

M 121523



๒๒ 123073

รายงานการวิจัย
เรื่อง

การออกแบบและสร้างเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบอุโมงค์ลมสำหรับ
อบแห้งพริกแดง

Design and Construction a Solar Tunnel dryer for
Red Chilli Drying



ธานินทร์ รัชโพธิ์
พงศธร กองแก้ว
มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม
RAJABHAT MAHASARAKHAM UNIVERSITY

มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม
2558

๒๒/๑๑/๒๕๕๘

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม

งานวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนจากสถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม ปีงบประมาณ 2557

สำนักวิทยบริการฯ มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม
รับรับ..... 15 พ.ค. 2560
วันลงทะเบียน..... ๑๙, 249783
เลขทะเบียน..... ๒๕๕๘
เลขเรียกหนังสือ..... ๒๒๑.402๒ ๒๕๕๓ก

2558

๒๒.๒

กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยเรื่อง การออกแบบและสร้างเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบอุโมงค์ลม สำหรับอบแห้งพริกแดง สำเร็จลงได้ด้วยดี เนื่องจากได้รับความอนุเคราะห์จากมหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม ที่ให้ทุนสนับสนุนโครงการวิจัยจนสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ขอขอบพระคุณสาขาวิชาฟิสิกส์และฟิสิกส์ประยุกต์ที่ให้การสนับสนุนด้านเครื่องมืออุปกรณ์สำหรับการทำวิจัยในครั้งนี้

ขอขอบพระคุณ คณาจารย์ประจำภาควิชาฟิสิกส์ทุกท่าน รวมทั้งเจ้าหน้าที่สาขาวิชาฟิสิกส์มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม ที่ให้คำแนะนำ และให้ความช่วยเหลือในการทำวิจัยครั้งนี้

ขอขอบพระคุณ บิตามารดาและญาติพี่น้อง ซึ่งเป็นกำลังใจที่สำคัญยิ่งสำหรับการทำการศึกษาวิจัยนี้ คุณค่าอันพึงมี คุณงามความดี และคุณประโยชน์ของโครงการวิจัยนี้ ขอมอบเป็นกตัญญู กตเวทิตาแด่คุณบิดา มารดา อาจารย์ อีกทั้งผู้มีพระคุณทุกท่าน

คณะผู้วิจัย
2558



มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม
RAJABHAT MAHASARAKHAM UNIVERSITY

เรื่อง	การออกแบบและสร้างเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบอุโมงค์ลม สำหรับอบแห้งพริกแดง
ผู้ดำเนินการวิจัย	นายธานินทร์ รัชโพธิ์ นายพงศธร กองแก้ว
หน่วยงาน	สาขาวิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม
ปีที่พิมพ์	2558

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบและสร้างเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบอุโมงค์ลมสำหรับอบแห้งพริกแดง โดยใช้ทฤษฎีเป็นวัสดุก็เก็บความร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ ติดครีบริบายความร้อนด้านล่างแผงรับรังสีอาทิตย์ ศึกษาประสิทธิภาพและสมการอบแห้งชั้นบางของการอบแห้งพริกแดงด้วยเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบอุโมงค์ลม ความชื้นเริ่มต้นของพริกแดงประมาณ 280 เปอร์เซ็นต์มาตรฐานแห้ง อบแห้งจนพริกแดงเหลือความชื้นสุดท้ายประมาณ 14 เปอร์เซ็นต์มาตรฐานแห้ง ในการศึกษาสมการอบแห้งชั้นบางจะใช้รูปแบบสมการของ Henderson, Logarithmic, Two term, Page และ Lewis

จากการออกแบบและสร้างเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบอุโมงค์ลม พบว่า ห้องอบแห้งมีพื้นที่ประมาณ 2.4 ตารางเมตร โดยมีความกว้าง 1.5 เมตร ยาว 1.6 เมตร และตัวเก็บรังสีอาทิตย์มีพื้นที่เท่ากับ 1.6 ตารางเมตร โดยมีขนาดความ กว้าง 1.50 เมตร ยาว 1.06 เมตร สำหรับการประเมินประสิทธิภาพเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบอุโมงค์ลม โดยพิจารณาจากประสิทธิภาพตัวเก็บรังสีอาทิตย์ ประสิทธิภาพเชิงความร้อน และอัตราการอบแห้ง พบว่า ประสิทธิภาพตัวเก็บรังสีอาทิตย์เฉลี่ยเท่ากับ 29.53 เปอร์เซ็นต์ ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของระบบอบแห้งเท่ากับ 12.4 เปอร์เซ็นต์ อัตราการอบแห้งเท่ากับ 0.57 กิโลกรัมต่อชั่วโมง สำหรับการศึกษาสมการอบแห้ง พบว่า สมการของ Page สามารถทำนายค่าความชื้นในแต่ละเวลาได้ดีที่สุดโดยให้ค่า R^2 มากและค่า χ^2 น้อยที่สุด

Research Title	Design and construction a solar tunnel dryer for Red chilli drying
Authors	Mr. Thanin Rudchapo Mr. Pongsathorn khongkeaw
Department	Department of Physics , faculty of science and technology Rajabhat Mahasarakham University
Year	2015

ABSTRACT

The objective of this research was to investigate design and construct solar tunnel dryer. The used of sand for solar thermal energy storage and install the fin for heat transfer under solar thermal absorb plate. Study performance and thin layer drying equation of drying red chilli with solar tunnel dryer. The initial moisture content of red chilli was about 280 % dry basis. The drying of red chilli until the moisture content down to 14 % dry basis. In study of thin layer drying equation will used format of Henderson, Logarithmic, Two term, Page and Lewis.

From the design and construct solar tunnel dryer, it was found that drying chamber area 2.4 m^2 which 1.5 m width , 1.6 m length and solar collector area 1.6 m^2 which had 1.5 m width , 1.06 m length. For efficiency evaluation of solar tunnel dryer by considering solar collector efficiency (η_c) , drying thermal efficiency (η_{th}) and drying rate, it was found that solar collector efficiency was 29.53 % and thermal efficiency of the drying system was 12.4%. The drying rate of drying was 0.57 kg/hr. The thin layer drying equation, it found that the best fit for chilli was Page's model which gave the highest coefficient of determination (R^2) and the lowest chi-square (χ^2)

สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	ก
บทคัดย่อภาษาไทย	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	จ
สารบัญภาพ	ฉ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	2
1.3 ขอบเขตการวิจัย	2
1.4 คำจำกัดความที่ใช้ในงานวิจัย/(นิยามศัพท์เฉพาะ)	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
บทที่ 2 แนวคิด ทฤษฎี เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 การอบแห้ง	4
2.2 การอบแห้งด้วยแสงอาทิตย์	7
2.3 ทราย	16
2.4 สมการอบแห้ง	17
2.5 พริก	19
2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	20
2.7 แนวทางในการออกแบบและสร้างเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ แบบอุโมงค์ลมสำหรับอบแห้งพริกแดง	24
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย	25
3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย	25
3.2 วิธีดำเนินการวิจัย	26
3.2.1 ตอนที่ 1 ออกแบบและสร้างเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ แบบอุโมงค์ลมสำหรับอบแห้งพริกแดง	26

3.2.2	ตอนที่ 2 ศึกษาสมรรถนะเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ แบบอุโมงค์ลมสำหรับอบแห้งพริกแดง	27
3.2.3	ตอนที่ 3 ศึกษาสมการอบแห้งชั้นบาง	28
บทที่ 4	ผลการวิจัยและวิเคราะห์ข้อมูล	30
4.1	ผลการออกแบบเครื่องอบแห้งและสร้างเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ แบบอุโมงค์ลมสำหรับอบแห้งพริกแดง	30
4.1.1	ตัวเก็บรังสีดวงอาทิตย์แบบลูกฟูกลอนเล็ก	30
4.1.2	ห้องอบแห้ง	31
4.1.3	เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบอุโมงค์ลม	32
4.2	ผลการศึกษาสมรรถนะเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบอุโมงค์ลม สำหรับอบแห้งพริกแดง	33
4.2.1	การศึกษาประสิทธิภาพตัวเก็บรังสีอาทิตย์	33
4.2.2	ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของระบบอบแห้ง	37
4.2.3	อัตราการอบแห้ง	39
4.3	ผลการศึกษาสมการอบแห้งชั้นบาง	39
4.3.1	การหาความชื้นสมดุล	39
4.3.2	การวิเคราะห์หาสมการอบแห้งชั้นบางที่เหมาะสมที่สุด	40
บทที่ 5	สรุปผลการวิจัย อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ	43
5.1	สรุปผลการวิจัย	43
5.2	อภิปรายผล	44
5.3	ข้อเสนอแนะ	44
บรรณานุกรม	45
	บรรณานุกรมภาษาไทย	46
	บรรณานุกรมภาษาต่างประเทศ	48
ภาคผนวก	49
	ภาคผนวก ก	50
	ภาคผนวก ข	58
	ภาคผนวก ค	61

หน้า

ภาคผนวก ง	65
ภาคผนวก จ	68
ภาคผนวก ฉ	76
ภาคผนวก ช	80
ภาคผนวก ซ	85
ประวัติผู้วิจัย	89



มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม
RAJABHAT MAHASARAKHAM UNIVERSITY

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ตารางเปรียบเทียบการใช้การอบแห้งด้วยแสงอาทิตย์และแหล่งความร้อน เชื้อเพลิงอื่น	7
4.1 ค่าความแตกต่างอุณหภูมิทางเข้าและทางออก ($T_{Out} - T_{In}$) ตัวเก็บรังสีอาทิตย์ ความเข้มรังสีอาทิตย์ (G_p) และประสิทธิภาพของแผงรับรังสีอาทิตย์ (%Eff) เฉลี่ย ของแต่ละวันในการทดลอง	36
4.2 ผลการวิเคราะห์การถดถอยแบบไม่เป็นเชิงเส้นเพื่อหาค่าคงที่ของสมการ อบแห้ง	41
4.3 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติโดยใช้ค่า R^2 และ χ^2	41
ก-1 แสดงค่ามวล ค่าความชื้นและอัตราส่วนความชื้นของพริกแดงที่เปลี่ยนแปลง เมื่ออบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบอุโมงค์ลม (วันที่ 13 มิถุนายน 2558)	51
ก-2 แสดงค่ามวล ค่าความชื้นและอัตราส่วนความชื้นของพริกแดงที่เปลี่ยนแปลง เมื่ออบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบอุโมงค์ลม (วันที่ 14 มิถุนายน 2558)	52
ก-3 แสดงค่ามวลและค่าความชื้นของพริกแดงตากแดด (วันที่ 13 มิถุนายน 2558)	53
ก-4 แสดงค่ามวลและค่าความชื้นของพริกแดงตากแดด (วันที่ 14 มิถุนายน 2558)	54
ก-5 แสดงค่ามวลและค่าความชื้นของพริกแดงตากแดด (วันที่ 15 มิถุนายน 2558)	55
ก-6 แสดงค่ามวลและค่าความชื้นของพริกแดงตากแดด (วันที่ 16 มิถุนายน 2558)	56
ก-7 แสดงค่ามวลและค่าความชื้นของพริกแดงตากแดด (วันที่ 17 มิถุนายน 2558)	57
ข-1 อุณหภูมิในห้องอบแห้ง อุณหภูมิแวดล้อม และความเข้มรังสีอาทิตย์ (วันที่ 13 มิถุนายน 2558)	59
ข-2 อุณหภูมิในห้องอบแห้ง อุณหภูมิแวดล้อม และความเข้มรังสีอาทิตย์ (วันที่ 14 มิถุนายน 2558)	60
ค-1 อุณหภูมิทางเข้า-ออก แผงรับรังสีอาทิตย์ ความเข้มรังสีอาทิตย์และประสิทธิภาพ ตัวรับรังสีอาทิตย์ ตั้งแต่เวลา 09.00 น.-15.00 น. (วันที่ 13 มิถุนายน 2558)	62
ค-2 อุณหภูมิทางเข้า-ออก แผงรับรังสีอาทิตย์ ความเข้มรังสีอาทิตย์และประสิทธิภาพ ตัวรับรังสีอาทิตย์ ตั้งแต่เวลา 09.00 น.-15.00 น. (วันที่ 14 มิถุนายน 2558)	63

- ค-3 อุณหภูมิทางเข้า-ออก แผงรับรังสีอาทิตย์ ความเข้มรังสีอาทิตย์และประสิทธิภาพ
ตัวรับรังสีอาทิตย์ ตั้งแต่เวลา 09.00 น.-15.00 น. (วันที่ 15 มิถุนายน 2558) 64



มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม
RAJABHAT MAHASARAKHAM UNIVERSITY

สารบัญภาพ

ภาพที่

หน้า

2.1 แสดงพลังงานของดวงอาทิตย์นอกโลกและที่กระทบบนพื้นโลกที่ ความยาวคลื่นต่างๆ	8
2.2 แสดงการอบแห้งแบบ Passive แบบต่างๆ	9
2.3 การตากแห้งด้วยแสงอาทิตย์แบบธรรมชาติ	10
2.4 เครื่องอบแห้งแบบรับแสงอาทิตย์โดยตรงชนิดตู้	11
2.5 เครื่องอบแห้งแบบรับแสงอาทิตย์โดยตรง ชนิดอุโมงค์หลังคาโค้ง	11
2.6 เครื่องอบแห้งแบบใช้แผงรับแสงอาทิตย์ (Indirect)	12
2.7 เครื่องอบแห้งแสงอาทิตย์แบบผสม	12
2.8 เครื่องอบแห้งแบบใช้แผงรับความร้อนโดยใช้พัดลมดูดอากาศร้อนเพื่อลด ความชื้นของผลิตภัณฑ์	13
2.9 เครื่องอบแห้งแบบอุโมงค์โดยใช้เซลล์แสงอาทิตย์เป็นพลังงานขับพัดลม	13
2.10 เครื่องอบแห้งแบบอุโมงค์แบบแผงรับแสงอาทิตย์	13
2.11 ตู้อบพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับหัวเผาความร้อน	14
2.12 ตู้อบพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับชีวมวล	14
2.13 ตู้อบพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมฮีตเตอร์ไฟฟ้า	14
3.1 ตำแหน่งการวัดอุณหภูมิภายในห้องอบแห้ง	27
4.1 ภาคตัดขวางโครงสร้างและส่วนประกอบของตัวเก็บรังสีอาทิตย์	31
4.2 ภาคตัดขวางโครงสร้างและส่วนประกอบของห้องอบแห้ง	32
4.3 โครงสร้างเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบอุโมงค์ลม	32
4.4 กราฟอุณหภูมิแวดล้อม (T_{En}) อุณหภูมิทางเข้า (T_{InC}) และทางออก (T_{OutC}) ของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ และความเข้มรังสีอาทิตย์ (G_T) เทียบกับเวลา (13 มิถุนายน 2558)	33
4.5 กราฟอุณหภูมิแวดล้อม (T_{En}) อุณหภูมิทางเข้า (T_{InC}) และทางออก (T_{OutC}) ของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ และความเข้มรังสีอาทิตย์ (G_T) เทียบกับเวลา (14 มิถุนายน 2558)	34
4.6 กราฟอุณหภูมิแวดล้อม (T_{En}) อุณหภูมิทางเข้า (T_{In}) และทางออก (T_{Out}) ของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ และความเข้มรังสีอาทิตย์ (G_T) เทียบกับเวลา (15 มิถุนายน 2558)	34
4.7 กราฟความเข้มรังสีอาทิตย์ (G_T) และประสิทธิภาพของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ (%Eff) เทียบกับเวลา (13 มิถุนายน 2558)	35

ภาพที่

หน้า

4.8 กราฟความเข้มรังสีอาทิตย์ (G_T) และประสิทธิภาพของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ (%Eff) เทียบกับเวลา (14 มิถุนายน 2558)	35
4.9 กราฟความเข้มรังสีอาทิตย์ (G_T) และประสิทธิภาพของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ (%Eff) เทียบกับเวลา (13 มิถุนายน 2558)	36
4.10 กราฟอุณหภูมิทางเข้า (T_{In}) อุณหภูมิตรงกลาง (T_{Mid}) และอุณหภูมิทางออก (T_{Out}) ห้องอบแห้ง อุณหภูมิแวดล้อม (T_{En}) และความเข้มรังสีแสงอาทิตย์ (G_T) เทียบกับเวลา (13 มิถุนายน 2558)	37
4.11 กราฟอุณหภูมิทางเข้า (T_{In}) อุณหภูมิตรงกลาง (T_{Mid}) และอุณหภูมิทางออก (T_{Out}) ห้องอบแห้ง อุณหภูมิแวดล้อม (T_{En}) และความเข้มรังสีแสงอาทิตย์ (G_T) เทียบกับเวลา (14 มิถุนายน 2558)	38
4.12 กราฟความชื้นที่ลดลงในแต่ละเวลาการอบแห้งเทียบกับการตากแดด	39
4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นจากผลการทำนายของสมการ Page เปรียบเทียบกับการทดลอง	42
ง-1 เครื่องชั่งน้ำหนักความละเอียด 0.0001 กรัม	66
ง-2 ตู้อบไฟฟ้าที่ใช้สำหรับหาความชื้น	67
จ-1 Nonlinear Regression	69
จ-2 Parameters	70
จ-3 Loss Function	71
จ-4 Parameter Constraints	71
จ-5 Save new variables	72
จ-6 Option : Sequential quadratic programming	72
จ-7 Option : Levenberg-Marquardt	73
ช-1 เครื่องวัดความเร็วลม (Anemometer)	81
ช-2 เครื่องชั่งน้ำหนักแบบดิจิทัลความละเอียด 0.01 กรัม	81
ช-3 แบริดเตอร์	82
ช-4 เซลล์แสงอาทิตย์	82
ช-5 เครื่องคอมพิวเตอร์	83
ช-6 เครื่องบันทึกข้อมูลอุณหภูมิ (data logger)	83
ช-7 ไพรานอมิเตอร์	84
ช-1 ภาพรวมของเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบอุโมงค์ลม	86
ช-2 ทางออกลมร้อนของเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบอุโมงค์ลม	86
ช-3 การติดตั้งพัดลมของเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบอุโมงค์ลม	87

ภาพที่

หน้า

ช-4 การอบแห้งพริกแดงด้วยเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบอุโมงค์ลม	87
ช-5 การตากแดดพริกแดง	88



มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม
RAJABHAT MAHASARAKHAM UNIVERSITY

บทที่ 1

บทหน้า

1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา

พริก เป็นพืชในตระกูล Solanaceae มีชื่อทางวิทยาศาสตร์ว่า *Capsicum frutescens* L. เป็นเครื่องเทศที่มีความสำคัญทางเศรษฐกิจชนิดหนึ่ง และมีความสัมพันธ์ต่อความเป็นอยู่ของชาวไทย เป็นเวลาช้านาน เนื่องจากคนไทยนิยมรับประทานอาหารรสเผ็ด พริกจึงเป็นส่วนประกอบของอาหารไทยหลายๆ ชนิด นอกจากนี้ยังใช้เป็นยาสมุนไพรได้อีกด้วย โดยช่วยรักษาโรคหืด กลาก ลดอาการปวด บวมเนื่องจากถูกความเย็นจัด สำหรับการปลูกพริกในจังหวัดมหาสารคาม จะเป็นการปลูกเพื่อบริโภค ในครัวเรือน เมื่อเหลือบริโภคก็จะนำไปขายและแปรรูปเป็นพริกแห้ง ซึ่งเป็นการลดความชื้นของพริก เพื่อที่จะสามารถเก็บรักษาไว้ได้นาน สร้างมูลค่าเพิ่มให้แก่พริก และบริโภคในยามขาดแคลน

วิธีการที่ชาวบ้านใช้สำหรับลดความชื้นของพริกก็คือ การตากแดด ซึ่งการตากแดดเป็นวิธีการลดความชื้นที่ชาวบ้านใช้กันมาแต่ดั้งเดิม สามารถลดความชื้นของพริกจนถึงระดับที่สามารถระงับการเจริญเติบโตของเชื้อจุลินทรีย์ได้ คือ มีค่าวอเตอร์แอกทิวิตี (Water activity, a_w) ต่ำกว่า 0.70 ทำให้เก็บพริกไว้ได้นาน และลดน้ำหนักของพริกทำให้สะดวกในการบรรจุเก็บรักษาและขนส่ง สำหรับการลดความชื้นด้วยการตากแดดนี้เป็นวิธีการที่ประหยัดพลังงาน ค่าใช้จ่ายในการดำเนินการต่ำ แต่กระบวนการก็ใช้เวลาค่อนข้างนาน และพริกมีฝุ่นละอองปนเปื้อน ทำให้มีผลต่อคุณภาพของพริกได้ สำหรับกระบวนการลดความชื้นของพริกที่น่าสนใจอีกวิธีหนึ่งที่สามารถแก้ปัญหาเรื่องดังกล่าวได้อย่างเหมาะสม ก็คือการใช้เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบอูโมงค์ลม ซึ่งผลิตภัณฑ์ที่อยู่ในเครื่องอบ จะได้รับความร้อนทั้งจากรังสีดวงอาทิตย์ที่ตกกระทบโดยตรงและความร้อนจากแผงรับรังสีดวงอาทิตย์ ทำให้ใช้เวลาในการอบแห้งผลิตภัณฑ์เร็วขึ้น ไม่ถูกรบกวนจากฝุ่นละออง แมลงหรือเปียกฝน และสามารถประหยัดพลังงานในการอบแห้งเพราะจะใช้พลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานในการอบแห้ง เนื่องจากเป็นพลังงานที่ไม่ต้องลงทุน เป็นพลังงานสะอาด ซึ่งพลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์ก็เพียงพอที่จะทำให้ผลผลิตทางการเกษตรมีความชื้นหลังการอบแห้งพอเหมาะในการเก็บรักษาอยู่แล้ว ลักษณะภูมิประเทศของประเทศไทยตั้งอยู่ในเขตร้อนซึ่งได้รับพลังงานแสงอาทิตย์ค่อนข้างสูงตลอดทั้งปี การใช้เครื่องอบแห้งที่ใช้พลังงานแสงอาทิตย์จึงนับเป็นการแก้ไขปัญหาการอบแห้งที่มีความเป็นไปได้ค่อนข้างสูง พลังงานแสงอาทิตย์นั้นเป็นพลังงานทดแทนอย่างหนึ่งที่ได้รับจากธรรมชาติ ซึ่งถือได้ว่าพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานที่ไม่ก่อให้เกิดมลพิษใดๆ และเป็นพลังงานที่ยังสามารถใช้งานหมุนเวียนได้อีกมากมาย โดยถ้ามีการใช้พลังงานแสงอาทิตย์มาพัฒนาเครื่องอบแห้งมากขึ้นก็ถือได้ว่าคุ้มค่าต่อค่าใช้จ่ายต้นทุนการทำงานในอนาคตอีกมากมาย

สมการอบแห้งอบแห้งชิ้นบางเป็นสมการอบแห้งที่สามารถทำนายอัตราการอบแห้งได้ดี การประยุกต์ใช้สมการอบแห้งชิ้นบางเพื่อทำนายและติดตามการเปลี่ยนแปลงปริมาณความชื้นของพริก ชื้นแห้ง ซึ่งสมการที่เหมาะสมจะสามารถทำนายค่าความชื้นในแต่ละเวลาระหว่างการอบแห้งได้อย่าง

เหมาะสม ทำให้ทราบเวลาสิ้นสุดการอบแห้งได้ซึ่งจะช่วยลดปัญหาการเสื่อมเสียของคุณภาพเนื่องจากการอบแห้งที่ใช้เวลานานเกินไป และลดค่าใช้จ่ายด้านพลังงานลง

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบอุโมงค์ลมสำหรับอบแห้งพริกชี้หนูแดง โดยใช้ทรายเป็นวัสดุสะสมความร้อน ติดตั้งครีบบระบายความร้อนด้านล่าง แผงรับรังสีดวงอาทิตย์ ประเมินประสิทธิภาพทางความร้อนของเครื่องอบแห้ง และศึกษาสมการอบแห้งชั้นบางของการอบแห้งพริกแดงด้วยเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบอุโมงค์ลม

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 เพื่อออกแบบและสร้างเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบอุโมงค์ลมสำหรับอบแห้งพริกแดง

1.2.2 เพื่อศึกษาประสิทธิภาพเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบอุโมงค์ลมสำหรับอบแห้งพริกแดง

1.2.3 เพื่อศึกษาสมการอบแห้งชั้นบาง สำหรับทำนายค่าความชื้นในแต่ละเวลาการอบแห้งพริกแดงด้วยเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบอุโมงค์ลม

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1.3.1 ใช้แผงรับแสงอาทิตย์ในการแปลงพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานความร้อนที่ใช้ในการอบแห้งผลิตผลทางการเกษตร โดยใช้พริกแดงเป็นผลิตผลทางการเกษตรในการวิจัย

1.3.2 ใช้เซลล์แสงอาทิตย์ ทำหน้าที่รับพลังงานแสงจากดวงอาทิตย์ และเปลี่ยนเป็นพลังงานไฟฟ้าในการจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับชุดพัดลมในการพาความร้อนสู่ผลิตภัณฑ์ภายในเครื่องอบแห้ง

1.3.3 พัฒนาเครื่องอบแห้ง ทดลองและเก็บข้อมูล โดยใช้สถานที่ตลาดฟ้าศูนย์วิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม

1.3.4 ประเมินประสิทธิภาพเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์สำหรับอบแห้งพริกแดง โดยศึกษาประสิทธิภาพตัวเก็บรังสีอาทิตย์ ประสิทธิภาพเชิงความร้อน และอัตราการอบแห้ง

1.3.5 ทำการอบแห้งเวลา 9.00 น. ถึง เวลา 15.00 น.

1.3.6 อบแห้งพริกชี้หนูแดง ครั้งละ 10 กิโลกรัม จนเหลือความชื้นสุดท้าย 14% มาตรฐานแห้ง (มาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชนเลขที่ มกษ 3001/2553)

1.3.7 ติดตั้งครีบบระบายความร้อนด้านล่างแผ่นรับรังสีอาทิตย์

1.3.8 ใช้ทรายเป็นวัสดุกักเก็บความร้อนภายในเครื่องอบแห้ง

1.3.9 การไหลของอากาศภายในเครื่องอบแห้งจะเป็นแบบไหลผ่านทั้งด้านบนและด้านล่างของแผงรับรังสีดวงอาทิตย์

1.3.10 ในการศึกษาสมการอบแห้งชั้นบาง จะใช้รูปแบบสมการของ Henderson, Logarithmic, Two term, Page และ Lewis

1.4 คำจำกัดความที่ใช้ในงานวิจัย (นิยามศัพท์เฉพาะ)

1.4.1 สมการอบแห้งชั้นบาง คือ สมการทางคณิตศาสตร์ที่สามารถอธิบายกลไกการอบแห้งวัสดุเพียงหนึ่งชั้นหรือเมล็ดพืชชั้นบางเท่านั้น

1.4.2 ตัวเก็บรังสีอาทิตย์ คือ บริเวณที่รับรังสีแสงอาทิตย์แล้วเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อนสำหรับการอบแห้ง

1.4.3 เซลล์แสงอาทิตย์ คือ อุปกรณ์ที่เปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้า

1.4.4 วัสดุกักเก็บความร้อน คือ วัสดุที่สามารถกักเก็บความร้อนได้ดี

1.4.5 ความชื้นในวัสดุ เป็นตัวบอกปริมาณของน้ำที่มีอยู่ในวัสดุ เมื่อเทียบกับมวลของวัสดุชั้นหรือแห้ง

1.4.6 ความชื้นสมดุลของวัสดุ คือ ความชื้นของวัสดุจะลดต่ำลงจนถึงจุดๆ หนึ่งซึ่งไม่เปลี่ยนแปลง

1.4.7 อัตราการอบแห้ง คือ ปริมาณความชื้นที่เปลี่ยนแปลงต่อเวลาการอบแห้ง

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 เป็นแนวทางในการพัฒนาการออกแบบและสร้างเครื่องอบแห้งผลผลิตทางการเกษตรที่ใช้พลังงานแสงอาทิตย์

1.4.2 ทำให้ทราบถึงประสิทธิภาพเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์สำหรับอบแห้งพริกชี้หนูแดง

1.4.3 สามารถสร้างมูลค่าเพิ่มให้ผลิตภัณฑ์ และได้ผลิตภัณฑ์ที่สะอาดถูกหลักอนามัยรวมทั้งสอดคล้องกับความต้องการของผู้บริโภค

1.4.4 ได้สมการอบแห้งชั้นบางสำหรับทำนายค่าความชื้นในแต่ละเวลาการอบแห้งพริกชี้หนูแดงด้วยเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบอุโมงค์ลม

บทที่ 2

ทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการออกแบบและสร้างเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบอุโมงค์ลมสำหรับอบแห้งพริกแดง โดยผู้วิจัยได้ศึกษาค้นคว้าเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง เพื่อเป็นข้อมูลในการวิจัยสรุปสาระสำคัญตามหัวข้อดังนี้

2.1 การอบแห้ง

2.2 การอบแห้งด้วยแสงอาทิตย์

2.3 ทฤษฎี

2.4 สมการการอบแห้ง

2.5 พริก

2.6 กรอบแนวคิดของการออกแบบและสร้างเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบ

อุโมงค์ลมสำหรับอบแห้งพริกแดง

2.1 การอบแห้ง (สมชาติ โสภณธนฤทธิ, 2540 : 1)

การอบแห้ง คือ กระบวนการลดความชื้นซึ่งจะมีการถ่ายเทความร้อนและการถ่ายเทมวลสารเกิดขึ้นพร้อมๆ กัน ความร้อนที่ทำให้น้ำระเหยออกจากวัสดุ ส่วนมากแล้วได้รับมาจากความร้อนสัมผัสของอากาศ และการถ่ายเทความร้อนจะมีทั้งการนำความร้อน การพาความร้อน และการแผ่รังสี แต่โดยทั่วไปแล้วจะเป็นการถ่ายเทความร้อนด้วยการพาความร้อนเป็นหลัก ซึ่งในการอบแห้งโดยทั่วไปมักอาศัยอากาศร้อนในการอบแห้ง ความร้อนจะถ่ายเทจากอากาศร้อนไปยังวัสดุ ซึ่งความร้อนส่วนใหญ่จะถูกนำไปใช้ในการระเหยน้ำ โดยของเหลวที่อยู่ภายในวัสดุจะเคลื่อนที่ออกมายังผิววัสดุโดย Capillary Flow ซึ่งเป็นผลมาจากแรงตึงผิว (Surface Force) ส่วนไอน้ำในวัสดุจะเคลื่อนที่เนื่องจากความแตกต่างของความเข้มข้นของความชื้น (Vapor Diffusion) และความดันไอ (Partial Vapor of Pressure) ที่ความแตกต่างระหว่างไอน้ำในวัสดุกับอากาศร้อน ถ้าผิวของวัสดุมีน้ำอยู่จำนวนมาก การลดลงของความเข้มข้นของไอน้ำที่ผิวก็จะคงที่ ส่งผลให้อัตราการอบแห้งคงที่ด้วย และเมื่อปริมาณน้ำที่ผิวของวัสดุลดลงมาก อุณหภูมิและความเข้มข้นของไอน้ำที่ผิวย่อมเปลี่ยนไป กล่าวคืออุณหภูมิของวัสดุเพิ่มขึ้นทำให้ความเข้มข้นของไอน้ำในวัสดุลดลงส่งผลให้อัตราการอบแห้งลดลง ความชื้นที่อยู่ระหว่างอัตรการอบแห้งคงที่และอัตรการอบแห้งลดลงเรียกว่า ความชื้นวิกฤต และอัตรการอบแห้งจะลดลงตลอดระยะเวลาการอบแห้ง จนกระทั่งความดันไอของของเหลวในวัสดุมีค่าไม่แตกต่างกับความดันไอของอากาศแวดล้อมในการอบแห้ง ความชื้นที่จุดสุดท้ายนี้เรียกว่า ความชื้นสมดุล เป็นจุดที่ไม่มีการถ่ายเทความชื้นอีกต่อไป

อัตราการอบแห้งสามารถแบ่งได้เป็น 2 ช่วง คือ

ช่วงอัตราการอบแห้งคงที่ การถ่ายเทความร้อนและมวลจะเกิดขึ้นที่ผิวของวัสดุเท่านั้น น้ำจะเกาะอยู่ที่ผิวของวัสดุเป็นจำนวนมาก เมื่อเพิ่มความเร็วลมที่ไหลผ่านวัสดุจะทำให้ฟิล์มอากาศนี้มีความหนาลดลง เป็นผลให้ความต้านทานต่อการไหลของความร้อนและมวลลดลงด้วย เมื่อเพิ่มอุณหภูมิของอากาศอบแห้ง จะทำให้ความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างที่ผิววัสดุและของกระแสอากาศที่ไหลอย่างอิสระมีมากขึ้น เป็นผลให้การถ่ายเทความร้อนและมวลดีขึ้น

ช่วงอัตราการอบแห้งลดลง การถ่ายเทความร้อนและมวล จะไม่จำกัดอยู่เฉพาะที่ผิวของวัสดุเท่านั้น แต่จะเกิดขึ้นภายในผิวและเนื้อวัสดุด้วย เมื่อเพิ่มอุณหภูมิของอากาศอบแห้ง จะทำให้ความแตกต่างของอุณหภูมิมักขึ้น นอกจากนี้ยังมีผลให้สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นมีค่าเพิ่มขึ้นด้วย (สมชาติ โสภณธรรมฤทธิ์, 2540 : 105-109) เมื่อลดค่าความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศอบแห้งจะเป็นผลให้เกิดความแตกต่างระหว่างอัตราส่วนความชื้นเพิ่มขึ้นและมีผลให้ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นเพิ่มขึ้นด้วย ดังนั้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิหรือลดความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศแล้ว จะเป็นผลให้การถ่ายเทความร้อนและมวลดีขึ้น เมื่อเพิ่มความเร็วลมจะพบว่าความหนาของฟิล์มอากาศนี้มีค่าลดลง เป็นผลให้ความต้านทานลดลงเนื่องจากความต้านทานที่ฟิล์มอากาศมีค่าน้อยเมื่อเทียบกับความต้านทานตัวอื่น ดังนั้นจึงไม่มีผลต่ออัตราการถ่ายเทความร้อนและมวลมากนัก

2.1.1 ปัจจัยที่มีผลต่อการทำแห้ง (คณาจารย์ภาควิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร , 2546)

2.1.1.1 ธรรมชาติของอาหาร อาหารเนื้อโปร่งมีการเคลื่อนของน้ำภายในอาหารแบบผ่านช่องแคบ ซึ่งเร็วกว่าการแพร่ในอาหารเนื้อแน่น ดังนั้นอาหารเนื้อโปร่งจึงแห้งเร็วกว่าอาหารที่มีเนื้อแน่น อาหารที่มีน้ำตาลสูงจะมีความเหนียวกีดขวางการเคลื่อนที่ของน้ำจึงแห้งช้า ส่วนอาหารที่มีการสวก นวดคลึง ทำให้เซลล์แตกจึงแห้งเร็วได้เร็วกว่า

2.1.1.2 ขนาดและรูปร่าง มีผลต่อพื้นที่ผิวต่อน้ำหนัก เช่น รูปร่างเหมือนกันขนาดเล็กจะมีพื้นที่ต่อน้ำหนักมากกว่าขนาดใหญ่จึงแห้งเร็วกว่า แต่ทั้งนี้ต้องคำนึงถึงพื้นที่ผิวที่สัมผัสกับอากาศที่เคลื่อนย้ายไอน้ำออกไปได้ เช่น ถ้าชิ้นเล็กมากที่ถมกัน การระเหยเกิดได้เฉพาะพื้นที่ผิวที่สัมผัสกับอากาศ การระเหยจึงเกิดได้ช้าทั้ง ๆ ที่พื้นที่ต่อหน่วยน้ำหนักมาก

2.1.1.3 ตำแหน่งของอาหารในเตา น้ำในวัสดุที่สัมผัสกับลมร้อนได้ดีกว่า หรือสัมผัสกับลมร้อนที่มีความชื้นต่ำระเหยได้ดีกว่า

2.1.1.4 ปริมาณอาหารต่อถาด ถ้าปริมาณอาหารต่อถาดมากเกินไปอาหารส่วนล่างไม่ได้สัมผัสกับอากาศร้อน หรือได้รับความร้อนจากถาดแล้วแต่ไอน้ำไม่สามารถแพร่กระจายผ่านชั้นอาหารตอนบนออกมาได้จึงแห้งช้า

2.1.1.5 ความสามารถในการรับไอน้ำของอากาศร้อน อากาศร้อนที่มีไอน้ำอยู่มากแล้วจะรับไอน้ำได้น้อยมีผลในช่วงอัตราการทำแห้งคงที่

2.1.1.6 อุณหภูมิของอากาศร้อนถ้าอากาศมีความชื้นคงที่ การเพิ่มอุณหภูมิเป็นการเพิ่มความ สามารถในการรับไอน้ำ จึงมีผลต่ออัตราการทำแห้งคงที่และอุณหภูมิที่สูงขึ้นทำให้การแพร่กระจายของน้ำดีขึ้นจึงมีผลต่อช่วงการทำแห้งลดลงด้วย

2.1.1.7 ความเร็วของลมร้อน ลมร้อนทำหน้าที่ในการเคลื่อนย้ายไอน้ำออกไปด้วย เมื่อความเร็วลมเพิ่มขึ้นจึงเคลื่อนย้ายได้ดีขึ้น การเคลื่อนย้ายเกิดขึ้นเต็มที่ที่ความเร็วลม 244 เมตรต่อวินาที นอกจากนั้นความเร็วลมทำให้เกิดกระแสปั่นป่วนในเตา อากาศจึงสัมผัสสออากาศได้ดีขึ้น

2.1.2 ความชื้นในอากาศ (สมชาติ โสภณธรณฤทธิ, 2540) มักเรียกเป็น ความชื้นสัมพัทธ์ (Relative Humidity) คือ อัตรา ส่วนระหว่าง ปริมาณความชื้นที่มีอยู่จริงในอากาศกับปริมาณความชื้นที่อากาศขณะนั้นจะมีได้ ณ อุณหภูมิเดียวกัน ความชื้นสัมพัทธ์ (%) = (ปริมาณน้ำที่มีอยู่จริงในอากาศ×100) / (ปริมาณน้ำที่อากาศนั้นจะมีได้ ณ อุณหภูมิเดียวกัน)

2.1.3 ความชื้นในวัสดุ (สมชาติ โสภณธรณฤทธิ, 2540) เป็นตัวบอกปริมาณของน้ำที่มีอยู่ในวัสดุ เมื่อเทียบกับมวลของวัสดุขึ้นหรือแห้ง ซึ่งแสดงได้ 2 แบบ คือ

1. ความชื้นมาตรฐานเปียก

$$M_w = \left(\frac{w-d}{w} \right) \times 100 \quad \dots (2.1)$$

เมื่อ M_w คือ ความชื้นมาตรฐานเปียก %
 w คือ มวลของวัสดุเปียก kg
 d คือ มวลของวัสดุแห้ง kg

2. ความชื้นมาตรฐานแห้ง

$$M_d = \left(\frac{w-d}{d} \right) \times 100 \quad \dots (2.2)$$

เมื่อ M_d คือ ความชื้นมาตรฐานแห้ง %
 w คือ มวลของวัสดุเปียก kg
 d คือ มวลของวัสดุแห้ง kg

ความชื้นแบบมาตรฐานแห้ง นิยมใช้ในการวิเคราะห์กระบวนการอบแห้งทางทฤษฎี เพราะช่วยให้การคำนวณสะดวกขึ้น เนื่องจากมวลแห้งของวัสดุมีค่าเกือบจะคงที่ในระหว่างการอบแห้ง (สมชาติ โสภณธรณฤทธิ, 2540)

นอกจากนี้ยังสามารถหาความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นมาตรฐานเปียกและความชื้นแบบมาตรฐานแห้ง ได้ดังนี้

$$M_w = \left(\frac{M_d}{1+M_d} \right) \quad \dots (2.3)$$

และ

$$M_d = \left(\frac{M_w}{1 - M_w} \right) \quad \dots (2.4)$$

2.1.4 ความชื้นสมดุลของวัสดุ (สมชาติ โสภณธนฤทธิ, 2540) มีความสำคัญต่อการศึกษากระบวนการอบแห้ง เพราะเมื่อทำการอบแห้งวัสดุใช้อากาศที่สภาวะคงที่ (อุณหภูมิหรือความชื้นสัมพัทธ์คงที่) ความชื้นของวัสดุจะลดต่ำลงจนถึงจุดๆ หนึ่งซึ่งไม่เปลี่ยนแปลง ในขณะนั้นความชื้นในวัสดุมีความดันไอเท่ากับอากาศที่อยู่รอบๆ และอุณหภูมิของวัสดุก็เท่ากับอุณหภูมิของอากาศที่อยู่รอบๆ ด้วยเราเรียกความชื้นในขณะนั้นว่า ความชื้นสมดุล ค่าความชื้นสมดุลขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุ อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ

2.2 การอบแห้งด้วยแสงอาทิตย์ (Solar Drying)

เนื่องจากประเทศไทยอยู่บริเวณศูนย์สูตร ซึ่งมีศักยภาพด้านการใช้ประโยชน์จากพลังงานแสงอาทิตย์ค่อนข้างสูง คือ ประมาณ 18.2 MJ/m²-day และสืบเนื่องจากประเทศไทยเป็นประเทศเกษตรกรรม พืชผลทางการเกษตรมากมาย ส่วนหนึ่งก็จำหน่ายในรูปของสด และบางส่วนก็ทำการอบแห้ง หรือตากแห้ง เพื่อเพิ่มมูลค่า ยืดอายุการจัดเก็บ หรือความสะดวกต่อการขนส่ง การอบแห้งหรือตากแห้งด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ก็เป็นทางเลือกที่เกษตรกรหรือผู้ประกอบการเลือกใช้ เนื่องจากต้นทุนต่ำ และง่าย มีอุปกรณ์ไม่ยุ่งยากซับซ้อน

ปัจจุบันประเทศไทย หลายหน่วยงานทั้งภาครัฐและเอกชน ได้ให้ความสำคัญกับการใช้เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์มากขึ้น เนื่องจากกระแสการอนุรักษ์พลังงาน และลดการใช้พลังงานจากเชื้อเพลิงฟอสซิล การพัฒนาเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์มีรูปแบบพัฒนาหลายรูปแบบด้วยกัน เช่น เครื่องอบแห้งแบบธรรมชาติ แบบบังคับ หรือแบบมีตัวรับรังสี แต่ยังไม่ได้รับความนิยมมากนักในระดับเกษตรกร ครัวเรือน หรือระดับชุมชน

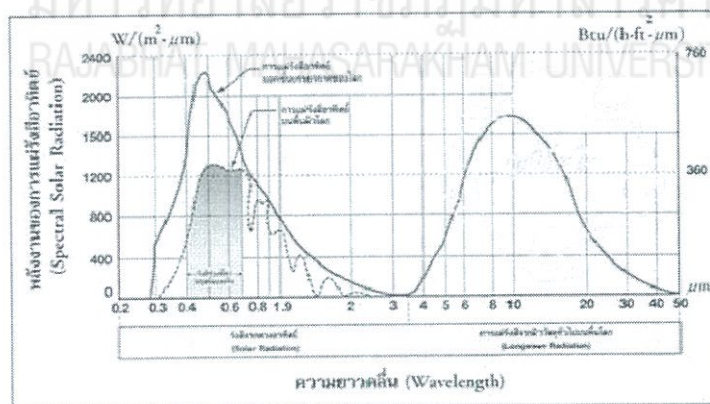
เนื่องจากปริมาณการอบยังมีปริมาณน้อย ขาดการถ่ายทอดเทคโนโลยีที่เหมาะสม และความไม่แน่นอนของปริมาณแสงอาทิตย์ แต่อย่างไรก็ตาม การอบแห้งด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ ก็ยังข้อดีกว่าการใช้แหล่งความร้อนจากเชื้อเพลิงอื่น ๆ ซึ่งสามารถแสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ตารางเปรียบเทียบการใช้การอบแห้งด้วยแสงอาทิตย์และแหล่งความร้อนเชื้อเพลิงอื่น

รายการ	ความร้อนจากแสงอาทิตย์	เชื้อเพลิงน้ำมันเตา	ไฟฟ้า
ค่าใช้จ่ายด้านพลังงาน	ไม่มี	ราคาถูก (มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น)	ราคาแพง
เงินลงทุนเครื่องอบแห้ง	ราคาแพง	ราคาปานกลาง	ราคาต่ำ
ระยะเวลาในการคุ้มทุน	ระยะเวลายาว แต่คุ้มค่า	ปานกลาง	ต่ำ

อายุการใช้งาน	ยาวนาน	ปานกลาง	ต่ำ
ค่าความร้อน/หน่วย	ต่ำ	สูง	ปานกลาง
ความสะดวกในการใช้งาน	ง่าย และสะดวก	ปานกลาง	สะดวก
การประหยัดพลังงาน	ไม่มีค่าใช้จ่าย	ปานกลาง	ไม่ประหยัด
พื้นที่ในการติดตั้ง	ใช้พื้นที่ติดตั้งมาก	ปานกลาง	น้อย
ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม	ไม่มีผลกระทบ (สะอาด)	ปานกลาง	น้อย

กระบวนการรอบแหว่งหรือตากแห้งเป็นการระเหยน้ำที่อยู่ในผลิตภัณฑ์ออกไปให้เหลือปริมาณที่เหมาะสมซึ่งผลิตภัณฑ์แต่ละชนิดจะมีค่าความชื้นสุดท้ายไม่เท่ากัน โดยอาศัยพลังงานความร้อนเพื่อทำให้น้ำระเหย หรืออาจกล่าวได้ว่า พลังงานจากดวงอาทิตย์มีความร้อนอยู่ในแสงอาทิตย์ โดยปกติแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบบนพื้นโลกจะประกอบด้วยรังสีต่างๆ 3 ช่วง คือ ช่วงแรกจะเป็นช่วงรังสีอัลตราไวโอเล็ต (UV) เป็นช่วงรังสีที่ฆ่าเชื้อโรคบางชนิดได้ ทำให้เกิดโรคมะเร็งได้ และจะทำให้สีซีดจาง อัลตราไวโอเล็ตมีประมาณ 3% ของแสงแดด ช่วงที่สอง คือ แสงสว่าง ทำให้เราสามารถมองเห็นสิ่งต่างๆ ได้ และช่วงสุดท้าย คือ อินฟราเรด (Infrared) เป็นช่วงที่มีความสำคัญต่อการอบแห้งหรือตากแห้ง เพราะช่วงนี้จะทำให้เกิดความร้อนขึ้น ซึ่งมีปริมาณมากถึง 53% ของแสงแดด พลังงานที่ปลดปล่อยจากดวงอาทิตย์และเคลื่อนที่มายังบรรยากาศนอกโลกอันที่จริงมีปริมาณสูงมากแต่จะถูกบรรยากาศเหนือพื้นโลกดูดซับบางส่วนและเหลือประมาณ 800-1000 วัตต์ต่อตารางเมตร ดังแสดงในภาพที่ 2.1

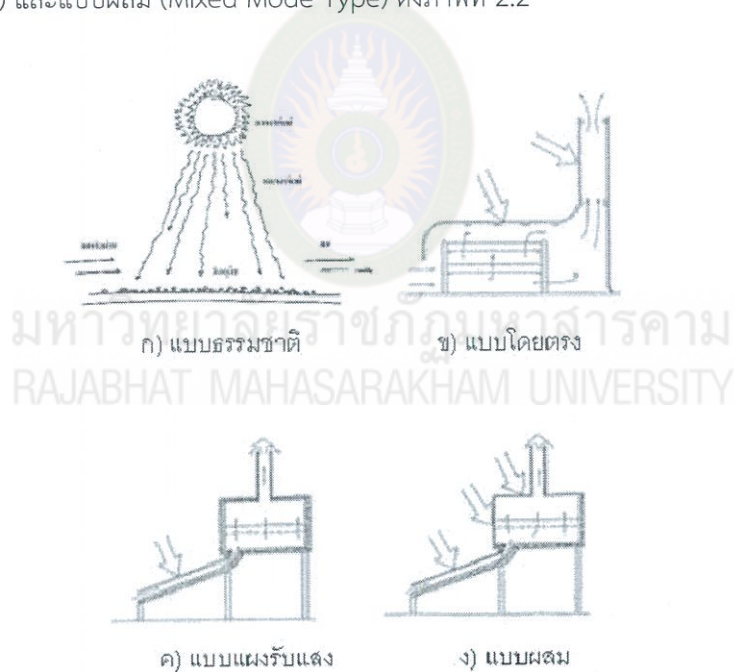


ภาพที่ 2.1 แสดงพลังงานของดวงอาทิตย์นอกโลกและที่กระทบบนพื้นโลกที่ความยาวคลื่นต่าง ๆ

2.2.1 เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ มนุษย์รู้จัก และเรียนรู้การตากแห้ง หรือใช้ความร้อนจากแสงอาทิตย์มาเป็นเวลานานแล้ว ไม่ว่าจะเป็นการตากผลผลิตทางการเกษตร การตากเสื้อผ้า การทำนาเกลือ เป็นต้น แต่ส่วนใหญ่เป็นการตากแห้งแบบโดยตรง ซึ่งประสบปัญหามากมาย ทั้งความไม่แน่นอนของธรรมชาติ และบางครั้งยังอาจก่อให้เกิดความไม่สะอาดของผลผลิต หรือวัตถุดิบ เช่น ผุ่น

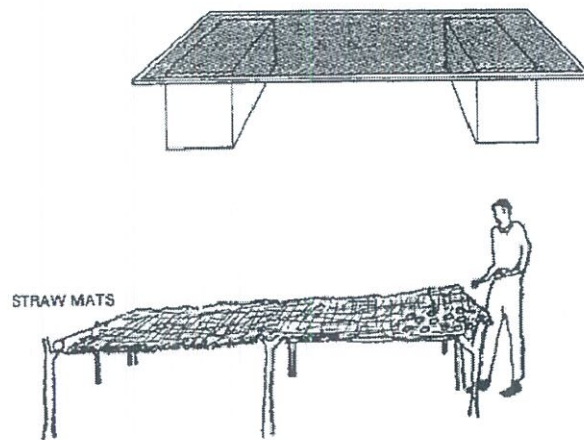
ละออง แมลงวัน เชื้อโรคต่าง ๆ ดังนั้น การพยายามหาเครื่องมือ หรืออุปกรณ์ เพื่อช่วยลดปัญหาดังกล่าว ก็ถูกพัฒนาขึ้น ในรูปของเครื่องอบแห้ง เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์เป็นอุปกรณ์ที่มนุษย์พยายามคิดค้น และพัฒนาขึ้นเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการอบแห้งพืชผลทางการเกษตร และลดความเสียหายในการตากแห้ง โดยอาศัยพลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์ เป็นหลัก ปัจจุบันเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ได้รับการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง ทั้งด้านรูปแบบ วิธีการ ทำให้สามารถแยกออกเป็นประเภทใหญ่ได้ 3 ลักษณะ คือ การอบแห้งแบบ Passive การอบแห้งแบบ Active และแบบ Hybrid

2.2.1.1 การอบแห้งแบบ Passive เป็นระบบแบบไม่อาศัยระบบขับเคลื่อนอากาศ เช่น พัดลม มาช่วยในการหมุนเวียนกระแสอากาศร้อนที่ได้รับพลังงานจากดวงอาทิตย์ อาศัยการเคลื่อนที่แบบธรรมชาติ เครื่องอบแห้งด้วยระบบนี้ ยังแบ่งย่อยได้อีก 4 ชนิด คือ เครื่องอบแห้งโดยธรรมชาติ เครื่องอบแห้งที่รับแสงอาทิตย์โดยตรง (Direct Type) และแบบใช้แผงรับพลังงานแสงอาทิตย์ (Indirect Type) และแบบผสม (Mixed Mode Type) ดังภาพที่ 2.2



ภาพที่ 2.2 แสดงการอบแห้งแบบ Passive แบบต่าง ๆ

การตากแห้งแบบธรรมชาติ เป็นแบบที่นิยมใช้กันในระดับครัวเรือนในพื้นที่ชนบทเป็นส่วนใหญ่ มีผลผลิตที่จะตากแห้งไม่มากนัก ประสิทธิภาพต่ำ ใช้ระยะเวลาในการตากแห้งนาน และมักพบสิ่งปนเปื้อนมาก อาศัยวัตถุดิบรับแสงอาทิตย์โดยตรง และอากาศร้อนจะเคลื่อนที่พาความชื้นออกจากวัตถุดิบโดยวิธีธรรมชาติ การตากแห้งแบบธรรมชาติมักจะประกอบด้วยอุปกรณ์ที่หาได้ง่าย ราคาไม่แพง เช่น ใช้ไม้กระดานเป็นพื้นรองวัตถุดิบ พื้นปูน หรือตะแกรง ดังแสดงในภาพที่ 2.3

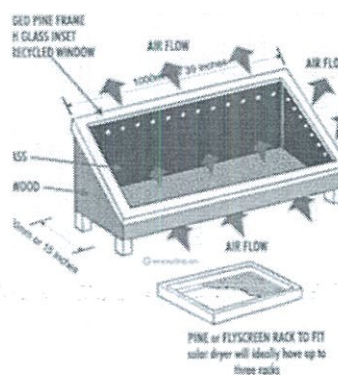


ภาพที่ 2.3 การตากแห้งด้วยแสงอาทิตย์แบบธรรมชาติ

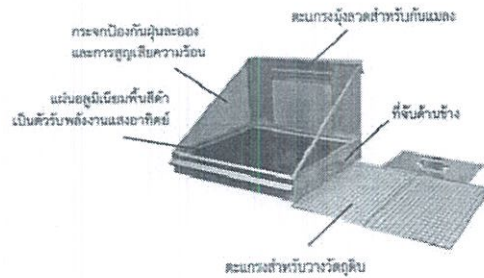
เครื่องตาก/อบแห้งแบบโดยตรง (Direct Type) การอบแห้งด้วยวิธีนี้อาศัยวัตถุดิบรับพลังงานแสงอาทิตย์โดยตรง วัตถุดิบที่อบแห้งมักจะอยู่ในวัสดุโปร่งใส อากาศภายในเครื่องอบแห้งจะเคลื่อนตัวจากการขยายตัวเมื่อได้รับความร้อนและจะพาความชื้นออกจากวัตถุดิบและหมุนเวียนเพื่อถ่ายเทความชื้นภายในเครื่องอบแห้ง เครื่องอบแห้งแบบนี้อุณหภูมิภายในค่อนข้างสูงอาจสูงกว่า 60°C ทำให้เวลาในการอบแห้งจะสั้นลง วัตถุดิบที่อบแห้งสะอาดไม่มีสิ่งปนเปื้อนจากมลภาวะภายนอก รวมถึงแมลงวันและแมลงพาหะต่าง ๆ

ปัจจุบันเครื่องอบแห้งแบบนี้ได้รับการพัฒนาให้มีรูปแบบและวัสดุโปร่งใสให้มีประสิทธิภาพสูง เช่น วัสดุที่ใช้ทำหลังคา ต้องโปร่งใส ทนทานรังสี UV แสงผ่านเข้าง่ายและสะท้อนออกยาก ทำให้เก็บสะสมความร้อนได้เป็นอย่างดี และมีน้ำหนักเบาเพื่อลดน้ำหนักโครงสร้าง ปัจจัยสำคัญในการพิจารณาปัจจัยหนึ่งคือ ราคาของวัสดุที่เลือกใช้ กระทั่งถือได้ว่าเป็นวัสดุที่มีการเลือกใช้น้อยมาก เนื่องจาก มีคุณสมบัติที่ดี ราคาถูก แต่มีปัญหาเรื่องการแตกหักง่าย

เครื่องอบแห้งแบบโดยตรงที่มีใช้ในปัจจุบันมีหลายรูปแบบด้วยกัน เช่น แบบตู้อบแห้ง อุโมงค์หลังคาโค้ง หรืออาจเป็นหลังคาทรงจั่ว ดังแสดงในภาพที่ 2.4 และ 2.5

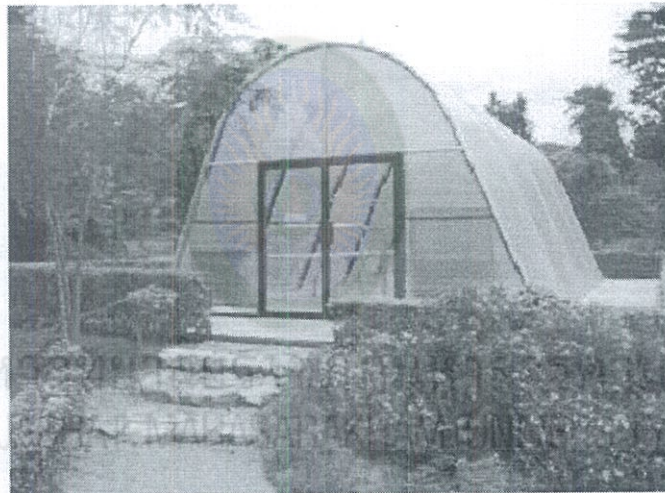


ก) แสดงการเคลื่อนที่ของอากาศของตู้อบแห้ง



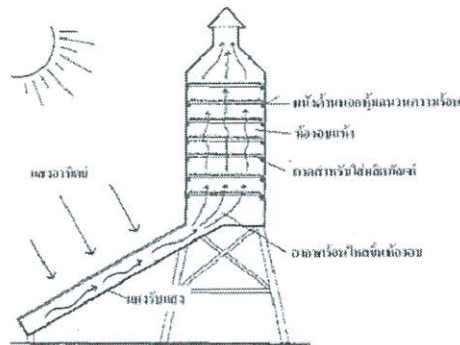
ข) ส่วนประกอบของตู้อบแห้ง

ภาพที่ 2.4 เครื่องอบแห้งแบบรับแสงอาทิตย์โดยตรงชนิดตู้



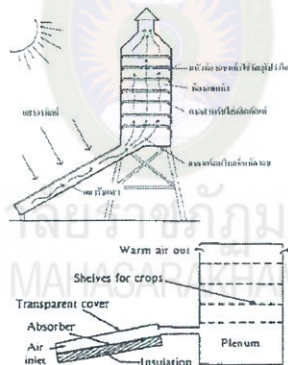
ภาพที่ 2.5 เครื่องอบแห้งแบบรับแสงอาทิตย์โดยตรง ชนิดอุโมงค์หลังคาโค้ง

แบบใช้แผงรับพลังงานแสงอาทิตย์ (Indirect Type) เครื่องอบแห้งแบบนี้วัสดุอบแห้งไม่ได้รับความร้อนจากแสงอาทิตย์โดยตรง จะมีแผงรับแสงอาทิตย์ (Solar Collector) ภายในจะมีวัสดุสำหรับดูดกลืนพลังงานแสงอาทิตย์และถ่ายเทไปยังอากาศจนทำให้อากาศร้อนและเคลื่อนที่ไปยังห้องอบแห้ง ซึ่งภายในบรรจุวัสดุหรือผลิตภัณฑ์ที่ต้องการอบแห้ง ผนังห้องสำหรับอบแห้งมักจะหุ้มฉนวนไว้เพื่อป้องกันการสูญเสียความร้อนออกภายนอก ภายในห้องอบแห้งอาจทำเป็นชั้น หลาย ๆ ชั้น เพื่อให้บรรจุผลิตภัณฑ์ในการอบแห้งได้มากขึ้น ลักษณะทั่วไปของเครื่องอบแห้งแบบนี้สามารถแสดงในภาพที่



ภาพที่ 2.6 เครื่องอบแห้งแบบใช้แผงรับแสงอาทิตย์ (Indirect)

เครื่องอบแห้งแบบผสม (Mixed Mode Type) เครื่องอบแห้งแบบนี้จะมีลักษณะคล้ายกับแบบใช้แผงรับความร้อนจากดวงอาทิตย์ ต่างกันตรงที่ห้องอบแห้งจะทำด้วยวัสดุโปร่งใสด้วยเพื่อให้ห้องอบแห้งสามารถรับพลังงานจากดวงอาทิตย์ด้วย หรืออาจกล่าวได้ว่าเครื่องอบแห้งแบบนี้รับพลังงานจากดวงอาทิตย์สองแหล่งคือจากแผงรับแสงและจากห้องอบแห้ง ดังแสดงในภาพที่ 2.7



ภาพที่ 2.7 เครื่องอบแห้งแสงอาทิตย์แบบผสม

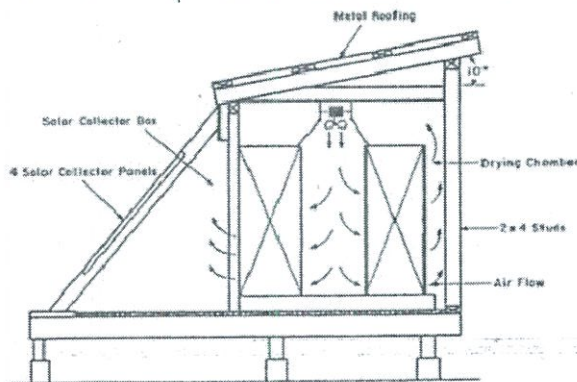
2.2.1.2 การอบแห้งแบบ Active เป็นระบบหรือเครื่องอบแห้งที่มีเครื่องช่วยให้อากาศเคลื่อนที่ หมุนเวียนในทิศทางที่ต้องการ เช่น พัดลม โดยพัดลมจะทำหน้าที่ดูดอากาศจากภายนอกให้เคลื่อนที่ผ่านอุปกรณ์รับความร้อนจากดวงอาทิตย์และมีการถ่ายเทความร้อนไปยังอากาศให้อากาศเคลื่อนที่ผ่านวัสดุหรือผลิตภัณฑ์ที่ใช้ในการอบแห้งเพื่อลดความชื้นให้เหลือตามต้องการ โดยรูปแบบของเครื่องอบแห้งจะมีลักษณะคล้ายกับแบบ Passive เพียงแต่เพิ่มระบบขับเคลื่อนกระแสอากาศเข้าไปในเครื่องอบแห้ง ซึ่งสามารถแสดงในภาพที่ 2.8, 2.9 และ 2.10



ภาพที่ 2.8 เครื่องอบแห้งแบบใช้แผงรับความร้อนโดยใช้พัดลมดูดอากาศร้อนเพื่อลดความชื้นของผลิตภัณฑ์

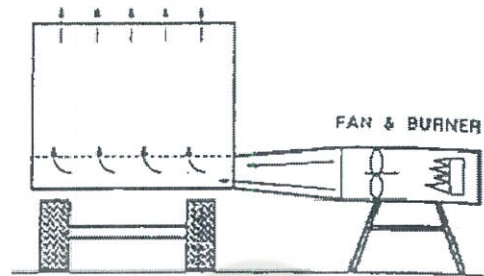


ภาพที่ 2.9 เครื่องอบแห้งแบบอุโมงค์โดยใช้เซลล์แสงอาทิตย์เป็นพลังงานขับเคลื่อน



ภาพที่ 2.10 เครื่องอบแห้งแบบอุโมงค์แบบแผงรับแสงอาทิตย์

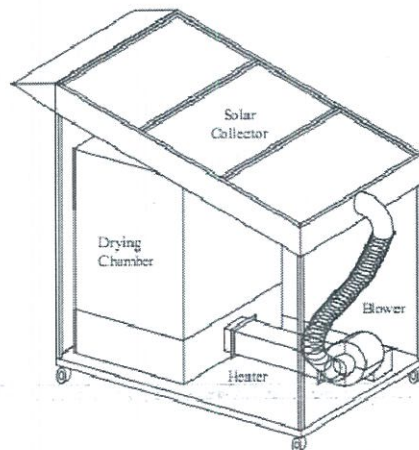
2.1.3 เครื่องอบแห้งแบบ Hybrid เป็นเครื่องอบแห้งที่อาศัยพลังงานความร้อนจากดวงอาทิตย์ร่วมกับแหล่งความร้อนอื่นในกรณี ที่แสงอาทิตย์ไม่สม่ำเสมอ หรือในบางฤดูที่มีปริมาณแสงแดดน้อย เพื่อให้กระบวนการอบแห้งเป็นไปอย่างต่อเนื่อง หรือแม้แต่ต้องการเพิ่มประสิทธิภาพการอบแห้งให้สูงขึ้น หรือลดระยะเวลาในการอบแห้งลง พลังงานความร้อนที่มักใช้ร่วมกับแสงอาทิตย์ คือ พลังงานไฟฟ้า พลังงานเหลือทิ้งจากแหล่งอื่น พลังงานความร้อนจากชีวมวล หรือแม้แต่แก๊สชีวภาพแล้วแต่การประยุกต์ใช้งาน ดังแสดงในภาพที่ 2.11, 2.12 และ 2.13



ภาพที่ 2.11 ตู้อบพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับหัวเผาความร้อน



ภาพที่ 2.12 ตู้อบพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับชีวมวล



ภาพที่ 2.13 ตู้อบพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมฮีตเตอร์ไฟฟ้า

2.2.2 การประเมินประสิทธิภาพของระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์

2.2.2.1 ประสิทธิภาพของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ (Solar collector efficiency)

ตัวเก็บรังสีอาทิตย์มีหน้าที่เปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์ให้เป็นความร้อน เพื่อใช้แลกเปลี่ยนความร้อนให้อากาศที่ดูดเข้ามาให้มีอุณหภูมิสูงขึ้นก่อนที่จะไหลเข้าสู่ห้องอบแห้งของเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ โดยทั่วไปการคำนวณหาประสิทธิภาพของตัวเก็บรังสีอาทิตย์สามารถหาได้จากสมการ

$$\eta_{th} = \frac{\dot{m}_a C_a (T_{OutC} - T_{InC})}{G_t A_c} \times 100\% \quad \dots (2.5)$$

โดยที่ η_{th}	คือ	ประสิทธิภาพของแผงรับรังสี (%)
\dot{m}_a	คือ	อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศ (kg/s)
T_{InC}	คือ	อุณหภูมิของอากาศที่ไหลเข้าแผงรับรังสี ($^{\circ}C$)
T_{OutC}	คือ	อุณหภูมิของอากาศที่ไหลออกจากแผงรับรังสี ($^{\circ}C$)
A_c	คือ	พื้นที่แผงรับรังสี (m^2)
G_t	คือ	ค่ารังสีดวงอาทิตย์ที่ตกกระทบแผงรับรังสี (W/m^2)
C_a	คือ	ความร้อนจำเพาะของอากาศ (kJ/kg)

2.2.2.2 ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของระบบอบแห้ง (Thermal efficiency)

ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเครื่องอบแห้ง เป็นตัวบอกสมรรถนะของเครื่องอบแห้งได้ ซึ่งสามารถหาได้จากสัดส่วนของพลังงานความร้อนที่ใช้ในการระเหยต่อพลังงานที่ให้กับระบบอบแห้ง ด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ สามารถหาได้จากสมการ

$$\eta_{th} = \frac{m_w h_{fg}}{(G_t A_c + G_t A_{ch}) \times t} \times 100\% \quad \dots (2.6)$$

โดยที่ η_{th}	คือ	ประสิทธิภาพเชิงความร้อน (%)
m_w	คือ	มวลของน้ำที่ระเหยออกจากวัสดุอบแห้ง (kg)
h_{fg}	คือ	ความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอของน้ำ (kJ/kg)
A_c	คือ	พื้นที่ของตัวเก็บรังสี (m^2)
G_t	คือ	รังสีรวมที่ตกกระทบบนระนาบของตัวเก็บรังสี (W/m^2)
t	คือ	เวลาที่ใช้ระเหยน้ำออกจากวัสดุอบแห้ง (s)
A_{ch}	คือ	พื้นที่ของห้องอบแห้ง (m^2)

2.2.2.3 อัตราการอบแห้ง (Drying Rate, DR)

อัตราการอบแห้ง สามารถหาได้จากปริมาณน้ำที่ระเหยออกจากวัสดุต่อระยะเวลาในการอบแห้ง มีหน่วยเป็น kg/hr สามารถหาได้จากสมการ (วรบุรณ์ แก้วอัสดร, 2543)

$$DR = \frac{m_{pi} - m_{po}}{t} \quad \dots (2.7)$$

โดยที่ DR	คือ	อัตราการอบแห้ง (kg/hr)
m_{pi}	คือ	น้ำหนักวัสดุก่อนอบแห้ง (kg)
m_{po}	คือ	น้ำหนักวัสดุหลังอบแห้ง (kg)
t	คือ	เวลาที่ใช้ในการอบแห้ง (hr)

2.3 ทราย

ทราย (Sand) มีลักษณะเป็นก้อนหินแข็งที่แตกแยกออกมาจากหินก้อนใหญ่ ซึ่งเป็นองค์ประกอบหนึ่งของเปลือกโลก ส่วนใหญ่เป็นสารประกอบซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO₂) ดังนั้นเปลือกโลกส่วนใหญ่จะเป็นแร่ตระกูลซิลิเกต และ แร่ควอทซ์ (Quartz) เป็นซิลิกาไดออกไซด์บริสุทธิ์ชนิดหนึ่ง มีลักษณะเนื้อหยาบสีน้ำตาลแดงมีผลึกรูปทรงหกเหลี่ยมยอดแหลม พบอยู่ทั่วไปในเปลือกทวีปแต่หายากในเปลือกมหาสมุทร เมื่อแร่ควอทซ์ผุพังลงจะกลายเป็นอนุภาคของทราย แร่ควอทซ์มีความความแข็งมากสามารถขูดแก้วเป็นรอยได้ ในตามธรรมชาติทรายจะแยกตัวออกมาได้เอง ขนาดของอนุภาคทรายจะมีขนาดระหว่าง 0.0635-2.1166 mm (1/400" -1/12") ถ้ามีอนุภาคขนาดเล็กกว่านี้จะมีสภาพเป็นฝุ่นทรายหรือเรียกว่าทราย

2.3.1 ประเภทของทราย ทรายที่พบตามธรรมชาติที่สามารถนำมาใช้ประโยชน์แบ่งออกได้เป็น 2 ชนิด ได้แก่

2.3.1.1 ทรายบก เกิดจากหินทรายที่แตกแยกออกมาเป็นเม็ดทรายตามสภาพภูมิอากาศ แวดล้อมจะฝังจมอยู่ในพื้นดินเป็นแห่ง ๆ ทรายชนิดนี้จะมีดิน ซากพืชและซากสัตว์ปะปนอยู่ด้วย ในการใช้งานจึงต้องนำทรายมาล้างเพื่อแยกดิน ซากพืช และซากสัตว์ออกให้สะอาดและทรายจากทะเลก็จัดเป็นทรายบกด้วย

2.3.1.2 ทรายแม่น้ำ ทรายชนิดนี้มีอยู่ทั่วไปในที่ราบลุ่มของแม่น้ำ ทรายชนิดนี้เกิดจากปรากฏการณ์ตามธรรมชาติ โดยกระแสน้ำได้พัดพาทรายจากที่ต่าง ๆ มาตกตะกอนรวมกันในแหล่งที่ราบลุ่มที่เป็นแหล่งรวบรวมของ

2.3.2 ขนาดอนุภาคของทราย ในการกำหนดขนาดของทรายนั้นยังมีสิ่งที่ตกลงกันไม่ได้ในกลุ่มนักวิทยาศาสตร์เกี่ยวกับขนาดที่แน่นอนของทรายและทรายแป้ง ดังนั้นผู้วิจัยจะกล่าวถึงมาตรฐานที่ใช้กันทั่วไป ได้แก่

2.3.2.1 US Department of Agriculture (USDA) ให้ขนาดของทรายและทรายแป้ง ดังนี้

- ทรายมีค่าอนุภาคเท่ากับ 2.00-0.05 mm
- ทรายแป้งอนุภาคมีค่าเท่ากับ 0.05-0.005 mm

2.3.2.2 The International Soil Science Society (ISSS) ให้ขนาดของทรายและทรายแป้ง ดังนี้

- ทรายมีค่าอนุภาคเท่ากับ 2.00-0.02 mm

- ทรายแป้งมีอนุภาคค่าเท่ากับ 0.05-0.002 mm

โดยทั้ง 2 องค์กรให้นิยามเหมือนกันว่าอนุภาคที่เล็กกว่า 0.002 mm ถือว่าเป็นอนุภาคของดินเหนียว (Global Learning and Observation to Benefit the Environment. 2005 : Web Site) สำหรับประเทศไทย กำหนดให้ขนาดอนุภาคทรายไว้ว่าทราย หมายถึง ก้อนหินเม็ดเล็กที่มีขนาดโตไม่เกิน 3 mm

2.4 สมการรอบแห้ง

เป็นที่ยอมรับกันว่า ปฏิกิริยาการย่อยสลายของผลิตภัณท์ทางชีววิทยาในช่วง falling rate ถูกควบคุมโดยกลไกของการแพร่กระจายของเหลวและ/หรือไอ แบบจำลองการรอบแห้งแบบ thin-layer ซึ่งอธิบายถึงการรอบแห้งของวัสดุเหล่านี้แบ่งเป็น 3 รูปแบบ คือ ทฤษฎี กึ่งทฤษฎี และจากการทดลอง (เอมไพริคเคิล) โดยที่แบบแรกจะคำนวณจากความต้านทานภายในในการส่งผ่านความชื้นในขณะที่อีก 2 แบบจะพิจารณาจากความต้านทานภายนอกในการส่งผ่านความชื้นระหว่างผลิตภัณท์และอากาศ

2.4.1 สมการรอบแห้งทางทฤษฎี

สมการรอบแห้งทางทฤษฎีจะพิจารณาการเคลื่อนที่ของน้ำในวัสดุที่มีโครงสร้างภายในเป็นรูพรุน การเคลื่อนที่ของน้ำส่วนใหญ่อยู่ในรูปของของเหลวที่เป็นผลเนื่องจากความเข้มข้นของความชื้น สมการทางทฤษฎีจะแสดงการวิเคราะห์การเคลื่อนที่ของน้ำในลักษณะการแพร่ เมื่อสัมประสิทธิ์การแพร่ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของการรอบแห้ง แต่อย่างไรก็ตามสมการทางทฤษฎีมีจำนวนเทอมในการวิเคราะห์จำนวนมากซึ่งขึ้นอยู่กับรูปร่างของผลิตภัณท์ มีตัวแปรและตัวพารามิเตอร์หลายตัว ดังนั้นจึงไม่นิยมนำแบบจำลองมาใช้ รูปแบบสมการรอบแห้งทางทฤษฎีที่ใช้ในการหาอัตราส่วนความชื้น คือ

2.4.1.1 กรณีของวัสดุทรงลูกบาศก์

$$\overline{MR} = (8/\pi^2)^3 [\exp(-3\pi^2 Dt/l^2) + (3/9)\exp(-11\pi^2 Dt/l^2) + (3/25)\exp(-27\pi^2 Dt/l^2)] \quad \dots (2.8)$$

2.4.1.2 กรณีของวัสดุทรงกลม

$$\overline{MR} = (6/\pi^2) \sum_{p=1}^{\infty} (1/p^2) \exp(-p^2 \pi^2 X^2/9) \quad \dots (2.9)$$

2.4.1.3 กรณีของวัสดุทรงกระบอกยาวมาก

$$\overline{MR} = \sum_{n=1}^{\infty} (4/\lambda_n^2) \exp(-\lambda_n^2 X^2/4) \quad \dots (2.10)$$

เมื่อ \overline{MR} คือ อัตราส่วนความชื้นเฉลี่ย

X คือ $(A/V) (Dt)^{1/2}$

A คือ พื้นที่ผิว (m^2)

V คือ ปริมาตร (m^3)

λ_n คือ รากของเบสเซลฟังก์ชันอันดับที่ศูนย์

l คือ ความหนา (m)

2.4.2 สมการอบแห้งกึ่งทฤษฎี

เป็นสมการแบบจำลองสมการง่าย ๆ โดยการนำสมการทางทฤษฎีมาวิเคราะห์ที่ให้ง่ายขึ้น และไม่ต้องนำรูปทรงของผลิตภัณฑ์มาพิจารณา ซึ่งทำให้สมการไม่มีความซับซ้อน โดยทั่วไปจะถูกสร้างขึ้นโดยการแก้อนุกรมทั่วไปของ Fick's second law ให้ง่ายขึ้น หรือแก้ไข simplified model และ valid ในค่าของอุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ ความเร็วในการไหลของอากาศ และ ปริมาณความชื้นที่ได้นำมาใช้แบบจำลองเหล่านี้ต้องการเวลาน้อยกว่าเมื่อเทียบกับแบบจำลองตาม ทฤษฎีและไม่ต้องสมมุติรูปร่างของอาหาร การแพร่กระจายมวลและการถ่ายเทมวล

สมการ Lewis เป็นกรณีพิเศษของแบบจำลองของ Handerson และ Pabis ได้ อธิบายว่าการถ่ายเทความชื้นของอาหารหรือวัสดุทางการเกษตร สามารถมองให้เหมือนกับการถ่ายเท ความร้อนของวัตถุที่จุ่มอยู่ในของไหลเย็น จากการเปรียบเทียบกับปรากฏการณ์นี้ด้วยกฎการเย็นตัวของนิวตัน อัตราการอบแห้งเป็นอัตราส่วนของผลต่างระหว่างปริมาณความชื้นของวัสดุอบแห้งและ ความชื้นที่สมดุล ที่สภาวะของอากาศที่ใช้ในการอบแห้ง สมการนี้ถือว่าการเคลื่อนที่ของความชื้นใน วัสดุจากภายในออกมาสู่ผิวภายนอกไม่มีความต้านทาน ใช้อธิบายการอบแห้ง ข้าวบาร์เลย์ ข้าว สาลี มะม่วงหิมพานต์ และวอลนัทได้ดี อย่างไรก็ตามในระยะเวลาแรกของการอบแห้งสมการจะ ทำนายค่าความชื้นได้สูงเกินไป และในช่วงหลังจะทำนายค่าความชื้นได้ต่ำ (Kashaninejad and others. 2007 : 98-108) มีรูปแบบสมการดังนี้

$$MR = \frac{M_t - M_{eq}}{M_i - M_{eq}} = \exp(-At) \quad \dots\dots (2.11)$$

2.4.3 สมการอบแห้งเอมไพริคเคิล

เป็นสมการที่ใช้ในการทำนายอัตราการอบแห้งได้ดี แต่มีข้อจำกัดคือเงื่อนไขการอบแห้ง ต้องตรงกับสภาวะการทดลอง

สมการ Henderson and Pabis เป็นรูปแบบที่ง่ายที่สุด โดยพิจารณาเฉพาะเทอมแรก ของสมการ infinite series solution แบบจำลองนี้ประสบความสำเร็จในการจำลองการอบแห้ง ของข้าวโพด ข้าวสาลี และถั่วลันเตา ความชื้นของแบบจำลองนี้ (สัมประสิทธิ์, k_0) สัมพันธ์กับ ประสิทธิภาพในการแพร่กระจาย เมื่อกระบวนการอบแห้งอยู่ในช่วง falling rate และการ แพร่กระจายของของเหลวเป็นตัวควบคุมกระบวนการ (Kashaninejad and others. 2007 : 98-108) มีรูปแบบสมการดังนี้

$$MR = \frac{M_t - M_{eq}}{M_i - M_{eq}} = A \exp(-Bt) \quad \dots\dots (2.12)$$

สมการ Two term Sharaf-Eldeen, Blaisdell and Hamdy ได้นำเสนอ Two-term model เพื่อทำนายอัตราการอบแห้งของ shelled corn ที่สัมผัสกับอากาศอย่างเต็มที่แบบจำลอง นี้เป็น 2 เทอมแรกของการแก้อนุกรมทั่วไปของสมการ Fick's second law อย่างไรก็ตาม แบบจำลองนี้ต้องให้อุณหภูมิของผลิตภัณฑ์คงที่ และต้องสมมุติค่าการกระจายที่คงที่ ใช้อธิบายการ อบแห้งผลผลิตทางการเกษตรโดยไม่คำนึงถึงรูปร่างของวัสดุ เช่น ข้าวโพด ถั่วเหลือง แมคคาเดเมีย ได้ดี อย่างไรก็ตามสมการนี้จะทำนายได้ดีเมื่ออุณหภูมิอบแห้งคงที่ (Ozdemir and Devres. 1999 : 225-233) รูปแบบของสมการมีดังนี้

$$MR = \frac{M_t - M_{eq}}{M_i - M_{eq}} = A \exp(-Bt) + C \exp(-Dt) \quad \dots\dots (2.13)$$

สมการ Logarithmic รูปแบบสมการจะเป็นการเพิ่มพารามิเตอร์เข้าไปในสมการ
 อดของ Lewis รูปแบบของสมการมีดังนี้

$$MR = \frac{M_t - M_{eq}}{M_i - M_{eq}} = A \exp(-Bt) + C \quad \dots\dots (2.14)$$

สมการ Page เป็นสมการที่ Page ได้นำเสนอเมื่อปี ค.ศ 1949 เป็นการปรับปรุง
 แบบจำลองของ Lewis เพื่อแก้ไขจุดบกพร่อง แบบจำลองนี้ถูกสร้างขึ้นมาเพื่อให้เกิดความแม่นยำใน
 การทำนายการอบแห้งของธัญพืช ข้าวกล้อง ถั่วขาว เมล็ดข้าวโพด และข้าวบาร์เลย์
 (Kashaninejad and others. 2007 : 98-108) ซึ่งมีรูปแบบสมการดังนี้

$$MR = \frac{M_t - M_{eq}}{M_i - M_{eq}} = \exp(-At^B) \quad \dots\dots (2.15)$$

สมการอบแห้งขั้นบางเป็นการนำความรู้ทางคณิตศาสตร์มาใช้อธิบายการเคลื่อนที่ของน้ำใน
 วัสดุที่มีโครงสร้างภายในเป็นรูพรุนในช่วงอัตราการอบแห้งลดลง ซึ่งสามารถอธิบายกลไกการอบแห้ง
 วัสดุเพียงหนึ่งขั้นหรือเมล็ดพืชขั้นบางเท่านั้น (อากาศเมื่อไหลผ่านวัสดุมีสถานะเกือบไม่เปลี่ยนแปลง)
 สำหรับงานวิจัยนี้ได้ทำการอบแห้งแมคคาเดเมียแบบขั้นบางและใช้รูปแบบสมการอบแห้งเอมไพริคเคิล
 เพื่อทำนายค่าความชื้นและเวลาในการอบแห้ง ซึ่งสมการอบแห้งเอมไพริคเคิลเป็นสมการที่ได้มาจาก
 การทดลอง สามารถทำนายอัตราการอบแห้งได้ดี

2.5 พริก

พริก เป็นพืชในตระกูล Solanaceae มีชื่อทางวิทยาศาสตร์ว่า *Capsicum frutescens* L. ชื่อ
 ภาษาอังกฤษว่า Chilli peppers, chili, chile หรือ chilli มาจากคำภาษาสเปน ว่า chile โดย
 ส่วนมากแล้ว ชื่อเหล่านี้มักหมายถึง พริกที่มีขนาดเล็ก ส่วนพริกขนาดใหญ่ที่มีรสอ่อนกว่าจะเรียกว่า
 Bell Pepper ในสหรัฐอเมริกา Pepper ในประเทศอังกฤษและไอร์แลนด์, capsicum ในประเทศ
 อินเดียกับออสเตรเลีย และ Paprika ในประเทศทวีปยุโรปหลายประเทศ พริกชนิดต่างๆ มีต้นกำเนิด
 มาจากทวีปอเมริกา ซึ่งในปัจจุบันนี้ได้มีปลูกกันในหลายประเทศทั่วโลก เพราะพริกเป็นเครื่องเทศที่
 สำคัญชื่อหนึ่ง และยังมีคุณสมบัติเป็นยาสมุนไพรด้วยเช่นกัน

ความเผ็ดของพริกมาจากสารชื่อ “แคปไซซิน” (*Capsaicin*) ซึ่งจะมีอยู่มากในบริเวณเยื่อ
 แกนกลางสีขาว (คือส่วนเผ็ดมากที่สุด) ส่วนเปลือกและเมล็ดนั้นจะมีสารนี้น้อย ซึ่งคนทั่วไปมักเข้าใจ
 ผิดว่าส่วนเมล็ดและเปลือกคือส่วนที่เผ็ดที่สุด และสารชนิดนี้จะทนทานต่อความร้อนและความเย็น
 อย่างมาก แม้จะนำมาต้มให้สุกหรือแช่แข็งก็ไม่ได้ทำให้สูญเสียความเผ็ดไปแต่อย่างใด โดยเราสามารถ
 เรียงลำดับความเผ็ดของพริกจากมากไปหาน้อยได้ คือ พริกชี้หนู > พริกเหลือง > พริกชี้ฟ้า > พริก
 หยก > พริกหวาน เป็นต้น

หน่วย วัดความเผ็ดเดิมคือ สโควิลล์ (Seoville) (เป็นค่าที่ตั้งขึ้นตามชื่อผู้คิดค้นวิธีการวัดระดับ ซึ่งก็คือ วิลเบอร์ สโควิลล์ นักเคมีชาวอเมริกัน) โดยพริกขี้หนูสวนบ้านเราจะมีค่าอยู่ที่ 50,000-100,000 สโควิลล์ ส่วนพริกที่ได้รับการบันทึกลงในกินเนสส์บุ๊กว่าเผ็ดที่สุดในโลกก็คือ พริกฮาบานโร วัดค่าได้ถึง 350,000 สโควิลล์หรือมากกว่า

พริกอุดมไปด้วยวิตามินและแร่ธาตุต่างๆ อย่าง วิตามินเอ วิตามินบี6 วิตามินซี ธาตุแมกนีเซียม ธาตุโพแทสเซียม ธาตุเหล็ก โยอาหาร เป็นต้น โดยในพริก 100 กรัม จะมีวิตามินซีสูงถึง 144 มิลลิกรัมเลยทีเดียว

2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จารุวัฒน์ เจริญจิต (2555) ศึกษาเทคโนโลยีการอบแห้งด้วยรังสีอาทิตย์ เพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนาและส่งเสริมการใช้เทคโนโลยีเครื่องอบแห้งด้วยอาทิตย์ในประเทศไทย พบว่า สามารถแบ่งตามวิธีการรับรังสีอาทิตย์ได้ 3 แบบ คือ รับรังสีอาทิตย์โดยตรง, โดยอ้อม และแบบผสม มีลักษณะการหมุนเวียนอากาศภายใน 2 ลักษณะ คือหมุนเวียนตามธรรมชาติ (passive system) และหมุนเวียนแบบบังคับ (active system) โดยปัจจัยหลักของการเพิ่มสมรรถนะการอบแห้งด้วยรังสีอาทิตย์ คือ อุณหภูมิ, ความเร็ว และความชื้นของอากาศในระบบ รวมถึงการพัฒนากระบวนการอบแห้งที่มีความสม่ำเสมอ และเพิ่มระยะเวลาการอบแห้งที่ใช้ความร้อนจากรังสีอาทิตย์ เป็นแนวทางที่ส่งเสริมให้รังสีอาทิตย์มีความคุ้มค่าด้านเศรษฐศาสตร์มากขึ้น ตามลำดับ โดยการประยุกต์ใช้ระบบทำน้ำร้อนด้วยรังสีอาทิตย์ ที่มีถังสะสมน้ำร้อน ทำงานร่วมกับโรงเรือนกระจก เป็นแนวทางที่ควรศึกษา เพื่อพัฒนาการผลิตอากาศร้อนในกระบวนการอบแห้งแบบ Mixed active solar drying และ Mixed passive solar drying ตามลำดับ โดยอุณหภูมิที่สามารถผลิตได้ แปรผันตามสมรรถนะของตัวเก็บรังสีอาทิตย์แต่ละชนิด โดยใช้น้ำร้อนเป็นตัวกลางสะสมความร้อน หรือทำงานร่วมกับระบบฮีตปั๊ม ตามความเหมาะสมของวัสดุอบแห้งชนิดต่างๆ

ธีรเดช ใหญ่บุก และคณะ (2552) ศึกษากระบวนการผลิตปลาแห้งอนามัยด้วยเครื่องอบแห้งพลังงานร่วมแสงอาทิตย์-ไฟฟ้า ภายใต้สภาพภูมิอากาศทางภาคใต้ของประเทศไทย โดยออกแบบเครื่องอบแห้งที่ใช้พลังงานแสงอาทิตย์พลังงานหลักและพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานเสริมประกอบด้วยตู้อบชนิดโปร่งแสง แผงรับรังสีอาทิตย์มีขนาด 4.08 ขดลวดไฟฟ้าสำหรับทำความร้อนขนาด 800 จำนวน 2 ชุด มีความจุของปลาที่ใช้อบได้ 50 กิโลกรัม จากการทดลองอบแห้งปลา 2 ชนิด คือ ปลาช่อนและปลาดุก โดยให้อุณหภูมิในห้องอบแห้ง 40, 50 และ 60°C พบว่าการอบแห้งปลาช่อนแบบใช้พลังงานร่วมแสงอาทิตย์-ไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 60°C มีความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ ในการอบแห้งน้อยสุดเท่ากับ 42.57 และมีประสิทธิภาพในการอบแห้ง 5.54% ใช้ระยะเวลาในการอบแห้ง 6 ชั่วโมง ส่วนการอบแห้งปลาดุกด้วยพลังงานความร้อนร่วมแสงอาทิตย์-ไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 50°C มีการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะในการอบแห้งน้อยที่สุดคือเท่ากับ 80.02 และมีประสิทธิภาพในการอบแห้ง 2.98% และใช้ระยะเวลาการอบแห้ง 8 ชั่วโมง

ธีระศักดิ์ หุตากร (2552) ศึกษาสมรรถนะของตัวเก็บรังสีอาทิตย์แผ่นราบแบบร่องรูปตัววี สำหรับเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ โดยเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ประกอบด้วย ห้อง

อบแห้งขนาด $1 \times 1 \times 0.7$ ลูกบาศก์เมตร ตัวเก็บรังสีอาทิตย์แผ่นราบขนาด 3×1 ตารางเมตร ซึ่งมีลักษณะเป็นร่องรูปตัววี โดยใช้อัตราการไหลของอากาศเท่ากับ 0.04 กิโลกรัมต่อวินาที ผลผลิตที่ใช้ในการอบแห้ง คือ มะเขือเทศราชินีแช่แอม โดยมีความชื้นเริ่มต้น 91 เปอร์เซ็นต์มาตรฐานเปียก ทำการอบแห้งครั้งละ 5 กิโลกรัม จำนวน 4 ถาดๆละ 1.25 กิโลกรัม จนกระทั่งเหลือความชื้นสุดท้ายเท่ากับ 30 เปอร์เซ็นต์มาตรฐานเปียก จากการทดลองพบว่าในช่วงเวลา $9.00-17.00$ น. ของวันที่มีท้องฟ้าแจ่มใสอุณหภูมิภายในห้องอบแห้งเฉลี่ยทั้งวันอยู่ที่ 47.0 °C และมีอุณหภูมิสูงสุดที่ 54.10 °C โดยมีประสิทธิภาพของตัวเก็บรังสีอาทิตย์สูงสุดที่ 56.23% และมีประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์สูงสุดเท่ากับ 16.90% เครื่องอบแห้งนี้สามารถอบมะเขือเทศราชินีแช่แอมในเวลา 24 ชั่วโมง ในขณะที่ตากแดดตามธรรมชาติใช้เวลาถึง 48 ชั่วโมง

ยุทธศักดิ์ บุณรอด (2549) ศึกษาสมรรถนะของเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบอุโมงค์ลมที่ใช้กระจกปิดด้านบน โดยดำเนินการออกแบบและสร้างเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบอุโมงค์ลมที่ใช้กระจกปิดด้านบน เครื่องอบแห้งดังกล่าวประกอบด้วยแผงรับรังสีดวงอาทิตย์แบบแผ่นราบและส่วนบรรจุผลิตภัณฑ์ ที่มีกระจกปิดด้านบนแผงรับรังสีดวงอาทิตย์จะผลิตอากาศร้อนและเป่าเข้าไปในส่วนที่บรรจุผลิตภัณฑ์ โดยอาศัยพัดลมซึ่งทำงานด้วยกำลังไฟฟ้าจากโซล่าเซลล์ขนาด 15 วัตต์ ผลิตภัณฑ์ที่ทำการอบจะแผ่เป็นชั้นบางอยู่บนถาดในส่วนบรรจุผลิตภัณฑ์ ซึ่งรับความร้อนทั้งจากอากาศร้อนที่ไหลจากแผงรับรังสีดวงอาทิตย์และจากรังสีดวงอาทิตย์ที่ตกกระทบผลิตภัณฑ์โดยตรง ผู้วิจัยได้ทำการทดลองทดสอบสมรรถนะของเครื่องอบแห้งดังกล่าวด้วยการทดลองอบแห้งกล้วยครั้งละ 100 กิโลกรัม จำนวน 5 ครั้ง จากการทดลองพบว่า อุณหภูมิของอากาศแปรค่าระหว่าง $40 - 80$ องศาเซลเซียส โดยใช้เวลาในการอบแห้ง ประมาณ $4-5$ วัน เมื่อเปรียบเทียบกับ การอบแห้งตามธรรมชาติจะใช้เวลาในการอบแห้ง $6-7$ วัน นอกจากนี้ผู้วิจัยยังได้ทำการพัฒนาแบบจำลองการอบแห้งของเครื่องอบแห้งดังกล่าว โดยการเขียนสมการสมดุลของความร้อนและพิจารณาในรูปสมการเชิงอนุพันธ์ จากนั้นได้ทำการแก้สมการดังกล่าว โดยวิธีการ finite difference ผลที่ได้พบว่าค่าความชื้นของผลิตภัณฑ์ที่คำนวณได้จากแบบจำลองมีค่าสอดคล้องกับค่าที่ได้จากการทดลอง

สุดธิดา อินทผลและคณะ (2551) พัฒนาเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ แล้วทำการประเมินประสิทธิภาพและสมรรถนะทางกายภาพของเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ ซึ่งได้ออกแบบและสร้างขึ้นเป็น 2 ส่วนคือส่วนของแผงรับแสงอาทิตย์โดยการแปลงพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานความร้อน อีกส่วนหนึ่งคือตู้อบแห้งสำหรับวางผลิตภัณฑ์ทางการเกษตรในการอบแห้ง โดยทำการติดตั้ง ชุดพัดลมพาอากาศร้อนจากแผงรับแสงอาทิตย์มายังตู้อบแห้งเพื่อใช้สำหรับลดความชื้นของผลิตภัณฑ์ทางการเกษตรที่ทำการอบแห้ง โดยออกแบบให้เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์สามารถอบพริกได้ครั้ง ละ 10 กิโลกรัม โดยมีอัตราการระเหยของน้ำ ภายในเครื่องอบแห้งเฉลี่ยจากการคำนวณได้เท่ากับ 4.1 กิโลกรัมต่อตารางเมตรต่อวันการหาสมรรถนะของเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ทำการทดลองอบพริกปริมาณ 10 กิโลกรัม มีความชื้น 85% (wb) ให้มีปริมาณความชื้นน้อยกว่าหรือเท่ากับ 15% (wb) โดยเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์สามารถอบพริกสดขนาด 10 กิโลกรัมให้แห้งได้โดยใช้ระยะเวลา 2 วัน , 1.5 วัน และ 1 วัน ตามลำดับ ขึ้นอยู่กับสภาพอากาศของสภาวะแวดล้อม ในวันที่ทำการอบแห้ง ซึ่งเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์สามารถเพิ่มอุณหภูมิของอากาศภายในตู้อบแห้งได้ $20 - 30$ °C โดยมีอุณหภูมิสูงสุดเท่ากับ 70 °C ในวันที่สภาพอากาศแจ่มใสตลอดทั้งวัน ซึ่ง

สามารถอบพริกให้แห้งได้ภายใน 1 วัน โดยมีอัตราการระเหยของน้ำ ภายในเครื่องอบแห้งเฉลี่ยจากผลการทดลองจริงได้เท่ากับ 4.1 กิโลกรัมต่อตารางเมตรต่อวันการประเมินสมรรถนะทางกายภาพโดยให้ผู้เชี่ยวชาญ จำนวน 4 ท่านเป็นผู้ประเมิน แบ่งการประเมินออกเป็น 3 ด้าน คือด้านการออกแบบและการใช้งานอยู่ในระดับดี ($X = 4.35$, $SD = 0.19$) ด้านความปลอดภัยในการใช้งานอยู่ในระดับดี ($X = 4.25$, $SD = 0.60$) และด้านความสวยงามอยู่ในระดับดี ($X = 4.00$, $SD = 0.63$) ผลรวมของการประเมินสมรรถนะทางกายภาพอยู่ในระดับดี ($X = 4.24$, $SD = 0.35$) ในการวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์ของเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์โดยทำการเปรียบเทียบกับการตากพริกแห้งโดยวิธีธรรมชาติ สรุปได้ว่าระยะเวลาคืนทุนของเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์เท่ากับ 3.97 – 4.26 ปี ขึ้นอยู่กับราคาของพริกสด 16 – 18 บาทต่อกิโลกรัม และราคาขายของพริกแห้ง 110 – 120 บาทต่อกิโลกรัม

Karim และ Hawlader (2004 : 329-344) ศึกษาตัวเก็บรังสีอาทิตย์ทำอากาศร้อนเพื่อประยุกต์ใช้ในการอบแห้งผลิตภัณฑ์ทางการเกษตร ภายใต้เงื่อนไขของภูมิอากาศของประเทศสิงคโปร์การทดลองอ้างอิงตามมาตรฐาน ASHRAE 93-77 (1977) ทดลองเปรียบเทียบแผ่นดูดกลืนรังสีอาทิตย์ 3 รูปแบบ ได้แก่ แบบแผ่นราบ แบบแผ่นครีบลูก 25 mm และแบบรูปตัววี 60° ซึ่งสูง 60 mm วัสดุที่ใช้ทำแผ่นดูดกลืนรังสีอาทิตย์ทำจากเหล็กกล้าไร้สนิมทาสีดำหนา 1 mm ขนาด 1.8 m x 0.7 m ฉนวนด้านหลังทำจากใยแก้วหนา 60 mm ฉนวนด้านข้างทำจากโฟรอสไตรีน ไม้และแผ่นยางซิลิกอนประสานติดกันโดยกาวซิลิโคน ปิดด้านบนด้วยกระจกใสหนา 5 mm จำนวน 1 ชั้น อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศที่ 0.0154-0.056 $\text{kg/m}^2\text{s}$ เวลาในการทดลองเครื่องคือก่อนและหลังเที่ยงวัน 2 ชั่วโมง ใช้พัดลมแบบหมุนตามแกนมี Volume Capacities 260 m^3/hr มีความดันสถิตขนาด 300 Pa ใช้ฮีตเตอร์ 12 kW ใช้เทอร์โมคัปเปิลชนิด T วัดอุณหภูมิจำนวน 20 ช่องทุก ๆ 20 วินาที ผลการทดลองพบว่าจากการปรับเปลี่ยนอัตราการไหลเชิงมวลของอากาศประสิทธิภาพสูงสุดอยู่ที่ 0.056 $\text{kg/m}^2\text{s}$ ซึ่งตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบรูปตัววี 60° ให้ประสิทธิภาพสูงสุด ผลการคำนวณเปรียบเทียบประสิทธิภาพของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ พบว่าประสิทธิภาพสูงสุดอยู่ที่ 0.056 $\text{kg/m}^2\text{s}$ ที่ 82.06, 80.58 และ 77.47 % ของตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบรูปตัววี 60° แบบแผ่นครีบลูกและแบบแผ่นราบ ตามลำดับ ผลการศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพของแผ่นดูดกลืนรังสีอาทิตย์ที่มีเปลี่ยนอัตราการไหลเชิงมวลของอากาศพบว่าตัวเก็บรังสีอาทิตย์ที่อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศ 0.056 $\text{kg/m}^2\text{s}$ แบบรูปตัววี 60° ให้ประสิทธิภาพสูงกว่าแบบแผ่นราบประมาณ 7-12 % เนื่องจากมีพื้นที่ของแผ่นดูดกลืนมากกว่า และพบอีกว่าอัตราการไหลเชิงมวลของอากาศที่ 0.031 0.029 และ 0.030 $\text{kg/m}^2\text{s}$ ให้อุณหภูมิของอากาศที่ทางออกจากตัวเก็บรังสีอาทิตย์ ได้ถึง 53 50 และ 48 °C ของตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบรูปตัววี 60° แบบแผ่นครีบลูกและแบบแผ่นราบ ตามลำดับ แต่อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการอบแห้งผลิตภัณฑ์ทางการเกษตรคือ 0.035 $\text{kg/m}^2\text{s}$

Mohamad (1997 : 71-76) ทำการทดลองตัวเก็บรังสีอาทิตย์ที่ใช้วัสดุพูนนำมาบรรจุในแผ่นดูดกลืนรังสีอาทิตย์ ทดลองที่อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศอยู่ระหว่าง 0.005-0.2 $\text{kg/m}^2\text{s}$ มีระยะช่องว่างระหว่างกระจกและแผ่นดูดกลืนรังสีอาทิตย์อยู่ 2 ค่า คือ 2.5 cm และ 5 cm ในส่วนของตัวเก็บรังสีอาทิตย์มีอยู่ 4 รูปแบบ คือ แบบมีกระจกชั้นเดียว แบบมีกระจก 2 ชั้น แบบมีการไหลวนกลับของอากาศที่ใช้วัสดุพูนและแบบมีการไหลวนกลับของอากาศที่ไม่ใช้วัสดุพูน จากการทดลอง

พบว่าตัวเก็บรังสีอาทิตย์ทั้ง 4 แบบ มีประสิทธิภาพสูงกว่า 75 % และแบบมีการไหลวนกลับของอากาศที่ใช้วัสดุพรมมีประสิทธิภาพสูงสุด จากการที่ค่าความเข้มข้นของรังสีอาทิตย์สามารถแทรกซึมลึกลงไปวัสดุพรมและเก็บสะสมความร้อนไว้แล้วจึงส่งถ่ายความร้อนให้กับกระแสการไหลของอากาศ ทำให้อุณหภูมิที่ทางออกมีค่าสูงขึ้น และผลการทดลองพบว่าที่ระยะช่องการไหลเชิงมวลของอากาศที่ 2.5 cm ประสิทธิภาพสูงกว่า 5 cm ประมาณ 3 % ส่วนแบบมีกระจกชั้นเดียวและแบบสองชั้นมีประสิทธิภาพที่ 80 % ที่ระยะช่องการไหลเชิงมวลของอากาศที่ 5 cm แบบที่มีกระจกสองชั้น จะมีประสิทธิภาพดีกว่าแบบกระจกชั้นเดียว ส่วนแบบไม่มีวัสดุพรมที่ระยะช่องการไหลเชิงมวลของอากาศที่ 2.5 cm จะต่ำกว่าแบบมีวัสดุพรม 10 % และ 18 % สำหรับระยะช่องว่างการไหลเชิงมวลของอากาศที่ 5 cm

Naphon และ Kongtragool (2003 : 1125-1136) ศึกษาคุณลักษณะของการส่งถ่ายความร้อนและสมรรถนะเชิงความร้อนของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ ทดลองเปรียบเทียบจำนวน 5 รูปแบบแล้วนำผลการทดลองของแต่ละแบบเปรียบเทียบหาประสิทธิภาพที่ดีที่สุด เพื่อนำไปใช้ในการออกแบบตัวเก็บรังสีอาทิตย์ ซึ่งรูปแบบทั้งหมดมีการการปรับเปลี่ยนอัตราการไหลเชิงมวลของอากาศที่ 0.00265, 0.00795, 0.01325, 0.01855 และ 0.02385 kg/s ซึ่งส่งผลต่ออุณหภูมิของกระจกโดยตรง กล่าวคือจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อมีอัตราการไหลเชิงมวลของอากาศลดลง เนื่องจากอัตราการไหลเชิงมวลของอากาศและระยะช่องว่างของการไหลของอากาศซึ่งเป็นตัวแปรหนึ่งของการส่งถ่ายพลังงานความร้อนของแผ่นดูดกลืนรังสีอาทิตย์ไปยังอากาศแวดล้อม ผลการทดลองของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ในแต่และแบบพบว่า การไหลของอากาศแบบไหลวนกลับที่ข้างบนและข้างล่างของแผ่นดูดกลืนรังสีอาทิตย์พบว่าแบบที่มีแผ่นดูดกลืนรังสีอาทิตย์ที่มีระยะอยู่ตรงกึ่งกลางของช่องการไหลของอากาศมีอุณหภูมิของอากาศเพิ่มขึ้น ในลักษณะคล้ายกับการทดลองของ Yeh and Lin (1996 : 435-443) และอุณหภูมิของกระจกจะสูงกว่าแบบมีแผ่นดูดกลืนรังสีอาทิตย์ที่ติดบนฉนวน ลักษณะการไหลของอากาศในตัวเก็บรังสีอาทิตย์พบว่า การไหลของอากาศแบบไหลวนกลับจะมีอุณหภูมิของอากาศสูงขึ้น เนื่องจากแผ่นดูดกลืนรังสีอาทิตย์ที่ได้รับรังสีอาทิตย์ไว้แล้วถ่ายเทความร้อนได้ทั้งข้างบนและข้างล่างของแผ่นดูดกลืนรังสีอาทิตย์อีกเหตุผลหนึ่ง คือ การสูญเสียความร้อนที่ข้างล่างของแผ่นดูดกลืนรังสีอาทิตย์มีค่าต่ำกว่าที่ผิวกระจก ผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพและอัตราการส่งถ่ายความร้อนของตัวเก็บรังสีอาทิตย์จะเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราการไหลเชิงมวลของอากาศลดลง ผลการศึกษาคุณลักษณะของการส่งถ่ายความร้อนและสมรรถนะเชิงความร้อนของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ทำอากาศร้อน พบว่าตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบกระจกชั้นเดียวมีประสิทธิภาพต่ำสุด และแบบมีกระจกสองชั้นและมีการไหลของอากาศแบบไหลวนกลับมีประสิทธิภาพสูงสุด ทั้งนี้เนื่องจากการพาความร้อนแบบบังคับทำให้การสูญเสียความร้อนจากแผ่นดูดกลืนรังสีอาทิตย์มีค่าไม่เท่ากัน เนื่องจากอัตราการไหลเชิงมวลของอากาศที่สูงทำให้แผ่นดูดกลืนรังสีอาทิตย์จะมีค่าดูดกลืนรังสีอาทิตย์ที่มีค่าต่ำลงส่งผลทำให้กระแสของอากาศที่ไหลผ่านตัวเก็บรังสีอาทิตย์มีอุณหภูมิต่ำลง และพบว่าสมรรถนะเชิงความร้อนจะเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มจำนวนแผ่นปิดใส และลักษณะการไหลของอากาศในตัวเก็บรังสีอาทิตย์ ซึ่งเป็นแพคเตอร์ที่สำคัญของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ ทำอากาศร้อนอีกอย่างหนึ่ง

2.7 แนวทางการออกแบบและสร้างเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบอุโมงค์ลมสำหรับอบแห้งพริกแดง

ผลการศึกษาทฤษฎีการอบแห้งด้วยพลังงานแสงอาทิตย์และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง พบว่า เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์มีการนำพลังงานพลังงานแสงอาทิตย์มาใช้ในกระบวนการอบแห้ง ซึ่งพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานที่ไม่มีวันหมด ครอบคลุมพื้นที่ที่มีดวงอาทิตย์ เป็นแหล่งพลังงานที่ไม่ต้องลงทุน ทำให้สามารถประหยัดพลังงาน ลดค่าใช้จ่าย และยังทำให้ผลิตภัณฑ์มีคุณภาพ สามารถเก็บไว้ได้นาน นำมารับประทานในยามขาดแคลน เพิ่มมูลค่าเพิ่มให้แก่พริก ทั้งยังไม่ก่อให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมเพราะไม่มีการปล่อยมลพิษออกมาในระหว่างกระบวนการอบแห้ง สำหรับเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบอุโมงค์ลม ผลิตภัณฑ์ที่อยู่ในเครื่องอบจะได้รับความร้อนทั้งจากรังสีดวงอาทิตย์ที่ตกกระทบโดยตรงและความร้อนจากแผงรับรังสีดวงอาทิตย์ ทำให้การอบแห้งผลิตภัณฑ์ใช้เวลาเร็วขึ้น

การอบแห้งที่ใช้ในงานวิจัยครั้งนี้ จะเริ่มอบแห้งที่เวลา 09.00 – 15.00 น. ทุกวันของการอบแห้ง อบจนพริกมีค่าความชื้นไม่เปลี่ยนแปลง โดยทำการชั่งมวลของพริก วัดอุณหภูมิในแต่ละจุดภายในและนอกห้องอบแห้ง วัดความเข้มข้นรังสีอาทิตย์ ทุกๆ 20 นาที

สำหรับการพัฒนาเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบอุโมงค์ลมนี้ จะพิจารณาในส่วน of แผงรับรังสีอาทิตย์ ซึ่งจะพิจารณาในเรื่องของพื้นที่รับรังสีอาทิตย์โดยจะใช้แผงรับรังสีอาทิตย์แบบลูกฟูกและทาสีดำด้าน ตัวเก็บสะสมความร้อนจะมีการใส่วัสดุที่มีรูพรุน และการถ่ายเทความร้อนของแผงรับรังสีอาทิตย์ให้กับอากาศจะมีการติดครีบริบายความร้อน สำหรับการพาความร้อนจากแผงรับรังสีอาทิตย์ไปยังห้องอบแห้งจะใช้พัดลมเป็นตัวบังคับอากาศให้ไหลผ่านทั้งด้านบนและด้านล่างของตัวรับรังสีอาทิตย์ ซึ่งเมื่อมีการปรับปรุงแผงรับรังสีอาทิตย์สามารถผลิตความร้อนได้สูง ก็จะทำให้เครื่องอบแห้งมีประสิทธิภาพของเครื่องอบแห้งมีค่าสูงขึ้น สำหรับการศึกษาศาสตร์การอบแห้งจะใช้สมการอบแห้งชั้นบางของ Henderson, Logarithmic, Two term, Page และ Lewis (T.Y. Tunde-Akintunde. 2139-2145 : 2011) มาใช้ในการทำนายและใช้ค่าไคสแควร์ (X^2) และสัมประสิทธิ์ตัวกำหนด (R^2) เป็นค่าทางสถิติที่ใช้ในการเลือกสมการที่เหมาะสม โดยสมการที่มีความเหมาะสมจะสามารถทำนายค่าความชื้นและเวลาในการอบแห้งได้ดี ทำให้ทราบเวลาสิ้นสุดการอบแห้ง ซึ่งจะช่วยลดปัญหาการเสื่อมเสียคุณภาพของพริกเนื่องจากการสัมผัสกับความร้อนเป็นเวลานานเกินไป สามารถนำข้อมูลที่ได้จากสมการอบแห้งมาวิเคราะห์พื้นฐานเกี่ยวกับการอบแห้งพริกด้วยเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบอุโมงค์ลมได้

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

เนื่องจากประเทศไทยมีรังสีอาทิตย์ประมาณ $18.2 \text{ MJ/m}^2\text{-day}$ (กระทรวงพลังงาน, 2556) ผู้วิจัยจึงนำรังสีอาทิตย์มาใช้ประโยชน์ โดยการสร้างเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบอุโมงค์ลม ที่มีการรับรังสีอาทิตย์แบบผสมเป็นการรับรังสีจาก 2 แหล่ง คือ รับความร้อนจากรังสีอาทิตย์โดยตรงและความร้อนจากตัวเก็บรังสีอาทิตย์ ใช้ทรายเป็นตัวกักเก็บความร้อนภายในตัวเก็บรังสีและในห้องอบแห้ง และใช้เซลล์แสงอาทิตย์เป็นแหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้าให้แก่พัดลม ซึ่งมีขั้นตอนดำเนินการวิจัยดังนี้

3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย

3.1.1 เครื่องมือเก็บข้อมูล

1. เครื่องคอมพิวเตอร์
2. ไพราโนมิเตอร์ (Pyranometer) ยี่ห้อ METEON รุ่น 1.6.1.0
3. เครื่องวัดความเร็วลม (Anemometer) ยี่ห้อ PROVA รุ่น AVM-01
4. เครื่องบันทึกข้อมูลอุณหภูมิ (Data logger) ยี่ห้อ Agilent รุ่น 34972A
5. สายเทอร์โมคัปเปิล Type K
6. เครื่องชั่งน้ำหนักแบบดิจิตอลความละเอียด 0.01 กรัม ยี่ห้อ OHAUS

CORPORATION รุ่น IPA4102

7. เต้าอบไฟฟ้า
8. กระป๋องอะลูมิเนียม 5 กระป๋อง

3.1.2 อุปกรณ์สร้างเครื่องอบแห้ง

1. เหล็กกล่องขนาด 1×1 นิ้ว
2. ฉนวนยางดำหนา 10 มิลลิเมตร
3. แผ่นสังกะสีลูกฟูกลอนเล็ก
4. มือจับประตู
5. ตะแกรงมุ้งลวดอะลูมิเนียม
6. พัดลมคอมพิวเตอร์ 12 V
7. แผ่นโพลีคาร์บอเนตชนิดโปร่งแสง
8. พัดลมคอมพิวเตอร์ขนาด 12 V
9. โซล่าเซลล์แสงอาทิตย์
10. สังกะสีแผ่นเรียบ

3.2 วิธีดำเนินการวิจัย

การดำเนินการวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ 2 ข้อ คือศึกษาการออกแบบและสร้างเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบอุโมงค์ลมสำหรับอบแห้งพริกแดง และศึกษาสมรรถนะเครื่องอบแห้ง โดยการดำเนินการวิจัยแบ่งออกเป็น 2 ตอน ดังนี้

ตอนที่ 1 ออกแบบและสร้างเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบอุโมงค์ลมสำหรับอบแห้งพริกแดง

การออกแบบเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์สำหรับอบแห้งพริกชี้หนูแดง มีส่วนประกอบสำคัญที่ต้องออกแบบคือ ตัวเก็บรังสีอาทิตย์ ห้องอบแห้ง โดยมีเงื่อนไขการออกแบบมีดังนี้

1. ปริมาณพริกแดง 10 kg ความชื้นเริ่มต้น 300% มาตรฐานแห้ง อบแห้งให้เหลือความชื้นสุดท้าย 14% มาตรฐานแห้ง
2. ความเข้มรังสีอาทิตย์มาตรฐาน 1000 W/m² (กระทรวงพลังงาน, 2556)
3. ค่าเฉลี่ยอุณหภูมิจังหวัดมหาสารคามทั้งปี 28°C (กรมอุตุนิยมวิทยา, 2556)
4. อุณหภูมิออกจากตัวเก็บรังสีที่ใช้ในการอบแห้งพริกแดงที่เหมาะสมเท่ากับ 65°C (จารุวัฒน์ เจริญจิต, 2555)
5. เวลาที่ใช้ในการอบแห้ง 9 ชั่วโมง
6. ประสิทธิภาพตัวเก็บรังสีเท่ากับ 30%
7. ขนาดของพริกแดง มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.055 เมตร ยาว 0.08 เมตร
8. รูปทรงของพริกแดงสมมติให้เป็นรูปทรงกระบอก
9. กำหนดให้ความสูงของห้องอบแห้ง 0.2 m
10. กำหนดให้ความกว้างของห้องอบแห้ง 1.5 m

จากเงื่อนไขข้างต้นนำมาออกแบบเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบอุโมงค์ลมสำหรับอบแห้งพริกแดง โดยมีขั้นตอนดังนี้ (ดูรายละเอียด ภาคผนวก ฉ)

1. คำนวณหามวลของอากาศ
2. คำนวณห้อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศ
3. คำนวณหาขนาดพื้นที่ของตัวเก็บรังสี
4. คำนวณหาขนาดของห้องอบแห้ง

ตอนที่ 2 ศึกษาประสิทธิภาพเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบอุโมงค์ลมสำหรับอบแห้งพริกแดง

ขั้นที่ 1 ศึกษาประสิทธิภาพตัวเก็บรังสีดวงอาทิตย์

1. วัดอุณหภูมิที่อากาศทางเข้าและทางออกตัวเก็บรังสี โดยใช้เทอร์โมคัปเปิลและบันทึกอุณหภูมิตามตำแหน่งที่กำหนด ดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 ตำแหน่งการวัดอุณหภูมิภายในห้องอบแห้ง

หมายเหตุ :

- $T_{In.C}$ คือ อุณหภูมิทางเข้าตัวเก็บรังสี
- $T_{Out.C}$ คือ อุณหภูมิทางออกตัวเก็บรังสี
- T_{In} คือ อุณหภูมิทางเข้าห้องอบแห้ง
- T_{Mid} คือ อุณหภูมิกลางห้องอบแห้ง
- T_{Out} คือ อุณหภูมิออกห้องอบแห้ง

2. วัดความเข้มของรังสีดวงอาทิตย์รวมทั้งตกกระทบบนระนาบตัวเก็บรังสี โดยใช้ไพรานอมิเตอร์ (Pyranometer)

3. ปรับอัตราการไหลเชิงมวลของอากาศเท่ากับ 0.013 kg/s
4. ทำการเก็บข้อมูลตั้งแต่ 9.00 น. – 15.00 น.

5. รวบรวมข้อมูลที่ได้คำนวณค่าประสิทธิภาพของตัวเก็บรังสีดวงอาทิตย์ตามสมการที่

2.5

ขั้นที่ 2 ศึกษาประสิทธิภาพเชิงความร้อน

1. เตรียมพริกชี้หนูแดง 10 kg ซึ่งมีความชื้นเริ่มต้นประมาณ 280% d.b (การหาความชื้นดูรายละเอียดภาคผนวก ง) ทำการอบแห้งจนเหลือความชื้นสุดท้ายประมาณ 14 % d.b ขณะอบแห้งบันทึกค่ามวลที่เปลี่ยนแปลงทุกๆ 20 นาที ตั้งแต่เวลา 9.00 น.-15.00 น. ของทุกวันการอบแห้ง

2. ปรับอัตราการไหลเชิงมวลของอากาศเท่ากับ 0.013 kg/s ด้วยตัวต้านทานปรับค่าได้

3. วัดอุณหภูมิที่อากาศ โดยใช้เทอร์โมคัปเปิลและบันทึกอุณหภูมิตามตำแหน่งที่กำหนด ดังรูปที่ 3.1

4. วัดความเข้มรังสีอาทิตย์รวมที่ตกกระทบบนระนาบ ตัวเก็บรังสีโดยใช้ไพรานอมิเตอร์ (Pyranometer)

5. รวบรวมข้อมูลที่ได้แล้วคำนวณค่าประสิทธิภาพทางความร้อนของเครื่องอบแห้งตามสมการที่ 2.6

ขั้นที่ 3 ศึกษาอัตราการอบแห้ง

1. เตรียมพริกแดง 10 kg ความชื้นเริ่มต้นประมาณ 280% d.b ทำการอบแห้งจนเหลือความชื้นสุดท้ายประมาณ 14% d.b ขณะอบแห้งบันทึกค่ามวลที่เปลี่ยนแปลงทุกๆ 20 นาที ตั้งแต่เวลา 9.00 น.-15.00 น. ของทุกวันการอบแห้ง

2. นำข้อมูลการเปลี่ยนแปลงของมวลระหว่างการอบแห้งมาคำนวณหาอัตราการอบแห้งตามสมการที่ 2.7

ตอนที่ 3 ศึกษาสมการอบแห้งชั้นบาง

ขั้นที่ 1 ศึกษาความชื้นสมดุลของพริกแดง

1. เตรียมพริกแดง 0.5 กิโลกรัม ที่ผ่านการอบแห้งจนเหลือความชื้นสุดท้ายประมาณ 14% d.b จากขั้นที่ 3 ของตอนที่ 2

2. อบแห้งพริกด้วยเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบอูโมงค์ลม จนมวลของพริกแดงไม่เปลี่ยนแปลง ตั้งแต่เวลา 9.00 น.-15.00 น. ของทุกวันการอบแห้งเพื่อหาค่าความชื้นสมดุล

3. นำพริกแดงไปหาความชื้นสมดุล

ขั้นที่ 2 การวิเคราะห์หาสมการอบแห้งชั้นบางที่เหมาะสมที่สุด

1. คำนวณหาอัตราส่วนความชื้นในแต่ละเวลาการอบแห้ง (ดูรายละเอียดภาคผนวก ง)

2. นำอัตราส่วนความชื้นและเวลามาวิเคราะห์การถดถอยแบบไม่เป็นเส้นตรง (Non

linear regression) (ดูรายละเอียด ภาคผนวก จ) เพื่อหาค่าคงที่ของสมการโดยใช้สมการของ Henderson, Logarithmic, Two term, Page และ Lewis (สมการที่ 2.11 - 2.15)

3. ใช้ค่าสัมประสิทธิ์ตัวกำหนด (Coefficient of determination : R^2) ไควสแควร์ (Chi-square : χ^2) เป็นดัชนีบ่งชี้ที่แสดงถึงความสามารถในการทำนายของสมการ



มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม
RAJABHAT MAHASARAKHAM UNIVERSITY

บทที่ 4

ผลการวิจัยและวิเคราะห์ข้อมูล

ผลการวิจัย การออกแบบ สร้างเครื่อง และการศึกษาหาสมรรถนะเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบอุโมงค์ลมสำหรับอบแห้งพริกแดง โดยผลการวิจัยแบ่งออกเป็น 3 ตอน ดังนี้

4.1 ผลการออกแบบและสร้างเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบอุโมงค์ลมสำหรับอบแห้งพริกแดง

4.1.1 ตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบลูกฟูกลอนเล็ก

4.1.2 ห้องอบแห้ง

4.1.3 เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบอุโมงค์ลม

4.2 ผลการศึกษาประสิทธิภาพเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์สำหรับอบแห้งพริกแดง

4.2.1 ประสิทธิภาพตัวเก็บรังสีอาทิตย์

4.2.2 ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของระบบอบแห้ง

4.2.3 อัตราการอบแห้ง

4.3 ผลการศึกษาสมการอบแห้งชั้นบาง

4.3.1 การหาความชื้นสมดุล

4.3.2 การวิเคราะห์หาสมการอบแห้งชั้นบางที่เหมาะสมที่สุด

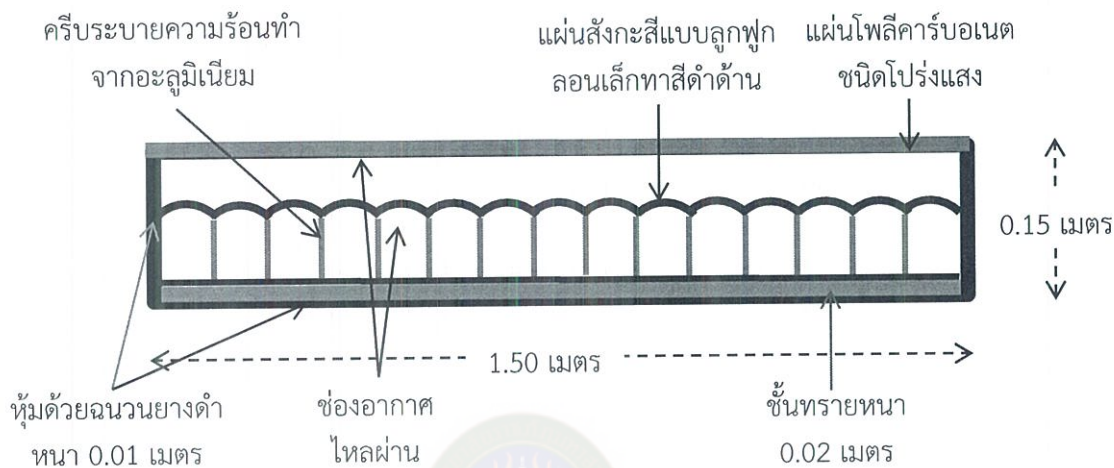
4.1 ผลการออกแบบเครื่องอบแห้งและสร้างเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบอุโมงค์ลมสำหรับอบแห้งพริกแดง

จากเงื่อนไขการออกแบบเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบอุโมงค์ลมสำหรับอบแห้งพริกแดง โดยการออกแบบคำนึงถึงปริมาณความร้อนที่ระเหยน้ำออกจากพริกแดง ทำให้ได้ผลการออกแบบดังนี้

4.1.1 ตัวเก็บรังสีดวงอาทิตย์แบบลูกฟูกลอนเล็ก

จากเงื่อนไขการออกแบบตัวเก็บรังสีอาทิตย์ เมื่อนำมาคำนวณหาขนาดของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ (ดูรายละเอียด ภาคผนวก ง) ที่มีรูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้า สำหรับอบแห้งพริกแดง 10 กิโลกรัม ความชื้นเริ่มต้นประมาณ 300% มาตรฐานแห้ง พบว่า ตัวเก็บรังสีดวงอาทิตย์มีพื้นที่เท่ากับ 1.6 ตารางเมตร โดยมีขนาดความกว้าง 1.50 เมตร ยาว 1.06 เมตร สูง 0.20 เมตร ติดตั้งตัวเก็บรังสีหันไปทางทิศใต้ เพื่อให้รับรังสีอาทิตย์ได้ตลอดทั้งวัน ด้านบนตัวเก็บรังสีดวงอาทิตย์ปิดด้วยแผ่นโพลีคาร์บอเนตหนา 0.005 เมตร ด้านในตัวเก็บรังสีอาทิตย์และแผ่นรับรังสีดวงอาทิตย์ทาด้วยสีดำด้าน เพื่อเพิ่มความสามารถในการดูดกลืนรังสีอาทิตย์ให้ได้มากขึ้น ด้านล่างของตัวเก็บรังสีอาทิตย์มีการติดตั้งครีบริบายความร้อนซึ่งทำด้วยอะลูมิเนียมจำนวน 14 ครีบริบาย โดยแต่ละครีบริบายห่างกันประมาณ 10 เซนติเมตร เพื่อเพิ่มความสามารถในการระบายความร้อนจากตัวเก็บรังสีอาทิตย์ให้กับอากาศร้อนสำหรับใช้ในการ

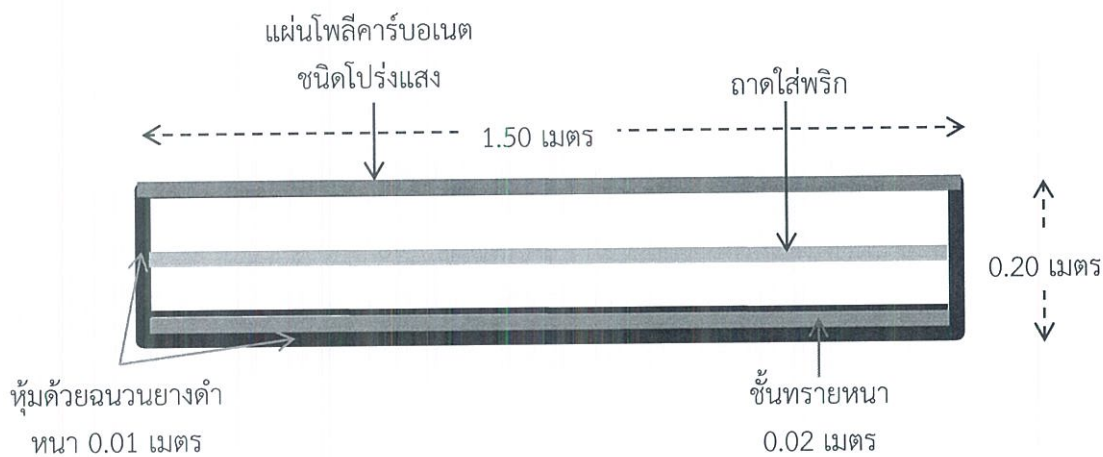
อบแห้ง ด้านล่างของตัวเก็บรังสีดวงอาทิตย์ จะใส่ทรายให้ทั่วพื้นที่ตัวเก็บรังสีดวงอาทิตย์ ซึ่งหนา ประมาณ 2 เซนติเมตร และคลุมด้วยสังกะสีแผ่นเรียบซึ่งทาสีดำด้าน ด้านล่างและด้านข้างของตัวเก็บ รังสีดวงอาทิตย์ จะหุ้มด้วยฉนวนยางดำเพื่อป้องกันการสูญเสียความร้อน ดังภาพที่ 4.1



ภาพที่ 4.1 ภาคตัดขวางโครงสร้างและส่วนประกอบของตัวเก็บรังสีอาทิตย์

4.1.2 ห้องอบแห้ง

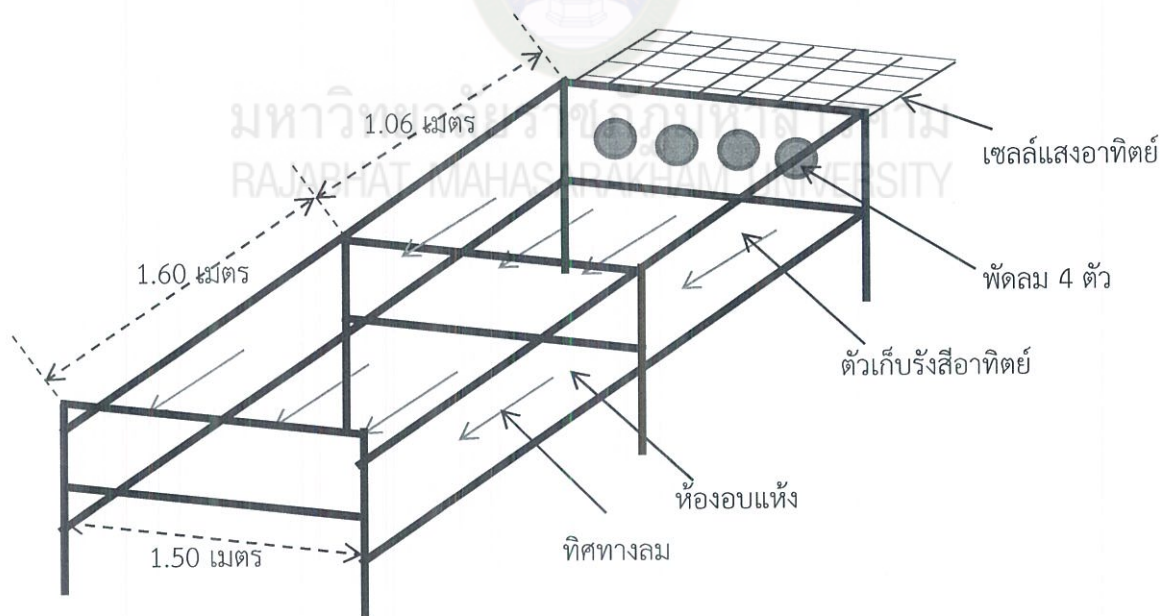
จากเงื่อนไขการออกแบบห้องอบแห้ง เมื่อนำมาคำนวณหาขนาดห้องอบแห้ง (ดูรายละเอียดภาคผนวก ง) ที่มีรูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้า สำหรับวางพริกแดง มวล 10 กิโลกรัม ความชื้นเริ่มต้น 300% มาตรฐานแห้ง พบว่า ขนาดของห้องอบแห้งต้องมีพื้นที่ประมาณ 2.4 ตารางเมตร โดยมีความกว้าง 1.5 เมตร ยาว 1.6 เมตร และความสูงของห้องอบแห้ง 0.20 เมตร ด้านล่างของห้องอบแห้งจะใส่ทรายให้ทั่วพื้นที่ห้องอบแห้ง ซึ่งหนาประมาณ 0.02 เมตร และคลุมด้วยสังกะสีแผ่นเรียบซึ่งทาสีดำด้าน ผึงและด้านล่างห้องอบแห้งบุด้วยฉนวนยางดำหนา 0.01 เมตร เพื่อป้องกันการสูญเสียความร้อน ด้านบนห้องอบแห้งปิดด้วยแผ่นโพลีคาร์บอนเนตหนา 0.005 เมตร เพื่อลดการสูญเสียความร้อนและทำให้เกิดสภาวะเรือนกระจก ดังภาพที่ 4.2



ภาพที่ 4.2 ภาคตัดขวางโครงสร้างและส่วนประกอบของห้องอบแห้ง

4.1.3 เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบอุโมงค์ลม

เมื่อนำตัวเก็บรังสีอาทิตย์และห้องอบแห้งที่ออกแบบไว้แล้ว นำมาประกอบเข้าด้วยกัน จะได้ดังภาพที่ 4.3 ซึ่งการพาความร้อนจากตัวเก็บรังสีอาทิตย์ไปยังห้องอบแห้งจะเป็นการพาความร้อนแบบบังคับ โดยติดตั้งพัดลมคอมพิวเตอรืขนาด 12 โวลต์ 4 ตัว ไว้ที่ตัวเก็บรังสีอาทิตย์ เพื่อเป่าความร้อนจากตัวเก็บรังสีอาทิตย์ไปยังห้องอบแห้ง โดยอาศัยเซลล์แสงอาทิตย์ขนาด 17.5 โวลต์ 40 วัตต์ และแบตเตอรี่ 12 โวลต์ เป็นแหล่งพลังงานไฟฟ้าให้กับพัดลมคอมพิวเตอรื

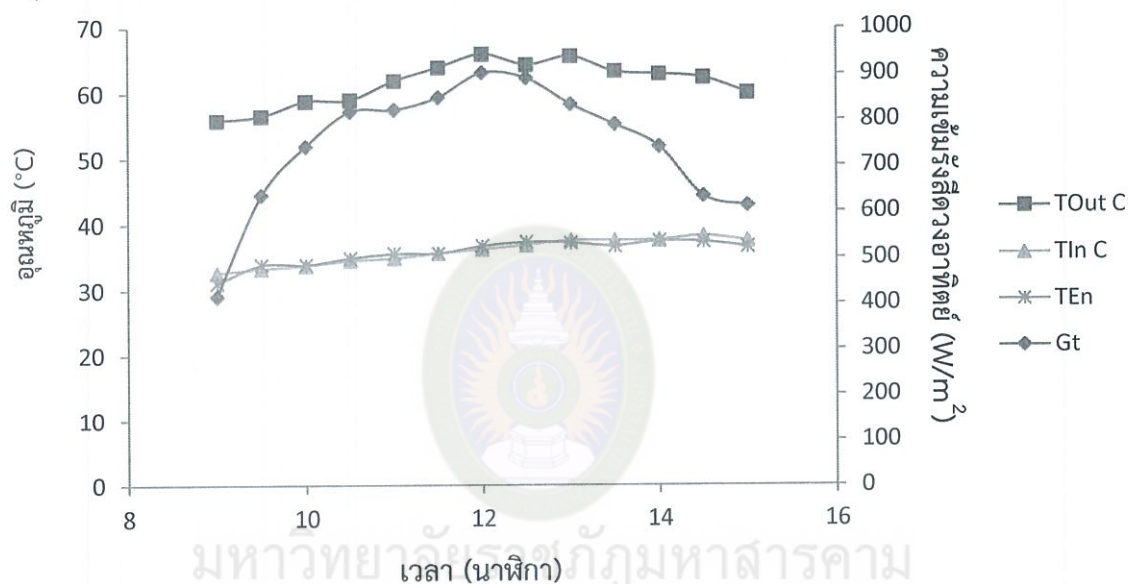


ภาพที่ 4.3 โครงสร้างเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบอุโมงค์ลม

4.2 ผลการศึกษาประสิทธิภาพเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบอุโมงค์ลมสำหรับอบแห้งพริกแดง

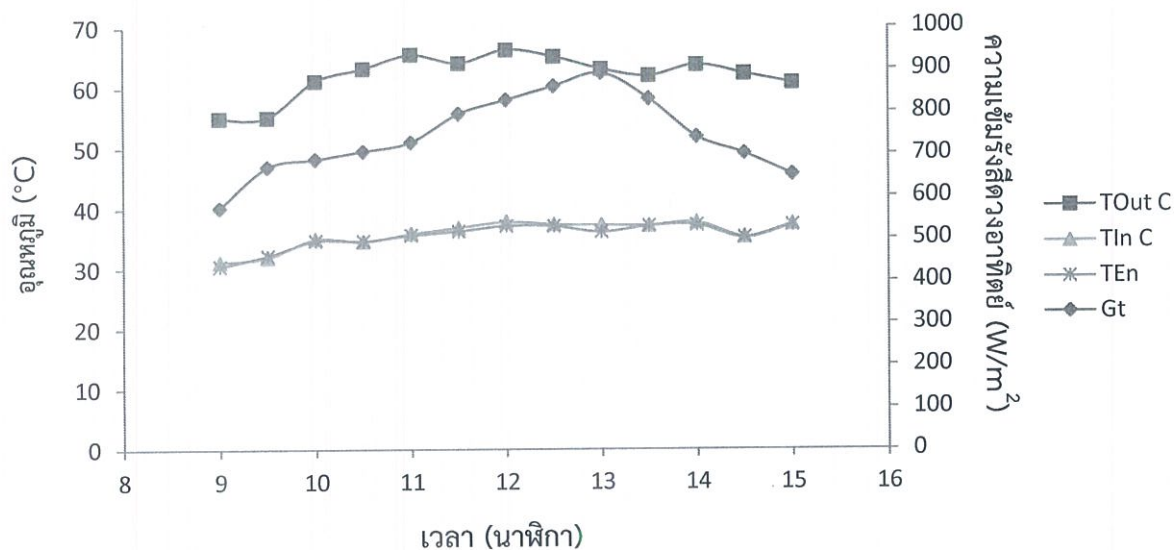
4.2.1 การศึกษาประสิทธิภาพตัวเก็บรังสีอาทิตย์

จากการศึกษาประสิทธิภาพตัวเก็บรังสีอาทิตย์ โดยทำการวัดอุณหภูมิที่อากาศทางเข้า (T_{InC}) และทางออก (T_{OutC}) ตัวเก็บรังสีอาทิตย์ อุณหภูมิแวดล้อม (T_{En}) และความเข้มรังสีอาทิตย์ (G_T) โดยทำการทดลองและเก็บข้อมูลตั้งแต่เวลา 09.00 น.-15.00 น. ตั้งแต่วันที่ 13-15 มิถุนายน 2558 ซึ่ง ได้ผลการทดลองดังแสดงในภาพที่ 4.4-4.6



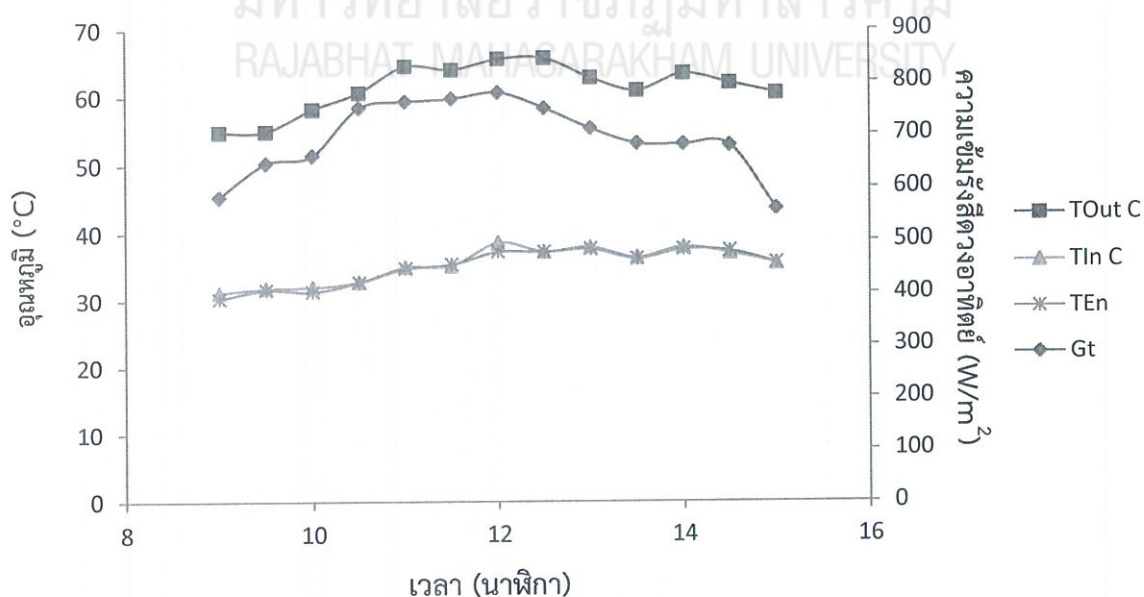
ภาพที่ 4.4 กราฟอุณหภูมิแวดล้อม (T_{En}) อุณหภูมิทางเข้า (T_{InC}) และทางออก (T_{OutC}) ของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ และความเข้มรังสีอาทิตย์ (G_T) เทียบกับเวลา (13 มิถุนายน 2558)

จากภาพที่ 4.4 พบว่า อุณหภูมิแวดล้อมอยู่ระหว่าง $31.04-37.36^{\circ}\text{C}$ อุณหภูมิทางเข้าตัวเก็บรังสีอยู่ระหว่าง $32.64^{\circ}\text{C}-38.24^{\circ}\text{C}$ อุณหภูมิทางออกตัวเก็บรังสีอยู่ระหว่าง $55.87^{\circ}\text{C}-65.95^{\circ}\text{C}$ และความเข้มรังสีอาทิตย์อยู่ระหว่าง $415-902\text{ W/m}^2$



ภาพที่ 4.5 กราฟอุณหภูมิแวดล้อม (T_{En}) อุณหภูมิทางเข้า (T_{InC}) และทางออก (T_{OutC}) ของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ และความเข้มรังสีอาทิตย์ (G_t) เทียบกับเวลา (14 มิถุนายน 2558)

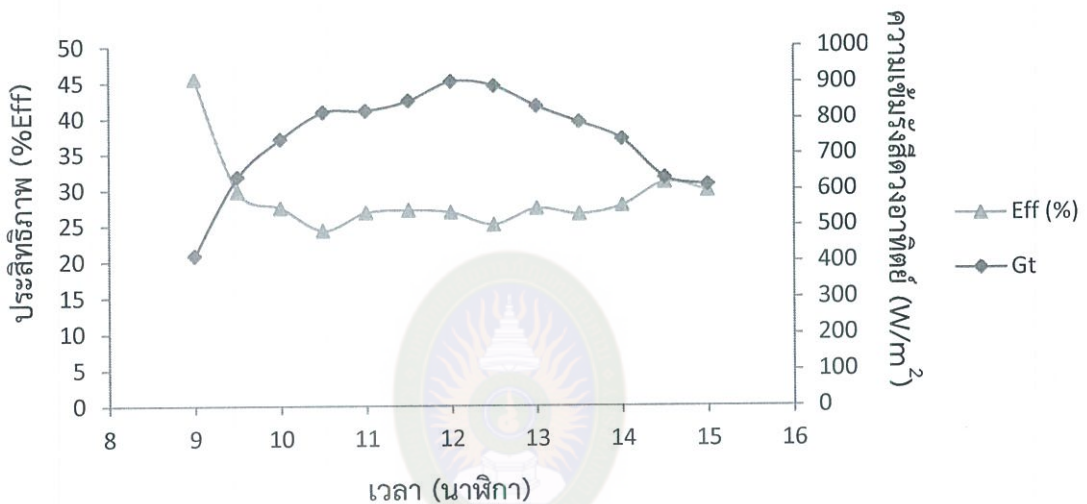
จากรูปที่ 4.5 พบว่า อุณหภูมิแวดล้อมอยู่ระหว่าง 30.43°C - 37.20°C อุณหภูมิทางเข้าตัวเก็บรังสีอยู่ระหว่าง 31.14°C - 37.76°C อุณหภูมิทางออกตัวเก็บรังสีอยู่ระหว่าง 54.98°C - 66.24°C และความเข้มรังสีอาทิตย์อยู่ระหว่าง 573 - 891 W/m^2



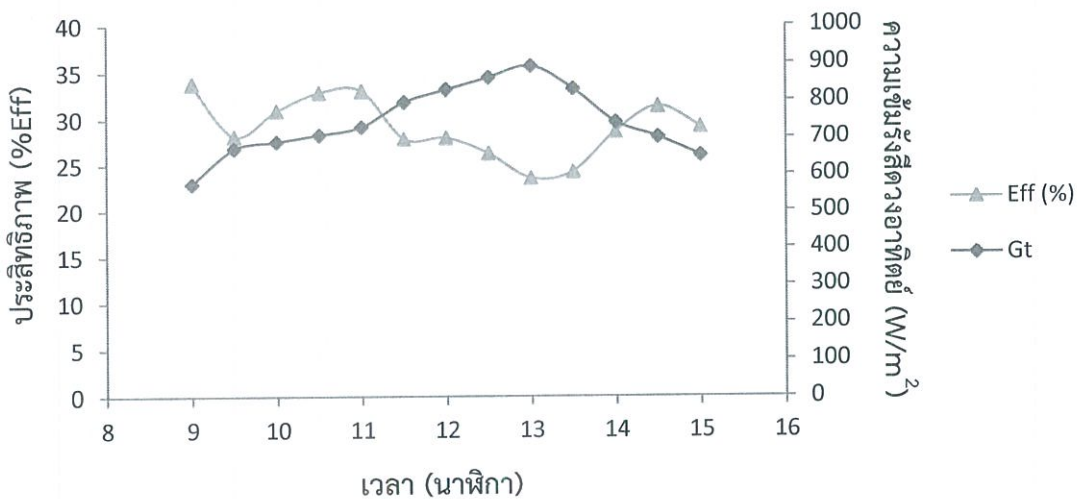
ภาพที่ 4.6 กราฟอุณหภูมิแวดล้อม (T_{En}) อุณหภูมิทางเข้า (T_{In}) และทางออก (T_{Out}) ของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ และความเข้มรังสีอาทิตย์ (G_t) เทียบกับเวลา (15 มิถุนายน 2558)

จากภาพที่ 4.6 พบว่า อุณหภูมิแวดล้อมอยู่ระหว่าง 30.26°C - 37.55°C อุณหภูมิทางเข้าตัวเก็บรังสีอยู่ระหว่าง 31.23°C - 38.54°C อุณหภูมิทางออกตัวเก็บรังสีอยู่ระหว่าง 54.78°C - 65.55°C และความเข้มรังสีอาทิตย์อยู่ระหว่าง 582 - 779 W/m^2

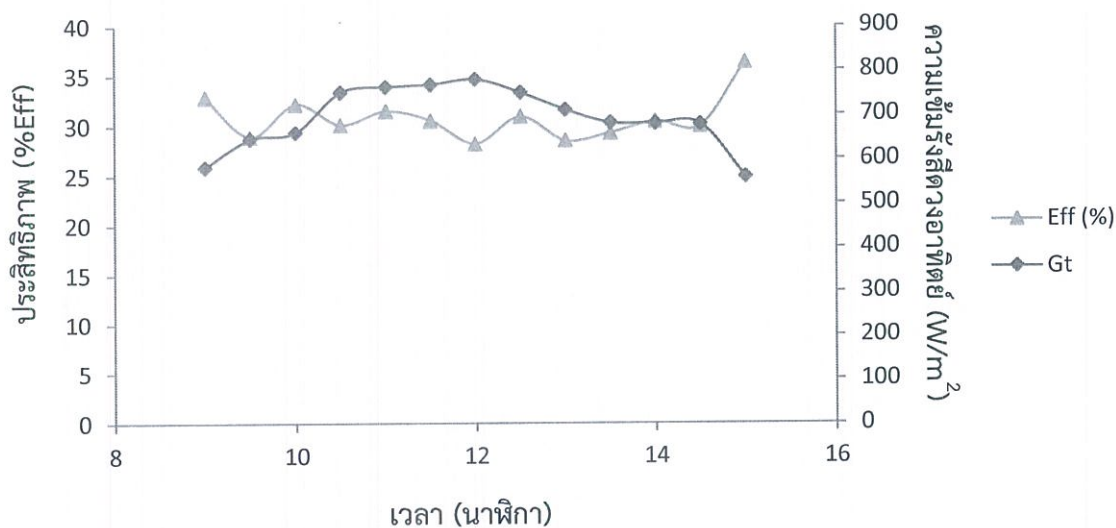
เมื่อนำข้อมูลอัตราการไหลเชิงมวล (\dot{m}) พื้นที่ตัวเก็บรังสีอาทิตย์ (A_c) อุณหภูมิทางเข้า (T_{in}) และทางออก (T_{out}) ตัวเก็บรังสีอาทิตย์ และความเข้มรังสีอาทิตย์ (G_t) มาคำนวณหาประสิทธิภาพของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ จะได้ผลการทดลองดังแสดงในภาพที่ 4.7-4.10



ภาพที่ 4.7 กราฟความเข้มรังสีอาทิตย์ (G_t) และประสิทธิภาพของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ (%Eff) เทียบกับเวลา (13 มิถุนายน 2558)



ภาพที่ 4.8 กราฟความเข้มรังสีอาทิตย์ (G_t) และประสิทธิภาพของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ (%Eff) เทียบกับเวลา (14 มิถุนายน 2558)



ภาพที่ 4.9 กราฟความเข้มรังสีอาทิตย์ (G_t) และประสิทธิภาพของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ (%Eff) เทียบกับเวลา (15 มิถุนายน 2558)

จากภาพที่ 4.7-4.9 พบว่า ประสิทธิภาพของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ (%Eff) อยู่ในช่วง 25-45 % สำหรับค่าความแตกต่างอุณหภูมิทางเข้าและทางออก ($T_{Out} - T_{In}$) แผงรับรังสีอาทิตย์ ความเข้มรังสีอาทิตย์ (G_t) และประสิทธิภาพของแผงรับรังสีอาทิตย์ (%Eff) เฉลี่ย ของแต่ละวันในการทดลอง จะแสดงในตารางที่ 4.1

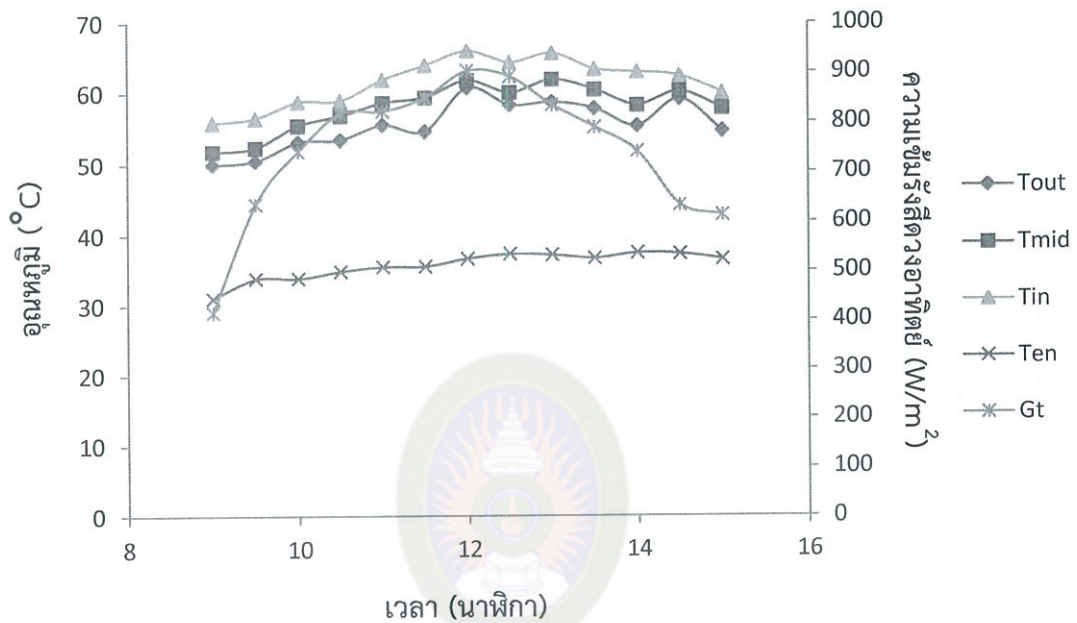
ตารางที่ 4.1 ค่าความแตกต่างอุณหภูมิทางเข้าและทางออก ($T_{Out} - T_{In}$) ตัวเก็บรังสีอาทิตย์ ความเข้มรังสีอาทิตย์ (G_t) และประสิทธิภาพของแผงรับรังสีอาทิตย์ (%Eff) เฉลี่ย ของแต่ละวันในการทดลอง

วัน/เดือน/ปี	$T_{Out} - T_{In}$ (°C)	G_t (W/m ²)	Eff (%)
13/06/58	25.70	744.46	28.84
14/06/58	26.29	743.07	29.04
15/06/58	26.08	692.53	30.72

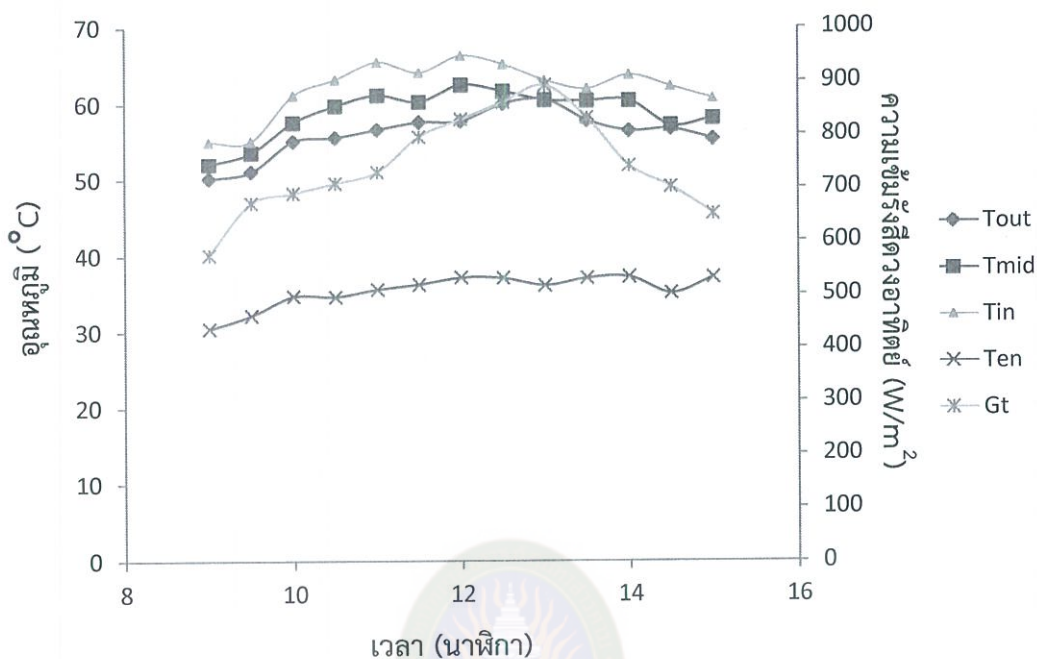
จากตารางพบว่า ค่าความแตกต่างของอุณหภูมิทางเข้าและทางออก ($T_{Out} - T_{In}$) แผงรับรังสีอาทิตย์ ในแต่ละวันการทดลองมีค่าใกล้เคียงกัน ส่งผลให้ประสิทธิภาพมีค่าใกล้เคียงกันด้วย โดยวันที่ 15 มิถุนายน 2558 เครื่องอบแห้งมีประสิทธิภาพเฉลี่ยมากที่สุด 30.72 % ซึ่งอาจจะมีส่วนมาจากในวันที่ 15 มิถุนายน 2558 สภาพอากาศมีความชื้นสัมพัทธ์ต่ำทำให้ค่าความแตกต่างของอุณหภูมิทางเข้าและทางออก ($T_{Out} - T_{In}$) มีค่าสูง ในขณะที่ความเข้มรังสีแสงอาทิตย์มีค่าน้อย ส่งผลให้ประสิทธิภาพของแผงรับรังสีอาทิตย์มีค่ามาก

4.2.2 ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของระบบอบแห้ง

ในการทดลองอบแห้งพริกแดงด้วยเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบอุโมงค์ลมโดยใช้ทรายเป็นวัสดุกักเก็บความร้อนและติดตั้งครีบบระบายความร้อน และทำการวัดอุณหภูมิทางเข้า (T_{In}) อุณหภูมิตรงกลาง (T_{Mid}) และอุณหภูมิ (T_{Out}) ห้องอบแห้ง อุณหภูมิแวดล้อม (T_{En}) และความเข้มรังสีแสงอาทิตย์ (G_t) ได้ผลการทดลองดังแสดงในภาพที่ 4.10



ภาพที่ 4.10 กราฟอุณหภูมิทางเข้า (T_{In}) อุณหภูมิตรงกลาง (T_{Mid}) และอุณหภูมิทางออก (T_{Out}) ห้องอบแห้ง อุณหภูมิแวดล้อม (T_{En}) และความเข้มรังสีแสงอาทิตย์ (G_t) เทียบกับเวลา (13 มิถุนายน 2558)



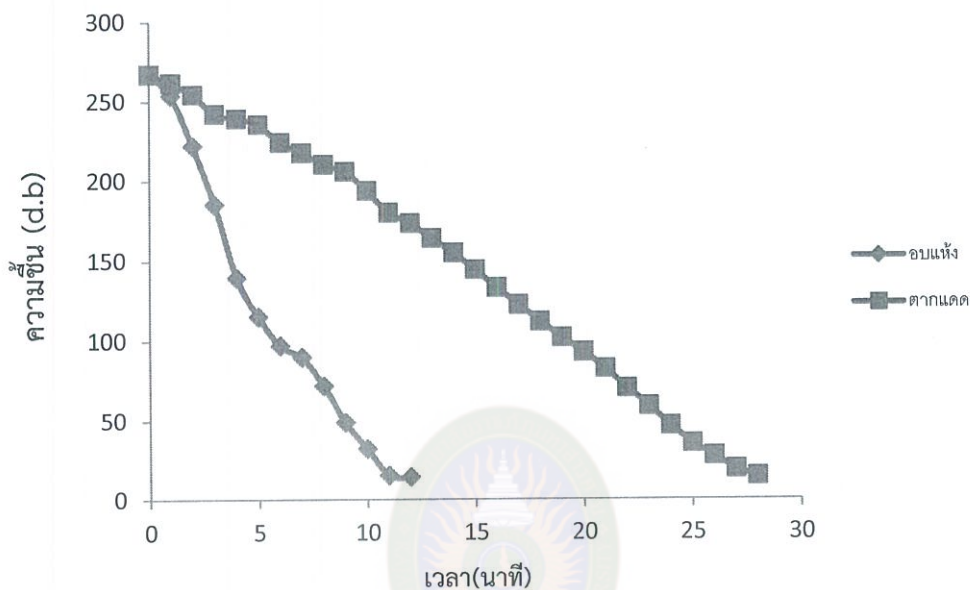
ภาพที่ 4.11 กราฟอุณหภูมิทางเข้า (T_{In}) อุณหภูมิตรงกลาง (T_{Mid}) และอุณหภูมิ (T_{Out}) ห้องอบแห้ง อุณหภูมิแวดล้อม (T_{En}) และความเข้มรังสีแสงอาทิตย์ (G_t) เทียบกับเวลา (14 มิถุนายน 2558)

จากการอบแห้งพริกแดงด้วยเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบอุโมงค์ลม ตั้งแต่เวลา 09.00 น. – 15.00 น. ของทุกวันการทดลอง พบว่าอุณหภูมิทางเข้า ตรงกลาง และทางออกห้องอบแห้งเฉลี่ยประมาณ 61.57 , 58.10 , 55.57 °C ตามลำดับ ซึ่งผลของอุณหภูมิของห้องอบแห้งที่แตกต่างกันดังกล่าวมีสาเหตุมาจากความชื้นของอากาศอบแห้ง โดยที่บริเวณทางเข้าห้องอบแห้งอากาศร้อนยังไม่ได้สัมผัสกับพริกแดง ทำให้อากาศยังไม่มี ความชื้นที่ถ่ายเทออกจากพริกแดงทำให้ทางเข้าห้องอบแห้งมีอุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิออกจากแผงรับรังสีอาทิตย์ ซึ่งยังมีค่าสูง แต่เมื่ออากาศร้อนสัมผัสกับผิวพริกแดงทำให้ความชื้นถ่ายเทจากผิวของพริกแดงมายังอากาศร้อน ส่งผลให้อากาศร้อนมีอุณหภูมิลดลง โดยที่ทางออกห้องอบแห้งมีอุณหภูมิกอากาศร้อนต่ำที่สุด

ในการศึกษาประสิทธิภาพเชิงความร้อนของระบบอบแห้ง พบว่า ระยะเวลาในการอบแห้งพริกแดงจนมีความชื้นสุดท้ายประมาณ 14 % มาตรฐานแห้ง ใช้เวลาประมาณ 12 ชั่วโมง มวลของน้ำที่ระเหยออกไป (m_w) 6.89 กิโลกรัม ค่าความเข้มแสงอาทิตย์เฉลี่ย 726.69 วัตต์ต่อตารางเมตร เมื่อนำค่าดังกล่าวมาคำนวณประสิทธิภาพเชิงความร้อนของระบบอบแห้ง พบว่า ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของระบบอบแห้งเท่ากับ 12.4 %

4.2.3 อัตราการอบแห้ง

ในการอบแห้งพริกแดงด้วยเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบอุโมงค์ลมโดยใช้ทรายเป็นวัสดุกักเก็บความร้อนและติดตั้งครีบริบายความร้อน เพื่อให้พริกแดงมีความชื้นสุดท้ายประมาณ 14 %มาตรฐานแห้ง ซึ่งผลการเปลี่ยนแปลงความชื้นในแต่ละเวลาการอบแห้ง จะแสดงดังภาพที่ 4.11



ภาพที่ 4.12 กราฟความชื้นที่ลดลงในแต่ละเวลาการอบแห้งเทียบกับการตากแดด

จากภาพที่ 14.2 พบว่า ลักษณะของกราฟความชื้นที่ลดลงตามเวลาไม่สม่ำเสมอ เนื่องจากความร้อนที่ใช้ในการไล่ความชื้นออกจากพริกแดงเป็นพลังงานแสงอาทิตย์ซึ่งไม่มีความสม่ำเสมอ เพราะในช่วงเวลาการทดลองอยู่ในฤดูฝน ซึ่งมีก้อนเมฆเป็นจำนวนมากมาบดบังรังสีอาทิตย์ ทำให้ค่าความเข้มแสงอาทิตย์มีค่าไม่สม่ำเสมอ ส่งผลให้ค่าความชื้นที่เปลี่ยนแปลงในแต่ละเวลาไม่สม่ำเสมอ ด้วย การอบแห้งพริกแดงเพื่อให้พริกแดงมีความชื้นสุดท้ายประมาณ 14 % มาตรฐานแห้ง จะใช้ระยะเวลาในการอบแห้งประมาณ 12 ชั่วโมง และอัตราการอบแห้งเท่ากับ 0.57 กิโลกรัมต่อชั่วโมง ซึ่งใช้เวลาน้อยกว่าการตากแดด 16.40 ชั่วโมง (ดูรายละเอียดภาคผนวก ก)

4.3 ผลการศึกษาสมการอบแห้งชั้นบาง

4.3.1 การหาความชื้นสมดุล

จากการศึกษาการอบแห้งพริกแดงด้วยเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบอุโมงค์ลม โดยใช้ทรายวัสดุสะสมความร้อน และติดตั้งครีบริบายความร้อนด้านล่างของแผงรับรังสีดวงอาทิตย์ เมื่ออบแห้งพริกจนถึงความชื้นสมดุล พบว่า ค่าความชื้นสมดุลของพริกแดงมีค่าประมาณ 12% มาตรฐานแห้ง ซึ่งผลการทดลองนี้มีความแตกต่างไปจากงานวิจัยของ ศุภฤกษ์ ชามงคลประเดิษฐ์ และคณะ (2550) โดยทำการตากแห้งพริกเป็นระยะเวลา 12 วัน พบว่า ค่าความชื้นสมดุลของพริกมีค่า

10% มาตรฐานแห้ง ซึ่งมีค่าสูงกว่างานวิจัยนี้อาจจะเป็นเพราะว่าในงานวิจัยนี้ในการทดลองนี้อบแห้งพริกจนถึงความชื้นสมดุล ใช้เวลาอบแห้งเพียง 16 ชั่วโมง และอบแห้งพริกในฤดูฝน ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศจะมีค่าสูง ประกอบกับมีเมฆมากและมามบดบังรังสีดวงอาทิตย์ ทำให้อุณหภูมิภายในห้องอบแห้งมีค่าต่ำกว่าช่วงที่มีท้องฟ้าโปร่ง ทำให้ค่าความชื้นสมดุลมีค่าสูงกว่า

4.3.2 การวิเคราะห์หาสมการอบแห้งชั้นบางที่เหมาะสมที่สุด

การอบแห้งพริกแดงด้วยเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบอุโมงค์ลม โดยกระบวนการลดความชื้นจะเริ่มเมื่อตัวกลางอบแห้งพัดผ่านผิวพริก ความร้อนจะถูกถ่ายเทไปยังผิวของพริกแดงและความชื้นจะระเหยออกมาด้วยความร้อนแฝงของการเกิดไอ ไอน้ำจะแพร่ผ่านฟิล์มอากาศและถูกพัดพาไปโดยตัวกลางที่เคลื่อนที่ สภาวะดังกล่าวจะทำให้พริกแดงมีความดันไอที่ผิวหน้าต่ำกว่าความดันไอด้านใน เป็นผลให้เกิดความแตกต่างของความดันไอน้ำทำให้พริกแดงชั้นด้านในจะมีความดันไอสุง และค่อยๆ ลดต่ำลงเมื่อชั้นของพริกเข้าใกล้ตัวกลางอบแห้ง ความแตกต่างนี้ทำให้เกิดแรงดันเพื่อไล่น้ำออกจากพริกแดง

ในการวิเคราะห์หาสมการอบแห้งชั้นบางที่เหมาะสมสำหรับทำนายค่าความชื้นและเวลาการอบแห้งพริกแดงด้วยเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบอุโมงค์ลม นั้นจำเป็นต้องทราบค่าความชื้นที่เปลี่ยนแปลงในแต่ละเวลา ซึ่งคำนวณได้จากน้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงในแต่ละเวลา เมื่อทราบค่าความชื้นจะสามารถคำนวณหาอัตราส่วนความชื้นได้ จากนั้นนำอัตราส่วนความชื้นและเวลามาวิเคราะห์การถดถอยแบบไม่เป็นเชิงเส้นเพื่อหาค่าคงที่ของสมการอบแห้งชั้นบาง และใช้ค่าสัมประสิทธิ์ตัวกำหนด (R^2) และค่าไคสแควร์ (χ^2) เป็นดัชนีบ่งชี้ที่แสดงถึงความสามารถในการทำนายของสมการ โดยสมการที่สามารถทำนายได้เหมาะสมที่สุดจะมีค่า R^2 และ χ^2 สูงและต่ำที่สุด สำหรับค่าคงที่ของสมการอบแห้งชั้นบางที่ได้จากการวิเคราะห์การถดถอยแบบไม่เป็นเชิงเส้น และค่า R^2 ค่า χ^2 จะแสดงดังตารางที่ 4.2-4.3 สำหรับข้อมูลของน้ำหนัก ความชื้นและอัตราส่วนความชื้นที่เปลี่ยนแปลงแต่ละเวลาระหว่างการอบแห้งจะแสดงในภาคผนวก ก

4.3.2.1 การวิเคราะห์หาค่าคงที่ในสมการอบแห้ง

การวิเคราะห์การถดถอยแบบไม่เป็นเชิงเส้นระหว่างอัตราส่วนความชื้น (MR) กับเวลา (t) เพื่อหาค่าคงที่ในสมการอบแห้งชั้นบาง ซึ่งผลการวิเคราะห์ดังแสดงในตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ผลการวิเคราะห์การถดถอยแบบไม่เป็นเชิงเส้นเพื่อหาค่าคงที่ของสมการอบแห้ง

Equation	Drying Constant			
	A	B	C	D
Henderson	1.109	0.204		
Logarithmic	1.496	0.104	-0.447	
Two term	0.554	0.204	0.554	0.204
Page	0.077	1.493		
Lewis	0.185			

4.3.2.2 การวิเคราะห์ความสามารถในการทำนายของสมการ

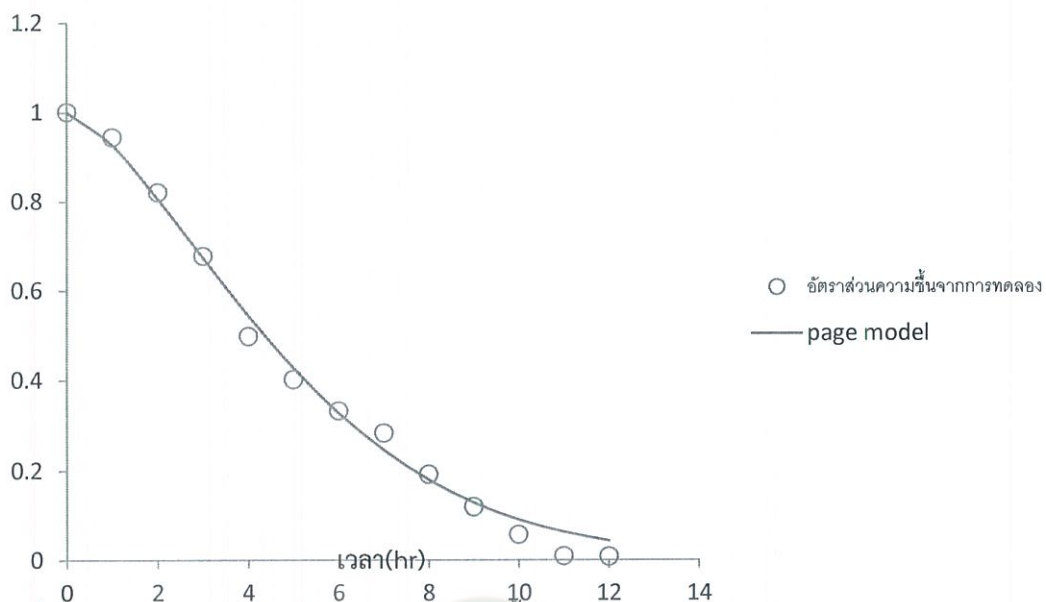
การวิเคราะห์ความสามารถของสมการในการทำนาย โดยใช้ R^2 และ χ^2 เป็นเกณฑ์ในการพิจารณาความสามารถของสมการในการทำนาย ซึ่งสมการที่สามารถทำนายได้ดีที่สุดจะต้องได้ค่า R^2 สูงและให้ค่า χ^2 ต่ำที่สุด ซึ่งผลการวิเคราะห์แสดงดังตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติโดยใช้ค่า R^2 และ χ^2

สถิติ	สมการ				
	Henderson	Two term	Log	Page	Lewis
R^2	0.949696	0.949631	0.988696	0.991669	0.907368
χ^2	0.005741	0.007172	0.001552	0.001031	0.007426

จากการวิเคราะห์เพื่อหาสมการอบแห้งชั้นบางที่เหมาะสมสำหรับทำนายค่าความชื้นและเวลาในการอบแห้งพริกแดงด้วยเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบอุโมงค์ลม โดยใช้ค่า R^2 และค่า χ^2 เป็นเกณฑ์ในการพิจารณาความสามารถของสมการในการทำนายพบว่า สมการของ Page สามารถทำนายอัตราการอบแห้งได้ดีที่สุดโดยให้ค่า R^2 มากและค่า χ^2 น้อยที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลองของ T.Y. Tunde-Akintunde ซึ่งทำการศึกษาสมการอบแห้งโดยอบแห้งพริก (chilli pepper) ด้วยเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ พบว่า สมการของ page สามารถทำนายได้เหมาะสมที่สุด ซึ่งสมการที่วิเคราะห์ได้มีสอดคล้องกับงานวิจัยครั้งนี้

เมื่อนำค่าอัตราส่วนความชื้นของพริกแดงจากการทดลองเปรียบเทียบกับผลการทำนายของสมการ page จะแสดงดังภาพที่ 4.13



รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นจากผลการทำนายของสมการ Page
เปรียบเทียบกับ การทดลอง

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

จากผลการออกแบบและสร้างเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบอุโมงค์ลมสำหรับอบแห้งพริกแดง ที่มีผลเริ่มต้นประมาณ 10 กิโลกรัม ความชื้นเริ่มต้นประมาณ 267 % มาตรฐานแห้งสามารถสรุปผลการทดลองได้ดังนี้

5.1.1 ออกแบบและสร้างเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบอุโมงค์ลมสำหรับอบแห้งพริกแดง

5.1.1.1 ตัวเก็บรังสีดวงอาทิตย์ มีรูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้า มีพื้นที่เท่ากับ 1.6 ตารางเมตร โดยมีขนาดความกว้าง 1.50 เมตร ยาว 1.06 เมตร สูง 0.20 เมตร ตัวเก็บรังสีหันไปทางทิศใต้ เพื่อให้รับรังสีอาทิตย์ได้ตลอดทั้งวัน ด้านบนตัวเก็บรังสีดวงอาทิตย์ปิดด้วยแผ่นโพลีคาร์บอเนตหนา 0.005 เมตร ด้านในตัวเก็บรังสีอาทิตย์และแผ่นรับรังสีดวงอาทิตย์ทำด้วยสีดำด้าน เพื่อเพิ่มความสามารถในการดูดกลืนรังสีอาทิตย์ให้ได้มากขึ้น ด้านล่างของตัวเก็บรังสีอาทิตย์มีการติดตั้งครีบบระบายความร้อนซึ่งทำด้วยอะลูมิเนียมจำนวน 14 ครีบ โดยแต่ละครีบห่างกันประมาณ 10 เซนติเมตร เพื่อเพิ่มความสามารถในการระบายความร้อนจากตัวเก็บรังสีอาทิตย์ให้กับอากาศร้อนสำหรับการอบแห้ง ด้านล่างของตัวเก็บรังสีดวงอาทิตย์ จะใส่ทรายให้ทั่วพื้นที่ตัวเก็บรังสีดวงอาทิตย์ ซึ่งหนาประมาณ 2 เซนติเมตร และคลุมด้วยสังกะสีแผ่นเรียบซึ่งทำสีดำด้าน ด้านล่างและด้านข้างของตัวเก็บรังสีดวงอาทิตย์ จะหุ้มด้วยฉนวนยางดำเพื่อป้องกันการสูญเสียความร้อน

5.1.1.2 ห้องอบแห้ง มีพื้นที่ประมาณ 2.4 ตารางเมตร โดยมีความกว้าง 1.5 เมตร ยาว 1.6 เมตร และความสูงของห้องอบแห้ง 0.20 เมตร ด้านล่างของห้องอบแห้งจะใส่ทรายให้ทั่วพื้นที่ห้องอบแห้ง ซึ่งหนาประมาณ 0.02 เมตร และคลุมด้วยสังกะสีแผ่นเรียบซึ่งทำสีดำด้าน ผนังและด้านล่างห้องอบแห้งบุด้วยฉนวนยางดำหนา 0.01 เมตร เพื่อป้องกันการสูญเสียความร้อน ด้านบนห้องอบแห้งปิดด้วยแผ่นโพลีคาร์บอเนตหนา 0.005 เมตร เพื่อลดการสูญเสียความร้อนและทำให้เกิดสภาวะเรือนกระจก

5.1.1.3 เมื่อนำตัวเก็บรังสีอาทิตย์และห้องอบแห้งที่ออกแบบไว้แล้ว นำมาประกอบเข้าด้วยกันจะได้เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบอุโมงค์ลมสำหรับอบแห้งพริกแดง ซึ่งการพาความร้อนจากตัวเก็บรังสีอาทิตย์ไปยังห้องอบแห้งจะเป็นการพาความร้อนแบบบังคับ โดยติดตั้งพัดลมคอมพิวเตอรืขนาด 12 โวลต์ 4 ตัว ไว้ที่ตัวเก็บรังสีอาทิตย์ สำหรับพาความร้อนจากตัวเก็บรังสีอาทิตย์ไปยังห้องอบแห้ง โดยอาศัยเซลล์แสงอาทิตย์ขนาด 17.5 โวลต์ 40 วัตต์ และแบตเตอรี่ 12 โวลต์ เป็นแหล่งพลังงานไฟฟ้าให้กับพัดลมคอมพิวเตอรื

5.1.2 ประสิทธิภาพเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบอุโมงค์ลมสำหรับอบแห้งพริกแดง

5.1.2.1 ประสิทธิภาพตัวเก็บรังสีอาทิตย์ (η_c) เฉลี่ยของทั้งสามวันการทดลองมีค่าเท่ากับ 29.53 % โดยมีค่าอุณหภูมิแตกต่างกันระหว่างทางเข้าและทางออกตัวเก็บรังสีอาทิตย์เฉลี่ยเท่ากับ 26.02 องศาเซลเซียส

5.1.2.2 ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของระบบอบแห้ง (η_{th}) มีค่าเท่ากับ 12.4 %

5.1.2.3 อัตราการอบแห้งพริกแดงด้วยเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบอุโมงค์ลม มีค่าเท่ากับ 0.57 kg/hr โดยใช้เวลาอบแห้ง 12 ชั่วโมง ซึ่งใช้เวลาน้อยกว่าการตากแดด 16.40 ชั่วโมง

5.1.3 สมการอบแห้งชั้นบาง

5.1.3.1 ค่าความชื้นสมดุลของพริกแดงเท่ากับ 12% มาตรฐานแห้ง

5.1.3.2 จากการวิเคราะห์เพื่อหาสมการอบแห้งชั้นบางที่เหมาะสมสำหรับทำนายค่าความชื้นและเวลาในการอบแห้งพริกแดงด้วยเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบอุโมงค์ลม พบว่าสมการของ Page สามารถทำนายอัตราการอบแห้งได้ดีที่สุดโดยให้ค่า R^2 มากและค่า χ^2 น้อยที่สุด

5.2 อภิปรายผล

5.2.1 เนื่องจากวันเวลาในการทดลองอยู่ในช่วงฤดูฝน ทำให้อากาศมีความชื้นสัมพัทธ์สูง มีเมฆมากมาบดบังรังสีอาทิตย์ ทำให้ความเข้มรังสีอาทิตย์ส่องลงมาพื้นโลกมีค่าน้อย ส่งผลให้พลังงานความร้อนที่ใช้ในการอบแห้งมีค่าน้อยลง ทำให้กระบวนการไล่ความชื้นออกจากพริกชี้หูแดงเพื่อให้ความชื้นสุดท้ายประมาณ 14% มาตรฐานแห้งจะใช้เวลาเพิ่มขึ้น

5.2.2 จากการศึกษาประสิทธิภาพเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบอุโมงค์ลม พบว่าประสิทธิภาพตัวเก็บรังสีอาทิตย์มีค่าค่อนข้างต่ำ อาจมีผลมาจากตัวเก็บรังสีอาทิตย์มีการดูดกลืนรังสีอาทิตย์น้อย ส่งผลให้การผลิตอากาศร้อนเพื่อไล่ความชื้นมีอุณหภูมิต่ำ

5.2.3 สำหรับการใช้เซลล์แสงอาทิตย์มีความเหมาะสมที่จะใช้เป็นแหล่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าให้แก่พัดลมเพื่อพาอากาศร้อนเคลื่อนที่ไปยังห้องอบแห้ง

5.3 ข้อเสนอแนะ

1. ควรพัฒนาระบบให้ความร้อนเสริม เช่น ความร้อนทิ้งจากเครื่องปรับอากาศ ระบบเซลล์แสงอาทิตย์ ระบบสะสมความร้อนจากเกลือหลอมเหลว (molten salt) เพื่อจะให้เครื่องอบทำงานได้ตลอดทั้ง กลางวันและกลางคืน และทุกฤดูกาล และประเมินความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์

2. การสร้างตัวเก็บรังสีควรเปลี่ยนชนิดฉนวน เพื่อให้ได้รับความร้อนมาใช้ประโยชน์ได้มากขึ้น และเพิ่มประสิทธิภาพของตัวเก็บรังสี

3. ความเร็วอากาศภายในห้องอบแห้งควรมีระดับต่ำ เพราะความเร็วอากาศที่ผ่านตัวเก็บรังสีอาทิตย์ มีผลให้อุณหภูมิของอากาศที่ออกจากตัวเก็บรังสีอาทิตย์ลดลงทำให้มีความร้อนที่กระแสอากาศได้รับเพื่อที่จะระเหยน้ำออกจากวัสดุอบแห้งมีค่าลดลง ส่งผลให้เวลาที่ใช้ในการอบแห้งจึงเพิ่มมากขึ้น



มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม
RAJABHAT MAHASARAKHAM UNIVERSITY

บรรณานุกรม

- กรมอุตุนิยมวิทยา. (2557). *สภาพอากาศโดยรวมทั่วประเทศ*. 7 มิถุนายน.
<http://www.tmd.go.th/thailand.php>.
- กัลยา วานิชย์บัญชา. (2554). *การวิเคราะห์ตัวแปรหลายตัวด้วย SPSS for Windows*. กรุงเทพฯ : จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- คณาจารย์ภาควิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร. (2548). *วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร*. กรุงเทพฯ : มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- จารุวัฒน์ เจริญจิต. (2555). เทคโนโลยีการอบแห้งด้วยรังสีอาทิตย์และแนวทางการพัฒนา. *KKU Res. J*, 2012, 17(1), 110-124.
- ธีรเดช ใหญ่บึก และคณะ. (2552). การพัฒนากระบวนการอบแห้งปลาด้วยเครื่องอบแห้งพลังงานร่วมแสงอาทิตย์-ไฟฟ้าภายใต้สภาพภูมิอากาศภาคใต้ของประเทศไทย. *วารสารมหาวิทยาลัยทักษิณ*, ปีที่ 12 (ฉบับที่ 3), ตุลาคม 2552 - มกราคม 2553.
- ธีระศักดิ์ หุตากร. (2552). การศึกษาสมรรถนะของตัวเก็บรังสีอาทิตย์แผ่นราบแบบร่องรูปตัววีสำหรับเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์, *การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย*, ครั้งที่ 47 พฤศจิกายน 2552 จังหวัดเชียงใหม่.
- กัลยา วานิชย์บัญชา. (2554). *การวิเคราะห์ตัวแปรหลายตัวด้วย SPSS for Windows*. กรุงเทพฯ : จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- พลังงาน, กระทรวง. (2556). *พลังงานแสงอาทิตย์*. กรุงเทพฯ.
- ราชกิจจานุเบกษา. (2553). *มาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชนเลขที่ มกษ 3001/2553 (พริกแห้ง)*.
- วีไล รังสาดทอง. (2547). *เทคโนโลยีการแปรรูปอาหาร*. กรุงเทพฯ : เท็กซ์แอนด์เจอร์นัลพับลิเคชั่น.
- วรบูรณ์ แก้วอัสตร. (2543). *การอบแห้งผลไม้โดยใช้ปริมาณความร้อนสำหรับอุตสาหกรรมขนาดเล็ก*. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี. หน้า 112
- คันสนีย์ แสนศิริพันธ์. (2546). *การพัฒนาเครื่องอบแห้งสตรอเบอรี่โดยใช้ความร้อนทิ้งจากคอนเดนเซอร์และพลังงานแสงอาทิตย์*. กรุงเทพฯ. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- ศุภฤกษ์ ชามงคลประดิษฐ์ และคณะ (2550). การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการอบแห้งพริกแบบต่อเนื่องโดยใช้กระบวนการอบแห้งตามเทคนิคฟลูอิดไดซ์เบด. *การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย*. 17-19 ตุลาคม 2550 จังหวัดชลบุรี.
- สุดธิดา อินทผลและคณะ (2551). การพัฒนาเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์. *วารสารวิชาการอุตสาหกรรมศึกษา*, ปีที่2 (ฉบับที่ 1), มกราคม – มิถุนายน 2551 (71-81).
- สมชาติ โสภณธณฤทธิ. (2540). *การอบแห้งเมล็ดพืชและอาหารบางประเภท*. กรุงเทพฯ : มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.

สมพล มะสีกะ (2550). การศึกษาสมรรถนะเครื่องกลั่นน้ำพลังงานแสงอาทิตย์ทรงพีระมิดที่มีตัวรับ
รังสีอาทิตย์แบบแผ่นราบเป็นอุปกรณ์เสริม. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต.
กรุงเทพฯ : คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.



มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม
RAJABHAT MAHASARAKHAM UNIVERSITY

Bibliography

- Aboul-Enein, S. and others. (2000). Parametric Study of Solar Air Heater With and Without Thermal Storage for Solar Drying Applications. *Renewable Energy*. 21 : 505-522.
- Atlanta, N.E. (2009). *ASHRAE Handbook Fundamentals*. American Society of Heating. pp. 53-54.
- karim, Md. (2006). Performance investigation of flat plate, vcorrugated and finned air collectors. *Energy*. pp. 452-470.
- Kashaninejad, M. and others. (2007). Thin Layer Drying Characteristics and Modeling of Pistachio Nuts. *Journal of Food Engineering*. 78 : 98-108.
- Kavak, E.(2008). Mathematical modelling of thin layer drying process of long green pepper in solar dryer and under open sun. *Energy Conversion and Management*. pp. 1367-1375
- Mohamad, A.A. (1997). High Efficiency Solar Air Heater. *Solar Energy*. 60(2) : 71-76.
- Naphon, P. and B. Kongtragool. (2003). Theoretical Study on Transfer Characteristics and Performance of the Flat-Plate Solar Air Heaters. *International Communications Heat and Mass Transfer*. 30(8) : 125-1136.
- Ozdemir, M. and Y.O. Devres.(1999). The Thin Layer Drying Characteristics of Hazelnuts During Roasting. *Journal of Food Engineering*. 42 : 225-233.
- T.Y. Tunde-Akintunde. (2011). Mathematical modeling of sun and solar drying of chilli pepper. *Renewable Energy*. 36 : 2139-2145.



มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม
RAJABHAT MAHASARAKHAM UNIVERSITY



ภาคผนวก ก

มวล ความชื้น และอัตราส่วนความชื้นของพริกแดงที่เปลี่ยนแปลงในแต่ละเวลาการอบแห้ง
เมื่ออบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบอุโมงค์ลม และการตากแดด

มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม
RAJABHAT MAHASARAKHAM UNIVERSITY

ตารางที่ ก-1 แสดงค่ามวล ค่าความชื้นและอัตราส่วนความชื้นของพริกแดงที่เปลี่ยนแปลงเมื่ออบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบอุโมงค์ลม (วันที่ 13 มิถุนายน 2558)

เวลา (นาฬิกา)	มวลพริกชี้หนูแดง (g)	ความชื้น (%d.b.)	อัตราส่วน ความชื้น (MR)
09.00	10000	267.5254511	1
09.20	9910.5	264.2360983	0.987076527
09.40	9759	258.6680878	0.965200481
10.00	9610	253.1919585	0.943685425
10.20	9406	245.6944393	0.914228571
10.40	8935	228.3839906	0.846217892
11.00	8748	221.5112647	0.819215775
11.20	8460	210.9265317	0.777629627
11.40	8201	201.4076225	0.740230974
12.00	7750.5	184.8506009	0.67518042
12.20	7370	170.8662575	0.62023761
12.40	6969	156.1284869	0.562334675
13.00	6504.5	139.0569297	0.495262573
13.20	6259	130.0341799	0.45981327
13.40	6006	120.735786	0.423280994
14.00	5842.5	114.7267448	0.399672191
14.20	5655.5	107.8540189	0.372670075
14.40	5481.5	101.459076	0.347545111
15.00	5355	96.80987908	0.329278973

ตารางที่ ก-2 แสดงค่ามวล ค่าความชื้นและอัตราส่วนความชื้นของพริกแดงที่เปลี่ยนแปลงเมื่ออบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบอุโมงค์ลม (วันที่ 14 มิถุนายน 2558)

เวลา (นาฬิกา)	มวลพริกชี้หนูแดง(g)	ความชื้น (%d.b.)	อัตราส่วน ความชื้น (MR)
09.00	5355	96.80987908	0.329278973
09.20	5272.5	93.77779411	0.317366274
09.40	5160.5	89.66150906	0.301193883
10.00	5009	84.09349847	0.279317837
10.20	4888.5	79.66481679	0.261918077
10.40	4669.5	71.61600941	0.230295278
11.00	4377	60.86588996	0.188059346
11.20	4197	54.25043184	0.162068004
11.40	4039	48.44352971	0.139253381
12.00	3879.5	42.58149877	0.116222164
12.20	3758.5	38.13444081	0.098750206
12.40	3590.5	31.96001323	0.07449162
13.00	3442	26.50226028	0.053048763
13.20	3178	16.79958837	0.014928127
13.40	3127.5	14.94358484	0.007636112
14.00	3110	14.3004153	0.005109176
14.20	3104.9	14.11297732	0.004372755
14.40	3101.2	13.97699291	0.003838488
15.00	3099.4	13.91083833	0.003578575

ตารางที่ ก-3 แสดงค่ามวลและค่าความชื้นของพริกแดงตากแดด (วันที่ 13 มิถุนายน 2558)

เวลา (นาฬิกา)	มวลพริกแดง (g)	ความชื้น (%d.b.)
09.00	2000	267.0061474
09.20	1987	264.6206074
09.40	1981.8	263.6663914
10.00	1970.5	261.5928067
10.20	1962.3	260.0880815
10.40	1949.3	257.7025415
11.00	1930.1	254.1792825
11.20	1910.9	250.6560235
11.40	1882.5	245.4445362
12.00	1863.2	241.9029269
12.20	1862.2	241.7194238
12.40	1859.6	241.2423158
13.00	1846.5	238.8384255
13.20	1839.7	237.5906046
13.40	1838.1	237.2969997
14.00	1826.5	235.1683641
14.20	1817.7	233.553537
14.40	1779.3	226.507019
15.00	1764.8	223.8462244

ตารางที่ ก-4 แสดงค่ามวลและค่าความชื้นของพริกแดงตากแดด (วันที่ 14 มิถุนายน 2558)

เวลา (นาฬิกา)	มวลพริกแดง (g)	ความชื้น (%d.b.)
09.00	1764.8	223.8462244
09.20	1755.2	222.0845949
09.40	1741.5	219.5706028
10.00	1728.8	217.2401138
10.20	1715.8	214.8545738
10.40	1704.5	212.7809891
11.00	1688.6	209.8632902
11.20	1683.5	208.9274245
11.40	1677.7	207.8631067
12.00	1665	205.5326177
12.20	1649	202.5965685
12.40	1633.1	199.6788696
13.00	1599.4	193.494816
13.20	1563.4	186.8887054
13.40	1543.3	183.2002936
14.00	1524.5	179.7504358
14.20	1516.2	178.2273603
14.40	1512.4	177.5300486
15.00	1489.2	173.2727773

ตารางที่ ก-5 แสดงค่ามวลและค่าความชื้นของพริกแดงตากแดด (วันที่ 15 มิถุนายน 2558)


เวลา (นาฬิกา)	มวลพริกแดง (g)	ความชื้น (%d.b.)
09.00	1489.2	173.2727773
09.20	1474.6	170.5936324
09.40	1453.2	166.6666667
10.00	1438.6	163.9875218
10.20	1423.9	161.2900266
10.40	1408.7	158.5007799
11.00	1389.2	154.92247
11.20	1369.7	151.34416
11.40	1350.2	147.7658501
12.00	1330.4	144.1324892
12.20	1311	140.5725296
12.40	1290.7	136.8474172
13.00	1270.1	133.0672539
13.20	1249.5	129.2870906
13.40	1231.3	125.9473346
14.00	1212.1	122.4240756
14.20	1193.2	118.9558675
14.40	1174	115.4326085
15.00	1155.1	111.9644004

ตารางที่ ก-6 แสดงค่ามวลและค่าความชื้นของพริกแดงตากแดด (วันที่ 16 มิถุนายน 2558)

เวลา (นาฬิกา)	มวลพริกแดง (g)	ความชื้น (%d.b.)
09.00	1155.1	111.9644004
09.20	1149.9	111.0101844
09.40	1128.1	107.0098174
10.00	1100.2	101.8900817
10.20	1077.7	97.7612625
10.40	1060.1	94.5316084
11.00	1052	93.04523351
11.20	1033.8	89.70547757
11.40	1014.3	86.12716763
12.00	994.8	82.54885769
12.20	974.8	78.87879622
12.40	955.6	75.35553721
13.00	927.5	70.19910083
13.20	905.7	66.19873383
13.40	886	62.58372328
14.00	866	58.9136618
14.20	844.5	54.96834572
14.40	814.5	49.46325351
15.00	798.8	46.58225525

ตารางที่ ก-7 แสดงค่ามวลและค่าความชื้นของพริกแดงตากแดด (วันที่ 17 มิถุนายน 2558)

เวลา (นาฬิกา)	มวลพริกแดง (g)	ความชื้น (%d.b.)
09.00	798.8	46.58225525
09.20	782.6	43.60950546
09.40	751.5	37.90255987
10.00	737.6	35.35186714
10.20	727.8	33.55353702
10.40	715.8	31.35150014
11.00	694	27.35113313
11.20	683.1	25.35094963
11.40	673	23.49756858
12.00	648	18.90999174
12.20	630	15.60693642
12.40	625	14.68942105
13.00	623.6	14.43251674
13.20	623.3	14.37746582
13.40	623	14.3224149



ภาคผนวก ข

อุณหภูมิในห้องอบแห้ง อุณหภูมิแวดล้อม และความชื้นรังสีอาทิตย์ ของการอบแห้งพริกแดงด้วยเครื่อง
อบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบอุโมงค์ลม

มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม
RAJABHAT MAHASARAKHAM UNIVERSITY

ตารางที่ ข-1 อุณหภูมิในห้องอบแห้ง อุณหภูมิแวดล้อม และความเข้มรังสีอาทิตย์ (วันที่ 13 มิถุนายน 2558)

Time (O'clock)	T _{Out} (°C)	T _{Mid} (°C)	T _{In} (°C)	T _{En} (°C)	G _t (W/m ²)
09.00	50.01	51.86	55.87	31.04	415
09.30	50.54	52.42	56.50	33.88	635
10.00	53.20	55.48	58.78	33.89	741
10.30	53.52	56.85	58.96	34.90	817
11.00	55.55	58.65	61.90	35.57	821
11.30	54.65	59.40	63.90	35.61	848
12.00	60.76	61.78	65.95	36.72	902
12.30	58.34	60.05	64.33	37.35	890
13.00	58.71	61.87	65.62	37.21	833
13.30	57.82	60.47	63.34	36.74	789
14.00	55.40	58.30	62.95	37.48	741
14.30	59.17	60.24	62.39	37.36	633
15.00	54.70	57.85	60.04	36.61	613

มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม
RAJABHAT MAHASARAKHAM UNIVERSITY

ตารางที่ ข-2 อุณหภูมิในห้องอบแห้ง อุณหภูมิแวดล้อม และความเข้มรังสีอาทิตย์ (วันที่ 14 มิถุนายน 2558)

Time (O'clock)	T _{Out} (°C)	T _{Mid} (°C)	T _{In} (°C)	T _{En} (°C)	G _t (W/m ²)
09.00	50.10	52.03	54.98	30.43	573
09.30	51.03	53.56	55.09	32.18	670
10.00	55.07	57.56	61.13	34.68	688
10.30	55.56	59.73	63.14	34.61	707
11.00	56.62	61.12	65.43	35.59	728
11.30	57.59	60.22	64.03	36.20	795
12.00	57.70	62.46	66.24	37.12	828
12.30	59.99	61.61	65.10	37.04	860
13.00	60.55	60.46	63.04	36.07	891
13.30	57.80	60.37	61.91	37.05	830
14.00	56.42	60.40	63.72	37.20	740
14.30	56.67	57.16	62.23	35.08	700
15.00	55.32	58.08	60.65	37.13	650

หมายเหตุ : T_{Out} คือ อุณหภูมิออกห้องอบแห้ง
 T_{Mid} คือ อุณหภูมิกลางห้องอบแห้ง
 T_{In} คือ อุณหภูมิเข้าห้องอบแห้ง
 T_{En} คือ อุณหภูมิแวดล้อม
 G_t คือ ความเข้มรังสีอาทิตย์

ภาคผนวก ค

อุดมภูมิทางเข้า-ออก แผงรับรังสีอาทิตย์ ความเข้มรังสีอาทิตย์และประสิทธิภาพตัวรับรังสีอาทิตย์



มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม
RAJABHAT MAHASARAKHAM UNIVERSITY

ตารางที่ ค-1 อุณหภูมิทางเข้า-ออก แผงรับรังสีอาทิตย์ ความเข้มรังสีอาทิตย์และประสิทธิภาพตัวรับรังสีอาทิตย์
ตั้งแต่เวลา 09.00 น.-15.00 น. (วันที่ 13 มิถุนายน 2558)

Time (O'clock)	G_t (W/m^2)	$T_{Out\ c}$ ($^{\circ}C$)	$T_{In\ c}$ ($^{\circ}C$)	$T_{Out\ c}-T_{In\ c}$ ($^{\circ}C$)	T_{En} ($^{\circ}C$)	η_c (%)
09.00	415	55.87	32.64	23.23	31.04	45.48
09.30	635	56.50	33.28	23.22	33.88	29.71
10.00	741	58.78	33.76	25.02	33.89	27.43
10.30	817	58.96	34.55	24.41	34.90	24.27
11.00	821	61.90	34.89	27.01	35.57	26.73
11.30	848	63.90	35.64	28.26	35.61	27.07
12.00	902	65.95	36.23	29.72	36.72	26.77
12.30	890	64.33	36.88	27.45	37.35	25.06
13.00	833	65.62	37.59	28.03	37.21	27.34
13.30	789	63.34	37.57	25.77	36.74	26.54
14.00	741	62.95	37.67	25.28	37.48	27.72
14.30	633	62.39	38.24	24.15	37.36	31.00
15.00	613	60.04	37.54	22.5	36.61	29.82
เฉลี่ย	744.46	61.57	35.88	25.69	35.72	28.84

ตารางที่ ค-2 อุณหภูมิทางเข้า-ออก แผงรับรังสีอาทิตย์ ความเข้มรังสีอาทิตย์และประสิทธิภาพตัวรับรังสีอาทิตย์
ตั้งแต่เวลา 09.00 น.-15.00 น. (วันที่ 14 มิถุนายน 2558)

Time (O'clock)	G_t (W/m^2)	$T_{out\ c}$ ($^{\circ}C$)	$T_{in\ c}$ ($^{\circ}C$)	$T_{out\ c}-T_{in\ c}$ ($^{\circ}C$)	T_{En} ($^{\circ}C$)	η_c (%)
09.00	573	54.98	31.14	23.84	30.43	33.80
09.30	670	55.09	31.89	23.2	32.18	28.13
10.00	688	61.13	34.97	26.16	34.68	30.89
10.30	707	63.14	34.56	28.58	34.61	32.84
11.00	728	65.43	35.85	29.58	35.59	33.01
11.30	795	64.03	36.78	27.25	36.20	27.85
12.00	828	66.24	37.76	28.48	37.12	27.95
12.30	860	65.10	37.34	27.76	37.04	26.23
13.00	891	63.04	37.21	25.83	36.07	23.55
13.30	830	61.91	37.14	24.77	37.05	24.25
14.00	740	63.72	37.67	26.05	37.20	28.60
14.30	700	62.23	35.23	27	35.08	31.34
15.00	650	60.65	37.35	23.3	37.13	29.12
เฉลี่ย	743.08	62.05	35.76	26.29	35.41	29.04

ตารางที่ ค-3 อุณหภูมิทางเข้า-ออก แผงรับรังสีอาทิตย์ ความเข้มรังสีอาทิตย์และประสิทธิภาพตัวรับรังสีอาทิตย์ ตั้งแต่เวลา 09.00 น.-15.00 น. (วันที่ 15 มิถุนายน 2558)

Time (O'clock)	G_t (W/m^2)	$T_{Out\ c}$ ($^{\circ}C$)	$T_{In\ c}$ ($^{\circ}C$)	$T_{Out\ c}-T_{In\ c}$ ($^{\circ}C$)	T_{En} ($^{\circ}C$)	η_c (%)
09.00	582	54.78	31.23	23.55	30.26	32.88
09.30	646	54.84	31.86	22.98	31.61	28.90
10.00	660	58.12	32	26.12	31.31	32.16
10.30	750	60.56	32.78	27.78	32.69	30.10
11.00	762	64.49	35	29.49	34.75	31.44
11.30	767	63.96	35.16	28.8	35.36	30.51
12.00	779	65.55	38.54	27.01	37.20	28.17
12.30	749	65.70	37.23	28.47	37.16	30.88
13.00	710	62.76	37.87	24.89	37.60	28.48
13.30	681	60.85	36.34	24.51	36.17	29.24
14.00	680	63.34	37.88	25.46	37.55	30.42
14.30	678	61.95	36.98	24.97	37.29	29.92
15.00	559	60.45	35.49	24.96	35.57	36.28
เฉลี่ย	692.53	61.33	35.26	26.08	34.96	30.72

หมายเหตุ : $T_{Out\ c}$ คือ อุณหภูมิออกตัวเก็บรังสี
 $T_{In\ c}$ คือ อุณหภูมิเข้าตัวเก็บรังสี
 T_{En} คือ อุณหภูมิแวดล้อม
 G_t คือ ความเข้มรังสีอาทิตย์
 η_c คือ ประสิทธิภาพของแผงรับรังสีอาทิตย์

ภาคผนวก ง
การหาความชื้นและการคำนวณอัตราส่วนความชื้นของพริกแดง



มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม
RAJABHAT MAHASARAKHAM UNIVERSITY

การหาความชื้นของพริกแดง

วัสดุและอุปกรณ์

1. ครอบอะลูมิเนียม
2. ตู้อบไฟฟ้า
3. เครื่องชั่งน้ำหนักความละเอียด 0.01 กรัม
4. พริกแดงสำหรับหาค่าความชื้น

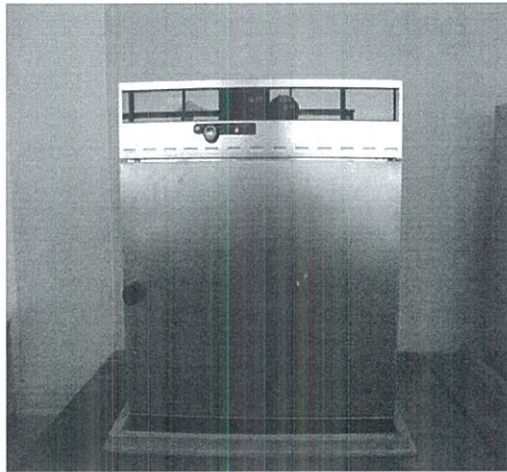
วิธีการทดลอง

1. ชั่งน้ำหนักครอบอะลูมิเนียม บันทึก



ภาพที่ ง-1 เครื่องชั่งน้ำหนักความละเอียด 0.0001 กรัม

2. เตรียมพริกแดงใส่ในครอบอะลูมิเนียม
3. ชั่งน้ำหนักของครอบ+พริกแดง บันทึกเป็นน้ำหนักก่อนอบ
4. นำครอบอะลูมิเนียมที่มีพริกแดงใส่ในตู้อบไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 103 °C เป็นเวลา 48 ชั่วโมง
5. หลังจากนั้นนำครอบอะลูมิเนียมออกจากตู้อบไฟฟ้า แล้วนำไปเก็บไว้ในโถดูดความชื้น



ภาพที่ ง-2 ตู้อบไฟฟ้าที่ใช้สำหรับหาความชื้น

6. พกกระป๋องอะลูมิเนียมเย็นลง นำไปชั่งน้ำหนัก บันทึกเป็นน้ำหนักหลังอบ
7. คำนวณหาน้ำหนักจริงของพริกแดงทั้งก่อนอบและหลังอบ
8. คำนวณหาความชื้น (d.b) จากสมการ

$$MC = \frac{W_{before} - W_{after}}{W_{after}} \times 100 \quad \dots\dots\dots (ง-1)$$

เมื่อ MC = ความชื้นมาตรฐานเปียก (d.b)

W_{before} = น้ำหนักจริงของพริกแดงก่อนอบแห้ง

W_{after} = น้ำหนักจริงของพริกแดงหลังอบแห้ง

การคำนวณหาอัตราส่วนความชื้น (MR)

จะสามารถคำนวณได้ดังนี้

$$MR = \frac{MC_i - MC_{eq}}{MC_t - MC_{eq}} \quad \dots\dots\dots (ง-2)$$

โดยที่ M_i = ความชื้นเริ่มต้น (d.b)

M_t = ความชื้น ณ เวลาใด ๆ (d.b)

M_{eq} = ความชื้นสมดุล (d.b)



ภาคผนวก จ

การใช้โปรแกรม SPSS for Windows ในการวิเคราะห์การถดถอยแบบไม่เป็นเชิงเส้น
และการประมาณค่าเริ่มต้น

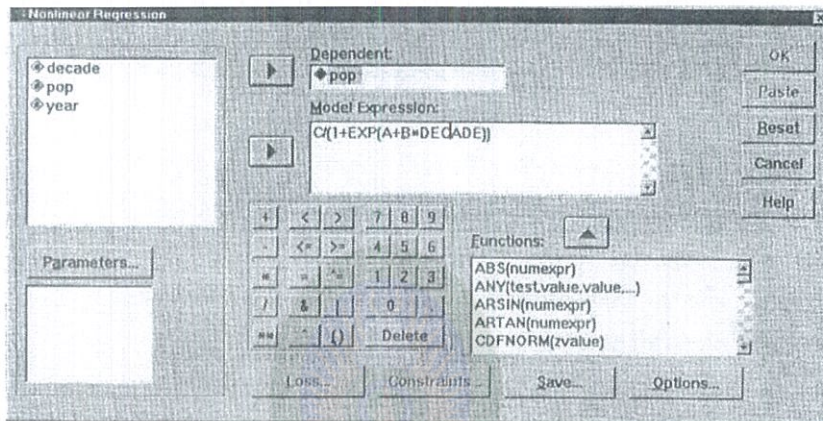
มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม
RAJABHAT MAHASARAKHAM UNIVERSITY

การใช้โปรแกรม SPSS for Windows ในการวิเคราะห์การถดถอยแบบไม่เป็นเชิงเส้น(กัลยา วาณิชย์บัญชา. 2544)

เมื่อความสัมพันธ์อยู่ในรูปแบบไม่เป็นเชิงเส้น จะใช้คำสั่งดังต่อไปนี้

Analyz → Regression → Nonlinear.....

จะได้หน้าจอเหมือนกันดังภาพที่ จ-1



ภาพที่ จ-1 Nonlinear Regression

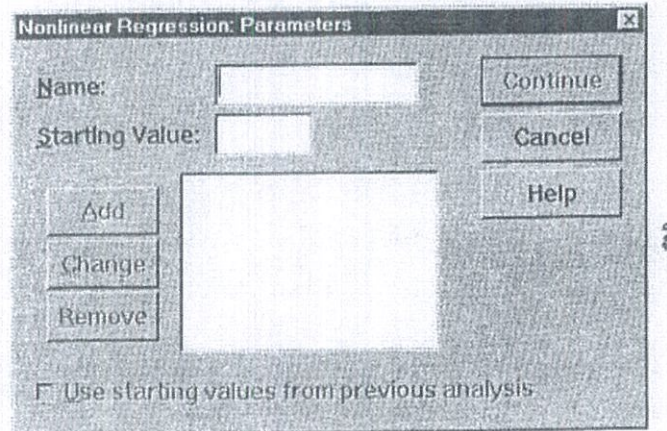
หน้าจอภาพที่ จ-1 ประกอบด้วย

Dependent หมายถึง ตัวแปรตามที่ต้องการเป็นตัวแปรชนิดตัวเลข (numeric) 1 ตัว

Model Expression ผู้ใช้จะต้องกำหนดสูตรหรือฟังก์ชันของตัวแปรอิสระ ซึ่งหมายถึง ฟังก์ชันทางขวามือของสมการความถดถอย เช่น Bx^2 โดยต้องมีตัวแปรอิสระอย่างน้อย 1 ตัวโดยผู้ใช้อาจจะพิมพ์ฟังก์ชันลงใน box ของ Model Expression หรือให้เลือกฟังก์ชันจาก box ที่กำหนดให้ก็ได้ซึ่งในงานวิจัยนี้ใช้สมการเอมไพริคัลของ Henderson, Twoterm, Logarithmic, Page, Lewis ในการวิเคราะห์การถดถอยแบบไม่เป็นเชิงเส้น

1. การกำหนดค่าเริ่มต้นของพารามิเตอร์

1.1 เมื่อคลิกปุ่ม **parameters** ในหน้าจอภาพที่ จ-1 จะได้หน้าจอภาพที่ จ-2



ภาพที่ จ-2 Parameters

1.2 หน้าจอภาพที่ จ-2 เป็นการกำหนดค่าเริ่มต้น (Starting Value) ของพารามิเตอร์ (B) ถ้าการกำหนดค่าเริ่มต้นของพารามิเตอร์ได้ใกล้เคียงกับค่าประมาณที่ได้จะทำให้ converge ได้เร็วขึ้น

1.3 ในส่วนของ Name ระบุชื่อพารามิเตอร์ เช่น B_1 ซึ่งต้องมีอยู่แล้วในส่วน of Model Expression ของหน้าจอภาพที่ จ-3

1.4 Starting Value ให้ระบุค่าเริ่มต้นของพารามิเตอร์ที่เลือกไว้ใน Name แล้วคลิก

Add

มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม

1.5 ถ้าต้องการแก้ไขชื่อหรือค่าเริ่มต้น ให้คลิกเลือกชื่อและค่าเริ่มต้นแล้วคลิกปุ่ม

Chang

1.6 ถ้าต้องการลบชื่อหรือค่าเริ่มต้น ให้คลิกเลือกชื่อและค่าเริ่มต้นที่ต้องการลบแล้วคลิก

ปุ่ม

Remove

1.7 Use Starting values from previous analysis ถ้าเลือกทางเลือกรูปนี้แสดงว่า จะใช้ค่าสุดท้ายของการวิเคราะห์ก่อนหน้านี้ เป็นค่าเริ่มต้น โดยจะต้องเป็นแฟ้มข้อมูลเดียวกัน และการวิเคราะห์ครั้งก่อนประกอบด้วยพารามิเตอร์ทุกตัวในการวิเคราะห์ครั้งนี้

1.8 เมื่อกำหนดชื่อและค่าเริ่มต้นแล้วคลิกปุ่ม

Continue

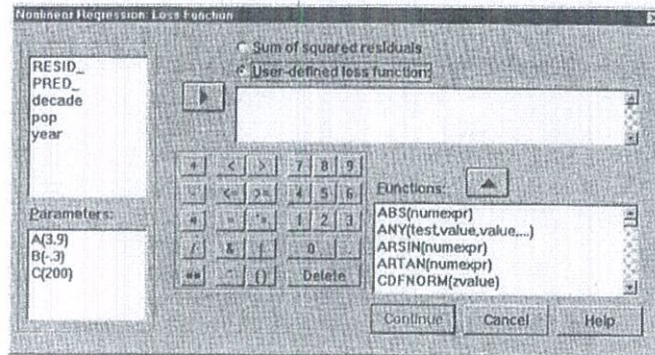
จ-1

2. การกำหนด Loss Function

2.1 จากหน้าจอภาพที่ จ-1 คลิกปุ่ม

Loss

จะได้หน้าจอภาพที่ จ-3



ภาพที่ จ-3 Loss Function

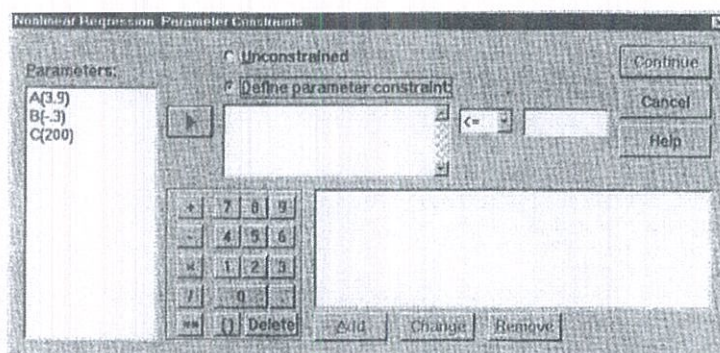
2.2 หน้าจอ Loss function เป็นการกำหนดค่าที่ต้องการ minimize เมื่อต้องการประมาณค่าพารามิเตอร์ (B)

2.2.1 Sum of square residuals ถ้าเลือกทางเลือกนี้ หมายถึง จะประมาณค่าพารามิเตอร์ที่ทำให้ Sum of square residuals มีค่าต่ำสุด ทางเลือกนี้เป็น default สำหรับงานวิจัยในครั้งนี้ได้เลือกทางเลือกนี้

2.2.2 User-defined loss function จะเลือกทางเลือกนี้ถ้าผู้ต้องการกำหนด loss function เอง เมื่อเลือกทางเลือกนี้ผู้จะต้องระบุค่าที่ต้องการให้ต่ำสุดใน box ที่กำหนด

3. การกำหนดเงื่อนไข

3.1 จากหน้าจอรูปที่ จ-1 คลิกปุ่ม **Contraints** จะได้หน้าจอภาพที่ จ-4



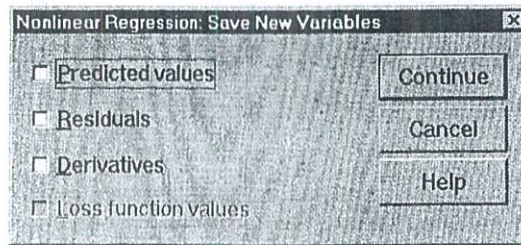
ภาพที่ จ-4 Parameter Constraints

3.2 การวิเคราะห์การถดถอยแบบไม่เป็นเชิงเส้นอาจจะมีเงื่อนไขเกี่ยวกับพารามิเตอร์หรือไม่ก็ได้ ผู้ใช้จึงต้องระบุว่า มีเงื่อนไขหรือไม่โดยเลือก

3.2.1 Unconstainted เลือกทางเลือกนี้เมื่อไม่มีเงื่อนไขเกี่ยวกับพารามิเตอร์ สำหรับงานวิจัยในครั้งนี้ได้เลือกทางเลือกนี้

3.2.2 Define parameter constant เลือกทางเลือกนี้เมื่อมีเงื่อนไขเกี่ยวกับพารามิเตอร์ตั้งแต่ 1 เงื่อนไขขึ้นไป โดยการกำหนดเงื่อนไขใน box แล้วคลิกปุ่ม **Add**

3.3 การบันทึกตัวแปรใหม่ จากหน้าจอรูปที่ จ-1 คลิกปุ่ม **Save** จะได้หน้าจอรูปที่ จ-5 ซึ่งผู้ใช้สามารถเลือกตัวแปรที่ต้องการบันทึกไว้ในแฟ้มข้อมูลเดิมได้ดังนี้



ภาพที่ จ-5 Save new variables

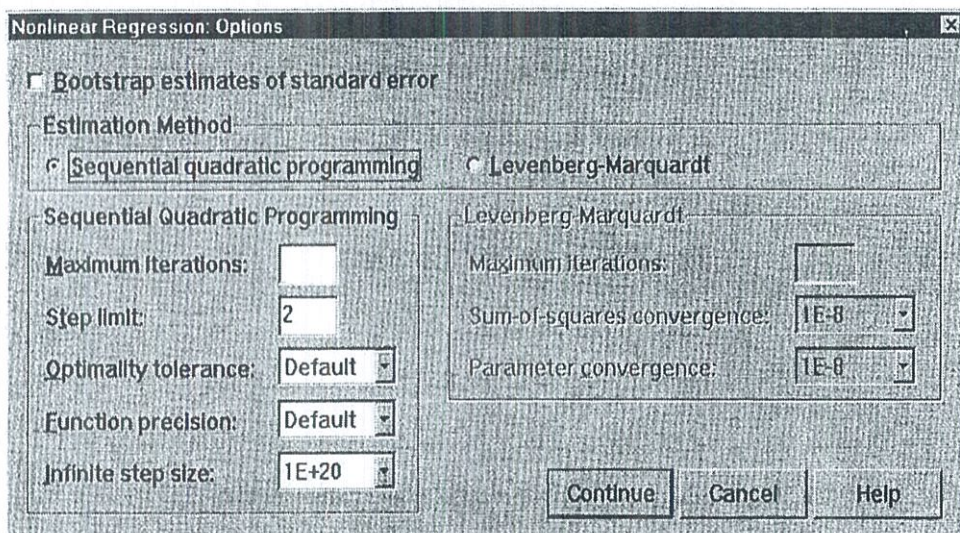
3.3.1 Predicted Values หมายถึง ต้องการบันทึกค่าพยากรณ์ของตัวแปรตามไว้ในแฟ้มข้อมูลโดยจะเป็นตัวแปรชื่อ pred_

3.3.2 Residuals หมายถึง ต้องการบันทึกค่าคลาดเคลื่อนจากการพยากรณ์ในตัวแปรชื่อ resid

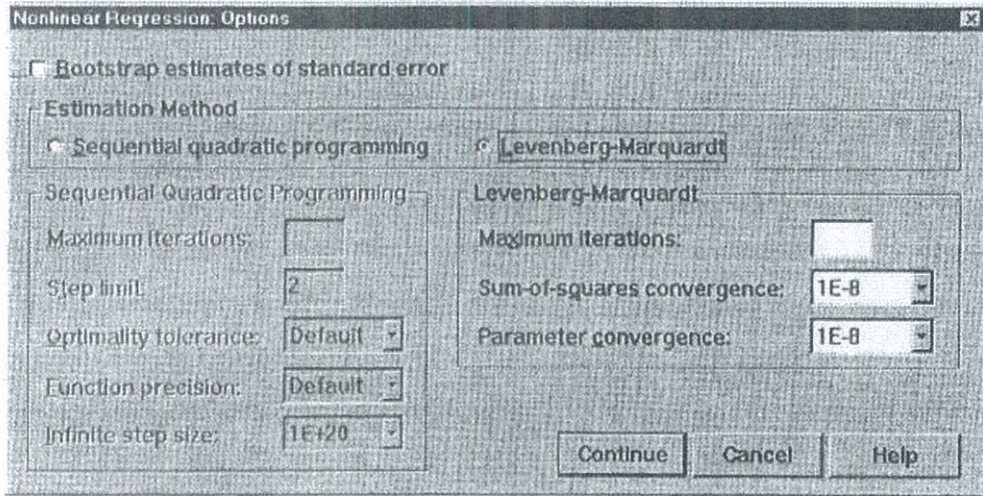
3.3.3 Derivatives จะบันทึกค่า derivative ของพารามิเตอร์แต่ละตัว โดยชื่อตัวแปรจะขึ้นต้นด้วย d ตามด้วยชื่อพารามิเตอร์ที่ยาวไม่เกิน 6 ตัว

3.3.4 Loss function values จะเลือกทางเลือกนี้ได้ดังในหน้าจอภาพประกอบ 41 Loss function เลือก User-defined loss function โดยตัวแปรชื่อ loss_option

3.4 จากรูปที่ จ-1 คลิกปุ่ม **Options** จะได้หน้าจอภาพที่ จ-6 และ จ-7



ภาพที่ จ-6 Option : Sequential quadratic programming



ภาพที่ จ-7 Option : Levenberg-Marquardt

หน้าจอ Option เป็นการควบคุมวิธีการประมาณค่าพารามิเตอร์โดยมีรายละเอียดดังนี้

3.4.1 Bootstrap estimates of standard error

เป็นการกำหนดให้ใช้ bootstrap ในการประมาณค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐานของพารามิเตอร์ และจะแสดงค่าประมาณแบบช่วงของพารามิเตอร์ เมตริกของสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (correlation) ของพารามิเตอร์ เมื่อเลือกทางเลือกรูปนี้แสดงว่าใช้วิธี Sequential quadratic programming ในการประมาณค่าพารามิเตอร์

3.4.2 Estimation Method คือ วิธีการประมาณค่าพารามิเตอร์มีให้เลือก 2 วิธีดังนี้

1. Sequential quadratic programming วิธีนี้สามารถใช้ได้กับปัญหาที่ไม่มีเงื่อนไขและปัญหาที่มีเงื่อนไข โดยงานวิจัยนี้ได้เลือกวิธีนี้ เมื่อเลือกวิธีนี้ผู้ใช้สามารถเปลี่ยนแปลง algorithm setting ได้ดังนี้

- Maximum iteration การกำหนดรอบ (iteration) ของการคำนวณใน default จะกำหนดค่าสูงสุดเป็น 50 หรือ $3(k+l)+10p$ โดยที่ k = จำนวนพารามิเตอร์ l =จำนวนเงื่อนไขที่เป็นเชิงเส้น p =จำนวนเงื่อนไขไม่เป็นเชิงเส้น ผู้ใช้ต้องกำหนดค่าเป็นเลขจำนวนเต็มบวก

- Step limit หมายถึง จำนวนครั้งของการเปลี่ยนความยาวของ parameter vector ผู้ใช้กำหนดเองโดยใส่เลขจำนวนเต็มบวกที่มากกว่าศูนย์ default กำหนดเป็น 2

- Optimality tolerance เป็นการประมาณความถูกต้องของ loss function

- Function precision ความถูกต้องที่วัดโดย loss function

- Infinite step size default กำหนดเป็น $1E+20$

ดังนี้

2. Levenberg-Marquardt ถ้าเลือกวิธีนี้ ผู้ใช้สามารถเปลี่ยนแปลงค่าต่างๆ

- Maximum iterations หมายถึง จำนวนสูงสุดของ iteration โปรแกรม SPSS กำหนด default ไว้เป็น 100 สำหรับแต่ละพารามิเตอร์ ผู้ใช้สามารถกำหนดเองโดยใส่เลขจำนวนเต็มบวก

- Sum-of square convergence เป็นการกำหนด convergence criterion สำหรับ model sum of square residual น้อยกว่าที่กำหนด โปรแกรม SPSS กำหนด default เป็น E-8

- Parameter convergence เป็นการกำหนด convergence criterion สำหรับค่าประมาณพารามิเตอร์ นั่นคือจะหยุดคำนวณเมื่อ iteration นั้นมีการเปลี่ยนแปลงของค่าพารามิเตอร์น้อยกว่าสัดส่วนที่กำหนดโปรแกรม SPSS กำหนด default เป็น E-8

การประมาณค่าเริ่มต้น

ในการใช้ iteration algorithm ประมาณค่าพารามิเตอร์ ที่ทำให้ SSE ต่ำสุด ผู้ใช้จะต้องกำหนดค่าเริ่มต้นของพารามิเตอร์ทุกตัว ถ้ากำหนดค่าเริ่มต้นไม่ถูกต้อง (ต่างจากค่าพารามิเตอร์ที่ควรจะเป็นมากๆ) อาจจะได้คำตอบ วิธีการประมาณค่าเริ่มต้นมีหลายวิธี ในงานวิจัยนี้จะกล่าวถึงเฉพาะวิธีที่นิยมใช้ 3 วิธีดังนี้

1. ใช้เทคนิคการวิเคราะห์การถดถอยแบบเชิงเส้นในการหาค่าเริ่มต้นของค่า โดยจะต้องไม่พิจารณาค่าคลาดเคลื่อน E เช่น

$$Y = e^{A+BX} + E$$

จะได้ $\ln(Y) = A+BX$ (จ-1)

จากนั้นประมาณค่า A และ B ด้วยเทคนิคการวิเคราะห์ความถดถอยเชิงเส้นแล้วใช้ค่าดังกล่าวเป็นค่าเริ่มต้นของ A และ B ในการวิเคราะห์ที่ไม่เชิงเส้น

2. ใช้การแทนค่าข้อมูลจริงในสมการไม่เชิงเส้น เช่น

$$Y = e^{A+BX}$$

ถ้าทราบค่า ถ้า $X = 0, Y = 2$

จะได้ว่า $\ln(Y) = A+BX$

แทนค่า $X = 0$

จะได้ $A = \ln(2)$

แล้วใช้ $\ln(2)$ เป็นค่าของ A

3. ใช้วิธีการแก้สมการโดยมีจำนวนสมการเท่ากับจำนวนพารามิเตอร์ เช่น $Y = e^{A+BX}$ ซึ่งมีพารามิเตอร์ 2 ตัวคือ A และ B จึงควรมี 2 สมการนั่นคือจะแทนค่า X และ Y จำนวน 2 คู่จะได้

$$\ln(Y_1) = A+BX_1 \quad \dots\dots\dots (จ-2)$$

$$\ln(Y_2) = A+BX_2 \quad \dots\dots\dots (จ-3)$$

นำสมการ (จ-3) ลบออกจากสมการ (จ-2) จะได้

$$\ln(Y_1) - \ln(Y_2) = B(x_1 - x_2)$$

$$B = \frac{\ln(Y_1) - \ln(Y_2)}{X_1 - X_2} \quad \dots\dots\dots (จ-4)$$

$$A = \ln(Y_1) - BX_1 \quad \dots\dots\dots (จ-5)$$

แล้วใช้ค่าจากสมการ (จ-5) และ (จ-4) เป็นค่าเริ่มต้นของ A และ B ตามลำดับ



มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม
RAJABHAT MAHASARAKHAM UNIVERSITY

ภาคผนวก ฉ

วิธีการคำนวณเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบอุโมงค์ลม



มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม
RAJABHAT MAHASARAKHAM UNIVERSITY

จากเงื่อนไขข้างต้นนำมาออกแบบเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบอุโมงค์ลมสำหรับอบแห้งพริกแดง โดยมีขั้นตอนดังนี้

1. คำนวณอัตราการไหลของอากาศ

ในขั้นตอนของการออกแบบ ต้องการอบแห้งพริกแดงปริมาณ 10 kg จากความชื้นเริ่มต้น 300% d.b จนเหลือความชื้นสุดท้าย 14% d.b สามารถคำนวณหามวลแห้งของพริกแดงได้จากสมการ

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

โดยแทนค่า $M_d = 3$, $w = 10 \text{ kg}$ จะได้

$$d = \frac{w}{(M_d+1)}$$

$$= \frac{(10\text{kg})}{(3+1)}$$

$$d = 2.5 \text{ kg}$$

ดังนั้น มวลแห้งของพริกแดง (d) เท่ากับ 2.5 kg และถ้าต้องการความชื้นสุดท้าย 14% d.b จะสามารถหาน้ำหนักสุดท้ายของพริกแดงได้จากสมการ

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

โดยแทน $M_d = 0.14$, $d = 2.5 \text{ kg}$ จะได้

$$w = (M_d + 1)d$$

$$= (0.14 + 1)(2.5)\text{kg}$$

$$w = 2.85 \text{ kg}$$

ดังนั้น น้ำหนักสุดท้ายของพริกแดง (w) เท่ากับ 2.85 kg ซึ่งจะต้องระเหยน้ำออกทั้งหมด $10 - 2.85 = 7.15 \text{ kg}$

นั่นคือ ถ้าต้องการอบแห้งพริกแดงปริมาณ 10 kg จากความชื้นเริ่มต้น 300% มาตรฐานแห้งและความชื้นสุดท้าย 14% มาตรฐานแห้ง จะต้องระเหยน้ำออก 7.15 kg

กำหนดให้อากาศทางออกเครื่องอบแห้งมีอุณหภูมิ 65°C อากาศทางเข้าห้องอบแห้งมีอุณหภูมิ 28°C จะสามารถคำนวณหาอัตราการไหลของอากาศได้จากสมการสมดุลพลังงานจะได้

$$m_a c_p (T_{\text{Out}} - T_{\text{In}}) = m_w h_{fg}$$

$$= \frac{m_w h_{fg}}{c_p (T_{\text{Out}} - T_{\text{In}})}$$

$$= \frac{(7.15\text{kg})(2260\text{kJ/kg})}{(1000\text{J/kg}^\circ\text{C})(65^\circ\text{C} - 28^\circ\text{C})}$$

$$m_a = 436.73\text{kg}$$

มวลอากาศแห้งเท่ากับ 436.73 kg ทำการอบแห้งให้เสร็จภายใน 9 ชั่วโมง จะสามารถคำนวณหาอัตราการไหลเชิงมวลของอากาศได้ ดังนี้

$$\begin{aligned}\dot{m} &= \frac{ma}{t} \\ &= \frac{(436.73\text{kg})}{(9\text{hr})(3600\text{s})} \\ \dot{m} &= 0.013\text{kg/s}\end{aligned}$$

2. คำนวณขนาดของห้องอบแห้ง

การคำนวณหาปริมาตรของห้องอบแห้งสามารถคำนวณหาได้จากพริกแดงปริมาณ 10 kg จะสามารถคำนวณหาปริมาตรของห้องอบแห้งได้ดังนี้

จากการสุ่มตัวอย่างของพริกแดงจำนวน 20 เม็ด

จะมีน้ำหนักของพริกแดงประมาณ 0.002 kg ต่อพริกจำนวน 1 เม็ด

ดังนั้น จะได้จำนวนของพริกแดงทั้งหมด $= \frac{10000\text{g}}{2\text{g}} = 5000$ เม็ด

จากการสุ่มตัวอย่างของพริกแดงจำนวน 10 เม็ด พบว่า

- พริกแดงมีเส้นผ่านศูนย์กลางของพริกแดงประมาณ 0.8 cm ต่อพริกจำนวน 1 เม็ด

- พริกแดงมีความยาวของพริกแดงประมาณ 5.5 cm ต่อพริกจำนวน 1 เม็ด

ดังนั้น พื้นที่ของถาดอบแห้ง $= 5000 \times 0.008 \times 0.055 = 2.2 \text{ m}^2$

กำหนดให้ความสูงของห้องอบแห้ง 20 cm

กำหนดให้ความกว้างของห้องอบแห้ง 150 cm

ซึ่งในการอบแห้งควรจะต้องจัดระยะการวางพริกแดงไม่ให้ชิดกันจนเกินไปเนื่องจากต้องการให้อากาศร้อนสัมผัสกับผิวของพริกแดงให้มากที่สุด ดังนั้นถาดสำหรับวางพริกควรมีพื้นที่ประมาณ 2.4 ตารางเมตร เมื่อนำพื้นที่ของห้องอบแห้งซึ่งมีความกว้าง 1.5 เมตร มาคำนวณความยาวของห้องอบแห้งจะได้เท่ากับ 1.6 เมตร

3. คำนวณพื้นที่ของตัวเก็บรังสีอาทิตย์

$$A_c = \frac{\dot{m}c_p(T_{\text{Out } c} - T_{\text{In } c})}{\eta_c G_t}$$

สมมติให้ ตัวเก็บรังสีอาทิตย์มีค่าประสิทธิภาพ $\eta_c = 0.30$ จะได้

$$A_c = \frac{(0.013\text{kg/s})(1000 \text{ J/kg}^\circ\text{C})(65^\circ\text{C} - 28^\circ\text{C})}{(0.30)(1000 \frac{\text{W}}{\text{m}^2})}$$

$$A_c = 1.6 \text{ m}^2$$

ดังนั้นตัวเก็บรังสีอาทิตย์เท่ากับ 1.6 ตารางเมตร เมื่อนำพื้นที่ของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ซึ่งมีความกว้าง 1.5 เมตร มาคำนวณความยาวของห้องอบแห้งจะได้เท่ากับ 1.06 เมตร

4. คำนวณความเร็วของอากาศที่ใช้ในห้องอบแห้ง

$$\begin{aligned}\dot{m} &= \rho AV \\ V &= \frac{\dot{m}}{\rho A} \\ &= \frac{0.013 \text{ kg/s}}{(1.1 \text{ kg/m}^3)(0.3 \text{ m}^2)} \\ V &= 0.039 \text{ m/s}\end{aligned}$$

5. คำนวณประสิทธิภาพเฉลี่ยตัวเก็บรังสีอาทิตย์ในแต่ละวันการทดลอง จากสมการที่ 2.5

$$\eta_c = \frac{\dot{m} C_p (T_{\text{outc}} - T_{\text{inc}})}{A_c G_t} \times 100\%$$

วันที่ 13 มิถุนายน 2558

$$\begin{aligned}\eta_c &= \frac{(0.013 \text{ kg/s})(1000 \text{ J/kg}^\circ\text{C})(61.57^\circ\text{C} - 35.88^\circ\text{C})}{(1.6 \text{ m}^2)(744.46 \text{ W/m}^2)} \times 100\% \\ &= 28.04\%\end{aligned}$$

วันที่ 14 มิถุนายน 2558

$$\begin{aligned}\eta_c &= \frac{(0.013 \text{ kg/s})(1000 \text{ J/kg}^\circ\text{C})(62.05^\circ\text{C} - 35.76^\circ\text{C})}{(1.6 \text{ m}^2)(743.08 \text{ W/m}^2)} \times 100\% \\ &= 28.75\%\end{aligned}$$

วันที่ 15 มิถุนายน 2558

$$\begin{aligned}\eta_c &= \frac{(0.013 \text{ kg/s})(1000 \text{ J/kg}^\circ\text{C})(61.33^\circ\text{C} - 35.26^\circ\text{C})}{(1.6 \text{ m}^2)(692.53 \text{ W/m}^2)} \times 100\% \\ &= 30.58\%\end{aligned}$$

6. คำนวณประสิทธิภาพเชิงความร้อน จากสมการที่ 2.6

$$\begin{aligned}\eta_{\text{th}} &= \frac{m_w h_{\text{fg}}}{(G_t A_c + G_t A_{\text{ch}}) \times t} \times 100\% \\ &= \frac{6.89 \text{ kg} \times 2260000 \text{ J/kg}}{[(726.69 \text{ W/m}^2)(1.6 \text{ m}^2) + (726.69 \text{ W/m}^2)(2.4 \text{ m}^2)] [(12 \text{ hr})(3600 \text{ s})]} \times 100\% \\ &= 12.4 \%\end{aligned}$$

7. คำนวณอัตราการอบแห้ง จากสมการที่ 2.7

$$DR = \frac{m_{\text{pi}} - m_{\text{po}}}{t}$$

อัตราการอบแห้งโดยใช้เครื่องอบแห้ง

$$DR = \frac{10 \text{ kg} - 3.11 \text{ kg}}{12 \text{ hr}}$$

$$DR = 0.57 \text{ kg/hr}$$

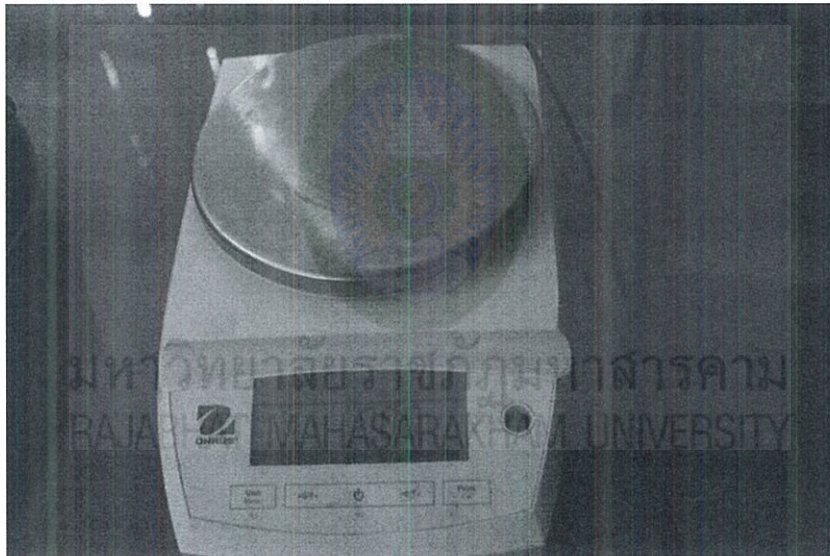


ภาคผนวก ช
อุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย

มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม
RAJABHAT MAHASARAKHAM UNIVERSITY



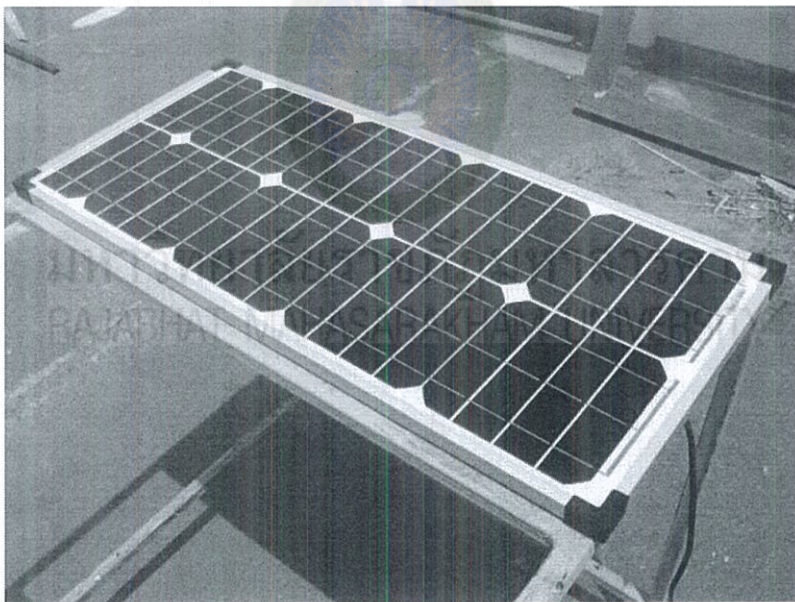
ภาพที่ ซ-1 เครื่องวัดความเร็วลม (Anemometer)



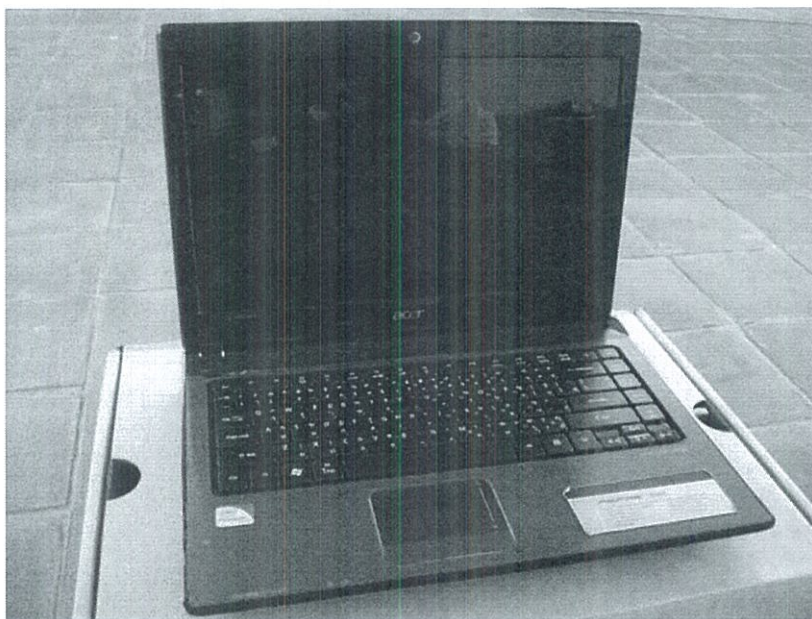
ภาพที่ ซ-2 เครื่องชั่งน้ำหนักแบบดิจิทัลความละเอียด 0.01 กรัม



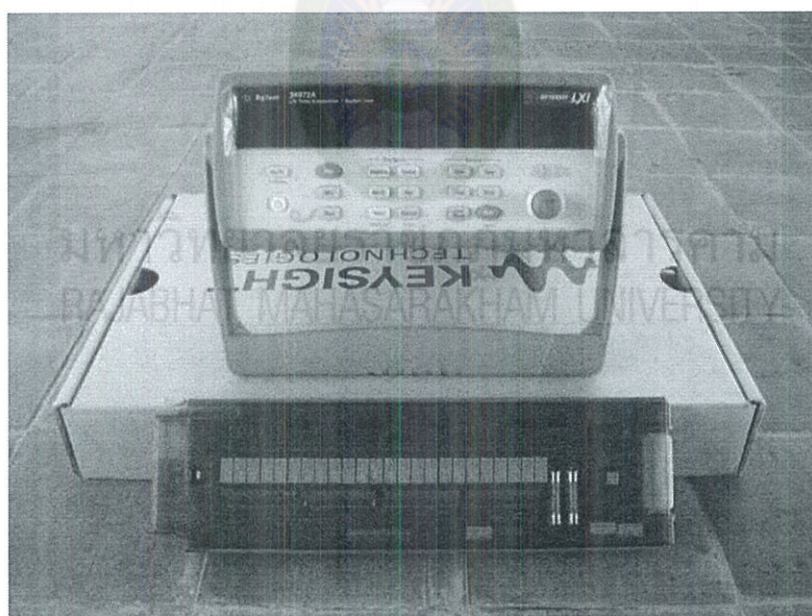
ภาพที่ ข-3 แบตเตอรี่



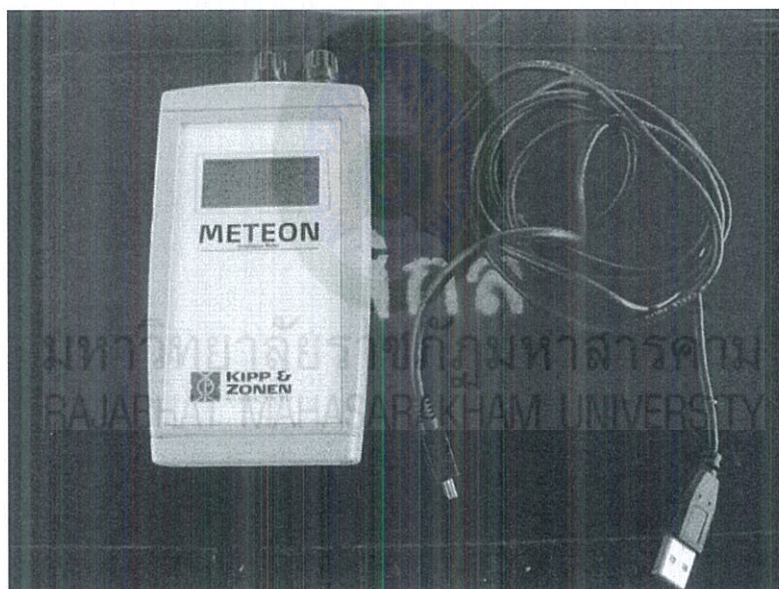
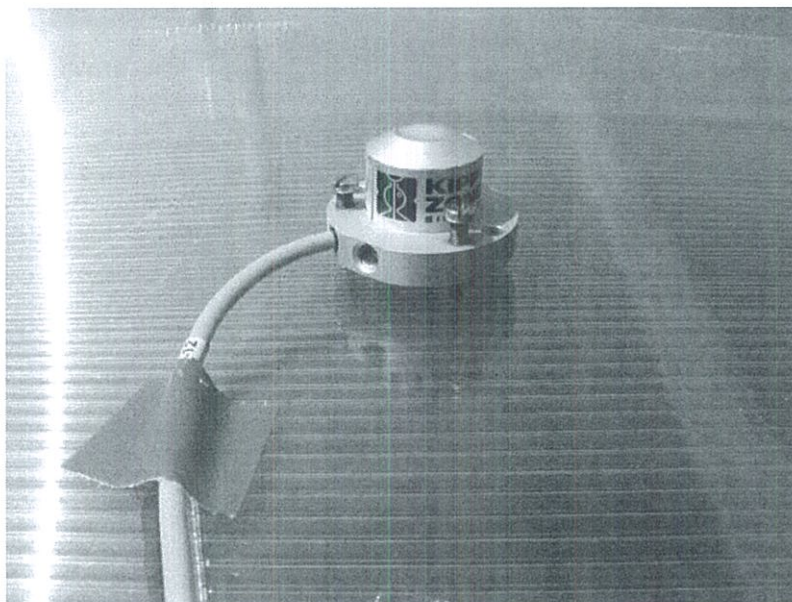
ภาพที่ ข-4 เซลล์แสงอาทิตย์



ภาพที่ ช-5 เครื่องคอมพิวเตอร์



ภาพที่ ช-6 เครื่องบันทึกข้อมูลอุณหภูมิ (data logger)



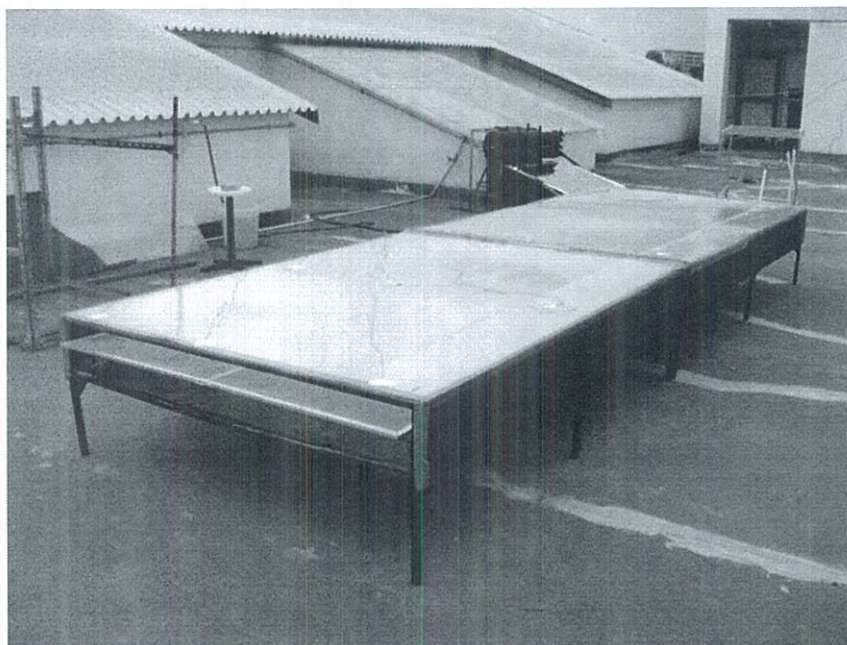
ภาพที่ ข-7 ไพรานอมิเตอร์

ภาคผนวก ซ

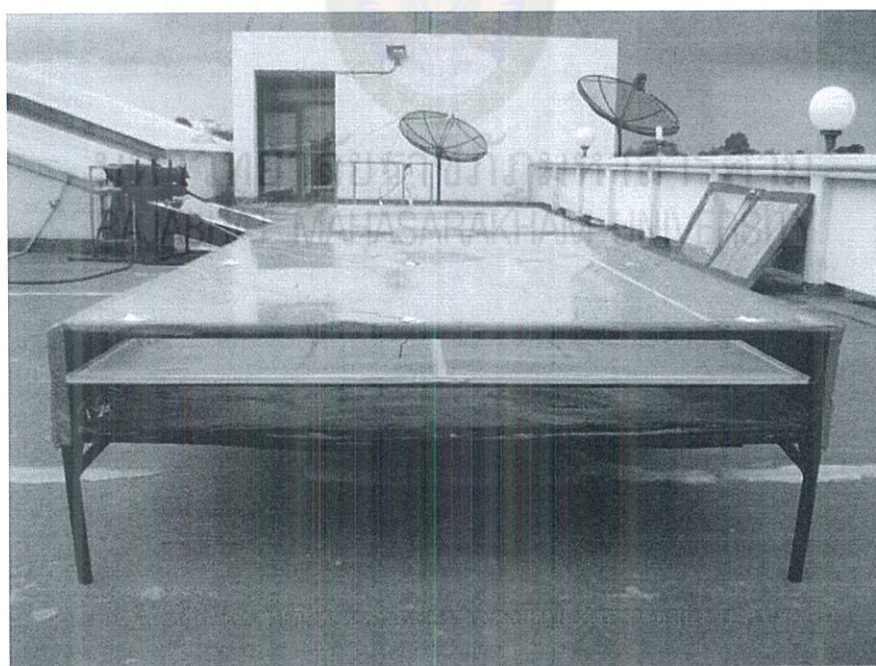
เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบอุโมงค์ลม



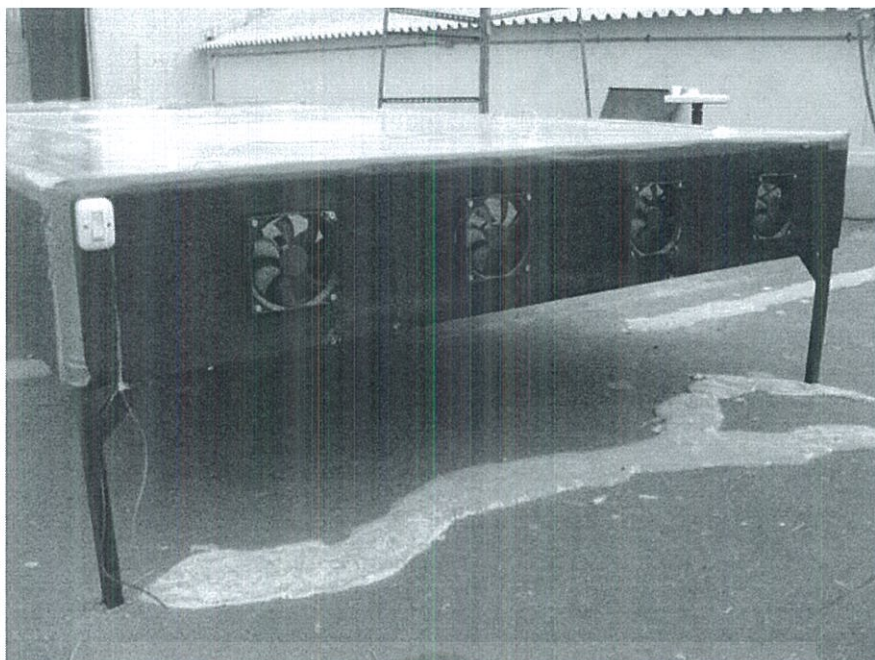
มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม
RAJABHAT MAHASARAKHAM UNIVERSITY



ภาพที่ ซ-1 ภาพรวมของเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบอุโมงค์ลม



ภาพที่ ซ-2 ทางออกลมร้อนของเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบอุโมงค์ลม



ภาพที่ ซ-3 การติดตั้งพัดลมของเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบอุโมงค์ลม



ภาพที่ ซ-4 การอบแห้งพริกแดงด้วยเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบอุโมงค์ลม



ภาพที่ ซ-5 การตากแดดพริกแดง



มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม
RAJABHAT MAHASARAKHAM UNIVERSITY



ประวัติผู้วิจัย

มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม
RAJABHAT MAHASARAKHAM UNIVERSITY

ประวัติผู้วิจัย

ชื่อ นายธานินทร์ รัชโพธิ์
การศึกษา พ.ศ. 2550 ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาฟิสิกส์ มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม
พ.ศ. 2553 ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาเทคโนโลยีพลังงาน มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

ชื่อ นายพงศธร กองแก้ว
การศึกษา พ.ศ. 2552 ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวัสดุศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ประสานมิตร
พ.ศ. 2554 ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวัสดุศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่



มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม
RAJABHAT MAHASARAKHAM UNIVERSITY