



การพัฒนาเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ขนาดเล็กสำหรับใช้ในครัวเรือน: การศึกษาเบื้องต้น
เกี่ยวกับสมรรถนะและการจำลองแบบ



โดย
นายทศพร ชุนแก้ว

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาฟิสิกส์ แผน ก แบบ ก 2 ระดับปริญญามหาบัณฑิต

ภาควิชาฟิสิกส์

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

ปีการศึกษา 2561

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

การพัฒนาเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ขนาดเล็กสำหรับใช้ในครัวเรือน: การศึกษา
เบื้องต้นเกี่ยวกับสมรรถนะและการจำลองแบบ



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาฟิสิกส์ แผน ก แบบ ก 2 ระดับปริญญามหาบัณฑิต
ภาควิชาฟิสิกส์
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร
ปีการศึกษา 2561
ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

DEVELOPMENT OF A SMALL-SCALE SOLAR DRYER FOR HOUSEHOLD USE:
PRELIMINARY INVESTIGATION OF THE PERFORMANCE AND MODELLING



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for Master of Science (PHYSICS)
Department of PHYSICS
Graduate School, Silpakorn University
Academic Year 2018
Copyright of Graduate School, Silpakorn University

หัวข้อ	การพัฒนาเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ขนาดเล็กสำหรับใช้ใน ครัวเรือน: การศึกษาเบื้องต้นเกี่ยวกับสมรรถนะและการจำลอง แบบ
โดย	ทศพร ชุนแก้ว
สาขาวิชา	ฟิสิกส์ แผน ก แบบ ก 2 ระดับปริญญาโทมหาบัณฑิต
อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก	ศาสตราจารย์ ดร. เสริม จันทน์ฉาย

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร ได้รับพิจารณาอนุมัติให้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

..... คณะบดีบัณฑิตวิทยาลัย
(รองศาสตราจารย์ ดร. จุไรรัตน์ นันทานิช)

พิจารณาเห็นชอบโดย

..... ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อิศระ มะศิริ)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก
(ศาสตราจารย์ ดร. เสริม จันทน์ฉาย)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม
(ดร. อรวรรณ อัมพร)

..... ผู้ทรงคุณวุฒิภายนอก
(รองศาสตราจารย์ ดร. ศิริชัย เทพา)

59306206 : ฟิสิกส์ แผน ก แบบ ก 2 ระดับปริญญาโทบัณฑิต

คำสำคัญ : อบอุ่น, พลังงานแสงอาทิตย์, เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์, แบบจำลอง ARX

นาย ทศพร ชุนแก้ว: การพัฒนาเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ขนาดเล็กสำหรับใช้ในครัวเรือน: การศึกษาเบื้องต้นเกี่ยวกับสมรรถนะและการจำลองแบบ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ : ศาสตราจารย์ ดร. เสริม จันทร์ฉาย

ในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยได้ทำการพัฒนาเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ขนาดเล็กสำหรับใช้ในครัวเรือน เครื่องอบแห้งนี้ประกอบด้วยหลังคารูปโค้งทรงครึ่งวงกลม ซึ่งปิดคลุมด้วยแผ่นโพลีคาร์บอเนตใส ชนิดตัน และติดตั้งบนพื้นโลหะสีดำ เครื่องอบแห้งดังกล่าวมีความกว้าง 0.75 เมตร ยาว 1.20 เมตร และสูง 1.30 เมตร และมีความจุในการอบผลไม้หรือผักจำนวน 4 กิโลกรัม เครื่องอบแห้งนี้มีแหล่งกำเนิดความร้อนเสริมที่ใช้ไฟฟ้าให้พลังงาน ในการทดสอบสมรรถนะของเครื่องอบแห้ง ผู้วิจัยได้ทำการทดลองอบแห้งกล้วยน้ำว้า 6 ครั้ง ครั้งละ 4 กิโลกรัม ผลการทดลองพบว่า การอบแห้งกล้วยน้ำว้าในเครื่องอบแห้งด้วยระบบอบแห้งใช้เวลาในการอบแห้งน้อยกว่าการตากแดดตามธรรมชาติ 3-4 วัน และผลิตภัณฑ์สุดท้ายที่ได้มีคุณภาพที่ดี นอกจากนี้ผู้วิจัยได้พัฒนาแบบจำลอง autoregressive model with exogenous variable (ARX) เพื่อใช้ทำนายสมรรถนะของเครื่องอบแห้ง ผลที่ได้พบว่าแบบจำลอง ARX มีค่าความขึ้นสอดคล้องกับผลการทดลอง โดยมีค่า root mean square difference (RMSD) และ mean bias difference (MBD) เท่ากับ 1.9% และ -0.2% ตามลำดับ



59306206 : Major (PHYSICS)

MR. THODSAPORN KHUNKAE0 : DEVELOPMENT OF A SMALL-SCALE SOLAR DRYER FOR HOUSEHOLD USE: PRELIMINARY INVESTIGATION OF THE PERFORMANCE AND MODELLING THESIS ADVISOR : PROFESSOR SERM JANJAI, Ph.D.

In this research, a small-scale solar dryer for household use was developed. The dryer consists of a semi-circle roof structure cover with polycarbonate solid sheet on a black-painted metal floor. The dimension of the dryer is 0.75 m in width, 1.2 m in length and 1.3 m in height with a loading capacity about 4 kg of fruits or vegetables. The dryer has auxiliary heater powered by electricity. To investigate its performance, the dryer was used to dry 6 batches of banana (4 kg/batch). The results obtained from the experiments show that the drying time for banana drying in the dryer was 3-4 days shorter than that of the natural sun drying and good quality products were obtained. An autoregressive model with exogenous variable (ARX) was also developed to predict the performance of the dryer. The simulated results agreed well with the experimental data, with root mean square difference (RMSD) and mean bias difference (MBD) equal to 1.9% and -0.2%, respectively.



กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาในระดับปริญญาโท โดยผู้วิจัยได้รับ
เงินทุนผู้ช่วยวิจัย อุปกรณ์และสถานที่ในการทำวิจัยจากห้องปฏิบัติการวิจัยพลังงานแสงอาทิตย์ ภาควิชา
ฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร ซึ่งผู้วิจัยขอขอบพระคุณไว้ ณ ที่นี้ เป็นอย่างสูง

ผู้วิจัยขอขอบคุณศาสตราจารย์ ดร.เสริม จันทร์ฉาย และ อาจารย์ ดร.อรรวรรณ์ อัมพร ซึ่งเป็น
อาจารย์ที่ปรึกษาที่ช่วยให้คำแนะนำในด้านวิชาการ รวมทั้งช่วยจัดหาอุปกรณ์ที่ใช้ในการทำงานวิจัย

ผู้วิจัยขอขอบคุณรองศาสตราจารย์ ดร.ศิริชัย เทพา สายวิชาเทคโนโลยีพลังงาน คณะพลังงาน
สิ่งแวดล้อมและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ที่กรุณาสละเวลามาเป็นกรรมการสอบ
วิทยานิพนธ์ครั้งนี้เป็นอย่างสูง

สุดท้ายผู้วิจัยขอขอบคุณ บิดา มารดา คณาจารย์ทุกท่าน รวมทั้งพี่ ๆ เพื่อน ๆ น้อง ๆ ที่ให้การ
สนับสนุนในการทำวิจัย

ทศพร ชุนแก้ว



สารบัญ

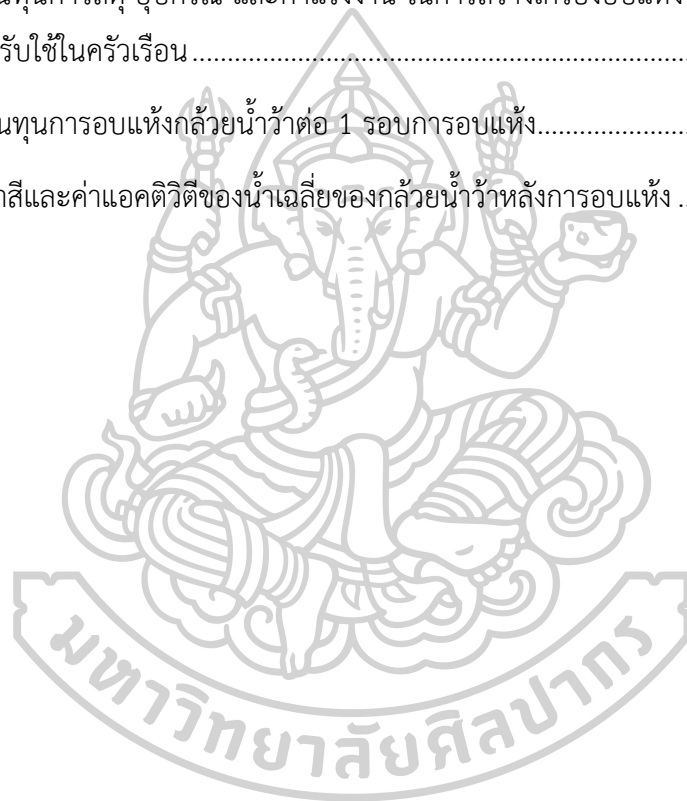
	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญรูปภาพ.....	ฎ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	2
บทที่ 2 หลักการทางวิชาการและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	3
2.1 การถ่ายเทความร้อน (เสริม จันทรฉาย, 2560a).....	3
2.1.1 การนำความร้อน.....	3
2.1.2 การพาความร้อน	4
2.1.2.1 การพาความร้อนแบบบังคับ	5
2.1.2.2 การพาความร้อนแบบธรรมชาติ.....	7
2.1.2.3 การพาความร้อนที่เกิดจากลม	9
2.1.3 การแผ่รังสี.....	9
2.2 อากาศชั้น	15
2.2.1 ความหมายของอากาศชั้น (เสริม จันทรฉาย, 2560a).....	15
2.2.2 สมบัติของอากาศชั้น (เสริม จันทรฉาย, 2560a).....	15

2.2.3 แผนภูมิอากาศชื้น (psychrometric chart).....	19
2.3 วัสดุชื้น (moist materials).....	20
2.3.1 ปริมาณความชื้นในวัสดุชื้น (เสริม จันทรฉาย, 2560a).....	20
2.3.2 น้ำในวัสดุชื้น (เสริม จันทรฉาย, 2560).....	21
2.3.3 แอคติวิตีของน้ำ (water activity) (เสริม จันทรฉาย, 2560a)	23
2.3.4 ความชื้นสมดุล (equilibrium moisture content).....	24
2.4 การอบแห้ง	26
2.4.1 หลักการพื้นฐานของการอบแห้ง	26
2.4.2 พฤติกรรมการแห้งของวัสดุชื้นระหว่างการอบแห้ง.....	27
2.4.3 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของพฤติกรรมการแห้งของวัสดุชื้น (เสริม จันทรฉาย, 2560a)	29
2.4.3.1 การสร้างแบบจำลองโดยพิจารณารายละเอียดที่อยู่ภายในชั้นวัสดุชื้น.....	29
2.4.3.2 การสร้างแบบจำลองโดยพิจารณาวัสดุชื้นทั้งชิ้นหรือหลายชิ้นวางเรียงเป็นชั้น บาง.....	30
2.5 เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์.....	33
2.5.1 หลักการทำงานของเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์.....	33
2.5.2 ประเภทของเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์.....	34
2.5.2.1 เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ที่ใช้การพาความร้อนตามธรรมชาติ.....	34
2.5.2.2 เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ที่ใช้การพาความร้อนโดยการบังคับอากาศ37	
2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ที่มีขนาดเล็ก	40
บทที่ 3 การดำเนินงานวิจัยและผลการวิจัย	50
3.1 การออกแบบเชิงแนวคิด (conceptual design).....	50
3.1.1 การออกแบบโครงสร้างหลักของเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์.....	50
3.1.2 การออกแบบระบบไฟฟ้า.....	56

3.1.3	หลักการทํางานของเครื่องอบแห้ง.....	59
3.1.4	ต้นทุนการผลิตเครื่องอบแห้ง.....	61
3.2	การทดสอบเครื่องอบแห้ง.....	62
3.2.1	อุปกรณ์วัดและเก็บข้อมูล.....	62
3.2.1.1	อุปกรณ์วัดอุณหภูมิอากาศ.....	62
3.2.1.2	อุปกรณ์วัดความชื้นสัมพัทธ์.....	64
3.2.1.3	อุปกรณ์วัดความเข้มรังสีอาทิตย์.....	65
3.2.1.4	อุปกรณ์บันทึกข้อมูล.....	66
3.2.2	การทดลองอบแห้งกล้วยน้ำว้าด้วยพลังงานแสงอาทิตย์.....	66
3.2.3	การทดลองอบแห้งกล้วยน้ำว้าด้วยพลังงานไฟฟ้า.....	71
3.3	ผลการทดสอบเครื่องอบแห้ง.....	72
3.3.1	ผลการทดลองอบแห้งกล้วยน้ำว้าด้วยพลังงานแสงอาทิตย์.....	72
3.3.2	ผลการทดลองอบแห้งกล้วยน้ำว้าด้วยพลังงานไฟฟ้า.....	78
3.4	แบบจำลอง (autoregressive model with exogenous variable, ARX).....	83
3.4.1	ขั้นตอนการสร้างแบบจำลอง.....	83
3.4.2	ผลการจำลอง.....	94
บทที่ 4	สรุป.....	97
	ภาคผนวก.....	98
	รายการอ้างอิง.....	99
	ประวัติผู้เขียน.....	102

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 1 ค่าแอกติวิตีของน้ำต่ำสุดที่จุลินทรีย์สามารถมีชีวิตอยู่ได้ (ดัดแปลงจาก สักกมน เทพหัสดิน ณ อยุธยา, 2555).....	23
ตารางที่ 2 ตัวอย่างแบบจำลองการอบแห้ง	31
ตารางที่ 3 ต้นทุนค่าวัสดุ-อุปกรณ์ และค่าแรงงาน ในการสร้างเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ ขนาดเล็กสำหรับใช้ในครัวเรือน	61
ตารางที่ 4 ต้นทุนการอบแห้งกล้วยน้ำว้าต่อ 1 รอบการอบแห้ง.....	62
ตารางที่ 5 ค่าสีและค่าแอกติวิตีของน้ำเฉลี่ยของกล้วยน้ำว้าหลังการอบแห้ง	82



สารบัญรูปภาพ

	หน้า
รูปที่ 1 แผนภาพจำลอง ผงที่มีการถ่ายเทความร้อนโดยการนำความร้อน	4
รูปที่ 2 การไหลแบบราบเรียบ (ซ้าย) และ การไหลแบบปั่นป่วน (ขวา)	5
รูปที่ 3 การพาความร้อนแบบธรรมชาติ	7
รูปที่ 4 สเปคตรัมของรังสีที่แผ่ออกมาจากวัตถุดำที่อุณหภูมิต่าง ๆ ดัดแปลงจาก mathematica.stackexchange.com	10
รูปที่ 5 แผนภาพแสดงรังสีต่าง ๆ ที่เกิดขึ้น เมื่อมีรังสีตกกระทบกับวัสดุ	11
รูปที่ 6 วัตถุทั้งสองแผ่นวางขนานหันเข้าหากัน (ซ้าย) และวัตถุทั้งสองวางตั้งฉากกัน (ขวา)	12
รูปที่ 7 วัตถุดำ 2 ผิว มีอุณหภูมิต่างกัน และเกิดการถ่ายเทความร้อนโดยการแผ่รังสี	13
รูปที่ 8 รังสีตกกระทบ และรังสีที่ออกจากวัตถุดำ	14
รูปที่ 9 ภาพจำลองส่วนประกอบของอากาศชั้น	15
รูปที่ 10 แผนภูมิอากาศชั้นแบบของมอริเยร์ (ดัดแปลงจาก เสริม จันทรฉาย, 2560a)	19
รูปที่ 11 น้ำภายในเซลล์และในช่องว่างระหว่างเซลล์ของวัสดุชีวภาพ (ดัดแปลงจาก เสริม จันทร ฉาย, 2560a)	21
รูปที่ 12 น้ำแต่ละชั้นในวัสดุชั้น (ดัดแปลงจาก Brooker และคณะ, 1974)	22
รูปที่ 13 ซอร์บชันไอโซเทอม (ดัดแปลงจาก เสริม จันทรฉาย, 2560a)	24
รูปที่ 14 ดีซอร์บชันไอโซเทอมและแอดซอร์บชันไอโซเทอม (ดัดแปลงจาก Airaksinen, 2005)	25
รูปที่ 15 การถ่ายเทความร้อนและความชื้นที่เกิดขึ้นกับวัสดุชั้นขณะทำการอบแห้ง	26
รูปที่ 16 กราฟการแห้ง (ดัดแปลงจาก เสริม จันทรฉาย, 2560a)	27
รูปที่ 17 กราฟการเปลี่ยนแปลงของอัตราการแห้งกับเวลา (ดัดแปลงจาก เสริม จันทรฉาย, 2560a)	28
รูปที่ 18 กราฟการเปลี่ยนแปลงของอัตราการแห้งกับความชื้นของผลิตภัณฑ์ (ดัดแปลงจาก เสริม จันทรฉาย, 2560a)	28

รูปที่ 19	แผนภาพแสดงหลักการใช้พลังงานของเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ (เสริม จันทร์ฉาย, 2560a).....	34
รูปที่ 20	เครื่องอบแห้งแบบกล่อง (ดัดแปลงจาก Lawand, 1966).....	35
รูปที่ 21	เครื่องอบแห้งแบบตู้ (ดัดแปลงจาก El-Sebaii และคณะ, 2002)	36
รูปที่ 22	เครื่องอบแห้งแบบตู้ (ดัดแปลงจาก Deshmukh และคณะ, 2014).....	36
รูปที่ 23	เครื่องอบแห้งแบบแบบอุโมงค์ลมที่พองตัวได้ (ดัดแปลงจาก Salvatierra-Rojas และคณะ, 2017).....	37
รูปที่ 24	เครื่องอบแห้งแบบแบบอุโมงค์ลมสองชั้น (ดัดแปลงจาก Banout และคณะ, 2011).....	38
รูปที่ 25	เครื่องอบแห้งแบบกล่อง (ดัดแปลงจาก Poblete และคณะ, 2018)	39
รูปที่ 26	เครื่องอบแห้งของ Tolulope และ Mondiu (2011).....	40
รูปที่ 27	เครื่องอบแห้งของ Poblete และคณะ (2018)	41
รูปที่ 28	เครื่องอบแห้งของ Sandali และคณะ (2019).....	42
รูปที่ 29	เครื่องอบแห้งของ Islam และคณะ (2019)	43
รูปที่ 30	เครื่องอบแห้งของ Seveda และ Jhajharia (2012)	44
รูปที่ 31	เครื่องอบแห้งทรงกรวยต้นแบบของ Joshi (2014)	45
รูปที่ 32	เครื่องอบแห้งของ Emelue และคณะ (2015) a) แบบใช้กระจกเงาช่วยรับแสง b) แบบ ธรรมดา ไม่ใช้กระจกเงา.....	46
รูปที่ 33	เครื่องอบแห้งของ Mehta และคณะ (2018)	47
รูปที่ 34	ด้านข้างเครื่องอบแห้งของ Ghazanfari และคณะ (2003).....	48
รูปที่ 35	ภาพจำลองเครื่องอบแห้งของ Maiti และคณะ (2011) จากมุมมองด้านข้าง	49
รูปที่ 36	ภาพจำลองเครื่องอบแห้งที่ออกแบบโดยโปรแกรม SolidWorks.....	51
รูปที่ 37	โซลาร์เซลล์ ภาพจำลอง(ซ้าย) และภาพจริง(ขวา)	52
รูปที่ 38	พัฒนาระบายอากาศ ติดตั้งอยู่ด้านหลังของเครื่องอบแห้ง.....	52
รูปที่ 39	แผนภาพฮีตเตอร์ (ซ้าย) และภาพฮีตเตอร์กับคอมบังฮีตเตอร์ (ขวา)	53
รูปที่ 40	แผ่นโพลีคาร์บอเนตใส ชนิดแผ่นตัน ดัดโค้งเป็นแผ่นปิดคลุมเครื่องอบแห้ง	53

รูปที่ 41	ตะแกรงวางผลิตภัณฑ์ (ซ้าย) และตาข่ายพลาสติกที่ใช้ทำตะแกรง (ขวา)	54
รูปที่ 42	ช่องอากาศเข้าที่ปิดด้วยตาข่ายกันแมลง และกันสาดป้องกันน้ำ	54
รูปที่ 43	พัดลมคววนอากาศภายในเครื่องอบแห้ง	55
รูปที่ 44	ฝาเปิด-ปิด	55
รูปที่ 45	กล่องควบคุมระบบไฟฟ้า	56
รูปที่ 46	เทอร์โมคัปเปิลบนขายึด	56
รูปที่ 47	แผนภาพการต่ออุปกรณ์ไฟฟ้า.....	57
รูปที่ 48	เบรกเกอร์	57
รูปที่ 49	เครื่องควบคุมอุณหภูมิ	58
รูปที่ 50	อุปกรณ์ตัดต่อวงจรไฟฟ้า	58
รูปที่ 51	อุปกรณ์แปลงไฟฟ้า.....	59
รูปที่ 52	เครื่องอบแห้งที่สร้างเสร็จแล้ว.....	59
รูปที่ 53	ตำแหน่งการติดตั้งเทอร์โมคัปเปิลบนตะแกรง ภายในเครื่องอบแห้ง (จากมุมมองด้านบน) 63	
รูปที่ 54	ตำแหน่งเทอร์โมคัปเปิลที่ติดตั้งบนตะแกรงภายในเครื่องอบแห้ง	63
รูปที่ 55	ปลายสายเทอร์โมคัปเปิลก่อนติดเทปกาว (ซ้าย) และหลังติดเทปกาว (ขวา).....	64
รูปที่ 56	เครื่องวัดความชื้นสัมพัทธ์ ยี่ห้อ E+E ELEKTRONIK รุ่น EE23 (ซ้าย) และหัววัดที่ติดตั้งบน ที่ยึด (ขวา).....	64
รูปที่ 57	ไพราโนมิเตอร์ ยี่ห้อ KIPP&ZONEN รุ่น CM11	65
รูปที่ 58	เครื่องบันทึกข้อมูล ยี่ห้อ YOKOGAWA รุ่น DC 100.....	66
รูปที่ 59	กล้วยน้ำว้าที่อบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์.....	66
รูปที่ 60	กล้วยน้ำว้าที่ตากแดดในกรงเหล็ก	67
รูปที่ 61	เครื่องชั่งดิจิตอล ยี่ห้อ Sartorius รุ่น BSA	67
รูปที่ 62	ภาพถ่ายกล้วยน้ำว้าที่อบแห้งในเครื่องอบแห้งโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์ (การทดลองที่ 2)	68

รูปที่ 63	เตาอบไฟฟ้า ยี่ห้อ Fisher Scientific รุ่น Isotemp	68
รูปที่ 64	เครื่องวัดสี ยี่ห้อ Hunter Lab รุ่น Miniscan EZ.....	69
รูปที่ 65	แกนสีของระบบ CIELAB	69
รูปที่ 66	เครื่องวัดค่าแอกติวิตีของน้ำ (ขวา) และเบ้า (ซ้าย)	70
รูปที่ 67	ภาพการทดลองอบแห้งกล้วยน้ำว้าด้วยพลังงานไฟฟ้า.....	71
รูปที่ 68	อุณหภูมิของอากาศภายในเครื่องอบแห้งและอากาศแวดล้อม ของการทดลองที่ 1.....	72
รูปที่ 69	ความชื้นสัมพัทธ์อากาศภายในเครื่องอบแห้งและอากาศแวดล้อม ของการทดลองที่ 1.....	73
รูปที่ 70	ความเข้มรังสีอาทิตย์ระหว่างการทดลองที่ 1.....	73
รูปที่ 71	กราฟการแห้งของกล้วยน้ำว้าอบแห้งในเครื่องอบแห้งที่ใช้พลังงานแสงอาทิตย์ และกล้วยน้ำว้าตากแดดตามธรรมชาติ ของการทดลองที่ 1	73
รูปที่ 72	อุณหภูมิของอากาศภายในเครื่องอบแห้งและอากาศแวดล้อม ของการทดลองที่ 2.....	74
รูปที่ 73	ความชื้นสัมพัทธ์อากาศภายในเครื่องอบแห้งและอากาศแวดล้อม ของการทดลองที่ 2.....	75
รูปที่ 74	ความเข้มรังสีอาทิตย์ระหว่างการทดลองที่ 2.....	75
รูปที่ 75	กราฟการแห้งของกล้วยน้ำว้าอบแห้งในเครื่องอบแห้งที่ใช้พลังงานแสงอาทิตย์ และกล้วยน้ำว้าตากแดดตามธรรมชาติ ของการทดลองที่ 2	75
รูปที่ 76	อุณหภูมิของอากาศภายในเครื่องอบแห้งและอากาศแวดล้อม ของการทดลองที่ 3.....	76
รูปที่ 77	ความชื้นสัมพัทธ์อากาศภายในเครื่องอบแห้งและอากาศแวดล้อม ของการทดลองที่ 3.....	77
รูปที่ 78	ความเข้มรังสีอาทิตย์ระหว่างการทดลองที่ 3.....	77
รูปที่ 79	กราฟการแห้งของกล้วยน้ำว้าอบแห้งในเครื่องอบแห้งที่ใช้พลังงานแสงอาทิตย์ และกล้วยน้ำว้าตากแดดตามธรรมชาติ ของการทดลองที่ 3	77
รูปที่ 80	อุณหภูมิของอากาศภายในเครื่องอบแห้งและอากาศแวดล้อม ของการทดลองที่ 4.....	78
รูปที่ 81	ความชื้นสัมพัทธ์อากาศภายในเครื่องอบแห้งและอากาศแวดล้อม ของการทดลองที่ 4.....	79
รูปที่ 82	กราฟการแห้งของกล้วยน้ำว้าอบแห้งในเครื่องอบแห้งที่ใช้พลังงานไฟฟ้า การทดลองที่ 4	79
รูปที่ 83	อุณหภูมิของอากาศภายในเครื่องอบแห้งและอากาศแวดล้อม ของการทดลองที่ 5.....	80
รูปที่ 84	ความชื้นสัมพัทธ์อากาศภายในเครื่องอบแห้งและอากาศแวดล้อม ของการทดลองที่ 5.....	80

รูปที่ 85 กราฟการแห้งของกล้วยน้ำว้าอบแห้งในเครื่องอบแห้งที่ใช้พลังงานไฟฟ้าของการทดลองที่ 5	80
รูปที่ 86 อุณหภูมิของอากาศภายในเครื่องอบแห้งและอากาศแวดล้อม ของการทดลองที่ 6	81
รูปที่ 87 ความชื้นสัมพัทธ์อากาศภายในเครื่องอบแห้งและอากาศแวดล้อม ของการทดลองที่ 6	81
รูปที่ 88 กราฟการแห้งของกล้วยน้ำว้าอบแห้งในเครื่องอบแห้งที่ใช้พลังงานไฟฟ้าของการทดลองที่ 6	82
รูปที่ 89 การรันโปรแกรมเพื่อจัดเก็บข้อมูลอินพุตและเอาต์พุตไว้ในตัวแปร	83
รูปที่ 90 รายชื่อตัวแปรในหน้าต่าง Workspace	84
รูปที่ 91 การเรียกใช้งานกล่องเครื่องมือสร้างแบบจำลองโดยวิธีที่ 1 (บน) หรือ วิธีที่ 2 (ล่าง)	84
รูปที่ 92 หน้าต่าง System Identification	85
รูปที่ 93 กล่อง Import data	85
รูปที่ 94 หน้าต่าง Import data และการป้อนข้อมูล	86
รูปที่ 95 ชุดข้อมูล miso_data2 ในหน้าต่าง System Identification	86
รูปที่ 96 ชุดข้อมูลทั้ง 3 การทดลอง ในหน้าต่าง System Identification	87
รูปที่ 97 กล่อง Preprocess	87
รูปที่ 98 หน้าต่าง Merge experiments ที่ลากข้อมูลมาใส่แล้ว	88
รูปที่ 99 หน้าต่าง System Identification ที่มีชุดข้อมูล miso_data_merge23	88
รูปที่ 100 หน้าต่าง System Identification เมื่อลากชุดข้อมูลเตรียมพร้อมสำหรับ สร้างและตรวจสอบแบบจำลอง	89
รูปที่ 101 กล่อง Estimate	89
รูปที่ 102 หน้าต่าง Polynomial Models	90
รูปที่ 103 หน้าต่าง Polynomial Models ที่ป้อนค่า Order สำหรับค้นหา n_a n_b และ n_k	91
รูปที่ 104 หน้าต่าง ARX Model Structure Selection	92
รูปที่ 105 หน้าต่าง System Identification ที่ได้เลือกแบบจำลองที่ต้องการแล้ว	92
รูปที่ 106 หน้าต่าง Model Output	93

รูปที่ 107 กราฟการแห้งของกล้วยน้ำว้าในเครื่องอบแห้งที่ใช้พลังงานแสงอาทิตย์เทียบกับผลการ
คำนวณจากแบบจำลอง ARX 94

รูปที่ 108 กราฟเปรียบเทียบความชื้นของกล้วยน้ำว้าที่อบแห้งด้วยเครื่องกับความชื้นที่คำนวณได้
จากแบบจำลอง ARX..... 95



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

การอบแห้งหรือการตากแห้งเป็นการถนอมอาหารวิธีหนึ่งซึ่งจะช่วยยืดอายุอาหารให้สามารถเก็บรักษาได้ยาวนานมากขึ้น เพื่อใช้บริโภคในช่วงฤดูกลางที่อาหารนั้นขาดแคลน นอกจากนั้นการอบแห้งหรือตากแห้งยังมีวัตถุประสงค์เพื่อแปรรูปอาหาร เช่น การทำกล้วยตากเพื่อเปลี่ยนกล้วยที่ใช้รับประทานแบบผลไม้สด ให้เป็นของหวาน

การทำให้ผลิตภัณฑ์แห้งที่นิยมทำกันในระดับครัวเรือนจะใช้วิธีการตากแดดตามธรรมชาติ เพราะเป็นวิธีที่ทำได้ง่าย ประหยัดค่าใช้จ่าย แต่ผลิตภัณฑ์ที่ได้จะมีคุณภาพต่ำ เนื่องจากการตากแดดจะต้องวางผลิตภัณฑ์ให้ได้รับแสงแดดโดยตรง เช่น บนหลังคาบ้าน บนแคร่ไม้ เป็นต้น จึงทำให้สัตว์และแมลงเข้าไปรบกวนได้ง่าย นอกจากนี้การตากแดดตามธรรมชาติจะใช้เวลามาก หากเป็นวันที่แดดน้อย ผลิตภัณฑ์ที่มีความชื้นสูง เช่น กล้วยหรือเนื้อสัตว์จะเกิดเชื้อราได้ง่าย ทำให้ผลิตภัณฑ์นั้นปนเปื้อนสารพิษจากเชื้อราซึ่งเป็นอันตรายต่อผู้บริโภค ปัญหาสำคัญอีกข้อหนึ่งคือในวันที่มีฝนตกหรือไม่มีแดด ผลิตภัณฑ์จะเสี่ยงต่อการเปียกฝนหรือไม่สามารถตากผลิตภัณฑ์ได้

สำหรับเครื่องอบแห้งที่ใช้พลังงานฟอสซิล พลังงานไฟฟ้า หรือพลังงานชีวมวล นั้นสามารถช่วยแก้ปัญหาการแห้งช้า การเปียกฝน การรบกวนจากสัตว์ ผลิตภัณฑ์ที่ได้จึงมีคุณภาพสูง แต่ข้อเสียของการใช้เครื่องอบแห้งเหล่านี้คือ เครื่องอบแห้งมีราคาแพง เครื่องอบแห้งบางชนิดมีขนาดใหญ่ไม่เหมาะกับการใช้งานในครัวเรือน สิ้นเปลืองเชื้อเพลิงและเชื้อเพลิงบางชนิดมีราคาสูง อีกทั้งการใช้งานเครื่องอบแห้งเหล่านี้ยังก่อให้เกิดมลพิษกับสิ่งแวดล้อมได้อีกด้วย ยกเว้นในกรณีของพลังงานไฟฟ้าซึ่งขึ้นอยู่กับกระบวนการผลิตไฟฟ้า เช่น ถ้าผลิตจากการใช้ถ่านหินก็จะเป็นมลพิษกับสิ่งแวดล้อม แต่ถ้าผลิตจากโรงงานไฟฟ้าโซลาร์เซลล์ก็จะเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมมากกว่า

เพื่อแก้ปัญหาข้างต้น ผู้วิจัยจึงได้สร้างเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ขนาดเล็กสำหรับใช้ในครัวเรือน ที่สามารถใช้งานง่าย เคลื่อนย้ายได้สะดวก สะอาด ปลอดภัย สามารถใช้ได้ทั้งพลังงานแสงอาทิตย์และพลังงานไฟฟ้าจากภายในบ้าน

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 1) เพื่อพัฒนาเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ขนาดเล็กให้ใช้งานได้ในครัวเรือน
- 2) สร้างแบบจำลอง autoregressive model with exogenous variable (ARX) เพื่อทำนายการเปลี่ยนแปลงความชื้นของผลิตภัณฑ์ที่ทำการอบแห้ง

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

งานวิจัยนี้จะทำการออกแบบและสร้างเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ขนาดเล็กที่สามารถใช้ได้ในครัวเรือน จากนั้นจะทำการทดสอบเครื่องอบแห้งนี้โดยการอบแห้งกล้วยน้ำว้า และนำผลการทดลองที่ได้มาสร้างแบบจำลอง ARX



บทที่ 2

หลักการทางวิชาการและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในบทนี้จะกล่าวถึงหลักพื้นฐานของการอบแห้ง ประเภทของเครื่องอบแห้งและตัวอย่างงานวิจัยที่เกี่ยวข้องตามรายละเอียดดังต่อไปนี้

2.1 การถ่ายเทความร้อน (เสริม จันทรฉาย, 2560a)

การถ่ายเทความร้อนเป็นสิ่งสำคัญต่อกระบวนการอบแห้ง เนื่องจากผลิตภัณฑ์ต้องการความร้อนในการถ่ายเทความร้อนขึ้นออกจากผลิตภัณฑ์ การส่งพลังงานความร้อนจากแหล่งความร้อนที่มีอุณหภูมิสูงไปยังผลิตภัณฑ์ที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า เรียกว่าการถ่ายเทความร้อน (heat transfer) ซึ่งแบ่งออกเป็น 3 แบบ คือ การนำความร้อน (conduction) การพาความร้อน (convection) และการแผ่รังสี (radiation)

2.1.1 การนำความร้อน

การนำความร้อน เป็นการถ่ายเทความร้อนที่ต้องมีตัวกลางในการส่งความร้อน ตัวกลางนั้นจะต้องไม่มีการเคลื่อนที่ผ่านหรือเคลื่อนไหวเป็นกลุ่ม (bulk motion) นั่นคือของแข็ง รวมทั้งของเหลวและก๊าซที่ไม่เคลื่อนหรือเคลื่อนไหวเป็นกลุ่มก็สามารถเป็นตัวกลางในการนำความร้อนได้

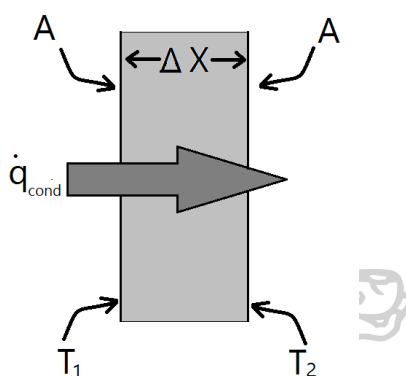
โดยสภาวะทั่วไปแล้วอะตอมและโมเลกุลของสสารจะมีการเคลื่อนที่หรือสั่นอยู่ตลอดเวลา คือมีพลังงานจลน์ ถ้าบริเวณของสสารนั้นมีพลังงานจลน์เฉลี่ยสูงแสดงว่าบริเวณนั้นมีอุณหภูมิสูง สสารบริเวณนั้นก็จะถ่ายเทพลังงานจลน์ไปยังสสารบริเวณข้างเคียงที่มีพลังงานจลน์ต่ำกว่าโดยการสั่นไปกระทบหรือเคลื่อนที่ชนกัน สสารที่ถูกชนก็จะได้รับพลังงานจลน์เพิ่มขึ้นคือมีอุณหภูมิสูงขึ้น กระบวนการถ่ายเทพลังงานเช่นนี้ก็คือการนำความร้อนจากบริเวณที่มีอุณหภูมิสูงไปสู่บริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า

อัตราการถ่ายเทพลังงานโดยการนำความร้อน

การนำความร้อนมีความสำคัญต่องานด้านอบแห้ง เช่น การออกแบบผนังของเครื่องอบแห้ง ซึ่งจะต้องมีอัตราการสูญเสียความร้อนที่น้อยที่สุด นั่นคือให้มีอัตราการถ่ายเทพลังงานโดยการนำความร้อนต่ำ โดยสามารถคำนวณ อัตราการถ่ายเทพลังงานโดยการนำความร้อนได้จาก กฎการนำความร้อนของฟูเรียร์ตามสมการที่ 1

$$\dot{q}_{\text{cond}} = kA \frac{T_1 - T_2}{\Delta x} = -kA \frac{\Delta T}{\Delta x} \quad (1)$$

เมื่อ	\dot{q}_{cond}	คือ อัตราการนำความร้อน (W)
	T_1 และ T_2	คือ อุณหภูมิของวัตถุที่ 1 และวัตถุที่ 2 ตามลำดับ (K)
	$\Delta T = T_2 - T_1$	คือ ความแตกต่างของอุณหภูมิ (K) โดย $T_1 > T_2$
	k	คือ สภาพนำความร้อนของวัตถุ (thermal conductivity) ($\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$)
	A	คือ พื้นที่ที่มีการนำความร้อนพุ่งผ่าน (m^2)
	Δx	คือ ความหนาของวัตถุ (m)



รูปที่ 1 แผนภาพจำลอง ผนังที่มีการถ่ายเทความร้อนโดยการนำความร้อน

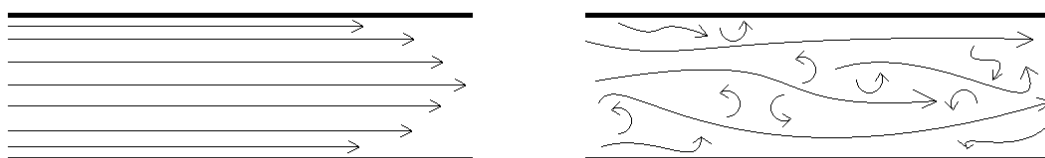
เมื่อนำกฎการนำความร้อนของฟูเรียร์มาอธิบายแผนภาพจำลองการถ่ายเทความร้อนโดยการนำความร้อนผ่านผนัง พบว่าผนังจะมีอัตราการสูญเสียความร้อนต่ำ เมื่อผนังมีความหนามากและมีสภาพนำความร้อนต่ำ

2.1.2 การพาความร้อน

การพาความร้อนจะเกิดขึ้นระหว่างผิวของแข็งกับของไหลที่เคลื่อนที่ผ่าน ของไหลจะทำหน้าที่เป็นตัวกลางในการถ่ายเทความร้อน โดยจะรับเอาความร้อนหรือส่งผ่านความร้อนให้กับผิวของแข็งที่ของไหลเคลื่อนที่ไปสัมผัส หากของไหลนั้นเกิดการเคลื่อนที่เพราะแรงกระทำภายนอกจะเรียกการพาความร้อนนั้นว่า การพาแบบบังคับ (forced convection) เช่น การใช้พัดลม หรือปั๊ม แต่ถ้าของไหลนั้นมีความแตกต่างของอุณหภูมิภายในตัวของของไหลเอง แล้วเกิดการเคลื่อนที่เพราะแรงลอยตัว (buoyancy force) จะเรียกการพาความร้อนนั้นว่า การพาแบบธรรมชาติ (natural convection) หรือการพาอิสระ (free convection)

2.1.2.1 การพาความร้อนแบบบังคับ

รูปแบบการไหลของของไหลที่แตกต่างกันนั้นก็จะส่งผลให้เกิดการถ่ายเทความร้อนที่ต่างกักัน โดยสามารถแบ่งการไหลของของไหลได้ 2 แบบ ได้แก่ การไหลแบบราบเรียบ (laminar flow) ซึ่งมวลของของไหลจะเคลื่อนที่เป็นระเบียบ และการไหลแบบปั่นป่วน (turbulent flow) ซึ่งมวลของของไหลจะเคลื่อนที่ไม่เป็นระเบียบ (รูปที่ 2) ปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อรูปแบบของการไหลนั้นมีหลายปัจจัย เช่น รูปทรงของพื้นผิวที่ของไหลนั้นไหลผ่าน ความเร็วของของไหล อุณหภูมิของพื้นผิวที่ไหลผ่าน ชนิดของของไหล เป็นต้น



รูปที่ 2 การไหลแบบราบเรียบ (ซ้าย) และ การไหลแบบปั่นป่วน (ขวา)

อัตราส่วนระหว่างแรงเฉื่อยที่กระทำต่อของไหล (inertia force) และแรงหนืด (viscous force) ในของไหลนั้น จะเรียกอัตรส่วนนี้ว่า เลขเรย์โนลด์ส์ (Reynolds number, Re) ซึ่งเป็นชื่อของ Osborn Reynolds นักฟิสิกส์วิศวกรชาวอังกฤษ ผู้ค้นพบ โดยเลขเรย์โนลด์ส์เขียนในรูปสมการได้ดังนี้

$$Re = \frac{\rho VL}{\mu} = \frac{VL}{\nu} \quad (2)$$

เมื่อ	Re	คือ เลขเรย์โนลด์ส์ (-)
	ρ	คือ ความหนาแน่นของของไหล (kg m^{-3})
	V	คือ ความเร็วภาวะบัลค์ (bulk state) ของของไหล (m s^{-1})
	L	คือ ความยาวบ่งลักษณะของระบบ (characteristic length) (m)
	μ	คือ ความหนืดเชิงพลวัต (dynamic viscosity) ($\text{kg m}^{-1}\text{s}^{-1}$)
	ν	คือ ความหนืดเชิงจลน์ (kinematic viscosity) ($\text{m}^2 \text{s}^{-1}$)

เลขเรย์โนลด์ส์สามารถใช้ในการบอกรูปแบบการไหลของของไหลได้ โดยที่เลขเรย์โนลด์ส์ต่ำเป็นการไหลแบบราบเรียบ ($0 < Re < 2000$) เลขเรย์โนลด์ส์สูงเป็นการไหลแบบปั่นป่วน ($Re > 4000$) และเลขเรย์โนลด์ส์วิกฤติ (critical Reynolds numbers, Re_{cr}) เป็นเลขเรย์โนลด์ส์ที่บอกการเปลี่ยนแปลงรูปแบบของไหลจากการไหลแบบราบเรียบไปเป็นแบบปั่นป่วน ($2000 < Re < 4000$)

ของไหลต่างชนิดกันจะมีความสามารถในการส่งผ่านโมเมนตัมและความสามารถในการส่งผ่านความร้อนในของไหลที่แตกต่างกัน ในการคำนวณที่เกี่ยวกับอัตราการถ่ายเทความร้อนโดยการพาความร้อนจะใช้เลขพรานด์เทิล (Prandtl number) ซึ่งเป็นอัตราส่วนระหว่างสภาพการแพร่โมเมนตัม (momentum diffusivity) และสภาพแพร่ความร้อน (thermal diffusivity) โดยเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$\text{Pr} = \frac{\nu}{\alpha} \quad (3)$$

เมื่อ Pr คือ เลขพรานด์เทิล (-)
 ν คือ ความหนืดเชิงจลน์หรือสภาพการแพร่โมเมนตัม ($\text{m}^2 \text{s}^{-1}$)
 α คือ สภาพแพร่ความร้อน ($\text{m}^2 \text{s}^{-1}$)

เลขพรานด์เทิลจะเป็นการบอกลักษณะของของไหล เช่น โลหะเหลวที่มีความหนืดสูงไหลยากแต่สามารถถ่ายเทความร้อนได้ดี เลขพรานด์เทิลจะมีค่าน้อยประมาณ 0.01 แต่ถ้าเป็นน้ำมันชั้นที่สามารถไหลได้ง่ายแต่ถ่ายเทความร้อนได้ไม่ดี เลขพรานด์เทิลจะมีค่ามากประมาณ 100,000

อัตราการถ่ายเทพลังงานโดยการพาความร้อนแบบบังคับ

ไอแซค นิวตัน (Isaac Newton) นักฟิสิกส์ชาวอังกฤษได้เสนอสมการอย่างง่ายสำหรับหาอัตราการถ่ายเทพลังงานโดยการพาความร้อน ที่เรียกว่าสมการการเย็นตัวของนิวตัน ดังนี้

$$\dot{q}_{\text{conv}} = h_{\text{conv}}(T_s - T_{\infty}) \quad (4)$$

เมื่อ \dot{q}_{conv} คือ อัตราการถ่ายเทพลังงานโดยการพาความร้อนต่อพื้นที่ (W m^{-2})
 h_{conv} คือ สัมประสิทธิ์การพาความร้อน (convection heat transfer coefficient) ($\text{W m}^{-2} \text{K}^{-1}$)
 T_s คือ อุณหภูมิผิวของของแข็ง (K)
 T_{∞} คือ อุณหภูมิของของไหลที่ยังไม่ได้รับอิทธิพลของความร้อนจากพื้นผิวที่ไหลผ่าน (K)

โดยการหา h_{conv} จะต้องใช้เลขนุสเซลต์ (Nusselt number, Nu) เขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$\text{Nu} = \frac{h_{\text{conv}}L}{k} \quad (5)$$

เมื่อ Nu คือ เลขนุสเซลต์ (-)
 L คือ ความหนาของชั้นของไหล (m)
 k คือ สภาพนำความร้อนของของไหล ($\text{W m}^{-2} \text{K}^{-1}$)

จากนั้นจัดรูปสมการเพื่อหา h_{conv} จะได้ดังนี้

$$h_{\text{conv}} = \frac{k}{L} \text{Nu} \quad (6)$$

วิธีการหา Nu นั้นหาได้จากการการวิเคราะห์เชิงมิติ (dimensional analysis) ของสมการอนุกรมมวลสาร พลังงาน และโมเมนตัมที่เกิดกับการพาความร้อนแบบบังคับ และได้พบว่าเลขนุสเซลต์มีความสัมพันธ์กับเลขเรย์โนลด์ส์และเลขพรานด์เทิล ในรูปสมการเอมไพริคัลดังนี้

$$\text{Nu} = C \text{Re}^m \text{Pr}^n \quad (7)$$

เมื่อ C m และ n คือ ค่าคงที่ซึ่งขึ้นอยู่กับรูปแบบของการไหล รวมทั้งการวางตัวและขนาดของวัตถุที่เกิดการถ่ายเทความร้อน ซึ่งค่าคงที่เหล่านี้จะได้จากการทดลอง

2.1.2.2 การพาความร้อนแบบธรรมชาติ

การพาความร้อนแบบธรรมชาตินี้เกิดจากวัตถุที่มีอุณหภูมิพื้นผิวสูงกว่าของไหล สมมติให้พื้นผิวนั้นวางราบและมีของไหลที่อยู่ด้านบนพื้นผิวนั้น โดยของไหลอยู่นิ่งเมื่อเวลาเริ่มต้น เมื่อเวลาผ่านไปความร้อนจะถ่ายเทจากพื้นผิววัตถุเข้าสู่ของไหลที่สัมผัสอยู่ เมื่อของไหลที่บริเวณผิววัตถุมีอุณหภูมิสูงขึ้นจึงเกิดการขยายตัวทำให้มีความหนาแน่นต่ำกว่าของไหลที่อยู่ด้านบน แรงลอยตัวจึงเกิดขึ้น ของไหลด้านล่างนี้จึงลอยตัวสูงขึ้น อากาศแวดล้อมด้านล่างที่อยู่รอบข้างจะไหลเข้ามาแทนที่ เกิดเป็นการพาความร้อนจากผิวของแข็งสู่อากาศที่อยู่ด้านบน



รูปที่ 3 การพาความร้อนแบบธรรมชาติ

รูปแบบการไหลของของไหลจะสามารถเกิดขึ้นได้ทั้งการไหลแบบราบเรียบและแบบปั่นป่วน ซึ่งขึ้นอยู่กับหลายปัจจัยด้วยกัน เช่น แรงลอยตัว แรงจากความหนืดของของไหล เพื่อความง่ายในการคำนวณนักวิทยาศาสตร์ได้รวมปัจจัยต่าง ๆ ไว้ในตัวแปรตัวหนึ่ง คือ เลขกราชอฟ (Grashof number) เขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$Gr = \frac{g\beta(T_s - T_\infty)L^3}{\nu^2} \quad (8)$$

เมื่อ	Gr	คือ เลขกราชอฟ (-)
	g	คือ ความเร่งจากแรงโน้มถ่วง ($m\ s^{-2}$)
	ν	คือ ความหนืดเชิงจลน์ ($m^2\ s^{-1}$)
	β	คือ สัมประสิทธิ์การขยายตัวเชิงปริมาตรของของไหล (K^{-1})
	T_s	คือ อุณหภูมิผิวของของแข็ง (K)
	T_∞	คือ อุณหภูมิของของไหลที่ยังไม่ได้รับอิทธิพลของความร้อนจากพื้นผิวที่ไหลผ่าน (K)
	L	คือ ความยาวบ่งลักษณะของระบบ (characteristic length) (m)

อัตราการถ่ายเทพลังงานโดยการพาความร้อนแบบธรรมชาติ

การคำนวณจะใช้วิธีการเดียวกับการพาความร้อนแบบบังคับ คือ ใช้สมการการเย็นตัวของนิวตันและทำการหาเลขนูนสเซลต์ แต่สมการที่ใช้หาเลขนูนสเซลต์จะมีความแตกต่างกัน โดยเขียนเป็นสมการดังนี้

$$Nu = C(Gr Pr)^n \quad (9)$$

เมื่อ C และ n คือ ค่าคงที่ซึ่งขึ้นอยู่กับรูปแบบของการไหล และลักษณะทางเรขาคณิต ซึ่งค่าคงที่เหล่านี้จะได้จากการทดลอง

2.1.2.3 การพาความร้อนที่เกิดจากลม

เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์มักจะมีการสูญเสียความร้อนเนื่องจากลมที่พัดพาอยู่ด้านบน นอก ซึ่งนิยมคำนวณการสูญเสียความร้อนที่เกิดจากลม โดยใช้สมการการเย็นตัวของนิวตัน แต่เปลี่ยนมาใช้สัมประสิทธิ์การสูญเสียความร้อนเนื่องจากลม ซึ่งเขียนเป็นสมการเอมไพริคัล (เสริม จันทรฉาย, 2560a) ได้ดังนี้

$$h_w = 5.7 + 3.8V \quad (10)$$

เมื่อ h_w คือ สัมประสิทธิ์การสูญเสียความร้อนเนื่องจากลม ($W m^{-2} K^{-1}$)

V คือ ความเร็วลม ($m s^{-1}$) (ไม่เกิน $7 m s^{-1}$, เสริม จันทรฉาย (2560a))

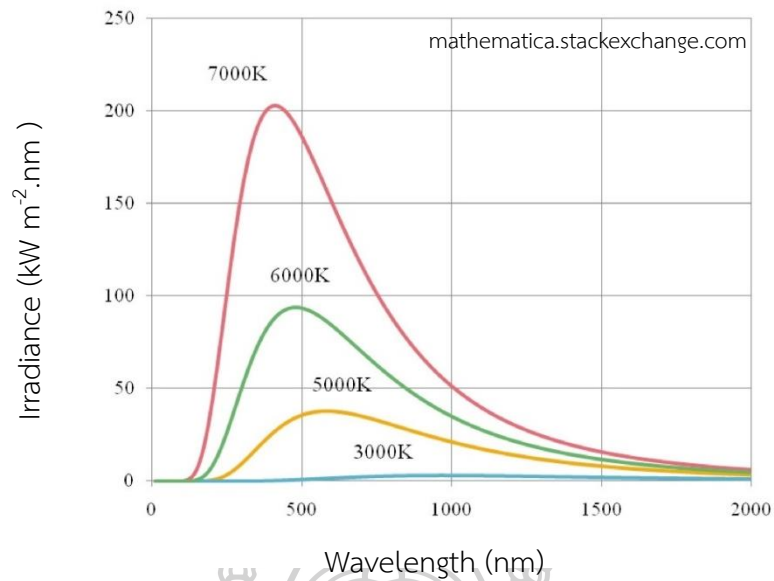
2.1.3 การแผ่รังสี

สำหรับการนำความร้อนและการพาความร้อนนั้นจำเป็นต้องมีตัวกลางในการถ่ายเทความร้อน แต่ยังมีวิธีการถ่ายเทความร้อนอีกแบบหนึ่งที่ไม่จำเป็นต้องใช้ตัวกลางในการถ่ายเทความร้อน เช่น การถ่ายเทพลังงานความร้อนจากดวงอาทิตย์มายังโลก ซึ่งระหว่างโลกกับดวงอาทิตย์นั้นไม่มีตัวกลางในการถ่ายเทความร้อน การถ่ายเทความร้อนในกรณีนี้เป็นการถ่ายเทความร้อนที่เรียกว่า การแผ่รังสี

การบอกปริมาณรังสีที่แผ่ออกมาจากวัตถุจะมี 2 แบบ คือ รังสีที่แผ่ออกในมุมตัน (emitted radiance, I_e) เป็นพลังงานรังสีที่แผ่ออกจากวัตถุในหนึ่งหน่วยมุมตันต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ที่ตั้งฉากกับทิศทางของรังสี และอีกแบบคือ รังสีที่แผ่ออกทั้งหมด (radiant existence, E) เป็นพลังงานรังสีที่แผ่ออกจากผิววัตถุรวมทุกทิศทางต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ของวัตถุที่แผ่รังสี

การบอกปริมาณรังสีที่ตกกระทบวัตถุจะมี 2 แบบ คือ รังสีที่ตกกระทบในมุมตัน (incident radiance, I_i) เป็นรังสีที่เข้ามาตกกระทบวัตถุในมุมตันต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ที่รับรังสีซึ่งตั้งฉากกับทิศทางของรังสี และแบบที่ 2 คือรังสีตกกระทบจากทุกทิศทาง (irradiance, G) เป็นรังสีจากทุกทิศทางที่เข้ามาตกกระทบวัตถุ

โดยทั่วไปวัตถุที่มีอุณหภูมิมากกว่าศูนย์องศาสัมบูรณ์ ($0 K$) จะสามารถแผ่รังสีออกมาได้แต่ปริมาณและความยาวคลื่นที่แผ่ออกมานั้นจะขึ้นอยู่กับสารที่ประกอบกันเป็นวัสดุนั้นและอุณหภูมิของวัสดุนั้น วัตถุต่างชนิดกันแม้ว่าจะมีอุณหภูมิเท่ากันแต่รังสีที่แผ่ออกมาต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ก็จะไม่เท่ากัน ดังนั้นการบอกความสามารถในการแผ่และดูดกลืนรังสีของวัตถุแต่ละชนิด จึงต้องสมมติวัตถุชิ้นหนึ่งเพื่อใช้เป็นวัตถุอ้างอิง โดยที่วัตถุนั้นสามารถแผ่และดูดกลืนรังสีได้อย่างสมบูรณ์ คือที่อุณหภูมิค่าหนึ่งวัตถุนั้นจะสามารถแผ่รังสีออกมาได้ทุกทิศทางเท่า ๆ กัน และแผ่รังสีได้มากกว่าวัตถุอื่น ๆ นอกจากนี้ยังสามารถดูดกลืนรังสีไว้ได้ทั้งหมดโดยไม่มีการสะท้อนหรือส่งผ่านเกิดขึ้น และเรียกวัดุดนี้ว่า วัตถุดำ (black body)



รูปที่ 4 สเปกตรัมของรังสีที่แผ่ออกมาจากวัตถุดำที่อุณหภูมิต่าง ๆ ดัดแปลงจาก mathematica.stackexchange.com

สมบัติเชิงรังสีของวัสดุ

สภาพการแผ่รังสี (emissivity)

$$\varepsilon = \frac{E(T)}{E_b(T)} \quad (11)$$

เมื่อ ε คือ สภาพการแผ่รังสี (-)

$E(T)$ คือ รังสีทั้งหมดที่แผ่จากวัตถุที่อุณหภูมิ T (W m^{-2})

$E_b(T)$ คือ รังสีทั้งหมดที่แผ่จากวัตถุดำที่อุณหภูมิ T (W m^{-2})

โดย $E_b(T)$ คำนวณได้จากกฎของสเตฟาน-โบลทซ์มาน (Stefan-Boltzmann law) ดังนี้

$$E_b(T) = \sigma T^4 \quad (12)$$

เมื่อ σ คือ ค่าคงที่สเตฟาน-โบลทซ์มาน (เท่ากับ $5.670 \cdot 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$)

T คือ อุณหภูมิของวัตถุดำ (K)

สภาพสะท้อนรังสี (reflectivity)

$$\rho = \frac{G_{\text{ref}}}{G} \quad (13)$$

- เมื่อ ρ คือ สภาพสะท้อนรังสี (-)
 G_{ref} คือ รังสีที่สะท้อนจากวัสดุ (W m^{-2})
 G คือ รังสีที่ตกกระทบวัสดุ (W m^{-2})

สภาพดูดกลืนรังสี (absorptivity)

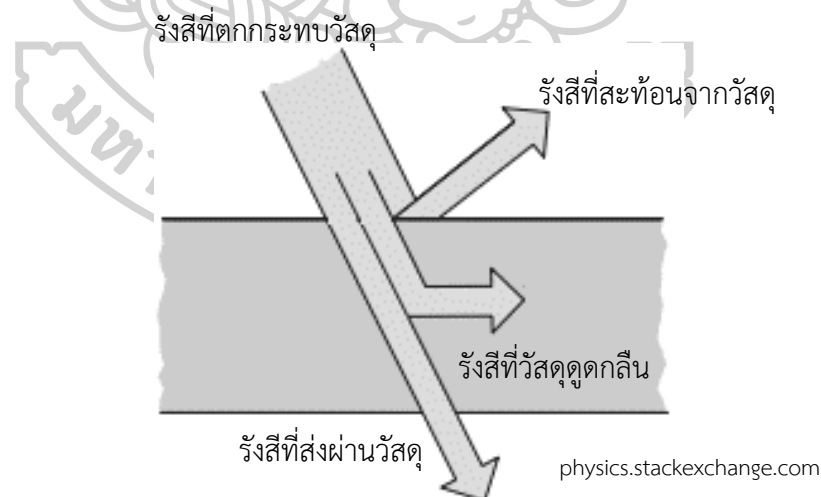
$$\alpha = \frac{G_{\text{ab}}}{G} \quad (14)$$

- เมื่อ α คือ สภาพดูดกลืนรังสี (-)
 G_{ab} คือ รังสีที่วัสดุดูดกลืน (W m^{-2})

สภาพส่งผ่านรังสี (transmissivity)

$$\tau = \frac{G_{\text{tr}}}{G} \quad (15)$$

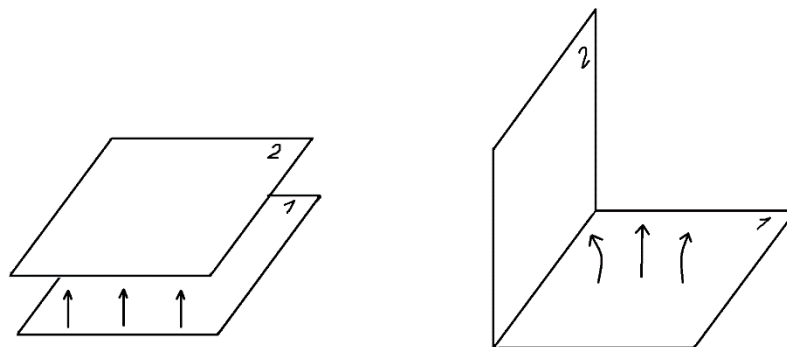
- เมื่อ τ คือ สภาพส่งผ่านรังสี(-)
 G_{tr} คือ รังสีที่ส่งผ่านวัสดุ (W m^{-2})



รูปที่ 5 แผนภาพแสดงรังสีต่าง ๆ ที่เกิดขึ้น เมื่อมีรังสีตกกระทบกับวัสดุ

วิวแฟคเตอร์ (view factor)

การแผ่รังสีระหว่างวัตถุ 2 ชิ้น นอกจากจะขึ้นกับอุณหภูมิและชนิดของวัตถุแล้ว การวางตัวของวัตถุทั้งสองชิ้นนั้น ก็เป็นส่วนสำคัญที่ส่งผลต่อปริมาณการถ่ายเทความร้อน สมมติให้มีวัตถุแผ่นเรียบ 2 แผ่น ที่วางห่างกัน ให้แผ่นที่ 1 เป็นตัวแผ่รังสี ให้แผ่นที่ 2 เป็นตัวรับรังสี หากเปลี่ยนแปลงลักษณะการวางตัวของวัตถุทั้งสองนี้ ก็จะทำให้ปริมาณพลังงานความร้อนที่ถ่ายเทได้เปลี่ยนแปลงไป



รูปที่ 6 วัตถุทั้งสองแผ่นวางขนานหันเข้าหากัน (ซ้าย) และวัตถุทั้งสองวางตั้งฉากกัน (ขวา)

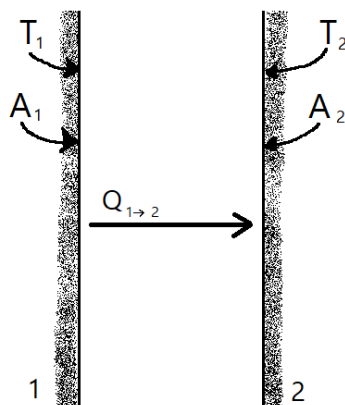
จากรูปที่ 6 กรณีที่วัตถุทั้งสองแผ่นวางขนานหันเข้าหากัน รังสีที่แผ่ออกจากวัตถุแผ่นที่ 1 จะไปตกกระทบบนวัตถุแผ่นที่ 2 ทั้งหมด แต่ในกรณีที่ 2 รังสีจากแผ่นที่ 1 จะไปตกกระทบแผ่นที่ 2 ได้บางส่วนเท่านั้น โดยวิวแฟคเตอร์ คือ อัตราส่วนระหว่างรังสีที่แผ่ออกจากผิวที่ 1 แล้วไปตกกระทบบนแผ่นที่ 2 ต่อ รังสีที่แผ่นที่ 1 แผ่ออกไปทั้งหมด ดังนั้นวิวแฟคเตอร์ในกรณีวัตถุทั้งสองแผ่นวางขนานหันเข้าหากันจะมีค่าเท่ากับ 1 ส่วนกรณีวัตถุทั้งสองวางตั้งฉากกัน วิวแฟคเตอร์จะมีค่าน้อยกว่า 1 โดยสัญลักษณ์ของวิวแฟคเตอร์ของการแผ่รังสีจากแผ่นที่ 1 ไปยังแผ่นที่ 2 คือ F_{12} และสัญลักษณ์ของวิวแฟคเตอร์ของการแผ่รังสีจากแผ่นที่ 2 ไปยังแผ่นที่ 1 จะเป็น F_{21} โดยความสัมพันธ์ระหว่าง F_{12} กับ F_{21} จะเรียกว่า ความสัมพันธ์สลับกัน (reciprocity relation) เขียนเป็นสมการดังนี้

$$A_1 F_{12} = A_2 F_{21} \quad (16)$$

- เมื่อ F_{12} คือ วิวแฟคเตอร์ของการแผ่รังสีจากแผ่นที่ 1 ไปยังแผ่นที่ 2 (-)
 F_{21} คือ วิวแฟคเตอร์ของการแผ่รังสีจากแผ่นที่ 2 ไปยังแผ่นที่ 1 (-)
 A_1 คือ พื้นที่ผิวของแผ่นที่ 1 (m^2)
 A_2 คือ พื้นที่ผิวของแผ่นที่ 2 (m^2)

การถ่ายเทความร้อนโดยการแผ่รังสีระหว่างผิวของวัตถุดำ

สมมติให้มีผิวของวัตถุดำ 2 ผิว วางอยู่ในสุญญากาศ พื้นที่ผิวของวัตถุดำชิ้นที่ 1 เป็น A_1 มีอุณหภูมิ T_1 และพื้นที่ของวัตถุดำชิ้นที่ 2 เป็น A_2 มีอุณหภูมิ T_2 ตามรูปที่ 7



รูปที่ 7 วัตถุดำ 2 ผิว มีอุณหภูมิต่างกัน และเกิดการถ่ายเทความร้อนโดยการแผ่รังสี

จากรูปที่ 7 ผิวที่ 1 จะแผ่รังสีไปตกกระทบผิวที่ 2 เท่ากับ $A_1\sigma T_1^4 F_{12}$ และผิวที่ 2 ก็แผ่รังสีไปตกกระทบผิวที่ 1 ด้วยเช่นกัน เท่ากับ $A_2\sigma T_2^4 F_{21}$ เมื่อพิจารณารังสีลัพธ์ที่ผิวที่ 1 แผ่รังสีให้ผิวที่ 2 ก็จะได้ดังสมการต่อไปนี้

$$Q_{1 \rightarrow 2} = A_1\sigma T_1^4 F_{12} - A_2\sigma T_2^4 F_{21} \quad (17)$$

เมื่อ $Q_{1 \rightarrow 2}$ คือ รังสีลัพธ์ที่แผ่จากผิวที่ 1 ไปตกกระทบผิวที่ 2 (W)
เนื่องจากความสัมพันธ์สลับกันจะสามารถเขียนสมการใหม่ได้ดังต่อไปนี้

$$Q_{1 \rightarrow 2} = A_1\sigma F_{12}(T_1^4 - T_2^4) \quad (18)$$

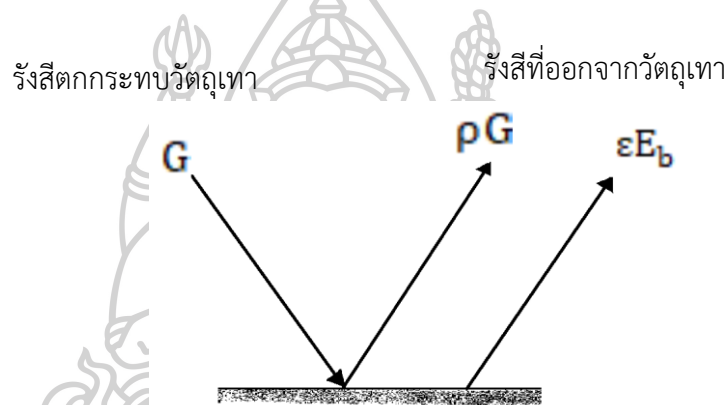
การถ่ายเทความร้อนโดยการแผ่รังสีระหว่างผิวของวัตถุเทา

วัตถุเทา (gray body) หรือวัตถุทึบรังสี (opaque body) เป็นวัตถุที่สมมติขึ้นเพื่อใช้คำนวณการถ่ายเทพลังงานความร้อนโดยการแผ่รังสีแทนวัตถุธรรมดา เนื่องจากวัตถุธรรมดานั้นมีความซับซ้อนมากกว่าวัตถุดำ คือสามารถสะท้อนรังสีได้ และมีสมบัติเชิงรังสีที่ขึ้นกับความยาวคลื่น ทำให้การคำนวณโดยใช้วัตถุธรรมดานั้นทำได้ยาก จึงเลือกใช้วัตถุเทาที่มีสมบัติเชิงรังสีไม่ขึ้นกับความยาวคลื่น และมีสมบัติของผิวกระจายรังสีสมบูรณ์ (คือรังสีในมุมตันที่แผ่หรือสะท้อนจากผิวจะเท่ากันทุกทิศทาง) เพื่อลดความซับซ้อนในการคำนวณ

เมื่อพิจารณาวัตถุเทา รังสีที่ออกจากวัตถุทั้งหมด (radiosity, J) จะประกอบด้วยรังสีที่แผ่ออกจากวัตถุเทา (ϵE_b) และรังสีที่สะท้อนจากวัตถุเทา (ρG) เขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$J = \epsilon E_b + \rho G \quad (19)$$

เมื่อ	J	คือ รังสีทั้งหมดที่ออกจากวัตถุ ($W m^{-2}$)
	ϵ	คือ สภาพแผ่รังสีของผิววัตถุ (-)
	E_b	คือ รังสีที่แผ่จากวัตถุดำเมื่อวัตถุดำมีอุณหภูมิเท่ากับวัตถุเทา ($W m^{-2}$)
	ρ	คือ สภาพสะท้อนรังสีของผิววัตถุ (-)
	G	คือ รังสีที่ตกกระทบผิววัตถุ ($W m^{-2}$)



รูปที่ 8 รังสีตกกระทบ และรังสีที่ออกจากวัตถุเทา

อัตราการงานรังสีสุทธิที่ผิววัตถุ สามารถคำนวณได้จาก รังสีที่ออกจากผิววัตถุลบกับรังสีที่ตกกระทบผิววัตถุ สามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

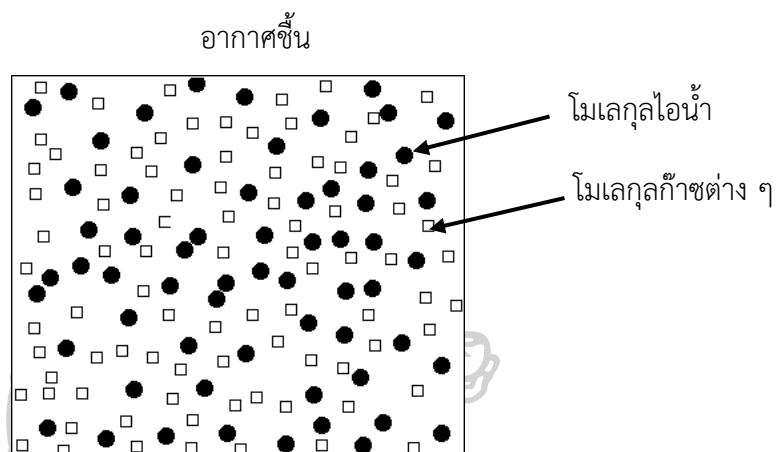
$$\dot{Q} = AJ - AG \quad (20)$$

เมื่อ	\dot{Q}	คือ อัตราพลังงานรังสีสุทธิที่ผิววัตถุ (W)
	J	คือ รังสีทั้งหมดที่ออกจากผิววัตถุ ($W m^{-2}$)
	G	คือ รังสีที่ตกกระทบผิววัตถุ ($W m^{-2}$)
	A	คือ พื้นที่ผิววัตถุ (m^2)

2.2 อากาศชื้น

2.2.1 ความหมายของอากาศชื้น (เสริม จันทรฉาย, 2560a)

อากาศชื้น (humid air) คือ ส่วนประกอบระหว่างโมเลกุลก๊าซต่าง ๆ หรืออากาศแห้ง (dry air) กับความชื้นหรือโมเลกุลน้ำหรือไอน้ำ (water vapour) อยู่ด้วยกัน โดยอากาศแห้งส่วนใหญ่จะประกอบด้วยก๊าซไนโตรเจนและก๊าซออกซิเจน



รูปที่ 9 ภาพจำลองส่วนประกอบของอากาศชื้น

อากาศแห้งจะสามารถดูดซับไอน้ำเข้าไปแล้วกลายเป็นอากาศชื้น โดยอุณหภูมิของอากาศชื้นจะมีผลต่อปริมาณไอน้ำสูงสุดที่สามารถมีอยู่ในอากาศชื้นนั้นได้ ดังนั้นอากาศชื้นที่มีอุณหภูมิสูงก็จะสามารถรับปริมาณไอน้ำได้มากกว่าอากาศชื้นที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า

ถ้าอากาศชื้นดูดซับไอน้ำจนถึงปริมาณสูงสุดที่จะสามารถรับไอน้ำไว้ได้ คืออากาศชื้นนั้นอยู่ในสภาวะอิ่มตัว เมื่อมีไอน้ำระเหยเพิ่มเข้าไปอีกจะทำให้อากาศชื้นนั้นเกิดการควบแน่น เปลี่ยนไอน้ำส่วนเกินให้กลายเป็นน้ำในสถานะของเหลว หรืออีกกรณีหนึ่ง หากทำการลดอุณหภูมิของอากาศชื้นที่อิ่มตัว จะทำให้อากาศชื้นนั้นรับปริมาณไอน้ำได้น้อยลงและเกิดการควบแน่นได้เช่นกัน

2.2.2 สมบัติของอากาศชื้น (เสริม จันทรฉาย, 2560a)

1) อัตราส่วนความชื้น (humidity ratio, w) คือ อัตราส่วนระหว่างมวลของไอน้ำกับมวลของอากาศแห้ง โดยอัตราส่วนความชื้นกับความดันไอน้ำและความดันอากาศมีความสัมพันธ์กันเป็นดังนี้

$$w = 0.62198 \frac{p_v}{p - p_v} \quad (21)$$

เมื่อ	w	คือ อัตราส่วนความชื้น (kg kg^{-1})
	p_v	คือ ความดันไอน้ำในอากาศชื้น (kPa)
	p	คือ ความดันอากาศชื้น (kPa)

2) เอนทัลปี (enthalpy, h) คือ อัตราส่วนระหว่างพลังงานความร้อนในอากาศชั้นต่อหนึ่งหน่วยมวลอากาศแห้ง หากใช้ระดับอ้างอิงที่อุณหภูมิ $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ เอนทัลปีมีค่าเป็นศูนย์ จะสามารถคำนวณหาค่าเอนทัลปีได้จากสมการ

$$h = 1.006T' + w(2501 + 1.775T'); \quad -50 \leq T' \leq 110\text{ }^{\circ}\text{C} \quad (22)$$

เมื่อ h คือ เอนทัลปี (J g^{-1})
 T' คือ อุณหภูมิกระเปาะแห้ง ($^{\circ}\text{C}$)
 w คือ อัตราส่วนความชื้น (kg kg^{-1})

3) ความดันไอน้ำ (vapour pressure, p_v) เนื่องจากอากาศชั้นประกอบด้วยไอน้ำและก๊าซต่าง ๆ ความดันย่อยของไอน้ำ จึงเรียกว่าความดันไอน้ำ ถ้าอากาศชั้นนั้นอยู่ในสภาวะอิ่มตัว จะเรียกความดันไอน้ำนั้นว่า ความดันไอน้ำอิ่มตัว (saturated vapour pressure, p_{vs}) จะสามารถคำนวณหาค่าความดันไอน้ำและความดันไอน้ำอิ่มตัว ได้ดังนี้

$$p_v = \frac{pw}{0.62198 + w} \quad (23)$$

$$\ln(p_{vs}) = 24.2779 - \frac{6238.64}{T} - 0.344438 \ln(T); \quad 233.16 \leq T \leq 273.16 \quad (24)$$

$$\ln(p_{vs}) = \frac{-7511.52}{T} + 89.63121 + 0.023998970T - 1.1654551 \times 10^{-5}T^2 - 1.2810336 \times 10^{-8}T^3 + 2.0998405 \times 10^{-11}T^4 - 12.150799 \ln(T) ; 273.16 \leq T \leq 393.16 \quad (25)$$

เมื่อ p_v คือ ความดันไอน้ำในอากาศชั้น (kPa)
 p_{vs} คือ ความดันไอน้ำอิ่มตัว (kPa)
 p คือ ความดันบรรยากาศ (kPa)
 w คือ อัตราส่วนความชื้น (kg kg^{-1})
 T คือ อุณหภูมิกระเปาะแห้งของอากาศชั้นที่อิ่มตัว (K)

4) ความชื้นสัมพัทธ์ (relative humidity, rh) คือ อัตราส่วนของความดันไอน้ำต่อความดันไอน้ำอิ่มตัว อากาศที่มีความชื้นสัมพัทธ์ต่ำจะสามารถดูดซับปริมาณไอน้ำได้มากกว่าอากาศที่มีความชื้นสัมพัทธ์สูง

$$rh = \frac{p_v}{p_{vs}} \quad (26)$$

$$rh = \frac{p_v}{p_{vs}} \times 100 \quad (27)$$

$$rh = \frac{\mu}{1 - (1 - \mu) \frac{p_{vs}}{p}} \quad (28)$$

เมื่อ	rh	คือ ความชื้นสัมพัทธ์ (-,%)
	p_v	คือ ความดันไอน้ำในอากาศชื้น (kPa)
	p_{vs}	คือ ความดันไอน้ำอิ่มตัว (kPa)
	p	คือ ความดันอากาศชื้น (kPa)
	μ	คือ ดัชนีความชื้น (-)

5) อุณหภูมิกระเปาะแห้ง (dry bulb temperature, T) คือ อุณหภูมิของอากาศที่วัดได้โดยวิธีทั่วไป เช่น การวัดโดยใช้เทอร์โมมิเตอร์ให้สัมผัสกับอากาศโดยตรง

6) อุณหภูมิกระเปาะเปียก (wet bulb temperature, T^*) คือ อุณหภูมิของอากาศที่วัดด้วยเทอร์โมมิเตอร์กระเปาะเปียก (เทอร์โมมิเตอร์ที่กระเปาะพันด้วยผ้าเปียก) และต้องมีอากาศไหลผ่าน ถ้าอากาศที่มีความชื้นสัมพัทธ์ต่ำอุณหภูมิกระเปาะเปียกจะต่ำกว่าอุณหภูมิกระเปาะแห้งมาก แต่สำหรับอากาศอิ่มตัวอุณหภูมิกระเปาะเปียกจะเท่ากับอุณหภูมิกระเปาะแห้ง

7) ปริมาตรจำเพาะ (specific volume, v) คือ อัตราส่วนของปริมาตรอากาศชื้นต่อมวลอากาศแห้ง ถ้าสมมติให้อากาศชื้นเป็นก๊าซในอุดมคติ (ideal gas) จะสามารถเขียนความสัมพันธ์ของปริมาตรจำเพาะกับตัวแปรอื่น ๆ ของอากาศชื้นได้ดังนี้

$$v = \frac{R_a T}{p} (1 + 1.6078w) \quad (29)$$

เมื่อ	v	คือ ปริมาตรจำเพาะ ($m^3 kg^{-1}$)
	T	คือ อุณหภูมิกระเปาะแห้ง (K)
	p	คือ ความดันบรรยากาศ (kPa)
	w	คือ อัตราส่วนความชื้น ($kg kg^{-1}$)
	R_a	คือ ค่าคงที่ของก๊าซ (gas constant) ($N m kg^{-1}K^{-1}$)

8) อุณหภูมิจุดน้ำค้าง (dew point temperature, T_{dp}) คือ อุณหภูมิของอากาศชื้นที่อิ่มตัว โดยมีความสัมพันธ์กับความดันไอน้ำ เขียนได้เป็นสมการดังนี้

$$T'_{dp} = 5.994 + 12.41a + 0.4273a^2 ; \quad -50 \leq T' \leq 0 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (30)$$

$$T'_{dp} = 6.983 + 14.38a + 1.079a^2 ; \quad 0 \leq T' \leq 50 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (31)$$

$$T'_{dp} = 13.80 + 9.478a + 1.991a^2 ; \quad 50 \leq T' \leq 110 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (32)$$

เมื่อ $a = \ln(p_v)$

โดยที่ T'_{dp} คือ อุณหภูมิจุดน้ำค้าง ($^\circ\text{C}$)

T' คือ อุณหภูมิกระเปาะแห้ง ($^\circ\text{C}$)

p_v คือ ความดันไอน้ำ (kPa)

9) ดักรีความอิ่มตัว (degree of saturation, μ) คือ อัตราส่วนของความชื้นของอากาศชื้น ต่อด้วยอัตราส่วนความชื้นเมื่ออากาศอิ่มตัว มีนิยามตามสมการดังนี้

$$\mu = \frac{w}{w_s} \quad (33)$$

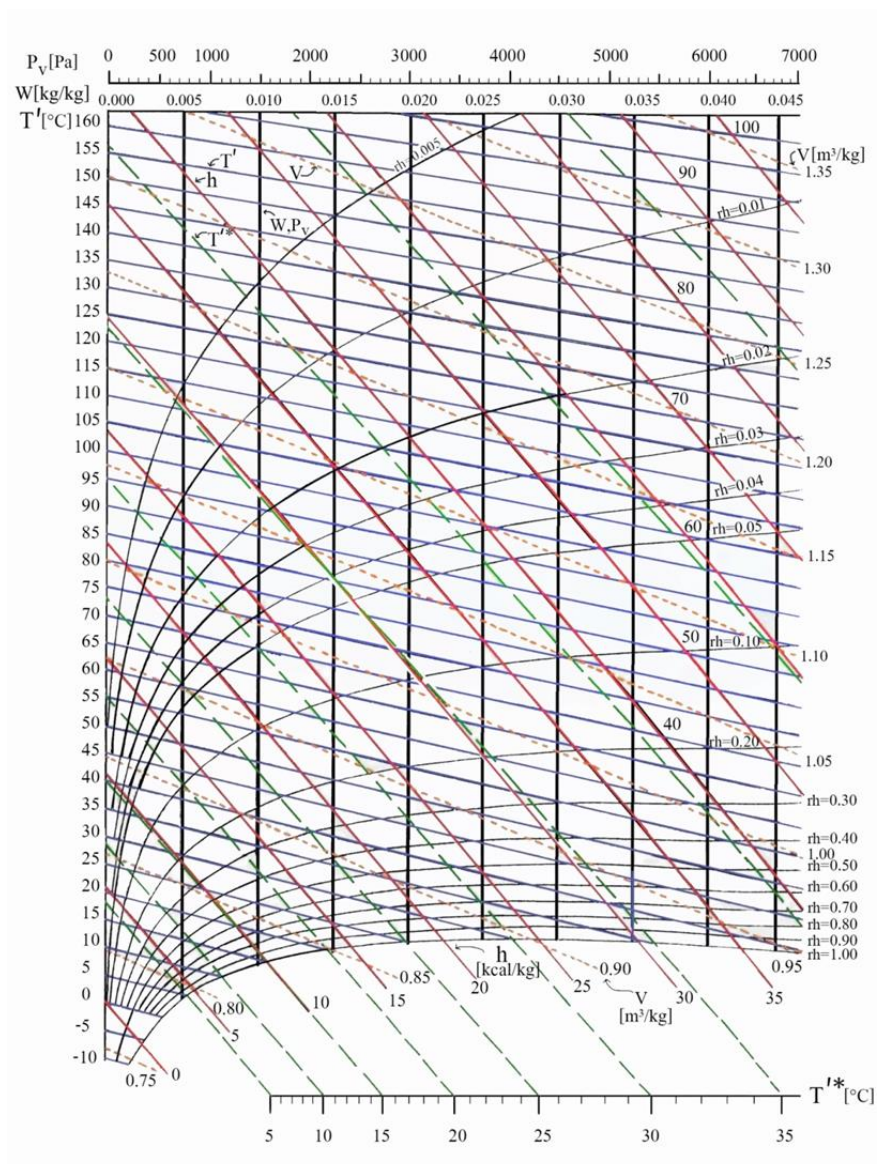
เมื่อ μ คือ ดักรีความอิ่มตัว (-)

w คือ อัตราส่วนความชื้น (kg kg^{-1})

w_s คือ อัตราส่วนความชื้นเมื่ออากาศชื้นอิ่มตัว (kg kg^{-1})

2.2.3 แผนภูมิอากาศชื้น (psychrometric chart)

แผนภูมิอากาศชื้นเป็นแผนภูมิที่แสดงความสัมพันธ์ของตัวแปร 7 ได้แก่ อัตราส่วนความชื้น (w) เอนทัลปี (h) ความดันไอน้ำ (p_v) ความชื้นสัมพัทธ์ (rh) อุณหภูมิกระเปาะแห้ง (T) อุณหภูมิกระเปาะเปียก (T^*) และปริมาตรจำเพาะ (v) ไว้ด้วยกันในแผนภูมิเดียว แผนภูมิอากาศชื้นมีหลายรูปแบบด้วยกัน ตัวอย่างดังรูปที่ 10 เป็นแผนภูมิอากาศชื้นแบบของมอริเยร์ (Mollier diagram of humid air)



รูปที่ 10 แผนภูมิอากาศชื้นแบบของมอริเยร์ (ดัดแปลงจาก เสริม จันทร์ฉาย, 2560a)

2.3 วัสดุชื้น (moist materials)

วัสดุชื้น คือวัสดุซึ่งประกอบด้วยมวลของของแข็งและความชื้นที่แทรกอยู่ โดยทั่วไปความชื้นจะหมายถึงน้ำที่อยู่ในรูปของของเหลว วัสดุชื้นแบ่งออกเป็นสองชนิด ได้แก่ วัสดุดูดซับความชื้น (Hygroscopic material) เช่น วัสดุทางชีวภาพ (biological material) น้ำจะแทรกอยู่ในเนื้อวัสดุ และวัสดุไม่ดูดซับความชื้น (Non hygroscopic material) เช่น ทราย กรวด หิน พลาสติก แต่สามารถมีความชื้นได้ เนื่องจากน้ำไปเกาะอยู่ที่ผิววัสดุแต่ไม่ซึมเข้าไปในเนื้อวัสดุ (เสริม จันทร์ฉาย, 2560a)

2.3.1 ปริมาณความชื้นในวัสดุชื้น (เสริม จันทร์ฉาย, 2560a)

ปริมาณความชื้นในวัสดุชื้น สามารถบอกได้ 2 วิธี ได้แก่ ความชื้นมาตรฐานแห้ง และความชื้นมาตรฐานเปียก

1) ความชื้นมาตรฐานแห้ง (moisture dry basis) คืออัตราส่วนระหว่างมวลของน้ำต่อมวลของของแข็ง เขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$M_d = \frac{m_w}{m_s} \quad (34)$$

เมื่อ M_d คือ ความชื้นมาตรฐานแห้ง (kg kg^{-1})
 m_w คือ มวลของน้ำ (kg)
 m_s คือ มวลของของแข็งหรืออาจเรียกว่ามวลแห้ง (kg)

2) ความชื้นมาตรฐานเปียก (moisture wet basis) คืออัตราส่วนระหว่างมวลของน้ำต่อมวลของวัสดุชื้น เขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$M_w = \frac{m_w}{m_h} \quad (35)$$

$$M_w = \frac{m_w}{m_w + m_s} \quad (36)$$

เมื่อ M_w คือ ความชื้นมาตรฐานเปียก (kg kg^{-1})
 m_w คือ มวลของน้ำ (kg)
 m_h คือ มวลของวัสดุชื้น (kg)

การใช้งานค่าปริมาณความชื้นทั้งสองแบบจะแตกต่างกัน ความชื้นมาตรฐานแห้งมักใช้ใน งานเชิงวิทยาศาสตร์เนื่องจากความชื้นมาตรฐานแห้งจะแปรผันตรงกับมวลของน้ำในวัสดุขึ้น สำหรับ ความชื้นมาตรฐานเปียกมักนิยมนำไปใช้ในเชิงการค้า โดยจะนำไปคูณด้วย 100 จะได้ตัวเลขออกมา เป็นเปอร์เซ็นต์

การแปลงค่าปริมาณความชื้นระหว่างทั้งสองแบบ สามารถทำได้โดยใช้ความสัมพันธ์ดังนี้ (สมชาติ โสภณรณฤทธิ์, 2529)

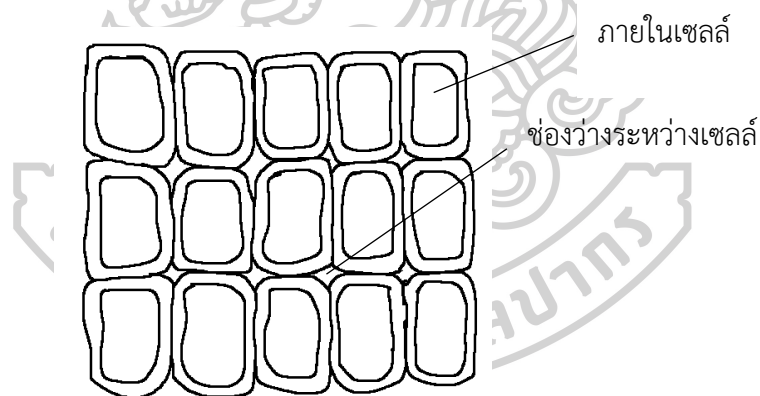
$$M_d = \frac{M_w}{1 - M_w} \quad (37)$$

หรือ

$$M_w = \frac{M_d}{1 + M_d} \quad (38)$$

2.3.2 น้ำในวัสดุขึ้น (เสริม จันทรฉาย, 2560)

น้ำที่กระจายตัวอยู่ในวัสดุขึ้นจะยึดเกาะอยู่กับของแข็ง โดยลักษณะการยึดเกาะนั้นจะ แตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับลักษณะของวัสดุขึ้น ตัวอย่างเช่น วัสดุทางชีวภาพ จะมีน้ำเป็นองค์ประกอบส่วน สำคัญ โดยน้ำจะอยู่ทั้งภายในเซลล์และในช่องว่างระหว่างเซลล์ (รูปที่ 11)



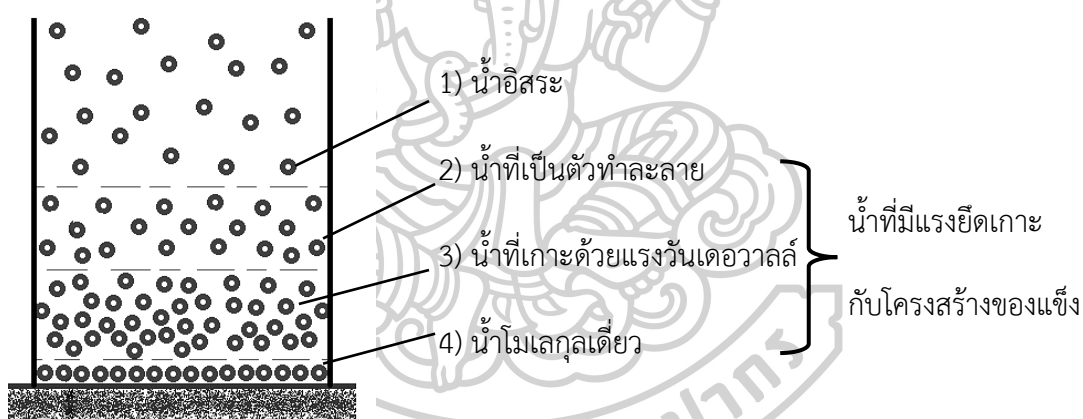
รูปที่ 11 น้ำภายในเซลล์และในช่องว่างระหว่างเซลล์ของวัสดุชีวภาพ

(ดัดแปลงจาก เสริม จันทรฉาย, 2560a)

น้ำในวัสดุชั้นจะมีแรงยึดเกาะกับของแข็งที่แตกต่างกัน แบ่งเป็นชั้นตามลักษณะการเกาะตัวของน้ำบนของแข็งได้ดังนี้

- 1) น้ำอิสระ (free water) เป็นน้ำชั้นนอกสุด พฤติกรรมเหมือนน้ำในสถานะเปิด มีแรงยึดเหนี่ยวน้อย
- 2) น้ำที่เป็นตัวทำละลาย (solvent water) เป็นน้ำที่ละลายอยู่กับสารอินทรีย์ต่าง ๆ ในวัสดุ
- 3) น้ำที่เกาะด้วยแรงแวนเดอวาลส์ (water attached with Van de Waal force)
- 4) น้ำโมเลกุลเดี่ยว (mono molecule water) เป็นน้ำที่สัมผัสอยู่กับผิวของของแข็งจะมีแรงยึดเกาะมากที่สุด จะไม่สามารถใช้น้ำชั้นนี้เป็นตัวทำละลายได้

น้ำตั้งแต่ชั้นที่สองถึงชั้นที่สี่เป็นน้ำที่มีแรงยึดเกาะกับโครงสร้างของแข็ง (bound water) ดังนั้นจึงแบ่งน้ำในวัสดุชั้นออกเป็นสองส่วนใหญ่ ๆ คือ น้ำอิสระ และ น้ำที่มีแรงยึดเกาะกับโครงสร้างของแข็ง



รูปที่ 12 น้ำแต่ละชั้นในวัสดุชั้น (ดัดแปลงจาก Brooker และคณะ, 1974)

2.3.3 แอคติวิตีของน้ำ (water activity) (เสริม จันท์ฉาย, 2560a)

วัสดุชิ้นที่ต่างกันจะมีน้ำที่แทรกตัวอยู่ด้วยแรงยึดเกาะที่ต่างกัน เช่นวัสดุชิ้นบางอย่างมีปริมาณน้ำอิสระอยู่มาก บางอย่างมีปริมาณน้ำอิสระอยู่น้อย ปริมาณของน้ำในวัสดุชิ้นคือสิ่งจำเป็นในการดำรงชีวิตของจุลชีพ (micro organism) ซึ่งจุลชีพแต่ละประเภทจะมีความสามารถในการดึงเอาน้ำออกมาใช้ประโยชน์แตกต่างกัน และยังขึ้นอยู่กับระดับความแอคทิฟของน้ำ ที่เรียกว่า แอคติวิตีของน้ำ (a_w) โดยนิยามเป็นสมการดังนี้

$$a_w = \frac{p_{vp}}{p_{vs}} \quad (39)$$

เมื่อ a_w คือ แอคติวิตีของน้ำ (-)
 p_{vp} คือ ความดันไอของวัสดุชิ้น (kPa)
 p_{vs} คือ ความดันไอน้ำอิ่มตัว (kPa)

จากสมการจะเห็นได้ว่าวัสดุชิ้นที่มีปริมาณน้ำอิสระมากหรือมีความดันไอน้ำมากจะมีค่า a_w สูง ซึ่งระดับของ a_w ที่แตกต่างกัน จะมีผลต่อการดำรงชีวิตของจุลชีพแต่ละประเภท โดยค่าแอคติวิตีของน้ำต่ำสุดที่จุลินทรีย์แต่ละชนิดสามารถมีชีวิตอยู่ได้แสดงดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ค่าแอคติวิตีของน้ำต่ำสุดที่จุลินทรีย์สามารถมีชีวิตอยู่ได้ (ดัดแปลงจาก สักกมน เทพหัสดิน ณ อยุธยา, 2555)

จุลินทรีย์	a_w
จุลินทรีย์ที่ทำให้เกิดเมือกที่ผิวของเนื้อสัตว์	0.98
แบคทีเรียแกรมลบส่วนใหญ่	0.97
บาซิลลัส ซับทิลิส และสปอร์ของคลอสทริเดียม บูโกลินัม	0.95
ซูโดโมแนส และสปอร์ของบาซิลลัส ซีเรียส	0.93
คลอสทริเดียม บูโกลินัม และซาลโมเนลลา	0.93
แบคทีเรียแกรมบวกส่วนใหญ่	0.90
ยีสต์ส่วนใหญ่	0.88
แอสเปอร์จิลลัส ไนเจอร์	0.85
ราส่วนใหญ่	0.80
แบคทีเรียที่ชอบเกลือ (Halophilic Bacteria)	0.75
ยีสต์ที่ชอบน้ำตาล (Osmophilic Yeast)	0.62
ราที่ชอบเจริญในที่แห้ง (Xerophilic Fungi)	0.61

ในกรณีที่วัสดุชิ้นมีความดันไอน้ำเท่ากับความดันไอน้ำของอากาศที่อยู่แวดล้อม นั่นคือวัสดุชิ้นนั้นอยู่ในสภาวะสมดุลทางความชื้นกับอากาศแวดล้อม และเนื่องจากความชื้นสัมพัทธ์คืออัตราส่วนระหว่างความดันไอน้ำต่อความดันไอน้ำอิ่มตัว ในสภาวะนี้จะได้ว่า

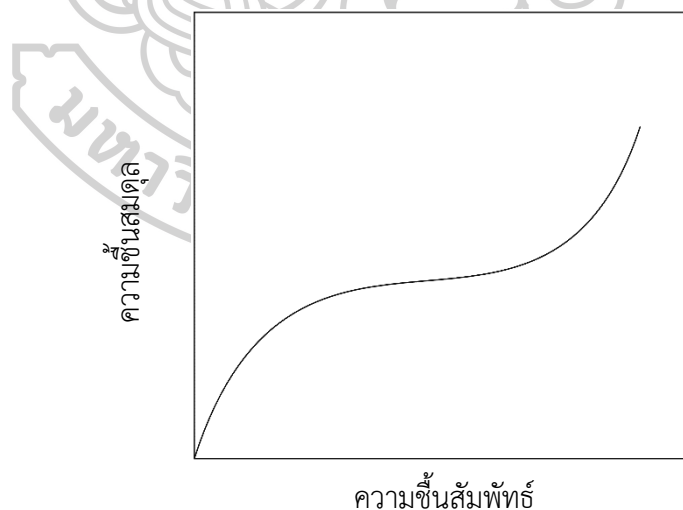
$$a_w = rh \quad (40)$$

เมื่อ rh คือ ความชื้นสัมพัทธ์ (-)

2.3.4 ความชื้นสมดุล (equilibrium moisture content)

วัสดุชิ้นที่มีความดันไอน้ำ p_{vp} เมื่อนำไปวางไว้ที่อากาศแวดล้อมที่มีความดันไอน้ำเป็น p_{va} ถ้า $p_{vp} > p_{va}$ วัสดุชิ้นจะคายความชื้นสู่อากาศ หรือถ้า $p_{vp} < p_{va}$ อากาศจะถ่ายเทความชื้นเข้าสู่วัสดุชิ้น จนกระทั่ง $p_{vp} = p_{va}$ คือ วัสดุชิ้นอยู่ในสภาวะสมดุลกับอากาศแวดล้อม ในสภาวะนี้ ความชื้นของวัสดุชิ้นจะเรียกว่าความชื้นสมดุล และจากสมการ 40 แสดงว่าความชื้นสมดุลนั้นสัมพันธ์กับความชื้นสัมพัทธ์หรือค่า a_w ของวัสดุชิ้นนั้น ดังนั้นหากทราบค่า a_w ก็สามารถทราบปริมาณน้ำในผลิตภัณฑ์ได้

ความชื้นสมดุลจะขึ้นกับชนิดของวัสดุชิ้น อุณหภูมิอากาศแวดล้อม และความชื้นสัมพัทธ์ที่อยู่แวดล้อมวัสดุชิ้นนั้น ถ้าเขียนกราฟระหว่างความชื้นสมดุลกับความชื้นสัมพัทธ์ โดยอากาศแวดล้อมมีอุณหภูมิคงที่จะได้กราฟที่เรียกว่า ซอร์บชันไอโซเทอม (sorption isotherm) ดังรูปที่ 13



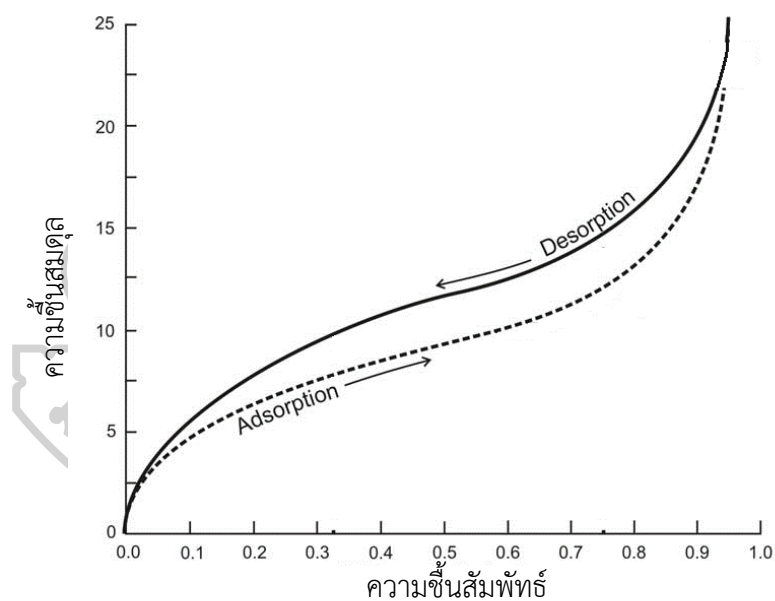
รูปที่ 13 ซอร์บชันไอโซเทอม (ดัดแปลงจาก เสริม จันทร์ฉาย, 2560a)

ซอร์บชันไอโซเทอมของวัสดุขึ้นแบ่งออกเป็น 2 ประเภท

1) ดีซอร์บชันไอโซเทอม (desorption isotherm) เกิดขึ้นเมื่อนำวัสดุขึ้นที่มีความชื้นสูงมาสัมผัสกับอากาศที่มีความชื้นสัมพัทธ์สูงและค่อย ๆ ลดความชื้นสัมพัทธ์ลงเป็นลำดับ และให้วัสดุขึ้นคายความชื้นเพื่อเข้าสู่สมดุลความชื้น

2) แอดซอร์บชันไอโซเทอม (adsorption isotherm) เกิดขึ้นเมื่อนำวัสดุขึ้นที่มีความชื้นต่ำมาสัมผัสกับอากาศที่มีความชื้นสัมพัทธ์ต่ำและค่อย ๆ เพิ่มความชื้นสัมพัทธ์ขึ้นเป็นลำดับ และให้วัสดุขึ้นดูดความชื้นเพื่อเข้าสู่สมดุลความชื้น

กราฟของซอร์บชันไอโซเทอมทั้ง 2 ประเภท จะเป็นเส้นกราฟที่แตกต่างกันเมื่อนำเส้นกราฟทั้ง 2 มารวมกันจะเกิดเป็นปรากฏการณ์ฮิสเทอเรซิส (hysteresis) คือกราฟที่ย้อนกลับไม่ซ้ำเส้นทางเดิม ดังรูปที่ 14



รูปที่ 14 ดีซอร์บชันไอโซเทอมและแอดซอร์บชันไอโซเทอม (ดัดแปลงจาก Airaksinen, 2005)

2.4 การอบแห้ง

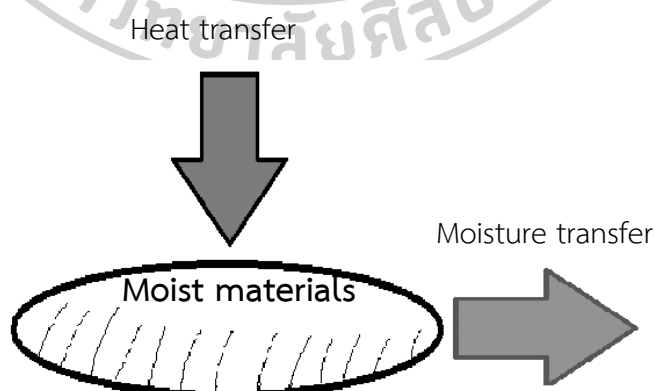
2.4.1 หลักการพื้นฐานของการอบแห้ง

การอบแห้งคือการลดความชื้นในวัสดุขึ้นเพื่อยืดอายุการเก็บรักษา เช่น ผลผลิตทางการเกษตรที่มีความชื้นสูงมากมักจะเก็บรักษาได้ไม่นานเพราะเกิดการสูญเสียจากการเน่าเปื่อย และมึ้น้ำหนักมากทำให้ต้องใช้ต้นทุนในการขนส่งมาก เมื่อผ่านกระบวนการอบแห้งจะทำให้การเน่าเปื่อยเกิดได้ยากขึ้นจึงเก็บรักษาได้นานขึ้นและยังช่วยลดน้ำหนักของผลิตภัณฑ์ ทำให้ต้นทุนในการขนส่งลดลง นอกจากนี้การอบแห้งยังเป็นการถนอมและแปรรูปอาหารในอีกรูปแบบหนึ่ง เช่น ก๋วยเตี๋ยว ลูกเกต ปลาแห้ง เนื้อแห้ง เป็นต้น

หลักการพื้นฐานของการอบแห้งคือ การที่วัสดุขึ้นได้รับความร้อน ทำให้วัสดุขึ้นมีอุณหภูมิสูงขึ้นน้ำในวัสดุขึ้นจึงสามารถระเหยออกมาได้ จนกระทั่งผลิตภัณฑ์แห้งหรือเหลือความชื้นตามต้องการ ดังนั้นกระบวนการที่มีส่วนสำคัญต่อการอบแห้งมีอยู่ 2 กระบวนการด้วยกัน คือ

- 1) กระบวนการถ่ายเทพลังงานความร้อนเข้าสู่วัสดุขึ้น (heat transfer)
- 2) กระบวนการถ่ายเทความชื้นออกจากวัสดุขึ้น (moisture transfer)

การถ่ายเทพลังงานความร้อนเข้าสู่วัสดุขึ้นจะใช้หลักของการถ่ายเทความร้อน คือ การพาความร้อน นำความร้อน หรือแผ่รังสีความร้อนวิธีใดวิธีหนึ่งหรือหลายวิธีร่วมกันก็ได้ สำหรับการถ่ายเทความชื้นออกจากวัสดุขึ้น จะใช้หลักของการแพร่ความชื้น โดยความชื้นจะเคลื่อนที่จากภายในวัสดุขึ้นซึ่งมีความหนาแน่นมากออกมายังภายนอกของวัสดุขึ้น ซึ่งมีความหนาแน่นน้อย จากนั้นจึงถ่ายเทความชื้นไปยังอากาศแวดล้อมต่อไป



รูปที่ 15 การถ่ายเทความร้อนและความชื้นที่เกิดขึ้นกับวัสดุขึ้นขณะทำการอบแห้ง

กระบวนการถ่ายเทความชื้นจากภายในออกมาสู่ผิวของวัสดุชิ้น จะขึ้นกับอุณหภูมि ความชื้น และลักษณะกายภาพของวัสดุชิ้นนั้น โดยมีกลไกที่สำคัญ ได้แก่

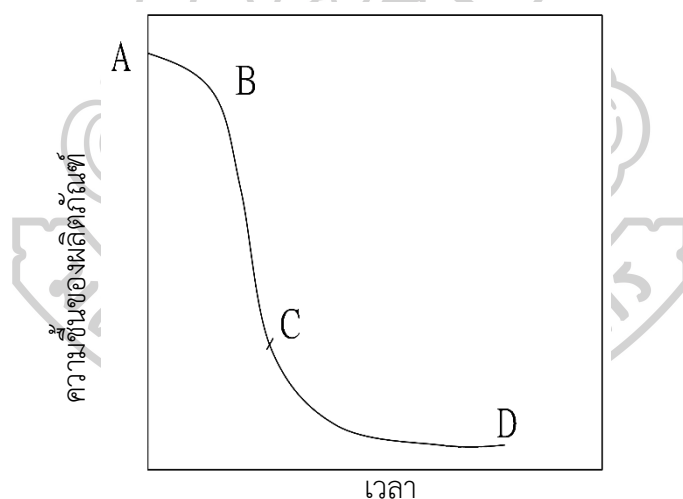
1) การแพร่ของน้ำในสถานะของเหลว (liquid diffusion) น้ำจะแพร่จากภายในออกมายังผิวด้านนอกของวัสดุชิ้น เนื่องจากภายในจะมีความเข้มข้นของน้ำมากกว่าที่ผิวด้านนอก ซึ่งบริเวณผิวด้านนอกของวัสดุชิ้นนั้นจะมีการสูญเสียน้ำให้กับอากาศแวดล้อม

2) การแพร่ของไอน้ำ (vapour diffusion) เกิดขึ้นเมื่อน้ำกลายเป็นไอน้ำภายในวัสดุชิ้น

3) ความดันไฮโดรสแตติกส์ (hydrostatic pressure) เกิดขึ้นเมื่อวัสดุชิ้นหดตัว (shrinkage) ในขณะที่เกิดกระบวนการอบแห้ง น้ำภายในวัสดุชิ้นจึงมีความดันเพิ่มขึ้น

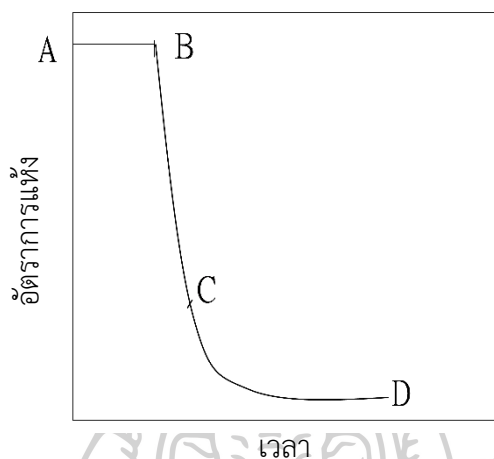
2.4.2 พฤติกรรมการแห้งของวัสดุชิ้นระหว่างการอบแห้ง

วัสดุชิ้นที่มีความชื้นสูงอย่างเช่นผลิตภัณฑ์ทางการเกษตร ในขณะที่ทำการอบแห้ง ผลิตภัณฑ์จะมีความชื้นลดลงไปตามเวลา เมื่อนำมาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นของผลิตภัณฑ์กับเวลา จะได้กราฟการแห้ง (drying curve) ดังรูปที่ 16

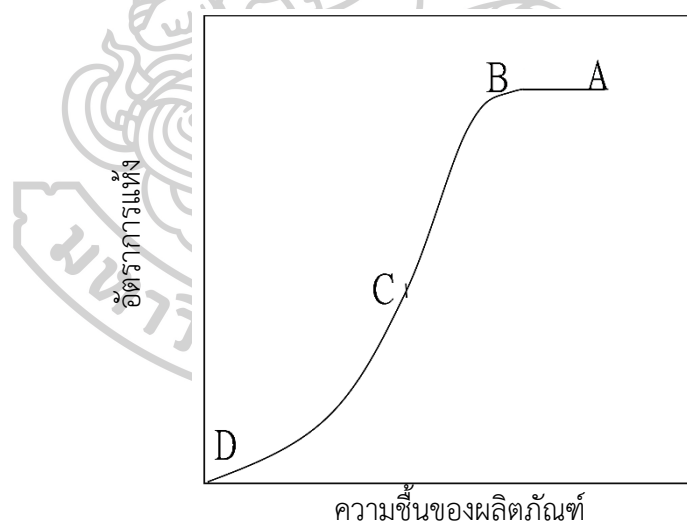


รูปที่ 16 กราฟการแห้ง (ดัดแปลงจาก เสริม จันทร์ฉาย, 2560a)

อัตราส่วนของการเปลี่ยนแปลงความชื้นต่อเวลา เรียกว่าอัตราการแห้ง (drying rate) เมื่อนำอัตราการแห้งมาเขียนกราฟกับเวลาหรือนำอัตราการแห้งมาเขียนกราฟกับความชื้นของผลิตภัณฑ์ (drying rate curve) จะได้ดังรูปที่ 17 และรูปที่ 18 ตามลำดับ



รูปที่ 17 กราฟการเปลี่ยนแปลงของอัตราการแห้งกับเวลา (ดัดแปลงจาก เสริม จันทรฉาย, 2560a)



รูปที่ 18 กราฟการเปลี่ยนแปลงของอัตราการแห้งกับความชื้นของผลิตภัณฑ์ (ดัดแปลงจาก เสริม จันทรฉาย, 2560a)

จากรูปที่ 16-18 พฤติกรรมการแห้งของผลิตภัณฑ์ประกอบด้วย 2 ส่วนเรียงตามลำดับดังนี้

1) ช่วงอัตราการแห้งคงที่ (constant drying rate period) คือช่วง AB เป็นช่วงที่เกิดการระเหยของน้ำอิสระจากผิวของวัสดุ อัตราการแห้งในช่วงนี้จะมีค่าสูงเนื่องจากน้ำอิสระระเหยได้รวดเร็ว

2) ช่วงอัตราการแห้งลดลง (falling drying rate period) คือช่วง BD เป็นช่วงที่เกิดการระเหยของน้ำที่มีแรงยึดเกาะกับโครงสร้างของแข็ง ซึ่งประกอบด้วย 2 ช่วงย่อย คือช่วงอัตราการแห้งลดลงอย่างรวดเร็ว (BC) และช่วงอัตราการแห้งลดลงอย่างช้า ๆ (CD) เนื่องจากน้ำในชั้นนี้ต้องใช้พลังงานในการระเหยนํามากกว่าน้ำอิสระจึงทำให้อัตราการการแห้งต่ำกว่าช่วงของการระเหยนํอิสระ

2.4.3 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของพฤติกรรมการแห้งของวัสดุขึ้น (เสริม จันทรฉาย, 2560a)

เมื่อวัสดุขึ้นเข้าสู่กระบวนการอบแห้ง ความชื้นและอัตราการเปลี่ยนแปลงความชื้นของวัสดุขึ้นแต่ละชนิดจะแตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับหลายตัวแปร รวมทั้งอิทธิพลของแต่ละตัวแปรก็แตกต่างกัน ดังนั้นนักวิทยาศาสตร์จึงได้สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นหรืออัตราการเปลี่ยนแปลงความชื้นกับตัวแปรต่าง ๆ แบบจำลองที่ได้จะช่วยให้เข้าใจพฤติกรรมการแห้งของวัสดุขึ้นและอิทธิพลของตัวแปรที่มีต่อการแห้งของวัสดุขึ้นได้ดีขึ้น และช่วยในการออกแบบเครื่องอบแห้งให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้น วิธีการสร้างแบบจำลองมีหลากหลายวิธี ในที่นี้จะยกตัวอย่างโดยแบ่งตามวิธีการพิจารณาวัสดุขึ้น

2.4.3.1 การสร้างแบบจำลองโดยพิจารณารายละเอียดที่อยู่ภายในชั้นวัสดุขึ้น

วิธีนี้จะสนใจกระบวนการต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นภายในวัสดุขึ้น เช่นความชื้นจะมีการเปลี่ยนแปลงตามเวลาและตำแหน่ง และยังขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่างเช่น รูปทรง ขนาด ชนิด และกลไกการถ่ายเทความชื้นภายในของวัสดุขึ้น

1) การสร้างแบบจำลองโดยใช้กฎการแพร่ของฟิคค์ (Fick's law) สมมติฐานที่สำคัญ คือ การถ่ายเทความชื้นจะเป็นไปตามกฎการแพร่ของฟิคค์ และให้การถ่ายเทความชื้นที่ตำแหน่งต่าง ๆ ของวัสดุขึ้น เขียนแทนด้วยสมการกฎการแพร่ของฟิคค์ ดังนี้

$$\frac{\partial M}{\partial t} = \nabla \cdot (D_{ef} \nabla M) \quad (41)$$

เมื่อ M คือ ความชื้นมาตรฐานแห้งของวัสดุขึ้น (% d.b.)

D_{ef} คือ สภาวะแพร่ความชื้นยังผลของวัสดุขึ้น (effective moisture diffusivity) ($m^2 s^{-1}$)

t คือ เวลา (s)

เมื่อได้สมการการเปลี่ยนแปลงความชื้นแต่ละตำแหน่งจากสมการกฎการแพร่ของฟิกค์ ขึ้นต่อไปคือการหาผลเฉลยของสมการ หากวัสดุชิ้นที่มีรูปทรงไม่ซับซ้อนอาจใช้วิธีวิเคราะห์หาผลเฉลยได้ (analytical solution) ถ้าวัสดุชิ้นที่มีรูปทรงซับซ้อนจะใช้วิธีเชิงตัวเลขหาผลเฉลย (numerical solution) เมื่อได้ผลเฉลยออกมาเป็นค่าความชื้นแต่ละจุดแล้วก็สามารถนำมาหาเป็นค่าความชื้นเฉลี่ยตามเวลาได้

2) สร้างแบบจำลองโดยใช้วิธีของลุยคอฟ วิธีการนี้จะพิจารณาว่าวัสดุชิ้นมีโครงสร้างเป็นท่อเล็ก ๆ พรุน ประกอบด้วยน้ำ ไอน้ำและอากาศอยู่ภายใน การถ่ายเทความชื้นเกิดจากเกรเดียนต์ของความชื้น อุณหภูมิ และความดันภายใน เขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$\frac{\partial M}{\partial t} = k_{11} \nabla^2 M + k_{12} \nabla^2 T + k_{13} \nabla^2 P \quad (42)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} = k_{21} \nabla^2 M + k_{22} \nabla^2 T + k_{23} \nabla^2 P \quad (43)$$

$$\frac{\partial P}{\partial t} = k_{31} \nabla^2 M + k_{32} \nabla^2 T + k_{33} \nabla^2 P \quad (44)$$

เมื่อ	M	คือ ความชื้นมาตรฐานแห้ง (kg kg ⁻¹)
	T	คือ อุณหภูมิของวัสดุชิ้น (K)
	P	คือ ความดันภายในวัสดุชิ้น (kPa)
	k	คือ สัมประสิทธิ์ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติทางฟิสิกส์ของวัสดุชิ้น

ในกรณีที่เกรเดียนต์ของอุณหภูมิ และความดันภายในมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับเกรเดียนต์ของความชื้น ทำให้เขียนสมการที่ 42 ได้เหมือนกับสมการการแพร่ของฟิกค์

2.4.3.2 การสร้างแบบจำลองโดยพิจารณาวัสดุชิ้นทั้งชิ้นหรือหลายชิ้นวางเรียงเป็นชั้นบาง

วิธีการนี้จะทำให้เห็นการลดลงของความชื้นในภาพรวมแต่ไม่สามารถบอกการเปลี่ยนแปลงของความชื้นภายในวัสดุชิ้นได้ แบ่งออกเป็น 3 วิธีได้แก่

1) รีแอกชันเอนจิเนียริงแบบพิจารณาวัสดุชิ้นทั้งชิ้น

การสร้างแบบจำลองนี้จะใช้หลักการคำนวณปฏิกิริยาเคมีในงานด้านวิศวกรรมเคมี โดยใช้สมการอัตราการแห้งของวัสดุชิ้นที่อบแห้งด้วยลมร้อน การสร้างแบบจำลองนี้จะต้องทำการทดลองเพื่อหาตัวแปรต่าง ๆ จากนั้นจึงจะสามารถทำนายการเปลี่ยนแปลงของความชื้นได้

2) การสร้างแบบจำลองจากกราฟการแห้ง วิธีนี้จะต้องมีการทดลองเพื่อหากราฟการแห้งมาก่อน จากนั้นจะแบ่งกราฟออกเป็นสองช่วง คือ ช่วงอัตราการแห้งคงที่และช่วงอัตราการแห้งลดลง และหาสมการแบบจำลองของแต่ละช่วง

- ช่วงอัตราการแห้งคงที่ เนื่องจากในช่วงนี้มีอัตราการแห้งคงที่จึงใช้รูปแบบสมการเส้นตรงเป็นสมการของแบบจำลอง ดังสมการที่ 45 (เสริม จันทรฉาย, 2560a)

$$\frac{dm_w}{dt} = \frac{h_c A}{l} (T_a - T_w) \quad (45)$$

เมื่อ $\frac{dm_w}{dt}$	คือ อัตราการลดลงของความชื้นในวัสดุชิ้น (kg s ⁻¹)
h_c	คือ สภาพนำความร้อนของอากาศเฉพาะส่วนที่ติดอยู่กับผิววัสดุชิ้น (W m ⁻² K ⁻¹)
A	คือ พื้นที่ผิวของวัสดุชิ้น (m ²)
l	คือ ความร้อนแฝงของการระเหยของน้ำ (J kg ⁻¹)
T_a	คือ อุณหภูมิของอากาศที่ใช้ออบแห้ง (K)
T_w	คือ อุณหภูมิของวัสดุชิ้น (K)

- ช่วงอัตราการแห้งลดลง แบบจำลองในช่วงนี้จะเป็นแบบจำลองแบบเอมไพริคัลซึ่งมีอยู่หลายแบบจำลอง ในที่นี้จะยกตัวอย่างดังต่อไปนี้

ตารางที่ 2 ตัวอย่างแบบจำลองการอบแห้ง

Model	สมการ	
Lewis	$MR = e^{-kt}$	(46)
Page	$MR = \exp(-kt^n)$	(47)
Page modified	$MR = \exp[-(kt)^n]$	(48)
Henderson and Pabis	$MR = a_1 \exp(-kt)$	(49)
logarithmic	$MR = a_2 \exp(-kt) + a_3$	(50)
Wang and Singh	$MR = 1 + a_4 t + a_5 t^2$	(51)
Two-term	$MR = a_6 \exp(-kt) + a_7 \exp(-gt)$	(52)
Henderson and Pabis modified	$MR = a_8 \exp(-kt) + a_9 \exp(-gt) + a_{10} \exp(-pt)$	(53)

โดย

$$MR = \frac{M - M_e}{M_0 - M_e} \quad (54)$$

เมื่อ	M	คือ ความขึ้นมาตรฐานแห่งของวัสดุที่เวลา t ($kg\ kg^{-1}$)
	M_e	คือ ความขึ้นมาตรฐานแห่งของวัสดุที่เวลาเริ่มต้น ($kg\ kg^{-1}$)
	M_0	คือ ความขึ้นสมดุมาตรฐานแห่งของวัสดุ ($kg\ kg^{-1}$)
	k	คือ ค่าคงที่ของการอบแห้ง ซึ่งขึ้นกับชนิดของวัสดุ (s^{-1})
	t	คือ เวลา (s)
	n	คือ ค่าคงที่ ซึ่งได้จากการปรับแบบจำลองกับผลการทดลองการอบแห้งแบบขั้นบันได
	$a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, a_6, a_7, a_8, a_9, a_{10}, g$ และ p	คือ สัมประสิทธิ์ของแบบจำลองที่ขึ้นกับวัสดุ (-)

3) การสร้างแบบจำลองจากข้อมูลการทดลองโดยใช้ สมการถดถอยที่มีเทอมจากตัวแปรอื่น (autoregressive with exogenous terms, ARX) วิธีการสร้างแบบจำลองนี้จะต้องทำการทดลองซ้ำหลาย ๆ ครั้ง เพื่อนำผลการทดลองที่ได้มาใช้เป็นตัวแปรอินพุทของแบบจำลอง ตัวอย่างของตัวแปรอินพุท เช่น อุณหภูมิอากาศแวดล้อม ความชื้นสัมพัทธ์ ความเข้มรังสีอาทิตย์ ฯลฯ โดยตัวแปรเอาต์พุทจะเป็นตัวแปรที่ต้องการทำนาย เช่น ความขึ้นของวัสดุ ข้อดีของแบบจำลองนี้คือไม่จำเป็นต้องสร้างสมการที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอินพุทกับเอาต์พุท จึงเหมาะกับระบบที่อินพุทกับเอาต์พุทมีความสัมพันธ์กันซับซ้อน โครงสร้างของ ARX ที่มีอินพุทตัวเดียวและเอาต์พุทตัวเดียว (Single input Single output, SISO) เขียนได้เป็นสมการที่ 55

$$y(t) + a_1y(t-1) + \dots + a_{na}y(t-na) = b_1u(t-nk) + \dots + b_{nb}u(t-nb-nk+1) + e(t) \quad (55)$$

เมื่อ	y	คือ เอาต์พุท
	u	คือ อินพุท
	a	คือ สัมประสิทธิ์ของเอาต์พุท
	b	คือ สัมประสิทธิ์ของอินพุท
	na	คือ ลำดับของเอาต์พุทในอดีต ที่ส่งผลถึงเอาต์พุทเมื่อเวลา t
	nb	คือ ลำดับของอินพุทในอดีต ที่ส่งผลต่อเอาต์พุทเมื่อเวลา t
	nk	คือ ลำดับของอินพุทในอดีตที่ไกลที่สุด ที่ส่งผลต่อเอาต์พุทเมื่อเวลา t
	$e(t)$	คือ สัญญาณรบกวนสีขาว (White-noise disturbance value) หรือค่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นที่เวลา t โดยความคลาดเคลื่อนแต่ละเวลาจะเป็นอิสระต่อกัน มีการแจกแจงปกติ มีค่าเฉลี่ยเป็นศูนย์ มีค่าความแปรปรวนคงที่

หรือสามารถเขียนในรูปที่กะทัดรัดได้เป็นดังสมการ 56

$$A(q)y(t) = B(q)u(t - nk) + e(t) \quad (56)$$

โดย

$$A(q) = 1 + a_1q^{-1} + \dots + a_naq^{-na} \quad (57)$$

$$B(q) = b_{1+}b_2q^{-1} + \dots + b_{nb}q^{-nb+1} \quad (58)$$

เมื่อ $A(q)$ คือ เทอมสัมประสิทธิ์ของเอาต์พุต

$B(q)$ คือ เทอมสัมประสิทธิ์ของอินพุต

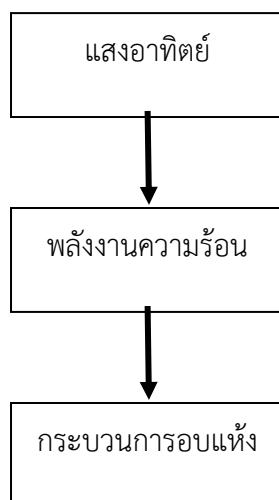
q คือ ตัวดำเนินการบอกความล่าช้า (delay operator)

2.5 เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์

การอบแห้งในประเทศกำลังพัฒนามักจะใช้วิธีการตากแดดตามธรรมชาติ เนื่องจากเป็นวิธีการที่ง่าย ใช้ต้นทุนน้อยหรือแทบไม่ใช้เลย แต่การตากแดดนั้นมีปัญหาหลายประการ เช่น การปนเปื้อนจากแมลงและสัตว์รบกวน ผลผลิตแห้งช้าและอาจเสียหายจากเปียกฝน ส่งผลให้เกิดปัญหาเชื้อรา จากปัญหาเหล่านี้ก็วิจัยด้านพลังงานแสงอาทิตย์จึงได้พัฒนาเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ (solar dryer) เพื่อให้สามารถทำการอบแห้งได้อย่างมีประสิทธิภาพ ลดเวลาการอบแห้ง ลดการปนเปื้อน และได้ผลผลิตที่มีคุณภาพมากขึ้น เนื้อหาต่อไปนี้จะกล่าวถึงหลักการทำงานของเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ ประเภทของเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์พร้อมตัวอย่างเครื่องอบแห้ง

2.5.1 หลักการทำงานของเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์

หลักการของเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์คือ การนำแสงอาทิตย์มาเปลี่ยนเป็นความร้อน แล้วนำความร้อนไปใช้ในการอบแห้งผลผลิต



รูปที่ 19 แผนภาพแสดงหลักการใช้พลังงานของเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ (เสริม จันทร์ฉาย, 2560a)

โดยทั่วไปเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์จะมีส่วนประกอบหลักอยู่ 2 ส่วนด้วยกัน คือ ส่วนรับพลังงานจากแสงอาทิตย์ (solar collector) และส่วนวางผลิตภัณฑ์ (drying chamber) โดยทั้งสองส่วนนี้จะอยู่รวมกันหรือแยกกันก็ได้

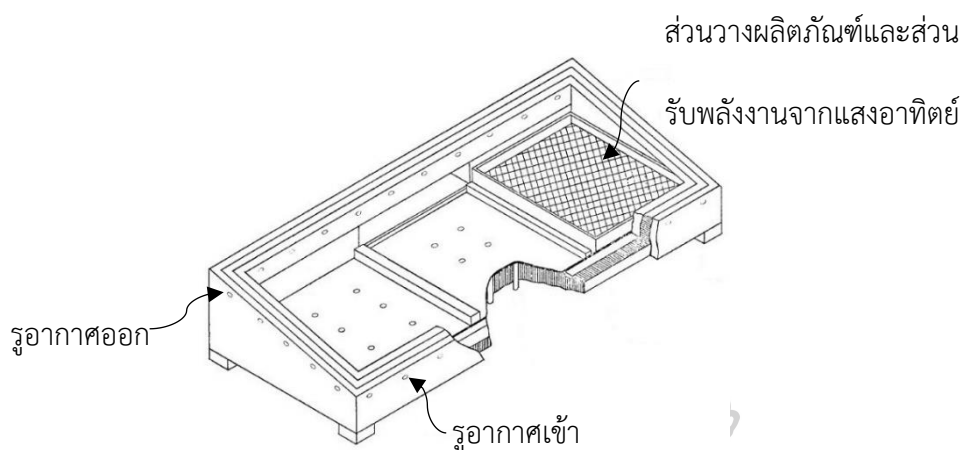
2.5.2 ประเภทของเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์

เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์นั้นมีมากมายหลายรูปแบบ ในที่นี้จะจำแนกตามลักษณะของการพาความร้อนซึ่งมี 2 ประเภทได้แก่ เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ที่ใช้การพาความร้อนตามธรรมชาติ (natural convection solar dryer) และเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ที่ใช้การพาความร้อนโดยการบังคับอากาศ (forced convection solar dryer)

2.5.2.1 เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ที่ใช้การพาความร้อนตามธรรมชาติ

เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ประเภทนี้จะใช้กลไกตามธรรมชาติในการพาความร้อน คือ อากาศร้อนจะมีน้ำหนักเบากว่าอากาศเย็น อากาศร้อนจึงยกตัวขึ้นสูง ดังนั้นเครื่องอบแห้งจึงใช้ประโยชน์จากหลักการนี้โดยให้อากาศร้อนที่รับความชื้นจากผลิตภัณฑ์ลอยออกไปจากเครื่องอบแห้ง แล้วรับอากาศใหม่เข้ามาเพื่อทำความร้อนและเข้าสู่กระบวนการอบแห้งต่อไป โดยเครื่องอบแห้งสามารถแบ่งย่อยตามลักษณะการรับแสงอาทิตย์ได้อีก 3 แบบ คือแบบรับพลังงานแสงอาทิตย์โดยตรง แบบรับพลังงานแสงอาทิตย์โดยอ้อม และแบบผสม

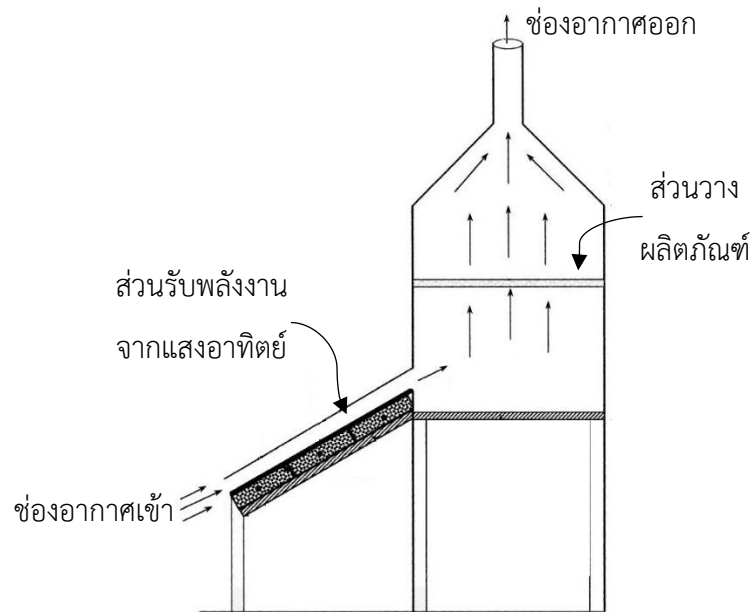
1) เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ที่ใช้การพาความร้อนตามธรรมชาติ แบบรับพลังงานแสงอาทิตย์โดยตรง (direct mode natural convection solar dryer) ผลิตภัณฑ์ที่วางอยู่ภายใน ส่วนวางผลิตภัณฑ์จะได้รับพลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์โดยตรง เช่น เครื่องอบแห้งแบบกล่อง (box dryer) ดังรูปที่ 20



รูปที่ 20 เครื่องอบแห้งแบบกล่อง (ดัดแปลงจาก Lawand, 1966)

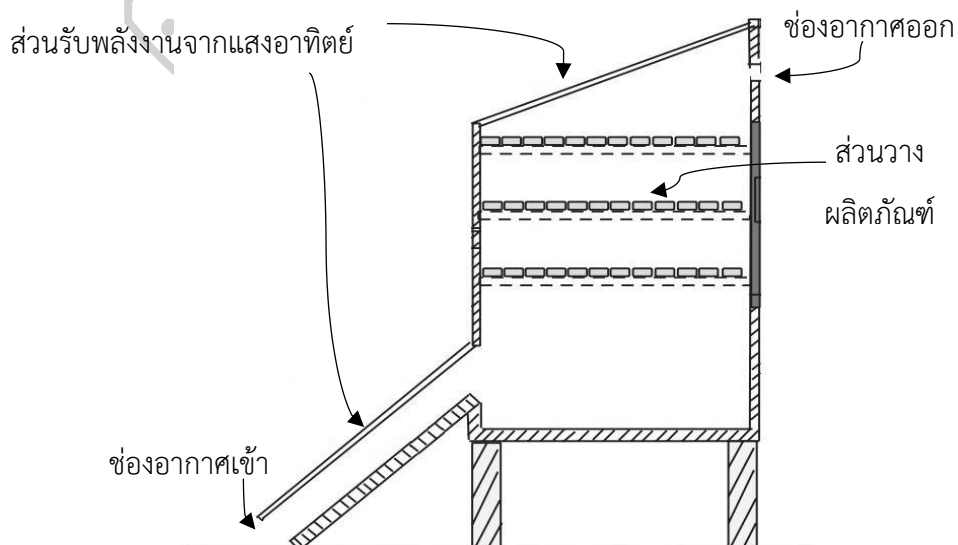
เครื่องอบแห้งแบบกล่อง ด้านบนปิดคลุมด้วยกระจกที่เอียงทำมุมตามมุมละติจูด ด้านในมีตะแกรงวางผลิตภัณฑ์ ซึ่งผลิตภัณฑ์จะได้รับแสงอาทิตย์ที่ส่องผ่านกระจกเข้ามาโดยตรง ผนังด้านล่างและด้านข้างมีรูสำหรับอากาศเข้าและออก เพื่อถ่ายเทอากาศสำหรับการพาความร้อนตามธรรมชาติ

2) เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ที่ใช้การพาความร้อนตามธรรมชาติ แบบรับพลังงานแสงอาทิตย์โดยอ้อม (indirect mode natural convection solar dryer) เครื่องอบแห้งชนิดนี้จะผลิตอากาศร้อนจากอากาศแวดล้อมที่ไหลเข้ามาในเครื่องอบแห้งโดยใช้ส่วนรับพลังงานจากแสงอาทิตย์ จากนั้นอากาศร้อนจะลอยตัวสูงขึ้นตามธรรมชาติ พาเอาความร้อนไปยังส่วนวางผลิตภัณฑ์ โดยผลิตภัณฑ์ได้รับความร้อนจากการพาความร้อนของอากาศแต่จะไม่ได้ได้รับความร้อนจากการแผ่รังสีของดวงอาทิตย์ จากนั้นอากาศร้อนจะพาเอาความชื้นจากผลิตภัณฑ์ออกทางช่องด้านบน เช่น เครื่องอบแห้งแบบตู้ ดังรูปที่ 21



รูปที่ 21 เครื่องอบแห้งแบบตู้ (ดัดแปลงจาก El-Sebail และคณะ, 2002)

3) เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ที่ใช้การพาความร้อนตามธรรมชาติ แบบผสม (mixed mode natural convection solar dryer) เครื่องอบแห้งชนิดนี้จะมีส่วนรับพลังงานแสงอาทิตย์สองส่วน คือส่วนสำหรับผลิตอากาศร้อนโดยเฉพาะและชั้นวางผลิตภัณฑ์ ผลิตภัณฑ์จึงได้รับความร้อนจากทั้งอากาศร้อนและแสงอาทิตย์โดยตรง เช่น เครื่องอบแห้งแบบตู้ ดังรูปที่ 22

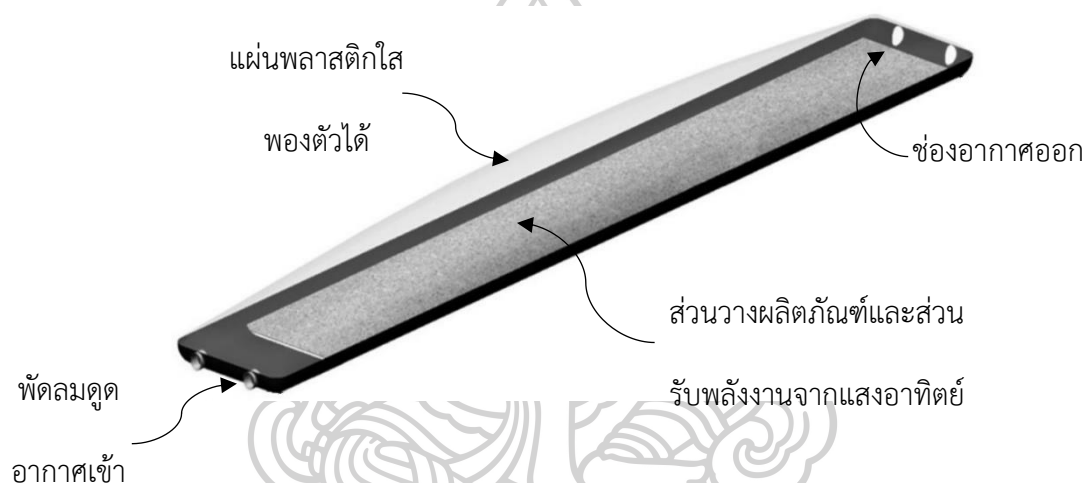


รูปที่ 22 เครื่องอบแห้งแบบตู้ (ดัดแปลงจาก Deshmukh และคณะ, 2014)

2.5.2.2 เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ที่ใช้การพาความร้อนโดยการบังคับอากาศ

เครื่องอบแห้งประเภทนี้จะใช้อุปกรณ์เพื่อบังคับให้อากาศไหลเวียนภายในเครื่องอบแห้ง เช่น พัดลม เครื่องเป่าลม และสามารถแบ่งย่อยตามลักษณะการรับแสงอาทิตย์ได้อีก 3 แบบเช่นเดียวกัน คือแบบรับพลังงานแสงอาทิตย์โดยตรง แบบรับพลังงานแสงอาทิตย์โดยอ้อม และแบบผสม

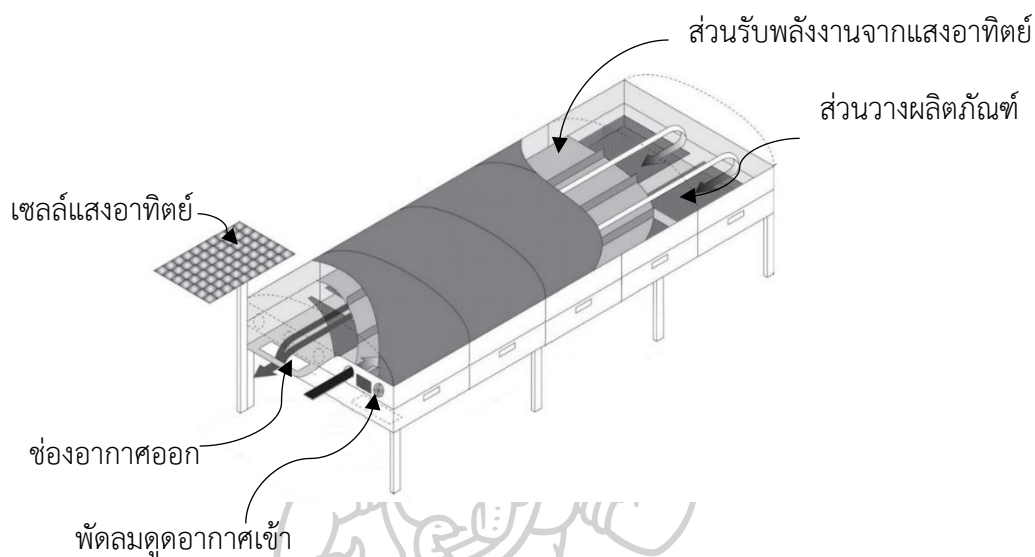
1) เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ที่ใช้การพาความร้อนโดยการบังคับอากาศ แบบรับพลังงานแสงอาทิตย์โดยตรง (direct mode forced convection solar dryer) เครื่องอบแห้งชนิดนี้ ผลิตภัณฑ์ที่วางอยู่ภายในจะได้รับพลังงานจากแสงอาทิตย์โดยตรงและมีพัดลมบังคับอากาศด้วย เช่น เครื่องอบแห้งแบบอุโมงค์ลมที่พองตัวได้ ดังรูปที่ 23



รูปที่ 23 เครื่องอบแห้งแบบแบบอุโมงค์ลมที่พองตัวได้ (ดัดแปลงจาก Salvatierra-Rojas และคณะ, 2017)

เครื่องอบแห้งแบบแบบอุโมงค์ลมที่พองตัวได้นี้ปิดคลุมด้วยแผ่นพลาสติกใส เมื่อพัดลมที่อยู่ด้านหน้าดูดอากาศเข้าไปในเครื่องอบแห้ง เครื่องอบแห้งนี้จึงพองตัวขึ้น อากาศจะร้อนขึ้นและไหลผ่านผลิตภัณฑ์ที่อยู่ภายใน จากนั้นอากาศร้อนจะไหลออกทางช่องอากาศด้านหลัง

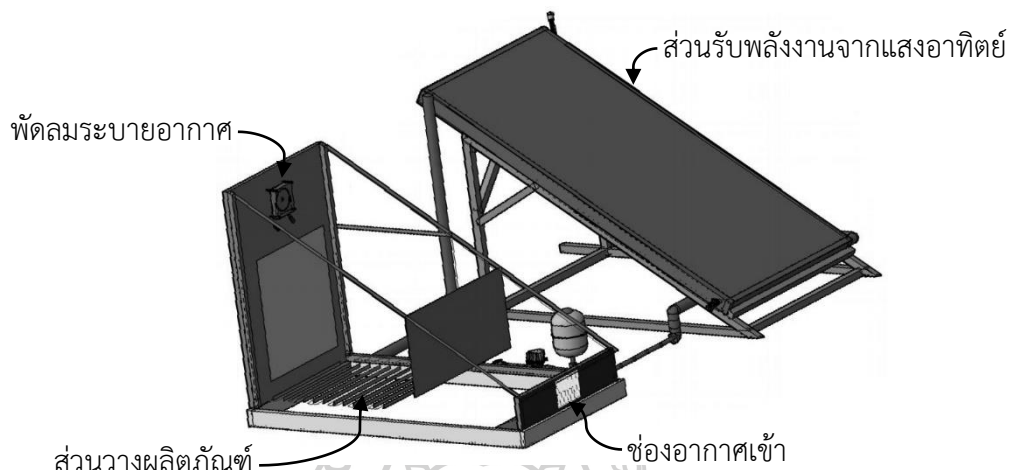
2) เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ที่ใช้การพาความร้อนโดยการบังคับอากาศ แบบรับพลังงานแสงอาทิตย์โดยอ้อม (indirect mode forced convection solar dryer) ผลิตภัณฑ์ที่วางอยู่ในเครื่องอบแห้งชนิดนี้ จะได้รับความร้อนจากอากาศร้อนที่ไหลออกมาจากส่วนทำอากาศร้อน เช่น เครื่องอบแห้งแบบอุโมงค์ลมสองชั้น ดังรูปที่ 24



รูปที่ 24 เครื่องอบแห้งแบบอุโมงค์ลมสองชั้น (ดัดแปลงจาก Banout และคณะ, 2011)

เครื่องอบแห้งแบบอุโมงค์ลมสองชั้น ซึ่งอุโมงค์ลมชั้นบนเป็นส่วนรับพลังงานจากแสงอาทิตย์ พัดลมจะดูดอากาศเข้าไปในส่วนนี้เพื่อผลิตเป็นอากาศร้อน จากนั้นอากาศร้อนจะไหลลงมาที่อุโมงค์ลมชั้นล่างซึ่งเป็นส่วนวางผลิตภัณฑ์ ดังนั้นผลิตภัณฑ์จึงได้รับพลังงานจากแสงอาทิตย์ทางอ้อม

3) เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ที่ใช้การพาความร้อนโดยการบังคับอากาศ แบบผสม (mixed mode forced convection solar dryer) เช่น เครื่องอบแห้งแบบกล่อง ดังรูปที่ 25



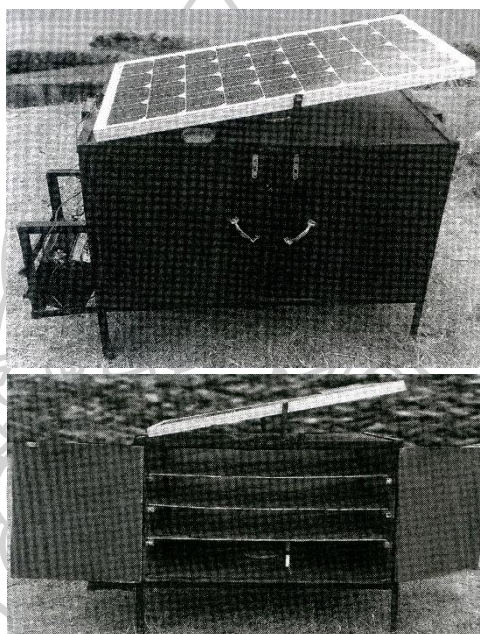
รูปที่ 25 เครื่องอบแห้งแบบกล่อง (ดัดแปลงจาก Poblete และคณะ, 2018)

เครื่องอบแห้งแบบกล่องนี้ใช้พัดลมระบายอากาศขึ้น ด้านหน้ามีช่องอากาศเข้า ส่วนวางผลิตภัณฑ์จะได้รับแสงอาทิตย์โดยตรง สำหรับส่วนรับพลังงานจากแสงอาทิตย์จะทำความร้อนให้ของไหลใช้งาน (working fluid) จากนั้นของไหลใช้งานจะถูกปั๊มให้ไหลไปข้างใต้ส่วนวางผลิตภัณฑ์เพื่อถ่ายเทความร้อนสู่ผลิตภัณฑ์

เนื่องจากงานวิจัยนี้เกี่ยวข้องกับการพัฒนาเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ขนาดเล็กที่เหมาะสมกับการใช้งานในครัวเรือน ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้ศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ขนาดเล็ก ซึ่งสามารถสรุปได้ดังหัวข้อต่อไปนี้

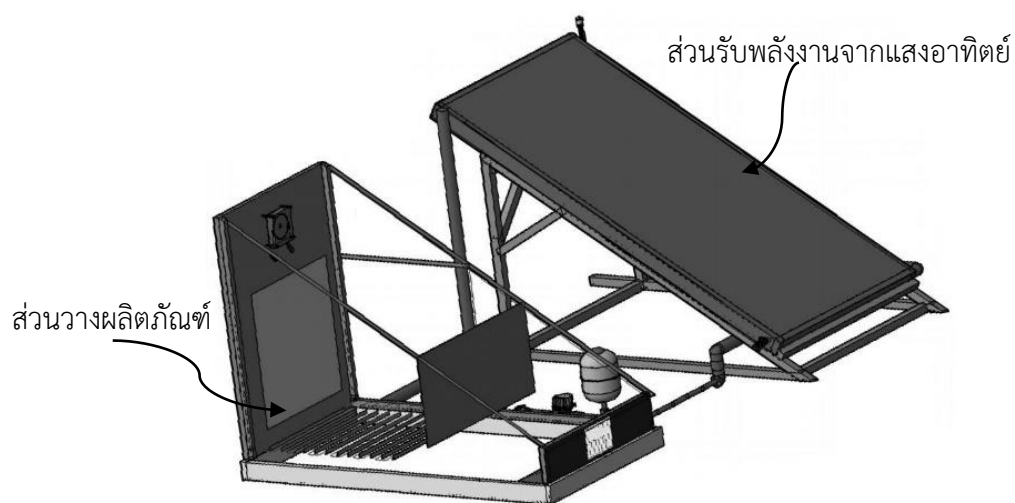
2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ที่มีขนาดเล็ก

Tolulope และ Mondiu (2011) ได้สร้างเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบตู้ โดยใช้เซลล์แสงอาทิตย์ขนาด 65 W และมีแบตเตอรี่สะสมพลังงานไฟฟ้า แล้วผลิตอากาศร้อนด้วยฮีตเตอร์ขนาด 60 W จากนั้นใช้พัดลมเพื่อหมุนเวียนความร้อนภายในเครื่องอบแห้ง ส่วนวางผลิตภัณฑ์ทำเป็นชั้น 3 ชั้น ปิดทุกด้านด้วยไม้อัด ผลิตภัณฑ์จึงไม่ได้รับแสงอาทิตย์โดยตรง จากนั้นทำการทดสอบโดยการอบแห้ง ผักโขมและกล้วยฝานเป็นแผ่น หนา 2-4 mm พบว่าเครื่องอบแห้งนี้สามารถทำอุณหภูมิได้ในช่วง 40°C - 43°C ใช้เวลาอบแห้ง 7-8 ชั่วโมง จากผักโขมความชื้นมาตรฐานเปียกเริ่มต้น 86.9% จนเหลือความชื้น 41.6% และจากกล้วยฝาน เริ่มต้น 75% จนเหลือ 26.0%



รูปที่ 26 เครื่องอบแห้งของ Tolulope และ Mondiu (2011)

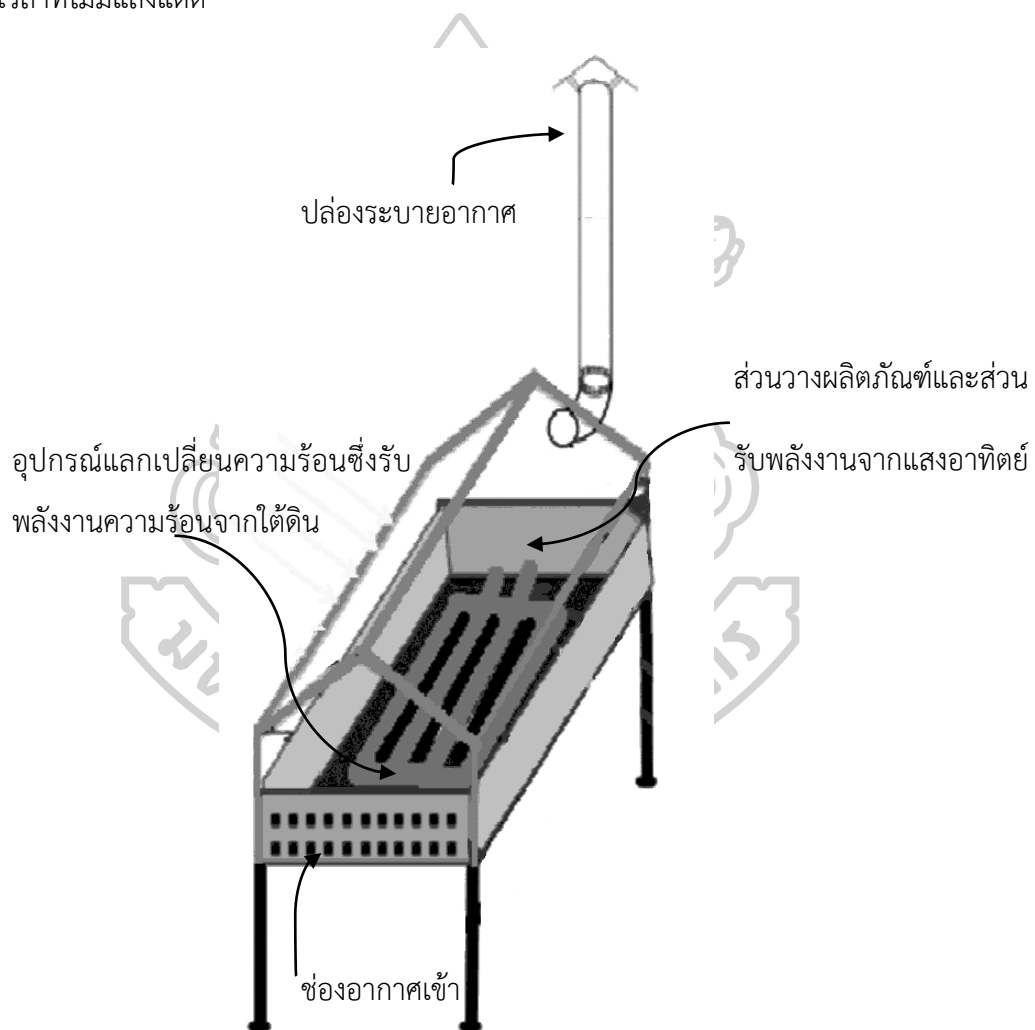
Poblete และคณะ (2018) ได้ทดลองหาวิธีที่ดีที่สุดในการอบแห้งสาหร่ายสีแดง เครื่องอบแห้งประกอบด้วยส่วนรับพลังงานแสงอาทิตย์แยกกับส่วนวางผลิตภัณฑ์ (รูปที่ 27) สำหรับส่วนวางผลิตภัณฑ์ (2 m²) จะได้รับแสงอาทิตย์โดยตรง จากการทดลองพบว่า การใช้แผ่นกั้นภายในส่วนวางผลิตภัณฑ์เพื่อให้อากาศภายในเครื่องอบแห้งปั่นป่วน ร่วมกับการใช้พัดลมดูดอากาศและการวางตะแกรงผลิตภัณฑ์ในแนวราบไม่ซ้อนกันเป็นชั้น เป็นวิธีที่ดีที่สุดในการตากแห้งสาหร่ายสีแดง โดยสาหร่ายสีแดงที่ใช้ทดสอบทั้งหมด 0.9 kg มีความชื้นมาตรฐานเปียกเริ่มต้น 86% ใช้เวลาอบแห้ง 5 ชั่วโมง จนเหลือความชื้น 17% (Poblete et al., 2018)



รูปที่ 27 เครื่องอบแห้งของ Poblete และคณะ (2018)

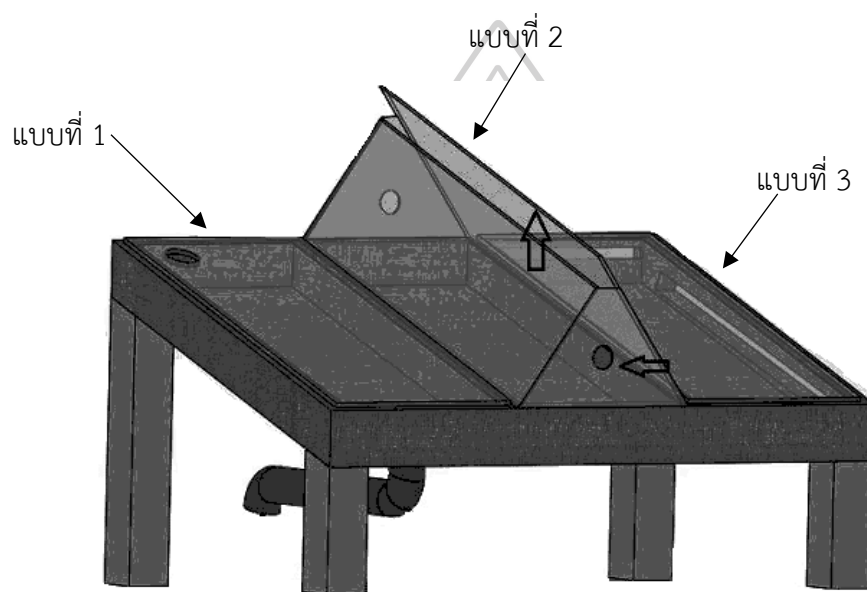


Sandali และคณะ (2019) ได้สร้างเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบรับพลังงานแสงอาทิตย์โดยตรงและใช้อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนซึ่งรับพลังงานความร้อนจากใต้พิภพมาเป็นพลังงานความร้อนเสริมในการอบแห้ง แต่ในการทดลองจะใช้เครื่องทำน้ำร้อนสร้างความร้อนแทนความร้อนจากใต้ดิน พบว่าอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนนี้สามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพให้เครื่องอบแห้งได้ โดยสามารถทำอุณหภูมิอากาศได้ 46-58 °C ในช่วงกลางวัน ขณะที่อุณหภูมิอากาศแวดล้อมมีค่าประมาณ 25 °C และสามารถทำอุณหภูมิอากาศเฉลี่ยตอนกลางคืนได้ 46 °C ขณะที่อุณหภูมิอากาศแวดล้อมมีค่าประมาณ 15 °C ดังนั้นเครื่องอบแห้งนี้จึงสามารถทำการอบแห้งได้ต่อเนื่องในช่วงเวลาที่ไม่มีแสงแดด



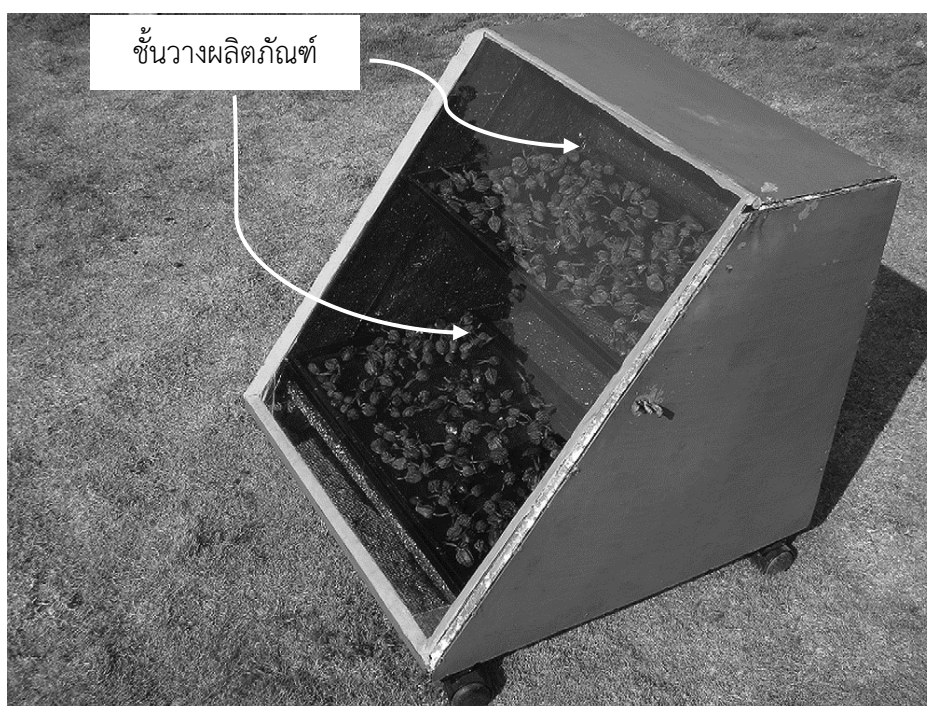
รูปที่ 28 เครื่องอบแห้งของ Sandali และคณะ (2019)

Islam และคณะ (2019) ได้ศึกษาผลกระทบของการถ่ายเทความชื้นของผลไม้เมื่อใช้ส่วนวางผลิตภัณฑ์ที่แตกต่างกัน 3 แบบ แบบที่ 1 คือแบบใช้ท่ออากาศขนาดเล็กเป็นช่องทางเข้าของอากาศ และใช้กระจกแผ่นเรียบปิดคลุมซึ่งมีรูเป็นช่องทางออกของอากาศ แบบที่ 2 คือใช้กระจกสองชั้น ประกอบเป็นรูปหลังคาสามเหลี่ยมที่มีช่องว่างให้อากาศออกและมีรูตรงหน้าจั่วให้อากาศเข้า แบบที่ 3 คือแบบใช้กระจกแผ่นเรียบปิดด้านบน ด้านข้างมีรูอากาศ 2 รู ทำเป็นรูปสี่เหลี่ยมให้เป็นช่องอากาศเข้าออก จากการทดลองปรากฏว่า ส่วนวางผลิตภัณฑ์แบบที่ 3 มีการถ่ายเทความชื้นได้ดีที่สุด เนื่องจากมีอัตราการระเหยน้ำสูงที่สุดเท่ากับ 58.9%



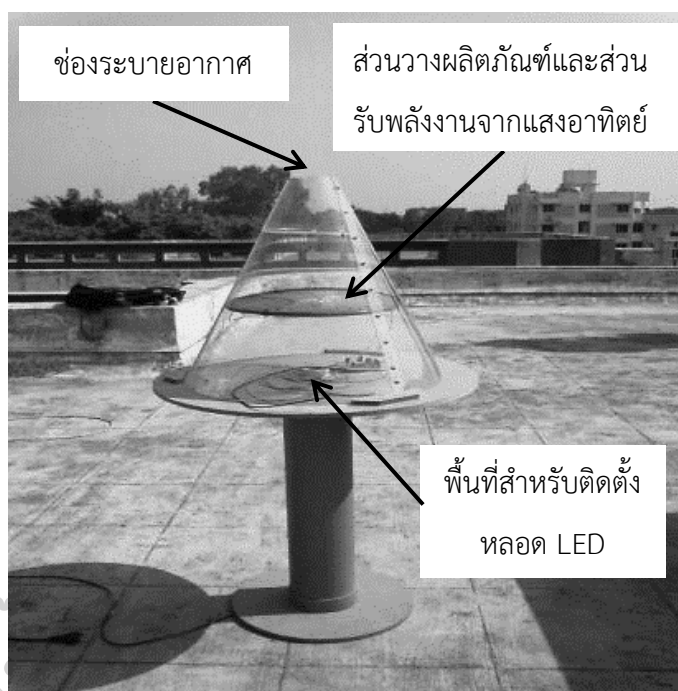
รูปที่ 29 เครื่องอบแห้งของ Islam และคณะ (2019)

Seveda และ Jhajharia (2012) ได้ออกแบบและสร้างเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ ที่ใช้การพาความร้อนโดยการบังคับอากาศและรับพลังงานแสงอาทิตย์โดยตรง เพื่ออบแห้งผลกระวาน ซึ่งนิยมใช้เป็นเครื่องเทศในประเทศอินเดีย เครื่องอบแห้งนี้มีลักษณะเป็นกล่องทรงสี่เหลี่ยม ด้านหนึ่งเอียงเพื่อรับแสงอาทิตย์ปิดคลุมด้วยกะจก ภายในมีชั้นวางผลิตภัณฑ์ 2 ชั้น ด้านบนของเครื่องมีพัดลมดูดอากาศ ด้านล่างมีช่องอากาศเข้า ผลที่ได้จากการอบผลกระวาน 5 kg จากความชื้นมาตรฐานเปียก เริ่มต้น 75.6% จนเหลือ 10.1% การใช้เครื่องอบแห้งจะช่วยลดเวลาในการตากแห้งผลกระวานลงได้ครึ่งหนึ่งเมื่อเทียบกับการตากแดดตามธรรมชาติ



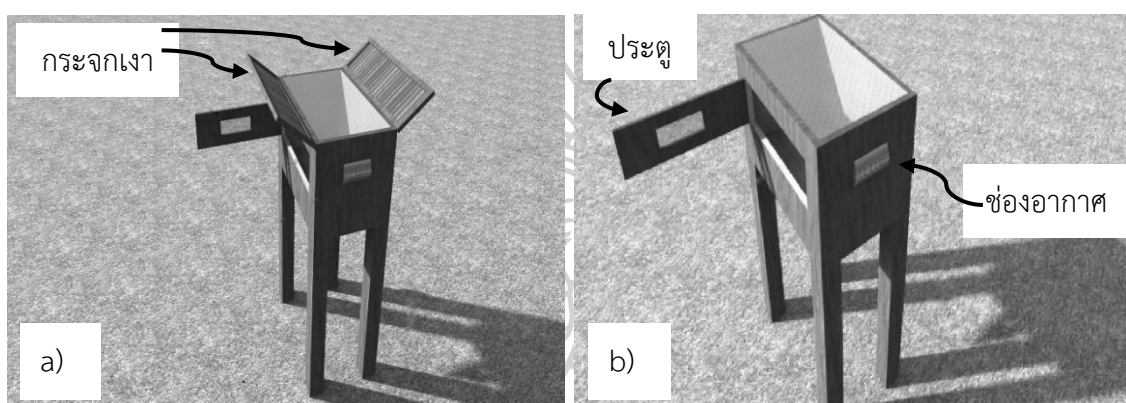
รูปที่ 30 เครื่องอบแห้งของ Seveda และ Jhajharia (2012)

Joshi (2014) ได้ออกแบบและสร้างเครื่องอบแห้งต้นแบบทรงกรวยเพื่อแก้ปัญหาทิศทางการรับแสงที่เกิดขึ้นกับเครื่องอบแห้งแบบกล่อง ที่จะต้องวางให้ส่วนรับพลังงานแสงอาทิตย์หันไปในทิศทางที่ถูกต้องเพื่อรับแสงอาทิตย์ให้ได้มากที่สุด รูปทรงกรวยนี้จะช่วยให้รับแสงอาทิตย์ได้รอบทิศ และยังใช้ LED เป็นแหล่งความร้อนตอนกลางคืน โดยจะวาง LED 27 ตัว ไว้ข้างใต้ส่วนวางผลิตภัณฑ์ ผลที่ได้จากการทดสอบจากเครื่องต้นแบบพบว่า เครื่องอบแห้งทรงกรวยนี้สามารถทำงานได้ในตอนกลางวันและ LED สามารถรักษาอุณหภูมิภายในเครื่องอบแห้งไว้ได้ ประมาณ 60 °C ในช่วงหลังจากพระอาทิตย์ตก ในขณะที่อุณหภูมิอากาศแวดล้อมมีค่าประมาณ 30-40 °C

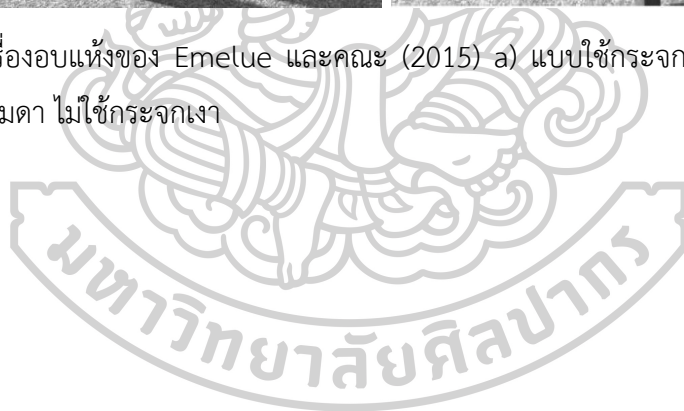


รูปที่ 31 เครื่องอบแห้งทรงกรวยต้นแบบของ Joshi (2014)

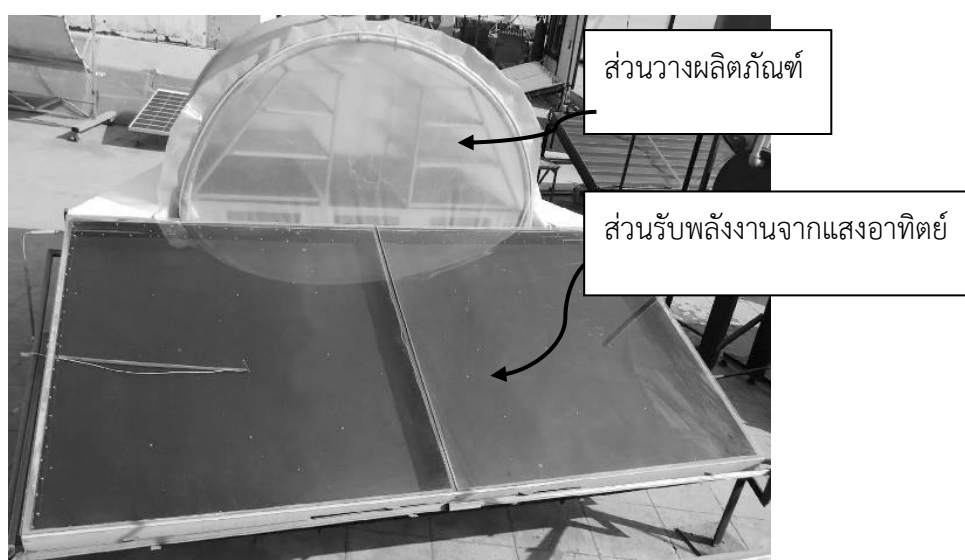
Emelue และคณะ (2015) ได้ออกแบบและทดสอบเครื่องอบแห้งแบบตู้ ด้านบนปิดคลุมด้วยกระจกใส เครื่องอบแห้งนี้กว้าง 50cm ยาว 80cm และลึก 40cm มีฝาเปิดด้านข้างและมีรูระบายอากาศอยู่ด้านข้างอีกด้าน โดยการทดสอบเครื่องอบแห้งจะใช้ทั้งแบบธรรมดา และแบบที่ใช้กระจกเงาช่วยรับพลังงานแสงอาทิตย์ โดยใช้กระจกเงากว้าง 25cm ยาว 80cm ผลการวิเคราะห์พบว่าแบบที่ใช้กระจกเงาช่วยรับแสงสามารถรับพลังงานได้ 350 W ส่วนแบบธรรมดารับได้ 330.5 W ผลจากการทดลองอบแห้งอาหาร 6 ชนิด ได้แก่ ถั่วลิสง ถั่วเขียว ถั่วเหลือง ถั่วแดง ถั่วดำ ถั่วขาว เนื้อสด สไลด์ พลาสติก และไข่ดิบ ปรากฏว่าแบบที่ใช้กระจกเงามีอัตราการแห้งสูงกว่าแบบธรรมดา



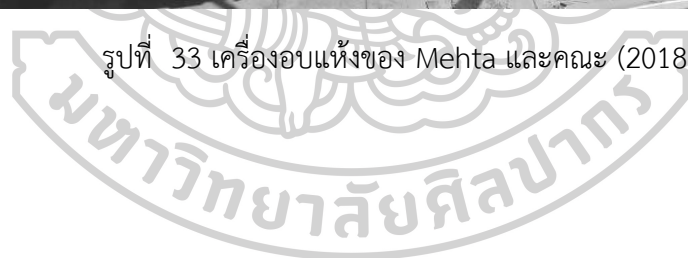
รูปที่ 32 เครื่องอบแห้งของ Emelue และคณะ (2015) a) แบบใช้กระจกเงาช่วยรับแสง b) แบบธรรมดา ไม่ใช้กระจกเงา



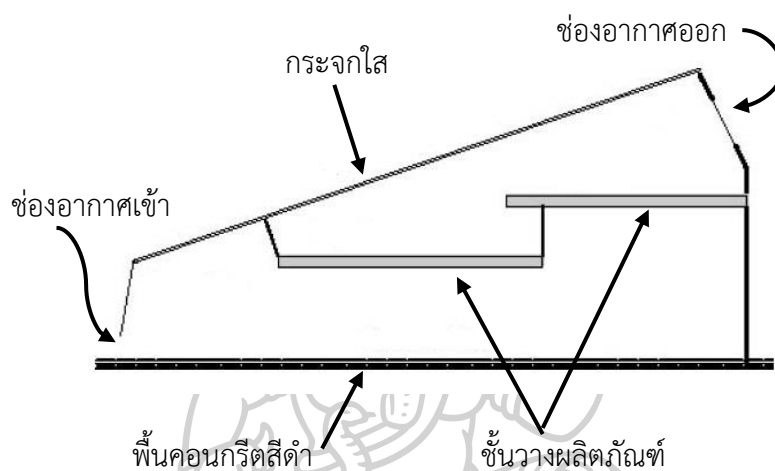
Mehta และคณะ (2018) ได้สร้างเครื่องอบแห้งแบบเต็นท์ที่ใช้การพาความร้อนตามธรรมชาติและรับพลังงานแสงอาทิตย์แบบผสม ด้านหน้าเป็นส่วนรับพลังงานจากแสงอาทิตย์ สำหรับส่วนวางผลิตภัณฑ์มีลักษณะเป็นกระบอกครึ่งวงกลม ภายในเป็นชั้นวางผลิตภัณฑ์หลายชั้น จากการวิเคราะห์ พบว่าส่วนรับพลังงานจากแสงอาทิตย์มีประสิทธิภาพ 25.4% จากการทดลองอบแห้งปลา จากความชื้นมาตรฐานเปียกเริ่มต้น 89% จนเหลือความชื้นสุดท้าย 10% ใช้เวลาอบแห้งทั้งหมด 18 ชั่วโมง อุณหภูมิอากาศภายในส่วนวางผลิตภัณฑ์ อยู่ที่ 60°C - 65°C ในขณะที่การตากแดดตามธรรมชาติจะต้องใช้เวลาอบแห้งทั้งสิ้น 38 ชั่วโมง



รูปที่ 33 เครื่องอบแห้งของ Mehta และคณะ (2018)



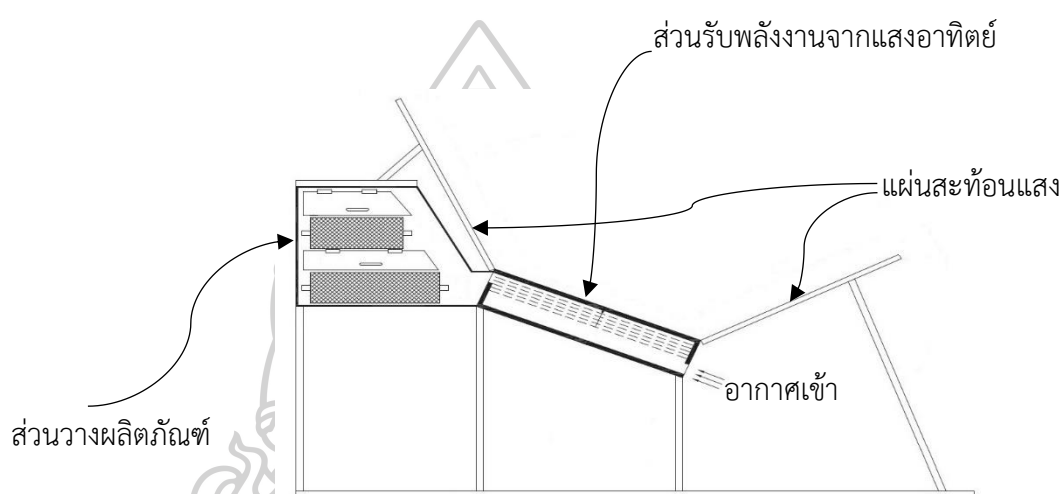
Ghazanfari และคณะ (2003) ได้สร้างเครื่องอบแห้งเพื่ออบถั่วพิสตาชิโอ ใช้การถ่ายเทความร้อนโดยการบังคับอากาศ เครื่องอบแห้งนี้ติดตั้งบนพื้นคอนกรีตสีดำ ปิดคลุมด้วยกระจกใสที่เอียงทำมุม 30 องศา ตามละติจูดเพื่อให้รับแสงอาทิตย์ได้มากที่สุด พื้นฐานมีขนาด $210 \times 170 \text{ cm}^2$ ด้านข้างทำเป็นประตูทั้งสองด้าน ติดตั้งพัดลมดูดอากาศไว้ที่ผนังด้านหลัง ด้านหน้ามีช่องอากาศเข้าภายในมีตะแกรงวางผลิตรั้ว จากการศึกษาทดลองอบแห้งพบว่า เวลาที่ใช้อบแห้ง คือ 36 ชั่วโมง โดยอุณหภูมิอากาศสูงสุดประมาณ $56 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ซึ่งสูงกว่าอากาศแวดล้อม $20 \text{ }^{\circ}\text{C}$



รูปที่ 34 ด้านข้างเครื่องอบแห้งของ Ghazanfari และคณะ (2003)



Maiti และคณะ (2011) ได้ออกแบบและพัฒนาเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบตู้ประเภทใช้การพาความร้อนตามธรรมชาติและได้รับพลังงานจากแสงอาทิตย์โดยอ้อม โดยจะมีแผ่นสะท้อนแสงที่ยึดอยู่กับที่ทางด้านเหนือและด้านใต้เพื่อสะท้อนแสงเข้าสู่ส่วนรับพลังงานจากแสงอาทิตย์ที่ปิดคลุมด้วยกระจกใส มีพื้นที่ 1.8 m^2 เอียงเพื่อให้รับแสงอาทิตย์ได้มากที่สุด (ในการทดลองนี้จะหันไปทางทิศใต้และเอียงจากพื้น 18.9°C) จากนั้น Maiti และคณะ ได้ทดสอบโดยการอบแห้ง “Papad” (เวเฟอร์ของชาวอินเดีย) โดยเครื่องอบแห้งนี้มีความจุได้ 2.5 kg และใช้เวลาในการอบแห้ง 5 ชั่วโมง ประสิทธิภาพการอบแห้งเฉลี่ยมีค่า 4.1%



รูปที่ 35 ภาพจำลองเครื่องอบแห้งของ Maiti และคณะ (2011) จากมุมมองด้านข้าง

จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับเครื่องอบแห้งขนาดเล็กยังไม่พบเครื่องอบแห้งที่ใช้พลังงานความร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์ที่สามารถสลับแหล่งพลังงานมาใช้พลังงานความร้อนจากไฟฟ้าในครัวเรือน ในวันที่สภาพอากาศไม่ดี ดังนั้นผู้วิจัยจึงมีความสนใจที่จะศึกษาและพัฒนาเครื่องอบแห้งที่ใช้พลังงานแสงอาทิตย์และสามารถสลับแหล่งพลังงานมาใช้พลังงานความร้อนจากไฟฟ้าในครัวเรือนได้ เพื่อความสะดวกต่อการใช้งานในครัวเรือน ซึ่งจะกล่าวถึงรายละเอียดในบทต่อไป

บทที่ 3

การดำเนินงานวิจัยและผลการวิจัย

3.1 การออกแบบเชิงแนวคิด (conceptual design)

ผู้วิจัยได้ออกแบบเชิงแนวคิดของเครื่องอบแห้งซึ่งมีระบบพลังงานความร้อนเสริม (auxiliary heating) จากไฟฟ้า โดยเครื่องอบแห้งนี้มีส่วนประกอบที่สำคัญ 2 ส่วน คือส่วนที่ใช้พลังงานแสงอาทิตย์ และระบบความร้อนเสริม

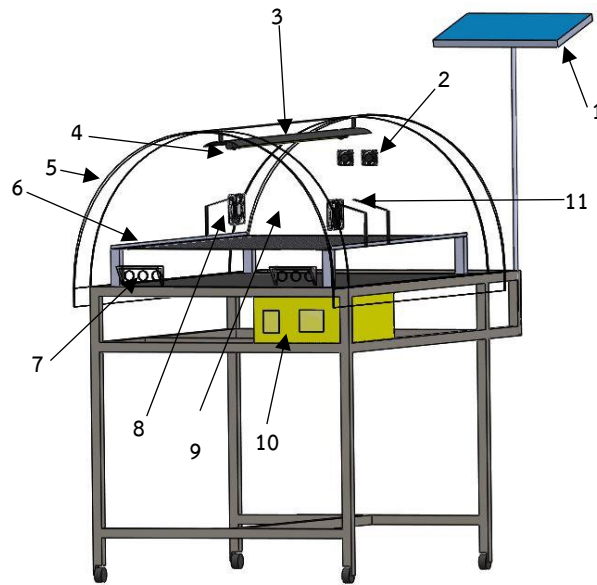
3.1.1 การออกแบบโครงสร้างหลักของเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์

ผู้วิจัยได้กำหนดกรอบแนวคิดเพื่อเป็นแนวทางการออกแบบไว้ดังนี้

- 1) ให้ส่วนรับพลังงานแสงอาทิตย์และส่วนวางผลิตภัณฑ์อยู่ร่วมกันเพื่อประหยัดพื้นที่
- 2) ต้องการให้การพาความร้อนแบบบังคับอากาศเพื่อให้ผลิตภัณฑ์แห้งได้รวดเร็ว
- 3) รูปทรงของเครื่องอบแห้งจะต้องดูสวยงาม
- 4) สามารถเคลื่อนย้ายได้ง่าย
- 5) สามารถยกตะแกรงวางผลิตภัณฑ์เข้าออกได้ง่าย
- 6) มีระบบให้ความร้อนเสริมจากพลังงานไฟฟ้า

จากกรอบแนวคิดข้างต้นจึงได้ทำการออกแบบเป็นโครงสร้างเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ด้วยโปรแกรม SolidWorks ได้ดังรูปที่ 36



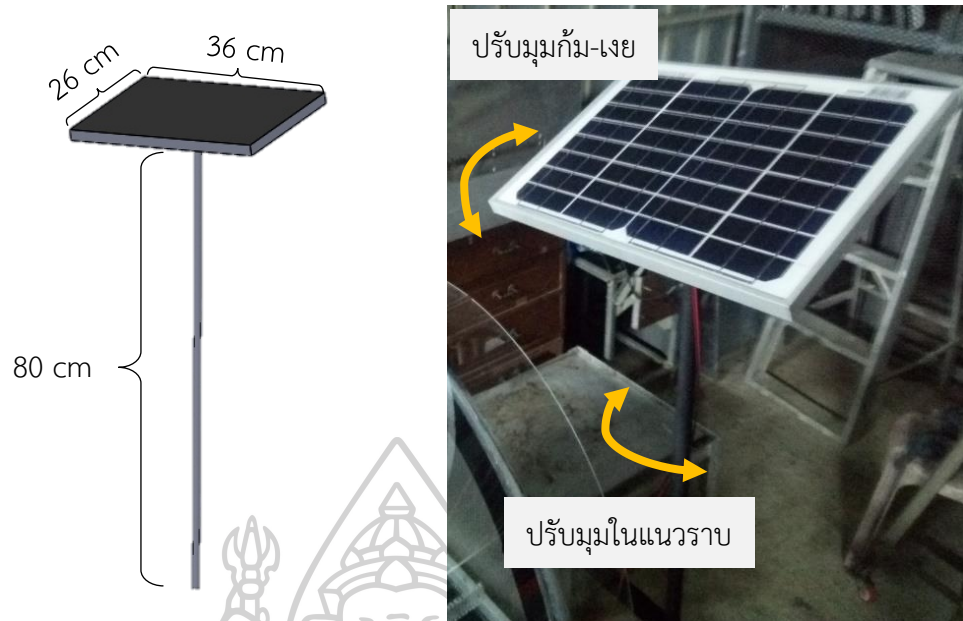


รูปที่ 36 ภาพจำลองเครื่องอบแห้งที่ออกแบบโดยโปรแกรม SolidWorks

- | | |
|--------------------------------|--|
| 1) คือ แผงโซลาเซลล์ | 7) คือ ช่องอากาศเข้า |
| 2) คือ พัดลมระบายอากาศ | 8) คือ พัดลมกวนอากาศภายในเครื่องอบแห้ง |
| 3) คือ โคมบังฮีตเตอร์อินฟราเรด | 9) คือ ฝาเปิด-ปิด |
| 4) คือ ฮีตเตอร์อินฟราเรด | 10) คือ กล่องควบคุมระบบไฟฟ้า |
| 5) คือ แผ่นปิดคลุม | 11) คือ เซนเซอร์วัดอุณหภูมิอากาศภายในเครื่องอบแห้ง |
| 6) คือ ตะแกรงวางผลิตภัณฑ์ | |

รายละเอียดของส่วนประกอบต่าง ๆ ของเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ มีดังนี้

1) แผงโซลาเซลล์ ขนาด 10 W ทำหน้าที่ผลิตไฟฟ้าจากแสงอาทิตย์เพื่อให้พลังงานไฟฟ้ากับพัดลมระบายอากาศ แผงโซลาเซลล์สามารถปรับมุมในแนวราบ และมุมก้ม-เงยได้ โดยการติดตั้งแผงโซลาร์เซลล์จะต้องหันหน้าไปทางทิศใต้เพื่อให้แผงสามารถรับแสงอาทิตย์ได้มากที่สุด



รูปที่ 37 โซลาร์เซลล์ ภาพจำลอง(ซ้าย) และภาพจริง(ขวา)

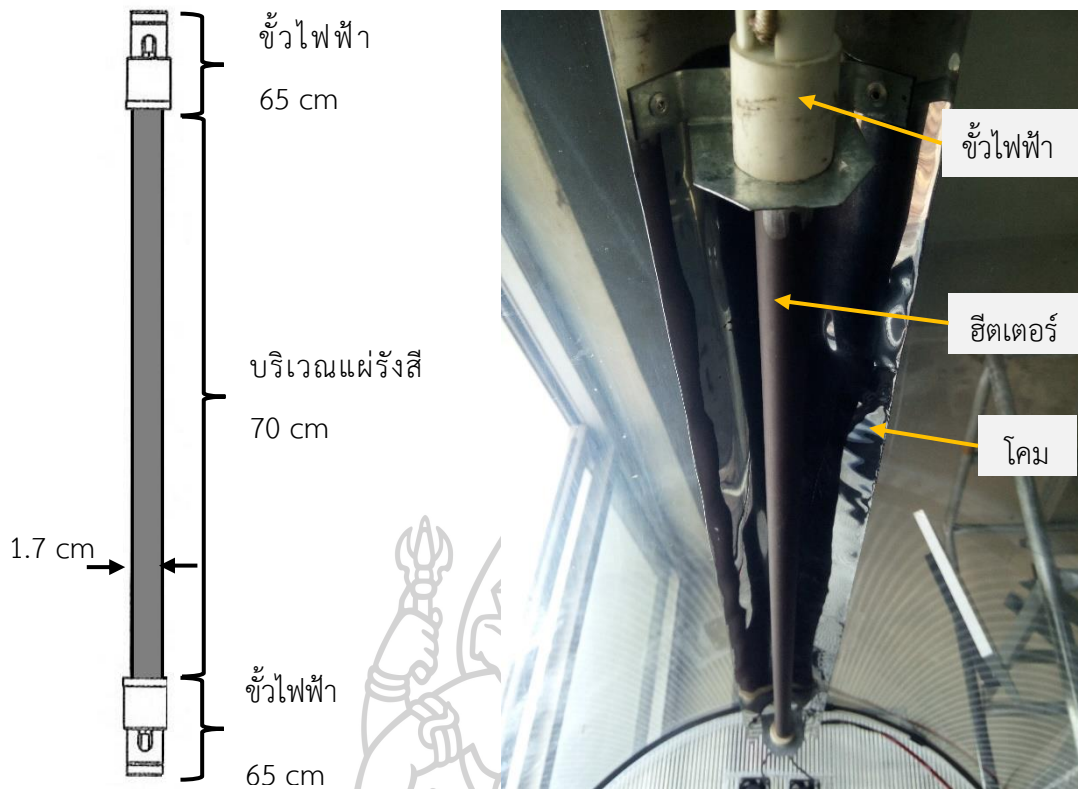
2) พัดลมระบายอากาศ DC 12V 0.35A จำนวน 2 ตัว ติดอยู่ที่ผนังด้านหลังของเครื่องอบแห้ง ทำหน้าที่ระบายความร้อนจากภายในเครื่องอบแห้งออกสู่สิ่งแวดล้อม



รูปที่ 38 พัดลมระบายอากาศ ติดตั้งอยู่ด้านหลังของเครื่องอบแห้ง

3) โคมบังฮีตเตอร์อินฟราเรด ทำเป็นแผ่นโค้งวางครอบเหนือฮีตเตอร์อินฟราเรด เพื่อป้องกันไม่ให้ความร้อนจากฮีตเตอร์สัมผัสกับแผ่นปิดคลุมโดยตรง

4) ฮีตเตอร์อินฟราเรด 220 V 850 W มีลักษณะเป็นแท่งกลม วางตามแนวยาวของเครื่องอบแห้ง อยู่เหนือตะแกรงวางผลิตภัณฑ์ ทำหน้าที่สร้างความร้อนและถ่ายเทความร้อนสู่ผลิตภัณฑ์โดยการแผ่รังสีความร้อน



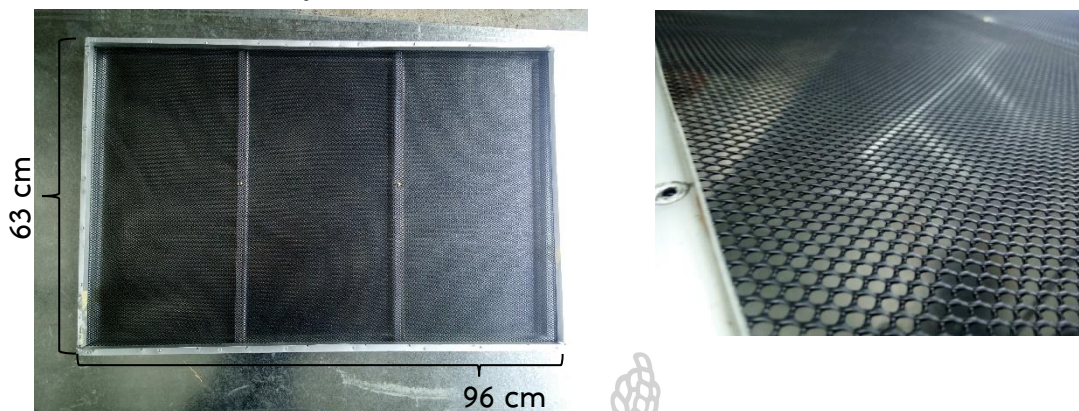
รูปที่ 39 แผนภาพฮีตเตอร์ (ซ้าย) และภาพฮีตเตอร์กับโคมบังฮีตเตอร์ (ขวา)

5) แผ่นปิดคลุม สำหรับปิดคลุมด้านบนของเครื่องอบแห้ง ทำจากแผ่นโพลีคาร์บอเนตใส ชนิดแผ่นตัน หนา 3 mm ตัดโค้งให้เป็นหลังคา แผ่นปิดคลุมนี้จะให้แสงอาทิตย์ส่องผ่านเข้ามาได้และป้องกันรังสีความร้อนไม่ให้ออกจากเครื่องอบแห้ง ทำให้อุณหภูมิอากาศด้านบนในเครื่องอบแห้งสูงขึ้นเนื่องจากปรากฏการณ์เรือนกระจก



รูปที่ 40 แผ่นโพลีคาร์บอเนตใส ชนิดแผ่นตัน ตัดโค้งเป็นแผ่นปิดคลุมเครื่องอบแห้ง

6) ตะแกรงวางผลิตภัณฑ์ ทำจากตาข่ายพลาสติกสีดำ วางอยู่บนรางที่อยู่ใต้ฮีตเตอร์อินฟราเรดข้างใต้ตะแกรง เป็นพื้นของเครื่องอบแห้งทำจากสังกะสีและทาสีดำเพื่อช่วยดูดกลืนแสงแล้วเปลี่ยนเป็นความร้อน ถ่ายเทสู่ผลิตภัณฑ์ด้านบน



รูปที่ 41 ตะแกรงวางผลิตภัณฑ์ (ซ้าย) และตาข่ายพลาสติกที่ใช้ทำตะแกรง (ขวา)

7) ช่องอากาศเข้า อยู่ด้านหน้าของเครื่องอบแห้ง ซึ่งอยู่ต่ำกว่าระดับของตะแกรง เพื่อให้อากาศไหลเข้าไปรับความร้อนจากพื้นของเครื่องอบแห้ง แล้วไหลผ่านผลิตภัณฑ์เพื่อนำความชื้นออกสู่อากาศแวดล้อม ด้านบนของช่องอากาศเข้าจะมีกันสาดเพื่อป้องกันน้ำฝนและติดตาข่ายเพื่อป้องกันแมลงเข้ามาภายในเครื่องอบแห้ง



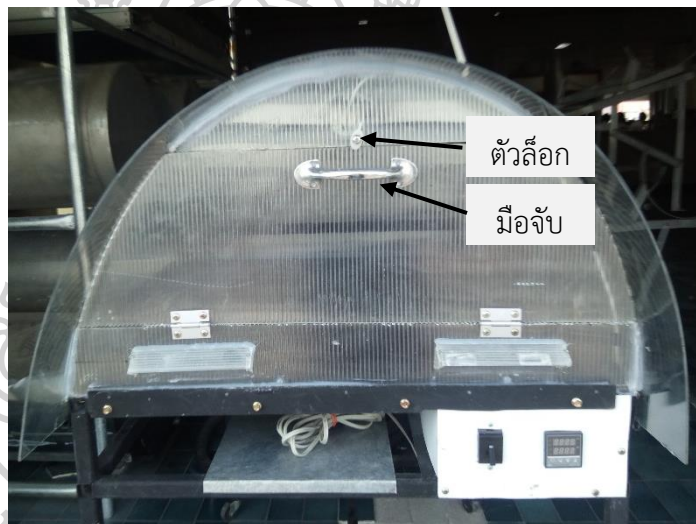
รูปที่ 42 ช่องอากาศเข้าที่ปิดด้วยตาข่ายกันแมลง และกันสาดป้องกันน้ำ

8) พัดลมกวนอากาศภายในเครื่องอบแห้ง DC 12V 0.51A จำนวน 2 ตัว ติดยึดไว้บริเวณเหนือตะแกรง ตัวหนึ่งอยู่ค่อนไปทางด้านหน้า ส่วนอีกตัวจะอยู่ฝั่งตรงข้ามและค่อนไปทางด้านหลัง พัดลมกวนอากาศนี้จะเปิดใช้งานเฉพาะกรณีใช้ไฟฟ้าเท่านั้นเพื่อช่วยกระจายความร้อนจากฮีตเตอร์อินฟราเรดให้มีความร้อนทั่วถึงกันในเครื่องอบแห้ง



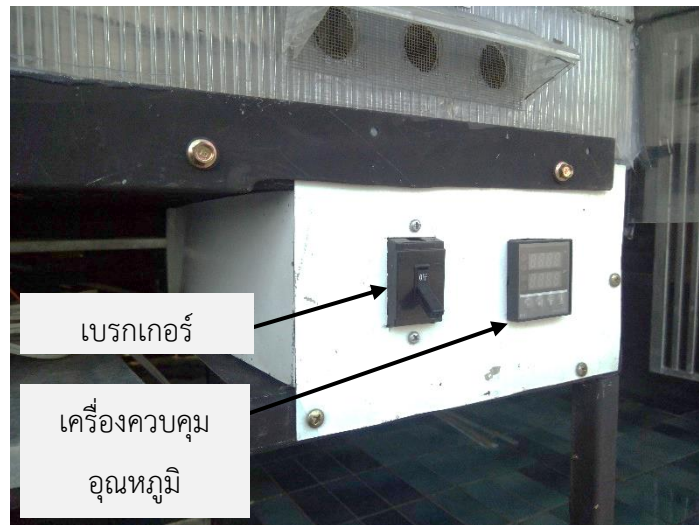
รูปที่ 43 พัดลมกวนอากาศภายในเครื่องอบแห้ง

9) ฝาเปิด-ปิด จะอยู่ด้านหน้าเครื่องอบแห้ง สูงกว่าช่องอากาศเข้า ด้านบนจะมีมือจับและที่ล็อกฝากับผนังด้านหลังทำมาจากแผ่นโพลีคาร์บอเนตใส ชนิดลูกฟูก เพื่อความคงทนแข็งแรง



รูปที่ 44 ฝาเปิด-ปิด

10) กล่องควบคุมระบบไฟฟ้า ภายในจะติดตั้งอุปกรณ์ของระบบไฟฟ้า ด้านหน้าของกล่องเป็นเบรกเกอร์สำหรับปิดเปิดการทำงาน และเครื่องควบคุมอุณหภูมิ ผนังกล่องทำเป็นสีขาวเพื่อให้สะท้อนแสง ลดการดูดกลืนแสง



รูปที่ 45 กล่องควบคุมระบบไฟฟ้า

11) เซนเซอร์วัดอุณหภูมิอากาศภายในเครื่องอบแห้ง ใช้เป็นเทอร์โมคัปเปิล ชนิดเค ติดตั้งด้วยขายึด ให้สูงกว่าตะแกรงเล็กน้อยเพื่อวัดอุณหภูมิอากาศที่อยู่ใกล้กับผลิตภัณฑ์



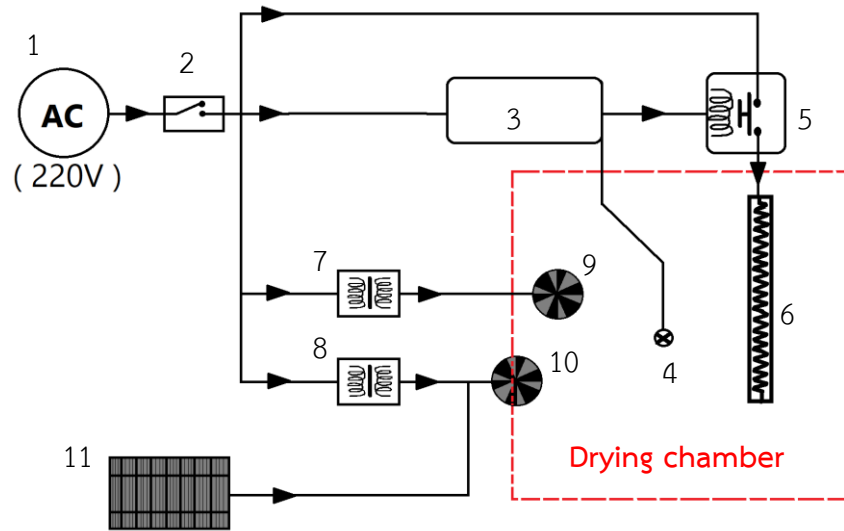
รูปที่ 46 เทอร์โมคัปเปิลบนขายึด

3.1.2 การออกแบบระบบไฟฟ้า

แนวคิดสำหรับการออกแบบระบบไฟฟ้าเป็นดังนี้

1. กรณีใช้แสงอาทิตย์เป็นพลังงานความร้อน พัฒลมระบายอากาศจะใช้พลังงานจากโซลาร์เซลล์เท่านั้น
2. กรณีใช้ไฟฟ้า (ใช้งานในช่วงฟ้าครึ้มหรือฝนตกตอนกลางวัน) จะต้องจ่ายไฟฟ้าให้ฮีตเตอร์อินฟราเรด พัฒลมกวอนอากาศ และพัฒลมระบายอากาศ
3. สามารถควบคุมอุณหภูมิอากาศในเครื่องอบแห้งได้

จากแนวคิดดังกล่าว ผู้วิจัยได้ออกแบบวงจรไฟฟ้า ดังรูปที่ 47



รูปที่ 47 แผนภาพการต่ออุปกรณ์ไฟฟ้า

- | | |
|---|-------------------------------|
| 1) คือ ไฟฟ้าจากในครัวเรือน | 6) คือ ฮีตเตอร์อินฟราเรด |
| 2) คือ เบรกเกอร์ | 7) และ 8 คือ อุปกรณ์แปลงไฟฟ้า |
| 3) คือ เครื่องควบคุมอุณหภูมิ | 9) คือ พัดลมกวนอากาศ |
| 4) คือ เซนเซอร์วัดอุณหภูมิอากาศภายในเครื่องอบแห้ง | 10) คือ พัดลมระบายอากาศ |
| 5) คือ อุปกรณ์ตัดต่อวงจรไฟฟ้า | 11) คือ แผงโซลาร์เซลล์ |

รายละเอียดและหน้าที่ของแต่ละส่วนประกอบมีดังนี้

- 1) ไฟฟ้าจากในครัวเรือน 220 V
- 2) เบรกเกอร์ สำหรับปิดเปิดการทำงานของระบบไฟฟ้าของเครื่องอบแห้ง



www.voltechshopping.com

รูปที่ 48 เบรกเกอร์

3) เครื่องควบคุมอุณหภูมิ (digital thermostat) ทำหน้าที่ควบคุมอุณหภูมิภายในส่วนวางผลิตภัณฑ์ให้คงที่



รูปที่ 49 เครื่องควบคุมอุณหภูมิ

4) เซนเซอร์วัดอุณหภูมิอากาศภายในเครื่องอบแห้ง ทำหน้าที่ส่งสัญญาณให้เครื่องควบคุมอุณหภูมิ ทำให้สามารถควบคุมอุณหภูมิในเครื่องอบแห้งให้คงที่ได้ตลอดการอบแห้ง

5) อุปกรณ์ตัดต่อวงจรไฟฟ้า (magnetic contactor) ทำหน้าที่ปิดวงจรไฟฟ้าเมื่อเครื่องควบคุมอุณหภูมิส่งสัญญาณให้ฮีตเตอร์ทำงาน



www.factomart.co.th

รูปที่ 50 อุปกรณ์ตัดต่อวงจรไฟฟ้า

6) ฮีตเตอร์อินฟราเรด ที่ใช้พลังงานไฟฟ้าจากในครัวเรือน

7) และ 8) อุปกรณ์แปลงไฟฟ้าจากไฟฟ้ากระแสสลับ 220 V เป็นไฟฟ้ากระแสตรง 12 V



รูปที่ 51 อุปกรณ์แปลงไฟฟ้า

- 9) พัดลมกวนอากาศ ติดตั้งอยู่ภายในเครื่องอบแห้ง
- 10) พัดลมระบายอากาศ ติดอยู่ที่ผนังด้านหลังของเครื่องอบแห้ง
- 11) แผงโซลาร์เซลล์ ทำหน้าที่ผลิตไฟฟ้าให้กับพัดลมระบายอากาศ

3.1.3 หลักการทำงานของเครื่องอบแห้ง



รูปที่ 52 เครื่องอบแห้งที่สร้างเสร็จแล้ว

การทำงานของเครื่องอบแห้ง เริ่มจากเปิดฝาที่อยู่ด้านหน้าเครื่อง แล้วนำผลิตภัณฑ์วางเรียงบนตะแกรงแบบชั้นบาง (สามารถดึงตะแกรงออกมาด้านนอกได้เพื่อความถนัด) เมื่อวางผลิตภัณฑ์เสร็จแล้วให้ปิดฝาและหมุนตัวล็อก จากนั้นจึงเริ่มการอบแห้งโดยสามารถทำได้ 2 วิธี

วิธีที่หนึ่ง คือใช้พลังงานแสงอาทิตย์ในการอบแห้ง ให้นำเครื่องอบแห้งไปตากแดดโดยให้ด้านหน้าของเครื่องอบแห้งหันไปทางทิศใต้ (กรณีอยู่ที่ซีกโลกเหนือ) เพื่อให้เครื่องอบแห้งรับแสงอาทิตย์ได้ดี จากนั้นหันแผงโซลาเซลล์ไปทางเดียวกับเครื่องอบแห้งแล้วปรับมุมเอียงให้พอดีกับละติจูดที่เครื่องอยู่ พัดลมระบายอากาศจะทำงานเพื่อดูดอากาศขึ้นภายในเครื่องอบแห้งออกไปสู่อากาศแวดล้อม แต่พัดลมกวนอากาศที่ติดตั้งไว้ภายในเครื่องอบแห้งจะไม่ทำงาน วิธีนี้สามารถทำได้เฉพาะเวลาที่มีแสงแดด แต่หากมีความจำเป็นต้องทำการอบแห้งตลอดทั้งกลางวันและกลางคืน หรือในวันที่สภาพอากาศไม่ดี เช่น ฝนตก เมฆมาก สามารถใช้วิธีที่สองได้

วิธีที่สอง คือการใช้พลังงานไฟฟ้า (ในช่วงฟ้าครึ้มหรือฝนตกในเวลากลางวัน) ซึ่งสามารถใช้ไฟฟ้า AC 220 V จากในครัวเรือนได้ โดยใช้ปลั๊กจากกล่องควบคุมระบบไฟฟ้าเชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้าบ้าน และตั้งค่าอุณหภูมิให้เหมาะสมกับผลิตภัณฑ์ที่ต้องการอบแห้ง

เมื่อผลิตภัณฑ์ได้รับความร้อนจากแสงอาทิตย์หรือจากฮีตเตอร์อินฟราเรด อุณหภูมิของผลิตภัณฑ์จะเพิ่มสูงขึ้น ส่งผลให้ความชื้น (น้ำ) ที่อยู่ในผลิตภัณฑ์เคลื่อนตัวออกมายังบริเวณผิวด้านนอกของผลิตภัณฑ์ เมื่อมีการไหลของอากาศผ่านผิวด้านนอกของผลิตภัณฑ์จะเกิดการถ่ายเทความชื้นจากผลิตภัณฑ์ไปยังอากาศ ทำให้อากาศมีความชื้นมากขึ้น จากนั้นพัดลมที่ติดอยู่ด้านหลังของเครื่องอบแห้งจะทำหน้าที่ในการดูดเอาอากาศชื้นออกไปสู่อากาศแวดล้อม

3.1.4 ต้นทุนการผลิตเครื่องอบแห้ง

ต้นทุนการสร้างเครื่องอบแห้ง ประกอบด้วยค่าวัสดุ-อุปกรณ์ และค่าแรงงาน แสดงในตารางที่ 3 และต้นทุนการอบแห้งกล้วยน้ำว้าต่อ 1 รอบ ประกอบด้วยค่ากล้วยและค่าไฟฟ้า (เฉพาะกรณีอบแห้งโดยใช้พลังงานไฟฟ้า) แสดงในตารางที่ 4

ตารางที่ 3 ต้นทุนค่าวัสดุ-อุปกรณ์ และค่าแรงงาน ในการสร้างเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ ขนาดเล็กสำหรับใช้ในครัวเรือน

รายการ	ราคา (บาท)
ฮีตเตอร์อินฟาเรด	780
เครื่องควบคุมอุณหภูมิ	580
แผงโซลาร์เซลล์	766
อุปกรณ์ตัดต่อวงจรไฟฟ้า	300
เบรกเกอร์	100
พัดลมระบายอากาศ DC 12V 0.35A 1.5" (2ตัว)	100
พัดลมกวนอากาศ DC 12V 0.51A 3.5" (2ตัว)	150
อุปกรณ์แปลงไฟฟ้า AC220V-DC12V	200
แผ่นโพลีคาร์บอเนตใส ชนิดแผ่นตัน	3325
แผ่นสังกะสี	600
เหล็ก ก่อ	275
แผ่นโพลีคาร์บอเนตใส ชนิดลูกฟูก	500
สีน้ำมันดำ	200
สายไฟ	180
ลื้อ	120
ฉนวนความร้อน	90
ตระแกรง	300
วัสดุอื่น ๆ	200
ค่าแรงงาน (3 วัน วันละ 400 บาท)	1,200
รวม	9,966

จากตารางที่ 3 ต้นทุนค่าวัสดุ-อุปกรณ์ และค่าแรงงาน สำหรับสร้างเครื่องอบแห้งคือ 9,966 บาท โดยผู้วิจัยประมาณการเวลาที่ใช้สร้างเครื่องอบแห้งทั้งหมด 3 วัน หากคิดเฉพาะค่าวัสดุ-อุปกรณ์ จะเป็นเงินทั้งสิ้น 8,766 บาท

ตารางที่ 4 ต้นทุนการอบแห้งกล้วยน้ำว้าต่อ 1 รอบการอบแห้ง

รายการ	ราคา (บาท) /รอบการอบ
กล้วยน้ำว้า	80
ค่าไฟฟ้า (ให้เครื่องทำงานโดยไม่ตัดการทำงาน)	180
รวม	260

ตารางที่ 4 เป็นค่าใช้จ่ายสำหรับทำกล้วยน้ำว้าอบแห้ง โดยวางกล้วยอบไว้เต็มตะแกรง ซึ่งจะใช้เวลาประมาณ 6-7 ชั่วโมง คิดเป็นเงิน 80 บาท สำหรับปริมาณไฟฟ้าจะคิดจากการเปิดใช้ รวมทั้งสิ้น 40 ชั่วโมง ซึ่งจะใช้เวลาไปทั้งสิ้น 36 ยูนิท โดยที่ 1 ยูนิท มีค่าเท่ากับ 5 บาท ดังนั้นคิดเป็นเงินทั้งหมด 180 บาท หากทำการอบแห้งในช่วงที่สภาพอากาศดีก็สามารถประหยัดค่าไฟฟ้าลงได้

3.2 การทดสอบเครื่องอบแห้ง

ผู้วิจัยได้ทดสอบเครื่องอบแห้งโดยทำการทดลองอบแห้งกล้วยน้ำว้า ซึ่งงานวิจัยนี้จะแบ่งการทดลองออกเป็น 2 ส่วน คือ

- การทดลองอบแห้งโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์ (การทดลองที่ 1-3)
- การทดลองอบแห้งโดยใช้พลังงานไฟฟ้า (การทดลองที่ 4-6)

สำหรับการทดลองอบแห้งโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์ ผู้วิจัยได้อบแห้งกล้วยน้ำว้าในเครื่องอบแห้งเปรียบเทียบกับการตากแห้งกล้วยน้ำว้าตามธรรมชาติ แต่การอบแห้งโดยใช้พลังงานไฟฟ้าจะทดลองอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งเพียงอย่างเดียว

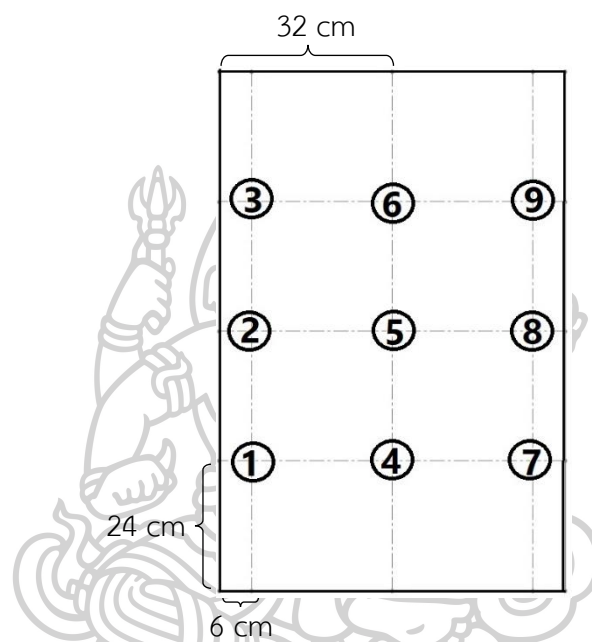
3.2.1 อุปกรณ์วัดและเก็บข้อมูล

ในระหว่างการทดลองผู้วิจัยได้เก็บข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการอบแห้ง ได้แก่ อุณหภูมิอากาศภายในเครื่องอบแห้ง อุณหภูมิอากาศแวดล้อม ความชื้นสัมพัทธ์อากาศภายในเครื่องอบแห้ง ความชื้นสัมพัทธ์อากาศแวดล้อม และความเข้มรังสีอาทิตย์ โดยมีรายละเอียดของอุปกรณ์และการติดตั้งดังต่อไปนี้

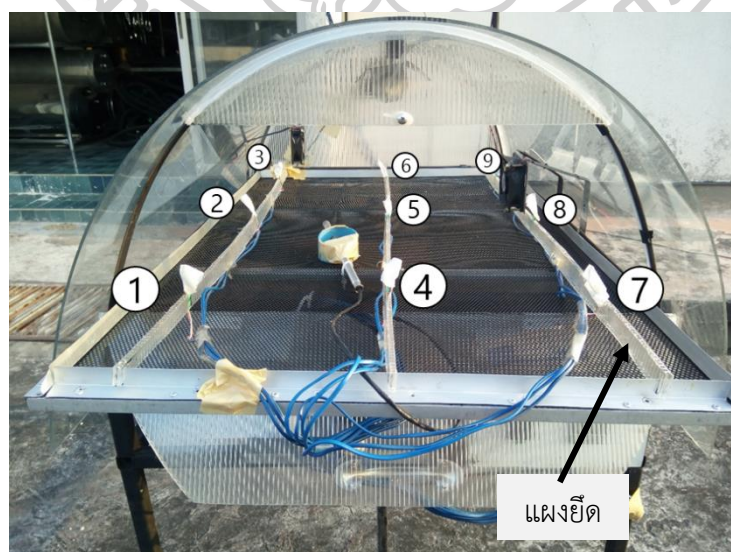
3.2.1.1 อุปกรณ์วัดอุณหภูมิอากาศ

ผลิตภัณฑ์ที่อบแห้งด้วยอากาศที่มีอุณหภูมิสูงจะแห้งเร็วกว่าผลิตภัณฑ์ที่อบแห้งด้วยอากาศที่มีอุณหภูมิต่ำ (ถ้าหากปัจจัยอื่น ๆ ของทั้งสองกรณีมีค่าเท่ากัน) ดังนั้นอุณหภูมิอากาศจึงมีความสำคัญต่อกระบวนการอบแห้ง ผู้วิจัยจึงได้ทำการเก็บข้อมูลอุณหภูมิอากาศภายในเครื่องอบแห้ง โดยติดตั้งเทอร์โมคัปเปิล ชนิดเค (K-type thermocouple) ไว้ 9 จุดภายในเครื่องอบแห้งเพื่อวัดอุณหภูมิอากาศภายในเครื่องอบแห้งและอีกหนึ่งจุด ติดตั้งไว้ด้านนอกเครื่องอบแห้งเพื่อวัดอุณหภูมิอากาศแวดล้อม

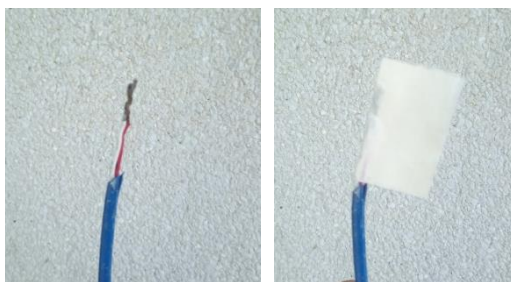
เทอร์โมคัปเปิลภายในเครื่องอบแห้งจะติดกับแผงยึดเพื่อให้ปลายสายเทอร์โมคัปเปิลชูขึ้นสู่อากาศ โดยจะมีความสูงจากตะแกรงประมาณ 5 cm ซึ่งจะอยู่สูงจากกล้วยน้ำว้าเพียงเล็กน้อย เพื่อให้ได้ข้อมูลอุณหภูมิอากาศในบริเวณที่ใกล้กับผลิตภัณฑ์มากที่สุด ซึ่งแผงยึดที่ใช้ นั้นมีความสูงไม่มากนัก จึงไม่รบกวนกระบวนการอบแห้ง ตำแหน่งการติดตั้งเทอร์โมคัปเปิล แสดงดังรูปที่ 53-54 และปลายสายของเทอร์โมคัปเปิลจะใช้เทปกาวสีขาวยึดไว้เพื่อป้องกันลวดเทอร์โมคัปเปิลสัมผัสกับแสงอาทิตย์โดยตรง (รูปที่ 55)



รูปที่ 53 ตำแหน่งการติดตั้งเทอร์โมคัปเปิลบนตะแกรง ภายในเครื่องอบแห้ง (จากมุมมองด้านบน)



รูปที่ 54 ตำแหน่งเทอร์โมคัปเปิลที่ติดตั้งบนตะแกรงภายในเครื่องอบแห้ง



รูปที่ 55 ปลายสายเทอร์โมคัปเปิลก่อนติดเทปกาว (ซ้าย) และหลังติดเทปกาว (ขวา)

3.2.1.2 อุปกรณ์วัดความชื้นสัมพัทธ์

ความชื้นสัมพัทธ์เป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่สำคัญต่อกระบวนการอบแห้ง ผลผลิตที่อุณหภูมิที่ถูกแวดล้อมด้วยอากาศซึ่งมีความชื้นสัมพัทธ์คงที่ค่าหนึ่ง ผลผลิตนั้นจะมีการดูดหรือคายความชื้นจนกระทั่งอยู่ในสภาวะสมดุลทางความชื้นกับอากาศแวดล้อม ดังนั้นในกระบวนการอบแห้งที่อากาศแวดล้อมผลผลิตมีความชื้นสัมพัทธ์ต่ำ ผลผลิตก็จะแห้งได้ดี ในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยได้เก็บข้อมูลความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศภายในและภายนอกเครื่องอบแห้ง โดยใช้เครื่องวัดความชื้นสัมพัทธ์ (Humidity transmitter) ยี่ห้อ E+E ELEKTRONIK รุ่น EE23 ซึ่งหัววัดจะถูกยึดไว้กับที่ยึด ที่อยู่บริเวณกลางตะแกรง โดยจะให้ปลายหัววัดอยู่ในระดับความสูงเดียวกันกับถ้ำยน้ำว่า (รูปที่ 56)



รูปที่ 56 เครื่องวัดความชื้นสัมพัทธ์ ยี่ห้อ E+E ELEKTRONIK รุ่น EE23 (ซ้าย) และหัววัดที่ติดตั้งบนที่ยึด (ขวา)

3.2.1.3 อุปกรณ์วัดความเข้มรังสีอาทิตย์

เครื่องอบแห้งนี้ใช้พลังงานแสงอาทิตย์เพื่อทำความร้อนในส่วนวางผลิตภัณฑ์และใช้ผลิตภัณฑ์กระแสไฟฟ้าสำหรับพัดลมระบายอากาศ การเปลี่ยนแปลงของแสงอาทิตย์จึงส่งผลกระทบต่อกระบวนการอบแห้งอย่างมาก

ในงานวิจัยนี้เลือกใช้คำว่า “แสงอาทิตย์” แทนคำว่า “รังสีอาทิตย์” เพื่อให้เข้าใจง่าย ซึ่งรังสีอาทิตย์นั้นหมายถึง พลังงานที่เกิดจากดวงอาทิตย์และแผ่ออกสู่อวกาศในรูปของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งมีทั้งในรูปรังสีและแสงสว่าง (เสริม จันทร์ฉาย, 2560b) การวัดปริมาณของแสงอาทิตย์จะใช้ไพราโนมิเตอร์ (pyranometer) ซึ่งจะวัดรังสีรวม ซึ่งเป็นรังสีที่มาจากท้องฟ้าทุกทิศทาง ค่าความเข้มรังสีอาทิตย์ที่วัดได้จะออกมาในหน่วยของวัตต์ต่อตารางเมตร ($W m^{-2}$) ไพราโนมิเตอร์ที่ใช้คือ ยี่ห้อ KIPP&ZONEN รุ่น CM11 ติดตั้งไว้ในบริเวณใกล้เคียงกับเครื่องอบแห้ง (รูปที่ 57)



รูปที่ 57 ไพราโนมิเตอร์ ยี่ห้อ KIPP&ZONEN รุ่น CM11

3.2.1.4 อุปกรณ์บันทึกข้อมูล

สัญญาณจากเทอร์โมคัปเปิล เครื่องวัดความชื้นสัมพัทธ์ และไพราโนมิเตอร์ ถูกบันทึกไว้ทุก 1 นาทีด้วยเครื่องบันทึกข้อมูล (data collector) ยี่ห้อ YOKOGAWA รุ่น DC 100 (รูปที่ 58) ตั้งแต่เวลา 8:00 - 18:00 น. ของทุกวันที่ทำการทดลอง



รูปที่ 58 เครื่องบันทึกข้อมูล ยี่ห้อ YOKOGAWA รุ่น DC 100

3.2.2 การทดลองอบแห้งกล้วยน้ำว้าด้วยพลังงานแสงอาทิตย์

การอบแห้งโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์ จะเริ่มต้นด้วยการคัดเลือกกล้วยน้ำว้าสุก จากนั้นผู้วิจัยจะสุ่มเลือกกล้วยน้ำว้าที่ปอกเปลือกออกแล้วเพื่อใช้เป็นกล้วยตัวอย่าง สำหรับอบแห้งในเครื่องอบแห้งกับตากแดดตามธรรมชาติ อย่างละ 2 ลูก และใช้กล้วยที่ปอกเปลือกออกแล้วประมาณ 4 kg สำหรับอบแห้งในเครื่องอบแห้ง ส่วนกล้วยที่เหลือจะใช้สำหรับทดลองตากแดดตามธรรมชาติ โดยจะใส่ไว้ในกรงเหล็ก เพื่อป้องกันสัตว์รบกวน เช่น นก กระรอก และหนู



รูปที่ 59 กล้วยน้ำว้าที่อบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์



รูปที่ 60 กล้วยน้ำว้าที่ตากแดดในกรงเหล็ก

ในระหว่างการอบแห้ง ผู้วิจัยเก็บข้อมูลโดยการชั่งน้ำหนักกล้วยตัวอย่าง ทุก 1 ชั่วโมง ด้วยเครื่องชั่งดิจิตอล ยี่ห้อ Sartorius รุ่น BSA เพื่อนำค่าน้ำหนักที่ได้ไปคำนวณหาความชื้นมาตรฐาน เปียกเมื่อเสร็จสิ้นการทดลอง



รูปที่ 61 เครื่องชั่งดิจิตอล ยี่ห้อ Sartorius รุ่น BSA

ช่วงเวลาที่ใช้อบกล้วยจะเริ่มตั้งแต่ 8:00 - 18:00 น. ต่อเนื่องเป็นเวลา 4 วัน สำหรับ 1 การทดลอง โดยการทดลองที่ 1 ทำการทดลองระหว่างวันที่ 28-31 มีนาคม 2562 การทดลองที่ 2 และ 3 ทำการทดลองต่อเนื่องกันระหว่างวันที่ 6-13 เมษายน 2562



รูปที่ 62 ภาพถ่ายกล้วยน้ำว้าที่อบแห้งในเครื่องอบแห้งโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์ (การทดลองที่ 2)

หลังจากเสร็จสิ้นแต่ละการทดลอง ผู้วิจัยจะนำกล้วยน้ำว้าตัวอย่างจากการอบแห้งในเครื่องอบแห้งและจากการตากแดดตามธรรมชาติ ไปเข้าเตาอบไฟฟ้า โดยตั้งค่าอุณหภูมิไว้ที่ $103\text{ }^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นนำออกมาชั่งน้ำหนัก จะได้เป็นค่ามวลแห้งของกล้วยตัวอย่างเพื่อใช้ในการคำนวณหาความชื้นมาตรฐานเปียกต่อไป



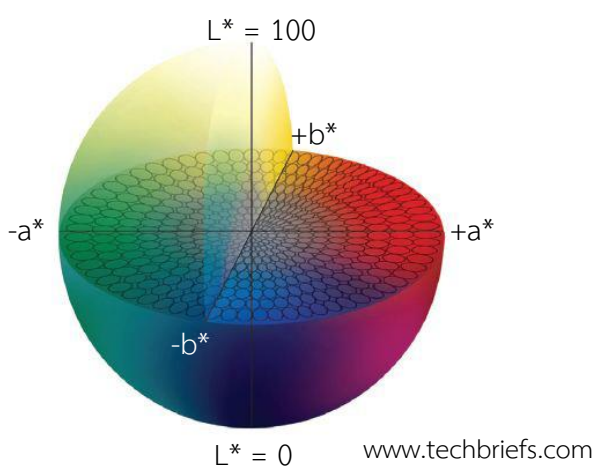
รูปที่ 63 เตาอบไฟฟ้า ยี่ห้อ Fisher Scientific รุ่น Isotemp

โดยในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยได้นำกล้วยที่อบแห้งจากเครื่องอบแห้งกับกล้วยที่ตากแดดตามธรรมชาติ มาวัดค่าสีของผลิตภัณฑ์ด้วยเครื่องวัดสีเพื่อเปรียบเทียบกัน และวัดค่าแอกติวิตีของน้ำเพื่อประเมินความเสี่ยงในการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์

ผู้วิจัยใช้เครื่องวัดสี (spectrophotometer) ยี่ห้อ Hunter Lab รุ่น Miniscan EZ (รูปที่ 64) ซึ่งจะได้ค่าสีในระบบ CIELAB โดยในระบบ CIELAB นี้จะประกอบด้วยตัวเลขทั้งหมด 3 ชุด ที่บ่งบอกค่าสีทั้ง 3 แกน แกนแรกคือ a^* มีค่าตั้งแต่ -60 (เท่ากับสีเขียว) ถึง $+60$ (เท่ากับสีแดง) แกนที่สองคือ b^* มีค่าตั้งแต่ -60 (เท่ากับน้ำเงิน) ถึง $+60$ (เท่ากับสีเหลือง) และแกนสุดท้ายคือ L^* มีค่าตั้งแต่ 0 (เท่ากับสีดำ) ถึง 100 (เท่ากับสีขาว) แกนสีของระบบ CIELAB แสดงดังรูปที่ 65



รูปที่ 64 เครื่องวัดสี ยี่ห้อ Hunter Lab รุ่น Miniscan EZ



รูปที่ 65 แกนสีของระบบ CIELAB

สำหรับการวัดค่าแอกติวิตีของน้ำจะใช้เครื่องวัดแอกติวิตีของน้ำ ยี่ห้อ ROTRONIC รุ่น hygropalm เครื่องมือนี้จะวัดค่าความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศที่อยู่ภายในแก้ว ซึ่งผู้วิจัยใส่แก้วที่แห้งแล้วลงไปแก้ว เมื่อแก้วที่แห้งแล้วกับอากาศภายในแก้วอยู่ในสภาวะสมดุลทางความชื้น เครื่องมือนี้จะวัดค่าความชื้นสัมพัทธ์และแสดงผลเป็นค่าแอกติวิตีของน้ำ



รูปที่ 66 เครื่องวัดค่าแอกติวิตีของน้ำ (ขวา) และแก้ว (ซ้าย)

3.2.3 การทดลองอบแห้งกล้วยน้ำว้าด้วยพลังงานไฟฟ้า

การอบแห้งโดยใช้พลังงานไฟฟ้า มีขั้นตอนเหมือนกับการอบแห้งโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์ แต่จะย้ายเครื่องอบแห้งเข้ามาทดลองภายในอาคาร และไม่มีการทดลองกล้วยน้ำว้าตากแดด รวมทั้งไม่มีความจำเป็นต้องเก็บข้อมูลรังสีอาทิตย์ เวลาของแต่ละการทดลองและปริมาณกล้วยที่ใช้จะเท่ากับการทดลองอบแห้งด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ โดยการทดลองที่ 4 ทำการทดลองระหว่างวันที่ 2-5 เมษายน 2562 การทดลองที่ 5 และ 6 ทำการทดลองต่อเนื่องกันระหว่างวันที่ 14-21 เมษายน 2562



รูปที่ 67 ภาพการทดลองอบแห้งกล้วยน้ำว้าด้วยพลังงานไฟฟ้า

3.3 ผลการทดสอบเครื่องอบแห้ง

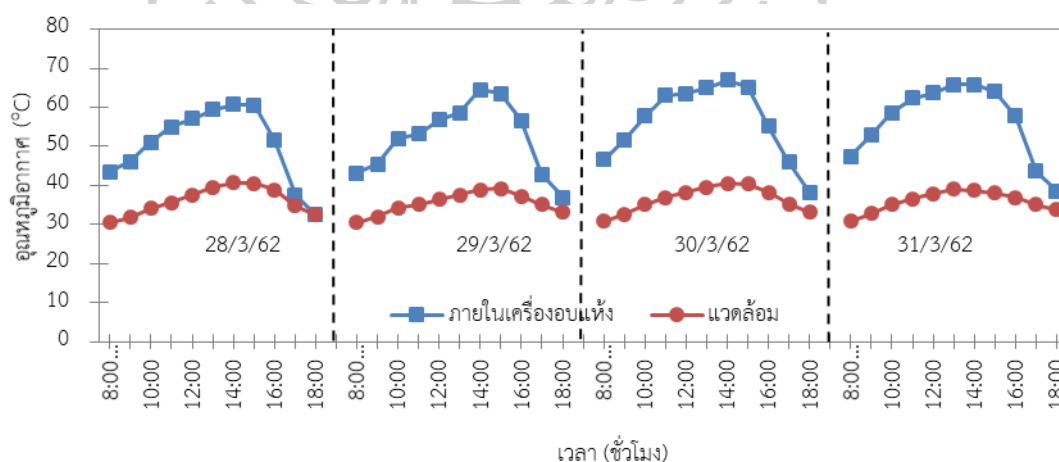
ผู้วิจัยทำการทดสอบประสิทธิภาพของเครื่องอบแห้งโดยการทดลองอบแห้งกล้วยน้ำว้า โดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์และใช้พลังงานไฟฟ้า ผลการทดลองที่ได้เป็นดังนี้

3.3.1 ผลการทดลองอบแห้งกล้วยน้ำว้าด้วยพลังงานแสงอาทิตย์

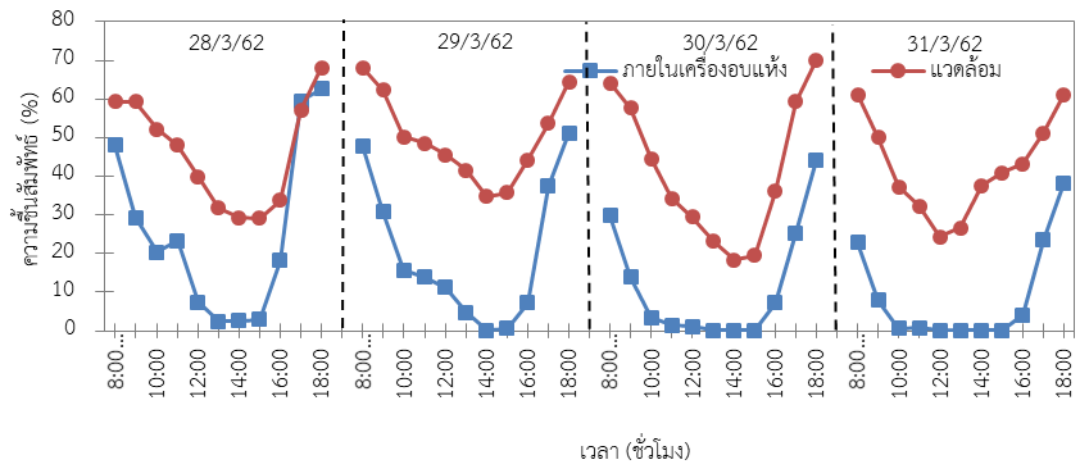
การทดลองที่ 1 อบแห้งกล้วยน้ำว้า ระหว่างวันที่ 28-31 มีนาคม 2562 ช่วงเวลาที่อบแห้ง คือ 8:00-18:00 น. ของทุกวัน ใช้กล้วยน้ำว้าที่ปอกเปลือกแล้ว 4 kg อบแห้งในเครื่องอบแห้งพร้อม กับเปรียบเทียบผลที่ได้กับการตากแดดตามธรรมชาติ

จากการทดลองพบว่า อุณหภูมิอากาศเฉลี่ยรายชั่วโมงภายในเครื่องอบแห้งมีค่าสูงสุดที่เวลา 14:00 น. ของทุก ๆ วัน โดยมีค่าสูงสุดถึง 67°C ในวันที่ 3 ของการทดลอง และเครื่องอบแห้ง สามารถทำอุณหภูมิอากาศได้สูงกว่าอากาศแวดล้อมประมาณ $20-27^{\circ}\text{C}$ สำหรับความชื้นสัมพัทธ์ ภายในเครื่องอบแห้งต่ำกว่าความชื้นสัมพัทธ์แวดล้อม โดยมีค่าต่ำที่สุดเวลา 14:00 น. เนื่องจาก อุณหภูมิอากาศภายในเครื่องอบแห้งมีค่าสูงสุด ความเข้มรังสีอาทิตย์สูงสุดมีค่าประมาณ 940 w m^{-2} เวลา 12:00 น. ในวันที่ 3 ของการทดลอง เป็นวันเดียวกันที่มีอุณหภูมิอากาศในเครื่องอบแห้งสูงสุด

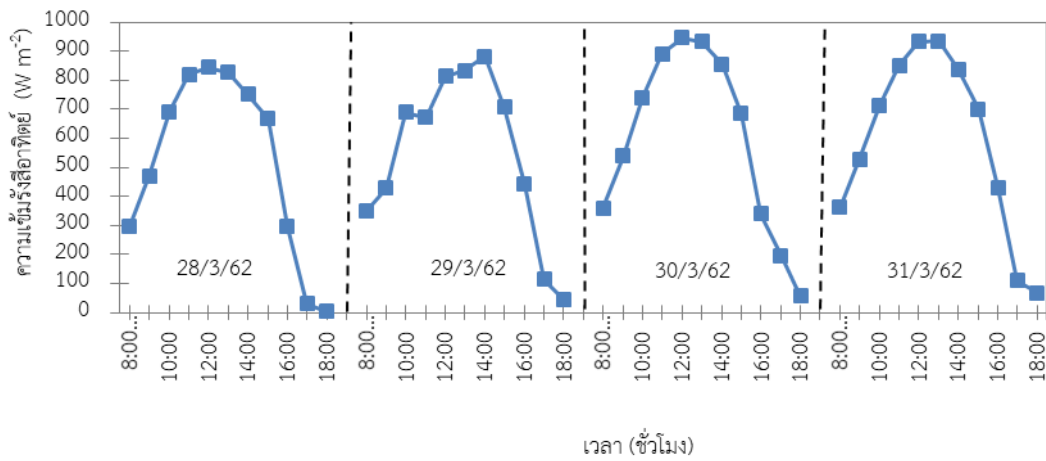
ความชื้นเริ่มต้นของกล้วยน้ำว้าประมาณ 66-68% w.b. จากนั้นค่อย ๆ ลดลงดังรูปที่ 69 โดยใช้เวลาอบกล้วยน้ำว้าทั้งหมด 4 วัน เพื่อให้ความชื้นของกล้วยน้ำว้าในเครื่องอบแห้งเหลืออยู่ประมาณ 12% w.b. ในขณะที่กล้วยน้ำว้าที่ตากแดดตามธรรมชาติใช้เวลาตากแห้งเท่ากันยังคงมีความชื้น เหลืออยู่ประมาณ 21% w.b. หลังจากการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งได้กล้วยอบแห้ง 1.6 kg



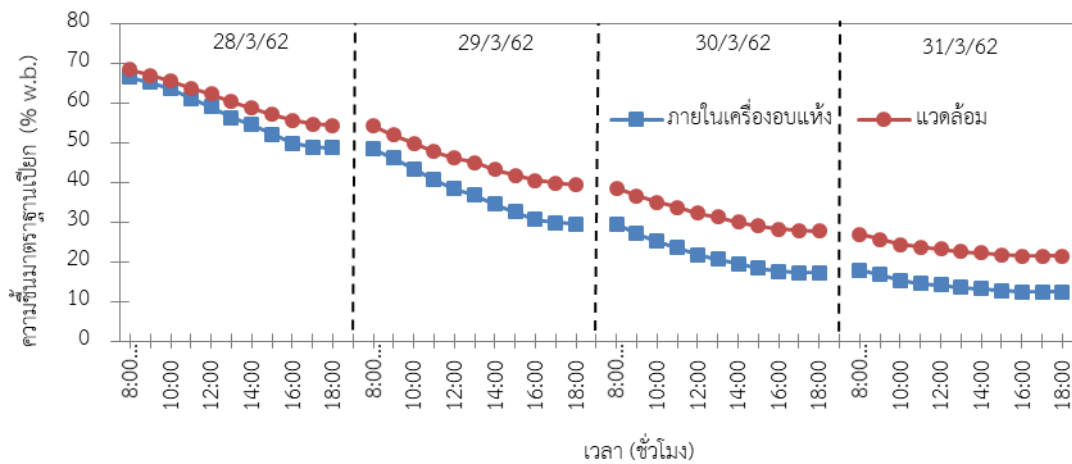
รูปที่ 68 อุณหภูมิของอากาศภายในเครื่องอบแห้งและอากาศแวดล้อม ของการทดลองที่ 1



รูปที่ 69 ความชื้นสัมพัทธ์อากาศภายในเครื่องอบแห้งและอากาศแวดล้อม ของการทดลองที่ 1



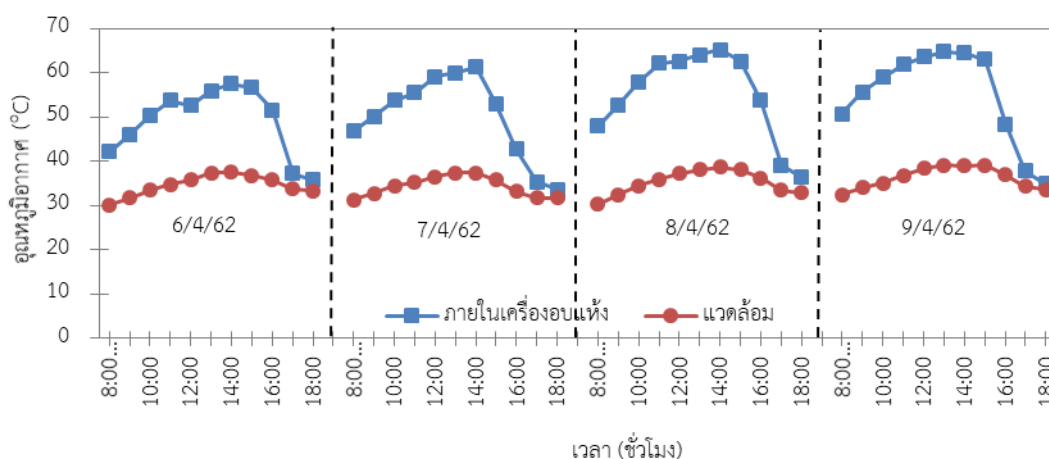
รูปที่ 70 ความเข้มรังสีอาทิตย์ระหว่างการทดลองที่ 1



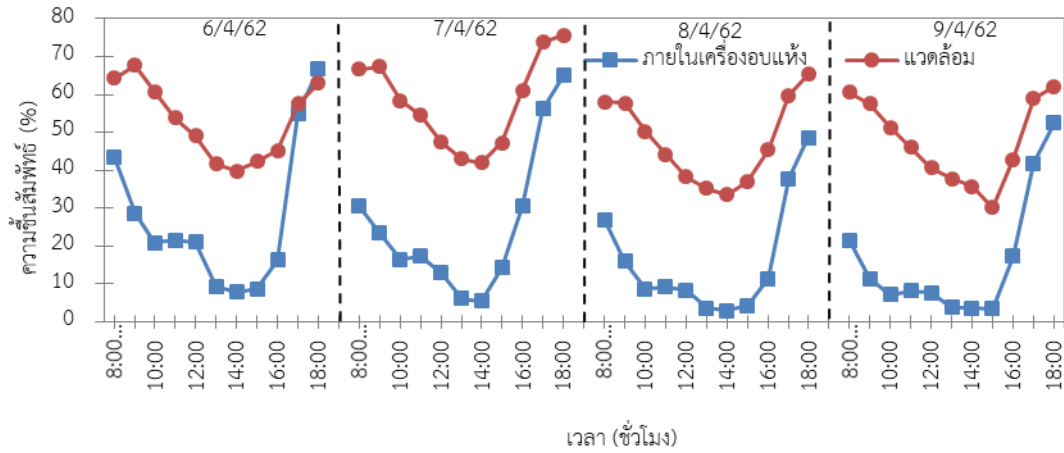
รูปที่ 71 กราฟการแห้งของกล้วยน้ำว้าอบแห้งในเครื่องอบแห้งที่ใช้พลังงานแสงอาทิตย์ และกล้วยน้ำว้าตากแดดตามธรรมชาติ ของการทดลองที่ 1

การทดลองที่ 2 ผู้วิจัยได้ทำการทดลองตามเงื่อนไขเดียวกันกับการทดลองที่ 1 ในช่วงระหว่างวันที่ 6-9 เมษายน 2562 ผลการทดลองพบว่า อุณหภูมิอากาศเฉลี่ยรายชั่วโมงภายในเครื่องอบแห้งมีค่าสูงสุดที่เวลา 14:00 น. ของทุก ๆ วัน โดยมีค่าสูงสุดถึง 65°C ในวันที่ 3 ของการทดลอง เครื่องอบแห้งสามารถทำอุณหภูมิอากาศได้สูงกว่าอากาศแวดล้อมประมาณ $20\text{-}26^{\circ}\text{C}$ ความชื้นสัมพัทธ์ภายในเครื่องอบแห้งต่ำกว่าความชื้นสัมพัทธ์แวดล้อม เนื่องจากอุณหภูมิอากาศภายในเครื่องอบแห้งสูงกว่าอุณหภูมิอากาศแวดล้อม ความเข้มรังสีอาทิตย์สูงสุดมีค่าประมาณ 970 w m^{-2} เวลา 12:00 น. ในวันที่ 3 ของการทดลอง เป็นวันเดียวกันที่มีอุณหภูมิอากาศในเครื่องอบแห้งสูงสุด

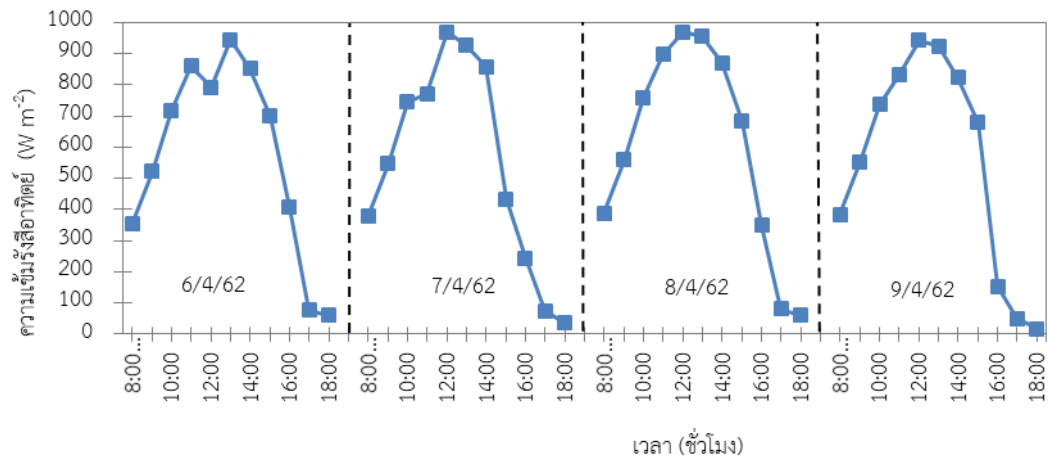
ความชื้นเริ่มต้นของกล้วยน้ำว้าประมาณ 67-68% w.b. จากนั้นค่อย ๆ ลดลงดังรูปที่ 73 โดยใช้เวลาอบกล้วยน้ำว้าทั้งหมด 4 วัน ความชื้นของกล้วยน้ำว้าในเครื่องอบแห้งเหลืออยู่ประมาณ 13% w.b. ในขณะที่กล้วยน้ำว้าตากแดดที่ใช้เวลาอบแห้งเท่ากันยังคงมีความชื้นเหลืออยู่ประมาณ 22% w.b. ซึ่งต้องใช้เวลาดตากแดดต่ออีก 4 วัน จึงจะเหลือความชื้นประมาณ 13% w.b. และหลังจากการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งได้กล้วยอบแห้ง 1.5 kg



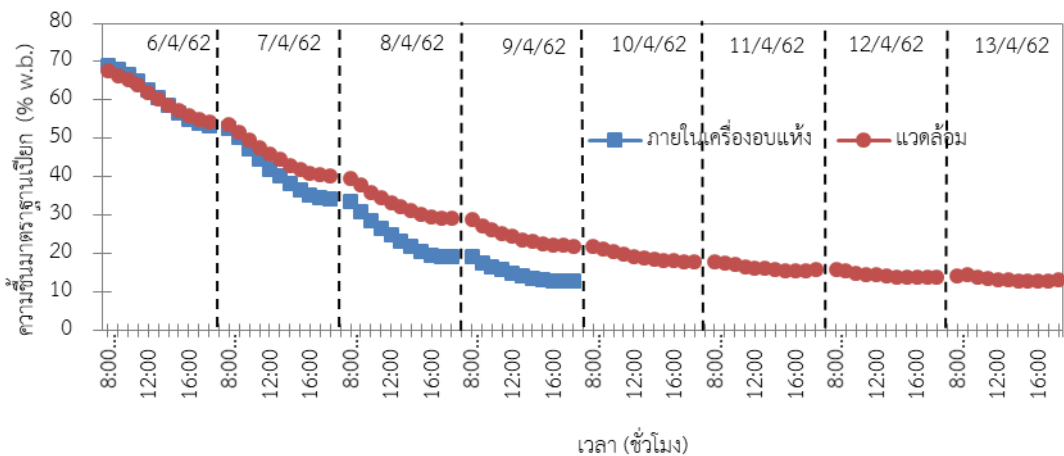
รูปที่ 72 อุณหภูมิของอากาศภายในเครื่องอบแห้งและอากาศแวดล้อม ของการทดลองที่ 2



รูปที่ 73 ความชื้นสัมพัทธ์อากาศภายในเครื่องอบแห้งและอากาศแวดล้อม ของการทดลองที่ 2



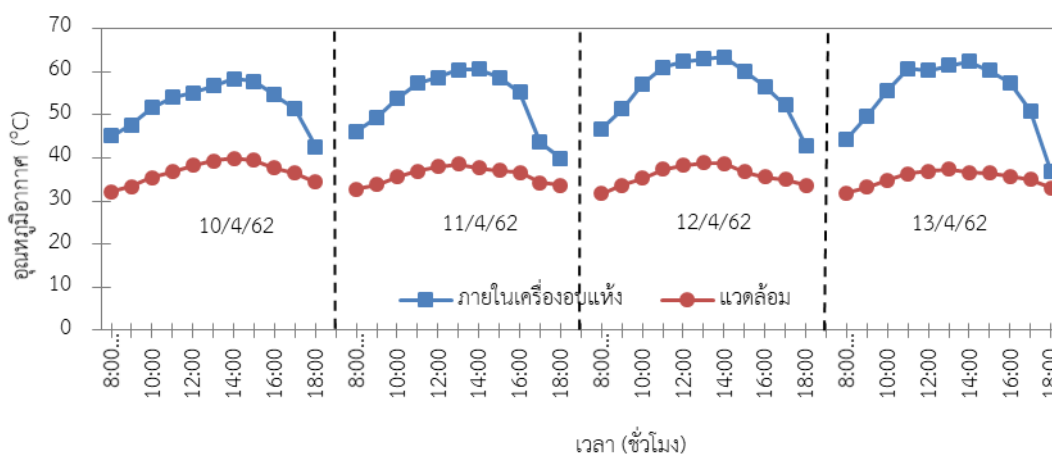
รูปที่ 74 ความเข้มรังสีอาทิตย์ระหว่างการทดลองที่ 2



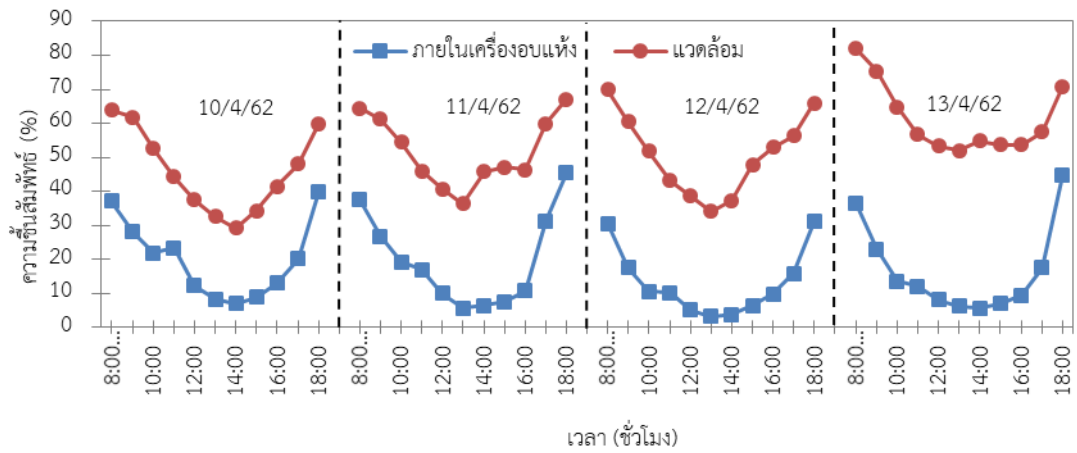
รูปที่ 75 กราฟการแห้งของกล้วยน้ำว้าอบแห้งในเครื่องอบแห้งที่ใช้พลังงานแสงอาทิตย์ และกล้วยน้ำว้าตากแดดตามธรรมชาติ ของการทดลองที่ 2

การทดลองที่ 3 ผู้วิจัยได้ทำการทดลองตามเงื่อนไขเดียวกันกับการทดลองที่ 1 ในช่วงระหว่างวันที่ 10-13 เมษายน 2562 ผลการทดลองพบว่า อุณหภูมิอากาศเฉลี่ยรายชั่วโมงภายในเครื่องอบแห้งมีค่าสูงสุดที่เวลา 14:00 น.ของทุกวัน โดยมีค่าสูงสุดถึง 63 °C ในวันที่ 3 ของการทดลอง และเครื่องอบแห้งสามารถทำอุณหภูมิอากาศได้สูงกว่าอากาศแวดล้อมประมาณ 18-25 °C ความชื้นสัมพัทธ์ภายในเครื่องอบแห้งต่ำกว่าความชื้นสัมพัทธ์แวดล้อม เนื่องจากอุณหภูมิอากาศภายในเครื่องอบแห้งสูงกว่าอุณหภูมิอากาศแวดล้อม ความเข้มรังสีอาทิตย์สูงสุดมีค่าประมาณ 925 w m⁻² เวลา 12:00 น. ในวันที่ 1 ของการทดลอง

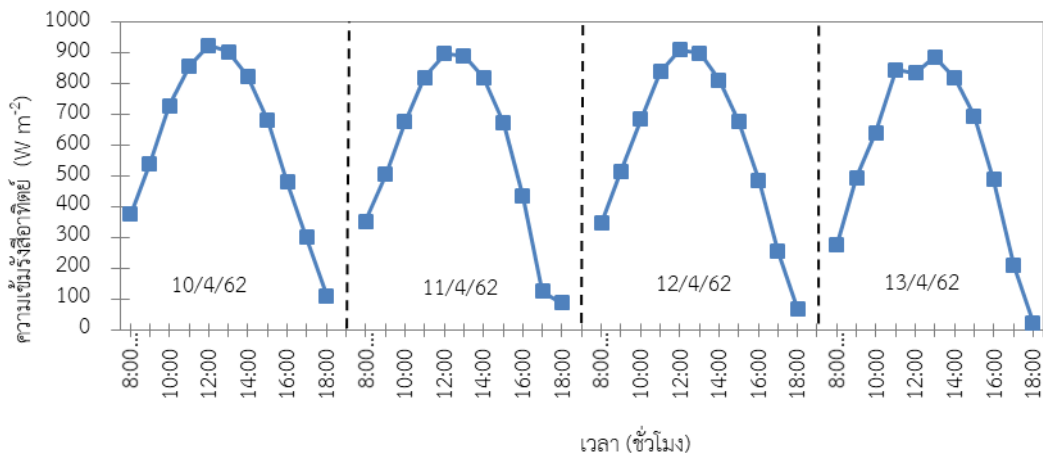
ความชื้นเริ่มต้นของกล้วยน้ำว้ามีค่าประมาณ 67% w.b. จากนั้นค่อย ๆ ลดลงดังรูปที่ 77 โดยใช้เวลาอบกล้วยน้ำว้าทั้งหมด 4 วัน ความชื้นของกล้วยน้ำว้าในเครื่องอบแห้งเหลืออยู่ประมาณ 15% w.b. ในขณะที่กล้วยน้ำว้าตากแดดต้องใช้เวลาตากแดด 7 วัน จึงจะเหลือความชื้นเท่ากัน (15% w.b.) และหลังจากการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งได้กล้วยอบแห้ง 1.5 kg



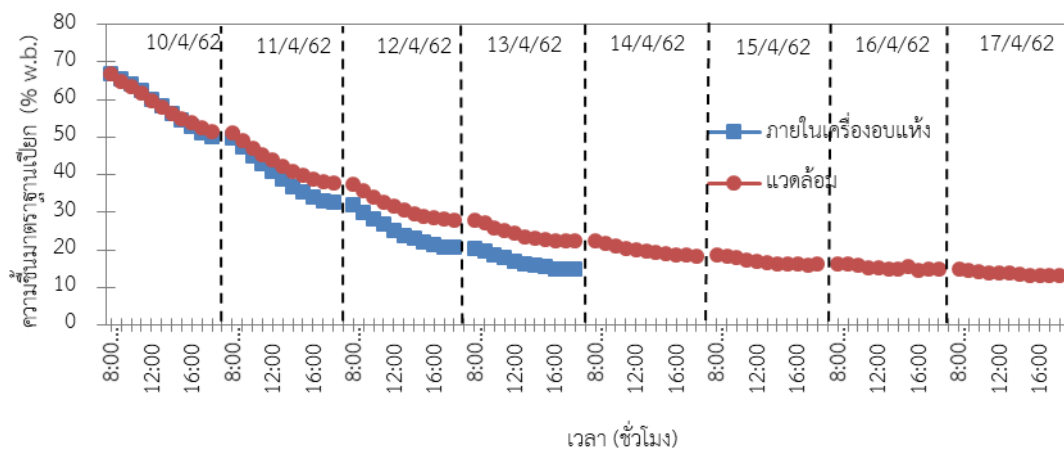
รูปที่ 76 อุณหภูมิของอากาศภายในเครื่องอบแห้งและอากาศแวดล้อม ของการทดลองที่ 3



รูปที่ 77 ความชื้นสัมพัทธ์อากาศภายในเครื่องอบแห้งและอากาศแวดล้อม ของการทดลองที่ 3



รูปที่ 78 ความเข้มรังสีอาทิตย์ระหว่างการทดลองที่ 3



รูปที่ 79 กราฟการแห้งของกล้วยน้ำว้าอบแห้งในเครื่องอบแห้งที่ใช้พลังงานแสงอาทิตย์ และกล้วยน้ำว้าตากแดดตามธรรมชาติ ของการทดลองที่ 3

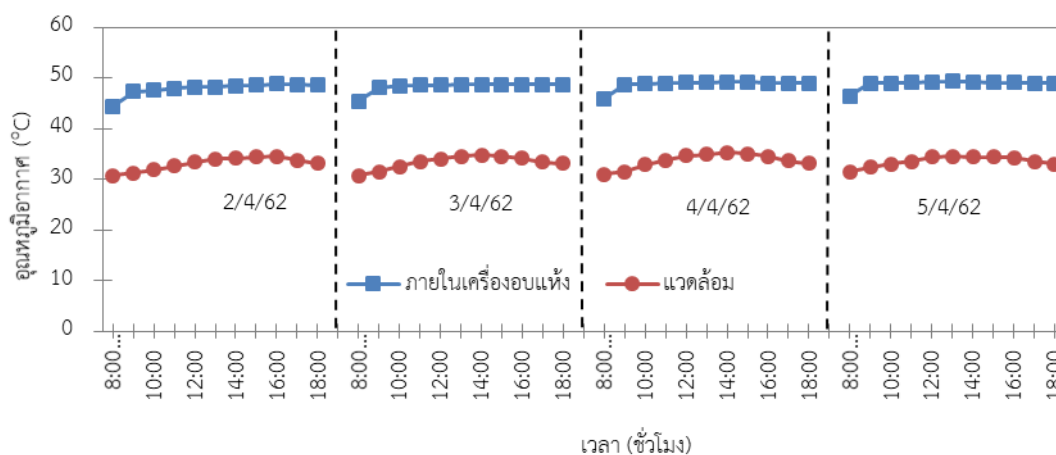
3.3.2 ผลการทดลองอบแห้งกล้วยน้ำว้าด้วยพลังงานไฟฟ้า

การทดลองในส่วนนี้จะทำการทดลองโดยควบคุมอุณหภูมิของเครื่องอบแห้งไว้ที่ 50 °C เนื่องจากเป็นอุณหภูมิที่เหมาะสมต่อการอบแห้งกล้วยน้ำว้า ใช้กล้วยน้ำว้าที่ปอกเปลือกแล้วจำนวน 4 kg เพื่อเป็นผลิตภัณฑ์ในการอบแห้ง ช่วงเวลาที่ใช้ในการอบแห้งคือ 8:00-18:00 น. ของทุกวันที่ทำการทดลอง โดยผู้วิจัยได้ทำการทดลองทั้งหมด 3 ครั้ง ในช่วงเวลาต่อไปนี้

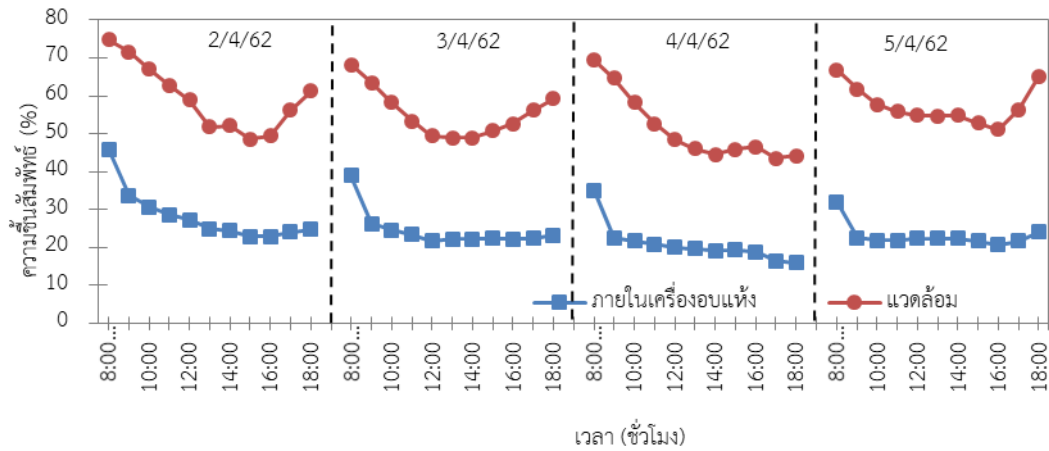
- การทดลองครั้งที่ 4: ระหว่างวันที่ 2-5 เมษายน 2562
- การทดลองครั้งที่ 5: ระหว่างวันที่ 14-17 เมษายน 2562
- การทดลองครั้งที่ 6: ระหว่างวันที่ 18-21 เมษายน 2562

จากการทดลองในครั้งที่ 4 พบว่า อุณหภูมิอากาศเฉลี่ยรายชั่วโมงภายในเครื่องอบแห้งมีค่าประมาณ 48 °C ในขณะที่อุณหภูมิอากาศแวดล้อมเฉลี่ยมีค่าประมาณ 33 °C ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศภายในเครื่องอบแห้งต่ำกว่าความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศแวดล้อม ในการทดลองวันแรกเวลา 8:00-12:00 น. ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศภายในเครื่องอบแห้งจะมีค่าสูงมากกว่าวันอื่น ๆ โดยมีค่าประมาณ 45-28% เนื่องจากในวันแรกกล้วยน้ำว้าสูญเสียน้ำจากการระเหยน้ำอิสระมากทำให้ความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศสูง ส่วนการทดลองในวันที่ 3-4 ความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศจะมีค่าประมาณ 18-22% และมีค่าค่อนข้างคงที่ เนื่องจากอุณหภูมิอากาศภายในเครื่องอบแห้งถูกควบคุมให้คงที่ ซึ่งต่างจากความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศแวดล้อมที่มีค่าสูงในช่วงเช้าและเย็น และมีค่าต่ำลงเล็กน้อยในช่วงกลางวัน โดยมีค่าสูงสุด, ต่ำสุด และค่าเฉลี่ย ประมาณ 75%, 43%, 56% ตามลำดับ

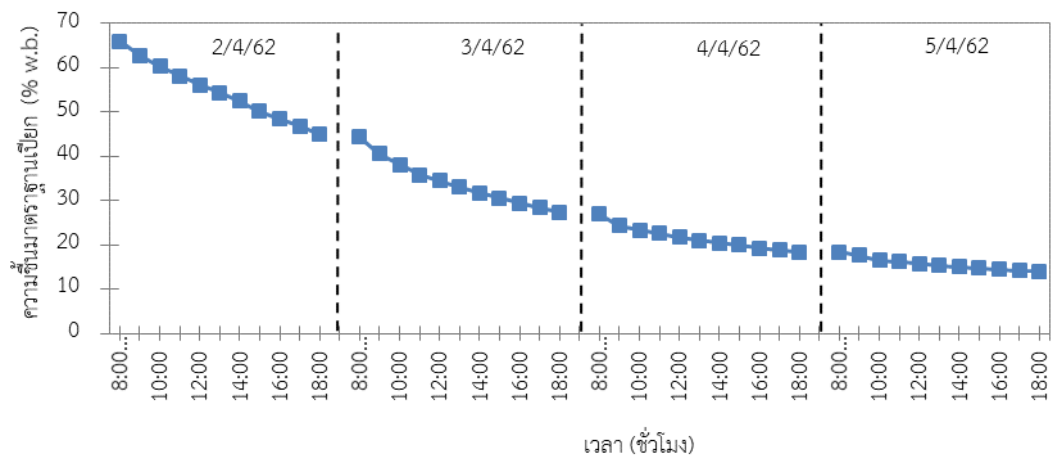
ความชื้นเริ่มต้นของกล้วยน้ำว้าอยู่ที่ประมาณ 66% w.b. จากนั้นค่อย ๆ ลดลงดังรูปที่ 81 โดยจะใช้เวลาอบกล้วยน้ำว้าทั้งหมด 4 วัน จนกล้วยน้ำว้าเหลือความชื้นสุดท้ายเท่ากับ 14% w.b. หลังจากการทดลองได้กล้วยอบแห้ง 1.6 kg



รูปที่ 80 อุณหภูมิของอากาศภายในเครื่องอบแห้งและอากาศแวดล้อม ของการทดลองที่ 4



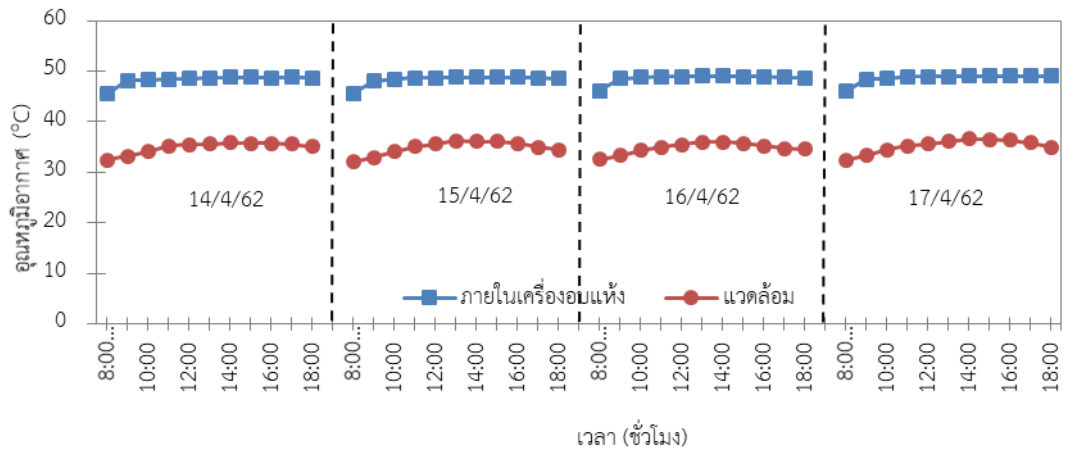
รูปที่ 81 ความชื้นสัมพัทธ์อากาศภายในเครื่องอบแห้งและอากาศแวดล้อม ของการทดลองที่ 4



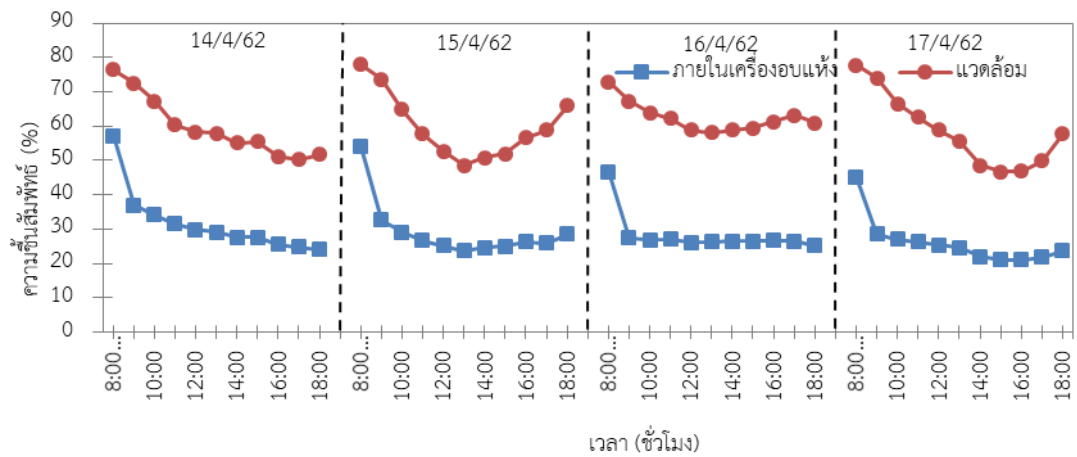
รูปที่ 82 กราฟการแห้งของกล้วยน้ำว้าอบแห้งในเครื่องอบแห้งที่ใช้พลังงานไฟฟ้า การทดลองที่ 4

ผลการทดลองที่ 5 พบว่า อุณหภูมิอากาศเฉลี่ยรายชั่วโมงภายในเครื่องอบแห้งมีค่าประมาณ 48.5 °C ในขณะที่อุณหภูมิอากาศแวดล้อมเฉลี่ยมีค่าประมาณ 35 °C ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศภายในเครื่องอบแห้งต่ำกว่าความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศแวดล้อม จากรูปที่ 84 ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศภายในเครื่องอบแห้งค่อนข้างคงที่มากกว่าความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศแวดล้อม ซึ่งมีค่าประมาณ 21-27% เนื่องจากอุณหภูมิอากาศภายในเครื่องอบแห้งถูกควบคุมให้คงที่ ซึ่งต่างจากความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศแวดล้อมที่มีค่าสูงในช่วงเช้าและเย็น และมีค่าต่ำลงเล็กน้อยในช่วงกลางวัน โดยมีค่าสูงสุด, ต่ำสุด และค่าเฉลี่ย ประมาณ 57%, 21%, 28% ตามลำดับ

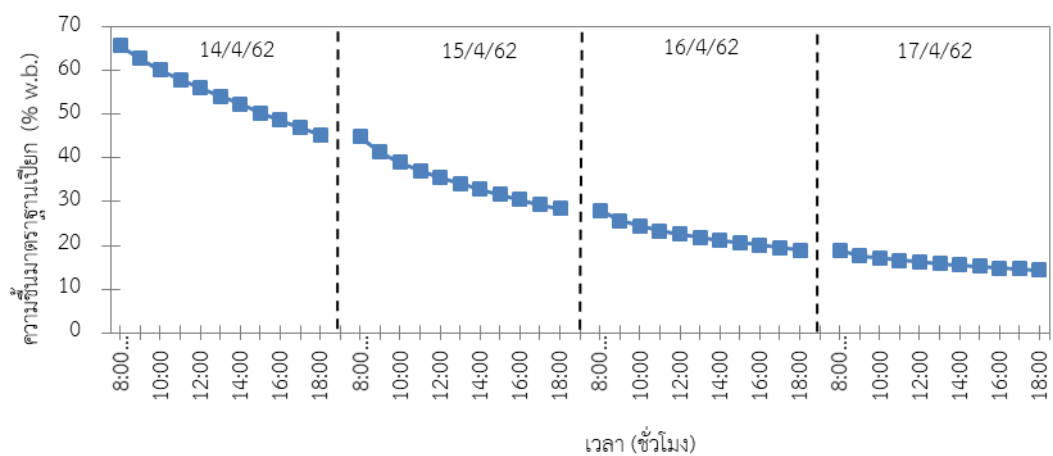
ความชื้นเริ่มต้นของกล้วยน้ำว้ามีค่าประมาณ 66% w.b. จากนั้นค่อย ๆ ลดลงดังรูปที่ 85 โดยใช้เวลาอบกล้วยน้ำว้าทั้งหมด 4 วัน จนกล้วยน้ำว้ามีความชื้นสุดท้ายเท่ากับ 14% w.b. หลังจากการทดลองได้กล้วยอบแห้ง 1.7 kg



รูปที่ 83 อุณหภูมิของอากาศภายในเครื่องอบแห้งและอากาศแวดล้อม ของการทดลองที่ 5



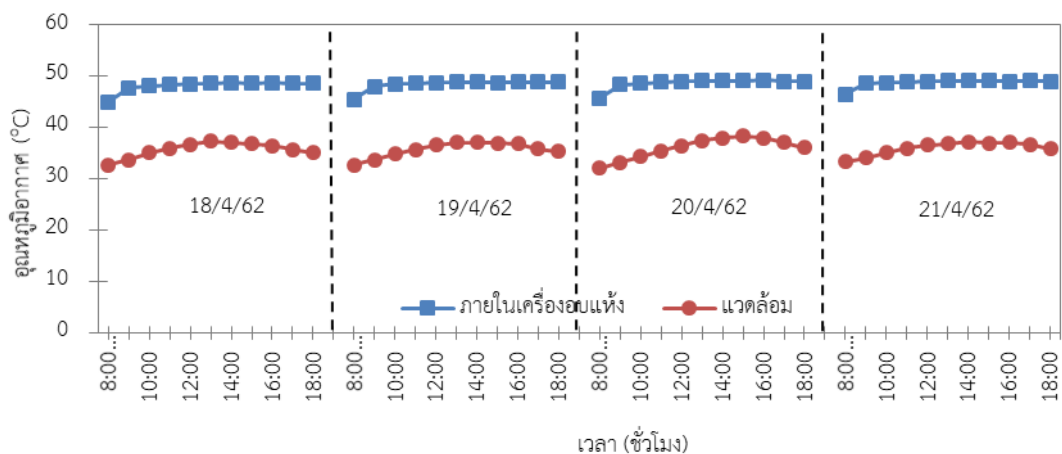
รูปที่ 84 ความชื้นสัมพัทธ์อากาศภายในเครื่องอบแห้งและอากาศแวดล้อม ของการทดลองที่ 5



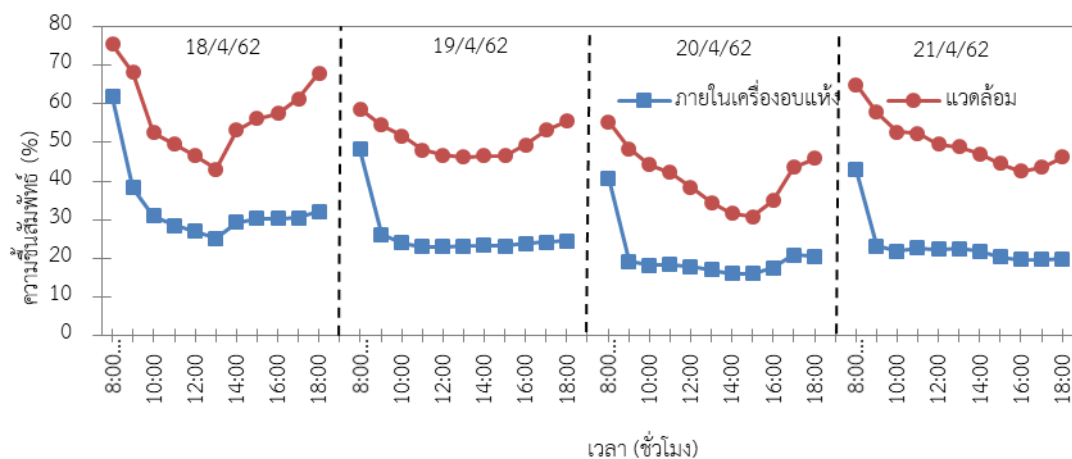
รูปที่ 85 กราฟการแห้งของกล้วยน้ำว้าอบแห้งในเครื่องอบแห้งที่ใช้พลังงานไฟฟ้าของการทดลองที่ 5

จากการทดลองที่ 6 พบว่า อุณหภูมิอากาศเฉลี่ยรายชั่วโมงภายในเครื่องอบแห้งมีค่าประมาณ 48.5 °C ในขณะที่อุณหภูมิอากาศแวดล้อมเฉลี่ยมีค่าประมาณ 36 °C ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศภายในเครื่องอบแห้งต่ำกว่าความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศแวดล้อม ในการทดลองวันแรก ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศภายในเครื่องอบแห้งจะมีค่าสูงมากกว่าวันอื่น ๆ เนื่องจากในวันแรกกล้วยน้ำว้าสูญเสียน้ำจากการระเหยน้ำอิสระมาก ความชื้นจากกล้วยจึงถูกถ่ายเทไปยังอากาศที่ไหลผ่าน ทำให้ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศมีค่าสูง ส่วนการทดลองในวันที่ 3-4 ความชื้นสัมพัทธ์มีค่าประมาณ 19-23% และมีค่าค่อนข้างคงที่ เนื่องจากอุณหภูมิอากาศภายในเครื่องอบแห้งถูกควบคุมให้คงที่ ซึ่งต่างจากความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศแวดล้อมที่มีค่าสูงในช่วงเช้าและเย็น และ มีค่าต่ำลงเล็กน้อยในช่วงกลางวัน โดยมีค่าสูงสุด, ต่ำสุด และค่าเฉลี่ย ประมาณ 62%, 16%, 26% ตามลำดับ

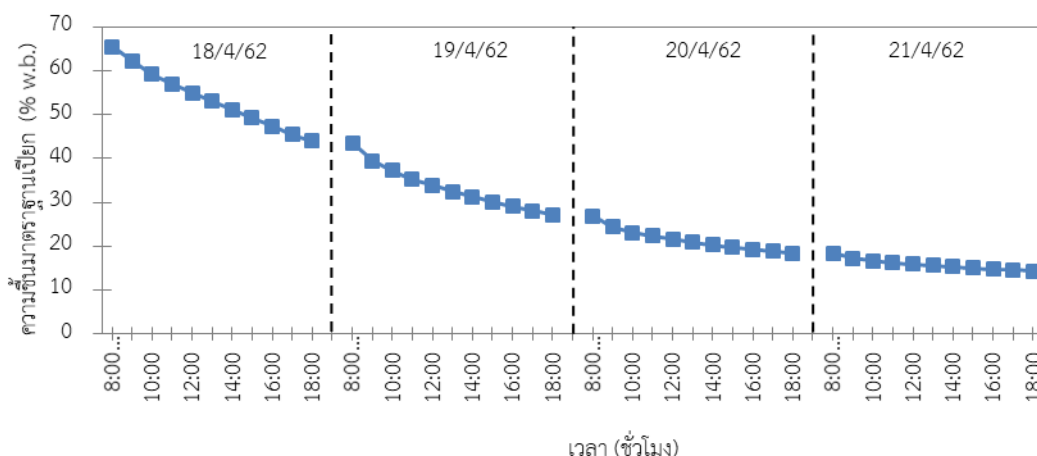
ความชื้นเริ่มต้นของกล้วยน้ำว้ามีค่าประมาณ 65.5% w.b. จากนั้นค่อย ๆ ลดลงดังรูปที่ 88 โดยใช้เวลาอบกล้วยน้ำว้าทั้งหมด 4 วัน จนกล้วยน้ำว้ามีความชื้นสุดท้ายเท่ากับ 14% w.b. หลังจาการทดลองได้กล้วยอบแห้ง 1.6 kg



รูปที่ 86 อุณหภูมิของอากาศภายในเครื่องอบแห้งและอากาศแวดล้อม ของการทดลองที่ 6



รูปที่ 87 ความชื้นสัมพัทธ์อากาศภายในเครื่องอบแห้งและอากาศแวดล้อม ของการทดลองที่ 6



รูปที่ 88 กราฟการแห้งของกล้วยน้ำว้าอบแห้งในเครื่องอบแห้งที่ใช้พลังงานไฟฟ้าของการทดลองที่ 6

ผลการวัดค่าสีและค่าแอกติวิตีของน้ำ หลังจากการทดลองอบแห้งกล้วยน้ำว้าด้วยพลังงานแสงอาทิตย์, พลังงานไฟฟ้า และการตากแดดตามธรรมชาติ ผู้วิจัยได้ทำการวัดค่าสีและวัดค่าแอกติวิตีของน้ำ โดยแสดงผลการวัดเป็นค่าเฉลี่ยดัง ตารางที่ 5

ตารางที่ 5 ค่าสีและค่าแอกติวิตีของน้ำเฉลี่ยของกล้วยน้ำว้าหลังการอบแห้ง

วิธีการอบแห้ง	L*	a*	b*	a _w
เครื่องอบแห้งใช้พลังงานแสงอาทิตย์	33.94	13.55	19.04	0.577
เครื่องอบแห้งใช้พลังงานไฟฟ้า	37.65	9.29	22.49	0.602
ตากแดดตามธรรมชาติ	37.59	9.31	22.93	0.586

จากตารางที่ 4 ค่าสีของกล้วยอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งที่ใช้พลังงานไฟฟ้ามีค่าสีใกล้เคียงกับกล้วยที่ได้จากการตากแดดตามธรรมชาติ แต่กล้วยอบแห้งที่ใช้พลังงานแสงอาทิตย์จะมีค่าสีต่างออกไป จากตัวเลขในตารางสามารถบอกได้ว่ากล้วยอบแห้งที่ใช้พลังงานแสงอาทิตย์จะมีค่าสีต่ำและแดงที่มากกว่า และเหลืองน้อยกว่ากล้วยที่อบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งที่ใช้พลังงานไฟฟ้าและกล้วยที่ตากแดดตามธรรมชาติ

จากค่าแอกติวิตีของน้ำ ที่แสดงในตารางที่ 1 พบว่ามีค่าต่ำกว่า 0.6 ซึ่งเป็นค่ามาตรฐานของผลิตภัณฑ์ที่แห้งแล้วและไม่มีการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ที่จะทำให้เกิดการเน่าเสียของผลิตภัณฑ์

3.4 แบบจำลอง (autoregressive model with exogenous variable, ARX)

แบบจำลองการแห้งของกล้วยน้ำว้าถือเป็นเครื่องมือที่ช่วยในการทำนายพฤติกรรมการแห้งของกล้วยน้ำว้า ที่จะช่วยให้ทราบความชื้นของกล้วยน้ำว้าในระหว่างกระบวนการอบแห้ง โดยที่ไม่ต้องทำการชั่งตัวอย่างกล้วย และจะเป็นประโยชน์ต่อการทดลองอบแห้งในครั้งต่อไป ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้สร้างแบบจำลอง ARX เพื่อจำลองการแห้งของกล้วยน้ำว้า ซึ่งแบบจำลอง ARX ไม่จำเป็นต้องใช้สมการที่ยุ่งยาก และใช้เวลาไม่นานในการสร้างแบบจำลอง โดยรายละเอียดการสร้างแบบจำลองและผลของแบบจำลองได้อธิบายไว้ในหัวข้อนี้

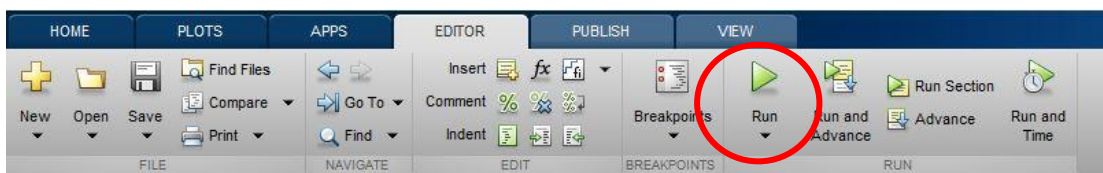
3.4.1 ขั้นตอนการสร้างแบบจำลอง

ผู้วิจัยได้ใช้โปรแกรม MATLAB ในการทำแบบจำลอง และใช้คอมพิวเตอร์ ที่มีหน่วยประมวลผล Intel(R) Core(TM) i5-6400 2.70GHz, แรม 4.00 GB, ระบบปฏิบัติการ Windows 10 64-bit โดยมีขั้นตอนการสร้างแบบจำลองดังนี้

1) จัดเตรียมข้อมูลอินพุตและเอาต์พุตให้มีช่วงเวลาตรงกัน (time domain ตรงกัน) และกำหนดข้อมูลเอาต์พุตคือความชื้นของกล้วยน้ำว้า ส่วนข้อมูลอินพุตผู้วิจัยได้เลือกใช้ อุณหภูมิอากาศภายในเครื่องอบแห้งเป็นอินพุตที่ 1 อุณหภูมิอากาศแวดล้อมเป็นอินพุตที่ 2 ความชื้นสัมพัทธ์อากาศแวดล้อมเป็นอินพุตที่ 3 และใช้ความเข้มรังสีอาทิตย์เป็นอินพุตที่ 4

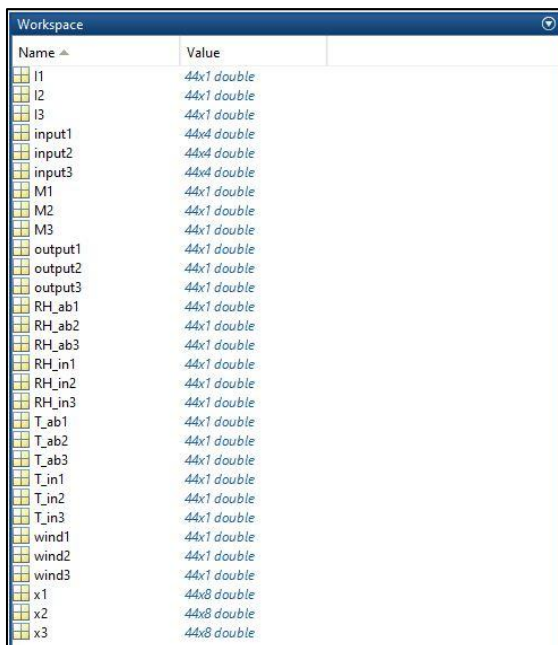
2) แบ่งข้อมูลออกเป็น 2 กลุ่ม ได้แก่ กลุ่มข้อมูลสำหรับสร้างแบบจำลอง (เลือกใช้ข้อมูลการทดลองที่ 2 กับ 3) และกลุ่มข้อมูลสำหรับตรวจสอบแบบจำลอง (เลือกใช้ข้อมูลการทดลองที่ 1)

3) เขียนโค้ดเพื่อจัดเก็บข้อมูลอินพุตและเอาต์พุตของแต่ละการทดลองไว้ในตัวแปรภายในโปรแกรม MATLAB จากนั้นรันโปรแกรม โดยใช้ปุ่มคำสั่ง Run ในเมนู EDITOR (โค้ดแสดงไว้ในภาคผนวก)



รูปที่ 89 การรันโปรแกรมเพื่อจัดเก็บข้อมูลอินพุตและเอาต์พุตไว้ในตัวแปร

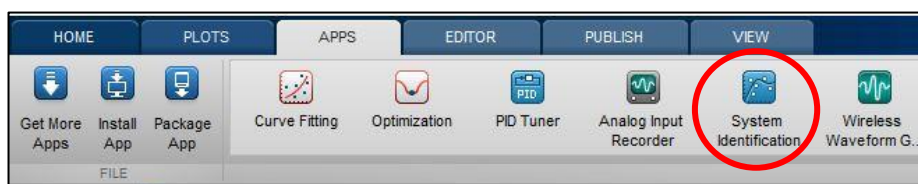
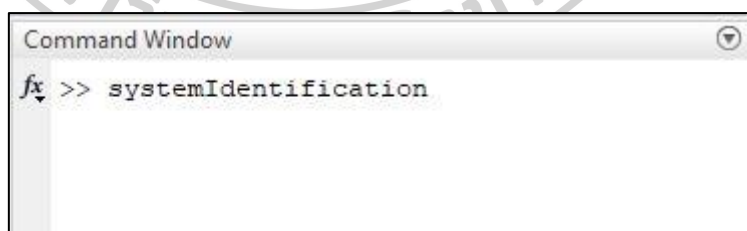
เมื่อเก็บข้อมูลอินพุตและเอาต์พุตไว้ในตัวแปรเรียบร้อยแล้ว จะปรากฏรายชื่อตัวแปรที่ได้สร้างไว้ในหน้าต่าง Workspace



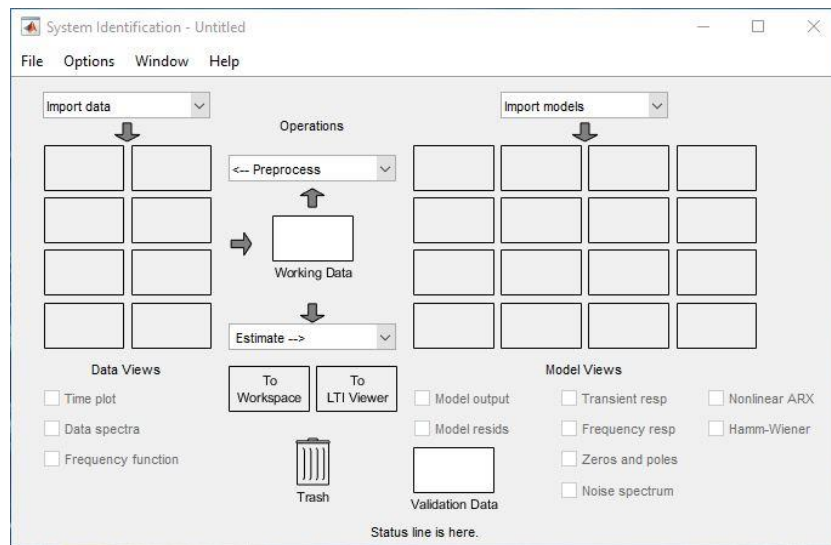
Name	Value
I1	44x1 double
I2	44x1 double
I3	44x1 double
input1	44x4 double
input2	44x4 double
input3	44x4 double
M1	44x1 double
M2	44x1 double
M3	44x1 double
output1	44x1 double
output2	44x1 double
output3	44x1 double
RH_ab1	44x1 double
RH_ab2	44x1 double
RH_ab3	44x1 double
RH_in1	44x1 double
RH_in2	44x1 double
RH_in3	44x1 double
T_ab1	44x1 double
T_ab2	44x1 double
T_ab3	44x1 double
T_in1	44x1 double
T_in2	44x1 double
T_in3	44x1 double
wind1	44x1 double
wind2	44x1 double
wind3	44x1 double
x1	44x8 double
x2	44x8 double
x3	44x8 double

รูปที่ 90 รายชื่อตัวแปรในหน้าต่าง Workspace

4) เรียกใช้งานกล่องเครื่องมือสร้างแบบจำลอง (System Identification Toolbox) ทำได้ 2 วิธี วิธีที่ 1 โดยการพิมพ์ `systemIdentification` ลงใน Command Window ของโปรแกรม MATLAB หรือ วิธีที่ 2 เรียกใช้งานได้จากเมนู APPS เมื่อเรียกใช้งานสำเร็จจะปรากฏหน้าต่าง System Identification ดังรูปที่ 92

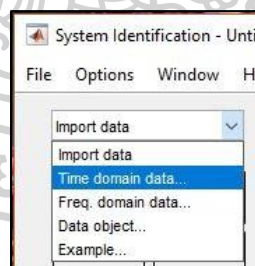


รูปที่ 91 การเรียกใช้งานกล่องเครื่องมือสร้างแบบจำลองโดยวิธีที่ 1 (บน) หรือ วิธีที่ 2 (ล่าง)

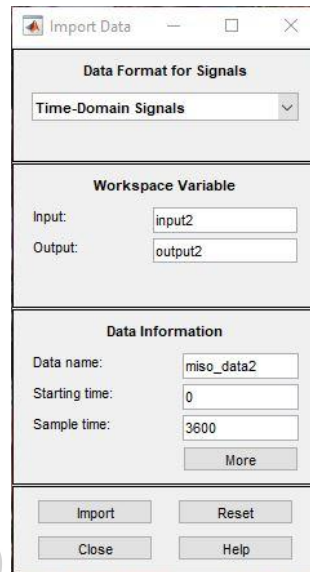


รูปที่ 92 หน้าต่าง System Identification

5) ป้อนข้อมูลลงในกล่องเครื่องมือสร้างแบบจำลอง โดยคลิกที่กล่อง Import data แล้วเลือก Time domain data ตามรูปที่ 93 จากนั้นจะปรากฏหน้าต่าง Import data ให้กรอกชื่อตัวแปรอินพุตและเอาต์พุตของแต่ละการทดลองที่ได้จัดเก็บไว้ จากข้อ 3) โดยผู้วิจัยใช้ชื่อ input2 เป็นตัวแปรอินพุตและใช้ชื่อ output2 เป็นเอาต์พุตของการทดลองที่ 2 พร้อมกับตั้งชื่อ miso_data2 เป็นชื่อของชุดข้อมูล จากนั้นกำหนดให้ Start time เป็น 0 และ Sample time เป็น 3600 หน่วยเป็นวินาที คือ 1 ชั่วโมง จากนั้นกดปุ่ม Import ตามรูปที่ 94

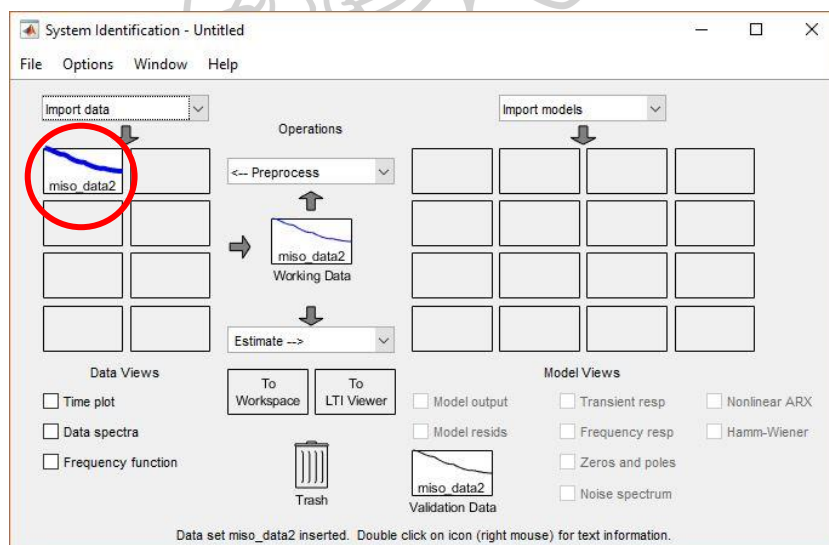


รูปที่ 93 กล่อง Import data



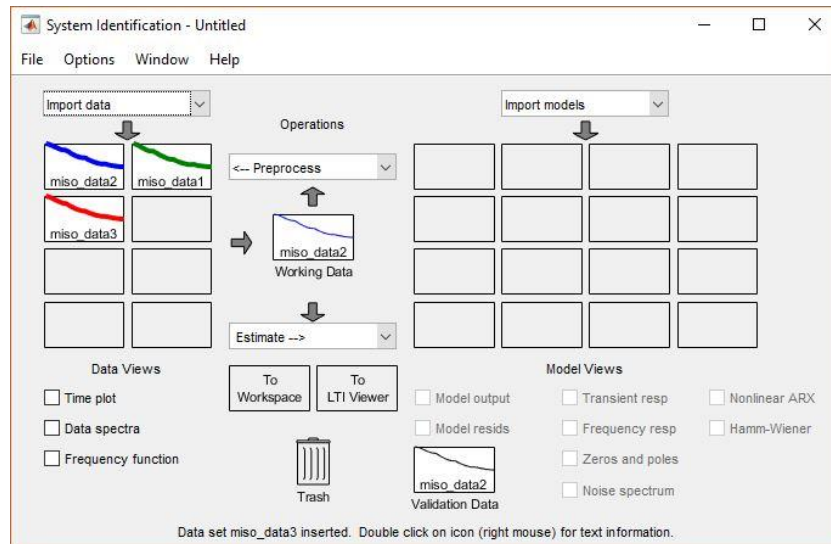
รูปที่ 94 หน้าต่าง Import data และการป้อนข้อมูล

เมื่อย้อนกลับไปดูที่หน้าต่าง System Identification จะปรากฏสัญลักษณ์ของชุดข้อมูล miso_data2 ตามรูปที่ 95



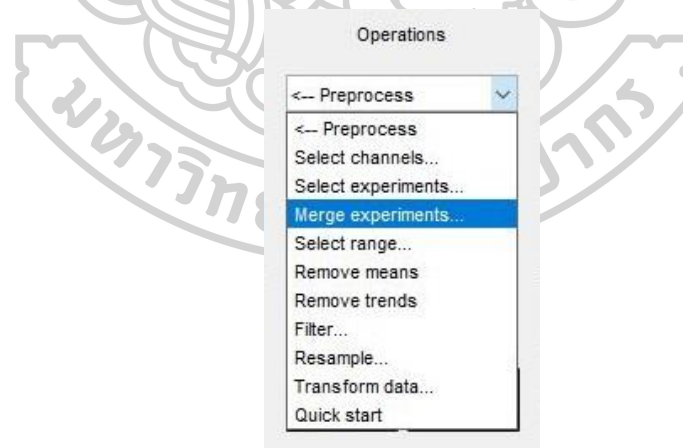
รูปที่ 95 ชุดข้อมูล miso_data2 ในหน้าต่าง System Identification

จากนั้นทำการป้อนข้อมูลลงในกล่องเครื่องมือสร้างแบบจำลองให้ครบทั้ง 3 การทดลอง จะได้นหน้าต่าง System Identification ที่ปรากฏสัญลักษณ์ของชุดข้อมูลทั้ง 3 การทดลอง ตามรูปที่ 96 แล้วจึงปิดหน้าต่าง Import data



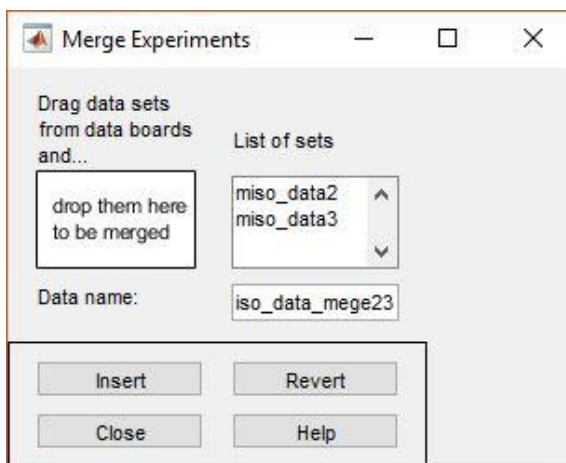
รูปที่ 96 ชุดข้อมูลทั้ง 3 การทดลอง ในหน้าต่าง System Identification

6) ทำการรวมชุดข้อมูลการทดลองที่ 2 และ 3 เข้าด้วยกัน เพื่อเตรียมเป็นข้อมูลสำหรับสร้างแบบจำลอง โดยคลิกเลือกที่กล่อง Preprocess แล้วเลือก Merge experiments ตามรูปที่ 97

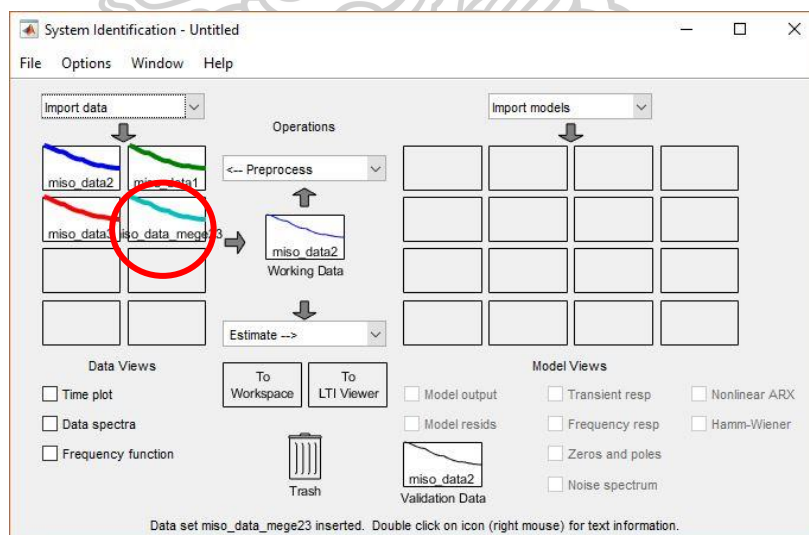


รูปที่ 97 กล่อง Preprocess

จากนั้นจะปรากฏหน้าต่าง Merge experiments แล้วลากสัญลักษณ์ของชุดข้อมูล 2 และ 3 มาวางในกรอบ “drop them here to be merged” เมื่อวางเสร็จแล้ว ช่อง List of sets จะปรากฏชื่อของชุดข้อมูลทั้งสองชุด แล้วทำการตั้งชื่อชุดข้อมูลใหม่เป็น miso_data_merge23 จากนั้นกดปุ่ม Insert (รูปที่ 98) ชุดข้อมูล miso_data_merge23 จะปรากฏอยู่ที่หน้าต่าง System Identification (รูปที่ 99)

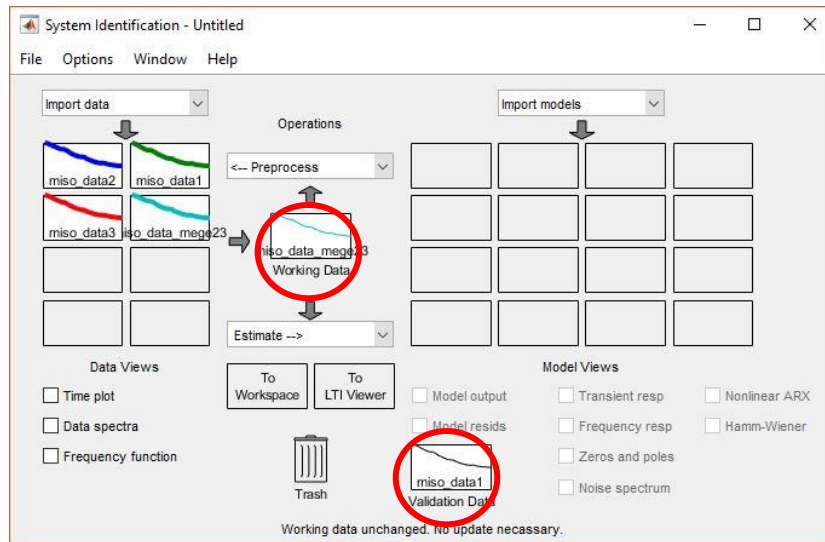


รูปที่ 98 หน้าต่าง Merge experiments ที่ลากข้อมูลมาใส่แล้ว



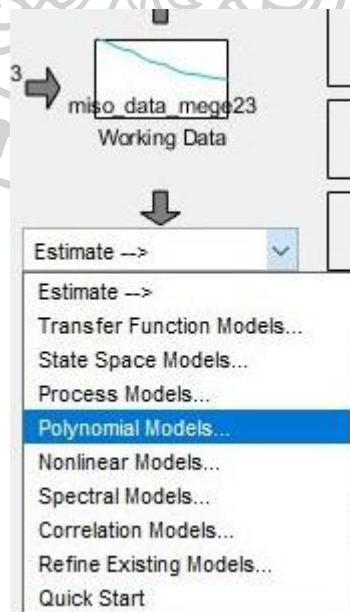
รูปที่ 99 หน้าต่าง System Identification ที่มีชุดข้อมูล miso_data_merge23

7) สร้างแบบจำลองจากชุดข้อมูล miso_data_merge23 โดยการลากสัญลักษณ์ของชุดข้อมูล miso_data_merge23 ลงในช่อง Working Data และลากข้อมูลของการทดลองที่ 1 คือ miso_data1 ลงในช่อง Validation Data เพื่อใช้ตรวจสอบแบบจำลอง ตามรูปที่ 100

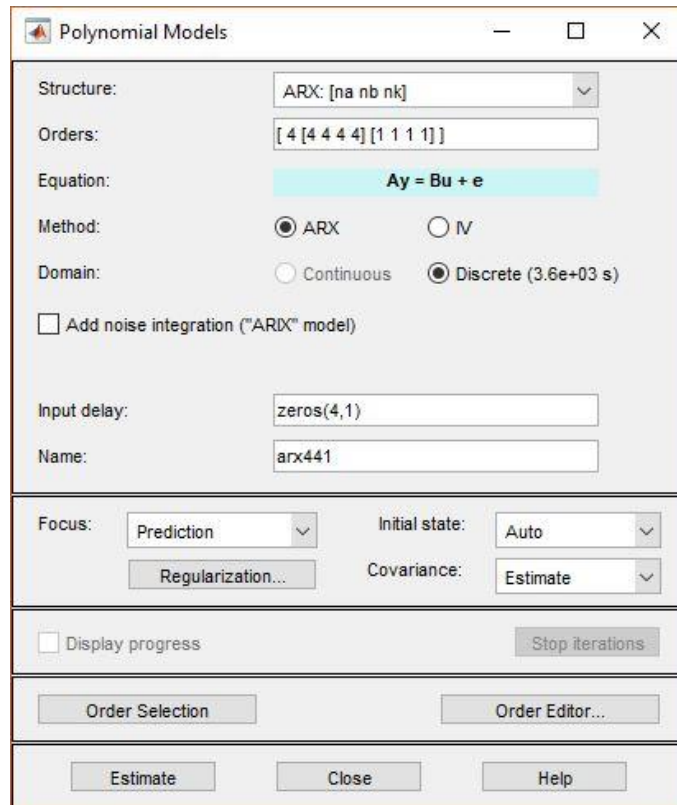


รูปที่ 100 หน้าต่าง System Identification เมื่อลากชุดข้อมูลเตรียมพร้อมสำหรับ สร้างและตรวจสอบแบบจำลอง

8) สร้างแบบจำลองโดยคลิกที่กล่อง Estimate แล้วเลือก Polynomial Models ตามรูปที่ 101 จะปรากฏหน้าต่าง Polynomial Models ดังรูปที่ 102



รูปที่ 101 กล่อง Estimate



รูปที่ 102 หน้าต่าง Polynomial Models

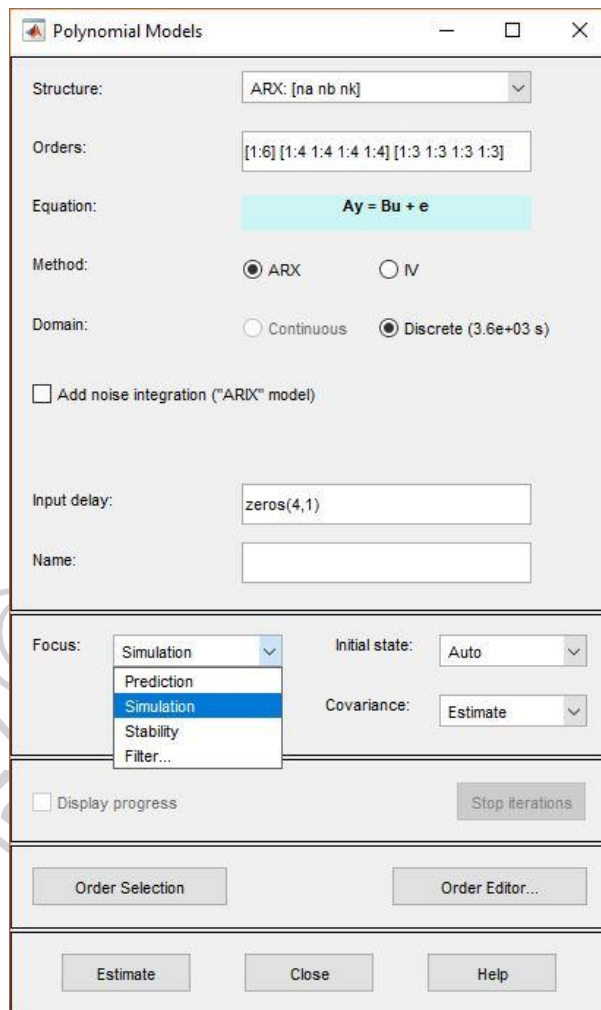
จากนั้นทดลองป้อนค่าเพื่อใช้ค้นหาแบบจำลองลงในช่อง Order (เป็นค่าสำหรับ na nb และ nk) ดังนี้ [1:6] [1:4 1:4 1:4 1:4] [1:3 1:3 1:3 1:3] ซึ่งแต่ละวงเล็บมีความหมายดังนี้

- วงเล็บแรก [1:6] เป็นคำสั่งให้โปรแกรมค้นหาค่าสำหรับ na คือจำนวนเทอมเอาต์พุทในช่วงเวลาที่ผ่านมาแล้ว (ความชื้นของกล้วยน้ำว้า) โดยมีช่วงการค้นหาตั้งแต่ 1 ถึง 6

- วงเล็บที่สอง [1:4 1:4 1:4 1:4] เป็นคำสั่งให้โปรแกรมค้นหาค่าสำหรับ nb คือจำนวนเทอมอินพุทในช่วงเวลาที่ผ่านมาแล้ว ประกอบด้วย อุณหภูมิอากาศภายในเครื่องอบแห้ง อุณหภูมิอากาศแวดล้อม ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศแวดล้อม และความเข้มรังสีอาทิตย์ ตามลำดับ โดยมีช่วงการค้นหาของแต่ละตัวแปรตั้งแต่ 1 ถึง 4

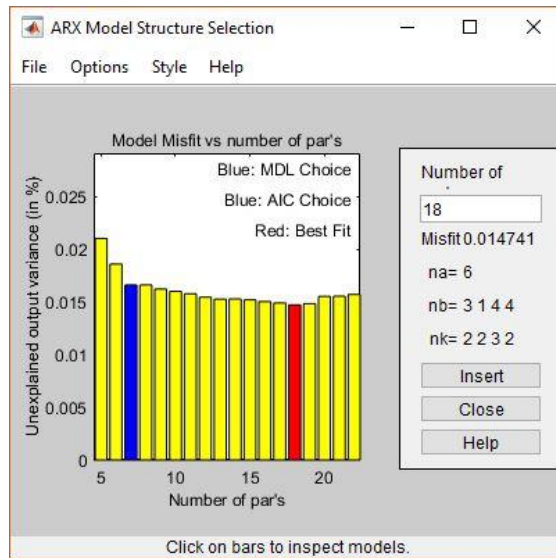
- วงเล็บที่สาม [1:3 1:3 1:3 1:3] เป็นคำสั่งให้โปรแกรมค้นหาค่าสำหรับ nk คือลำดับอินพุทในช่วงเวลาที่ผ่านมาแล้วที่ย้อนกลับไปใกล้ที่สุด ประกอบด้วยอินพุททั้ง 4 ตัวเหมือนกับคำสั่งค้นหาของวงเล็บที่สอง นอกจากนี้จะต้องตั้งค่าที่กล่อง Focus เลือกที่ Simulation จากนั้นกดปุ่ม Estimate (รูปที่ 103)

การสั่งให้โปรแกรมค้นหาค่าต่าง ๆ นั้น สามารถทำได้ไม่เกิน order 10 ซึ่งการสั่งให้โปรแกรมค้นหาด้วยตัวเลขจำนวนมาก ๆ นั้นจำเป็นต้องใช้ทรัพยากรของเครื่องคอมพิวเตอร์มาก ต้องใช้เวลาคำนวณมาก และอาจมีปัญหาในกรณีที่ความจำสำรองของเครื่องคอมพิวเตอร์เต็ม จนทำให้โปรแกรมไม่สามารถทำงานได้เสร็จสิ้น ดังนั้นผู้วิจัยจึงเลือกใช้คำสั่งในข้างต้นซึ่งคาดว่าจะเพียงพอต่อการสร้างแบบจำลองที่แม่นยำ



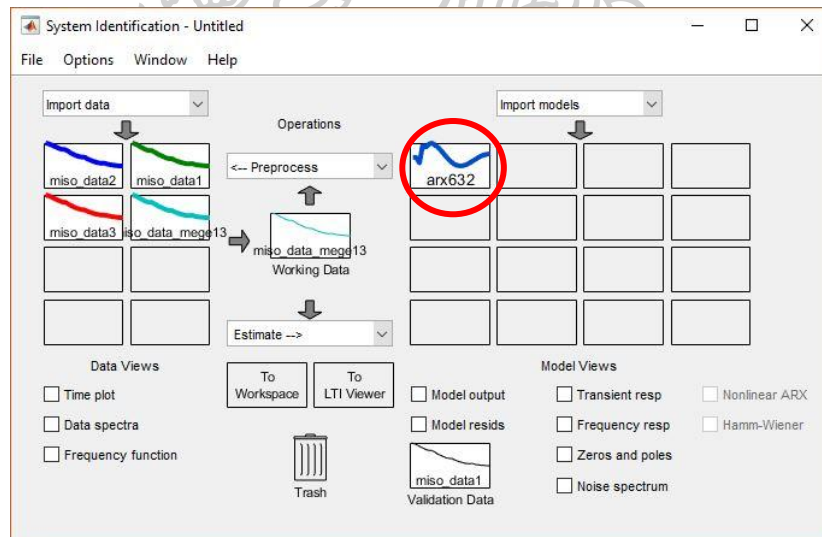
รูปที่ 103 หน้าต่าง Polynomial Models ที่ป้อนค่า Order สำหรับค้นหา na nb และ nk

รอสักครู่ก็จะปรากฏหน้าต่าง ARX Model Structure Selection เพื่อเลือกโครงสร้างของแบบจำลอง โดยหน้าต่างนี้แสดงค่าความแปรปรวนที่ไม่สามารถอธิบายได้ (unexplained variation) และจำนวนเทอมทั้งหมด ($na + nb$) ของแต่ละแบบจำลอง โดยทั่วไปแล้วแบบจำลอง ARX จะมีความแม่นยำสูง เมื่อจำนวนเทอม ($na + nb$) มีจำนวนมาก



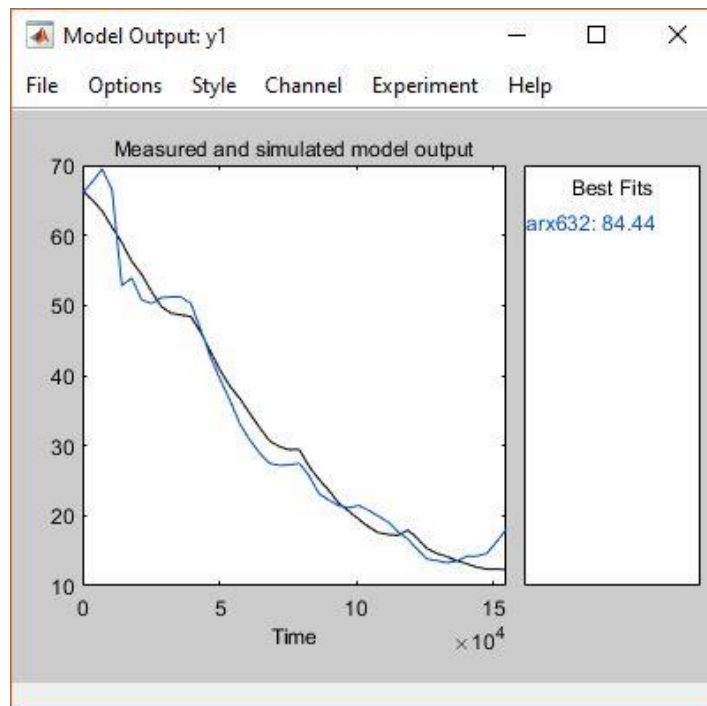
รูปที่ 104 หน้าต่าง ARX Model Structure Selection

เมื่อทำการเลือกแบบจำลองที่ต้องการได้แล้วให้คลิกที่กราฟแท่งของแบบจำลองนั้น แล้วกดปุ่ม Insert โดยสามารถเลือกได้หลายแบบจำลอง จากนั้นย้อนกลับไปหน้าต่าง System Identification จะเห็นสัญลักษณ์ของแบบจำลองในช่อง Model Views ตามรูปที่ 105



รูปที่ 105 หน้าต่าง System Identification ที่ได้เลือกแบบจำลองที่ต้องการแล้ว

9) ตรวจสอบแบบจำลอง โดยการคลิกเลือกที่กล่อง Model output จะปรากฏหน้าต่าง Model Output แสดงกราฟเปรียบเทียบระหว่างความชื้นของกล้วยน้ำว้าจากการทดลองที่ 1 และความชื้นของกล้วยน้ำว้าที่ได้จากแบบจำลองที่เลือกไว้ ตามรูปที่ 106



รูปที่ 106 หน้าต่าง Model Output

หากแบบจำลองที่ได้มีความแม่นยำน้อยก็สามารถใส่เลขที่ช่อง Order เพื่อให้โปรแกรมคำนวณออกมาหลาย ๆ แบบจำลอง หรืออาจทดลองสับเปลี่ยนข้อมูลที่ใช้ตรวจสอบให้ครบทั้ง 3 การทดลอง สุดท้ายแล้วผู้วิจัยจะได้แบบจำลองที่มีความแม่นยำซึ่งจะกล่าวถึงในหัวข้อต่อไป

3.4.2 ผลการจำลอง

จากการสร้างแบบจำลอง ARX ผู้วิจัยได้ใช้แบบจำลองที่มี โครงสร้าง na nb และ nk เป็นดังนี้ [3] $[4 \ 2 \ 1 \ 1]$ $[1 \ 1 \ 1 \ 1]$ และมีรูปแบบสมการดังนี้

$$A(z)y(t) = B(z)u(t) + e(t) \quad (59)$$

$$A(z) = 1 - 2.532z^{-1} + 2.037z^{-2} - 0.5481z^{-3} \quad (60)$$

$$B1(z) = -0.09744z^{-1} + 0.2032z^{-2} - 0.1517z^{-3} + 0.04275z^{-4} \quad (61)$$

$$B2(z) = 0.0378z^{-1} - 0.03613z^{-2} \quad (62)$$

$$B3(z) = -2.166 \times 10^{-5}z^{-1} \quad (63)$$

$$B4(z) = 0.0002811z^{-1} \quad (64)$$

จากสมการที่ 60 ถึง 61 เป็นเทอมของสัมประสิทธิ์ของตัวแปรดังนี้

$A(z)$: สัมประสิทธิ์ของความขึ้นของกล้วยน้ำว้า

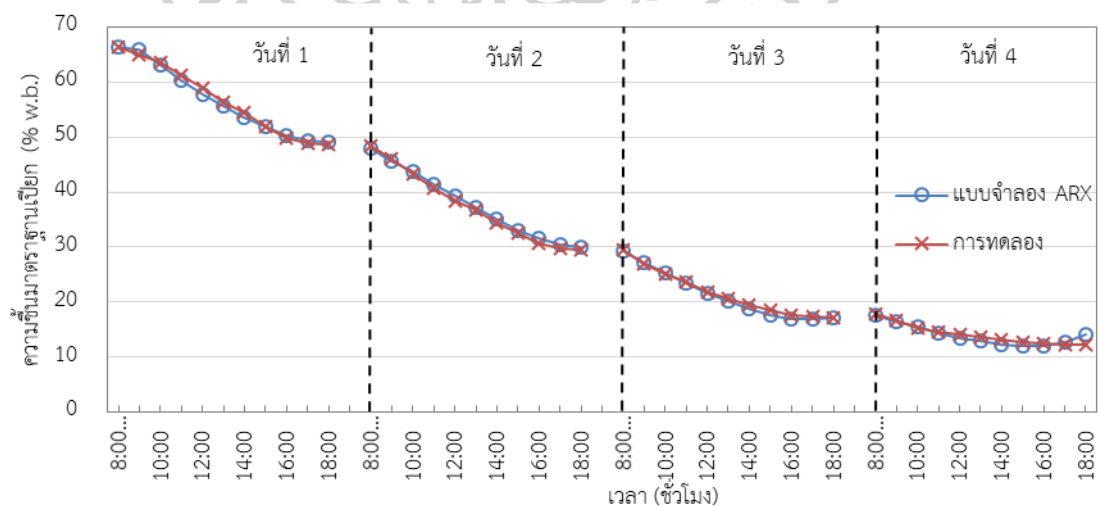
$B1(z)$: สัมประสิทธิ์ของอุณหภูมิอากาศภายในเครื่องอบแห้ง

$B2(z)$: สัมประสิทธิ์ของอุณหภูมิอากาศแวดล้อม

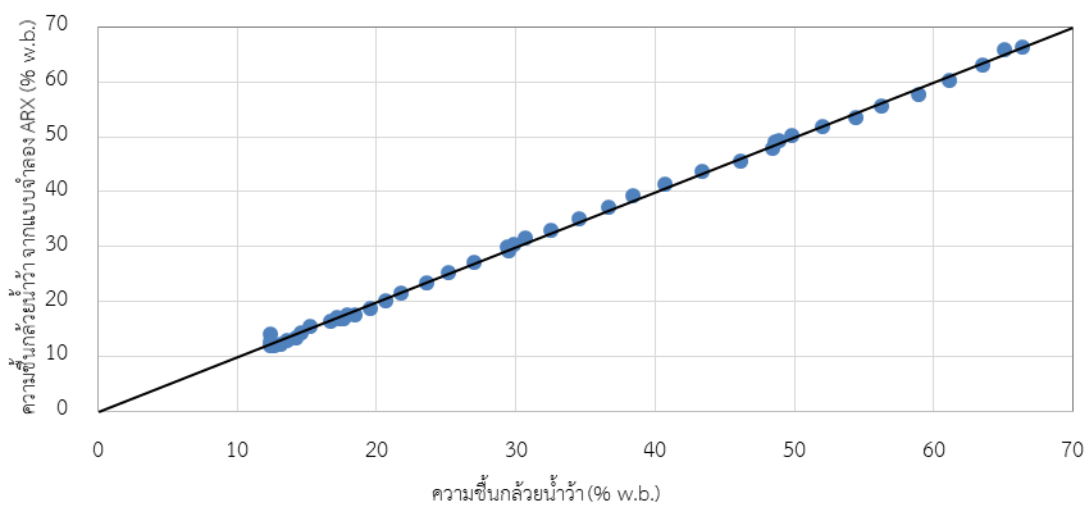
$B3(z)$: สัมประสิทธิ์ของความชื้นสัมพัทธ์แวดล้อม

$B4(z)$: สัมประสิทธิ์ของความเข้มรังสีอาทิตย์

ผลการเปรียบเทียบการแห้งของกล้วยน้ำว้าที่อบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งที่ใช้พลังงานแสงอาทิตย์ (การทดลองที่ 1) กับ ผลการคำนวณจากแบบจำลอง ARX แสดงดังรูปที่ 107



รูปที่ 107 กราฟการแห้งของกล้วยน้ำว้าในเครื่องอบแห้งที่ใช้พลังงานแสงอาทิตย์เทียบกับผลการคำนวณจากแบบจำลอง ARX



รูปที่ 108 กราฟเปรียบเทียบความชื้นของกล้วยน้ำว้าที่อบแห้งด้วยเครื่องกับความชื้นที่คำนวณได้จากแบบจำลอง ARX

เมื่อนำความชื้นของกล้วยน้ำว้าที่อบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งมาเปรียบเทียบกับความชื้นที่คำนวณได้จากแบบจำลอง ARX จะได้ดังรูปที่ 108 จากนั้นผู้วิจัยได้ทำการศึกษาค่าทางสถิติจากแบบจำลองที่ได้ โดยใช้

- R^2 (Coefficient of determination, R squared)

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (M_{i,measure} - M_{i,model})^2}{\sum_{i=1}^N (M_{i,measure} - \bar{M}_{measure})^2} \quad (65)$$

เมื่อ R^2 คือ Coefficient of determination (-)

$M_{i,measure}$ คือ ความชื้นของผลิตภัณฑ์จากการทดลอง (% w.b.)

$\bar{M}_{measure}$ คือ ความชื้นเฉลี่ยของผลิตภัณฑ์จากการทดลอง (% w.b.)

$M_{i,model}$ คือ ความชื้นของผลิตภัณฑ์จากแบบจำลอง (% w.b.)

N คือ จำนวนจุดข้อมูล

- RMSD (Root mean square difference)

$$RMSD = \frac{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (M_{i,model} - M_{i,measure})^2}{N}}}{\frac{\sum_{i=1}^N M_{i,measure}}{N}} \times 100 \quad (66)$$

เมื่อ RMSD คือ Root mean square difference (%)

- MBD (Mean bias difference)

$$\text{MBD} = \frac{\frac{\sum_{i=1}^N (M_{i,\text{model}} - M_{i,\text{measure}})}{N}}{\frac{\sum_{i=1}^N M_{i,\text{measure}}}{N}} \times 100 \quad (67)$$

เมื่อ **RMSD** คือ Mean bias difference (%)

จากการศึกษาพบว่า $R^2 = 0.99$ บ่งบอกว่าค่าความชื้นที่ได้จากการทดลองและจากแบบจำลองมีความสัมพันธ์กันดี และเป็นไปในทิศทางเดียวกัน, $\text{RMSD} = 1.9\%$ บ่งบอกว่าข้อมูลความชื้นจากทั้งสองเกาะกลุ่มกันดี (ใกล้เส้น 1:1) และ $\text{MBD} = -0.2\%$ บ่งบอกว่าความชื้นที่ได้จากการทดลองมีค่ามากกว่าความชื้นที่ได้จากแบบจำลองเล็กน้อย (เอนเอียงไปทางการทดลองเล็กน้อย)



บทที่ 4

สรุป

ในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยได้ออกแบบ สร้าง และทดสอบ เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ขนาดเล็กสำหรับใช้ในครัวเรือน (กว้าง 75 cm, ยาว 120 cm, สูง 130 cm) เครื่องอบแห้งนี้มีรูปทรงครึ่งวงกลม ปิดคลุมด้วยแผ่นโพลีคาร์บอเนตใส ชนิดตัน มีขนาดเล็กเหมาะกับการใช้งานในครัวเรือน โดยสามารถวางผลิตภัณฑ์เพื่อทำการอบแห้งได้ประมาณ 4 kg โดยเครื่องอบแห้งดังกล่าวมีการทำงาน 2 ระบบ คือระบบที่สามารถอบแห้งได้โดยใช้พลังงานจากแสงอาทิตย์และระบบที่สามารถใช้พลังงานจากไฟฟ้าจากภายในครัวเรือนสำหรับใช้อบแห้งในกรณีที่สภาพอากาศไม่ดี เช่น ฝนตก หรือเมฆมาก

ผู้วิจัยดำเนินการทดสอบเครื่องอบแห้งโดยทดลองอบแห้งกล้วยน้ำว้า โดยแบ่งการทดลองออกเป็น 2 แบบ แบบแรก คือ ทดสอบโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์ พร้อมกับทดลองเปรียบเทียบกับกล้วยที่ตากแห้งตามธรรมชาติ แบบที่สอง คือ ทดสอบโดยใช้พลังงานไฟฟ้าและควบคุมอุณหภูมิอากาศภายในเครื่องอบแห้งไว้ที่ 50 °C โดยจะทำการทดลองทั้งหมด 6 การทดลอง แบ่งเป็น การอบแห้งโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์ 3 การทดลอง และการอบแห้งโดยใช้ไฟฟ้า 3 การทดลอง โดยแต่ละการทดลองจะใช้กล้วยน้ำว้าที่ปอกเปลือกแล้วจำนวน 4 kg มาทำการอบแห้ง ผลการทดลองพบว่า เครื่องอบแห้งที่ใช้พลังงานแสงอาทิตย์และพลังงานไฟฟ้าสามารถอบแห้งกล้วยน้ำว้าจากความชื้นเริ่มต้นประมาณ 65-68% w.b. จนมีความชื้นสุดท้ายประมาณ 14-12% w.b. ได้ภายใน 4 วัน ซึ่งเร็วกว่าการตากแห้งตามธรรมชาติประมาณ 3-4 วัน และกล้วยตากแห้งที่ได้ยังมีคุณภาพที่ดีกว่ากล้วยที่ได้จากการตากแห้งตามธรรมชาติ

นอกจากนี้ผู้วิจัยยังได้สร้างแบบจำลอง ARX สำหรับจำลองความชื้นของกล้วยน้ำว้าเพื่อช่วยทำนายพฤติกรรมความชื้นของกล้วยน้ำว้า โดยแบบจำลองนี้จะช่วยให้ทราบความชื้นของกล้วยน้ำว้าในระหว่างกระบวนการอบแห้ง โดยที่ไม่ต้องทำการชั่งตัวอย่างกล้วย และจะเป็นประโยชน์ต่อการทดลองอบแห้งในครั้งต่อไป ผลการศึกษาพบว่า แบบจำลอง ARX ที่สร้างขึ้นสามารถทำนายการลดลงของความชื้นของผลิตภัณฑ์ได้ใกล้เคียงกับพฤติกรรมความชื้นของกล้วยน้ำว้าที่ได้จากการทดลองมาก โดยมีค่าทางสถิติดังนี้ $R^2=0.99$ $RMSD=1.9\%$ และ $MBD=-0.2\%$

ข้อเสนอแนะ เนื่องจากการใช้ไฟฟ้าให้พลังงานความร้อนเสริม ยังไม่ได้ทำการทดลองในช่วงที่สภาพอากาศไม่ดี (ฟ้าครึ้มหรือฝนตก) ทั้งนี้เพราะสภาพอากาศนี้ยังไม่เกิดขึ้นในช่วงทำการวิจัย ดังนั้นจึงเสนอแนะว่า ควรทำการทดลองในสภาพดังกล่าวเพิ่มเติม

รายการอ้างอิง

- Airaksinen, S. (2005). *Role of Excipients in Moisture Sorption and Physical Stability of Solid Pharmaceutical Formulations*: Division of Pharmaceutical Technology Faculty of Pharmacy University of Helsinki Finland.
- Banout, J., Ehl, P., Havlik, J., Lojka, B., Polesny, Z., & Verner, V. (2011). Design and performance evaluation of a Double-pass solar drier for drying of red chilli (*Capsicum annum L.*). *Solar Energy*, 85(3), 506-515.
- Brooker, D. B., Bakker-Arkema, F. W., & Hall, C. W. (1974). *Drying cereal grains*. Westport, Conn.: AVI Pub. Co.
- Deshmukh, A. W., Varma, M. N., Yoo, C. K., & Wasewar, K. L. (2014). Investigation of Solar drying of ginger (*Zingiber officinale*): Empirical modelling, drying characteristics, and quality study. *Chinese Journal of Engineering*, 2014, 1-7.
- El-Sebaei, A., Aboul-Enein, S., Ramadan, M., & El-Gohary, H. (2002). Experimental investigation of an indirect type natural convection solar dryer. *Energy Conversion and management*, 43(16), 2251-2266.
- Emelue, H., Omehe, N., Oghome, P., & Amanze, K. (2015). Design and Construction of Cabinet Solar Dryers. *British Journal of Applied Science & Technology*, 5, 270-284.
- Ghazanfari, A., Tabil, L., & Sokhansanj, S. (2003). Evaluating a Solar Dryer for In-Shell Drying of Split Pistachio Nuts. *Drying Technology*, 21(7), 1357-1368.
- Islam, M., Islam, M. I., Tusar, M., & Limon, A. H. (2019). Effect of cover design on moisture removal rate of a cabinet type solar dryer for food drying application. *Energy Procedia*, 160, 769-776.
- Joshi, S., Thakkar, H., & R. Jani, A. (2014). *A Novel Design Approach of Small Scale Conical Solar Dryer*. Paper presented at the National Conference on Emerging Trends in Engineering and Technology, Shri Umedsingh Bhati College of Engineering and Management, Abu Road, Rajasthan.
- Lawand, T. A. (1966). A solar-cabinet dryer. *Solar Energy*, 10(4), 158-164.

- Maiti, S., Patel, P., Vyas, K., Eswaran, K., & Ghosh, P. K. (2011). Performance evaluation of a small scale indirect solar dryer with static reflectors during non-summer months in the Saurashtra region of western India. *Solar Energy*, 85(11), 2686-2696.
- Mehta, P., Samaddar, S., Patel, P., Markam, B., & Maiti, S. (2018). Design and performance analysis of a mixed mode tent-type solar dryer for fish-drying in coastal areas. *Solar Energy*, 170, 671-681.
- Poblete, R., Cortes, E., Macchiavello, J., & Bakit, J. (2018). Factors influencing solar drying performance of the red algae *Gracilaria chilensis*. *Renewable Energy*, 126, 978-986.
- Salvatierra-Rojas, A., Nagle, M., Gummert, M., de Bruin, T., & Müller, J. (2017). Development of an inflatable solar dryer for improved postharvest handling of paddy rice in humid climates. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 10(3), 269-282.
- Sandali, M., Boubekri, A., Mennouche, D., & Gherraf, N. (2019). Improvement of a direct solar dryer performance using a geothermal water heat exchanger as supplementary energetic supply. An experimental investigation and simulation study. *Renewable Energy*, 135, 186-196.
- Seveda, M. S., & Jhajharia, D. (2012). Design and performance evaluation of solar dryer for drying of large cardamom (*Amomum subulatum*). *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, 4, 1. doi:10.1063/1.4769199
- Tolulope, O., & Mondiu, O. D. (2011). *DESIGN AND CONSTRUCTION OF A SOLAR DRYER: For Drying Fruits and Vegetables*: VDM Verlag Dr. Müller (May 3, 2011).
- สมชาติ โสภณรณฤทธิ์. (2529). การอบแห้งเมล็ดพืชและอาหารบาง โดย ผศ.ดร. สมชาติ โสภณรณฤทธิ์: สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- สั๊กมน เทพหัสดิน ณ อยุธยา. (2555). การอบแห้งอาหารและวัสดุชีวภาพ *Drying of foods and biomaterials*: บริษัท สำนักพิมพ์ท็อป จำกัด.

เสริม จันทร์ฉาย. (2560a). เทคโนโลยีการอบแห้งด้วยพลังงานรังสีอาทิตย์ *Solar drying technology*. บริษัท เพชรเกษมพรีนติ้ง จำกัด หน่วยวิจัยพลังงานแสงอาทิตย์ ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร.

เสริม จันทร์ฉาย. (2560b). รังสีอาทิตย์ (2 ed.). บริษัท เพชรเกษมพรีนติ้ง กรู๊ป จำกัด: หน่วยวิจัยพลังงานแสงอาทิตย์ ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร



ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	ทศพร ชุนแก้ว
วัน เดือน ปี เกิด	27 กันยายน 2536
สถานที่เกิด	เลขที่ 152 หมู่ 8 ตำบลหนองกุ่ม อำเภอบ่อพลอย จังหวัดกาญจนบุรี
วุฒิการศึกษา	ปริญญาตรี มหาวิทยาลัยศิลปากร
ที่อยู่ปัจจุบัน	เลขที่ 152 หมู่ 8 ตำบลหนองกุ่ม อำเภอบ่อพลอย จังหวัดกาญจนบุรี
ผลงานตีพิมพ์	สมรรถนะของเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบกล่องที่ใช้สารเปลี่ยนเฟสสะสมพลังงานความร้อน

