห้งด้วยพลังงานรังสีอาทิตย์. พิมพ์ครั้งที่ 1. ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์: มหาวิทยาลัยศิลปากร.
- อนุสร นาคี. 2555. ปัจจัยของวิธีและสภาวะการอบแห้งต่อจลนพลศาสตร์และคุณภาพใบเตย. มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- อำภา สารศิริ. 2561. พลังงานไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์พลังงานสะอาดที่ไม่มีวันหมด. [ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา <https://www.mut.ac.th/research-detail-249> (20 กรกฎาคม 2564).

- Abubakar, Umaru, Kaisan, Umar, Ashok and Nanthagopal. 2018. Development And Performance Comparison of Mixed-Mode Solar Crop Dryers With And Without Thermal Storage. **Renewable Energy**,128(1), 285-298.
- Anfal Al-Hamdani, Hemanatha Jayasuriya, Pankaj B. Pathare and Zahir Al-Attabi. 2022. Drying Characteristics and Quality Analysis of Medicinal Herbs Dried by an Indirect Solar Dryer. **Foods**,11(24), 1-19.
- Aymen ELkhadraoui, Sami Kooli, Ilhem Hamdi and Abdelhamid Farhat. 2015. Experimental Investigation And Economic Evaluation Of A New Mixedmode Solar Greenhouse Dryer For Drying Of Red Pepper And Grape. **Renewable Energy**,77(1), 1-8.
- Borah, Sethi, Sarkar and Hazarika. 2015. Effect Of Drying On Texture And Color Characteristics Of Ginger And Turmeric In A Solar Biomass Integrated Dryer. **Journal of Food Process Engineering**,40(1), 1-6.
- Busarakorn Mahayothee, Thipharat Thamsala, Pramote Khuwijitjaru and Serm Janjai. 2020. Effect Of Drying Temperature and Drying Method On Drying Rate And Bioactive Compounds In Cassumunar Ginger (Zingiber Montanum). **Journal of Applied Research on Medicinal and Aromatic Plants**,18(1), 1-10.
- Carneiro Rui, Gaspar and Silva. 2017. 3D And Transient Numerical Modelling of Door Opening and Closing Processes And Its Influence On Thermal Performance Of Cold Rooms. **Applied Thermal Engineering**,113(1), 585-600.
- Chandrasekar, Senthilkumar, Kumaragurubaran and Peter Fernandes. 2018. Experimental Investigation on a Solar Dryer Integrated With Condenser Unit Of Split Air Conditioner (A/C) For Enhancing Drying Rate. **Renewable Energy**, 122(1), 375-381.
- Das Mehmet and Akpınar Ebru Kavak. 2020. Determination Of Thermal and Drying Performances Of The Solar Air Dryer With Solar Tracking System: Apple Drying Test. **Case Studies in Thermal Engineering**,21(1), 1-15.
- Derya Arslan and Mehmet Musa Özcan. 2012. Evaluation of Drying Methods with Respect to Drying Kinetics, Mineral Content, and Color Characteristics of Savory Leave. **Food Bioprocess Technol**,5(1), 983-991.

- Hamid Reza Gazor and Saeid Minaei. 2005. Influence of Temperature and Air Velocity on Drying Time and Quality Parameters of Pistachio (*Pistacia vera* L.). **Drying Technology**,23(1), 2463–2475.
- Jasinta Poonam Ekka, Krishnendu Bala, Muthukumar and Dipak Kumar Kanaujiya. 2020. Performance Analysis of a Forced Convection Mixed Mode Horizontal Solar Cabinet Dryer for Drying of Black Ginger (*Kaempferia Parviflora*) Using Two Successive Air Mass Flow Rates. **Renewable Energy**,152(1), 55-66.
- Malakar, Santanu, Arora, Vinkel Kumar and Nema Prabhat K. 2021. Design and Performance Evaluation of an Evacuated Tube Solar Dryer for Drying Garlic Clove. **Renewable Energy**,168(1), 568-580.
- Mavis Owureku-Asare, Ibok Oduro, Firibu K. Saalia, Charles Tortoe, Jonathan Ampah and Kingsly Ambrose. 2022. Drying Characteristics and Microbiological Quality Assessment of Solar-Dried Tomato. **International Journal of Food Science**,2022(1), 1-13.
- Montero, Blanco, Miranda, Rojas and Celma. 2010. Design, Construction and Performance Testing of a Solar Dryer for Agroindustrial By-Products. **Energy Conversion and Management**,51(1), 1510–1521.
- Olajire AS, Tunde-Akintunde TY and Ogunlakin GO. 2018. Drying Kinetics and Moisture Diffusivity Study of Okro Slice. **Journal of Food Processing & Technology**,9(9), 1-7.
- Pedro Cerezal Mezquita, Aldo Álvarez López and Waldo Bugueño Muñoz. 2020. Effect of Drying on Lettuce Leaves Using Indirect Solar Dryer Assisted with Photovoltaic Cells and Thermal Energy Storage. **Processes**,168(8), 1-18.
- Priti P Lad, Nitesh A Pachpor, Reshma D Ghutukade and Shital D Bhagat. 2019. Analysis of Drying Characteristics of Ginger by Different Drying Methods. **Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry**,8(6), 1998-2004.
- Ramesh Harajibhai Chaudhari, Alok Gora, V.M. Modi and Hitesh Chaudhari. 2018. Economic Analysis of Hybrid Solar Dryer for Ginger Drying. **International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences**,7(1), 2725-2731.
- Sabareesh, John Milan, Muraleedharan and Rohinikumar. 2021. Improved Solar Drying Performance by Ultrasonic Desiccant Dehumidification in Indirect Forced

- Convection Solar Drying of Ginger with Phase Change Material. *Renewable Energy*,169(1), 1280-1293.
- Sansaniwal and Kumar. 2015. Analysis of Ginger Drying Inside a Natural Convection Indirect Solar Dryer: an Experimental Study. *Journal of Mechanical Engineering and Sciences*,9(1), 1671-1685.
- Sekyere, Forson and Adam. 2016. Experimental Investigation of the Drying Characteristics of a Mixed Mode Natural Convection Solar Crop Dryer With Back Up Heater. *Renewable Energy*,92(1), 532-542.
- Shahi, Deepika Kohli, Pradeep Kumar, Mohit Tamta and Pooja Arya. 2022. Drying Kinetics and Activation Energy for Solar Drying of Ginger Slices. *Journal of Spices and Aromatic Crops*,31(1), 15-24.
- Sodha, Bansal, Kumar, Bansal, Malik. 1987. *Solar Crop Drying vol 1*, CRC Press, Boca Raton, Florida, USA.
- Suherman Suherman, Evan Eduard Susanto, Anindita Dyah Ayu and Safina De. 2021. Experimental Investigation of Ginger Drying Using Hybrid Solar Dryer. **Journal of Applied Science and Engineerin**,24(4), 553-564.
- Ullah Fahim and Kang Min. 2017. Impact of Air Flow Rate on Drying of Apples and Performance Assessment of Parabolic Trough Solar Collector. **Applied Thermal Engineering**,127(1), 275-280.
- Vijayan, Arjunan and Kumar Anil. 2016. Mathematical Modeling and Performance Analysis of Thin Layer Drying of Bitter Gourd in Sensible Storage Based Indirect Solar Dryer. **Innovative Food Science & Emerging Technologies**,36(1), 59-67.
- Waheed Deshmukh, Mahesh N. Varma, ChangKyoo Yoo and Kailas L. Wasewar. 2014. Investigation of Solar Drying of Ginger (*Zingiber officinale*): Emprical Modelling, Drying Characteristics, and Quality Study. **Chinese Journal of Engineering**,2014(1), 1-7.
- Zeynep Hazal Tekin and Mehmet Baslar. 2018. The Effect of Ultrasound-Assisted Vacuum Drying on The Drying Rate and Quality of Red Peppers. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**,123(1), 1131-1143.





ภาคผนวก





ภาคผนวก ก

บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่



สมาคมพลังงานทดแทนสู่ชุมชนแห่งประเทศไทย  
ประชุมวิชาการ  
การถ่ายเทพลังงาน  
ความร้อนและมวลในอุปกรณ์  
ด้านความร้อนและกระบวนการ  
(ครั้งที่ 22)

วันที่ 9-10 มีนาคม 2566  
ณ โรงแรม เดอะ มินทรีนี  
จังหวัดเชียงราย

การพัฒนาเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ด้วยท่อลมร้อนร่วมกับตัวรับรังสีดวงอาทิตย์แบบ  
รางพาราโบลิกสำหรับกระบวนการอบแห้งผลผลิตทางการเกษตร  
DEVELOPMENT OF HOT-AIR DUCT COMBINED WITH SOLAR  
PARABOLIC TROUGH FOR AGRI-FOODS DRYING PROCESS

ธิวพร ศิริปัญญา<sup>1</sup>

ชนวัฒน์ นันทวีจิตร<sup>1</sup>

สมเกียรติ จตุรงค์ล้ำเลิศ<sup>1</sup>

และจตุรภัทร วาฤทธิ<sup>1</sup>

<sup>1</sup> คณะวิศวกรรมและอุตสาหกรรมเกษตร

มหาวิทยาลัยแม่โจ้

\* Corresponding Author:

[n\\_chanawat@hotmail.com](mailto:n_chanawat@hotmail.com)

บทคัดย่อ

เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบพาราโบลิกที่รวมเข้ากับท่อลมร้อนร่วมกับตัวรับรังสีดวงอาทิตย์แบบรางพาราโบลิกได้รับการพัฒนาเพื่อศึกษาอุณหภูมิของท่อลมร้อน พลังงานแสงอาทิตย์ อุณหภูมิภายในตู้อบแห้ง และความชื้นของซิงเมื่อผ่านการอบที่เวลาต่าง ๆ โครงสร้างของเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ประกอบด้วย พัดลม ตู้อบแห้ง และท่อลมร้อนพร้อมกับรางพาราโบลิกสะท้อนแสงซึ่งทำหน้าที่ให้ความร้อนบริเวณใต้ผิวท่อและสะท้อนความร้อนกลับไปให้ท่อ ทดลองดำเนินการด้วยความเร็วลมที่แตกต่างกัน ได้แก่ 1, 2 และ 3 เมตรต่อวินาที เพื่ออธิบายพฤติกรรมการอบแห้งของซิง ผลการทดลองพบว่า ซิงถูกทำให้แห้งด้วยความชื้นเริ่มต้น 87.8 เปอร์เซ็นต์ความชื้นมาตรฐานเปียก จนถึงความชื้นสุดท้ายที่ต่ำกว่า 12 เปอร์เซ็นต์ความชื้นมาตรฐานเปียก ใน 7 ชั่วโมง อุณหภูมิสูงสุดของห้องอบแห้ง 55.3 องศาเซลเซียส ที่ความเร็วลม 2 เมตรต่อวินาที ด้วยค่าความเข้มแสงอาทิตย์สูงสุด 1055.3 วัตต์/ตารางเมตร และอัตราการอบแห้งสูงสุดเท่ากับ 5.27 กิโลกรัมต่อชั่วโมง

คำสำคัญ : การอบแห้งด้วยพลังงานแสงอาทิตย์, เครื่องกักเก็บอากาศร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ท่อลมร้อนร่วม, ผลิตภัณฑ์เกษตรอบแห้ง

Abstract

An indirect convection solar dryer having a hot air duct combined with a parabolic trough solar receiver was developed to study the temperature of the solar hot air duct, air temperature within the drying chamber and moisture content of ginger after drying at various times. The structure of the solar dryer consists of intake fan, drying chamber and hot air duct with parabolic reflective trough, which generates heat under the duct surface and reflects heat to the duct. The experiments were operated with air velocities of 1, 2 and 3 m/s to explain the drying behavior of ginger. The results showed that the initial moisture content of 87.8 % (wb) was reduced to 12 % (wb) in 7 h. The highest air temperature within the drying chamber was 55.3 °C at 2 m/s airflow velocity with a maximum solar radiation of 1055.3 W/m<sup>2</sup> and a maximum drying rate of 5.27 kg/h.

**Key Word:** Solar dryer, Solar air collector, Hot air duct combined, Dried agricultural product

1. บทนำ

ประเทศไทยเป็นประเทศเกษตรกรรมสามารถปลูกผลผลิตได้เป็นจำนวนมากทุกปี ทำให้ผลผลิตที่มากเกินไปประสบปัญหาผลผลิตล้นตลาด [1] การแปรรูปผลผลิตทางการเกษตรเป็นการช่วยป้องกันปัญหาผลผลิตล้นตลาด หรือผลผลิตตกเกรดไม่ให้ขนาดตามที่ถูกกำหนด การทำให้สามารถยกระดับราคาผลผลิตไม่ให้ตกต่ำ และการ

สร้างเพิ่มมูลค่าให้แก่ผลผลิตทางการเกษตร การแปรรูปผลผลิตทางการเกษตรให้เป็นผลิตภัณฑ์อาหารหรือวัตถุดิบอาหารจะทำให้สามารถขยายตลาดการส่งออกไปสู่ต่างประเทศจะช่วยให้เพิ่มพูนรายได้ให้แก่ประเทศได้เป็นอย่างดี และประเทศไทยนับเป็นประเทศที่มีการส่งออกผลผลิตทางการเกษตรรายสำคัญของโลก สำหรับผลิตภัณฑ์ทางการเกษตรแปรรูปนั้นประเทศไทยมีมูลค่าการส่งออกเท่ากับ

128,342.34 ล้านบาท ในปี พ.ศ. 2563 และมูลค่าเพิ่มขึ้น 191,457.64 ล้านบาท ในปีพ.ศ. 2564 อัตราการขยายตัวสูงถึงร้อยละ 49.18 และพบว่ามีแนวโน้มการขยายตัวเพิ่มขึ้นทุก ๆ ปี [2]

การอบแห้งผักและผลไม้ในประเทศไทยประสบปัญหาหลายประการ ส่วนใหญ่การอบแห้งโดยการตากแดดตามธรรมชาติทำให้ผลิตภัณฑ์อบแห้งที่ได้มีการปนเปื้อนจากการปนของแมลงต่าง ๆ และฝุ่นละอองที่ฟุ้งกระจายในอากาศมีผลทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ไม่ได้มาตรฐาน นอกจากนี้ในฤดูฝนทำให้ผลิตภัณฑ์เกิดการเน่าเสียไม่สามารถเก็บผลผลิตไว้ไม่ได้นาน นอกจากนี้ทำให้ผู้บริโภคอาจเจ็บป่วยจากการบริโภคสินค้าที่ไม่สะอาด และในปัจจุบันการแปรรูปผลิตภัณฑ์ทางการเกษตรจะนิยมใช้เครื่องอบแห้งแบบใช้เชื้อเพลิงน้ำมันหรือแก๊สเป็นเชื้อเพลิงซึ่งในปัจจุบันราคาเชื้อเพลิงน้ำมันหรือแก๊สมีราคาสูงทำให้ต้นทุนการผลิตสูงขึ้นและการใช้เครื่องอบแห้งดังกล่าวยังก่อให้เกิดมลพิษต่อสิ่งแวดล้อม [3] ด้วยเหตุนี้เพื่อลดค่าใช้จ่ายจากเครื่องอบแห้งที่ใช้ น้ำมันหรือแก๊สเป็นเชื้อเพลิงจึงมีการใช้พลังงานแสงอาทิตย์เป็นแหล่งพลังงานในการให้ความร้อนในกระบวนการอบแห้ง และการอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์เป็นระบบที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม

จากงานวิจัยที่ผ่านมา พิทักษ์ชัย พรพันธ์ [4] ได้สร้างเครื่องอบแห้งต้นแบบโดยใช้ทฤษฎีการอบแห้ง ทฤษฎีการพาความร้อนและกระบวนการถ่ายเทความร้อน ข้อจำกัดของเครื่องดั้งเดิมคือ ไม่สามารถควบคุมความเร็วลมได้ เซลล์แสงอาทิตย์ยกยู่การทำงานหากมีความเข้มแสงน้อยกว่า 300 วัตต์ต่อตารางเมตร และความเร็วของพัดลมขึ้นอยู่กับความเข้มแสง เนื่องจากไม่ได้ใช้แบตเตอรี่ในการเก็บพลังงานไฟฟ้าจึงทำให้ลมที่ออกมาจากพัดลมมีความไม่สม่ำเสมอ และต่อมาพิมลรัตน์ สัตย์ภัส [5] ได้การพัฒนาเครื่องอบแห้งอีกครั้งโดยเพิ่มความเสถียรในการทำงานของพัดลม โดยได้มีการเพิ่มโมดูลควบคุมความเร็วของพัดลม เปลี่ยนแผงโซลาร์เซลล์และคอนโทรลลาร์จเจอร์ แต่ข้อจำกัดของเครื่องต้นแบบที่พัฒนาแล้วคือ พื้นที่รับแสงมีขนาดเล็กอยู่ในห้องอบแห้งจะเกิดการรวมแสงของตู้กระจกทำให้ผลิตภัณฑ์เกิดการชำรุด และภายในชุดพัดลมไม่สามารถทำงานได้เต็มประสิทธิภาพ 100 เปอร์เซ็นต์ ดังนั้นเพื่อพัฒนาพื้นที่รับความร้อนจากแสงอาทิตย์ที่ส่งผลต่ออุณหภูมิในห้องอบแห้ง ประสิทธิภาพของตัวรับแสงอาทิตย์ และระยะเวลาในการอบแห้งที่นาน เพื่อปรับปรุงและเพิ่มประสิทธิภาพของตัวรับแสงอาทิตย์พบว่า การติดตั้งรางพาราโบลจากแผ่นอะลูมิเนียมสะท้อนแสงขนาด 152.4 x 121.92 ตารางเซนติเมตร [6] สามารถเพิ่มอุณหภูมิภายในห้องอบแห้งได้สูงสุด 45 °C ประสิทธิภาพตัวเก็บพลังงานแสงอาทิตย์แบบรางพาราโบลสูงเฉลี่ย 23.00 เปอร์เซ็นต์ และใช้เวลาในการอบแห้ง 9 ชั่วโมงในการอบแห้งแอปเปิ้ลที่ปริมาณความชื้น 86 เปอร์เซ็นต์ความชื้นมาตรฐานเปียก ก่อนการอบแห้งซึ่งลดลงได้ถึง 7.3 เปอร์เซ็นต์ความชื้นมาตรฐานเปียก ต่อมามีการใช้รางพาราโบลทำให้อุณหภูมิในห้องอบแห้งแบบมีรางพาราโบลเพิ่มขึ้นเป็น 50 องศาเซลเซียส ใช้เวลาในการลดความชื้น 9 ชั่วโมง [7] และมีการติดตั้งตัวรับพาราโบลสามารถทำอุณหภูมิอากาศอบแห้ง

ได้สูงสุดเท่ากับ 60 องศาเซลเซียส ใช้เวลาในการอบแห้ง 6 ชั่วโมงเมื่อเทียบกับการตากแห้งด้วยแสงอาทิตย์ที่ใช้เวลา 24 ชั่วโมง [8]

งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาและออกแบบเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ตัวต่อลมร้อนร่วมกับตัวรับรังสีดวงอาทิตย์แบบรางพาราโบลจากหลักการถ่ายเทความร้อน โดยใช้ท่อลมร้อนร่วมทำงานร่วมกับพาราโบลสะท้อนแสงให้ความร้อน เสริมด้วย พัดลมจากพลังงานแสงอาทิตย์ที่สามารถอบแห้งผลผลิตทางการเกษตรภายในระยะเวลา 7 ชั่วโมงสำหรับกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์ทางการเกษตรอบแห้งที่ประหยัดพลังงาน เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม ลดต้นทุนในการอบแห้ง และยังสามารถนำไปใช้ในถิ่นทุรกันดารที่ไม่มีไฟฟ้าเข้าถึงได้อีกด้วย

## 2. อุปกรณ์และการทดลอง

### 2.1 การคำนวณและการออกแบบ

เครื่องอบแห้งที่พัฒนาขึ้นออกแบบสำหรับกรอบแห้งผลผลิตทางการเกษตร 1.5 กิโลกรัม ที่มีความชื้นเริ่มต้น 88 เปอร์เซ็นต์ความชื้นมาตรฐานเปียก ถึงความชื้นสุดท้าย 12 เปอร์เซ็นต์ความชื้นมาตรฐานเปียก อุณหภูมิอากาศก่อนเข้าตู้อบแห้งเท่ากับ 25 องศาเซลเซียส อุณหภูมิที่ใช้ในการออกแบบเท่ากับ 50 องศาเซลเซียส ด้วยระยะเวลา 7 ชั่วโมง

การคำนวณปริมาณความร้อนสำหรับอบแห้งผลิตภัณฑ์ คือ ปริมาณความร้อนที่ต้องใช้ในการทำให้ผลิตภัณฑ์มีอุณหภูมิสูงขึ้นจากอุณหภูมิบรรยากาศไปยังอุณหภูมิที่ใช้สำหรับอบแห้ง [9] โดยปริมาณความร้อนทั้งหมดที่จำเป็นต้องใช้ในการอบแห้งจากสมการที่ 1

$$Q_{TOTAL} = Q_{SENSIBLE} + Q_{AFTHT} + Q_{OTHER} + Q_{LOSS} \dots (1)$$

โดยที่  $Q_{TOTAL}$  คือ ปริมาณความร้อนทั้งหมดที่จำเป็นต้องใช้ในการอบแห้ง (กิโลจูล),  $Q_{SENSIBLE}$  คือ ปริมาณความร้อนสัมผัสสำหรับอบแห้งผลิตภัณฑ์,  $Q_{AFTHT}$  คือ ปริมาณความร้อนแฝงสำหรับการระเหยความชื้น,  $Q_{OTHER}$  คือ ปริมาณความร้อนที่สูญเสียให้กับวัสดุต่างๆ และ  $Q_{LOSS}$  คือ ปริมาณความร้อนที่สูญเสียให้กับบรรยากาศโดยรอบ

การคำนวณหาสัมประสิทธิ์การพาความร้อนภายในท่อลมร้อน กำหนดให้การไหลของอากาศเป็นแบบพาความร้อนแบบบังคับ ลักษณะของการทำความร้อนแบบทางอ้อม (Indirect) ดังนั้นจึงพบว่าการพาความร้อนแบบบังคับในการไหลของท่อป้อนป่วนจึงต้องคำนวณหาสัมประสิทธิ์การพาความร้อนสำหรับท่อลม โดยเลือกใช้สมการ Dittus-Boelter สำหรับการไหลแบบป้อนป่วน เนื่องจากท่อที่เลือกใช้เป็นท่อกลมผิวเรียบ [10] และคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของรัศมี (h) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2

$$h = \frac{k}{D} \times N_u$$

$$\text{และ } N_u = 0.023 R_e^{0.8} P_r^n \quad \dots (2)$$

โดยที่ โดยที่  $h$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของวัตถุ (วัตถุต่อตารางเมตร-เคลวิน),  $N_u$  คือ ตัวเลขนัสเซล (Nusselt number),  $P_r$  คือ ตัวเลขพรานด์ทล (Prandtl number),  $R_e$  คือ ตัวเลขเรย์โนลด์ส (Reynolds number),  $k$  คือ สัมประสิทธิ์การนำความร้อนอากาศ (วัตถุต่อเมตร-เคลวิน)

การหาพื้นที่ระบบแลกเปลี่ยนความร้อนจากแสงอาทิตย์ของท่อลมร้อน เพื่อความเหมาะสมและความสมดุลในการวางท่อลมร้อน จึงต้องคำนวณหาพื้นที่รับความร้อนทั้งหมดภายในท่อลมร้อน โดยคำนวณจากสมการการพาความร้อนเชิงผสมการที่ 3

$$q_c = hA (T_a - T_\infty) \quad \dots (3)$$

โดยที่  $q_c$  คือ ค่าการถ่ายเทความร้อนแบบการพาความร้อน (วัตถุ),  $h$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน (วัตถุต่อตารางเมตร-เคลวิน),  $A$  คือ พื้นที่ในการรับความร้อน (ตารางเมตร),  $T_a$  คือ ค่าอุณหภูมิผิวของวัตถุ (องศาเคลวิน) และ  $T_\infty$  คือ ค่าอุณหภูมิของของไหล (องศาเคลวิน)

การหาขนาดของท่อลมร้อน ต้องคำนึงถึงการสูญเสียความเสียดทานในท่อ (Frictional Loss) เป็นผลมาจากความเสียดทานของอากาศกับผิวท่อ และความปั่นป่วนของอากาศขณะเคลื่อนที่ เกิดขึ้นตลอดความยาวของเส้นท่อ Friction Loss จะมากหรือน้อยเพียงใดนั้นขึ้นอยู่กับความเร็วของลมในท่อ ขนาดท่อ ความหยาบของผิวด้านในท่อ และความยาวของท่อ [11] การคำนวณความเสียดทานในท่อและขนาดของท่อลมด้วยวิธีความเร็วจึงที่สามารถหาได้จากสมการที่ 4

$$F = 0.0195(12L/D) P_v \quad \dots (4)$$

$$\text{และ } D = 13.54\sqrt{A}$$

โดยที่  $F$  คือ การสูญเสียความเสียดทานในท่อ (นิ้วน้ำ),  $L$  คือ ความยาวท่อ (ฟุต),  $D$  คือ ขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ (นิ้ว),  $P_v$  คือ แรงดันพลวัตในท่อ (นิ้วน้ำ) และ  $A$  คือ พื้นที่หน้าตัดของท่อ (ตารางฟุต)

## 2.2 วิธีการทดสอบการอบแห้ง

การทดสอบเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ด้วยท่อลมร้อนร่วมกับตัวรับรังสีดวงอาทิตย์แบบรางพาราโบลามีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาอุณหภูมิของท่อลมร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ อุณหภูมิภายในตู้อบแห้ง และความชื้นของชิงเมื่อผ่านการอบที่เวลาต่าง ๆ การทดสอบการอบแห้งชิงจำนวน 1.5 กิโลกรัม หันหรือขอยชิงให้มีความหนาประมาณ 3 – 4 มิลลิเมตร ดำเนินการระหว่างเวลา 9.00 น. ถึง 16.00 น. โดยมีเงื่อนไขในการอบแห้งแบบการพาความร้อนแบบบังคับ ทดลองเครื่องอบแห้งที่มีการเปลี่ยนความเร็วลม การทดลองดำเนินการด้วยความเร็ว

ลมที่แตกต่างกัน ได้แก่ 1, 2 และ 3 เมตรต่อวินาที [12] นอกจากนี้ในการทดลองได้ทำการวัดค่าต่าง ๆ ดังนี้ ความเข้มของรังสีแสงอาทิตย์ ความชื้นของบรรยากาศ ความชื้นภายในท่อลมและตู้อบแห้ง อุณหภูมิของบรรยากาศ และอุณหภูมิภายในท่อลมและตู้อบแห้งโดยทั้งช่วงระยะห่างในการเก็บข้อมูล 1 ชั่วโมงต่อครั้ง และเพื่อหาความชื้นที่สูญเสียไปในระหว่างการอบแห้ง จึงนำชิงออกมาชั่งน้ำหนักทุก ๆ 1 ชั่วโมง โดยการทดสอบจะสิ้นสุดลงเมื่อชิงมีความชื้นสุดท้ายเหลือประมาณ 12 เปอร์เซ็นต์ความชื้นมาตรฐานเปียก หลังจากผ่านกระบวนการอบแห้งแล้วโดยเครื่องอบแห้งสามารถนำไปหาความชื้นด้วยวิธีมาตรฐาน AOAC [13] ซึ่งปริมาณความชื้นของวัสดุสามารถวัดได้ตามมาตรฐาน 2 แบบคือ

ปริมาณความชื้นฐานเปียก (Wet basis) อัตราส่วนน้ำหนักของน้ำในวัสดุต่อน้ำหนักวัสดุแห้ง ซึ่งเมื่อคูณด้วย 100 จะมีค่าเป็นเปอร์เซ็นต์ แสดงดังสมการที่ 5

$$M_w = \frac{w-d}{w} \times 100 \quad \dots (5)$$

ปริมาณความชื้นมาตรฐานแห้ง (Dry basis) อัตราส่วนน้ำหนักของน้ำในวัสดุต่อน้ำหนักวัสดุแห้ง ซึ่งเมื่อคูณด้วย 100 จะมีค่าเป็นเปอร์เซ็นต์ ดังสมการที่ 6

$$M_d = \frac{w-d}{d} \times 100 \quad \dots (6)$$

อัตราการอบแห้ง (Drying rate) สัมพันธ์กับความแตกต่างของปริมาณความชื้นของวัสดุที่จะทำให้อแห้งในช่วงเวลาหนึ่งหน่วยสามารถบอกให้ทราบถึงระยะเวลาที่ใช้ในการอบแห้งหรือค่าความชื้นที่ระเหยออกไปได้ต่อหน่วยเวลา [14] โดยสามารถหาได้จากสมการที่ 7

$$D_R = \frac{M_{d1} - M_{d2}}{\Delta t} \quad \dots (7)$$

## 3. ผลการทดลองและวิจารณ์

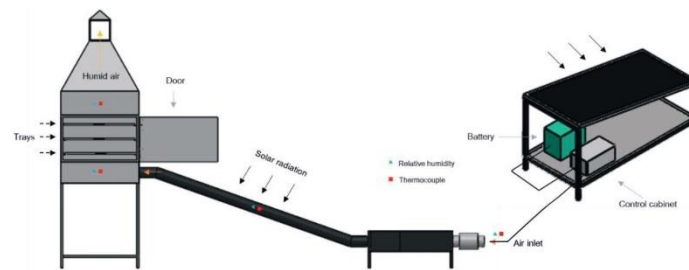
### 3.1 ผลการออกแบบและสร้างเครื่องอบแห้ง

เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ด้วยท่อลมร้อนร่วมกับตัวรับรังสีดวงอาทิตย์แบบรางพาราโบลามีหลักการทำความร้อน หลักการถ่ายเทความร้อน และหลักการทำงานของเครื่องอบแห้งพลังงานดังนี้ แสงจากดวงอาทิตย์เกิดการแผ่รังสีความร้อน (Radiation heat transfer) มาสู่เส้นท่อ เมื่อเส้นท่อได้รับความร้อนแล้วทำให้เกิดการนำความร้อน (Conduction heat transfer) จากผนังผิวด้านนอกและด้านในมาสู่อากาศภายในท่อ โดยที่การแผ่รังสีความร้อนนั้นจะเกิดอีก 2 ส่วนคือ 1) เซลล์แสงอาทิตย์ทำให้เกิดการเปลี่ยนจากพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้ากระแสตรง (Direct current) ซึ่งไฟฟ้านี้จะเป็นต้นกำลังของพัดลมที่อยู่ปลายท่อ เพื่อพัดพาอากาศเข้าสู่เส้นท่อและเคลื่อนที่ไปยังตู้อบแห้งเพื่อใช้ในการอบแห้งต่อไป กระบวนการนี้จะเรียกว่า กระบวนการพาความร้อนแบบบังคับ (Forced convection) และ 2) พาราโบลิตะท่อนแสง ทำให้เกิดการสะสมความร้อนบริเวณใต้

ผิวท่อและสะท้อนความร้อนกลับไปให้ท่อ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพทางความร้อนกับท่อ [6-7] เมื่อกระบวนการทำความร้อนเริ่มขึ้นจะแสดงลักษณะการทำงานของระบบอบแห้งดังรูปที่ 1 จากนั้นอากาศร้อนจะพาความชื้นจากตัวอย่างอบแห้งลอยขึ้นไปยังปล่องระบายความชื้น โดยความชื้นและอากาศร้อนจะถูกปล่อยทิ้งทั้งหมด

โครงสร้างและส่วนประกอบของเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ด้วยท่อลมร้อนร่วมกับตัวรับรังสีดวงอาทิตย์แบบรางพาราโบลามีทั้งหมด 3 ส่วน คือ ท่อลมร้อน ชุดพัดลม และตู้อบแห้ง โดยการออกแบบและติดตั้งของเครื่องอบแห้งแสดงดังรูปที่ 2 ติดตั้งพัดลมบริเวณทางเข้าของท่อลม เพื่อเป็นการพาลมร้อนให้ไหลตามท่อลม จึงเลือกใช้พัดลมแบบอากาศไหลตามแนวแกน (Axial flow fan) เนื่องจากพัดลมแบบนี้จะไหลขนานกับแกนของใบพัด และตั้งฉากกับระนาบการหมุนของใบพัด ดังนั้นพัดลมที่เลือกใช้คือ พัดลมทรง

กระรอก ชนิด In-Line axial flow fan ขนาด 270 ลูกบาศก์ฟุตต่อนาที 12 โวลต์ 72 วัตต์ พื้นที่ระบบแลกเปลี่ยนความร้อนจากแสงอาทิตย์ของท่อลมร้อนกำหนดใช้ท่อเหล็กกลมดำขนาด 4 นิ้ว ยาว 2 เมตร จำนวน 4 เส้น ติดตั้งพาราโบลาส่องทำจากแผ่นอลูมิเนียม (Parabolic Troughs) ขนาด 0.8 x 2.0 ตารางเมตร และปลายทางด้านหนึ่งของท่อลมเชื่อมต่อเข้ากับห้องอบแห้ง เพื่อกระจายลมร้อนเข้าไปใช้ในการอบแห้งผลิตภัณฑ์ภายในห้องอบแห้ง โดยห้องอบแห้งทำจากอลูมิเนียมขนาด 0.7 x 0.7 x 0.9 ลูกบาศก์เมตร ภายในบรรจุถาดอบแห้ง 3 ถาด ขนาด 0.69 x 0.69 ตารางเมตร สำหรับวางผลิตภัณฑ์ ถาดอบแห้งทำจากตะแกรงสแตนเลสพื้นที่ 0.47 ตารางเมตร ช่วยให้อากาศหมุนเวียนได้ดีขึ้น สามารถถอดถาดออกได้ง่ายเพื่อใส่และขนผลิตภัณฑ์อบแห้งออกทางประตู



ภาพที่ 1 ลักษณะกระบวนการทำงานของระบบอบแห้งของเครื่องอบแห้ง



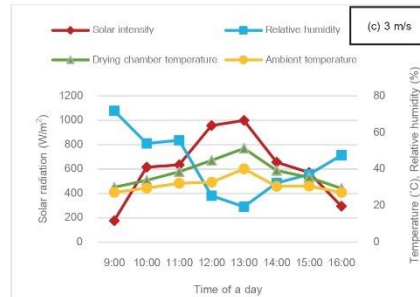
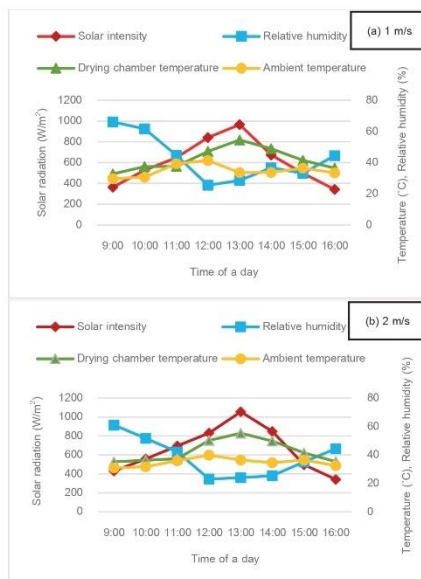
ภาพที่ 2 แบบโครงสร้างและลักษณะของระบบอบแห้ง

3.2 ผลการทดลองการอบแห้ง

จากการทดลองอบแห้งซึ่งได้รับการประเมินโดยพิจารณาความแปรผันรายชั่วโมงของการแผ่รังสีแสงอาทิตย์ ความชื้นสัมพัทธ์ อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม และอุณหภูมิห้องอบแห้ง ที่ความเร็วลมที่แตกต่างกัน

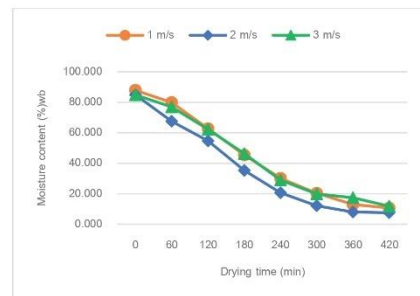
กัน ได้แก่ 1, 2 และ 3 เมตรต่อวินาที ดังแสดงในภาพ 3(a), 3(b) และ 3 (c) พบว่าอุณหภูมิสูงสุดของห้องอบแห้ง 55.3 องศาเซลเซียส ที่ความเร็วลม 2 เมตรต่อวินาที ในช่วงเวลา 13.00 น. ของวัน ซึ่งเป็นช่วงเวลาที่ความเข้มแสงดวงอาทิตย์สูงสุด 1055.3 วัตต์ต่อตาราง

เมตร และจากการสังเกตพบว่าอุณหภูมิห้องอบแห้งสูงสุด 54.6 องศาเซลเซียส ที่ความเร็วลม 1 เมตรต่อวินาที และอุณหภูมิห้องอบแห้งสูงสุด 51.3 องศาเซลเซียส ที่ความเร็วลม 3 เมตรต่อวินาที มีค่าความเข้มแสงดวงอาทิตย์สูงสุด 966.3 วัตต์/ตารางเมตร และ 999.2 วัตต์/ตารางเมตร ตามลำดับ ดังนั้นพบว่าเครื่องอบแห้งสามารถทำอุณหภูมิในตู้อบสูงสุด 53 องศาเซลเซียส ในช่วงเวลา 12.00 น. ถึง 14.00 น. ที่ความเข้มแสงดวงอาทิตย์สูงสุด 650 วัตต์ต่อตารางเมตร [15] และอุณหภูมิสูงสุดของเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์มีค่า 75-79 องศาเซลเซียส ในเวลาระหว่าง 12.00-15.00 น. และเริ่มลดลงในเวลา 16.00 น. [1] โดยอุณหภูมิห้องอบแห้งแปรผันตามค่าความเข้มแสงดวงอาทิตย์เสมอ โดยอุณหภูมิภายในห้องอบแห้งเพิ่มขึ้นเมื่อความเร็วลมเพิ่มขึ้นจาก 1 เมตรต่อวินาที เป็น 2 เมตรต่อวินาที เนื่องจากความเร็วการไหลของอากาศที่พอดีทำให้ตัวสะสมที่มีเก็บความร้อนส่งกระแสลมร้อนที่สม่ำเสมอไปยังห้องอบแห้ง



ภาพที่ 3 การแปรค่าการแผ่รังสีแสงอาทิตย์ ความชื้นสัมพัทธ์ อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม และอุณหภูมิห้องอบแห้งของการทดลองอบแห้ง

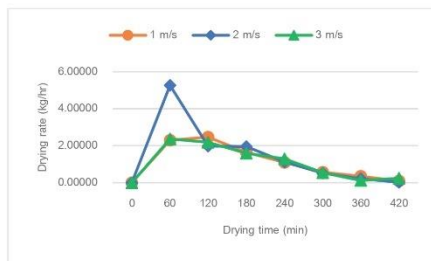
ซึ่งถูกทำให้แห้งด้วยความชื้นเริ่มต้นที่ 87.8 เปอร์เซ็นต์ ความชื้นมาตรฐานเปียก จนถึงความชื้นสุดท้ายที่ต่ำกว่า 12 เปอร์เซ็นต์ ความชื้นมาตรฐานเปียก การเปลี่ยนแปลงความชื้นของแสดงดังภาพที่ 4 จากการอบแห้งซึ่งด้วยความเร็วลม 1, 2 และ 3 เมตรต่อวินาที พบว่าความชื้นสุดท้ายลดลงเหลือขึ้นต่ำ 10.68, 7.54 และ 11.8 เปอร์เซ็นต์ความชื้นมาตรฐานเปียก ตามลำดับ โดยใช้เวลาทำให้แห้ง 420 นาที โดยการลดลงของปริมาณความชื้นมีค่าสูงขึ้นที่ความเร็วลม 2 เมตรต่อวินาที เนื่องจากท่อลมร้อนสามารถดูดซับพลังงานความร้อนในปริมาณที่มากขึ้น ทำให้พลังงานความร้อนที่ส่งไปยังห้องอบแห้งสามารถลดปริมาณความชื้นในระหว่างกระบวนการทำให้แห้งตามระยะเวลาการอบแห้งที่เพิ่มขึ้น



ภาพที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความชื้นเทียบกับเวลาในการอบแห้ง

การเปลี่ยนแปลงอัตราการอบแห้งที่ความเร็วลมต่างๆ แสดงดังภาพที่ 5 พบว่าอัตราการทำให้แห้งเริ่มต้นเท่ากับ 2.30, 5.27 และ 2.37 กิโลกรัมต่อชั่วโมง โดยอัตราการอบแห้งสูงสุดเท่ากับ 5.27

กิโกรัมต่อชั่วโมง ที่ความเร็วลม 2 เมตร/วินาที ณ เวลาทำให้แห้ง 60 นาที ตามปริมาณความร้อนที่เพิ่มขึ้นกระทำให้สามารถกำจัดความชื้นอิสระออกจากซิงได้ง่าย อัตราการอบแห้งเพิ่มขึ้นในช่วงเวลา 240 นาที และบันทึกได้ 1.10, 1.12 และ 1.29 กิโกรัมต่อชั่วโมง ที่ความเร็วลม 1, 2 และ 3 เมตร/วินาที ตามลำดับ หลังจากนั้นอัตราการอบแห้งลดลงอย่างต่อเนื่อง ในขั้นต้นอัตราการอบแห้งเพิ่มขึ้นเนื่องจากการขจัดความชื้นผลิตภัณฑ์และเริ่มลดลงเมื่อความชื้นอิสระในผลิตภัณฑ์ถูกขจัดออก และอัตราการอบแห้งต่ำสุดคือ 0.09, 0.02 และ 0.24 กิโกรัมต่อชั่วโมง ที่ความเร็วลม 1, 2 และ 3 เมตรต่อวินาทีตามลำดับ ในช่วงเวลา 480 นาที ของการทำให้แห้ง โดยผลการทดลองสอดคล้องกับ อัตราการอบแห้งสูงสุดเท่ากับ 1.56 กิโกรัมต่อชั่วโมง ที่ความเร็วลม 2 เมตรต่อวินาที ณ เวลา 12.00 น. [12] และเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์โดยใช้รางพาราโบลาที่มีอัตราการลดลงของความชื้นมากที่สุดที่อัตราการอบแห้งเฉลี่ยมีค่า 0.36 กิโกรัมต่อชั่วโมง ใช้เวลาในการลดความชื้น 9 ชั่วโมง [7]



ภาพที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการอบแห้งเทียบกับเวลาในการอบแห้ง

การศึกษาความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ของเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ด้วยท่อลมร้อนร่วมกับตัวรับรังสีดวงอาทิตย์แบบรางพาราโบลาได้พบว่า ราคาต้นทุนวัสดุสำหรับการสร้างเครื่องอบแห้ง 27,209 บาท ค่าใช้จ่ายคงที่ 72.56 บาท/กิโกรัม ค่าใช้จ่ายแปรผัน 440 บาท/กิโกรัม วิเคราะห์ต้นทุนผลตอบแทน 287.44 บาท/กิโกรัม ดังนั้น 1 ปีจะได้กำไรสุทธิ 17,246.4 บาท/ปี และระยะเวลาคืนทุน 1.6 ปี หรือ 18 เดือน

#### 4. สรุปผลการทดลอง

เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ที่ได้ออกแบบและสร้างขึ้น มีห้องอบแห้งทำจากอลูมิเนียมขนาด 0.7 x 0.7 x 0.9 ลูกบาศก์เมตร ภายในบรรจุถาดอบแห้งจำนวน 3 ถาด สำหรับวางผลิตภัณฑ์ รวมถึงเพิ่มตัวรับพลังงานแสงอาทิตย์ด้วยท่อลมร้อนขนาด 4 นิ้ว ยาว 2 เมตร ติดตั้งรางพาราโบลาสะท้อนแสงทำจากแผ่นอลูมิเนียม (Parabolic Trough) เพื่อเพิ่มอุณหภูมิให้อากาศที่ไหลผ่านท่อลมเข้าสู่ห้องอบ โดย

จากการศึกษาพบว่าเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ด้วยท่อลมร้อนร่วมกับตัวรับรังสีดวงอาทิตย์แบบรางพาราโบลาที่พัฒนาขึ้นทำงานได้ดี ที่ความเร็วลม 2 เมตร/วินาที อุณหภูมิห้องอบแห้งสูงสุดที่ทำได้คือ 55.3 องศาเซลเซียส เมื่อเปรียบเทียบกับการออกแบบพบว่าเครื่องอบแห้งมีอุณหภูมิห้องอบแห้งสูงกว่าที่ออกแบบ ที่ความเข้มแสงดวงอาทิตย์สูงสุด 1055.3 วัตต์/ตารางเมตร หลังจากนั้นพบว่าอุณหภูมิลดลงตามความเข้มของแสงอาทิตย์ที่ลดลง ความชื้นสุดท้ายของผลิตภัณฑ์ต่ำกว่า 12 เปอร์เซ็นต์ความชื้นมาตรฐานเปียก ภายในเวลาที่กำหนด 7 ชั่วโมง อัตราการอบแห้งสูงสุดของซิงคือ 5.27 กิโกรัมต่อชั่วโมง ที่ความเร็วลม 2 เมตรต่อวินาที และคืนทุนในเวลา 1.6 ปี

#### 5. กิตติกรรมประกาศ

ทีมผู้วิจัยขอขอบคุณสำนักงานคณะกรรมการส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม (สกสว.) ที่สนับสนุนทุนวิจัย

#### 6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Krissadang Sookramoon, Sanyaluck Kingtong, Jaroon Kaenchan, Setapat Chanaklang and Mananya Khamvairapitak. "Development of a direct solar powered dryer for drying cultivated banana in community scale", The Journal of Industrial Technology Suan Sunandha Rajabhat University, **2021**, 9(1), 33-43.
- [2] ศูนย์สารสนเทศการเจรจาการค้าระหว่างประเทศ. "การส่งออกสินค้าเกษตรของไทยกับประเทศคู่ FTA ไตรมาสแรกปี 2564", กรมเจรจาการค้าระหว่างประเทศ, **2564**, น. 1-10, สืบค้น 2 มิถุนายน 2565, จาก [https://api.dtn.go.th/files/\\_0.pdf](https://api.dtn.go.th/files/_0.pdf).
- [3] กองถ่ายถอดและเผยแพร่เทคโนโลยี กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. "การผลิตความร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์ การถ่ายถอดและการใช้ พลังงานแสงอาทิตย์", กระทรวงพลังงาน, **2563**, น. 21-25, สืบค้น 2 มิถุนายน 2565, จาก [http://webkc.dede.go.th/testmax/si tes/default/files/คู่มือการผลิตความร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์\\_ปก\\_0.pdf](http://webkc.dede.go.th/testmax/si tes/default/files/คู่มือการผลิตความร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์_ปก_0.pdf).
- [4] พิทักษ์ชัย พรพันธ์. "การอบแห้งผลผลิตทางการเกษตรด้วยท่อลมร้อนร่วมกับพัดลมพลังงานแสงอาทิตย์". วิทยานิพนธ์. **2562**. มหาวิทยาลัยแม่โจ้, เชียงใหม่.
- [5] พิมพ์รัตน์ สัตโยภาส. "การอบแห้งผลผลิตทางการเกษตรด้วยท่อลมร้อนร่วมกับพัดลมพลังงานแสงอาทิตย์". วิทยานิพนธ์. **2563**. มหาวิทยาลัยแม่โจ้, เชียงใหม่.
- [6] Ullah Fahim and Kang Min. "Impact of air flow rate on drying of apples and performance assessment of parabolic trough solar collector", Applied Thermal Engineering, **2017**, 127, 275-280.



- [7] วิจิตรา ภูมิสวัสดิ์. "การเพิ่มประสิทธิภาพเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ด้วยรางพาราโบลา", วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2560, 6(2), 46-56.
- [8] กระวี ตรีอำนาจ, เทวรัตน์ ทิพย์วิมล, ชรินทร์ จิตรเจริญ และดวงพร วงษ์วิวัฒน์พงษ์. "การอบแห้งพริกด้วยเครื่องอบแห้งแสงอาทิตย์แบบตัวรับพาราโบลา", ว.วิทยาศาสตร์เกษตร, 2555, 43(3), 143-146.
- [9] ประณกิต เลิศพิชัย. "การออกแบบและสร้างเครื่องต้นแบบระบบอบแห้งเนื้อหมากแ้วนสด". วิทยานิพนธ์. 2553. มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์, สงขลา.
- [10] สมเกียรติ จรุงศ์ล้ำเลิศ. "การถ่ายเทความร้อน", คณะวิศวกรรมและอุตสาหกรรมเกษตร, มหาวิทยาลัยแม่โจ้, 2553.
- [11] ชนวัฒน์ นันทน์วิจิตร. "เครื่องสูบลมและพัดลม", คณะวิศวกรรมและอุตสาหกรรมเกษตร, มหาวิทยาลัยแม่โจ้, 2553.
- [12] Santanu Malakar, Vinkel Kumar Arora and Prabhat K.Nema. "Design and performance evaluation of an evacuated tube solar dryer for drying garlic clove", Renewable Energy, 2021, 168, 568-580.
- [13] Ahmad Fudholi, Kamaruzzaman Sopian, Mohammad H. Yazdi, Mohd Hafidz Ruslan, Mohamed Gabbasa and Hussein A. Kazem. "Performance analysis of solar drying system for red chili", Solar Energy, 2014, 99, 47-54.
- [14] E. Kavak Akpinar. "Mathematical modelling of thin layer drying process under open sun of some aromatic plants", Journal of Food Engineering, 2006, 77 (4), 864-870.
- [15] ยุทธชัย เกียรติสันเทียะ. "การออกแบบและทดสอบตู้อบกล้วยพลังงานแสงอาทิตย์ชนิดพาสซีฟ", วารสารมหาวิทยาลัยวงษ์ชวลิตกุล, 2564, 34(1), 60-74.

## ประวัติผู้วิจัย

ชื่อ-สกุล	ธิดาพร ศิริปัญญา
เกิดเมื่อ	21 เมษายน 2541
ประวัติการศึกษา	พ.ศ. 2556 สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนต้น โรงเรียนพร้าววิทยาคม เชียงใหม่
	พ.ศ. 2559 สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนปลาย โรงเรียนพร้าววิทยาคม เชียงใหม่
	พ.ศ. 2563 สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี ปริญญาวิศวกรรม ศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมอาหาร มหาวิทยาลัยแม่ โจ้ เชียงใหม่

