



การพัฒนาระบบควบคุมและแสดงผลผ่านเครือข่ายอินเทอร์เน็ตสำหรับใช้งานในเครื่องอบแห้ง  
พลังงานแสงอาทิตย์แบบเรือนกระจกซึ่งมีหน้าตัดรูปพาราโบลาเพื่ออบแห้งกล้วย



โดย  
นายมงคล สัจจัน

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาฟิสิกส์ แผน ก แบบ ก 2 ระดับปริญญาามหาบัณฑิต

ภาควิชาฟิสิกส์

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

ปีการศึกษา 2564

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยศิลปากร

การพัฒนาระบบควบคุมและแสดงผลผ่านเครือข่ายอินเทอร์เน็ตสำหรับใช้งานในเครื่องอบ  
แห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบเรือนกระจกซึ่งมีหน้าตัดรูปพาราโบล่าเพื่ออบแห้งกล้วย



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาฟิสิกส์ แผน ก แบบ ก 2 ระดับปริญญาามหาบัณฑิต

ภาควิชาฟิสิกส์

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

ปีการศึกษา 2564

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยศิลปากร

DEVELOPMENT OF A CONTROL AND MONITOR SYSTEM VIA THE INTERNET  
FOR A PARABOLIC GREENHOUSE SOLAR DRYER OF BANANA



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for Master of Science (PHYSICS)  
Department of PHYSICS  
Graduate School, Silpakorn University  
Academic Year 2021  
Copyright of Silpakorn University





620720023 : ฟิสิกส์ แผน ก แบบ ก 2 ระดับปริญญาโทบัณฑิต

คำสำคัญ : ระบบควบคุมและแสดงผล, เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบเรือนกระจก, เครื่องช่ายอินเทอร์เน็ท, แบบจำลอง ARX

นาย มงคล สังกสัน: การพัฒนาระบบควบคุมและแสดงผลผ่านเครื่องช่ายอินเทอร์เน็ทสำหรับใช้งานในเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบเรือนกระจกซึ่งมีหน้าตัดรูปพาราโบลาเพื่ออบแห้งกล้วย อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : ศาสตราจารย์ ดร. เสริม จันทร์ฉาย

งานวิจัยนี้ ผู้วิจัยได้ทำการพัฒนาระบบควบคุมและแสดงผลสถานะการอบแห้งผ่านเครื่องช่ายอินเทอร์เน็ทสำหรับใช้งานในเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบเรือนกระจก ระบบดังกล่าวประกอบด้วย ระบบย่อยสำหรับติดตามสถานะการอบแห้ง ระบบย่อยสำหรับควบคุมการระบายอากาศ และระบบย่อยสำหรับควบคุมความร้อนเสริม โดยผู้วิจัยได้ติดตั้งระบบดังกล่าวในเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบเรือนกระจกขนาดใหญ่ (พื้นที่ฐาน  $9.0 \times 20.8$  ตารางเมตร) จำนวน 18 เครื่อง ซึ่งเครื่องอบแห้งทั้งหมดตั้งอยู่ที่อำเภอบางกระทุ่ม จังหวัดพิษณุโลก จากนั้นผู้วิจัยได้ทำการทดสอบระบบควบคุมและแสดงผลสถานะการอบแห้ง พร้อมกับทดสอบสมรรถนะของเครื่องอบแห้งแต่ละเครื่องด้วยการทดลองอบแห้งกล้วยน้ำว้าปกเปลือกแล้วจำนวน 1,000-1,200 กิโลกรัม จากผลการทดลองทั้งหมดพบว่า ความชื้นของกล้วยในเครื่องอบแห้งลดลงได้เร็วกว่าความชื้นของกล้วยที่ตากแห้งตามธรรมชาติอย่างชัดเจน ระบบควบคุมและแสดงผลสถานะการอบแห้งที่ติดตั้งเข้ากับเครื่องอบแห้งทั้ง 18 เครื่อง ทำงานได้ดี ผู้ใช้งานสามารถติดตามสถานะการอบแห้ง และสามารถควบคุมการปิด-เปิดระบบความร้อนเสริมและระบบระบายอากาศผ่านโทรศัพท์มือถือได้อย่างสะดวก นอกจากนี้ผู้วิจัยยังได้สร้างแบบจำลองสมการถดถอยที่มีเทอมจากตัวแปรอื่น (ARX) เพื่อทำนายความชื้นของกล้วยน้ำว้า ซึ่งผลการทดสอบแบบจำลอง พบว่า ความชื้นของกล้วยน้ำว้าจากแบบจำลอง และจากการทดลองมีความสอดคล้องกันดี โดยมีค่าความแตกต่างในรูปของ mean bias difference (MBD) อยู่ในช่วง  $-0.95-1.19\%$  และ root mean square difference (RMSD) อยู่ในช่วง  $1.68-7.22\%$

620720023 : Major (PHYSICS)

Keyword : control and monitor system, greenhouse solar dryer, internet, ARX modeling

MR. MONGKHON SANGSAN : DEVELOPMENT OF A CONTROL AND MONITOR SYSTEM VIA THE INTERNET FOR A PARABOLIC GREENHOUSE SOLAR DRYER OF BANANA  
THESIS ADVISOR : PROFESSOR SERM JANJAI, Ph.D.

In this study, a controlling and monitoring drying condition system via the internet for using in greenhouse solar dryers was developed. The system consists of a sub-system for monitoring drying conditions, a sub-system for controlling ventilation of the dryer and a sub-system for controlling an auxiliary heater. The system was installed in the 18 large-size parabolic greenhouse solar dryers (base area of  $9.0 \times 20.8 \text{ m}^2$ ). All dryers equipped with the system were built at Bangkratum district, Phitsanulok province. To investigate the performance of each dryer, it was used to dry 1,000-1,200 kg of peeled Cultivated bananas. From all drying experiments, it was found that bananas dried inside the dryers dried faster than bananas dried with the natural sun drying and the controlling and monitoring system work well, the users can be using a mobile phone to monitor drying conditions, control the on-off of the LPG burners and AC fans. In addition, an autoregressive model with exogenous variable (ARX) was developed to predict the moisture content of bananas. The discrepancy of the simulated results and the experimental results in terms of mean bias difference (MBD) are in the range of -0.95-1.19% and root mean square difference (RMSD) in the range of 1.68-7.22%

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาในระดับปริญญาโท โดยผู้วิจัยได้รับเงินทุนสนับสนุนผู้ช่วยวิจัยจากคณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร และได้รับเงินทุนเพิ่มเติม การสนับสนุนด้านอุปกรณ์และสถานที่ในการทำวิจัยจากห้องปฏิบัติการวิจัยพลังงานแสงอาทิตย์ ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร ซึ่งผู้วิจัยขอขอบพระคุณไว้ ณ ที่นี้ เป็นอย่างสูง

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ ศาสตราจารย์ ดร.เสริม จันทร์ฉาย ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาหลักผู้ให้คำแนะนำด้านวิชาการ พร้อมทั้งจัดหาทุนวิจัย เครื่องมือ อุปกรณ์ และข้อมูล สำหรับใช้ในการดำเนินการวิจัย อีกทั้งขอขอบพระคุณ อาจารย์ ดร.อรรณณ อัมพร และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมเจตน์ ภัทรภานิชชัย ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ช่วยให้คำแนะนำในด้านวิชาการ รวมทั้งช่วยจัดหาอุปกรณ์ที่ใช้ในการทำงานวิจัย

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.ศิริชัย เทพา อาจารย์คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ที่กรุณาสละเวลามาเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ครั้งนี้เป็นอย่างสูง

นอกจากนี้ ผู้วิจัยขอขอบคุณพระคุณอาจารย์และนักวิจัยของห้องปฏิบัติการวิจัยพลังงานแสงอาทิตย์ ภาควิชาฟิสิกส์ มหาวิทยาลัยศิลปากร ที่ให้คำปรึกษา แนะนำและสนับสนุนงานวิจัยนี้ และขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ของภาควิชาฟิสิกส์ทุกท่าน ที่เอื้ออำนวยความสะดวกในการประสานงานต่าง ๆ ในการทำวิทยานิพนธ์ครั้งนี้

ท้ายที่สุดนี้ คุณประโยชน์ที่เกิดจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้วิจัยขอมอบให้กับบิดาและมารดา รวมทั้งคณาจารย์ทุกท่าน เพื่อตอบแทนพระคุณที่ได้ช่วยให้ผู้วิจัยประสบความสำเร็จในการศึกษา

นาย มงคล สัจสัน

## 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 ขอบเขตงานวิจัย .....	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง .....	3
2.1 ทฤษฎี.....	3
2.1.1 การถ่ายเทความร้อน (heat transfer).....	3
2.1.1.1 การนำความร้อน .....	3
2.1.1.2 การพาความร้อน .....	5
2.1.1.3 การแผ่รังสี.....	6
2.1.2 พื้นฐานการอบแห้ง .....	14
2.1.2.1 อากาศชื้น.....	14
2.1.2.2 วัสดุชื้น (moist materials).....	20
2.1.2.3 กลไกการอบแห้ง .....	23
2.1.2.4 แบบจำลองของกระบวนการอบแห้ง.....	26

2.1.3 เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์.....	29
2.1.3.1 ประเภทของเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์.....	29
2.1.3.2 เครื่องอบแห้งแบบเรือนกระจก.....	34
2.1.4 หลักการเบื้องต้นของเซนเซอร์และไมโครคอนโทรลเลอร์ .....	36
2.1.4.1 เซนเซอร์ (Sensor).....	36
2.1.4.2 ไมโครคอนโทรลเลอร์ (Microcontroller).....	39
2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	42
บทที่ 3 การดำเนินงานวิจัยและผลการวิจัย .....	48
3.1 เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบเรือนกระจก .....	48
3.2 การพัฒนาระบบควบคุมและแสดงผลสถานะการอบแห้ง.....	49
3.2.1 บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์หลัก .....	49
3.2.2 ระบบแสดงผลสถานะการอบแห้ง .....	50
3.2.2.1 ชุดเซนเซอร์วัดอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ .....	50
3.2.2.2 เครื่องชั่งน้ำหนักของตัวอย่างผลิตภัณฑ์ที่อยู่ในเครื่องอบแห้ง .....	52
3.2.2.3 กล้องถ่ายภาพผลิตภัณฑ์ภายในเครื่องอบแห้ง .....	54
3.2.3 ระบบควบคุมสถานะการอบแห้ง.....	56
3.2.3.1 ระบบควบคุมการระบายอากาศของระบบย่อยที่ 2.....	56
3.2.3.2 ระบบควบคุมความร้อนเสริม.....	57
3.2.4 ตู้ควบคุม.....	58
3.2.5 การทำงานของระบบควบคุมและแสดงผลสถานะการอบแห้ง .....	60
3.3 การทดสอบสมรรถนะของเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบเรือนกระจก .....	67
3.4 ผลการทดสอบเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบเรือนกระจก .....	69
3.4.1 สมรรถนะของเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบเรือนกระจก .....	69
3.4.2 ประสิทธิภาพของระบบควบคุมและแสดงผลสถานะการอบแห้ง .....	81

3.4.3 ผลการวัดค่าแอกติวิตีของน้ำ..... 84

3.5 แบบจำลองสมการถดถอยที่มีเทอมจากตัวแปรอื่น (autoregressive model with  
exogenous variable, ARX)..... 85

3.5.1 ผลการจำลอง ..... 85

บทที่ 4 สรุป..... 89

รายการอ้างอิง..... 91

ประวัติผู้เขียน..... 96



## สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 1 ตัวอย่างแบบจำลองการอบแห้งชิ้นบาง (Prakash & Kumar, 2017) .....	27
ตารางที่ 2 ขนาดของเครื่องอบแห้งแบบเรือนกระจก .....	35
ตารางที่ 3 ช่วงเวลาดำเนินการทดลองอบแห้งกล้วยน้ำว้า .....	68
ตารางที่ 4 ค่าแอกติวิตีของน้ำ ( $a_w$ ) ของกล้วยที่อบแห้งภายในเครื่องอบแห้ง.....	84
ตารางที่ 5 ผลการเปรียบเทียบความชื้นของกล้วยน้ำว้าที่ได้จากแบบจำลอง ARX กับความชื้นของกล้วยน้ำว้าที่ได้จากการทดลองอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งทั้ง 18 เครื่อง .....	88





## สารบัญรูปภาพ

	หน้า
รูปที่ 1 การนำความร้อนผ่านกำแพง (Çengel & Ghajar, 2020).....	4
รูปที่ 2 (ก) การพาความร้อนแบบธรรมชาติ (ข) การพาความร้อนแบบบังคับ (Çengel & Ghajar, 2020).....	5
รูปที่ 3 คลื่นแม่เหล็กในช่วงความยาวคลื่นต่าง ๆ (Çengel & Ghajar, 2020).....	6
รูปที่ 4 การถ่ายเทความร้อนในห้องสุญญากาศจากวัตถุร้อนอุณหภูมิ $T_1$ ไปยังผนังห้องอุณหภูมิ $T_2$ โดยที่ $T_1 > T_2$ (Çengel & Ghajar, 2020).....	7
รูปที่ 5 สเปกตรัมของรังสีที่แผ่จากวัตถุดำที่อุณหภูมิต่าง ๆ (Çengel & Ghajar, 2020).....	9
รูปที่ 6 การสะท้อน การดูดกลืน และการส่งผ่านของรังสีตกกระทบวัตถุ (Çengel & Ghajar, 2020).....	10
รูปที่ 7 การถ่ายเทความร้อนโดยการแผ่รังสีของวัตถุดำ 2 ผิวที่มีอุณหภูมิต่างกัน (Çengel & Ghajar, 2020).....	11
รูปที่ 8 รังสีที่ตกกระทบ และรังสีที่ออกจากผิววัตถุเทา เมื่อ $G$ เป็นรังสีทั้งหมดที่ตกกระทบ $p$ เป็นสภาพสะท้อนรังสีของผิววัตถุเทา $\epsilon$ เป็นสภาพแผ่รังสีของผิววัตถุเทา และ $E_b$ เป็นรังสีทั้งหมดที่แผ่จากวัตถุดำที่อุณหภูมิเท่ากับวัตถุเทาดังกล่าว (Çengel & Ghajar, 2020).....	13
รูปที่ 9 องค์ประกอบของอากาศชั้น.....	14
รูปที่ 10 แผนภูมิอากาศชั้นรูปแบบของมอริเยร์ (Maloney, 2008).....	19
รูปที่ 11 โครงสร้างเซลล์ของวัสดุทางชีวภาพ (Khan et al., 2017).....	20
รูปที่ 12 การเปลี่ยนแปลงคุณภาพของวัสดุขึ้นตามค่าแอกติวิตีของน้ำ (Labuza et al., 1972).....	22
รูปที่ 13 เดซอร์บชันไอโซเทอมและแอดซอร์บชันไอโซเทอม (Prakash & Kumar, 2017).....	23
รูปที่ 14 กราฟการแห้ง ซึ่งแสดงการลดลงของความชื้นตามเวลา เมื่อ EMC คือ ความชื้นสมดุลของผลิตภัณฑ์ (Prakash & Kumar, 2017).....	24
รูปที่ 15 (ก) กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการแห้งกับเวลา (ข) กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการแห้งกับความชื้นของผลิตภัณฑ์ (Prakash & Kumar, 2017).....	25



รูปที่ 16 เครื่องอบแห้งแบบตู้ (Lawand, 1966) .....	30
รูปที่ 17 เครื่องอบแห้งแบบตู้ทึบแสง (Ekechukwu & Norton, 1999).....	31
รูปที่ 18 เครื่องอบแห้งแบบตู้หลายชั้น (Wibulswas & Niyomkorn, 1980).....	31
รูปที่ 19 เครื่องอบแห้งเมล็ดพืชแบบหลังคาโปร่งแสง (Shove et al., 1981).....	32
รูปที่ 20 เครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบบูรณาการเครื่องอบแห้งกับยั้งเก็บข้าว (Soponronnarit et al., 1986).....	33
รูปที่ 21 เครื่องอบแห้งแบบอุโมงค์ลม (Schirmer et al., 1996) .....	33
รูปที่ 22 ลักษณะภายนอกของเครื่องอบแห้งแบบเรือนกระจกรุ่นที่ 1 (Janjai et al., 2005).....	34
รูปที่ 23 สัมประสิทธิ์การส่งผ่านรังสีของแผ่นโพลีคาร์บอเนต (Janjai & Keawprasert, 2006).....	35
รูปที่ 24 เครื่องอบแห้งแบบเรือนกระจกขนาดใหญ่พิเศษ .....	36
รูปที่ 25 แผนภูมิของระบบเซนเซอร์.....	36
รูปที่ 26 ไมโครคอนโทรลเลอร์ .....	39
รูปที่ 27 โครงสร้างหลักของไมโครคอนโทรลเลอร์ .....	40
รูปที่ 28 บอร์ด Arduino UNO.....	41
รูปที่ 29 บอร์ด Arduino Nano.....	42
รูปที่ 30 บอร์ด Arduino Mega.....	42
รูปที่ 31 แผนภาพโครงสร้างฮาร์ดแวร์ (hardware) ของระบบตรวจสอบอัจฉริยะ (Xiao et al., 2014).....	43
รูปที่ 32 ส่วนประกอบของระบบควบคุมอัตโนมัติ (Marebane et al., 2018).....	44
รูปที่ 33 แผนภาพการทำงานของระบบควบคุมอัตโนมัติ (Marebane et al., 2018).....	45
รูปที่ 34 แผนภาพการทำงานของระบบส่งสัญญาณ (Dahere et al., 2019) .....	46
รูปที่ 35 แผนภาพการทำงานของระบบรับสัญญาณ (Dahere et al., 2019).....	46
รูปที่ 36 ลักษณะหน้าจอแอปพลิเคชันบนโทรศัพท์มือถือ (Dahere et al., 2019).....	47
รูปที่ 37 โครงสร้างของเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบเรือนกระจกขนาดใหญ่ .....	49

รูปที่ 38 บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์หลัก.....	50
รูปที่ 39 เซนเซอร์วัดอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ .....	50
รูปที่ 40 ชุดเซนเซอร์วัดอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ .....	51
รูปที่ 41 การติดตั้งชุดเซนเซอร์วัดอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศภายในเครื่องอบแห้ง ....	51
รูปที่ 42 การติดตั้งชุดเซนเซอร์วัดอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศแวดล้อม.....	52
รูปที่ 43 เซนเซอร์วัดน้ำหนัก (load cell, GUANG, model YZC-1B) .....	52
รูปที่ 44 บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์สำหรับเซนเซอร์วัดน้ำหนัก .....	53
รูปที่ 45 ระบบคานของเครื่องชั่งน้ำหนักของตัวอย่างผลิตภัณฑ์ที่อยู่ในเครื่องอบแห้ง.....	53
รูปที่ 46 การติดตั้งเครื่องชั่งน้ำหนักของตัวอย่างผลิตภัณฑ์.....	54
รูปที่ 47 กล้องถ่ายภาพสำหรับถ่ายภาพนิ่งจากภายในเครื่องอบแห้ง .....	54
รูปที่ 48 การติดตั้งกล้องถ่ายภาพสำหรับถ่ายภาพนิ่งภายในเครื่องอบแห้ง .....	55
รูปที่ 49 ระบบควบคุมสภาวะการอบแห้ง.....	56
รูปที่ 50 พัฒนาระบายอากาศชนิดใช้กระแสไฟฟ้ากระแสสลับ.....	57
รูปที่ 51 เครื่องเผาไหม้แก๊ส LPG.....	57
รูปที่ 52 การติดตั้งระบบควบคุมการระบายอากาศ .....	58
รูปที่ 53 การติดตั้งระบบควบคุมความร้อนเสริม.....	58
รูปที่ 54 ส่วนประกอบต่าง ๆ ภายในตู้ควบคุม.....	59
รูปที่ 55 ส่วนประกอบต่าง ๆ บริเวณหน้าตู้ควบคุม .....	59
รูปที่ 56 แผนผังการทำงานของระบบควบคุมและแสดงผลสภาวะการอบแห้ง.....	60
รูปที่ 57 ระบบควบคุมและแสดงผลสภาวะการอบแห้งที่ติดตั้งเข้ากับเครื่องอบแห้งพลังงาน แสงอาทิตย์แบบเรือนกระจกขนาดใหญ่ทั้ง 18 เครื่อง.....	61
รูปที่ 58 การติดตั้งไพราโนมิเตอร์บนหลังคาเครื่องอบแห้ง เพื่อวัดความเข้มรังสีอาทิตย์ .....	67
รูปที่ 59 ความเข้มรังสีอาทิตย์ที่เปลี่ยนแปลงในช่วงเวลา 08.00-18.00 น. ของเครื่องอบแห้ง 18 เครื่อง.....	69

รูปที่ 60 การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิอากาศภายในเครื่องอบแห้ง 18 เครื่อง (—) และอุณหภูมิของอากาศแวดล้อม (•••).....	72
รูปที่ 61 การเปลี่ยนแปลงของความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศภายในเครื่องอบแห้ง 18 เครื่อง (—) และความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศแวดล้อม (•••).....	75
รูปที่ 62 กราฟความชื้นของกล้วยน้ำว้าที่อบแห้งภายในเครื่องอบแห้ง 18 เครื่อง (—) และกล้วยน้ำว้าที่ตากแห้งตามธรรมชาติ (•••).....	78
รูปที่ 63 หน้าจอโทรศัพท์มือถือที่แสดงสภาวะอบแห้งและแถบคำสั่งของการควบคุมสภาวะอบแห้ง.....	81



## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ประเทศไทยตั้งอยู่ในบริเวณเขตร้อนซึ่งได้รับพลังงานแสงอาทิตย์ค่อนข้างสูงตลอดทั้งปี อีกทั้งยังเป็นประเทศที่มีการนำผลผลิตทางการเกษตรมาแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์แห้งจำนวนมาก เช่น ผัก ผลไม้และเครื่องเทศต่าง ๆ เป็นต้น โดยการทำผลิตภัณฑ์แห้งนั้นมีทั้งในระดับครัวเรือน ระดับอุตสาหกรรมขนาดเล็กและขนาดกลางกระจายอยู่ทั่วประเทศ (DEDE, 2015) การใช้เทคโนโลยีการอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์เพื่ออบแห้งผลผลิตทางการเกษตร จึงเป็นวิธีการหนึ่งที่สามารถนำมาประยุกต์ใช้ได้

ในช่วง 50 ปีที่ผ่านมา นักวิจัยในประเทศต่าง ๆ ได้ทำการพัฒนาเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ขึ้นหลายแบบ (Ekechukwu & Norton, 1999; El-Sebaei & Shalaby, 2012; Fudholi et al., 2010; Janjai & Bala, 2012; Kumar et al., 2016; Murthy, 2009; Mustayen et al., 2014; Pirasteh et al., 2014; Prakash et al., 2016; Sangamithra et al., 2014; Sharma et al., 2009; Singh et al., 2018; Soponronnarit, 1995) แต่หนึ่งในเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ที่นิยมใช้กันในเชิงพาณิชย์คือเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบเรือนกระจก ซึ่งมีการติดตั้งใช้งานในประเทศไทยและประเทศอื่น ๆ กว่า 600 เครื่อง (Janjai & Mahayoothee, 2016; Nabard Consultancy Services, 2019; Pankaew et al., 2016; Srimaneechai & Triwong, 2017; Tohsing et al., 2017) เนื่องจากเครื่องอบแห้งดังกล่าวมีการใช้งานที่ไม่ยุ่งยากและไม่ซับซ้อนสามารถป้องกันความเสียหายจากสัตว์ต่าง ๆ และจากการเปลี่ยนแปลงของสภาพอากาศ เช่น ฝนตก เป็นต้น นอกจากนี้เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบเรือนกระจกยังมีขนาดให้เลือกใช้งานได้ตามความเหมาะสมของกิจการ ได้แก่ เครื่องอบแห้งขนาดเล็กมีความกว้าง 6 เมตร ยาว 8.2 เมตร และสูง 3.5 เมตร (ความจุ 100-300 กิโลกรัม) เครื่องอบแห้งขนาดกลางมีความกว้าง 9 เมตร ยาว 12.4 เมตร และสูง 3.5 เมตร (ความจุ 400-600 กิโลกรัม) เครื่องอบแห้งขนาดใหญ่มีความกว้าง 9 เมตร ยาว 20.8 เมตร และสูง 3.5 เมตร (ความจุ 1,000-1,200 กิโลกรัม) และเครื่องอบแห้งขนาดใหญ่พิเศษมีความกว้าง 9 เมตร ยาว 27.0 เมตร และสูง 3.5 เมตร (ความจุ 1,500-1,700 กิโลกรัม) ซึ่งสามารถตอบสนองความต้องการของผู้ใช้งาน และมีต้นทุนที่ยอมรับได้ แต่อย่างไรก็ตามการใช้เครื่องอบแห้งดังกล่าว ผู้ใช้งานจะต้องเข้าไปในเครื่องอบแห้งเป็นระยะ ๆ เพื่อติดตามสภาพของผลิตภัณฑ์ที่ทำการอบแห้ง แต่อากาศภายในเครื่องอบแห้งมีอุณหภูมิค่อนข้างสูง ซึ่งส่งผลให้ผู้ใช้งานรู้สึกไม่สะดวกสบายในการใช้งานเครื่องอบแห้งนี้

ในปัจจุบันเทคโนโลยีด้านสารสนเทศ ได้แก่ การติดตามสมรรถนะของอุปกรณ์ต่าง ๆ ผ่านทางเครือข่ายอินเทอร์เน็ตได้พัฒนาไปมาก และมีการนำไปใช้งานในระบบทางวิศวกรรมต่าง ๆ มากมาย (Al-Ali et al., 2009; Alvinika et al., 2021; Roman & Hensel, 2014) แต่เทคโนโลยีสารสนเทศดังกล่าวไม่สามารถนำมาใช้กับเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบเรือนกระจกได้โดยตรง ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้พัฒนาระบบควบคุมและแสดงผลสถานะการอบแห้งสำหรับใช้งานในเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบเรือนกระจก โดยที่ผู้ใช้งานสามารถติดตามสถานะการอบแห้งและสั่งการเพื่อควบคุมสถานะการอบแห้งผ่านเครือข่ายอินเทอร์เน็ตได้

### 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 1) เพื่อพัฒนาระบบควบคุมและแสดงผลสถานะการอบแห้งที่สามารถทำงานผ่านเครือข่ายอินเทอร์เน็ตได้ สำหรับใช้งานในเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบเรือนกระจก
- 2) สร้างแบบจำลองสมการถดถอยที่มีเทอมจากตัวแปรอื่น (ARX) สำหรับทำนายความชื้นของผลิตภัณฑ์ที่ทำการอบแห้ง

### 1.3 ขอบเขตงานวิจัย

งานวิจัยนี้จะทำการพัฒนาระบบควบคุมและแสดงผลสถานะการอบแห้งที่สามารถทำงานผ่านเครือข่ายอินเทอร์เน็ตสำหรับใช้งานในเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบเรือนกระจก แล้วทำการติดตั้งระบบที่พัฒนาขึ้นเข้ากับเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบเรือนกระจกขนาดใหญ่จำนวน 18 เครื่อง ซึ่งตั้งอยู่ที่อำเภอบางกระทุ่ม จังหวัดพิษณุโลก พร้อมทั้งทดสอบการทำงานของระบบดังกล่าวด้วยการทดลองอบแห้งกล้วยน้ำว้า และทำการสร้างแบบจำลองสมการถดถอยที่มีเทอมจากตัวแปรอื่น (ARX)

## บทที่ 2

### ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในบทนี้จะกล่าวถึงการถ่ายเทความร้อนเบื้องต้น พื้นฐานของการอบแห้ง ประเภทของเครื่องอบแห้ง หลักการเบื้องต้นของเซนเซอร์และไมโครคอนโทรลเลอร์ และตัวอย่างงานวิจัยที่เกี่ยวข้องตามรายละเอียดดังต่อไปนี้

#### 2.1 ทฤษฎี

##### 2.1.1 การถ่ายเทความร้อน (heat transfer)

ในทางอุณหพลศาสตร์ ความร้อนถือเป็นพลังงานรูปแบบหนึ่งที่สามารถถ่ายเทจากระบบหนึ่งไปยังอีกระบบหนึ่งได้ ซึ่งการถ่ายเทความร้อนเป็นกระบวนการที่สำคัญต่อการอบแห้ง เนื่องจากความร้อนจะช่วยให้ความชื้นในผลิตภัณฑ์ลดลงได้ง่ายขึ้น การส่งพลังงานความร้อนจากแหล่งความร้อนที่มีอุณหภูมิสูงไปยังผลิตภัณฑ์ที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า เรียกว่าการถ่ายเทความร้อน ซึ่งแบ่งออกเป็น 3 แบบ คือ การนำความร้อน (conduction) การพาความร้อน (convection) และการแผ่รังสี (radiation)

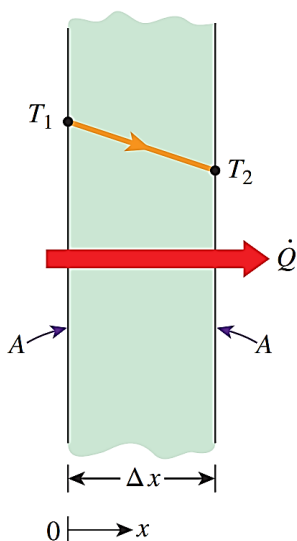
##### 2.1.1.1 การนำความร้อน

การนำความร้อนเป็นกระบวนการถ่ายเทพลังงานความร้อนจากอนุภาคที่มีพลังงานสูงไปสู่อนุภาคข้างเคียงที่มีพลังงานต่ำกว่า การนำความร้อนสามารถเกิดได้ทั้งในของแข็ง ของเหลว และก๊าซ ในกรณีของเหลวและก๊าซ การนำความร้อนเกิดจากการชนกันของอนุภาคและเกิดจากการแพร่ (diffusion) ของอนุภาคในระหว่างการเคลื่อนที่แบบสุ่ม ส่วนกรณีของแข็ง การนำความร้อนจะเกิดจากการสั่นของอนุภาคภายในของแข็งนั้น นอกจากนี้ของแข็งจำพวกโลหะจะมีอิเล็กตรอนอิสระอยู่ภายในของแข็ง การนำความร้อนจึงสามารถเกิดได้จากการถ่ายโอนพลังงาน (energy transport) ของอิเล็กตรอนอิสระนี้ด้วย

อัตราการถ่ายเทพลังงานโดยการนำความร้อนจะขึ้นอยู่กับลักษณะทางเรขาคณิต ความหนา และชนิดของวัสดุที่เป็นตัวกลาง ซึ่งถือว่ามีความสำคัญสำหรับงานในด้านการอบแห้ง เช่น การออกแบบผนังของเครื่องอบแห้งที่จำเป็นต้องออกแบบให้มีอัตราการสูญเสียความร้อนน้อยที่สุด นั่นคือมีอัตราการถ่ายเทพลังงานโดยการนำความร้อนต่ำ

ในการคำนวณหาอัตราการถ่ายเทพลังงานโดยการนำความร้อนสามารถพิจารณาได้จากการนำความร้อนในสภาวะคงตัว (steady state) ผ่านกำแพง ซึ่งกำแพงมีความหนา  $\Delta x$  พื้นที่ A ผนังกำแพงด้านซ้ายอุณหภูมิ  $T_1$  และด้านขวาอุณหภูมิ  $T_2$  โดยอุณหภูมิ  $T_1 > T_2$  ดังรูปที่ 1





รูปที่ 1 การนำความร้อนผ่านกำแพง (Çengel & Ghajar, 2020)

อัตราการนำความร้อนจากผิวกำแพงด้านซ้ายไปยังผิวกำแพงด้านขวาจะแปรผันตรงตามพื้นที่  $A$  และความแตกต่างของอุณหภูมิ ( $\Delta T$ ) ระหว่างผิวกำแพงทั้งสอง แต่จะแปรผกผันกับความหนาของกำแพง ( $L$ ) ซึ่งสามารถเขียนในของรูปความสัมพันธ์ได้ดังนี้

อัตราการนำความร้อน  $\propto \frac{\text{(พื้นที่)(ความแตกต่างของอุณหภูมิ)}}{\text{ความหนา}}$

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

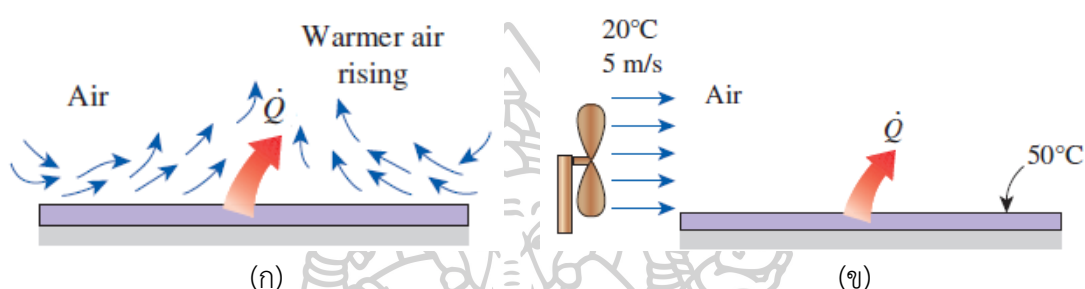
เมื่อ  $\dot{Q}_{\text{cond}}$  คือ อัตราการนำความร้อน (W) และ  $k$  คือ สภาพนำความร้อน (thermal conductivity) ( $\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$ ) ของวัสดุตัวกลาง ซึ่งเป็นค่าคงตัวที่บ่งบอกถึงความสามารถในการนำความร้อนของวัสดุ ถ้าให้  $\Delta x \rightarrow 0$  สมการ (1) จะเขียนในรูปสมการอนุพันธ์ได้ดังนี้

$$\dot{Q}_{\text{cond}} = -kA \frac{dT}{dx} \quad (2)$$

โดยสมการ (2) เรียกว่า สมการกฎการนำความร้อนของฟูรีเยร์ ซึ่งเรียกตามชื่อของนักฟิสิกส์ชาวฝรั่งเศส ฌอง บาพทิส โจเซฟ ฟูรีเยร์ (Jean Baptiste Joseph Fourier) ที่ได้นำเสนอสมการนี้เป็นครั้งแรกในปี ค.ศ. 1822

### 2.1.1.2 การพาความร้อน

การพาความร้อนเป็นกระบวนการที่อาศัยการเคลื่อนที่ของอนุภาคของของไหลเป็นตัวกลางในการถ่ายเทพลังงานความร้อน หากการเคลื่อนที่ของอนุภาคของของไหลเกิดจากแรงลอยตัว (buoyancy force) ที่เป็นผลมาจากความแตกต่างของอุณหภูมิของของไหล จะเรียกว่า การพาแบบธรรมชาติ (natural convection) หรือการพาอิสระ (free convection) ส่วนการเคลื่อนที่ของอนุภาคของของไหลที่เกิดจากการบังคับโดยแรงกระทำจากภายนอก เช่น พัดลม หรือปั๊ม จะเรียกว่า การพาแบบบังคับ (forced convection) (รูปที่ 2)



รูปที่ 2 (ก) การพาความร้อนแบบธรรมชาติ (ข) การพาความร้อนแบบบังคับ

(Çengel & Ghajar, 2020)

อัตราการถ่ายเทความร้อนโดยการพาความร้อนสามารถคำนวณได้โดยใช้สมการที่เรียกว่า กฎการเย็นตัวของนิวตัน (Newton's law of cooling) ซึ่งมีรูปสมการดังนี้

$$\dot{Q}_{\text{conv}} = h_{\text{conv}} A (T_s - T_{\infty}) \quad (3)$$

เมื่อ  $\dot{Q}_{\text{conv}}$  คือ อัตราการถ่ายเทความร้อนโดยการพาความร้อน (W)

$h_{\text{conv}}$  คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนโดยการพาความร้อน (convection heat transfer coefficient) ( $\text{W m}^{-2} \text{K}^{-1}$ )

$T_s$  คือ อุณหภูมิของผิวของแข็ง (K)

$T_{\infty}$  คือ อุณหภูมิของของไหลที่อยู่ห่างจากผิวของแข็งหรืออยู่นอกชั้นขอบเขต (K)

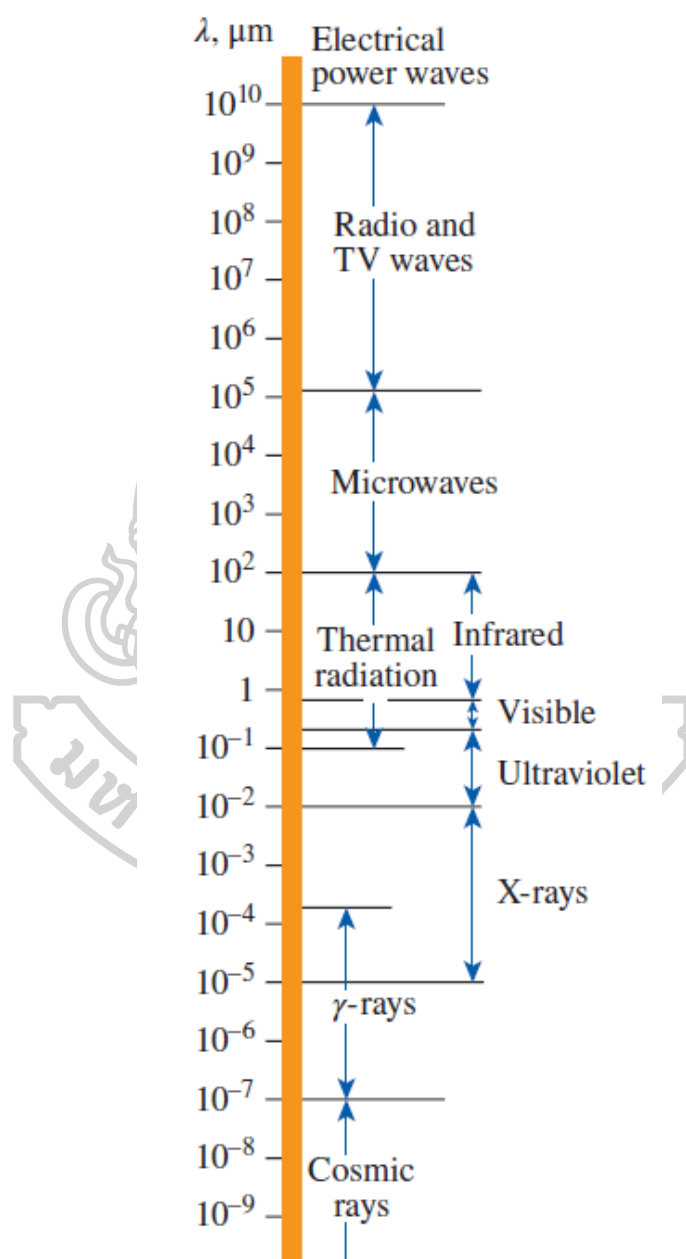
$A$  คือ พื้นที่ผิวที่เกิดการถ่ายเทความร้อนโดยการพาความร้อน ( $\text{m}^2$ )

โดยค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน ( $h_{\text{conv}}$ ) จะขึ้นอยู่กับตัวแปรทั้งหมดที่มีอิทธิพลต่อการพาความร้อน เช่น ลักษณะทางเรขาคณิตของพื้นผิว คุณสมบัติของของไหล และรูปแบบของการไหล เป็นต้น



### 2.1.1.3 การแผ่รังสี

รังสี (radiation) เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่เคลื่อนที่ด้วยความเร็ว  $2.9979 \times 10^8$  เมตรต่อวินาที ในสุญญากาศ ซึ่งคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ามีช่วงความยาวคลื่นที่หลากหลายครอบคลุมตั้งแต่ความยาวคลื่นที่สั้นกว่า  $10^{-10}$  ไมโครเมตร ไปจนถึงความยาวคลื่นที่ยาวกว่า  $10^{10}$  ไมโครเมตร ดังแสดงในรูปที่ 3

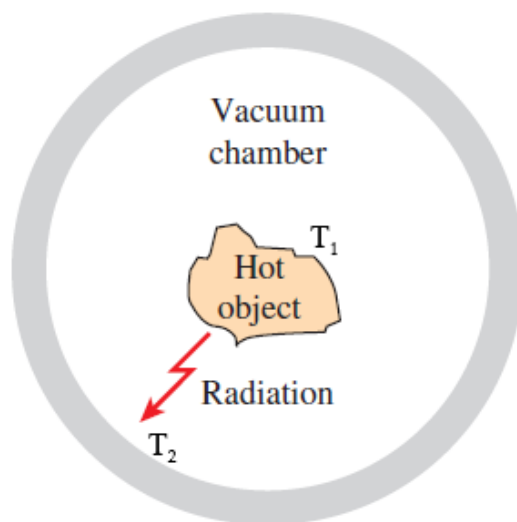


รูปที่ 3 คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าช่วงความยาวคลื่นต่าง ๆ (Çengel & Ghajar, 2020)

คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าแต่ละช่วงความยาวคลื่นจะมีสมบัติและกลไกการเกิดแตกต่างกัน เช่น รังสีแกมมาเกิดจากปฏิกิริยานิวเคลียร์ รังสีเอ็กซ์เกิดจากการยิงอิเล็กตรอนพลังงานสูงไปกระทบโลหะบางชนิด ส่วนคลื่นวิทยุเกิดจากการไหลของไฟฟ้ากระแสสลับผ่านตัวนำไฟฟ้า เป็นต้น

โดยทั่วไปคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในช่วงความยาวคลื่น 0.1-100 ไมโครเมตร จะมีชื่อเรียกว่า “รังสีความร้อน” ซึ่งครอบคลุมอยู่ในช่วงของแสงสว่าง บางส่วนของรังสีอัลตราไวโอเล็ตและบางส่วนของรังสีอินฟราเรด รังสีความร้อนเกิดจากการเปลี่ยนระดับพลังงานของอิเล็กตรอนภายในสสาร โดยระดับพลังงานของอิเล็กตรอนและปริมาณพลังงานที่แผ่ออกมาจะขึ้นกับอุณหภูมิ เมื่อรังสีความร้อนถูกสสารดูดกลืนจะเปลี่ยนไปเป็นพลังงานความร้อน ดังนั้นการแผ่รังสีจากวัตถุหนึ่งไปยังอีกวัตถุหนึ่งจึงเกิดการถ่ายเทความร้อน ซึ่งเรียกการแผ่รังสีดังกล่าวว่า การแผ่รังสีความร้อน

การแผ่รังสีสามารถพิจารณาได้จากกรณีที่มีวัตถุร้อนอุณหภูมิ  $T_1$  อยู่ในห้องสุญญากาศ ซึ่งผนังภายในห้องมีอุณหภูมิ  $T_2$  โดยที่  $T_1 > T_2$  (รูปที่ 4) วัตถุร้อนดังกล่าวจะถ่ายเทความร้อนไปยังผนังห้องจนอุณหภูมิของวัตถุลดลงและเข้าสู่สมดุลทางความร้อนระหว่างวัตถุกับผนังห้อง ซึ่งกระบวนการลักษณะนี้ไม่สามารถอธิบายได้ด้วยการถ่ายเทความร้อนโดยการนำความร้อนหรือการพาความร้อน เนื่องจากทั้ง 2 กระบวนการไม่สามารถเกิดขึ้นได้ในสุญญากาศ ดังนั้นการถ่ายเทความร้อนจะต้องเกิดขึ้นผ่านกระบวนการอื่นที่เกี่ยวข้องกับการปล่อยพลังงานความร้อนภายในวัตถุออกไปยังสิ่งแวดล้อมหรือวัตถุอื่น โดยไม่ต้องอาศัยตัวกลางในการถ่ายเทความร้อนนั้นไป ซึ่งกระบวนการดังกล่าวเรียกว่า การแผ่รังสี



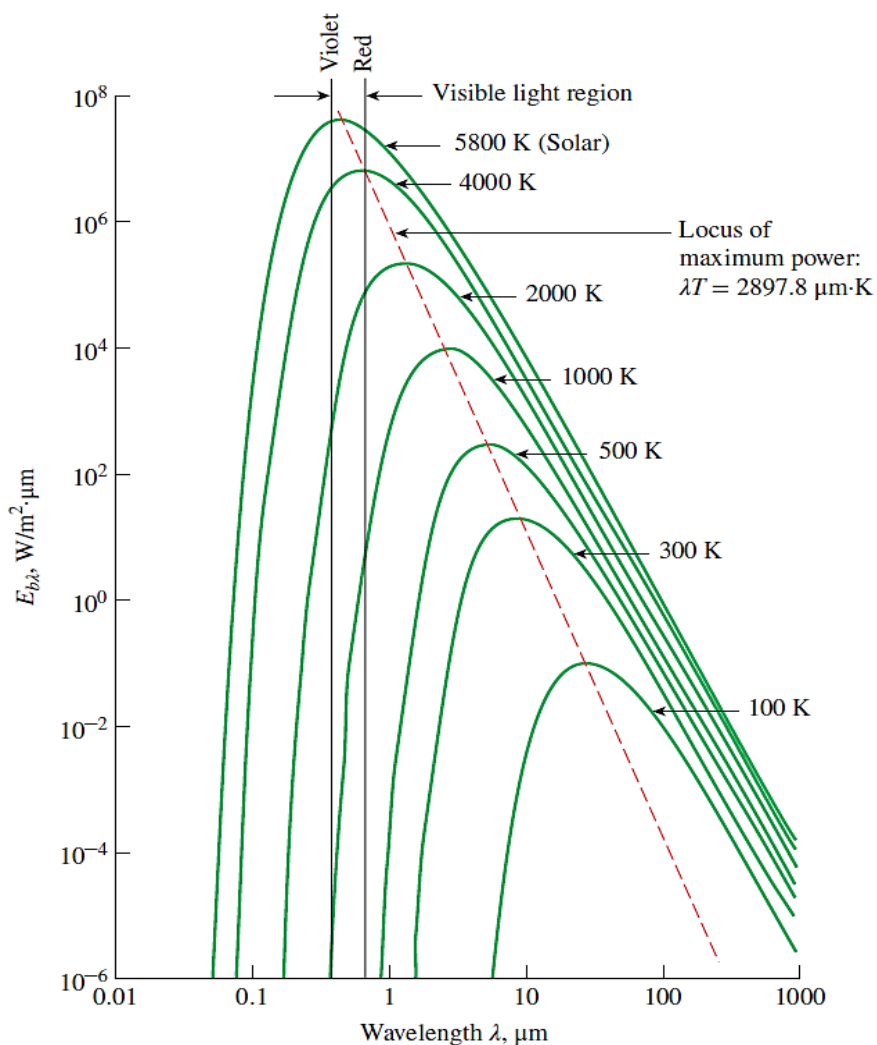
รูปที่ 4 การถ่ายเทความร้อนในห้องสุญญากาศจากวัตถุร้อนอุณหภูมิ  $T_1$  ไปยังผนังห้องอุณหภูมิ  $T_2$  โดยที่  $T_1 > T_2$  (Çengel & Ghajar, 2020)

การถ่ายเทความร้อนโดยการนำหรือการพาความร้อนเกิดขึ้นในทิศทางของอุณหภูมิที่ลดลง นั่นคือจากตัวกลางที่มีอุณหภูมิสูงไปยังตัวกลางที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า แต่การถ่ายเทความร้อนโดยการแผ่รังสีอาจเกิดขึ้นระหว่างวัตถุสองชิ้นโดยคั่นด้วยอุณหภูมิที่เย็นกว่าวัตถุทั้งสอง ตัวอย่างเช่น การแผ่รังสีของดวงอาทิตย์มาถึงพื้นผิวโลก ซึ่งถูกคั่นด้วยชั้นบรรยากาศโลกที่มีอุณหภูมิต่ำ นอกจากนี้พื้นผิวโลกที่ดูดกลืนรังสีอาทิตย์กลับมีอุณหภูมิสูง แม้ว่าชั้นบรรยากาศที่ปกคลุมพื้นผิวโลกยังคงเย็นอยู่ก็ตาม

### การแผ่รังสีของวัตถุดำ (blackbody)

วัตถุทุกชนิดที่อุณหภูมิสูงกว่าศูนย์องศาสัมบูรณ์ (0 เคลวิน) จะมีการแผ่รังสีออกมาเสมอ โดยปริมาณการแผ่รังสีของวัตถุจะขึ้นอยู่กับชนิดและอุณหภูมิของวัตถุ วัตถุต่างชนิดกันที่อุณหภูมิเท่ากัน จะแผ่รังสีออกมาต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ผิวของวัตถุได้ไม่เท่ากัน ดังนั้นนักวิทยาศาสตร์จึงได้กำหนดวัตถุในอุดมคติชนิดหนึ่งขึ้นมา เรียกว่า วัตถุดำ (black body) เพื่อใช้เป็นวัตถุอ้างอิงในการเปรียบเทียบความสามารถในการแผ่รังสีและการดูดกลืนรังสีของวัตถุต่าง ๆ โดยวัตถุดำมีสมบัติในการแผ่รังสีและดูดกลืนรังสีอย่างสมบูรณ์ กล่าวคือที่อุณหภูมิค่าหนึ่งวัตถุดำจะสามารถแผ่รังสีได้สูงสุด เมื่อเทียบกับวัตถุอื่น ๆ และรังสีที่ตกกระทบวัตถุดำจะถูกดูดกลืนจนหมดโดยไม่เหลือรังสีสะท้อนกลับออกมา สเปกตรัมของรังสีที่แผ่จากวัตถุดำที่อุณหภูมิต่าง ๆ แสดงดังรูปที่ 5





รูปที่ 5 สเปกตรัมของรังสีที่แผ่จากวัตถุดำที่อุณหภูมิค่าต่าง ๆ (Çengel & Ghajar, 2020)

### สมบัติเชิงรังสีของวัสดุ

การถ่ายเทความร้อนโดยการแผ่รังสีมีความเกี่ยวข้องกับรังสีที่ออกจากวัตถุ ซึ่งวัตถุต่าง ๆ มีความสามารถในการแผ่รังสีแตกต่างกันขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของพื้นผิว ความยาวคลื่นและทิศทางของรังสีที่แผ่ออกมา โดยความสามารถในการแผ่รังสีจะบอกในรูปของ “สภาพแผ่รังสี ( $\varepsilon$ )” ซึ่งเป็นอัตราส่วนระหว่างรังสีทั้งหมดที่แผ่ออกจากผิววัตถุ ( $E(T)$ ) ต่อรังสีทั้งหมดที่แผ่ออกจากวัตถุดำ ( $E_b(T)$ ) ที่อุณหภูมิเดียวกัน สามารถเขียนในรูปสมการได้ดังนี้

$$\varepsilon = \frac{E(T)}{E_b(T)} \quad (4)$$

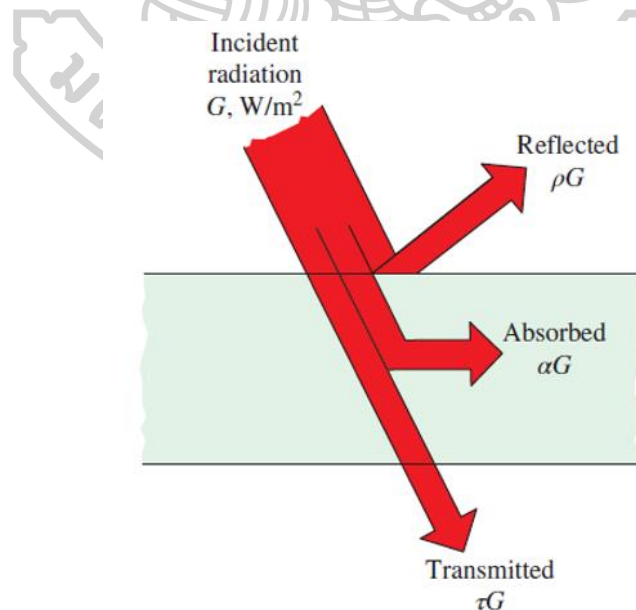
เมื่อรังสีตกกระทบวัตถุจะมีรังสีบางส่วนถูกสะท้อนออกจากผิวของวัตถุ ส่วนที่เหลือจะผ่านเข้าไปในเนื้อของวัตถุและถูกวัตถุดูดกลืนไว้บางส่วน และส่วนที่เหลือจากการสะท้อนและการดูดกลืนจะผ่านวัตถุออกไปภายนอก (รูปที่ 6) ซึ่งสมบัติในการสะท้อน การดูดกลืน และการส่งผ่าน สามารถนิยามได้ดังนี้

$$\text{สภาพสะท้อนรังสี } (\rho) = \frac{\text{รังสีที่สะท้อน}}{\text{รังสีที่ตกกระทบ}} = \frac{G_{\text{ref}}}{G} \quad (5)$$

$$\text{สภาพดูดกลืนรังสี } (\alpha) = \frac{\text{รังสีที่ถูกดูดกลืน}}{\text{รังสีที่ตกกระทบ}} = \frac{G_{\text{ab}}}{G} \quad (6)$$

$$\text{สภาพส่งผ่านรังสี } (\tau) = \frac{\text{รังสีที่ส่งผ่าน}}{\text{รังสีที่ตกกระทบ}} = \frac{G_{\text{tr}}}{G} \quad (7)$$

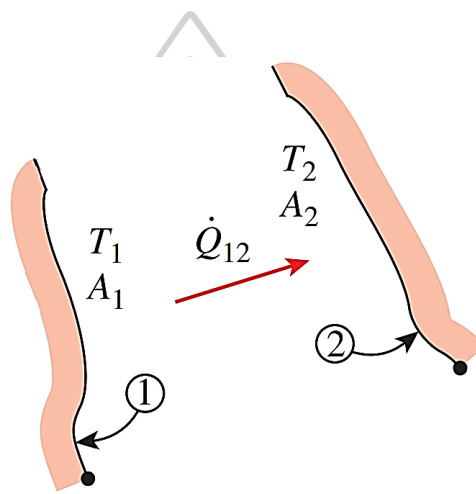
เมื่อ  $G$  คือ รังสีที่ตกกระทบ ( $\text{W m}^{-2}$ )  
 $G_{\text{ref}}$  คือ รังสีที่สะท้อน ( $\text{W m}^{-2}$ )  
 $G_{\text{ab}}$  คือ รังสีที่ถูกดูดกลืน ( $\text{W m}^{-2}$ )  
 $G_{\text{tr}}$  คือ รังสีที่ส่งผ่าน ( $\text{W m}^{-2}$ )



รูปที่ 6 การสะท้อน การดูดกลืน และการส่งผ่านของรังสีตกกระทบวัตถุ (Çengel & Ghajar, 2020)

### การถ่ายเทความร้อนโดยการแผ่รังสีระหว่างผิวของวัตถุดำ

โดยทั่วไปแล้วการวิเคราะห์เกี่ยวกับการถ่ายเทความร้อนโดยการแผ่รังสีระหว่างผิวของวัตถุต่าง ๆ นั้นค่อนข้างมีความซับซ้อน เนื่องจากการแผ่รังสีออกจากผิวที่หนึ่งไปยังผิวที่สองอาจเกิดการสะท้อนได้หลายครั้ง ก่อนที่รังสีจะถูกผิวของวัตถุดูดกลืนจนหมด การวิเคราะห์จะง่ายขึ้นหากผิวของวัตถุที่ทำการวิเคราะห์เป็นผิวของวัตถุดำ ซึ่งไม่มีรังสีที่สะท้อนกลับออกมาจากผิว โดยเราสามารถวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อนโดยการแผ่รังสีระหว่างผิวของวัตถุดำได้จากกรณีตัวอย่าง ซึ่งมีวัตถุดำ 2 ผิว วางอยู่ในสุญญากาศ โดยผิวที่ 1 มีพื้นที่  $A_1$  และอุณหภูมิ  $T_1$  ส่วนผิวที่ 2 มีพื้นที่  $A_2$  และอุณหภูมิ  $T_2$  (รูปที่ 7)



รูปที่ 7 การถ่ายเทความร้อนโดยการแผ่รังสีของวัตถุดำ 2 ผิวที่มีอุณหภูมิต่างกัน  
(Çengel & Ghajar, 2020)

จากรูปที่ 7 ผิวที่ 1 แผ่รังสีไปตกกระทบผิวที่ 2 เท่ากับ  $A_1 \sigma T_1^4 F_{12}$  ในขณะที่ผิวที่ 2 ก็แผ่รังสีไปตกกระทบผิวที่ 1 เท่ากับ  $A_2 \sigma T_2^4 F_{21}$  ดังนั้นรังสีสุทธิที่ผิวที่ 1 ถ่ายเทไปให้ผิวที่ 2 ( $Q_{1 \rightarrow 2}$ ) จะหาได้จากสมการที่ 8

$$Q_{1 \rightarrow 2} = A_1 \sigma T_1^4 F_{12} - A_2 \sigma T_2^4 F_{21} \quad (8)$$

จากความสัมพันธ์สลับกัน (reciprocity relation) จะได้ว่า  $A_1 F_{12} = A_2 F_{21}$  ดังนั้นสมการ (8) เขียนใหม่ได้ ดังนี้

$$Q_{1 \rightarrow 2} = A_1 \sigma F_{12} (T_1^4 - T_2^4) \quad (9)$$

โดยที่  $F_{12}$  คือ วิวแฟคเตอร์ (view factor) ที่มองจากผิวที่ 1 ไปยังผิวที่ 2

### วัตถุเทา (gray body)

ในกรณีของวัตถุอุดมคติอย่างวัตถุดำสมบัติเชิงรังสี ได้แก่ สภาพแผ่รังสี สภาพดูดกลืนรังสี สภาพสะท้อนรังสี และสภาพส่งผ่านรังสีของวัตถุจะขึ้นกับความยาวคลื่นของรังสี แต่ในกรณีของวัตถุทึบรังสี (opaque body) ที่สมบัติเชิงรังสีดังกล่าวไม่ขึ้นกับความยาวคลื่นของรังสี เราจะเรียกวัตถุนี้ว่า วัตถุเทา (gray body) ในการคำนวณการถ่ายเทความร้อนโดยการแผ่รังสีระหว่างวัตถุธรรมดา เรามักตั้งสมมติฐานว่าวัตถุดังกล่าวเป็นวัตถุเทา

### การถ่ายเทความร้อนโดยการแผ่รังสีระหว่างผิวของวัตถุเทา

ในกรณีของผิววัตถุธรรมดา การวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อนมีความซับซ้อนมากกว่ากรณีของผิววัตถุดำ เนื่องจากผิววัตถุธรรมดามีรังสีที่ออกจากผิววัตถุทั้งจากการแผ่รังสีของผิววัตถุและการสะท้อนรังสีของผิววัตถุ เพื่อให้การวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อนโดยการแผ่รังสีของผิววัตถุธรรมดาทำได้สะดวกขึ้น เราจะตั้งสมมติฐานว่าผิวดังกล่าวเป็นผิวแบบทึบรังสี กระจายรังสีสมบูรณ์ และเป็นผิวเทา

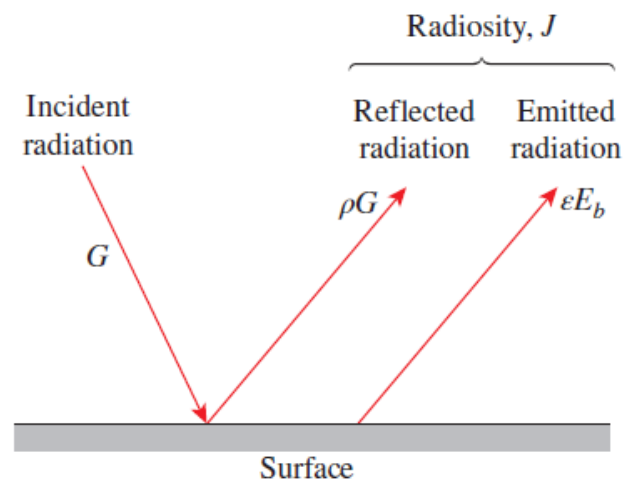
เมื่อพิจารณาวัตถุเทาที่ทึบรังสี (รูปที่ 8) รังสีทั้งหมดที่ออกจากวัตถุจะเท่ากับผลรวมของรังสีที่แผ่จากผิว และรังสีที่สะท้อนจากผิว สามารถแสดงในรูปสมการได้ดังนี้

$$J = \epsilon E_b + \rho G \quad (10)$$

เนื่องจาก  $\rho = 1 - \alpha$  เมื่อ  $\alpha$  เป็นสภาพดูดกลืนรังสีของผิว และ  $\alpha = \epsilon$  ดังนั้นเขียนสมการ (10) ได้ใหม่ดังนี้

$$J = \epsilon E_b + (1 - \epsilon) G \quad (11)$$

เมื่อ	J	คือ รังสีทั้งหมดที่ออกจากผิวของวัตถุเทา ( $W m^{-2}$ )
	$E_b$	คือ รังสีทั้งหมดที่แผ่จากวัตถุดำ ถ้าวัตถุดำมีอุณหภูมิเท่ากับวัตถุเทา ( $W m^{-2}$ )
	G	คือ รังสีทั้งหมดที่ตกกระทบผิว ( $W m^{-2}$ )
	$\rho$	คือ สภาพสะท้อนรังสีของผิว (-)
	$\epsilon$	คือ สภาพแผ่รังสีของผิว (-)



รูปที่ 8 รังสีที่ตกกระทบ และรังสีที่ออกจากผิววัตถุเทา เมื่อ  $G$  เป็นรังสีทั้งหมดที่ตกกระทบ  $\rho$  เป็นสภาพสะท้อนรังสีของผิววัตถุเทา  $\epsilon$  เป็นสภาพแผ่รังสีของผิววัตถุเทา และ  $E_b$  เป็นรังสีทั้งหมดที่แผ่จากวัตถุดำที่อุณหภูมิเท่ากับวัตถุเทาดังกล่าว (Çengel & Ghajar, 2020)

ในการถ่ายเทความร้อนโดยการแผ่รังสี ผิวของวัตถุจะสูญเสียความร้อนโดยการแผ่รังสีและจะได้รับความร้อนโดยการดูดกลืนรังสีที่แผ่หรือสะท้อนมาจากผิวอื่น ๆ โดยอัตราพลังงานรังสีสุทธิที่ผิวได้รับหรือสูญเสีย ( $\dot{Q}$ ) สามารถเขียนในรูปสมการได้ดังนี้

$$\dot{Q} = \text{รังสีที่ออกจากผิว} - \text{รังสีที่ตกกระทบผิว}$$

$$\dot{Q} = AJ - AG \quad (12)$$

หรือ 
$$\dot{Q} = A(J - G) \quad (13)$$

- เมื่อ
- A คือ พื้นที่ของผิว ( $\text{m}^2$ )
  - J คือ รังสีทั้งหมดที่ออกจากผิว ( $\text{W m}^{-2}$ )
  - G คือ รังสีทั้งหมดที่ตกกระทบผิว ( $\text{W m}^{-2}$ )

จากสมการ (11) จะได้ว่า

$$G = \frac{J - \epsilon E_b}{1 - \epsilon} \quad (14)$$



แทน  $G$  จากสมการ (14) ในสมการ (13) จะได้

$$\dot{Q} = A \left( J - \frac{J - \varepsilon E_b}{1 - \varepsilon} \right) \quad (15)$$

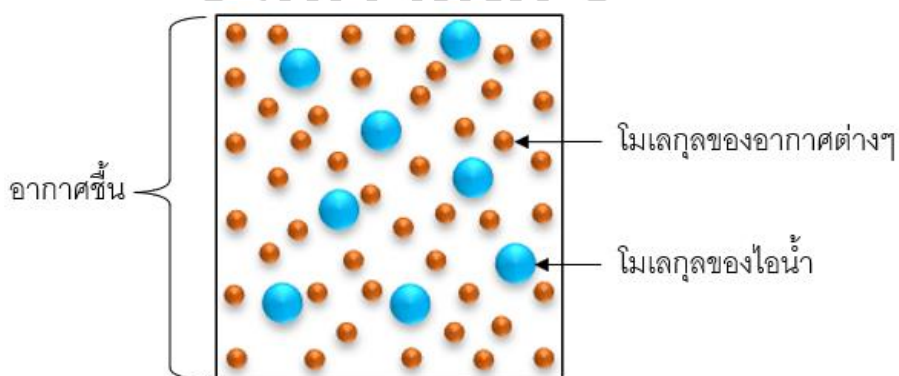
หรือ 
$$\dot{Q} = \frac{A\varepsilon}{1 - \varepsilon} (E_b - J) \quad (16)$$

## 2.1.2 พื้นฐานการอบแห้ง

การอบแห้งหรือการตากแห้ง (drying) เป็นกระบวนการที่นำเอาพลังงานความร้อนมาใช้เพื่อลดปริมาณน้ำที่อยู่ภายในวัสดุชื้น (moist material) โดยอาศัยอากาศเป็นตัวกลางในการถ่ายเทความร้อนไปยังวัสดุชื้น เพื่อให้ น้ำภายในวัสดุชื้นเกิดการระเหยออก ดังนั้นการอบแห้งจึงเป็นกระบวนการที่เกี่ยวข้องกับอันตรกิริยา (interaction) ระหว่างอากาศชื้นและวัสดุชื้น

### 2.1.2.1 อากาศชื้น

อากาศเป็นของผสมที่ประกอบด้วยโมเลกุลของก๊าซต่าง ๆ และไอน้ำ อากาศที่ไม่มีไอน้ำผสมอยู่จะเรียกว่า อากาศแห้ง (dry air) ส่วนอากาศที่มีไอน้ำผสมอยู่จะเรียกว่า อากาศชื้น (moist air) (รูปที่ 9) ซึ่งอากาศแห้งสามารถดูดกลืนไอน้ำแล้วกลายเป็นอากาศชื้นได้ โดยปริมาณไอน้ำสูงสุดที่สามารถอยู่ในอากาศชื้นได้ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของอากาศชื้นและปริมาณไอน้ำในอากาศชื้นนั้น อากาศชื้นที่มีปริมาณไอน้ำสูงสุดจะอยู่ในสภาพอิ่มตัว ถ้าเพิ่มไอน้ำให้กับอากาศชื้นดังกล่าว ไอน้ำส่วนเกินจะเกิดการควบแน่นกลายเป็นน้ำในสถานะของเหลว เราสามารถทำให้ไอน้ำอยู่ในสภาพอิ่มตัวได้ โดยการลดอุณหภูมิหรือเพิ่มปริมาณไอน้ำในอากาศนั้น หรือกระทำทั้งสองอย่าง



รูปที่ 9 องค์ประกอบของอากาศชื้น

สมบัติของอากาศชื้นสามารถบอกได้ด้วยตัวแปรต่าง ๆ ดังนี้ (Wilhelm, 1976)

- 1) อัตราส่วนความชื้น (humidity ratio,  $w$ ) หรือความชื้นสมบูรณ์ (absolute humidity) เป็นมวลของไอน้ำในอากาศชื้นต่อหนึ่งหน่วยมวลของอากาศแห้ง ซึ่งมีสมการคำนวณดังนี้

$$w = 0.62198 \frac{p_v}{p - p_v} \quad (17)$$

- เมื่อ  $w$  คือ อัตราส่วนความชื้น ( $\text{kg kg}^{-1}$ )  
 $p_v$  คือ ความดันไอน้ำในอากาศชื้น (kPa)  
 $p$  คือ ความดันบรรยากาศ (kPa)

กรณีที่อากาศชื้นอยู่ในสภาวะอิ่มตัว เราสามารถใช้สมการ (17) คำนวณอัตราส่วนความชื้นในสภาวะอิ่มตัว ( $w_s$ ) ได้ โดยแทนค่า  $p_v$  ด้วย  $p_{vs}$  และถ้าคำนวณที่อุณหภูมิกระเปาะเปียกจะแทน  $p_{vs}$  ด้วย  $p_{vs}^*$  และ  $w_s$  เป็น  $w_s^*$

- 2) เอนทัลปี (enthalpy,  $h$ ) เป็นพลังงานความร้อนในอากาศชื้นต่อหนึ่งหน่วยมวลอากาศแห้ง กรณีที่ใช้ค่าอ้างอิงเอนทัลปีเท่ากับศูนย์ที่อุณหภูมิ  $0^\circ\text{C}$  เราสามารถแทนความสัมพันธ์ระหว่างเอนทัลปีกับอุณหภูมิได้ในรูปสมการเอมไพริคัลดังนี้

$$h = 1.006 T' + w(2501 + 1.775 T'); \quad -50 \leq T' \leq 110 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (18)$$

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

- 3) ความดันไอน้ำ (vapor pressure,  $p_v$ ) เนื่องจากอากาศชื้นประกอบด้วยไอน้ำและก๊าซต่าง ๆ องค์ประกอบแต่ละชนิดจะมีความดันย่อย (partial pressure) กรณีของไอน้ำจะเรียกความดันย่อยนี้ว่า ความดันไอน้ำ กรณีของไอน้ำอิ่มตัวจะเรียกความดันย่อยนี้ว่า ความดันไอน้ำอิ่มตัว (saturated vapor pressure,  $p_{vs}$ ) ซึ่งทั้งความดันไอน้ำและความดันไอน้ำอิ่มตัวสามารถคำนวณได้จากสมการเอมไพริคัล ต่อไปนี้

กรณีของความดันไอน้ำอิ่มตัว

$$\ln(p_{vs}) = 24.2779 - \frac{6238.64}{T} - 0.344438 \ln(T); \quad 233.16 \leq T \leq 273.16 \quad (19)$$

$$\begin{aligned} \ln(p_{vs}) = & \frac{-7511.52}{T} + 89.63121 + 0.023998970T \\ & - 1.1654551 \times 10^{-5} T^2 - 1.2810336 \times 10^{-8} T^3 \\ & + 2.0998405 \times 10^{-11} T^4 - 12.150799 \ln(T); \quad 273.16 \leq T \leq 393.16 \end{aligned} \quad (20)$$

เมื่อ  $p_{vs}$  คือ ความดันไอน้ำอิ่มตัว (kPa)

$T$  คือ อุณหภูมิกระเปาะแห้งของอากาศชื้นเมื่ออากาศนั้นเริ่มอิ่มตัว (K)

กรณีที่คำนวณความดันไอน้ำอิ่มตัวที่อุณหภูมิกระเปาะเปียก สัญลักษณ์ในสมการ (19) และ (20) จะเปลี่ยนจาก  $p_{vs}$  เป็น  $p_{vs}^*$  และจาก  $T$  เป็น  $T^*$

กรณีของความดันไอน้ำ

$$p_v = \frac{p_w}{0.62198 + w} \quad (21)$$

เมื่อ  $p_v$  คือ ความดันไอน้ำในอากาศชื้น (kPa)

$p$  คือ ความดันบรรยากาศ (kPa)

$w$  คือ อัตราส่วนความชื้น ( $\text{kg kg}^{-1}$ )

4) ดิกรีความอิ่มตัว (degree of saturation,  $\mu$ ) เป็นอัตราส่วนความชื้นของอากาศชื้นต่ออัตราส่วนความชื้นเมื่ออากาศชื้นนั้นเริ่มอิ่มตัว สามารถคำนวณได้จากสมการดังนี้

$$\mu = \frac{w}{w_s} \quad (22)$$

เมื่อ  $\mu$  คือ ดิกรีความอิ่มตัว (-)

$w$  คือ อัตราส่วนความชื้น ( $\text{kg kg}^{-1}$ )

$w_s$  คือ อัตราส่วนความชื้นเมื่ออากาศชื้นอิ่มตัว ( $\text{kg kg}^{-1}$ )

- 5) ความชื้นสัมพัทธ์ (relative humidity, rh) เป็นอัตราส่วนของความดันไอน้ำต่อความดันไอน้ำอิ่มตัว โดยความชื้นสัมพัทธ์จะเป็นตัวบ่งชี้ความสามารถในการดูดกลืนไอน้ำของอากาศ ซึ่งสามารถคำนวณได้ดังสมการ

$$rh = \frac{p_v}{p_{vs}} \quad (23)$$

หรือ

$$rh = \frac{\mu}{1 - (1 - \mu) \frac{p_{vs}}{p}} \quad (24)$$

เมื่อ	rh	คือ ความชื้นสัมพัทธ์ (-)
	$p_v$	คือ ความดันไอน้ำ (kPa)
	$p_{vs}$	คือ ความดันไอน้ำอิ่มตัว (kPa)
	$p$	คือ ความดันบรรยากาศ (kPa)
	$\mu$	คือ ดิกรีความชื้น (-)

- 6) อุณหภูมิกระเปาะแห้ง (dry bulb temperature, T) เป็นอุณหภูมิของอากาศซึ่งวัดได้ด้วยเทอร์โมมิเตอร์กระเปาะแห้งหรือเทอร์โมมิเตอร์ทั่วไป
- 7) อุณหภูมิกระเปาะเปียก (wet bulb temperature,  $T^*$ ) เป็นอุณหภูมิของอากาศซึ่งวัดด้วยเทอร์โมมิเตอร์กระเปาะเปียก
- 8) ปริมาตรจำเพาะ (specific volume,  $v$ ) เป็นปริมาตรของอากาศขึ้นต่อหนึ่งหน่วยมวลอากาศแห้ง จากการตั้งสมมติฐานว่าอากาศขึ้นเป็นก๊าซในอุดมคติ เราสามารถเขียนสมการของความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรจำเพาะกับตัวแปรอื่น ๆ ของอากาศขึ้นได้ดังนี้

$$v = \frac{R_a T}{p} (1 + 1.6078w) \quad (25)$$

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 ค่าคงตัวของก๊าซ (gas constant) ( $N m kg^{-1} K^{-1}$ )

- 9) อุณหภูมิจุดน้ำค้าง (dew point temperature,  $T_{dp}$ ) ถ้าเราลดอุณหภูมิของอากาศชื้น โดยไม่มีการเพิ่มหรือลดปริมาณไอน้ำในอากาศชื้น ที่อุณหภูมิค่าหนึ่งไอน้ำในอากาศชื้น นั้นจะเริ่มควบแน่น อุณหภูมิตรงจุดดังกล่าวจะเรียกว่า อุณหภูมิจุดน้ำค้าง ซึ่งสามารถหาค่าได้จากสมการเอมไพริคัล ดังนี้

$$T'_{dp} = 5.994 + 12.41a + 0.4273a^2; \quad -50 \leq T' \leq 0 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (26)$$

$$T'_{dp} = 6.983 + 14.38a + 1.079a^2; \quad 0 \leq T' \leq 50 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (27)$$

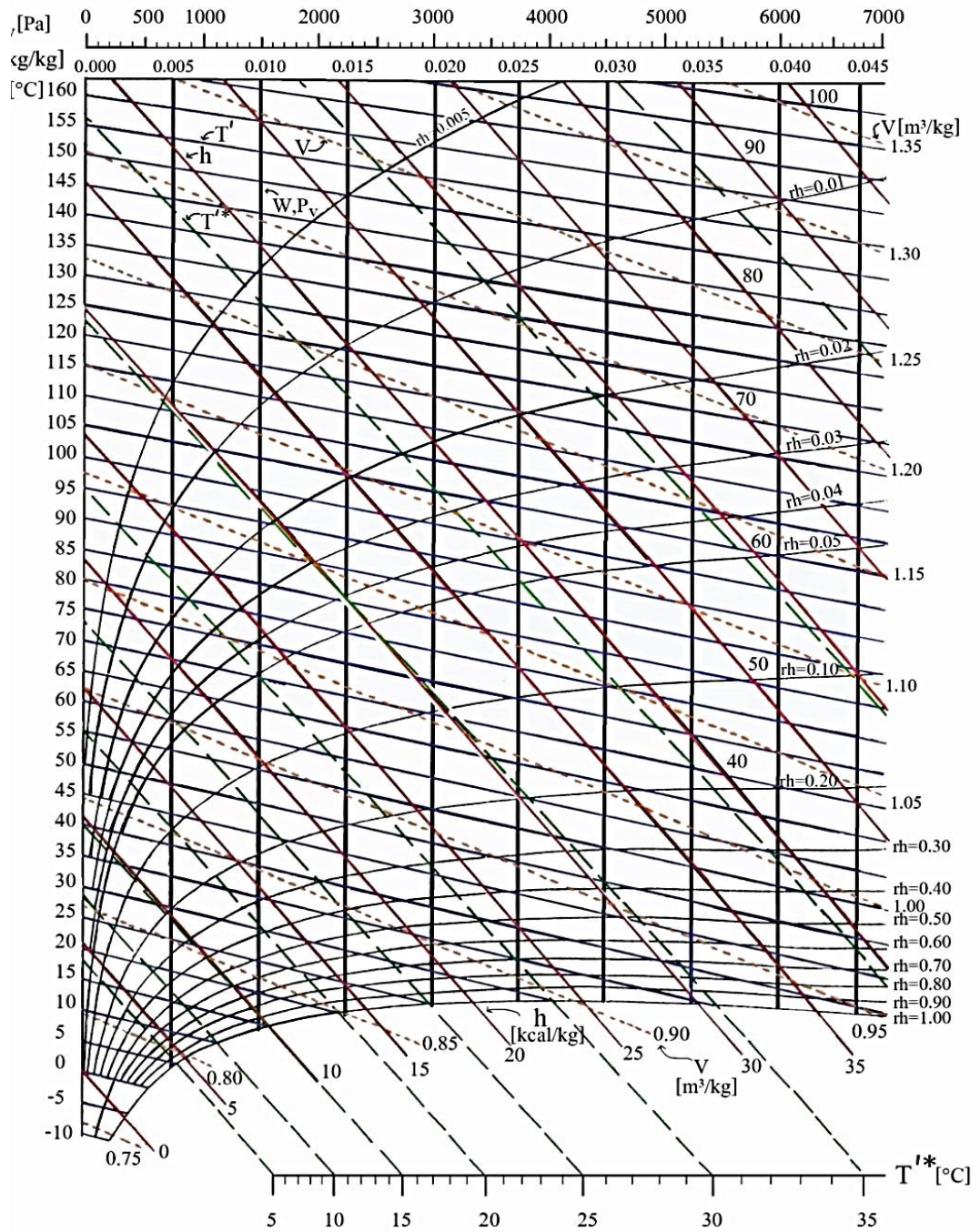
$$T'_{dp} = 13.80 + 9.478a + 1.991a^2; \quad 50 \leq T' \leq 110 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (28)$$

เมื่อ	$a = \ln(p_v)$	
โดยที่	$T'_{dp}$	คือ อุณหภูมิจุดน้ำค้าง ( $^\circ\text{C}$ )
	$T'$	คือ อุณหภูมิกระเปาะแห้ง ( $^\circ\text{C}$ )
	$p_v$	คือ ความดันไอน้ำ (kPa)

### แผนภูมิอากาศชื้น (Psychrometric chart)

สมบัติของอากาศชื้นทุกตัวมีความสัมพันธ์ซึ่งกันและกัน โดยสมบัติของอากาศชื้น 7 ตัวแปร ได้แก่ อัตราส่วนความชื้น ( $w$ ) เอนทัลปี ( $h$ ) ความดันไอน้ำ ( $p_v$ ) ความชื้นสัมพัทธ์ ( $rh$ ) อุณหภูมิกระเปาะแห้ง ( $T$ ) อุณหภูมิกระเปาะเปียก ( $T^*$ ) และปริมาตรจำเพาะ ( $v$ ) สามารถแสดงความสัมพันธ์ของตัวแปรทั้ง 7 ในรูปแผนภูมิที่เรียกว่า แผนภูมิอากาศชื้น ซึ่งมีอยู่หลายรูปแบบ ในที่นี้จะแสดงตามรูปแบบของมอริเยร์ (Mollier diagram of humid air) (รูปที่ 10) ซึ่งแผนภูมิอากาศชื้นของมอริเยร์ประกอบด้วย เส้นกราฟสมบัติของอากาศชื้นทั้ง 7 ตัวแปรข้างต้น โดยหากเราทราบค่าของตัวแปร 2 ตัว เราจะสามารถอ่านค่าตัวแปรอีก 5 ตัวที่เหลือได้



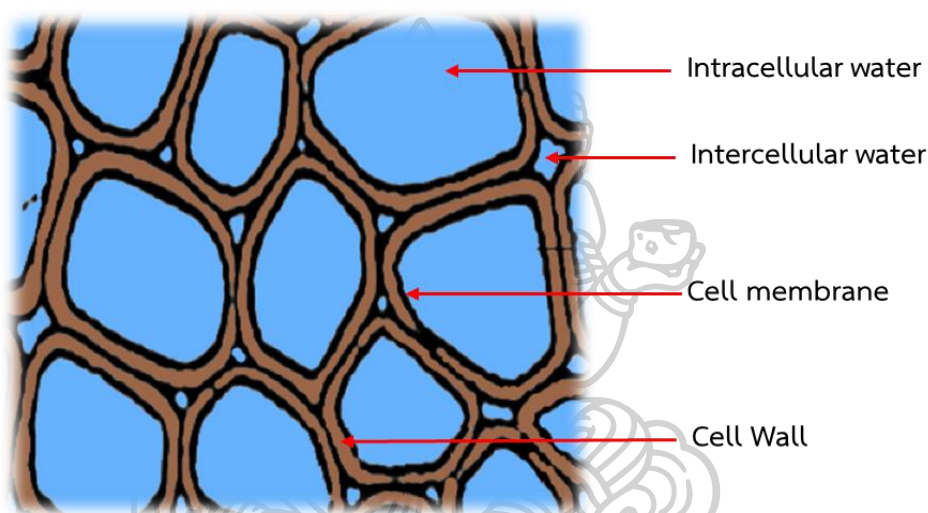


รูปที่ 10 แผนภูมิอากาศชื้นรูปแบบของมอริเยร์ (Maloney, 2008)

### 2.1.2.2 วัสดุชื้น (moist materials)

วัสดุชื้น หมายถึง วัสดุที่ประกอบด้วยของแข็งและความชื้น ซึ่งโดยทั่วไปความชื้นจะหมายถึง น้ำที่กระจายตัวอยู่ระหว่างของแข็งภายในวัสดุชิ้นนั้น

วิธีการยึดเกาะระหว่างน้ำกับของแข็งที่ประกอบเป็นวัสดุชิ้นนั้นเกิดขึ้นได้หลายแบบ ทั้งนี้ ขึ้นกับชนิดของวัสดุชิ้น กรณีของวัสดุทางชีวภาพ (biological materials) เช่น ผักและผลไม้ เป็นต้น ซึ่งเซลล์ของวัสดุทางชีวภาพจะมีน้ำเป็นองค์ประกอบสำคัญ โดยที่น้ำจะแทรกตัวอยู่ในช่องว่างระหว่างเซลล์และภายในเซลล์ (รูปที่ 11)



รูปที่ 11 โครงสร้างเซลล์ของวัสดุทางชีวภาพ (Khan et al., 2017)

น้ำที่อยู่ในวัสดุชื้นประกอบด้วย 2 ส่วน ได้แก่ ส่วนของน้ำที่ใช้สำหรับสร้างพันธะต่าง ๆ (bound water) เช่น พันธะไฮโดรเจน พันธะไฮโดรเจน น้ำส่วนนี้จะเกาะติดกับโครงสร้างที่เป็นของแข็งของวัสดุชื้น และน้ำอีกส่วน คือ น้ำอิสระ (free water) เป็นน้ำที่ไม่ได้ถูกนำไปใช้ในการสร้างพันธะใด ๆ ซึ่งอยู่ภายในช่องว่างของวัสดุชื้น โดยโมเลกุลของน้ำอิสระจะพร้อมที่จะเปลี่ยนสถานะจากของเหลวไปเป็นไอได้ทันทีเมื่อได้รับความร้อน

#### การบอกปริมาณความชื้น

ตามที่กล่าวไปข้างต้น การอบแห้งเป็นกระบวนการลดปริมาณความชื้นในวัสดุชื้น ดังนั้นเราจึงจำเป็นต้องทราบปริมาณความชื้นที่อยู่ในวัสดุชื้น ซึ่งการบอกปริมาณความชื้นสามารถบอกได้ 2 วิธี ดังนี้

- 1) ความชื้นมาตรฐานแห้ง (moisture dry basis) เป็นอัตราส่วนของมวลน้ำต่อมวลของแข็ง เขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$M_{\text{dry}} = \frac{m_w}{m_s} \quad (29)$$

เมื่อ  $M_{\text{dry}}$  คือ ความชื้นมาตรฐานแห้ง ( $\text{kg kg}^{-1}$ )

$m_w$  คือ มวลของน้ำ (kg)

$m_s$  คือ มวลของของแข็ง (kg)

- 2) ความชื้นมาตรฐานเปียก (moisture wet basis) เป็นอัตราส่วนของมวลน้ำต่อมวลวัสดุขึ้น เขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$M_{\text{wet}} = \frac{m_w}{m_H} \quad (30)$$

เมื่อ  $M_{\text{wet}}$  คือ ความชื้นมาตรฐานเปียก ( $\text{kg kg}^{-1}$ )

$m_w$  คือ มวลของน้ำ (kg)

$m_H$  คือ มวลของวัสดุขึ้น (kg)

ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นมาตรฐานแห้งและความชื้นมาตรฐานเปียกสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$M_{\text{dry}} = \frac{M_{\text{wet}}}{1 - M_{\text{wet}}} \quad (31)$$

หรือ

$$M_{\text{wet}} = \frac{M_{\text{dry}}}{1 + M_{\text{dry}}} \quad (32)$$

### แอกติวิตีของน้ำ (water activity)

ค่าแอกติวิตีของน้ำเป็นค่าที่บ่งบอกระดับของปริมาณน้ำต่ำสุดในวัสดุขึ้นที่จุลินทรีย์ (micro-organism) แต่ละชนิดจะสามารถนำน้ำไปใช้ในการเจริญเติบโตและใช้ในการเกิดปฏิกิริยาเคมีต่าง ๆ โดยค่าแอกติวิตีของน้ำ ( $a_w$ ) สามารถนิยามได้ตามสมการ

$$a_w = \frac{p_{vp}}{p_{vs}} \quad (33)$$

เมื่อ  $a_w$  คือ แอกติวิตีของน้ำ (-)

$p_{vp}$  คือ ความดันไอน้ำของวัสดุขึ้น (kPa)

$p_{vs}$  คือ ความดันไอน้ำอิ่มตัว (kPa)



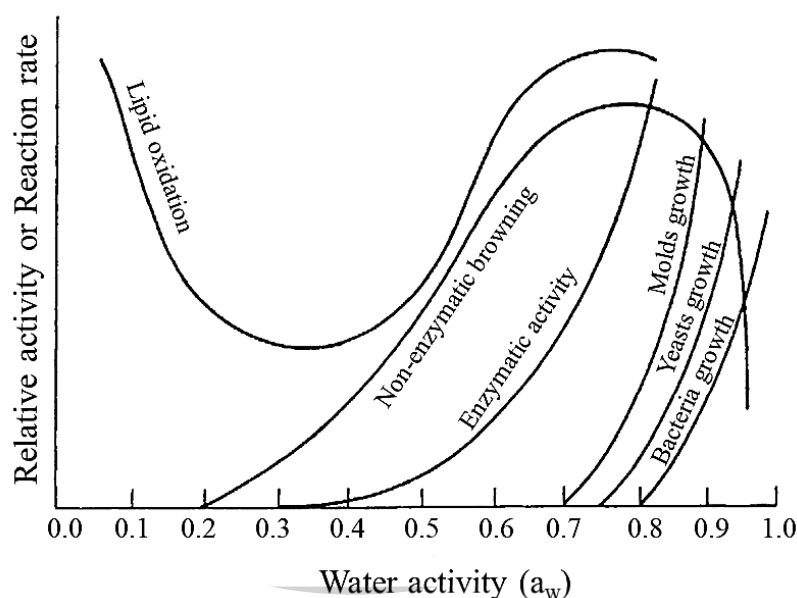
จากสมการ (33) จะเห็นว่า  $a_w$  จะแปรผันตรงกับความดันไอน้ำหรือน้ำไออิสระที่อยู่ภายในวัสดุชิ้น

เนื่องจากความสัมพันธ์เท่ากับอัตราส่วนของความดันไอน้ำต่อความดันไอน้ำอิ่มตัว ดังนั้นในสภาวะสมดุลทางความชื้นระหว่างวัสดุชิ้นกับอากาศที่แวดล้อมวัสดุนั้น ความดันไอน้ำในอากาศจะเท่ากับความดันไอน้ำของวัสดุชิ้น ซึ่งเราจะได้ว่า

$$a_w = rh \quad (34)$$

เมื่อ  $rh$  คือ ความชื้นสัมพัทธ์ (-)

ค่าแอกติวิตีของน้ำที่แบคทีเรียเกือบทุกชนิดไม่สามารถเจริญเติบโตได้จะอยู่ที่  $a_w$  ต่ำกว่า 0.8 ส่วนราและยีสต์ไม่สามารถเจริญเติบโตได้ที่ค่า  $a_w$  ต่ำกว่า 0.7 และการป้องกันการเสื่อมสภาพหรือการเน่าเสียของวัสดุชิ้นจำพวกอาหาร ค่า  $a_w$  ต้องมีค่าต่ำกว่า 0.6 ดังแสดงในรูปที่ 12



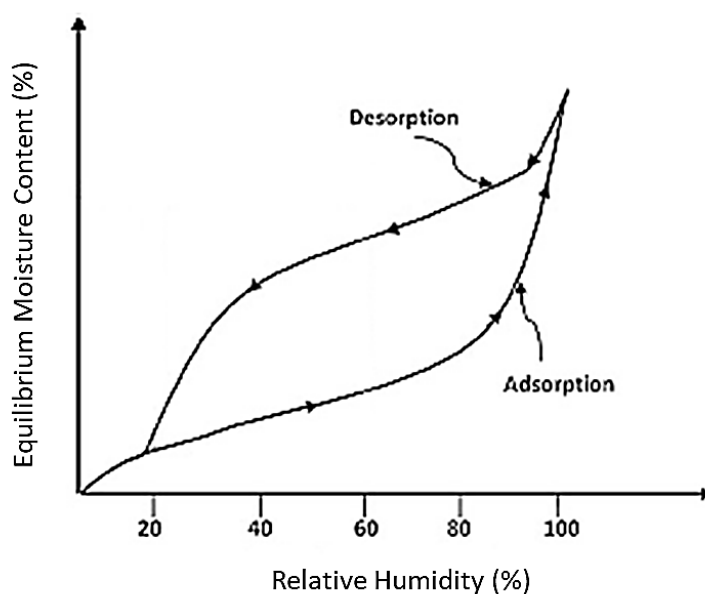
รูปที่ 12 การเปลี่ยนแปลงคุณภาพของวัสดุชิ้นตามค่าแอกติวิตีของน้ำ (Labuza et al., 1972)

### ความชื้นสมดุล (equilibrium moisture content)

พิจารณาน้ำในวัสดุชิ้นที่มีความดันไอน้ำ  $p_v$  เมื่อนำวัสดุชิ้นดังกล่าวไปวางในอากาศแวดล้อมที่มีความดันไอน้ำ  $p_{va}$  ถ้า  $p_v > p_{va}$  วัสดุชิ้นจะคายความชื้นสู่อากาศแวดล้อมจนกระทั่ง  $p_v = p_{va}$  หรือวัสดุชิ้นอยู่ในสภาวะสมดุลกับอากาศแวดล้อม เราจะเรียกความชื้นของวัสดุชิ้นในสภาวะสมดุลว่า “ความชื้นสมดุล” ซึ่งในสภาวะนี้วัสดุชิ้นจะไม่มี การดูดหรือคายความชื้นเพิ่มเติม

ความชื้นสมดุลขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุชิ้น อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศที่อยู่แวดล้อมวัสดุนั้น โดยความชื้นสมดุลสามารถเกิดได้ทั้งการดูดความชื้นหรือคายความชื้นของ

วัสดุขึ้นจนเข้าสู่สภาวะสมดุล ถ้าเราทำการเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นสมดุลกับความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศแวดล้อมที่อุณหภูมิคงที่ เราจะได้กราฟที่เรียกว่า ซอร์บชันไอโซเทอม (sorption isotherm) ซึ่งมีได้ 2 รูปแบบ คือ แอดซอร์บชันไอโซเทอม (adsorption isotherm) ที่เกิดจากการดูดความชื้น และเดซอร์บชันไอโซเทอม (desorption isotherm) ที่เกิดจากการคายความชื้น โดยเราสามารถให้วัสดุขึ้นคายความชื้นเพื่อสร้างเดซอร์บชันไอโซเทอม จากนั้นให้วัสดุขึ้นดูดความชื้นเพื่อสร้างแอดซอร์บชันไอโซเทอมที่อุณหภูมิคงที่ค่าเดียวกัน ซึ่งกราฟของเดซอร์บชันไอโซเทอมกับแอดซอร์บชันไอโซเทอมจะมีลักษณะที่เรียกว่า ฮิสเทอเรซิส (hysteresis) ดังรูปที่ 13



รูปที่ 13 เดซอร์บชันไอโซเทอมและแอดซอร์บชันไอโซเทอม (Prakash & Kumar, 2017)

### 2.1.2.3 กลไกการอบแห้ง

การอบแห้ง (drying) เป็นกระบวนการลดความชื้นภายในวัสดุขึ้น โดยการทำให้ น้ำที่อยู่ในวัสดุขึ้นเกิดการระเหยออก ถ้าการระเหยของน้ำเกิดจากความร้อนจะเรียกว่า การอบแห้งด้วยความร้อน (thermal drying) โดยกลไกของการอบแห้งดังกล่าวจะเกี่ยวข้องกับ 2 กระบวนการที่เกิดขึ้นพร้อมกัน ดังนี้

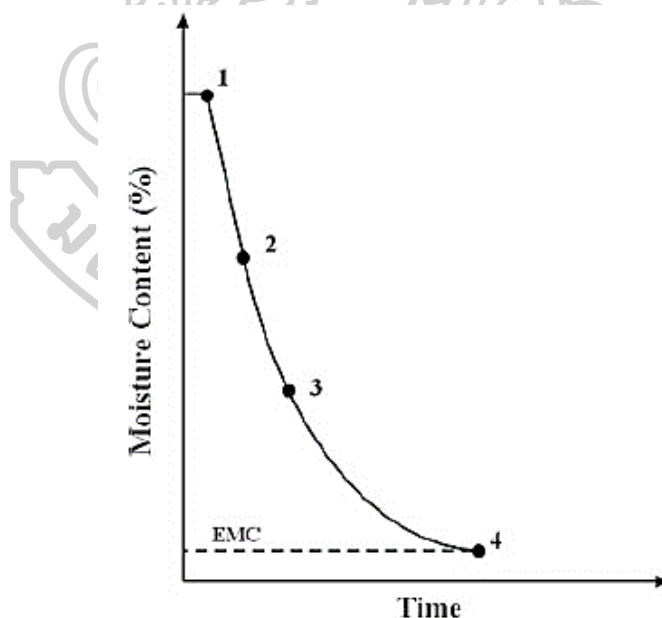
- 1) กระบวนการถ่ายเทความร้อนระหว่างสิ่งแวดล้อมกับวัสดุขึ้น ซึ่งความร้อนที่ถ่ายเทมายังวัสดุขึ้นอาจเกิดโดยการนำความร้อน การพาความร้อน หรือการแผ่รังสี วิธีใดวิธีหนึ่งหรือหลายวิธีร่วมกัน ความร้อนนี้จะทำให้อุณหภูมิของวัสดุขึ้นเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ความดันไอของวัสดุขึ้นเพิ่มขึ้นด้วย ในสภาวะนี้ความดันไอของวัสดุขึ้นจะสูงกว่าความดันไอของ

อากาศโดยรอบ ความแตกต่างของความดันนี้ทำให้เกิดการระเหยของความชื้นจากผิวของวัสดุขึ้นสู่อากาศ การระเหยดังกล่าวจะดำเนินต่อไปจนกว่าจะถึงสภาวะสมดุล

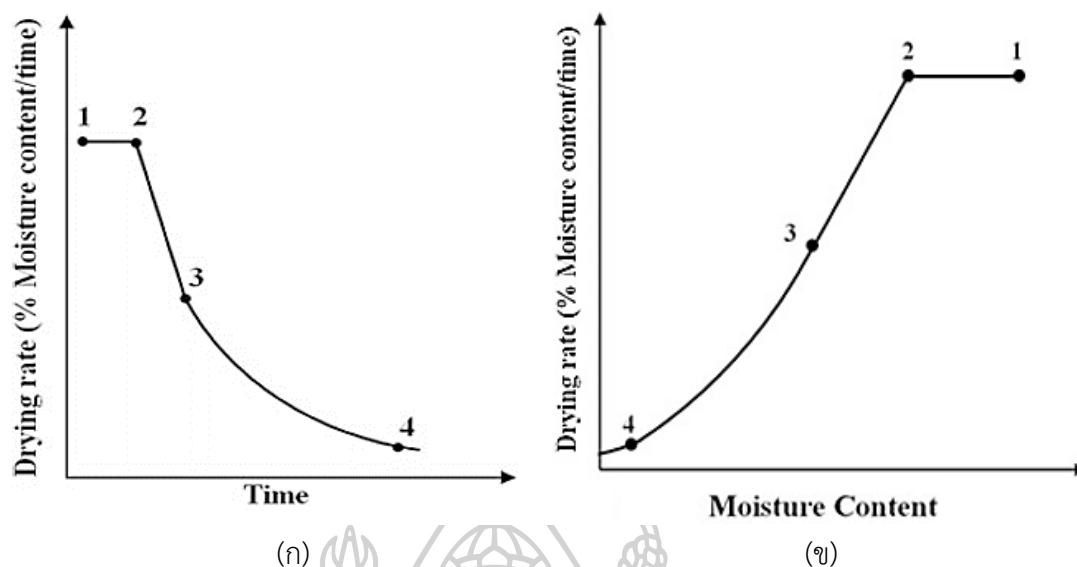
- 2) กระบวนการถ่ายเทมวลของน้ำจากภายในวัสดุขึ้นไปยังอากาศแวดล้อม สำหรับการอบแห้ง การถ่ายเทมวลเป็นกระบวนการถ่ายเทมวลของความชื้น (น้ำ) ซึ่งเกิดขึ้น 2 บริเวณ คือ การถ่ายเทมวลภายนอก ซึ่งเป็นการระเหยของความชื้นจากผิวของวัสดุขึ้นไปยังอากาศโดยรอบ และการถ่ายเทมวลภายในจะเป็นการเคลื่อนตัวของความชื้นจากภายในสู่บริเวณผิวของวัสดุขึ้น

### การเปลี่ยนแปลงความชื้นของวัสดุขึ้นระหว่างการอบแห้ง

พิจารณาการอบแห้งวัสดุที่มีความชื้นสูง เช่น ผลผลิตทางการเกษตร โดยระหว่างกระบวนการอบแห้งกำลังดำเนินอยู่ ความชื้นของผลิตภัณฑ์จะลดลงตามเวลา และมีลักษณะตามกราฟในรูปที่ 14 ซึ่งเรียกรูปดังกล่าวว่า กราฟการแห้ง (drying curve) และเรียกอัตราการเปลี่ยนแปลงของความชื้นต่อหนึ่งหน่วยเวลาว่า อัตราการแห้ง (drying rate) หากนำค่าอัตราการแห้งมาเขียนกราฟกับเวลา จะได้กราฟตามรูปที่ 15 (ก) และกราฟระหว่างอัตราการแห้งกับความชื้นจะมีลักษณะดังรูปที่ 15 (ข)



รูปที่ 14 กราฟการแห้ง ซึ่งแสดงการลดลงของความชื้นตามเวลา เมื่อ EMC คือ ความชื้นสมดุลของผลิตภัณฑ์ (Prakash & Kumar, 2017)



รูปที่ 15 (ก) กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการแห้งกับเวลา

(ข) กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการแห้งกับความชื้นของผลิตภัณฑ์ (Prakash & Kumar, 2017)

จากกราฟรูปที่ 14 และ 15 การลดลงของความชื้นสามารถแบ่งได้ 2 ช่วง ดังนี้

- ช่วงที่ 1-2 เป็นช่วงอัตราการแห้งคงที่ (constant drying rate period) ในช่วงนี้จะเกิดกระบวนการระเหยน้ำจากผิวของวัสดุ โดยน้ำดังกล่าวจะเป็นน้ำอิสระ
- ช่วงที่ 2-4 เป็นช่วงอัตราการแห้งลดลง (falling rate period) ในช่วงนี้จะเกิดกระบวนการระเหยน้ำที่อยู่ภายในวัสดุ โดยเป็นน้ำที่มีแรงยึดเกาะกับโครงสร้างของวัสดุ ทำให้ต้องใช้พลังงานมากกว่าการระเหยน้ำอิสระ ส่งผลให้อัตราการแห้งลดลง โดยช่วงอัตราการแห้งลดลงนี้อาจแบ่งเป็น 2 ช่วงย่อย ๆ ได้อีก คือ อัตราการแห้งลดลงช่วงที่หนึ่ง (first falling rate period, 2-3) อัตราการแห้งของช่วงนี้จะลดลงในสภาวะคงตัว (ความชื้นแปรผันตรงกับเวลา) และอัตราการแห้งลดลงช่วงที่สอง (second falling rate period, 3-4) เป็นช่วงที่อัตราการแห้งลดลงอย่างช้า ๆ

สำหรับความชื้นของผลิตภัณฑ์ที่เปลี่ยนจากช่วงอัตราการแห้งคงที่ไปสู่ช่วงอัตราการแห้งลดลงจะเรียกว่า ความชื้นวิกฤต (critical moisture content)

#### 2.1.2.4 แบบจำลองของกระบวนการอบแห้ง

เมื่อกระบวนการอบแห้งเริ่มต้นขึ้น ความชื้นของวัสดุจะลดลงตามเวลาที่ใช้ในการอบแห้ง อัตราการลดลงของความชื้นของวัสดุดังกล่าวจะขึ้นอยู่กับตัวแปรต่าง ๆ หลายตัวแปร ซึ่งการสร้างแบบจำลองเป็นวิธีการหนึ่งที่จะช่วยหาความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการลดลงของความชื้นของวัสดุที่กำลังอบแห้งกับตัวแปรต่าง ๆ ที่มีผลต่ออัตราการลดลงของความชื้น แบบจำลองที่ได้จะช่วยให้เข้าใจกระบวนการอบแห้งและอิทธิพลของตัวแปรต่าง ๆ ต่อการแห้งของวัสดุได้ดียิ่งขึ้น โดยทั่วไปแล้ววิธีการสร้างแบบจำลองมีอยู่ 2 วิธี ได้แก่ วิธีการสร้างแบบจำลองโดยใช้วิธีการทางคณิตศาสตร์ (mathematical model) และวิธีการสร้างแบบจำลองโดยใช้ข้อมูลการทดลอง ซึ่งแต่ละวิธีมีรายละเอียดและตัวอย่างของแบบจำลองดังนี้

- 1) วิธีการสร้างแบบจำลองโดยใช้วิธีการทางคณิตศาสตร์ (mathematical model) เป็นการศึกษาลักษณะทางกายภาพของกระบวนการอบแห้งที่เราต้องการสร้างแบบจำลองแล้วเขียนออกมาเป็นสมการทางคณิตศาสตร์ จากนั้นทำการหาผลเฉลยสมการของแบบจำลอง โดยตัวอย่างของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกระบวนการอบแห้ง เช่น แบบจำลองที่พิจารณาวัสดุขึ้นทั้งชิ้นหรือหลายชิ้นวางเรียงเป็นชั้นบาง (thin layer model) ซึ่งการสร้างแบบจำลองนี้จะพิจารณาอัตราการแห้งของวัสดุทั้งชิ้น โดยสร้างแบบจำลองตามลักษณะของกราฟการแห้ง ซึ่งโดยทั่วไปแล้วอัตราการแห้งจะแบ่งได้ 2 ช่วง ได้แก่ ช่วงอัตราการแห้งคงที่ และช่วงอัตราการแห้งลดลง โดยแต่ละช่วงจะสร้างแบบจำลองดังนี้
  - ช่วงอัตราการแห้งคงที่ เป็นช่วงที่เกิดกระบวนการระเหยของน้ำอิสระ (free water) ออกจากผิวของวัสดุ อัตราการแห้งจะสามารถเขียนได้ดังสมการ

$$\frac{dm_w}{dt} = \frac{h_c A}{\ell} (T_a - T_w) \quad (35)$$

เมื่อ $\frac{dm_w}{dt}$	คือ	อัตราการระเหยของน้ำ ( $\text{kg s}^{-1}$ )
$h_c$	คือ	สภาพนำความร้อน (thermal conductivity) ของอนุภาคอากาศบาง ๆ ที่ล้อมรอบวัสดุ ( $\text{W m}^{-2} \text{K}^{-1}$ )
$\ell$	คือ	ความร้อนแฝง (latent heat) ของการระเหยของน้ำ ( $\text{J kg}^{-1}$ )
$T_w$	คือ	อุณหภูมิผิวของวัสดุ ( $^{\circ}\text{C}$ )
$T_a$	คือ	อุณหภูมิของอากาศร้อนที่ใช้ออบแห้งวัสดุ ( $^{\circ}\text{C}$ )
$A$	คือ	พื้นที่ผิวของวัสดุ (m)

- ช่วงอัตราการแห้งลดลง แบบจำลองการลดลงของความชื้นในช่วงนี้ส่วนใหญ่เป็นแบบจำลองเอมไพริคัล ดังตัวอย่างในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ตัวอย่างแบบจำลองการอบแห้งชั้นบาง (Prakash & Kumar, 2017)

แบบจำลอง	สมการ
Lewis model	$MR = \exp(-kt)$
Page model	$MR = \exp(-kt^n)$
Modified page models	$MR = \exp[-(kt)^n]$
Henderson and Pabis model	$MR = a_1 \exp(-kt)$
Logarithmic model	$MR = a_2 \exp(-kt) + a_3$
Wang and Singh model	$MR = 1 + a_4 t + a_5 t^2$
Two-term model	$MR = a_6 \exp(-kt) + a_7 \exp(-gt)$

เมื่อ MR คือ อัตราส่วนความชื้นของวัสดุ (-)  
 k คือ ค่าคงตัวการอบแห้ง (drying constant) ขึ้นกับชนิดของวัสดุ ( $s^{-1}$ )  
 t คือ เวลา (s)  
 n คือ ค่าคงตัวที่ได้จากการฟิตแบบจำลองกับผลการทดลองอบแห้งชั้นบาง  
 $a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, a_6, a_7$  คือ สัมประสิทธิ์ของแบบจำลองที่ขึ้นกับวัสดุ (-)

โดยที่ MR มีความสัมพันธ์กับความชื้นของวัสดุ ดังสมการ

$$MR = \frac{M - M_e}{M_0 - M_e} \quad (36)$$

เมื่อ M คือ ความชื้นของวัสดุมาตรฐานแห้งที่เวลา t ( $kg\ kg^{-1}$ )  
 $M_0$  คือ ความชื้นเริ่มต้นของวัสดุมาตรฐานแห้ง ( $kg\ kg^{-1}$ )  
 $M_e$  คือ ความชื้นสมดุลของวัสดุมาตรฐานแห้ง ( $kg\ kg^{-1}$ )

- 2) วิธีการสร้างแบบจำลองจากข้อมูลการทดลอง วิธีการนี้จะนำเอาข้อมูลการทดลองอบแห้งที่เคยได้ทำการทดลองไว้แล้วมาเข้ากระบวนการทางคณิตศาสตร์เพื่อหาความสัมพันธ์ของตัวแปรต่าง ๆ ที่เราสนใจให้ออกมาในรูปของสมการทางคณิตศาสตร์ โดยตัวอย่างของแบบจำลองที่สร้างจากข้อมูลการทดลอง เช่น แบบจำลองสมการถดถอยที่มีเทอมจากตัวแปรอื่น (autoregressive with exogenous terms, ARX) การสร้างแบบ

จำลองด้วยวิธีนี้จะอาศัยตัวแปรภายนอกเป็นข้อมูลอินพุตของแบบจำลอง ซึ่งตัวแปรภายนอกนี้ไม่ขึ้นกับผลลัพธ์หรือเอาต์พุตของแบบจำลอง เช่น หากต้องการสร้างแบบจำลองเพื่อทำนายความชื้นของวัสดุที่กำลังอบแห้งในเครื่องแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ ก็สามารถใช้ตัวแปรภายนอก เช่น อุณหภูมิของอากาศแวดล้อม ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศแวดล้อม และความเข้มรังสีอาทิตย์ เป็นข้อมูลอินพุตได้ ดังนั้นแบบจำลองนี้ไม่จำเป็นต้องหาความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลอินพุตกับข้อมูลเอาต์พุต ซึ่งโครงสร้างของแบบจำลอง ARX ที่มีอินพุตเดียวและเอาต์พุตเดียว (Single input Single output, SISO) สามารถเขียนได้ดังสมการที่ 37

$$y(t) + a_1 y(t-1) + a_2 y(t-2) + \dots + a_{na} y(t-na) = b_1 u(t-nk) + \dots + b_{nb} u(t-nb-nk+1) + e(t) \quad (37)$$

เมื่อ  $y$  คือ เอาต์พุต  
 $u$  คือ อินพุต  
 $a$  คือ สัมประสิทธิ์ของเอาต์พุต  
 $b$  คือ สัมประสิทธิ์ของอินพุต  
 $na$  คือ ลำดับของเอาต์พุตในอดีตที่ส่งผลถึงเอาต์พุตเมื่อเวลา  $t$   
 $nb$  คือ ลำดับของอินพุตในอดีตที่ส่งผลต่อเอาต์พุตเมื่อเวลา  $t$   
 $nk$  คือ ลำดับของอินพุตในอดีตที่ใกล้ที่สุดที่ส่งผลต่อเอาต์พุตเมื่อเวลา  $t$   
 $e(t)$  คือ ค่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นที่เวลา  $t$

สมการที่ 37 สามารถเขียนให้อยู่ในรูปอย่างง่ายดังสมการที่ 38

$$A(z)y(t) = B(z)u(t-nk) + e(t) \quad (38)$$

โดย

$$A(z) = 1 + a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2} + \dots + a_{na} z^{-na} \quad (39)$$

$$B(z) = b_1 + b_2 z^{-1} + b_3 z^{-2} + \dots + b_{nb} z^{-nb+1} \quad (40)$$

เมื่อ  $A(z)$  คือ เทอมสัมประสิทธิ์ของเอาต์พุต  
 $B(z)$  คือ เทอมสัมประสิทธิ์ของอินพุต  
 $z$  คือ ตัวดำเนินการบอกความล่าช้า (delay operator)



### 2.1.3 เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์

การตากแห้งตามธรรมชาติ (natural sun drying) เป็นหนึ่งในวิธีการถนอมอาหารที่ใช้กันมาอย่างยาวนาน แม้กระทั่งในปัจจุบัน ประเทศที่กำลังพัฒนาส่วนใหญ่ก็ยังคงใช้วิธีการตากแห้งตามธรรมชาติ เนื่องจากวิธีการนี้สามารถทำได้ง่าย และใช้ต้นทุนน้อย แต่อย่างไรก็ดี วิธีการตากแห้งตามธรรมชาติยังคงมีปัญหาอยู่หลายด้าน เช่น ผลผลิตที่อยู่ที่อยู่ระหว่างการตากแห้งมักได้รับความเสียหายจากการเปลี่ยนแปลงสภาวะอากาศ เช่น ลม ฝน เป็นต้น การถูกแมลงและสัตว์ต่าง ๆ ครอบงวน นอกจากนี้ประสิทธิภาพในด้านการใช้ความร้อนที่ได้จากพลังงานแสงอาทิตย์ยังอยู่ในเกณฑ์ที่ค่อนข้างต่ำ เนื่องจากการตากแห้งวิธีนี้จะเกิดการสูญเสียความร้อนให้สิ่งแวดล้อมค่อนข้างมาก จากปัญหาดังกล่าว นักวิจัยด้านพลังงานแสงอาทิตย์จึงได้พัฒนาเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ (solar dryer) เพื่อใช้สำหรับอบแห้งผลิตภัณฑ์ ซึ่งสามารถใช้ประโยชน์จากพลังงานแสงอาทิตย์ได้อย่างมีประสิทธิภาพและช่วยแก้ปัญหาการเปียกฝน และการถูกรบกวนจากแมลงและสัตว์ต่าง ๆ

เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์จะประกอบด้วยส่วนสำคัญ 2 ส่วน ได้แก่ ส่วนสำหรับรับรังสีอาทิตย์ และส่วนสำหรับวางผลิตภัณฑ์ โดยทั้ง 2 ส่วนอาจอยู่ในโครงสร้างเดียวกันหรือแยกกันก็ได้ ในการทำงานของเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ รังสีอาทิตย์จะถูกเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อนและอากาศเป็นตัวกลางในการถ่ายเทพลังงานความร้อนที่ได้สู่ผลิตภัณฑ์ที่ต้องการอบแห้ง ส่งผลให้ผลิตภัณฑ์มีอุณหภูมิสูงขึ้นและเกิดกระบวนการระเหยน้ำออกจากผลิตภัณฑ์

#### 2.1.3.1 ประเภทของเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์

ในปัจจุบันเทคโนโลยีการอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ได้รับความนิยมอย่างแพร่หลาย ซึ่งนักวิจัยด้านการอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ในประเทศต่าง ๆ ได้ออกแบบและพัฒนาเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ขึ้นมาหลายหลายรูปแบบ ทั้งนี้ก็เพื่อความเหมาะสมกับชนิดของผลิตภัณฑ์ที่นำมาอบแห้ง และลักษณะทางภูมิศาสตร์ของแต่ละประเทศ จากการศึกษาพบว่า การจำแนกประเภทเครื่องอบแห้งส่วนใหญ่สามารถแบ่งตามการไหลของอากาศออกได้เป็น 2 ประเภท ได้แก่ เครื่องอบแห้งที่ใช้การพาความร้อนตามธรรมชาติ (natural convection solar dryer) และเครื่องอบแห้งที่ใช้การพาความร้อนโดยการบังคับอากาศ (forced convection solar dryer) โดยเครื่องอบแห้งแต่ละประเภทมีรายละเอียดดังนี้

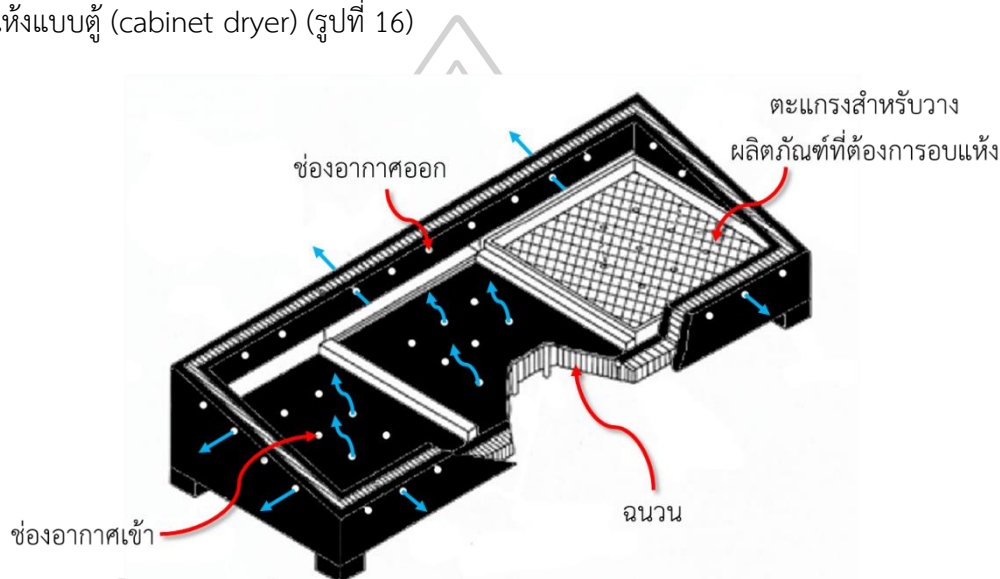
##### เครื่องอบแห้งที่ใช้การพาความร้อนตามธรรมชาติ

เครื่องอบแห้งประเภทนี้ อากาศจะได้รับความร้อนและไหลตามธรรมชาติโดยอาศัยกระบวนการพาความร้อนที่เกิดเนื่องจากแรงลอยตัว (buoyancy force) ที่เป็นผลมาจากความแตกต่างของอุณหภูมิอากาศภายในเครื่องอบแห้ง ซึ่งเครื่องอบแห้งประเภทนี้สามารถแบ่งย่อยตามลักษณะการรับรังสีอาทิตย์ของผลิตภัณฑ์ได้อีก 3 แบบ คือ แบบรับรังสีอาทิตย์ทางตรง (direct

mode) แบบรังสีอาทิตย์ทางอ้อม (indirect mode) และแบบผสม (mixed mode) โดยมีรายละเอียดดังนี้

### เครื่องอบแห้งประเภทที่ใช้การพาความร้อนตามธรรมชาติแบบรังสีอาทิตย์ทางตรง (direct mode natural convection solar dryer)

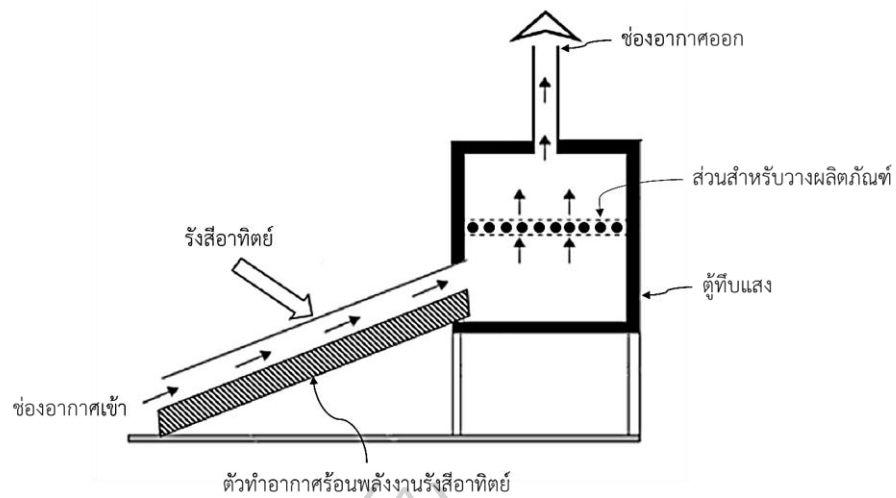
เครื่องอบแห้งประเภทนี้จะมีส่วนรับรังสีอาทิตย์และส่วนสำหรับวางผลิตภัณฑ์อยู่ในโครงสร้างเดียวกัน วัสดุที่ใช้ปิดคลุมผลิตภัณฑ์จะใช้วัสดุโปร่งแสง ทำให้รังสีอาทิตย์สามารถผ่านไปได้ตกกระทบกับผลิตภัณฑ์ที่นำมาอบแห้งได้โดยตรง ตัวอย่างของเครื่องอบแห้งประเภทนี้ เช่น เครื่องอบแห้งแบบตู้ (cabinet dryer) (รูปที่ 16)



รูปที่ 16 เครื่องอบแห้งแบบตู้ (Lawand, 1966)

### เครื่องอบแห้งประเภทที่ใช้การพาความร้อนตามธรรมชาติแบบรังสีอาทิตย์ทางอ้อม (indirect mode natural convection solar dryer)

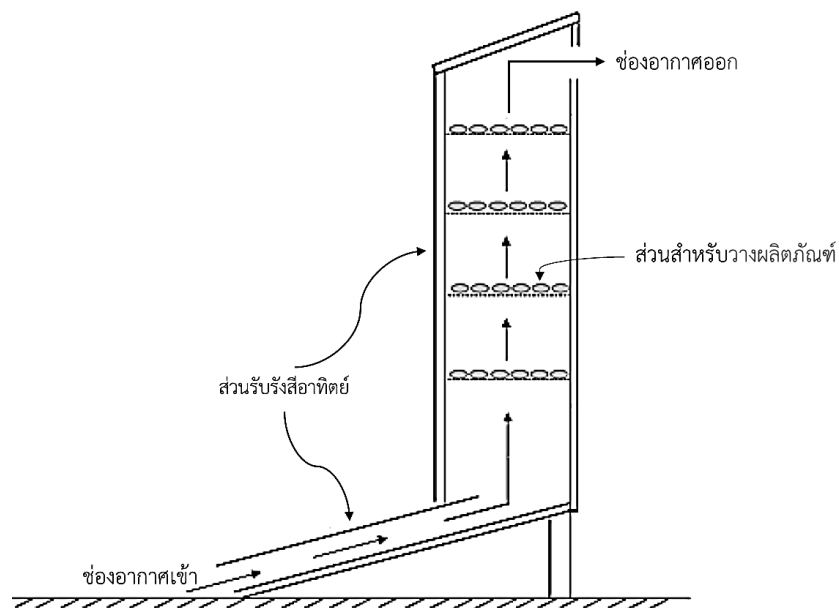
เครื่องอบแห้งประเภทนี้จะมีส่วนสำหรับรับรังสีอาทิตย์แยกจากส่วนสำหรับวางผลิตภัณฑ์ โดยส่วนรับรังสีอาทิตย์จะทำหน้าที่ผลิตอากาศร้อนและส่งต่อไปยังส่วนสำหรับวางผลิตภัณฑ์ วัสดุที่ใช้ปิดคลุมผลิตภัณฑ์จะเป็นวัสดุทึบแสง ทำให้รังสีอาทิตย์ไม่สามารถส่องผ่านไปได้ตกกระทบกับผลิตภัณฑ์ที่อบแห้งได้โดยตรง เครื่องอบแห้งประเภทนี้จึงเหมาะสำหรับการอบแห้งผลิตภัณฑ์ที่สีหรือองค์ประกอบทางชีวเคมีจะเสียหายหากได้รับรังสีอาทิตย์โดยตรง ตัวอย่างของเครื่องอบแห้งประเภทนี้ เช่น เครื่องอบแห้งแบบตู้ทึบแสง (รูปที่ 17)



รูปที่ 17 เครื่องอบแห้งแบบตู้ทึบแสง (Ekechukwu & Norton, 1999)

### เครื่องอบแห้งประเภทใช้การพาความร้อนตามธรรมชาติแบบผสม (mixed mode natural convection solar dryer)

เครื่องอบแห้งประเภทนี้ประกอบด้วยส่วนรับรังสีอาทิตย์และส่วนสำหรับวางผลิตภัณฑ์ คล้ายกับเครื่องอบแห้งแบบรับรังสีอาทิตย์ทางอ้อม แต่ในกรณีของเครื่องอบแห้งประเภทนี้จะใช้วัสดุปิดคลุมผลิตภัณฑ์ที่โปร่งแสง ผลิตภัณฑ์ที่นำมาอบแห้งจึงได้รับรังสีอาทิตย์โดยตรง ตัวอย่างของเครื่องอบแห้งประเภทนี้ เช่น เครื่องอบแห้งแบบตู้หลายชั้น (รูปที่ 18)



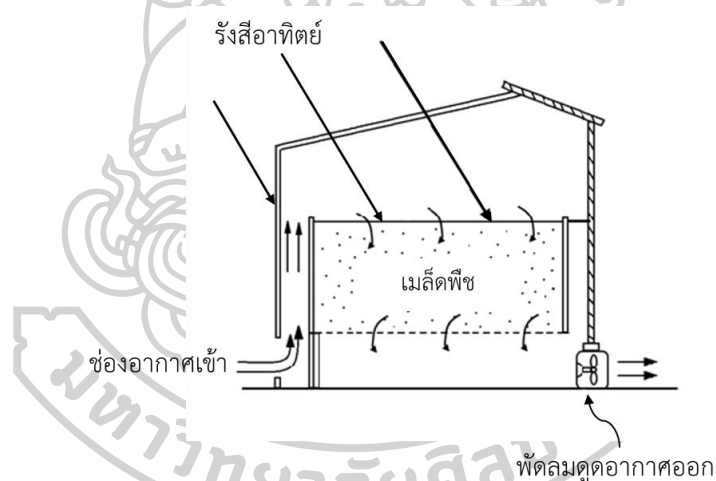
รูปที่ 18 เครื่องอบแห้งแบบตู้หลายชั้น (Wibulswas & Niyomkorn, 1980)

### เครื่องอบแห้งที่ใช้การพาความร้อนโดยการบังคับอากาศ

เครื่องอบแห้งประเภทนี้จะใช้อุปกรณ์ เช่น พัดลมหรือเครื่องเป่าอากาศ เพื่อช่วยให้อากาศไหลได้เร็วขึ้นหรือช่วยบังคับอากาศให้ไหลผ่านผลิตภัณฑ์อย่างทั่วถึง เครื่องอบแห้งประเภทนี้สามารถแบ่งย่อยตามลักษณะการรับรังสีอาทิตย์ของผลิตภัณฑ์ได้อีก 3 แบบ คือ แบบรับรังสีอาทิตย์ทางตรง (direct mode) แบบรับรังสีอาทิตย์ทางอ้อม (indirect mode) และแบบผสม (mixed mode) โดยมีรายละเอียดดังนี้

#### เครื่องอบแห้งประเภทที่ใช้การพาความร้อนโดยการบังคับอากาศแบบรับรังสีอาทิตย์ทางตรง (direct mode forced convection solar dryer)

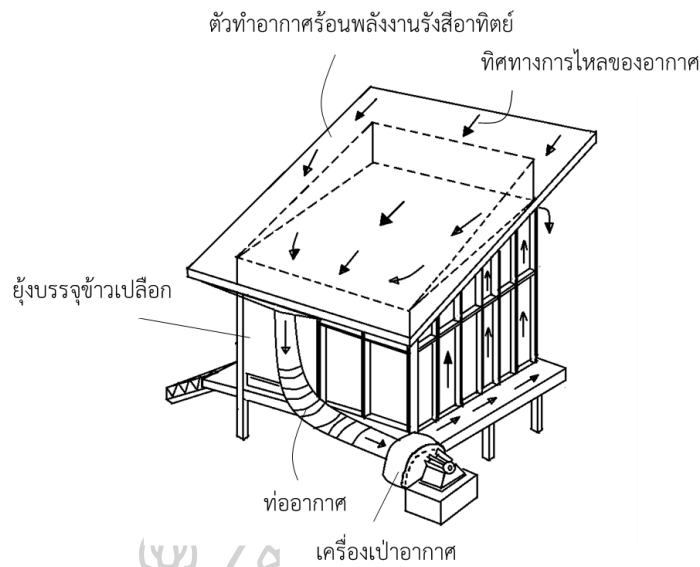
เครื่องอบแห้งประเภทนี้จะมีส่วนสำหรับรับรังสีอาทิตย์และส่วนสำหรับวางผลิตภัณฑ์อยู่ในโครงสร้างเดียวกัน มีพัดลมช่วยในการไหลของอากาศ ผลิตภัณฑ์ที่อยู่ภายในเครื่องอบแห้งจะได้รับพลังงานแสงอาทิตย์โดยตรง ตัวอย่างของเครื่องอบแห้งประเภทนี้ เช่น เครื่องอบแห้งเมล็ดพืชแบบหลังคาโปร่งแสง (รูปที่ 19)



รูปที่ 19 เครื่องอบแห้งเมล็ดพืชแบบหลังคาโปร่งแสง (Shove et al., 1981)

#### เครื่องอบแห้งประเภทที่ใช้การพาความร้อนโดยการบังคับอากาศแบบรับรังสีอาทิตย์ทางอ้อม (indirect mode forced convection solar dryer)

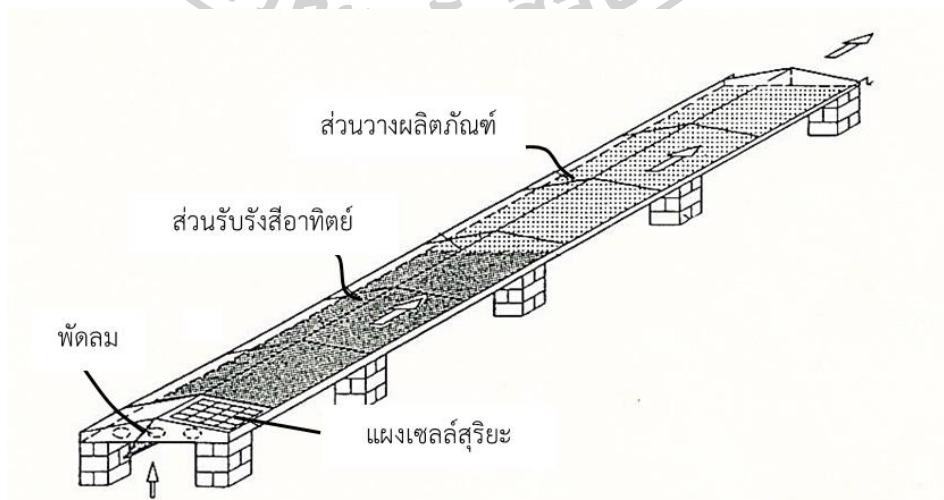
เครื่องอบแห้งประเภทนี้จะมีส่วนสำหรับรับรังสีอาทิตย์แยกออกจากส่วนสำหรับวางผลิตภัณฑ์ โดยส่วนรับรังสีอาทิตย์จะทำหน้าที่ผลิตอากาศร้อน และมีพัดลมช่วยในการไหลของอากาศร้อนจากส่วนรับรังสีอาทิตย์ไปยังส่วนสำหรับวางผลิตภัณฑ์ วัสดุที่ใช้ปิดคลุมผลิตภัณฑ์เป็นวัสดุทึบแสง รังสีอาทิตย์จึงไม่สามารถส่องผ่านไปได้กระทบกับผลิตภัณฑ์ที่อบแห้งได้โดยตรง ตัวอย่างของเครื่องอบแห้งประเภทนี้ เช่น เครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบบูรณาการเครื่องอบแห้งกับยุ้งเก็บข้าว (รูปที่ 20)



รูปที่ 20 เครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบบูรณาการเครื่องอบแห้งกับยุงเก็บข้าว  
(Soponronnarit et al., 1986)

### เครื่องอบแห้งประเภทที่ใช้การพาความร้อนโดยการบังคับอากาศแบบผสม (mixed mode forced convection dryer)

เครื่องอบแห้งประเภทนี้มีส่วนรับรังสีอาทิตย์แยกจากส่วนสำหรับวางผลิตภัณฑ์ และมีพัดลมเป่าหรือดูดอากาศให้ไหลจากส่วนรับรังสีอาทิตย์เข้าไปยังส่วนสำหรับวางผลิตภัณฑ์ วัสดุที่ปิดคลุมผลิตภัณฑ์จะมีลักษณะโปร่งแสง ทำให้รังสีอาทิตย์สามารถส่องผ่านไปได้ทกกระทบกับผลิตภัณฑ์ได้ ตัวอย่างของเครื่องอบแห้งประเภทนี้ เช่น เครื่องอบแห้งแบบอุโมงค์ลม (solar tunnel dryer) (รูปที่ 21)



รูปที่ 21 เครื่องอบแห้งแบบอุโมงค์ลม (Schirmer et al., 1996)



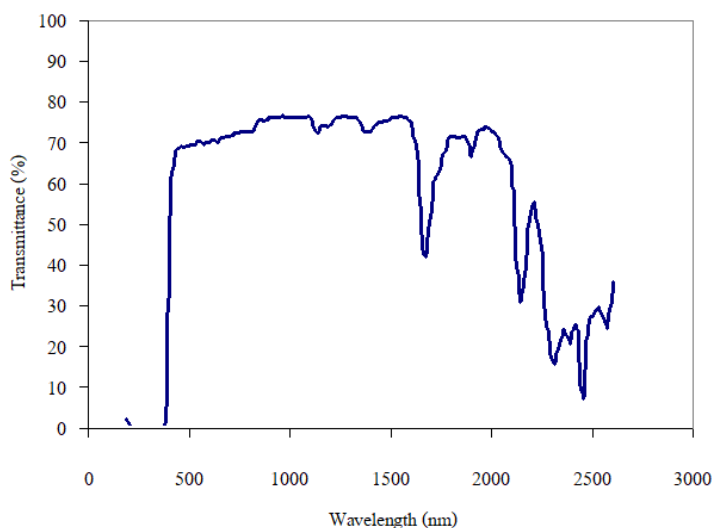
### 2.1.3.2 เครื่องอบแห้งแบบเรือนกระจก

เครื่องอบแห้งประเภทนี้จะใช้การพาความร้อนโดยการบังคับอากาศแบบผสม ซึ่งพัฒนาโดย คณะนักวิจัยของภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร เครื่องอบแห้งรุ่นที่ 1 (version 1) (Janjai et al., 2005) มีความกว้าง 5.5 เมตร ยาว 8.0 เมตร และสูง 3.5 เมตร ประกอบด้วยโครงหลังคาที่ทำด้วยท่อเหล็กซึ่งดัดโค้งเป็นรูปทรงพาราโบลา (parabola) มีพื้นเป็นคอนกรีตและปิดคลุมทุกด้านด้วยแผ่นโพลีคาร์บอเนต (polycarbonate sheets) ที่เคลือบสารป้องกันรังสีอัลตราไวโอเล็ต ด้านหลังมีช่องอากาศไหลเข้า ด้านหน้ามีพัดลมดูดอากาศออก ซึ่งใช้กำลังไฟฟ้าจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ภายในมีชั้นสำหรับวางผลิตภัณฑ์ที่ต้องการอบแห้ง เครื่องอบแห้งดังกล่าววางตัวอยู่ในแนวทิศเหนือ-ใต้ ลักษณะของเครื่องอบแห้งแบบเรือนกระจกรุ่นที่ 1 แสดงไว้ในรูปที่ 22



รูปที่ 22 ลักษณะภายนอกของเครื่องอบแห้งแบบเรือนกระจกรุ่นที่ 1 (Janjai et al., 2005)

ข้อดีของเครื่องอบแห้งนี้คือ พื้นคอนกรีตเป็นฐานยึดโครงสร้างของเครื่องอบแห้งที่มีความแข็งแรง ช่วยป้องกันความชื้นจากพื้นดินไม่ให้ระเหยเข้าไปในเครื่องอบแห้ง และช่วยเก็บสะสมพลังงานความร้อนสำหรับใช้ในเวลาที่รังสีอาทิตย์มีความเข้มต่ำได้ หลังคาที่โค้งเป็นรูปทรงพาราโบลามีมุมตกกระทบของรังสีที่เอื้อต่อการส่งผ่านรังสีอาทิตย์ได้ดีตลอดทั้งวัน อีกทั้งแผ่นโพลีคาร์บอเนตยังมีคุณสมบัติส่งผ่านรังสีอาทิตย์ได้ดีและป้องกันการส่งผ่านรังสีอินฟราเรดที่แผ่จากผลิตภัณฑ์และองค์ประกอบภายในเครื่องอบแห้ง (รูปที่ 23) ส่งผลให้ภายในเครื่องอบแห้งเกิดภาวะเรือนกระจก (greenhouse effect) ซึ่งช่วยให้ผลิตภัณฑ์แห้งได้เร็วกว่าการตากแห้งตามธรรมชาติ นอกจากนี้สีของผลิตภัณฑ์ที่อบแห้งจะเปลี่ยนแปลงไม่มากนัก เนื่องจากแผ่นโพลีคาร์บอเนตมีสารเคลือบป้องกันรังสีอัลตราไวโอเล็ตจากดวงอาทิตย์ ซึ่งรังสีอัลตราไวโอเล็ตเป็นปัจจัยสำคัญในการทำให้ผลิตภัณฑ์มีสีที่เปลี่ยนแปลงไป (Csap' et al., 2019)



รูปที่ 23 สัมประสิทธิ์การส่งผ่านรังสีของแผ่นโพลีเอทิลีน (Janjai & Keawprasert, 2006)

เครื่องอบแห้งแบบเรือนกระจกรุ่นที่ 1 สามารถอบแห้งผลิตภัณฑ์สดได้ครั้งละ 100 กิโลกรัม ในการทดลองอบกล้วยพบว่า กล้วยที่อบในเครื่องอบแห้งใช้เวลาในการอบแห้งเร็วกว่าการตากแห้งตามธรรมชาติ 1-2 วัน และได้กล้วยคุณภาพดี (Janjai et al., 2005) นอกจากนี้ยังได้ทดสอบอบแห้งพริก ผลที่ได้พบว่าพริกที่ตากในเครื่องอบแห้งจะแห้งเร็วกว่าการตากแห้งตามธรรมชาติประมาณ 3 วัน และพริกแห้งที่ได้มีสีแดงสดกว่าการตากแห้งธรรมชาติ ทั้งนี้เพราะแผ่นโพลีเอทิลีนช่วยป้องกันรังสีอัลตราไวโอเล็ตจากดวงอาทิตย์ (Janjai et al., 2007)

เนื่องจากเครื่องอบแห้งแบบเรือนกระจกรุ่นที่ 1 ยังมีความจุที่ไม่เพียงพอต่อการอบแห้งผลิตภัณฑ์ในเชิงพาณิชย์ คณะนักวิจัยจากมหาวิทยาลัยศิลปากรร่วมกับกรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน (พพ.) จึงได้ทำการปรับปรุงและพัฒนาเครื่องอบแห้งแบบเรือนกระจกเรื่อยมา จนในปัจจุบันมีเครื่องอบแห้งแบบเรือนกระจกขนาดมาตรฐาน 4 ขนาด ดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ขนาดของเครื่องอบแห้งแบบเรือนกระจก

เครื่องอบแห้ง	ขนาดของเครื่องอบแห้ง (กว้าง × ยาว × สูง) (เมตร)	ความจุ (กิโลกรัม)
ขนาดเล็ก	6 × 8.2 × 3.5	100-300
ขนาดกลาง	9 × 12.4 × 3.5	400-600
ขนาดใหญ่	9 × 20.8 × 3.5	1,000-1,200
ขนาดใหญ่พิเศษ	9 × 27.0 × 3.5	1,500-1,700





รูปที่ 24 เครื่องอบแห้งแบบเรือนกระจกขนาดใหญ่พิเศษ

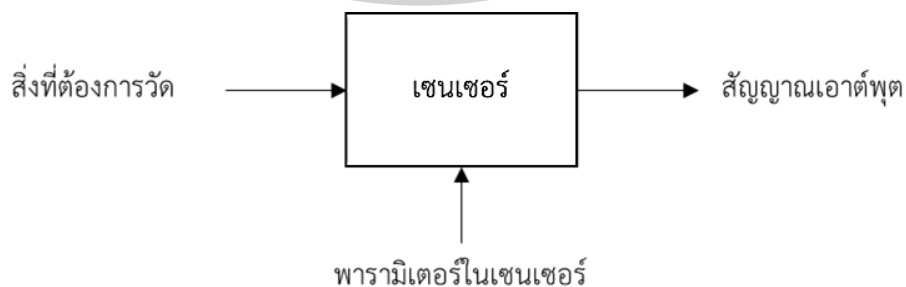
## 2.1.4 หลักการเบื้องต้นของเซนเซอร์และไมโครคอนโทรลเลอร์

### 2.1.4.1 เซนเซอร์ (Sensor)

เซนเซอร์เป็นอุปกรณ์ตรวจวัดการเปลี่ยนแปลงปริมาณทางกายภาพของตัวแปรต่าง ๆ เช่น ความร้อน แสง ระยะทาง การเคลื่อนที่ เป็นต้น จากนั้นจะทำการแปลงค่าที่วัดได้ให้อยู่ในรูปของปริมาณทางไฟฟ้า ซึ่งเป็นสัญญาณเอาต์พุตของเซนเซอร์ที่จะนำมาประมวลผลต่อไป

#### หลักการทำงานของเซนเซอร์

หลักการทำงานของเซนเซอร์นั้นจะมีองค์ประกอบที่สำคัญ คือ สิ่งที่ต้องการวัด พารามิเตอร์ในเซนเซอร์ และสัญญาณเอาต์พุต (รูปที่ 25)



รูปที่ 25 แผนภูมิของระบบเซนเซอร์

การตรวจวัดของเซนเซอร์จะอาศัยผลจากการเปลี่ยนแปลงของพารามิเตอร์ในตัวเซนเซอร์เอง ซึ่งส่วนใหญ่จะเป็นพารามิเตอร์ทางไฟฟ้า เช่น ความต่างศักย์ กระแส ความต้านทาน ความจุและความเหนี่ยวนำ เป็นต้น เมื่อปริมาณทางกายภาพของสิ่งที่ต้องการวัดเปลี่ยนแปลง ค่าของพารามิเตอร์ดังกล่าวในตัวเซนเซอร์จะเปลี่ยนตาม โดยเราสามารถทราบค่าการเปลี่ยนแปลงของพารามิเตอร์ในเซนเซอร์ได้ด้วยการวัดโดยใช้มิเตอร์หรือวงจรบริดจ์ต่าง ๆ ซึ่งค่าที่วัดได้นี้จะเป็นสัญญาณเอาต์พุตของเซนเซอร์

### เซนเซอร์วัดอุณหภูมิอากาศ

เซนเซอร์วัดอุณหภูมิอากาศจะวัดการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางไฟฟ้าของวัสดุที่ใช้เป็นตัววัดอุณหภูมิ จากนั้นจะแปลงค่าทางไฟฟ้าที่วัดได้เป็นอุณหภูมิ โดยเซนเซอร์วัดอุณหภูมิสามารถแบ่งได้ 3 ชนิด ดังนี้

- 1) เทอร์โมคัปเปิล (Thermocouples) เป็นอุปกรณ์เบื้องต้นในการวัดอุณหภูมิอากาศ ประกอบด้วยเส้นลวดโลหะตัวนำ 2 ชนิด มาเชื่อมต่อปลายด้านหนึ่งเข้าด้วยกัน ซึ่งเรียกว่า "จุดอุณหภูมิ" ส่วนปลายอีกด้านหนึ่งปล่อยเปิดไว้ เรียกว่า "จุดอ้างอิง" หากที่จุดอุณหภูมิและจุดอ้างอิงมีอุณหภูมิต่างกัน จะทำให้เกิดความต่างศักย์ไฟฟ้าที่จุดอ้างอิง ซึ่งค่าความต่างศักย์ที่เกิดขึ้นนี้สามารถแปลงเป็นค่าอุณหภูมิได้
- 2) อาร์ทีดี (Resistance Temperature Detector, RTD) คือ เซนเซอร์วัดอุณหภูมิที่ใช้หลักการแปลงค่าความต้านทานของโลหะ การทำงานจะต้องอาศัยแหล่งจ่ายไฟภายนอกป้อนให้กับวงจร โดยค่าความต้านทานไฟฟ้าของวัสดุและอุณหภูมิจะแปรผันตรงกัน กล่าวคือ ค่าความต้านทานจะมีค่าเพิ่มตามอุณหภูมิ ความต้านทานของโลหะที่เพิ่มขึ้นนี้ เรียกว่า สัมประสิทธิ์การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิแบบบวก วัสดุที่นำมาใช้จะเป็นโลหะที่มีความต้านทานจำเพาะต่ำ เช่น แพลตินัม ทังสเตน นิกเกิล เป็นต้น
- 3) เทอร์มิสเตอร์ (Thermistor) เป็นเซนเซอร์วัดอุณหภูมิชนิดที่ใช้หลักการของความต้านทานไฟฟ้า ซึ่งค่าความต้านทานนี้จะเปลี่ยนแปลงเมื่อได้รับความร้อน สามารถแบ่งได้ 2 ชนิด คือ ชนิดพีทีซี (Positive Temperature Coefficient, PTC) เป็นชนิดที่ค่าความต้านทานจะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น โดยทั่วไปจะนิยมใช้เป็นอุปกรณ์ป้องกันกระแสไฟฟ้าเกิน (Over current protection) และ ชนิดเอ็นทีซี (Negative Temperature Coefficient, NTC) เป็นชนิดที่ค่าความต้านทานจะลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น นิยมใช้ในการตรวจวัดอุณหภูมิ

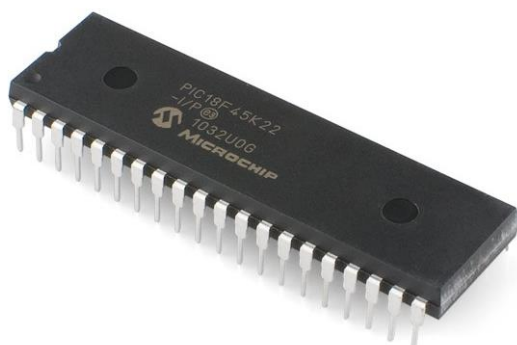
### เซนเซอร์วัดความชื้นของอากาศ

เซนเซอร์วัดความชื้นอากาศจะทำงานโดยตรวจวัดการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางไฟฟ้าหรือคุณสมบัติทางความร้อนของวัสดุที่ใช้เป็นตัววัดความชื้น จากนั้นจะแปลงค่าที่วัดได้ไปเป็นค่าความชื้น โดยเซนเซอร์วัดความชื้นแบ่งเป็น 3 ประเภท ดังนี้

1. Capacitive Humidity Sensor เซนเซอร์ประเภทนี้มีโครงสร้างภายในที่ประกอบด้วย ฉนวนที่มักจะทำด้วยโพลีเมอร์หรือเมทัลออกไซด์ (Metal Oxide) ซึ่งจะถูกวางอยู่ระหว่างแผ่นอิเล็กโทรด 2 แผ่น เมื่อความชื้นในอากาศเปลี่ยนแปลงจะทำให้ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (Dielectric constant) ของฉนวนเปลี่ยนแปลงตาม ส่งผลให้ค่าความจุไฟฟ้า (Capacitive) ระหว่างอิเล็กโทรดทั้งสองเปลี่ยนแปลงด้วย จึงสามารถแปลงค่าความจุไฟฟ้านี้เป็นความชื้นของอากาศได้
2. Resistive Humidity Sensor โครงสร้างภายในของเซนเซอร์นี้จะมีวัสดุวางซ้อนกัน 3 ชั้น ประกอบด้วย ชั้นล่างสุดเป็นฐาน (Substrate) ที่มักเคลือบด้วยเกลือ (Salt) หรือโพลีเมอร์ (Conductive Polymer) มีอิเล็กโทรดโลหะ 2 ส่วน วางอยู่ตรงกลาง และชั้นบนสุดจะเป็นวัสดุดูดความชื้น (Hygroscopic material) หลักการทำงานของเซนเซอร์ชนิดนี้คือวัดการเปลี่ยนค่าความต้านทานของตัวอิเล็กโทรด โดยเมื่อวัสดุดูดความชื้นดูดซับไอน้ำ ไอออนของไอน้ำจะแตกตัวทำให้ค่าความต้านทานไฟฟ้าของอิเล็กโทรดลดลง ซึ่งสามารถแปลงค่าความต้านทานไฟฟ้านี้เป็นปริมาณความชื้นของอากาศได้
3. Thermal Conductivity Humidity Sensor เป็นเซนเซอร์ที่ใช้วัดความชื้นสัมบูรณ์ (Absolute Humidity) จะอาศัยการคำนวณความแตกต่างระหว่างค่าการนำความร้อนของอากาศแห้งกับอากาศที่มีไอน้ำ โครงสร้างภายในจะประกอบไปด้วยเทอร์มิสเตอร์ 2 ตัว ต่ออยู่ในวงจรรบริดจ์ โดยเทอร์มิสเตอร์ตัวหนึ่งจะบรรจุอยู่ในแคปซูลที่มีก๊าซไนโตรเจน และเทอร์มิสเตอร์อีกตัวจะถูกวางอยู่ในบรรยากาศ กระแสไฟฟ้าจะถูกส่งผ่านเทอร์มิสเตอร์ทั้งสองทำให้เกิดความร้อนสูงขึ้นในตัวเทอร์มิสเตอร์ โดยความร้อนที่กระจายออกจากเทอร์มิสเตอร์ที่อยู่ในแคปซูลจะมากกว่าเทอร์มิสเตอร์ที่อยู่ในบรรยากาศ ความแตกต่างของอุณหภูมินี้จะเป็นความต่างของการนำความร้อนของไอน้ำเทียบกับไนโตรเจนแห้ง ซึ่งความแตกต่างของค่าความต้านทานของเทอร์มิสเตอร์จะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความชื้นสัมบูรณ์

#### 2.1.4.2 ไมโครคอนโทรลเลอร์ (Microcontroller)

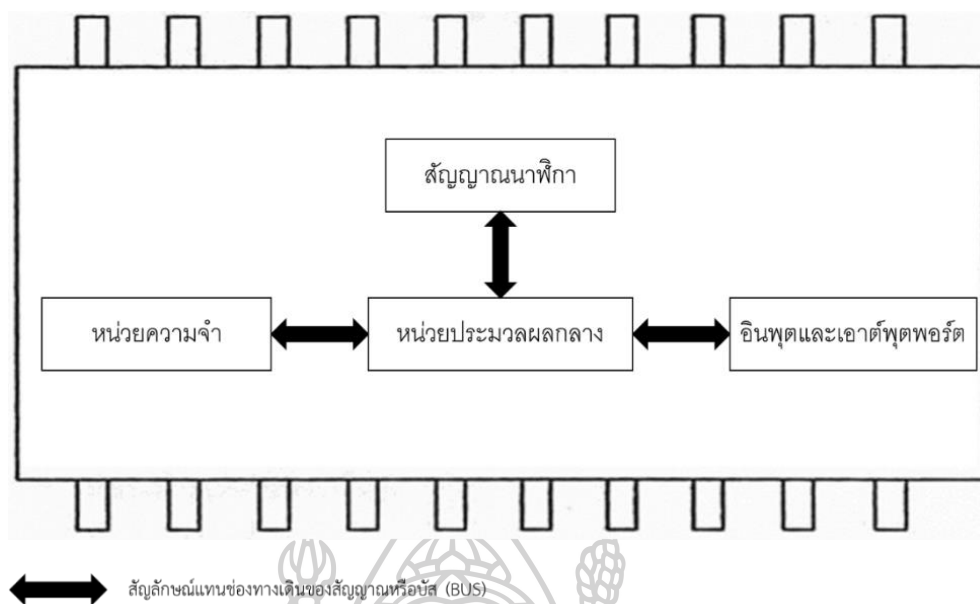
ในปัจจุบันเราจะเห็นการทำงานของอุปกรณ์ต่าง ๆ เป็นการทำงานแบบอัตโนมัติมากขึ้น ซึ่งระบบอัตโนมัติดังกล่าวจะนิยมใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ (รูปที่ 26) เป็นส่วนประกอบ เนื่องจากไมโครคอนโทรลเลอร์เป็นอุปกรณ์ที่สะดวกและง่ายต่อการใช้งาน มีขนาดเล็ก ราคาถูก และที่สำคัญสามารถกำหนดเงื่อนไขการทำงานของอุปกรณ์ใหม่ได้ โดยที่ผู้ใช้งานไม่จำเป็นต้องเปลี่ยนวงจรภายนอก



รูปที่ 26 ไมโครคอนโทรลเลอร์

(<http://jumpstartinnovation.blogspot.com/2013/07/blog-post.html>)

ไมโครคอนโทรลเลอร์ (Microcontroller) มาจากคำ 2 คำ คือ ไมโคร (Micro) ที่หมายถึงขนาดเล็ก และคอนโทรลเลอร์ (Controller) ที่หมายถึงตัวควบคุมหรืออุปกรณ์ควบคุม ดังนั้นไมโครคอนโทรลเลอร์จึงหมายถึงอุปกรณ์ควบคุมขนาดเล็ก ซึ่งภายในได้รวมส่วนประกอบหลักสำคัญของระบบคอมพิวเตอร์เข้าไว้ด้วยกัน ได้แก่ หน่วยประมวลผลหลัก (Central Processing Unit, CPU) หน่วยความจำ (Memory) อินพุตและเอาต์พุตพอร์ต (I/O Port) รีจิสเตอร์ (Register) วงจรผลิตสัญญาณ (Oscillator) และวงจรอิเล็กทรอนิกส์ เช่น วงจรแปลงจากสัญญาณ (รูปที่ 27)



รูปที่ 27 โครงสร้างหลักของไมโครคอนโทรลเลอร์

### โครงสร้างของไมโครคอนโทรลเลอร์

ไมโครคอนโทรลเลอร์มีหลากหลายตระกูล แต่ละตระกูลมีโครงสร้างภายในที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับบริษัทผู้ผลิตและจุดประสงค์ของการสร้างไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูลนั้น ๆ แต่โดยพื้นฐานแล้วโครงสร้างภายในของไมโครคอนโทรลเลอร์จะสามารถแบ่งออกได้ 5 ส่วนหลักๆ ดังนี้

- 1) หน่วยประมวลผลกลางหรือซีพียู (Central Processing Unit: CPU) ทำหน้าที่เป็นศูนย์กลางควบคุมการทำงาน และประมวลผลทางคณิตศาสตร์และทางลอจิก (Arithmetic and logic unit) โดยจะนำข้อมูลจากอุปกรณ์รับข้อมูลมาประมวลผลข้อมูลตามคำสั่งของโปรแกรม และส่งผลลัพธ์ออกไปยังหน่วยแสดงผล
- 2) หน่วยความจำ (Memory) สามารถแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ หน่วยความจำที่มีไว้สำหรับเก็บโปรแกรมหลัก (Program Memory) เช่น Flash Memory หน่วยความจำนี้จะอ่านและเขียนได้ด้วยไฟฟ้า เปรียบเสมือนฮาร์ดดิสก์ของเครื่องคอมพิวเตอร์ คือข้อมูลใด ๆ ที่ถูกเก็บไว้ในหน่วยความจำนี้จะไม่สูญหายไปแม้ไม่มีไฟเลี้ยง อีกส่วนหนึ่งคือ หน่วยความจำข้อมูล (Data Memory) ใช้เป็นเหมือนกับกระดาษทดในการคำนวณของซีพียู และเป็นที่พักข้อมูลชั่วคราวขณะทำงาน แต่หากไม่มีไฟเลี้ยงข้อมูลจะหายไปคล้ายกับหน่วยความจำแรม (RAM)
- 3) ส่วนติดต่อกับอุปกรณ์ภายนอกหรือพอร์ต (Port) มี 2 ลักษณะคือ พอร์ตอินพุต (Input Port) และพอร์ตเอาต์พุต (Output Port) ซึ่งจะใช้ทั้ง 2 พอร์ตนี้เป็นส่วนเชื่อมต่อกับ



อุปกรณ์ภายนอก โดยพอร์ตอินพุตจะทำหน้าที่รับสัญญาณเพื่อนำไปประมวลผลและ  
ส่งไปแสดงผลที่พอร์ตเอาต์พุต

- 4) เส้นทางของสัญญาณหรือบัส (BUS) เป็นลักษณะของสายสัญญาณจำนวนมากอยู่ภายใน  
ตัวไมโครคอนโทรลเลอร์ ซึ่งจะทำหน้าที่เป็นเส้นทางที่ใช้สำหรับติดต่อสื่อสารและ  
แลกเปลี่ยนข้อมูลระหว่าง ซีพียู หน่วยความจำและพอร์ต ซึ่งเส้นทางของสัญญาณ  
สามารถแบ่งได้ 3 แบบ คือ บัสข้อมูล (Data Bus) บัสแอดเดรส (Address Bus) และบัส  
ควบคุม (Control Bus)
- 5) วงจรสัญญาณนาฬิกา (Clock) ทำหน้าที่ควบคุมจังหวะการสื่อสารของซีพียูกับส่วนอื่น ๆ  
ของไมโครคอนโทรลเลอร์ ซึ่งความเร็วในการประมวลผลของไมโครคอนโทรลเลอร์จะ  
ขึ้นกับสัญญาณนาฬิกา หากสัญญาณนาฬิกามีความถี่สูง จังหวะการสื่อสารของซีพียูก็  
สามารถทำได้ถี่ขึ้น ส่งผลให้ไมโครคอนโทรลเลอร์มีความเร็วในการประมวลผลสูงขึ้นด้วย

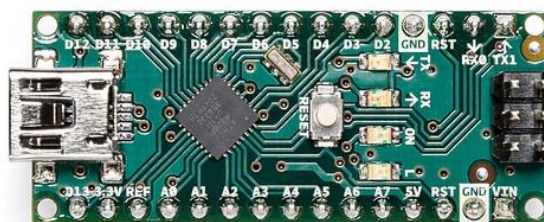
### ไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino

Arduino เป็นไมโครคอนโทรลเลอร์แบบบอร์ดสำเร็จรูป นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในปัจจุบัน  
โดย Arduino ถูกสร้างมาจากคอนโทรลเลอร์ตระกูล ARM ของ ATMEL ไมโครคอนโทรลเลอร์บอร์ด  
นี้มีข้อดี คือ มีโอเพ่นซอร์ส (Open Source) ที่สามารถนำไปพัฒนาต่อเป็นอุปกรณ์ต่าง ๆ ได้ และ  
ความสามารถในการเพิ่มตัวโหลดการบูท (Boot Loader) เข้าไปที่ตัวคอนโทรลเลอร์ ARM ซึ่งช่วยให้  
การอัปโหลดโค้ด (Code) เข้าตัวบอร์ดสามารถทำได้ง่ายขึ้น และยังมีการพัฒนาชุดคำสั่ง (Software)  
ที่ใช้ในการควบคุมตัวบอร์ดของ Arduino ให้เป็นภาษา C++ ซึ่งเป็นภาษาที่คนส่วนใหญ่มี  
ความคุ้นเคยในการใช้งาน นอกจากนี้ตัวบอร์ดยังสามารถต่อโมดูลเพิ่มเติมได้ ซึ่งช่วยให้การประยุกต์ใช้  
งาน Arduino ทำได้หลากหลายมากขึ้น โดยตัวอย่างบอร์ด Arduino ที่นิยมนำมาใช้งานในปัจจุบัน  
แสดงดังรูปที่ 28-30



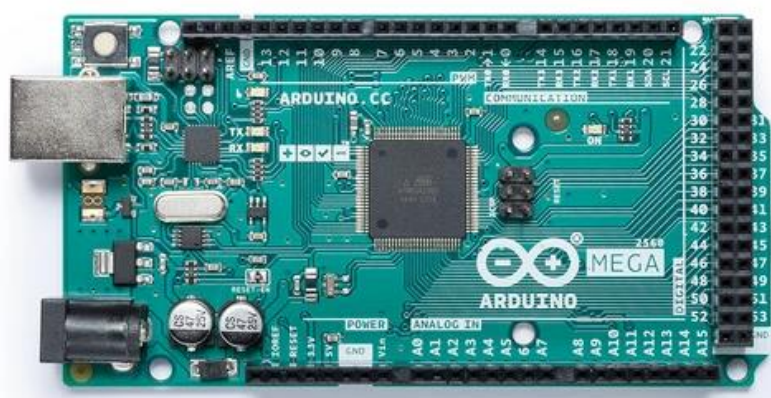
รูปที่ 28 บอร์ด Arduino UNO

(<https://store.arduino.cc/products/arduino-uno-rev3>)



รูปที่ 29 บอร์ด Arduino Nano

(<https://store.arduino.cc/products/arduino-nano>)



รูปที่ 30 บอร์ด Arduino Mega

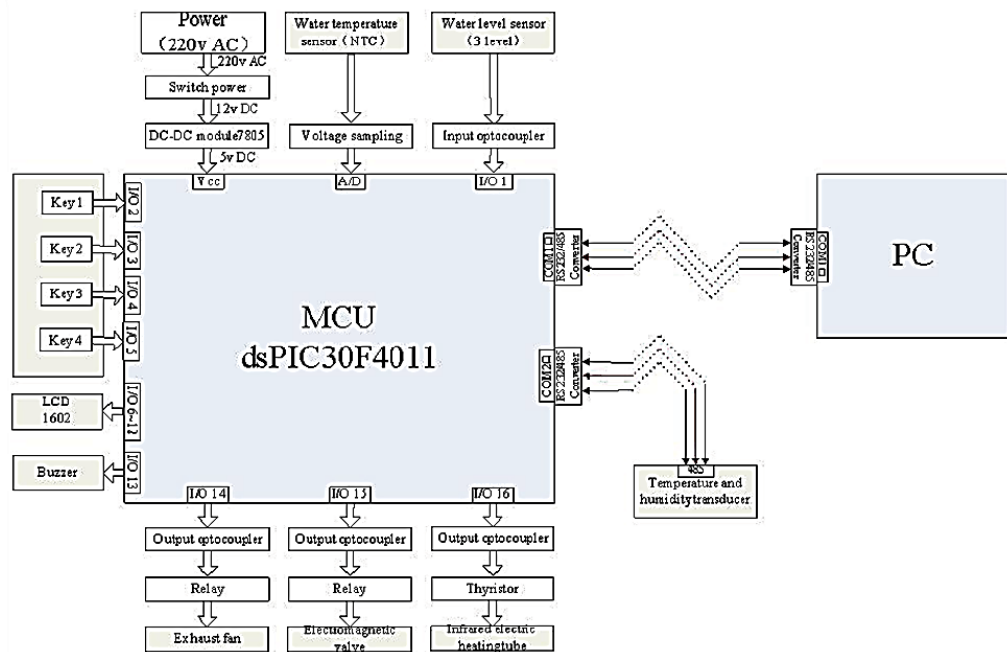
(<https://store.arduino.cc/products/arduino-mega-2560-rev3>)

## 2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Kaewkiew และคณะ (2011) ได้นำเสนอการทดลองอบแห้งพริกโดยใช้เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบเรือนกระจกขนาดใหญ่ ซึ่งมีความกว้าง 8 เมตร ยาว 20.8 เมตร และสูง 3.5 เมตร ที่ติดตั้งอยู่ที่จังหวัดอุบลราชธานี โดยภายในเครื่องอบแห้งจะมีพัดลมดูดอากาศชนิดใช้กระแสไฟฟ้าตรง (DC) ที่ติดตั้งอยู่ตรงผนังด้านหลังของเครื่องอบแห้ง พัดลมนี้ใช้ไฟฟ้าจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ขนาด 50 วัตต์ จำนวน 3 แผง โดยเครื่องอบแห้งนี้ถูกนำมาใช้ทดลองอบแห้งพริกที่มีน้ำหนักเริ่มต้น 500 กิโลกรัม ซึ่งทำการทดลองทั้งหมด 3 ครั้ง ในช่วงเดือนพฤศจิกายน – ธันวาคม ปี 2009 จากการทดลองพบว่าอุณหภูมิอากาศภายในเครื่องอบแห้งนั้นมีค่าสูงกว่าอุณหภูมิอากาศแวดล้อม และความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศภายในเครื่องอบแห้งมีค่าต่ำกว่าความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศแวดล้อม ส่งผลให้ความชื้นของพริกในเครื่องอบแห้งลดลงจากความชื้นเริ่มต้นที่ 74% (w.b.) จนมีความชื้นสุดท้ายที่ 9% (w.b.) ภายในระยะเวลาแค่ 3 วัน ซึ่งเร็วกว่าการตากแห้งตามธรรมชาติ 3 วัน นอกจากนี้สีของพริกที่อบแห้งภายในเครื่องอบแห้งยังมีคุณภาพดีกว่าการตากแห้งธรรมชาติ



Xiao และคณะ (2014) ได้นำเสนอระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์อัจฉริยะ โดยระบบอบแห้งดังกล่าวจะใช้ตัวสะสมพลังงานรังสีอาทิตย์เพื่อดูดกลืนความร้อนแล้วถ่ายเทให้กับน้ำในถังเก็บ ความแตกต่างของอุณหภูมิของน้ำในถังเก็บน้ำจะทำให้เกิดการไหลเวียนในระบบ น้ำที่ไหลเวียนนี้จะเป็นตัวกลางในการพาความร้อนไปยังห้องอบแห้งที่มีขนาดกว้าง 1 เมตร ยาว 0.66 เมตร และสูง 1.2 เมตร โดยกระบวนการอบแห้งนี้จะมีระบบตรวจสอบอัจฉริยะที่ประกอบด้วย 3 ส่วนหลัก ได้แก่ ระบบคอมพิวเตอร์ ระบบการวัดและควบคุมแบบเรียลไทม์ และระบบการแสดงผลระยะไกล ซึ่งโครงสร้างฮาร์ดแวร์ (hardware) ของระบบแสดงรูปที่ 31 โดยระบบตรวจสอบอัจฉริยะนี้จะใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ dsPIC30F4011 เป็นหน่วยควบคุมการทำงานของระบบ ซึ่งทำหน้าที่รับข้อมูลจากเซนเซอร์และรับคำสั่งจากผู้ใช้งาน โดยผู้ใช้งานสามารถส่งคำสั่งควบคุมอุณหภูมิของน้ำในถัง อุณหภูมิและความชื้นของอากาศภายในห้องอบแห้งผ่านคอมพิวเตอร์หรือผ่านปุ่ม 4 ปุ่มที่อยู่บนแผงควบคุม โดยการสื่อสารระหว่างไมโครคอนโทรลเลอร์กับคอมพิวเตอร์จะใช้โมดูลสื่อสาร RS-485 เป็นตัวกลางในการส่งข้อมูลระหว่างกัน การแสดงผลของระบบนี้จะแสดงผ่านจอ LCD นอกจากนี้ยังมีระบบการแจ้งเตือนแบบเรียลไทม์ เมื่อระบบเกิดสถานการณ์ผิดปกติ เช่น อุณหภูมิภายในเครื่องอบแห้งสูงผิดปกติ โดยการแจ้งเตือนจะอยู่ในรูปของเสียงกริ่งและสัญญาณไฟ



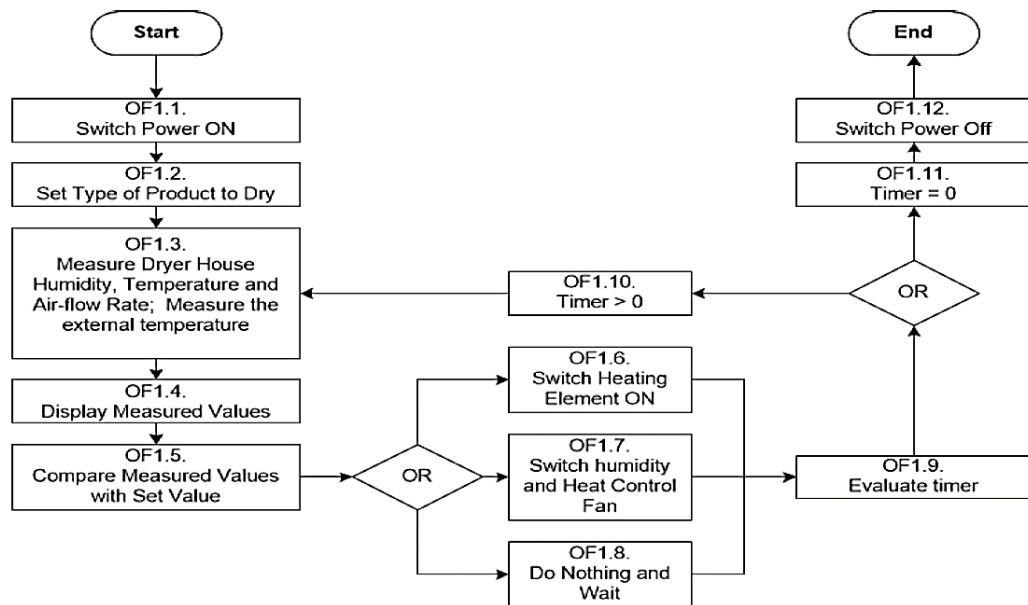
รูปที่ 31 แผนภาพโครงสร้างฮาร์ดแวร์ (hardware) ของระบบตรวจสอบอัจฉริยะ

(Xiao et al., 2014)

Marebane และคณะ (2018) ได้ออกแบบและพัฒนาระบบควบคุมอัตโนมัติ สำหรับใช้ในเครื่องอบแห้งผักและผลไม้ ระบบควบคุมดังกล่าวประกอบด้วยอุปกรณ์ ได้แก่ คอนโทรลเลอร์ชนิด PLC แผงเซลล์แสงอาทิตย์ ตัวเก็บสะสมพลังงานรังสีอาทิตย์ เครื่องทำอากาศร้อน เซนเซอร์วัดอุณหภูมิของอากาศ เซนเซอร์วัดความชื้นของอากาศ เซนเซอร์วัดความเร็วของอากาศ และพัดลมดูดอากาศเข้า-ออกเครื่องอบแห้ง (รูปที่ 32) ระบบควบคุมอัตโนมัติจะควบคุมทั้งอุณหภูมิและความชื้นของอากาศที่จะใช้ในการอบแห้ง โดยใช้คอนโทรลเลอร์ชนิด PLC เป็นตัวควบคุมหลักที่จะรับคำสั่งจากผู้ใช้งานและเก็บข้อมูลจากเซนเซอร์ต่าง ๆ แล้วนำมาประมวลผลเพื่อกำหนดเงื่อนไขในการควบคุมการอบแห้ง ในการควบคุมอุณหภูมิจะใช้ตัวเก็บสะสมพลังงานรังสีอาทิตย์ทำหน้าที่เพิ่มอุณหภูมิให้กับอากาศ แต่หากอากาศยังมีอุณหภูมิไม่ถึงค่าที่กำหนดไว้ เครื่องทำอากาศร้อนจะทำงานเพื่อเพิ่มอุณหภูมิให้ถึงค่าที่กำหนด จากนั้นพัดลมจะดูดอากาศร้อนเข้าไปยังห้องอบแห้ง และมีพัดลมดูดอากาศออกเพื่อถ่ายเทความชื้นออกจากห้องอบแห้ง ซึ่งการดูดอากาศเข้า-ออกห้องอบแห้งนี้ยังใช้เพื่อควบคุมความชื้นของอากาศภายในห้องอบแห้งด้วย โดยพลังงานไฟฟ้าทั้งหมดที่ใช้ในระบบควบคุมอัตโนมัตินี้จะได้จากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ การทำงานของระบบควบคุมอัตโนมัติแสดงดังรูปที่ 33 กระบวนการทำงานจะเริ่มต้นที่ผู้ใช้กำหนดชนิดผลิตภัณฑ์ที่จะอบแห้ง พร้อมทั้งเลือกระดับความแห้งของผลิตภัณฑ์ว่าแห้งปานกลางหรือแห้งสนิท โดยชุดข้อมูลที่ใช้ป้อนเข้าไปจะถูกนำมาเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการวัดของเซนเซอร์ต่าง ๆ จากนั้นระบบจะทำการประมวลผลแล้วเลือกเงื่อนไขในการควบคุม 3 เงื่อนไข ได้แก่ รอและให้กระบวนการอบแห้งดำเนินต่อไป เปิดหรือปิดอุปกรณ์ทำอากาศร้อน และเปิดหรือปิดระบบควบคุมอุณหภูมิและความชื้น ซึ่งจากการทดลองใช้งานระบบควบคุมอัตโนมัติในการอบแห้งแอปเปิล พบว่า การควบคุมอุณหภูมิของอากาศ การควบคุมความชื้นของอากาศ และการใช้กระบวนการพาอากาศร้อนแบบบังคับ ให้ผลลัพธ์ที่ดีในแง่ของการใช้พลังงานที่ลดลง อัตราการแห้งเร็วขึ้น และผลไม้แห้งยังมีคุณภาพที่ดี เมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการที่มีอยู่แล้ว

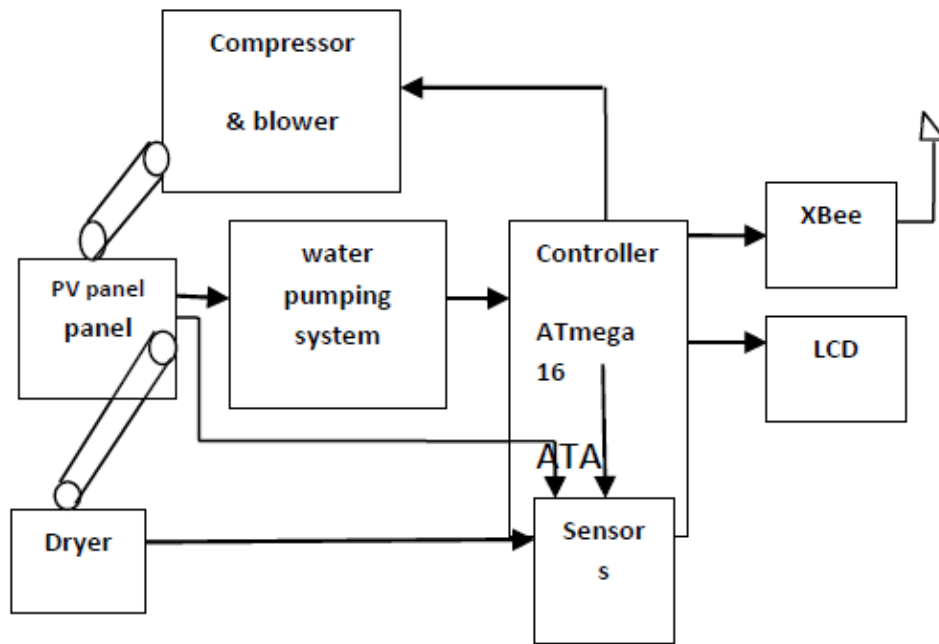


รูปที่ 32 ส่วนประกอบของระบบควบคุมอัตโนมัติ (Marebane et al., 2018)

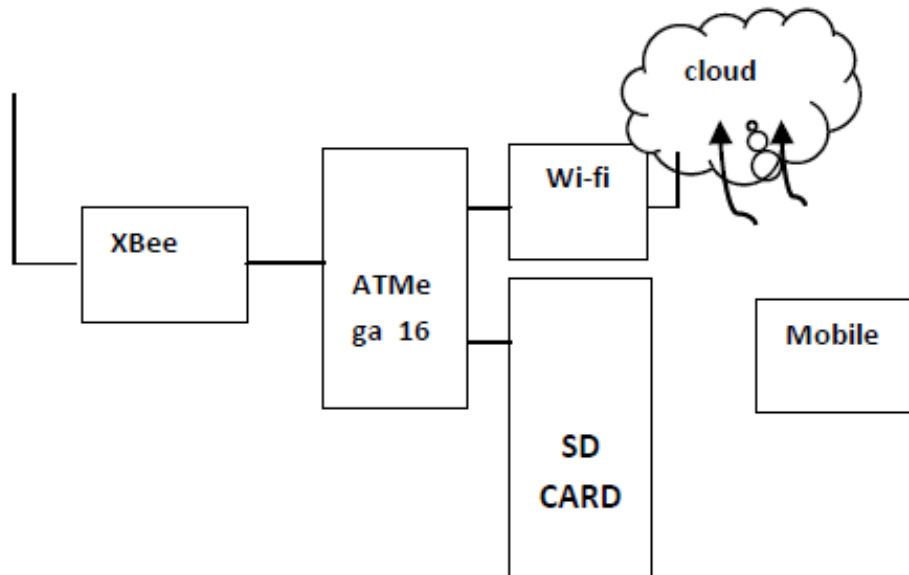


รูปที่ 33 แผนภาพการทำงานของระบบควบคุมอัตโนมัติ (Marebane et al., 2018)

Dahere และคณะ (2019) ได้นำเทคโนโลยีไอโอที (Internet of Things, IoT) มาใช้เพื่อสร้างระบบแสดงผลและควบคุมสำหรับใช้ในการปั้มน้ำและการอบแห้ง โดยระบบแสดงผลและควบคุมจะประกอบด้วย 2 ระบบย่อย คือ ระบบส่งสัญญาณ (Transmitter System) (รูปที่ 34) และระบบรับสัญญาณ (Receiver System) (รูปที่ 35) โดยระบบส่งสัญญาณประกอบด้วยเซนเซอร์จำนวนมาก ได้แก่ อุณหภูมิและความชื้นของอากาศ ความเข้มรังสีอาทิตย์ น้ำหนัก แรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า อัตราการไหลของน้ำ และอัตราการไหลของอากาศ ซึ่งเซนเซอร์เหล่านี้จะเชื่อมต่อกับคอนโทรลเลอร์ ATmega16 ที่จะประมวลผลข้อมูลที่ได้จากการวัดและส่งข้อมูลดังกล่าวผ่านโมดูล XBee ไปยังระบบรับสัญญาณ ระบบรับสัญญาณจะนำข้อมูลที่ได้อ่านบันทึกลงในการ์ดเก็บข้อมูล (SD Card) พร้อมทั้งส่งข้อมูลไปเก็บไว้ในระบบฐานข้อมูล (คลาวด์) โดยผู้ใช้สามารถเข้าถึงข้อมูลที่อยู่ในฐานข้อมูลได้แบบเรียลไทม์ผ่านแอปพลิเคชันบนโทรศัพท์มือถือ (รูปที่ 36) ที่ผู้วิจัยได้พัฒนาขึ้น นอกจากนี้ผู้ใช้อย่างสามารถควบคุมระบบปั้มน้ำและระบบอบแห้งผ่านแอปพลิเคชันดังกล่าวได้ด้วย



รูปที่ 34 แผนภาพการทำงานของระบบส่งสัญญาณ (Dahere et al., 2019)



รูปที่ 35 แผนภาพการทำงานของระบบรับสัญญาณ (Dahere et al., 2019)



รูปที่ 36 ลักษณะหน้าจอแอปพลิเคชันบนโทรศัพท์มือถือ (Dahere et al., 2019)

จากการศึกษาวิจัยที่เกี่ยวข้องพบว่า เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ที่ใช้ระบบควบคุมและระบบแสดงผลส่วนใหญ่ยังเป็นเครื่องอบแห้งที่มีขนาดเล็ก และยังไม่พบเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบเรือนกระจกที่มีการนำระบบควบคุมและระบบแสดงผลมาใช้งาน ดังนั้นผู้วิจัยจึงมีความสนใจที่จะศึกษา และพัฒนาระบบควบคุมและแสดงผลสถานะการอบแห้งสำหรับใช้ในเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบเรือนกระจก โดยผู้ใช้งานสามารถติดตามและสั่งการเพื่อควบคุมสถานะการอบแห้งผ่านเครือข่ายอินเทอร์เน็ตได้ โดยรายละเอียดการศึกษาและพัฒนาจะกล่าวไว้ในบทต่อไป

### บทที่ 3

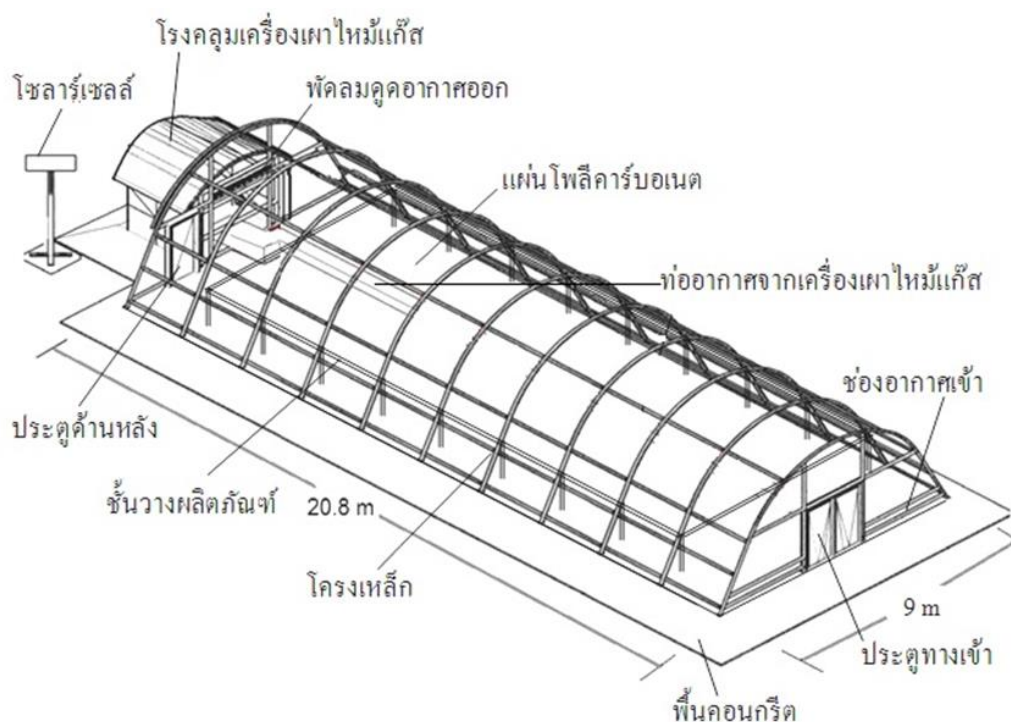
#### การดำเนินงานวิจัยและผลการวิจัย

ในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยได้ดำเนินการพัฒนาระบบควบคุมและแสดงผลสถานะการอบแห้งสำหรับใช้ในเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบเรือนกระจก โดยระบบดังกล่าวสามารถทำงานผ่านเครือข่ายอินเทอร์เน็ตได้ ระบบที่ผู้วิจัยพัฒนาขึ้นนี้จะถูกติดตั้งเข้ากับเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบเรือนกระจกขนาดใหญ่ (พื้นที่ฐาน 9.0 x 20.8 ตารางเมตร) จำนวน 18 เครื่อง ซึ่งเครื่องอบแห้งทั้งหมดตั้งอยู่ที่อำเภอบางกระทุ่ม จังหวัดพิษณุโลก เมื่อติดตั้งระบบควบคุมและแสดงผลสถานะการอบแห้งแล้ว ผู้วิจัยได้ทดสอบสมรรถนะและพัฒนาแบบจำลองสมการถดถอยที่มีเทอมจากตัวแปรอื่น (ARX) ของเครื่องอบแห้งทั้ง 18 เครื่อง โดยรายละเอียดต่าง ๆ มีดังต่อไปนี้

#### 3.1 เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบเรือนกระจก

เครื่องอบแห้งที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบเรือนกระจกขนาดใหญ่ ซึ่งมีความกว้าง 9 เมตร ยาว 20.8 เมตร และสูง 3.5 เมตร (รูปที่ 37) เครื่องอบแห้งนี้ประกอบด้วย โครงสร้างเหล็กรูปทรงพาราโบลายึดติดกับพื้นซีเมนต์ และปิดด้านบนด้วยแผ่นโพลีคาร์บอเนตใสชนิดมีช่องอากาศ ภายในมีชั้นสำหรับวางผลิตภัณฑ์ 6 แถว ด้านหน้ามีช่องอากาศเข้า ส่วนด้านหลังมีระบบระบายอากาศออก โดยระบบระบายอากาศ ประกอบด้วย 2 ระบบย่อย: ระบบย่อยที่ 1 ใช้พัดลมไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 14.4 วัตต์ จำนวน 9 ตัว ซึ่งระบบย่อยนี้จะใช้พลังงานไฟฟ้าจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ขนาด 50 วัตต์ จำนวน 3 แผง และระบบย่อยที่ 2 ใช้พัดลมไฟฟ้ากระแสสลับขนาด 35 วัตต์ จำนวน 6 ตัว โดยระบบย่อยทั้ง 2 จะทำหน้าที่ดูดอากาศขึ้นภายในเครื่องอบแห้งออกสู่อากาศแวดล้อม นอกจากนี้ยังมีระบบความร้อนเสริมเป็นเครื่องเผาไหม้แก๊ส LPG (LPG gas burner) สำหรับให้พลังงานความร้อนเสริมในเวลากลางวันขณะที่ฟ้าครึ้มหรือฝนตก ซึ่งเป็นช่วงที่ปริมาณรังสีอาทิตย์ไม่เพียงพอสำหรับทำความร้อนให้แก่ระบบอบแห้ง





รูปที่ 37 โครงสร้างของเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบเรือนกระจกขนาดใหญ่

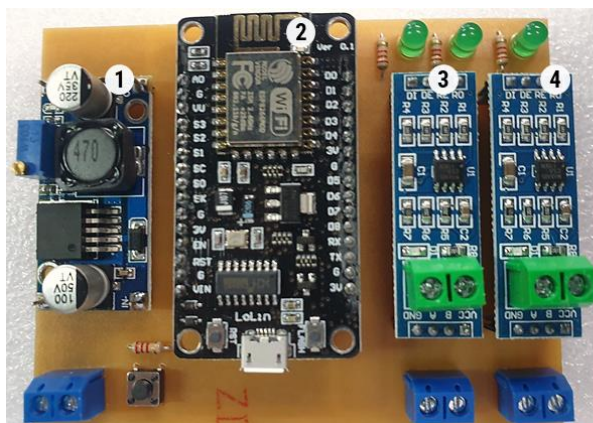
### 3.2 การพัฒนาระบบควบคุมและแสดงผลสถานะการอบแห้ง

ระบบควบคุมและแสดงผลสถานะการอบแห้งประกอบด้วย 4 ส่วน คือ บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์หลัก ระบบแสดงผลสถานะการอบแห้ง ระบบควบคุมสถานะการอบแห้ง และตู้ควบคุม โดยรายละเอียดของแต่ละส่วนมีดังต่อไปนี้

#### 3.2.1 บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์หลัก

บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์หลัก ประกอบด้วย ไมโครคอนโทรลเลอร์หลัก (Arduino Node MCU) โมดูลแปลงแรงดันไฟฟ้า (LM2596S) และโมดูลสื่อสาร (RS-485) (รูปที่ 38) บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์หลักนี้จะเป็นหน่วยประมวลผลของทั้งระบบ มีหน้าที่ออกคำสั่งควบคุมหน่วยย่อยอื่น ๆ เก็บรวบรวมข้อมูล และส่งข้อมูลไปยังระบบฐานข้อมูล (คลาวด์) ซึ่งไมโครคอนโทรลเลอร์หลักจะมีโมดูล WiFi (model ESP8266) อยู่ในตัว ทำให้การติดต่อสื่อสารระหว่างไมโครคอนโทรลเลอร์หลักกับคอมพิวเตอร์หรือโทรศัพท์มือถือสามารถทำได้โดยไม่ต้องติดตั้งโมดูล WiFi เพิ่มเติม ส่วนการสื่อสารระหว่างไมโครคอนโทรลเลอร์หลักกับไมโครคอนโทรลเลอร์ย่อยของระบบแสดงผลสถานะการอบแห้ง และระบบควบคุมสถานะการอบแห้งจะติดต่อสื่อสารกันผ่านโมดูลสื่อสาร (RS-485)





1. โมดูลแปลงแรงดันไฟฟ้า
2. Arduino Node MCU
3. และ 4. โมดูลสื่อสาร

รูปที่ 38 บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์หลัก

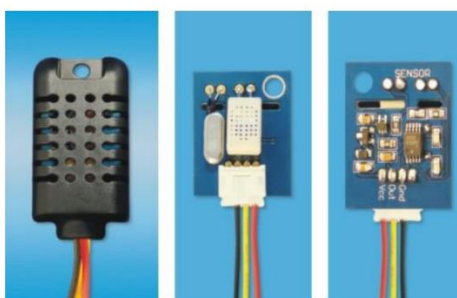
### 3.2.2 ระบบแสดงผลภาวะการอบแห้ง

ระบบแสดงผลภาวะการอบแห้ง ประกอบด้วย ชุดเซนเซอร์วัดอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ เครื่องชั่งน้ำหนักของตัวอย่างผลิตภัณฑ์ที่อยู่ในเครื่องอบแห้ง และกล้องถ่ายภาพผลิตภัณฑ์ภายในเครื่องอบแห้ง โดยรายละเอียดของแต่ละส่วนมีดังนี้

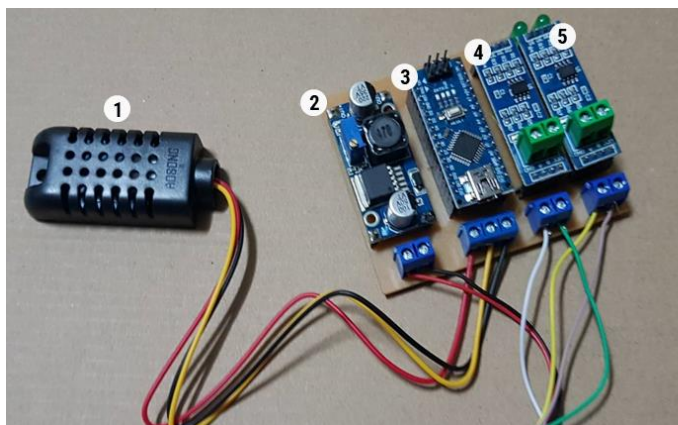
#### 3.2.2.1 ชุดเซนเซอร์วัดอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ

ชุดเซนเซอร์วัดอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ ประกอบด้วย เซนเซอร์วัดอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ (AOSONG, model AM2301 DHT21) (รูปที่ 39) ที่ต่อกับบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ย่อย (รูปที่ 40) โดยในบอร์ดประกอบด้วย โมดูลแปลงแรงดันไฟฟ้า (LM2596S) ไมโครคอนโทรลเลอร์ย่อย (Arduino Nano) และโมดูลสื่อสาร (RS-485)

AM2301 เป็นเซนเซอร์ชนิดคาปาซิทีฟ (capacitive) ที่สามารถตรวจวัดได้ทั้งอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศภายในเซนเซอร์ตัวเดียว เซนเซอร์นี้สามารถวัดอุณหภูมิได้ในช่วง -40 ถึง 80 องศาเซลเซียส มีค่าความคลาดเคลื่อนของการวัดอุณหภูมิอยู่ที่  $\pm 0.3$  องศาเซลเซียส ส่วนความสามารถในการวัดความชื้นสัมพัทธ์จะอยู่ในช่วง 0 ถึง 99.9 เปอร์เซ็นต์ และมีค่าความคลาดเคลื่อนของการวัดความชื้นสัมพัทธ์อยู่ที่  $\pm 3$  เปอร์เซ็นต์



รูปที่ 39 เซนเซอร์วัดอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ



1. เซนเซอร์วัดอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ
2. โมดูลแปลงแรงดันไฟฟ้า
3. Arduino nano
4. และ 5. โมดูลสื่อสาร

รูปที่ 40 ชุดเซนเซอร์วัดอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ

ผู้วิจัยได้ติดตั้งชุดเซนเซอร์วัดอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศทั้งหมด 10 จุด โดยกระจายอยู่ภายในเครื่องอบแห้ง 9 จุด และภายนอกเครื่องอบแห้งอีก 1 จุด เซนเซอร์ที่อยู่ภายในเครื่องอบแห้งจะยึดติดกับโครงสร้างเหล็กของเครื่องอบแห้งให้มีความสูงจากพื้น 2.5 เมตร ส่วนเซนเซอร์ที่อยู่ภายนอกจะยึดติดกับคานของโรงคลุมเครื่องเผาไหม้แก๊สให้มีความสูงจากพื้น 2.1 เมตร (รูปที่ 41 และ 42) เซนเซอร์ทุกตัวจะเดินสายสัญญาณไปตามคานเหล็กและไปต่อเข้ากับบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์หลักที่ติดตั้งอยู่ภายในตู้ควบคุม



รูปที่ 41 การติดตั้งชุดเซนเซอร์วัดอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศภายในเครื่องอบแห้ง



รูปที่ 42 การติดตั้งชุดเซนเซอร์วัดอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศแวดล้อม

### 3.2.2.2 เครื่องชั่งน้ำหนักของตัวอย่างผลิตภัณฑ์ที่อยู่ในเครื่องอบแห้ง

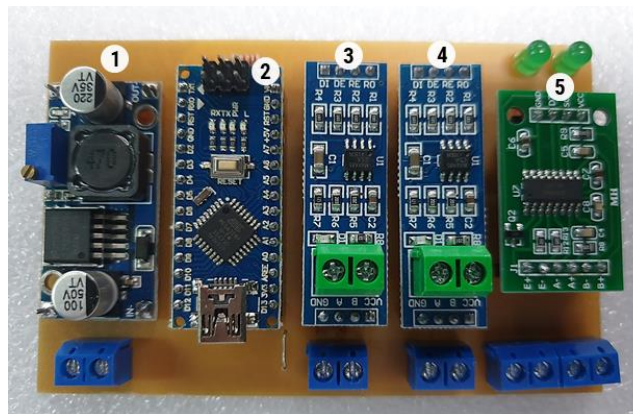
เครื่องชั่งน้ำหนักของตัวอย่างผลิตภัณฑ์ที่อยู่ในเครื่องอบแห้ง ประกอบด้วย เซนเซอร์วัดน้ำหนัก (load cell, GUANG, model YZC-1B) บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ย่อย และระบบคาน (รูปที่ 43-45) โดยภายในบอร์ดประกอบด้วย โมดูลแปลงแรงดันไฟฟ้า (LM2596S) ไมโครคอนโทรลเลอร์ย่อย (Arduino Nano) โมดูลสื่อสาร (RS-485) และโมดูลขยายสัญญาณของเซนเซอร์วัดน้ำหนัก (HX711) ส่วนระบบคานจะเป็นลักษณะของคานกระดก ซึ่งมีระยะความยาวแขนวัดจากจุดหมุนเป็น 60 เซนติเมตร เท่ากันทั้ง 2 ข้าง ปลายด้านหนึ่งของคานจะเชื่อมต่อกับถาดสำหรับวางผลิตภัณฑ์ และปลายอีกด้านจะสัมผัสกับกับเซนเซอร์วัดน้ำหนัก ซึ่งน้ำหนักของผลิตภัณฑ์จะส่งแรงผ่านคานไปตกลงบนเซนเซอร์วัดน้ำหนัก ทำให้เซนเซอร์สามารถอ่านค่าน้ำหนักของผลิตภัณฑ์ได้



รูปที่ 43 เซนเซอร์วัดน้ำหนัก (load cell, GUANG, model YZC-1B)

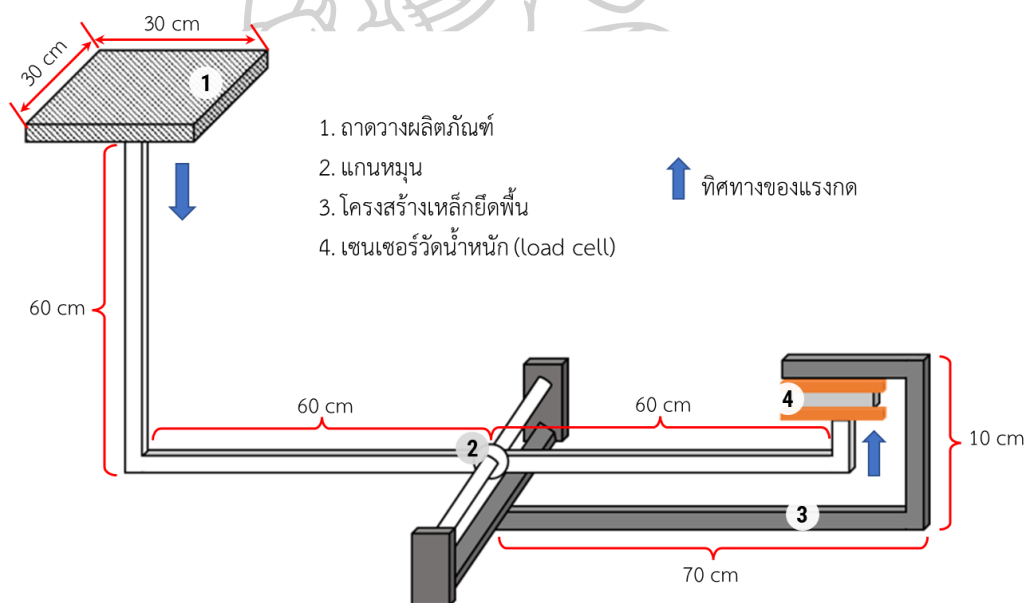


เซนเซอร์วัดน้ำหนักที่ใช้เป็นโหลดเซลล์แบบสเตรนเกจ (Strain Gauge Load cell) ที่สามารถรับน้ำหนักได้สูงสุด 20 กิโลกรัม และมีช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสมต่อการทำงานของอุปกรณ์ที่ -35 ถึง 80 องศาเซลเซียส และเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของการวัดอยู่ที่  $\pm 0.03$  เปอร์เซ็นต์



1. โมดูลแปลงแรงดันไฟฟ้า
2. Arduino nano
3. และ 4. โมดูลสื่อสาร
5. โมดูลขยายสัญญาณของเซนเซอร์วัดน้ำหนัก

รูปที่ 44 บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์สำหรับเซนเซอร์วัดน้ำหนัก



รูปที่ 45 ระบบคานของเครื่องชั่งน้ำหนักของตัวอย่างผลิตภัณฑ์ที่อยู่ในเครื่องอบแห้ง

เครื่องชั่งน้ำหนักของตัวอย่างผลิตภัณฑ์จะติดตั้งอยู่ในโรงคลุมเครื่องเผาไหม้แก๊ส ระบบคานจะมีโครงสร้างเหล็กที่เป็นฐานยึดติดกับพื้น โหลดเซลล์จะยึดติดกับโครงสร้างเหล็กในลักษณะที่คว่ำลงเพื่อรับแรงกดจากน้ำหนักของผลิตภัณฑ์ สายสัญญาณของเซนเซอร์วัดน้ำหนักจะต่อเข้ากับ

ไมโครคอนโทรลเลอร์หลักที่ติดตั้งอยู่ภายในตู้ควบคุม และปลายของคานด้านที่เป็นภาควาดผลิตภัณฑ์ ตัวอย่างจะยื่นเข้าไปในเครื่องอบแห้ง ดังแสดงในรูปที่ 46



รูปที่ 46 การติดตั้งเครื่องชั่งน้ำหนักของตัวอย่างผลิตภัณฑ์

### 3.2.2.3 กล้องถ่ายภาพผลิตภัณฑ์ภายในเครื่องอบแห้ง

กล้องถ่ายภาพสำหรับใช้ถ่ายภาพนิ่งจากภายในเครื่องแห้งเป็นกล้องแบบ USB (ELP, model USBFHD06H) ความละเอียด 2.0 Mega pixel (รูปที่ 47) ซึ่งตัวกล้องสามารถเชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์ได้โดยตรงผ่านสาย USB



รูปที่ 47 กล้องถ่ายภาพสำหรับถ่ายภาพนิ่งจากภายในเครื่องอบแห้ง

กล้องถ่ายภาพสำหรับถ่ายภาพนิ่งจากภายในเครื่องอบแห้งจะติดตั้งภายในโรงคลุมเครื่องเผาไหม้แก๊ส โดยตัวกล้องจะยึดติดกับคานเหล็กกึ่งกลางโรงคลุมเครื่องเผาไหม้แก๊ส และมีระยะห่างจากผนังด้านหลังของเครื่องอบแห้ง 30 เซนติเมตร ตัวกล้องสามารถหมุนเพื่อปรับมุมการถ่ายภาพได้อย่างอิสระ สาย USB ของกล้องจะต่อเข้ากับคอมพิวเตอร์ขนาดเล็กที่ติดตั้งอยู่ภายในตู้ควบคุม ผนังด้านหลังของเครื่องอบแห้งที่เป็นแผ่นโพลีคาร์บอเนต จะถูกเจาะให้มีขนาด 30 x 30 เซนติเมตร และใส่แผ่นอะคริลิกใสปิดช่องว่างนั้น เพื่อให้กล้องสามารถถ่ายภาพภายในเครื่องอบแห้งได้อย่างชัดเจน และเห็นภาพถ่ายในมุมมองกว้าง การติดตั้งกล้องถ่ายภาพแสดงดังรูปที่ 48

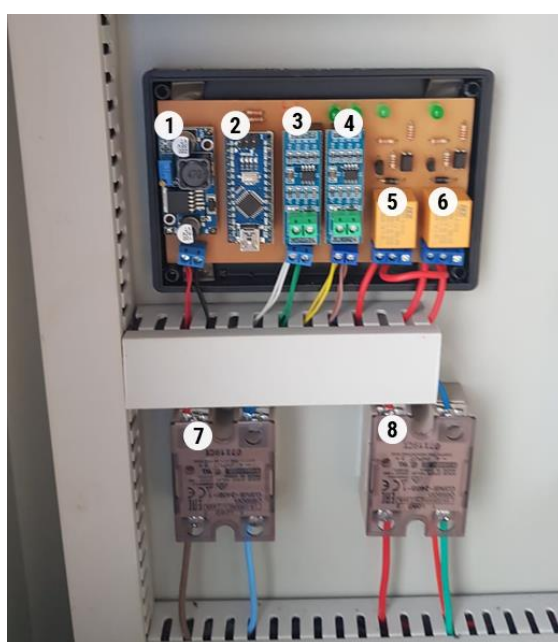


รูปที่ 48 การติดตั้งกล้องถ่ายภาพสำหรับถ่ายภาพนิ่งภายในเครื่องอบแห้ง



### 3.2.3 ระบบควบคุมสถานะการอบแห้ง

ระบบควบคุมสถานะการอบแห้ง ประกอบด้วย ระบบควบคุมการระบายอากาศของระบบย่อยที่ 2 และระบบควบคุมความร้อนเสริม โดยระบบทั้ง 2 จะใช้บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ย่อยเดียวกันในการควบคุม ซึ่งภายในบอร์ด ประกอบด้วย โมดูลแปลงแรงดันไฟฟ้า (LM2596S) ไมโครคอนโทรลเลอร์ย่อย (Arduino Nano) โมดูลสื่อสาร (RS-485) และโมดูลรีเลย์ (HKE, HRS4H-S-DC5V) และบอร์ดดังกล่าวจะทำงานร่วมกับโซลิตสเตตรีเลย์ (Solid State Relay) (OMRON รุ่น G3NA) อีก 2 ตัว (รูปที่ 49)



1. โมดูลแปลงแรงดันไฟฟ้า
2. Arduino nano
3. และ 4. โมดูลสื่อสาร
5. โมดูลรีเลย์สำหรับควบคุมพัดลม
6. โมดูลรีเลย์สำหรับควบคุมเครื่องเผาไหม้แก๊ส
7. โซลิตสเตตรีเลย์สำหรับควบคุมพัดลม
8. โซลิตสเตตรีเลย์สำหรับควบคุมเครื่องเผาไหม้แก๊ส

รูปที่ 49 ระบบควบคุมสถานะการอบแห้ง

การทำงานของระบบควบคุมสถานะการอบแห้งจะแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ การควบคุมการระบายอากาศของระบบย่อยที่ 2 และการควบคุมระบบความร้อนเสริม ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

#### 3.2.3.1 ระบบควบคุมการระบายอากาศของระบบย่อยที่ 2

ระบบควบคุมการระบายอากาศของระบบย่อยที่ 2 จะควบคุมการปิด - เปิดของพัดลมระบายอากาศชนิดใช้กระแสไฟฟ้ากระแสสลับ 6 ตัวที่ติดตั้งอยู่ที่ผนังด้านหลังของเครื่องอบแห้ง (รูปที่ 50) โดยการควบคุมจะใช้โซลิตสเตตรีเลย์เป็นสวิตช์ทางไฟฟ้าทำหน้าที่ปิด - เปิดพัดลมตามคำสั่งที่ได้รับจากบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์



รูปที่ 50 พัดลมระบายอากาศชนิดใช้กระแสไฟฟ้ากระแสสลับ

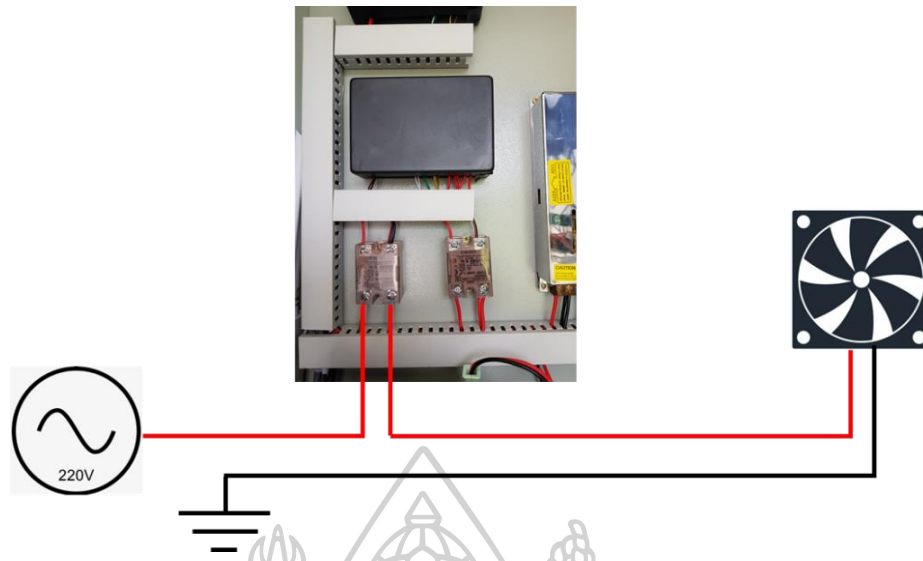
### 3.2.3.2 ระบบควบคุมความร้อนเสริม

ระบบควบคุมความร้อนเสริมเป็นการควบคุมการเผาไหม้แก๊ส LPG ของเครื่องเผาไหม้แก๊ส (รูปที่ 51) ซึ่งติดตั้งอยู่ภายในโรงคลุมเครื่องเผาไหม้แก๊ส โดยการควบคุมจะใช้โซลิตสเตรียเป็นสวิทช์ทางไฟฟ้าทำหน้าที่ปิด - เปิดเครื่องเผาไหม้แก๊สตามคำสั่งที่ได้รับจากบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์

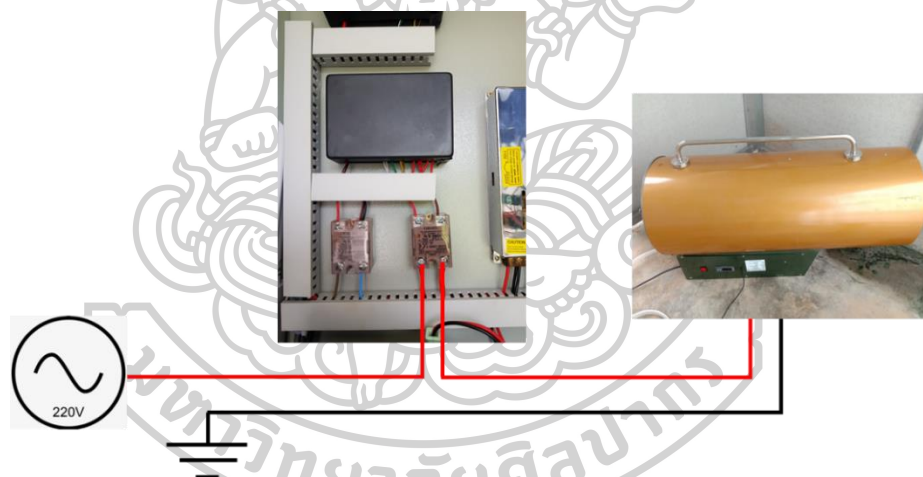


รูปที่ 51 เครื่องเผาไหม้แก๊ส LPG

การติดตั้งระบบควบคุมการระบายอากาศของระบบย่อยที่ 2 และระบบควบคุมความร้อนเสริมจะติดตั้งในลักษณะเดียวกัน คือ ใช้โซลิตสเตรียมาต่อคั่นกลางระหว่างแหล่งจ่ายไฟและตัวอุปกรณ์ของแต่ละระบบ ซึ่งโซลิตสเตรียนี้จะติดตั้งอยู่ในตู้ควบคุม โดยการติดตั้งระบบควบคุมการระบายอากาศและระบบควบคุมความร้อนเสริมแสดงดังรูปที่ 52 และ 53 ตามลำดับ



รูปที่ 52 การติดตั้งระบบควบคุมการระบายอากาศ

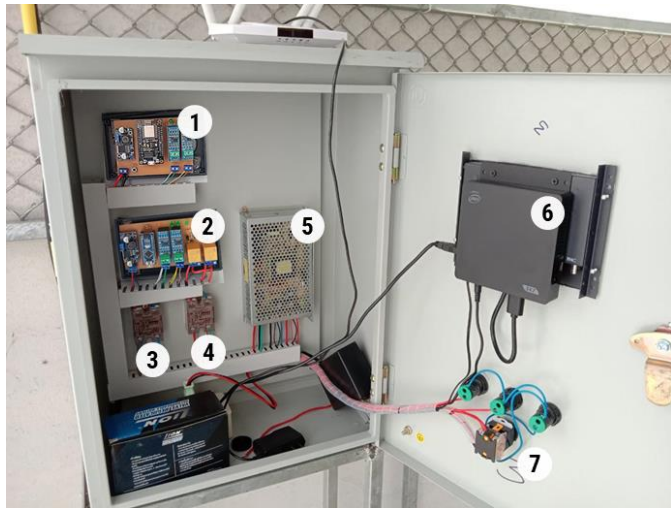


รูปที่ 53 การติดตั้งระบบควบคุมความร้อนเสริม

### 3.2.4 ตู้ควบคุม

ตู้ควบคุมจะเป็นจุดที่รวมเอาส่วนประกอบต่าง ๆ ของระบบมาติดตั้งรวมกันไว้ ซึ่งตู้ควบคุมติดตั้งอยู่ในโรงคุมเครื่องเผาไหม้แก๊ส โดยภายในตู้ประกอบด้วยบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์หลัก บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ย่อยสำหรับควบคุมสถานะการอบแห้ง โซลิดสเตตรีเลย์ สวิตซ์เพาเวอร์ ซัพพลาย (Switching Power Supply) คอมพิวเตอร์ขนาดเล็ก ไฟแสดงสถานะ และสวิตซ์ปิด - เปิดระบบ โดยมีหน้าจอบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ ไฟแสดงสถานะและสวิตซ์ปิด - เปิดระบบ ติดตั้งอยู่บนตู้ควบคุม (รูปที่ 54 และ 55)

สวิตช์เพาเวอร์ซัพพลายจะทำหน้าที่เป็นอุปกรณ์แปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับขนาด 220 V ให้เป็นไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 12 V เพื่อใช้เป็นไฟเลี้ยงของอุปกรณ์ต่าง ๆ ภายในระบบทั้งหมด โดยมีคอมพิวเตอรืเป็นอุปกรณ์ที่ใช้ควบคุมการทำงานของระบบ พร้อมทั้งแสดงผลสถานะการอบแห้งแบบเรียลไทม์ผ่านหน้าจอที่อยู่หน้าตู้ควบคุม



1. บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์หลัก
2. บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ของระบบควบคุมสถานะการอบแห้ง
3. และ 4. โซลิดสเตตรีเลย์
5. สวิตช์เพาเวอร์ซัพพลาย
6. คอมพิวเตอรืขนาดเล็ก
7. สวิตช์ปิด-เปิดระบบและหลอดไฟแสดงสถานะ

รูปที่ 54 ส่วนประกอบต่าง ๆ ภายในตู้ควบคุม



1. หน้าจอคอมพิวเตอร์
2. ไฟแสดงสถานะของระบบอบแห้ง
3. ไฟแสดงสถานะของพัดลม
4. ไฟแสดงสถานะของความร้อนเสริม
5. สวิตช์ปิด-เปิดระบบ

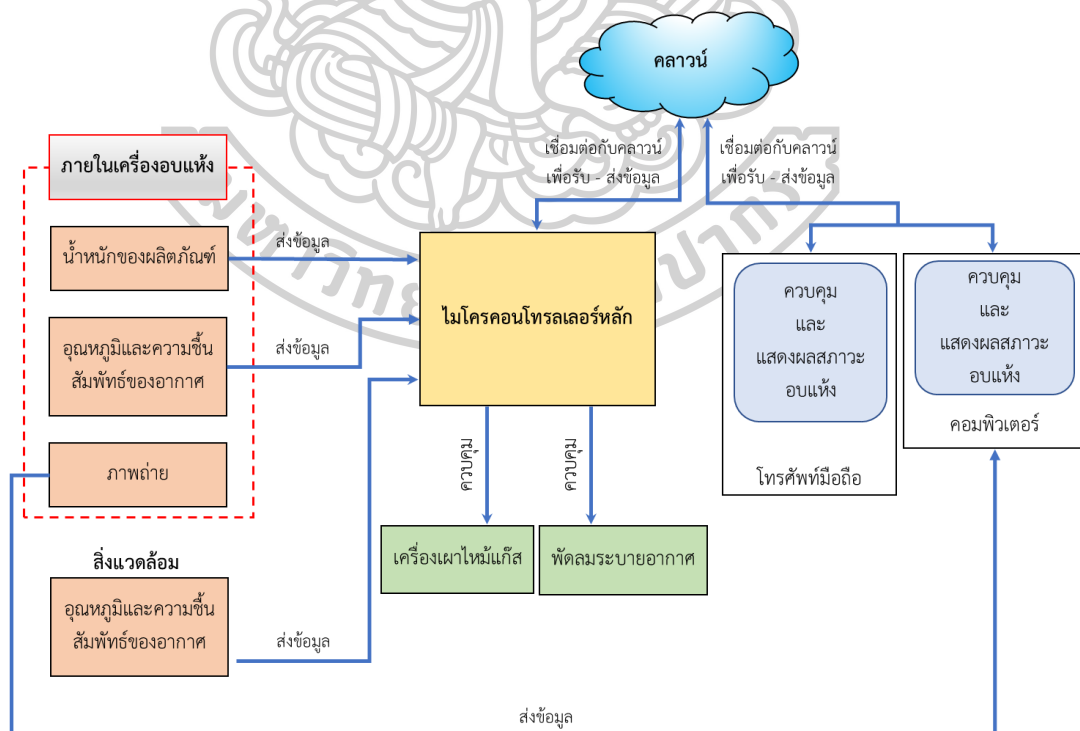
รูปที่ 55 ส่วนประกอบต่าง ๆ บริเวณหน้าตู้ควบคุม



### 3.2.5 การทำงานของระบบควบคุมและแสดงผลสถานะการอบแห้ง

การทำงานของระบบควบคุมและแสดงผลสถานะการอบแห้งแสดงดังรูปที่ 56 โดยเริ่มจากไมโครคอนโทรลเลอร์หลัก (Arduino Node MCU) ทำการสื่อสารกับไมโครคอนโทรลเลอร์ย่อย (Arduino Nano) ผ่านโมดูลสื่อสาร (RS-485) เพื่อเก็บรวบรวมข้อมูลที่ได้จากการวัดด้วยเซนเซอร์ ซึ่งได้แก่ น้ำหนักของตัวอย่างผลิตภัณฑ์ภายในเครื่องอบแห้ง อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศทั้งภายในเครื่องอบแห้งและสิ่งแวดล้อม จากนั้นไมโครคอนโทรลเลอร์หลักจะส่งข้อมูลที่รวบรวมได้ผ่านอินเทอร์เน็ตไปเก็บไว้ในระบบฐานข้อมูล (คลาวด์) ส่วนการถ่ายภาพภายในเครื่องอบแห้ง ตัวกล้องจะเชื่อมต่อโดยตรงกับคอมพิวเตอร์ขนาดเล็ก ดังนั้นภาพที่ถ่ายได้จะถูกคอมพิวเตอร์ส่งผ่านอินเทอร์เน็ตไปเก็บไว้ในระบบฐานข้อมูล ซึ่งผู้ใช้งานสามารถดูข้อมูลสถานะการอบแห้งผ่านทางโทรศัพท์มือถือหรือดูผ่านหน้าจอคอมพิวเตอร์ที่อยู่ด้านหน้าของผู้ควบคุม

เมื่อผู้ใช้งานทราบสถานะการอบแห้งแล้ว ผู้ใช้งานสามารถส่งคำสั่งผ่านโทรศัพท์มือถือเพื่อไปควบคุมการทำงานของระบบควบคุมสถานะการอบแห้ง โทรศัพท์มือถือจะส่งคำสั่งดังกล่าวผ่านอินเทอร์เน็ต จากนั้นไมโครคอนโทรลเลอร์หลักจะอ่านค่าคำสั่ง และส่งคำสั่งผ่านโมดูลสื่อสารต่อไปยังไมโครคอนโทรลเลอร์ย่อยเพื่อทำการปิด - เปิดพัดลมระบายอากาศหรือปิด - เปิดเครื่องเผาไหม้แก๊สตามคำสั่งที่ได้รับจากผู้ใช้งาน



รูปที่ 56 แผนผังการทำงานของระบบควบคุมและแสดงผลสถานะการอบแห้ง

ผู้วิจัยได้ติดตั้งระบบควบคุมและแสดงผลสถานะการอบแห้งที่พัฒนาขึ้นเข้ากับเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบเรือนกระจกขนาดใหญ่ทั้งหมด 18 เครื่อง ที่ตั้งอยู่ที่อำเภอบางกระทุ่ม จังหวัดพิษณุโลก (รูปที่ 57)



เครื่องที่ 1



เครื่องที่ 2



เครื่องที่ 3

รูปที่ 57 ระบบควบคุมและแสดงผลสถานะการอบแห้งที่ติดตั้งเข้ากับเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบเรือนกระจกขนาดใหญ่ทั้ง 18 เครื่อง





เครื่องที่ 4



เครื่องที่ 5



เครื่องที่ 6

รูปที่ 57 (ต่อ)



เครื่องที่ 7



เครื่องที่ 8



เครื่องที่ 9

รูปที่ 57 (ต่อ)



เครื่องที่ 10



เครื่องที่ 11



เครื่องที่ 12

รูปที่ 57 (ต่อ)



เครื่องที่ 13



เครื่องที่ 14



เครื่องที่ 15

รูปที่ 57 (ต่อ)





เครื่องที่ 16



เครื่องที่ 17



เครื่องที่ 18

รูปที่ 57 (ต่อ)

### 3.3 การทดสอบสมรรถนะของเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบเรือนกระจก

ผู้วิจัยได้ทดสอบสมรรถนะของเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบเรือนกระจกทั้ง 18 เครื่อง ที่ติดตั้งระบบควบคุมและแสดงผลสถานะการอบแห้งด้วยการทดลองอบแห้งกล้วยน้ำว้า ประมาณ 1,000-1,200 กิโลกรัม ควบคู่ไปกับการตากกล้วยน้ำว้าด้วยวิธีการตากแห้งตามธรรมชาติ โดยผู้วิจัยได้ติดตั้งไพราโนมิเตอร์ (Kipp & Zonen, model CMP 21) บนหลังคาเครื่องอบแห้ง เพื่อวัดความเข้มรังสีอาทิตย์ (รูปที่ 58) และติดตั้งเทอร์โมคัปเปิล type k พร้อมทั้งเครื่องวัดความชื้นสัมพัทธ์ (E+E ELEKTRONIK รุ่น EE23) สำหรับวัดอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศภายในเครื่องอบแห้งและอากาศแวดล้อม โดยสัญญาณจากเครื่องวัดเหล่านี้จะส่งไปยังเครื่องบันทึกข้อมูล (Yokogawa, model DC 100 ) ทุก ๆ 10 นาที และซิงก์นำหนักกล้วยตัวอย่างที่อยู่ภายในเครื่องอบแห้งและที่ตากแห้งตามธรรมชาติทุก ๆ 2 ชั่วโมง การทดลองอบแห้งกล้วยน้ำว้าของเครื่องอบแห้งทั้ง 18 เครื่องได้ดำเนินการในช่วงเวลา 08.00-18.00 น. ของเดือนมิถุนายน-กันยายน 2563 รายละเอียดดังตารางที่ 3

เมื่อกล้วยน้ำว้าตัวอย่างมีน้ำหนักคงที่จะถือว่าการอบแห้งเสร็จสิ้น ตัวอย่างกล้วยน้ำว้าที่อยู่ภายในเครื่องอบแห้งและที่ตากแห้งตามธรรมชาติจะถูกนำมาหาค่าแอกติวิตีของน้ำด้วยเครื่องวัดแอกติวิตีของน้ำ (ROTRONIC รุ่น hygropalm) จากนั้นจะนำมาอบแห้งในเตาอบไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 103 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อหามวลแห้งของกล้วยน้ำว้า



รูปที่ 58 การติดตั้งไพราโนมิเตอร์บนหลังคาเครื่องอบแห้ง เพื่อวัดความเข้มรังสีอาทิตย์



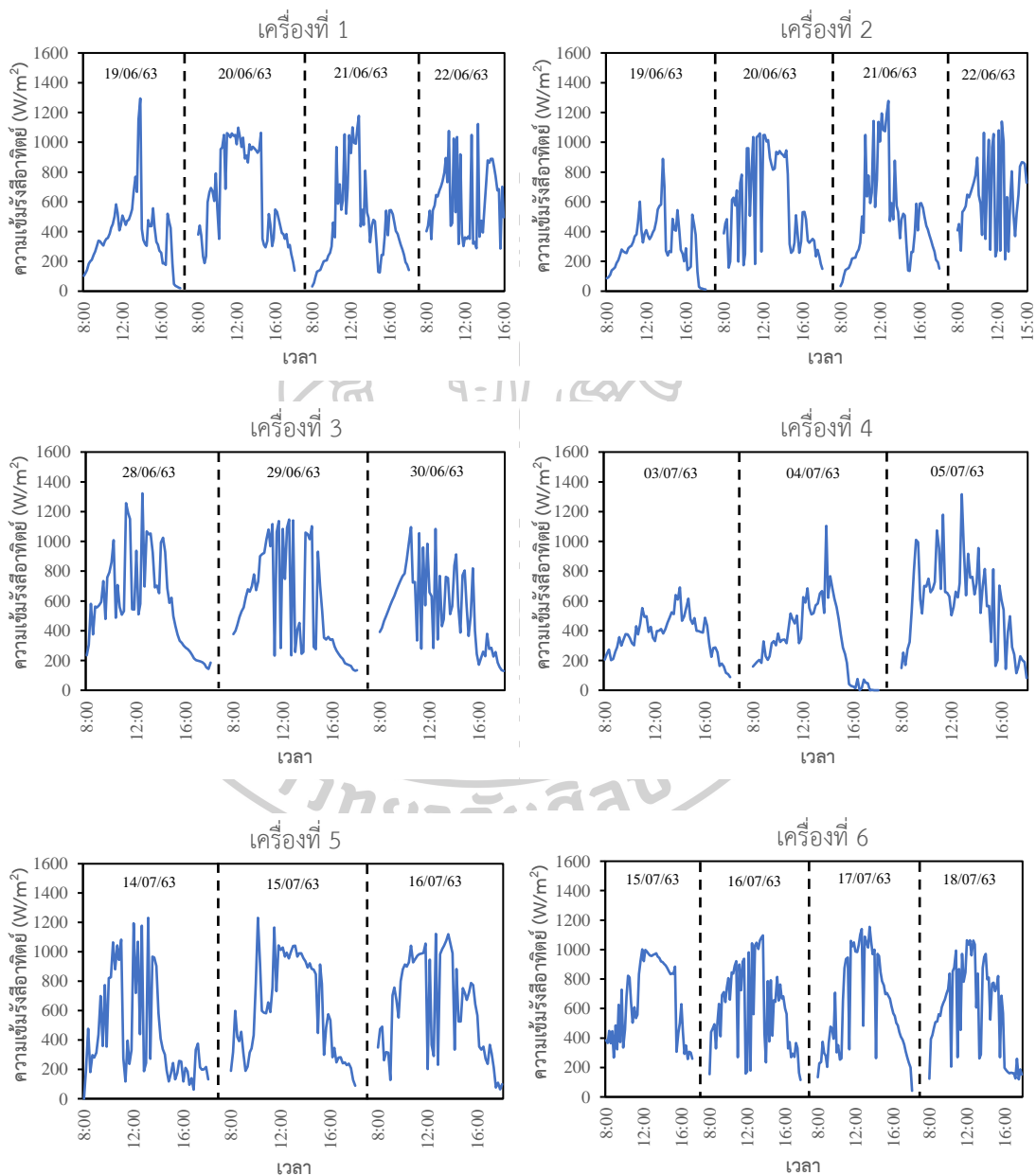
ตารางที่ 3 ช่วงเวลาดำเนินการทดลองอบแห้งกล้วยน้ำว้า

ลำดับของเครื่องอบแห้ง	ช่วงเวลาทำการทดลอง
1	19 - 22 มิ.ย. 2563
2	19 - 22 มิ.ย. 2563
3	28 - 30 มิ.ย. 2563
4	3 - 5 ก.ค. 2563
5	14 - 16 ก.ค. 2563
6	15 - 18 ก.ค. 2563
7	3 - 7 ส.ค. 2563
8	4 - 8 ส.ค. 2563
9	10 - 14 ส.ค. 2563
10	14 - 19 ส.ค. 2563
11	15 - 19 ส.ค. 2563
12	16 - 20 ส.ค. 2563
13	16 - 20 ส.ค. 2563
14	26 - 28 ส.ค. 2563
15	27 - 29 ส.ค. 2563
16	30 ส.ค. - 1 ก.ย. 2563
17	8 - 10 ก.ย. 2563
18	8 - 11 ก.ย. 2563

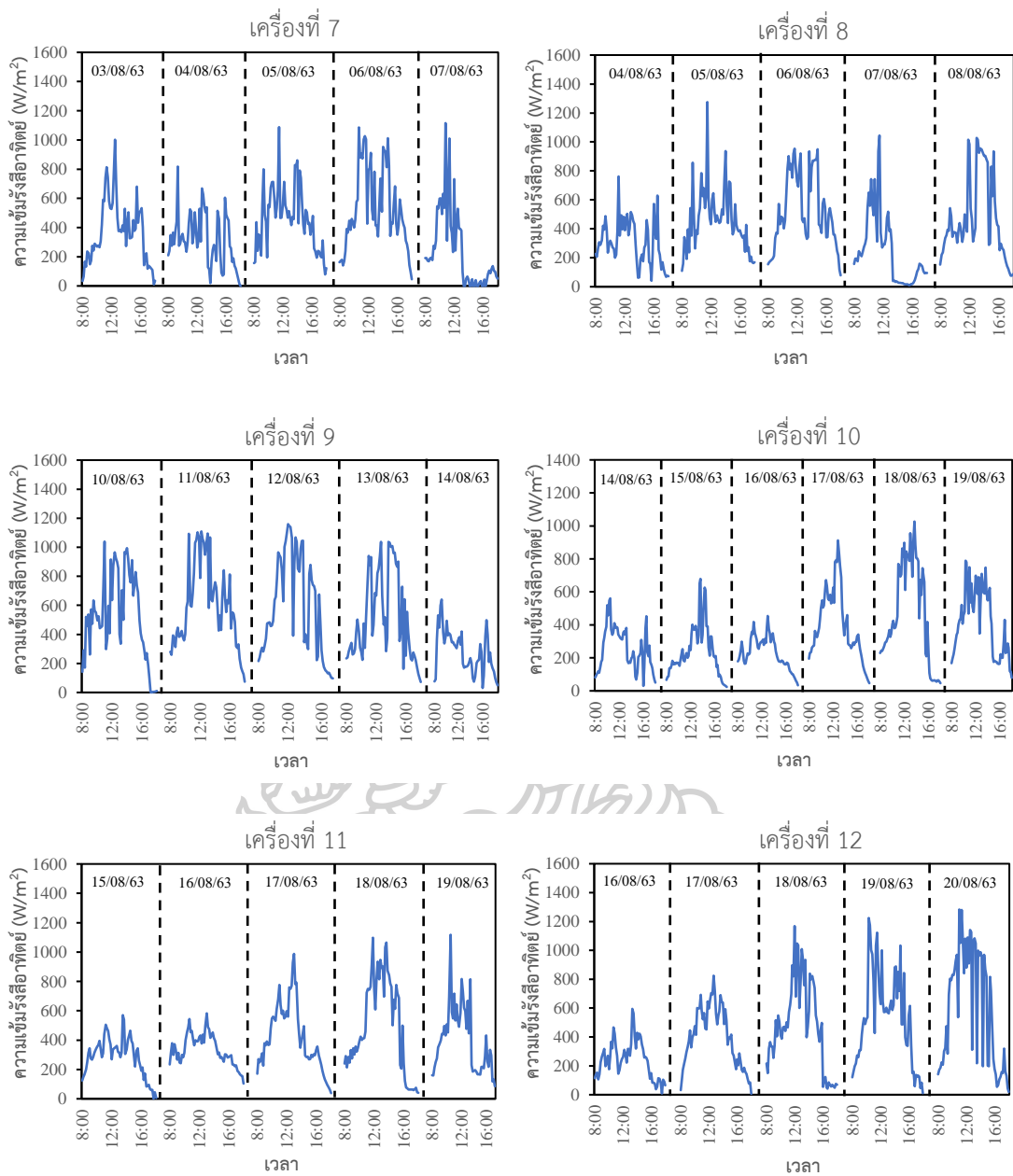
### 3.4 ผลการทดสอบเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบเรือนกระจก

#### 3.4.1 สมรรถนะของเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบเรือนกระจก

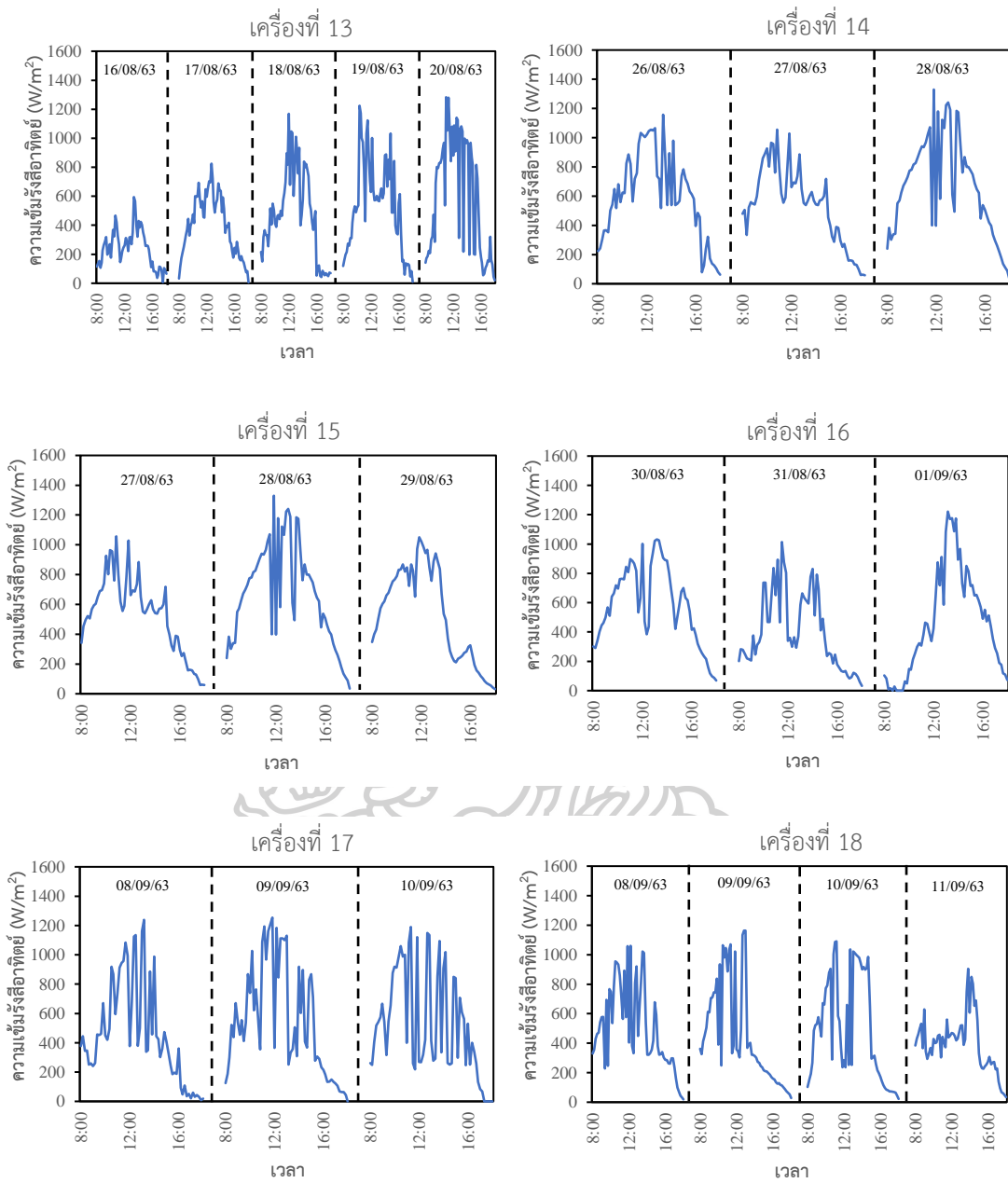
จากการทดลองอบแห้งกล้วยน้ำว้าของเครื่องอบแห้งแต่ละเครื่อง ผู้วิจัยได้นำข้อมูลรังสีอาทิตย์ ข้อมูลอุณหภูมิอากาศ ข้อมูลความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ และข้อมูลความชื้นของผลิตภัณฑ์ในช่วงเวลา 08.00-18.00 น. มาเขียนกราฟเทียบกับเวลา ดังแสดงในรูปที่ 59-62



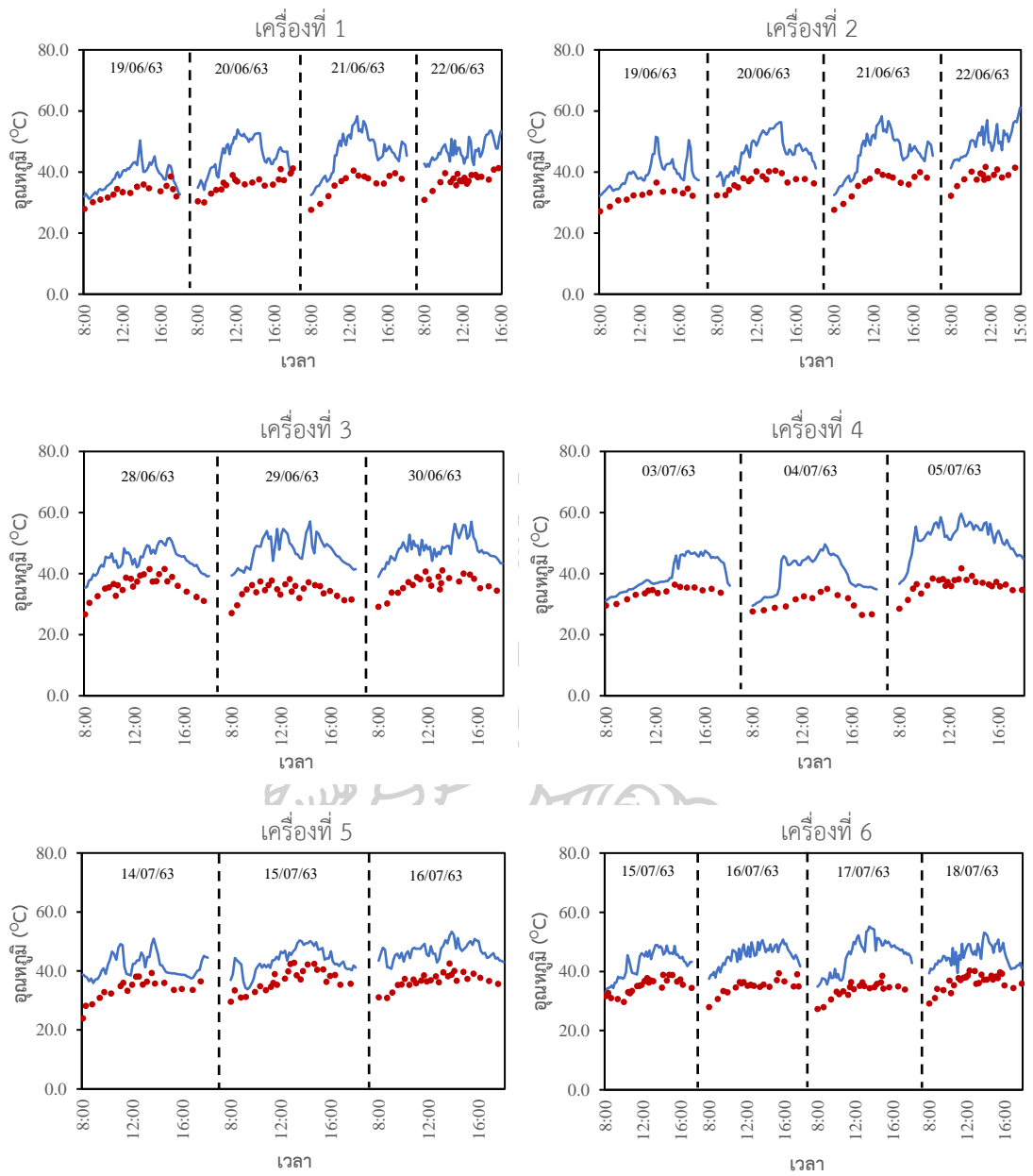
รูปที่ 59 ความเข้มรังสีอาทิตย์ที่เปลี่ยนแปลงในช่วงเวลา 08.00-18.00 น. ของเครื่องอบแห้ง 18 เครื่อง



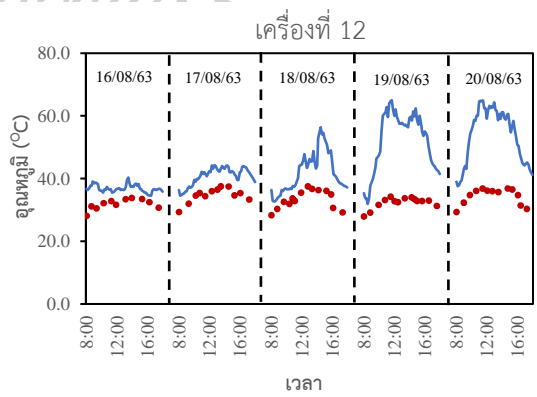
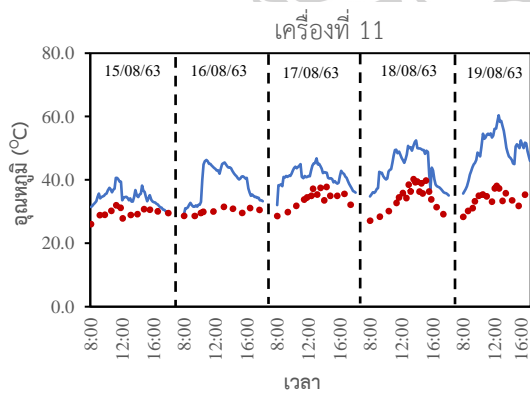
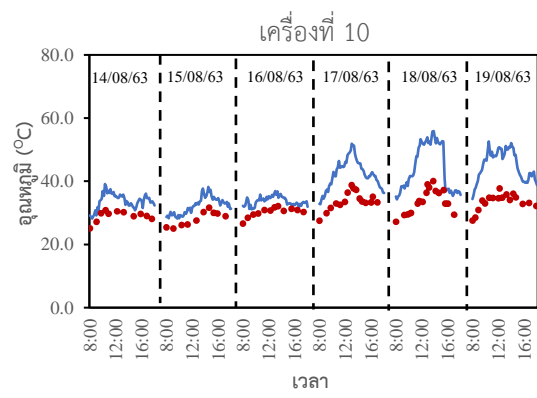
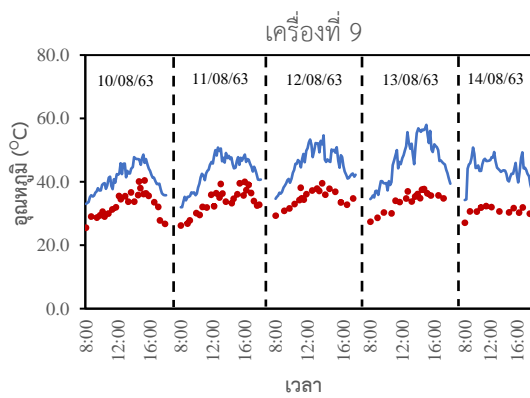
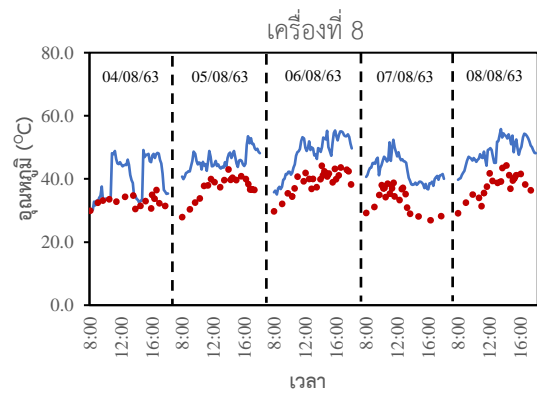
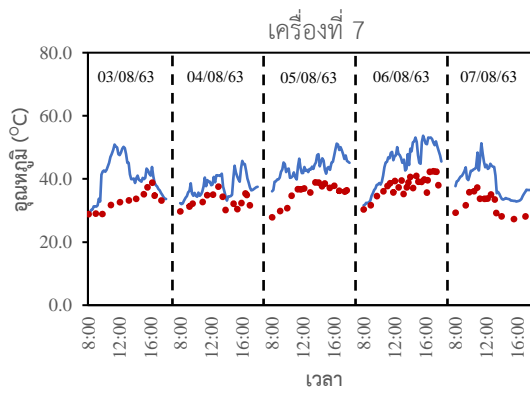
รูปที่ 59 (ต่อ)



รูปที่ 59 (ต่อ)

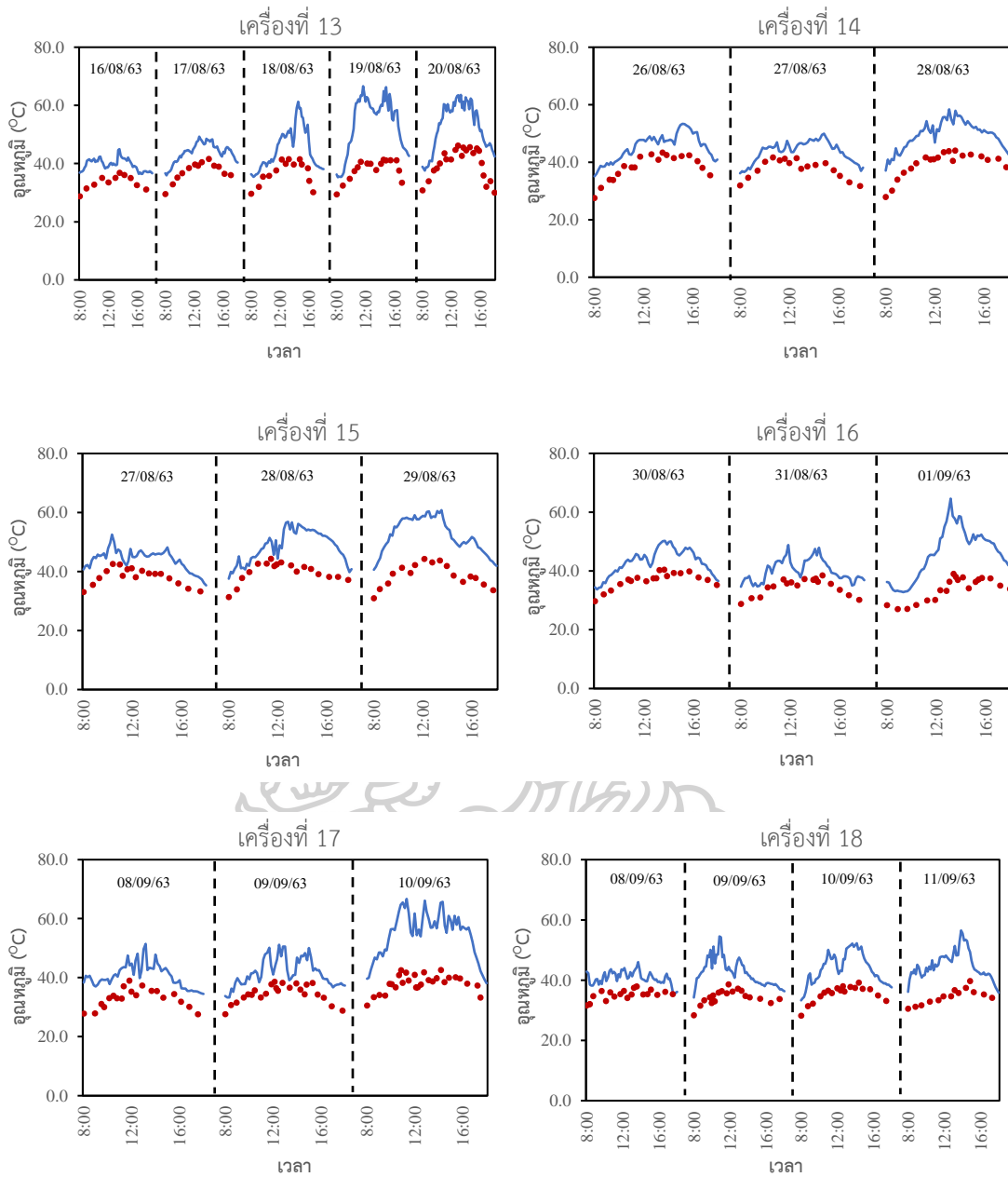


รูปที่ 60 การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิอากาศภายในเครื่องบินทั้ง 18 เครื่อง (—) และอุณหภูมิของอากาศแวดล้อม (•••)

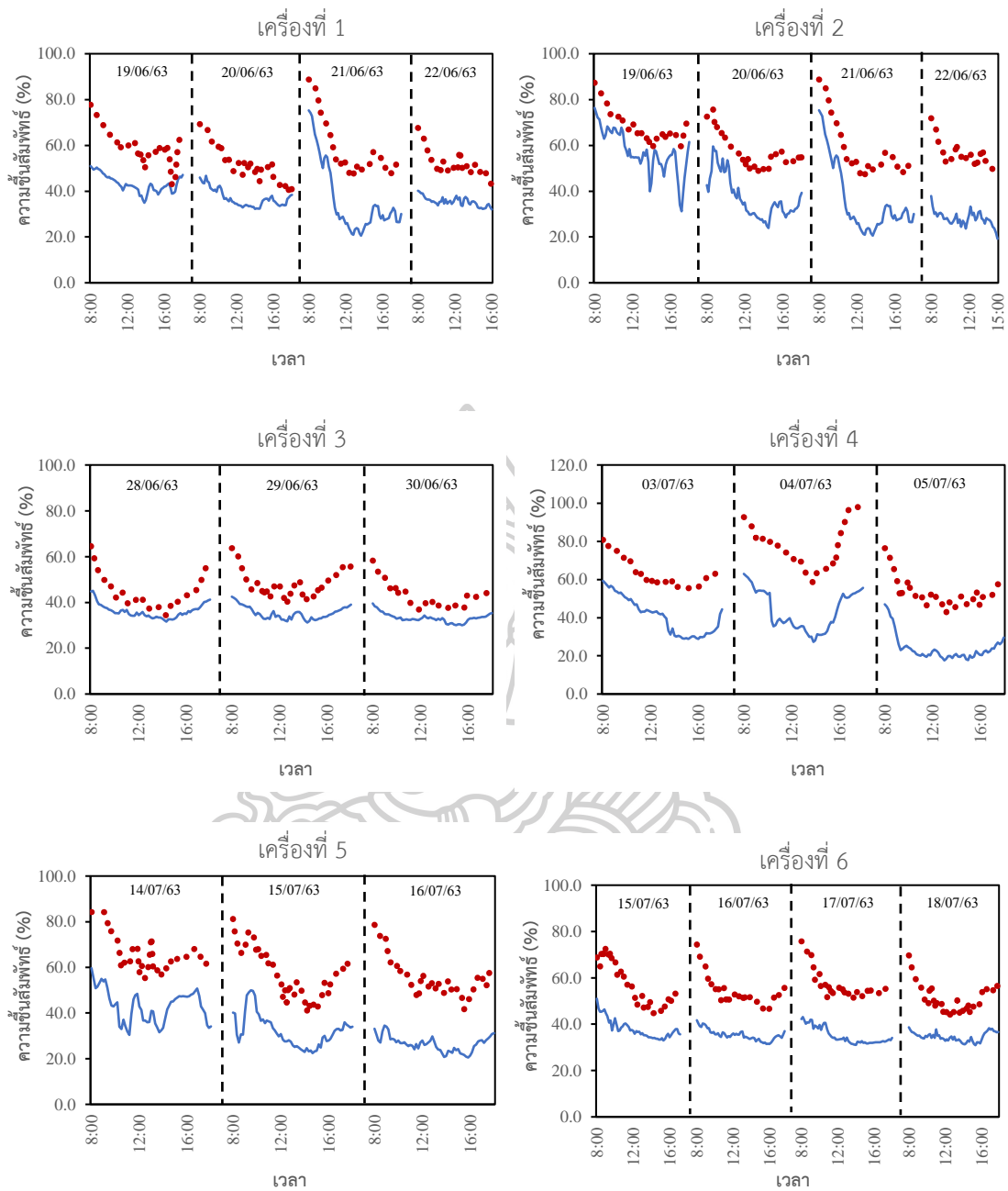


รูปที่ 60 (ต่อ)

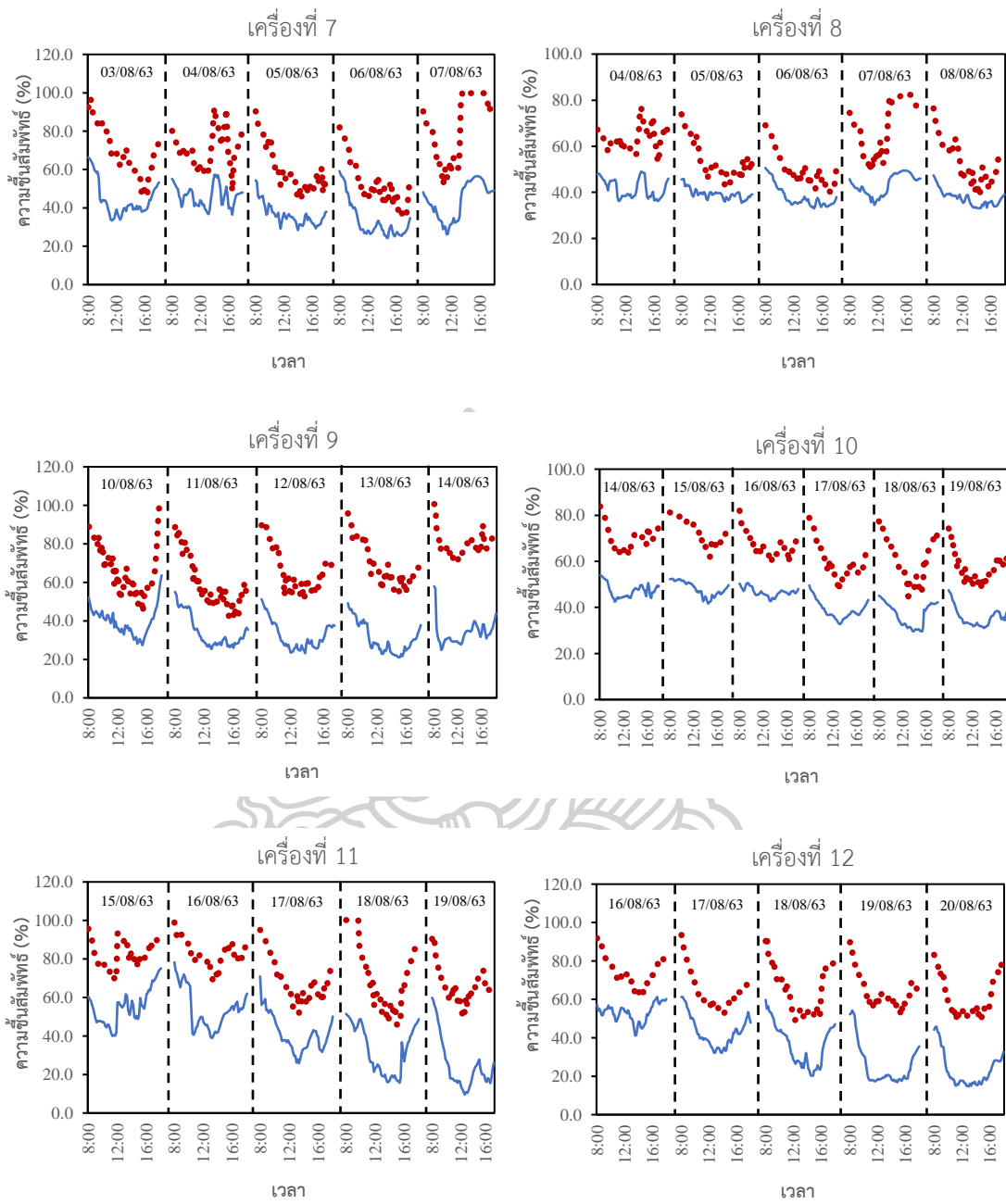




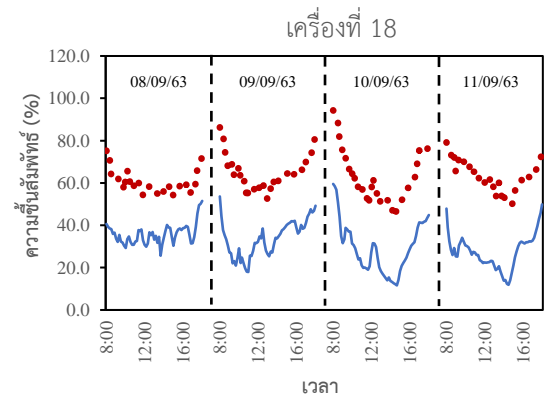
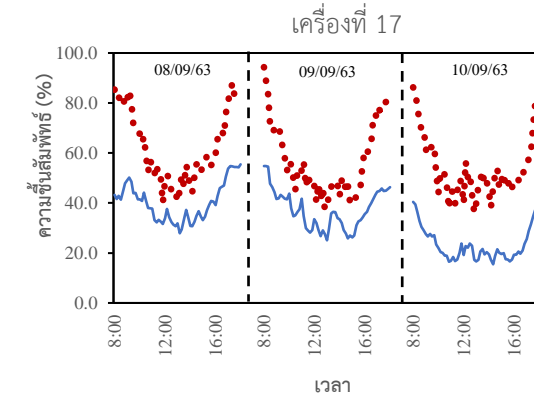
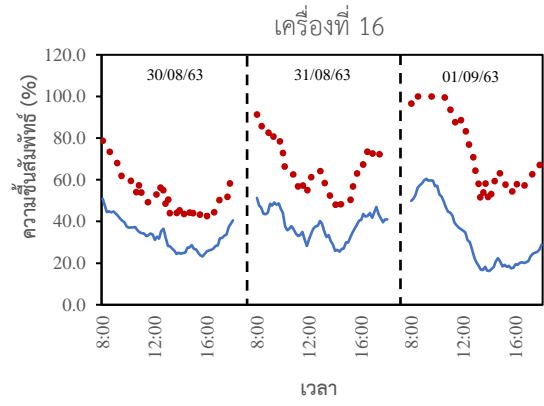
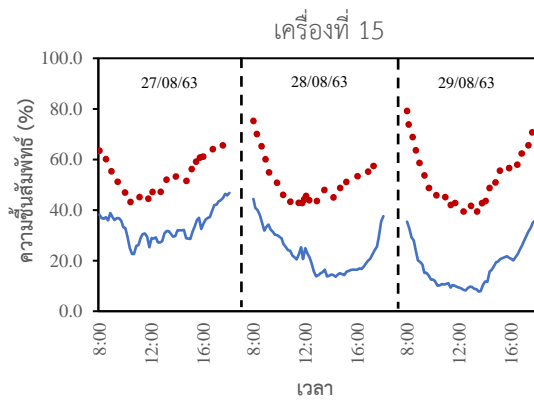
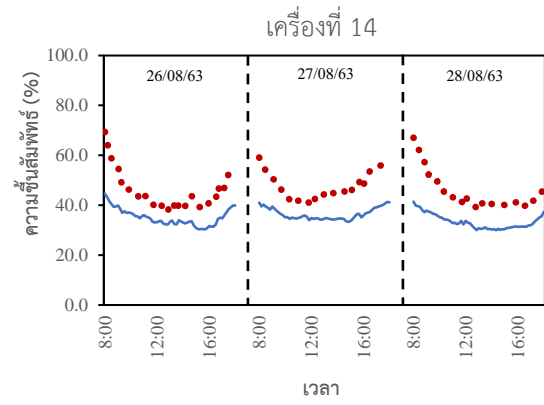
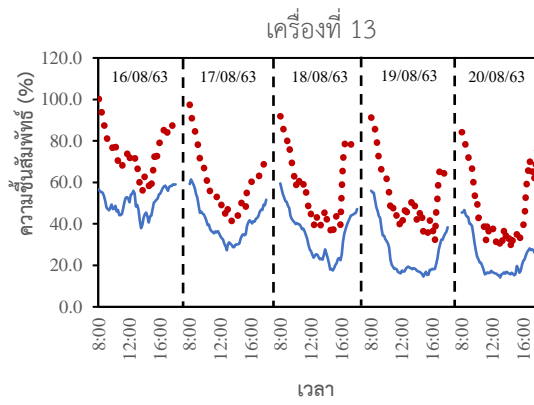
รูปที่ 60 (ต่อ)



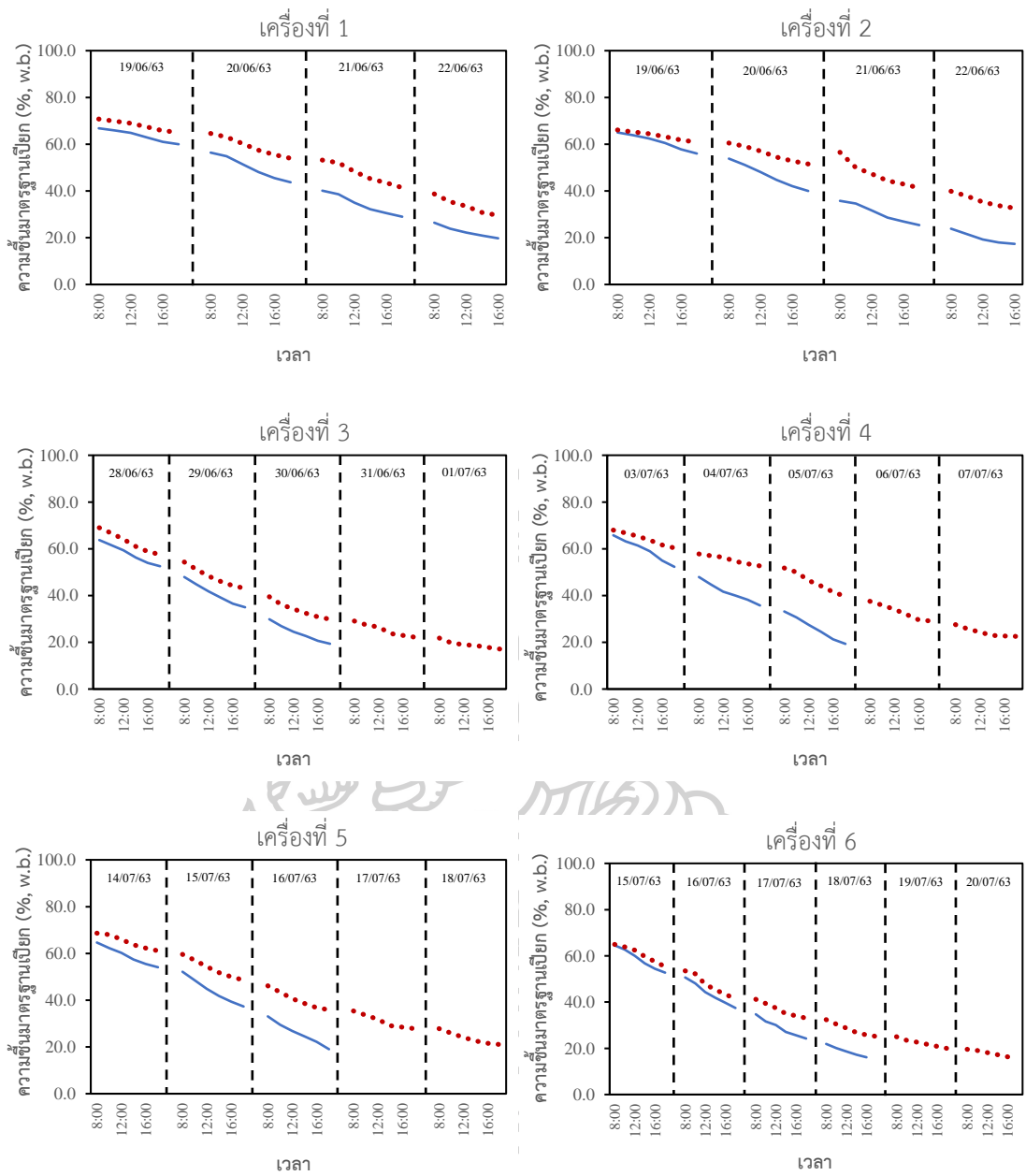
รูปที่ 61 การเปลี่ยนแปลงของความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศภายในเครื่องอบแห้ง 18 เครื่อง (—) และความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศแวดล้อม (●●●)



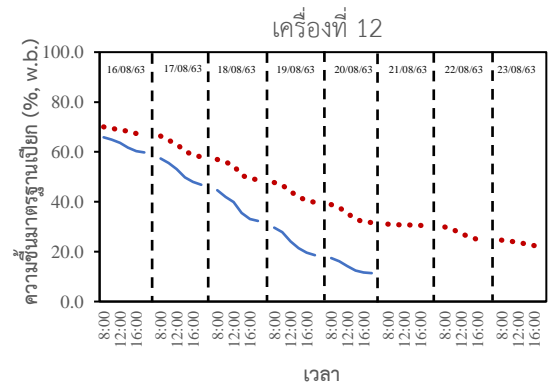
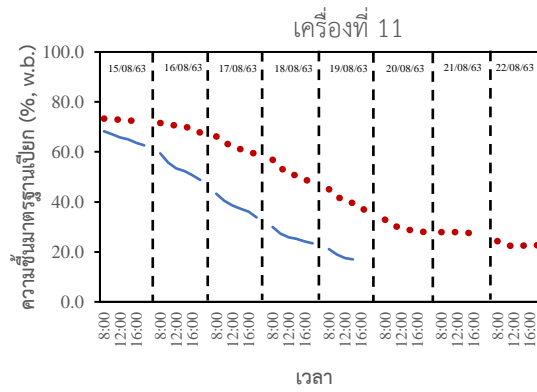
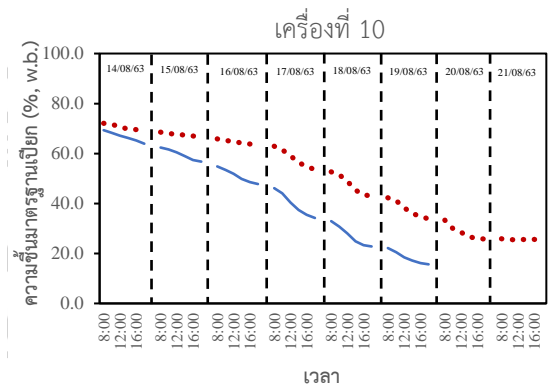
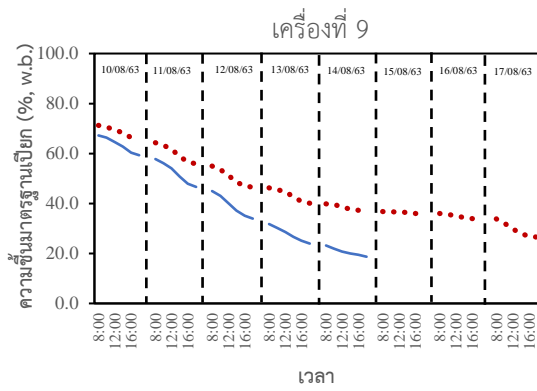
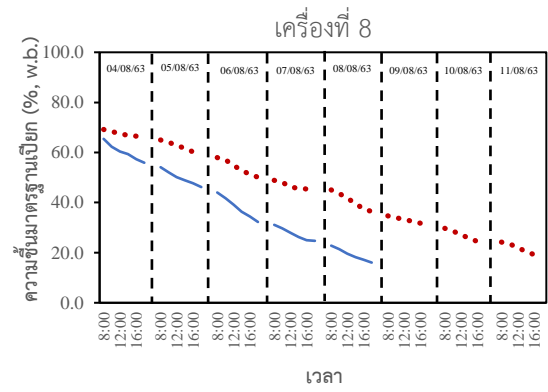
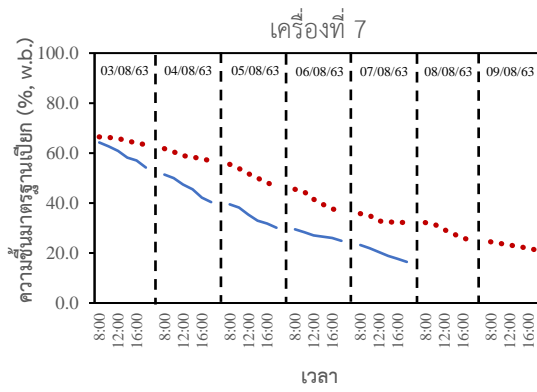
รูปที่ 61 (ต่อ)



รูปที่ 61 (ต่อ)

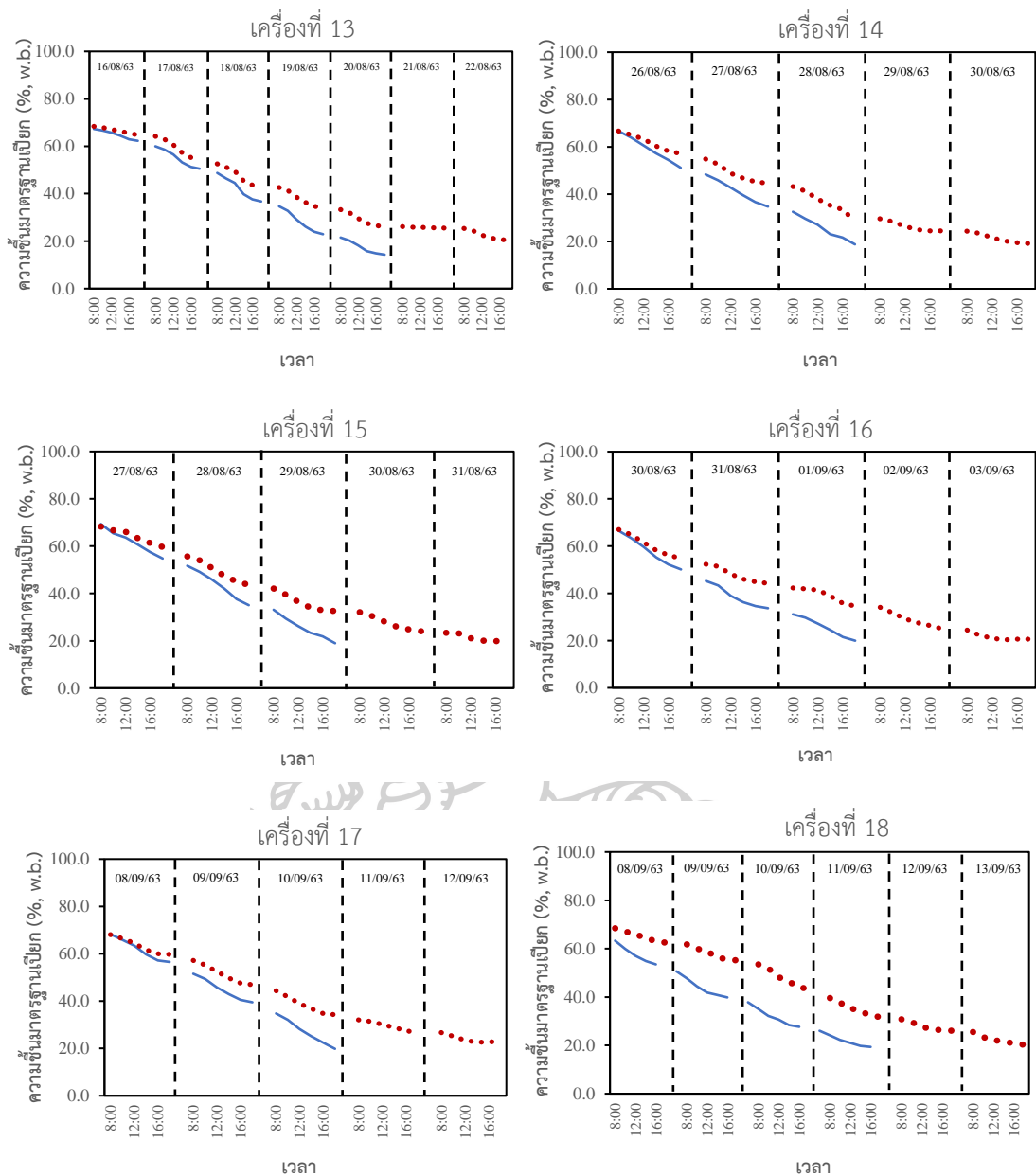


รูปที่ 62 กราฟความชื้นของกล้วยน้ำว้าที่อบแห้งภายในเครื่องอบแห้ง 18 เครื่อง (—) และกล้วยน้ำว้าที่ตากแห้งตามธรรมชาติ (•••)



รูปที่ 62 (ต่อ)





รูปที่ 62 (ต่อ)

จากรูปที่ 59-62 จะเห็นได้ว่าความเข้มข้นของสารที่ติดอยู่ในระหว่างการทดลองส่วนใหญ่มีค่าที่ค่อนข้างแปรปรวน เนื่องจากช่วงเวลาที่ทำการทดลองทั้งหมดอยู่ในช่วงฤดูฝน ท้องฟ้ามีเมฆปกคลุมเป็นจำนวนมาก ซึ่งส่งผลต่อปริมาณความเข้มข้นของสารที่ติดอยู่ที่ได้รับ จากการทดลองทั้งหมดพบว่าอุณหภูมิอากาศภายในเครื่องอบแห้งมีค่าสูงกว่าอุณหภูมิอากาศแวดล้อม เนื่องจากอากาศภายในเครื่องอบแห้งได้รับการถ่ายเทความร้อนจากส่วนประกอบต่าง ๆ ที่อยู่ภายในเครื่องอบแห้ง ได้แก่ ฟันคอนกรีต ผลิตภัณฑ์ และแผ่นโพลีคาร์บอเนต นอกจากนี้ยังเกิดภาวะเรือนกระจกขึ้นภายในเครื่องอบแห้งจึงทำให้อุณหภูมิภายในเครื่องอบแห้งมีค่าสูง ซึ่งอุณหภูมิอากาศที่สูงนี้ส่งผลให้ความชื้น

สัมพัทธ์ของอากาศภายในเครื่องอบแห้งมีค่าต่ำกว่าความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศแวดล้อม จึงส่งผลให้ความชื้นของกล้วยน้ำว้าที่อบแห้งภายในเครื่องอบแห้งลดลงเร็วกว่ากล้วยน้ำว้าที่ตากแห้งตามธรรมชาติอย่างเห็นได้ชัดเจน

### 3.4.2 ประสิทธิภาพของระบบควบคุมและแสดงผลสถานะการอบแห้ง

ผลการทดสอบประสิทธิภาพของระบบควบคุมและแสดงผลสถานะการอบแห้ง พบว่า ระบบทำงานได้ดี ผู้ใช้งานสามารถติดตามสถานะการอบแห้งและภาพถ่ายของกล้วยน้ำว้าที่กำลังอบแห้งอยู่ภายในเครื่องอบแห้งผ่านโทรศัพท์มือถือได้ นอกจากนี้ผู้ใช้งานยังสามารถควบคุมการปิด - เปิดเครื่องเผาไหม้แก๊ส และพัดลมระบายอากาศด้วยโทรศัพท์มือถือได้เช่นกัน (รูปที่ 63)



รูปที่ 63 หน้าจอโทรศัพท์มือถือที่แสดงผลสถานะการอบแห้งและแถบคำสั่งของการควบคุมสถานะการอบแห้ง

เครื่องที่ 7

ระบบความร้อนเสริม  
พัดลมระบายอากาศ



อุณหภูมิอากาศภายใน	44.7 °C
ความชื้นสัมพัทธ์อากาศภายใน	42.4 %
อุณหภูมิอากาศภายนอก	38.5 °C
ความชื้นสัมพัทธ์อากาศภายนอก	49.9 %
น้ำหนักผลผลิตทั้งหมด	0.280 kg
น้ำหนักเริ่มต้น	0.611 kg

เครื่องที่ 8

ระบบความร้อนเสริม  
พัดลมระบายอากาศ



อุณหภูมิอากาศภายใน	42.7 °C
ความชื้นสัมพัทธ์อากาศภายใน	40.4 %
อุณหภูมิอากาศภายนอก	36.0 °C
ความชื้นสัมพัทธ์อากาศภายนอก	52.5 %
น้ำหนักผลผลิตทั้งหมด	0.211 kg
น้ำหนักเริ่มต้น	0.610 kg

เครื่องที่ 9

ระบบความร้อนเสริม  
พัดลมระบายอากาศ



อุณหภูมิอากาศภายใน	53.0 °C
ความชื้นสัมพัทธ์อากาศภายใน	21.6 %
อุณหภูมิอากาศภายนอก	43.1 °C
ความชื้นสัมพัทธ์อากาศภายนอก	41.3 %
น้ำหนักผลผลิตทั้งหมด	0.408 kg
น้ำหนักเริ่มต้น	0.705 kg

เครื่องที่ 10

ระบบความร้อนเสริม  
พัดลมระบายอากาศ



อุณหภูมิอากาศภายใน	56.1 °C
ความชื้นสัมพัทธ์อากาศภายใน	19.0 %
อุณหภูมิอากาศภายนอก	40.8 °C
ความชื้นสัมพัทธ์อากาศภายนอก	42.7 %
น้ำหนักผลผลิตทั้งหมด	0.185 kg
น้ำหนักเริ่มต้น	0.524 kg

เครื่องที่ 11

ระบบความร้อนเสริม  
พัดลมระบายอากาศ



อุณหภูมิอากาศภายใน	38.3 °C
ความชื้นสัมพัทธ์อากาศภายใน	56.4 %
อุณหภูมิอากาศภายนอก	30.3 °C
ความชื้นสัมพัทธ์อากาศภายนอก	85.3 %
น้ำหนักผลผลิตทั้งหมด	0.335 kg
น้ำหนักเริ่มต้น	0.644 kg

เครื่องที่ 12

ระบบความร้อนเสริม  
พัดลมระบายอากาศ



อุณหภูมิอากาศภายใน	40.8 °C
ความชื้นสัมพัทธ์อากาศภายใน	28.6 %
อุณหภูมิอากาศภายนอก	29.5 °C
ความชื้นสัมพัทธ์อากาศภายนอก	74.3 %
น้ำหนักผลผลิตทั้งหมด	0.347 kg
น้ำหนักเริ่มต้น	0.718 kg



เครื่องที่ 13

ระบบความร้อนเสริม

พัดลมระบายอากาศ



อุณหภูมิอากาศภายใน	41.4 °C
ความชื้นสัมพัทธ์อากาศภายใน	37.4 %
อุณหภูมิอากาศภายนอก	32.5 °C
ความชื้นสัมพัทธ์อากาศภายนอก	72.9 %
น้ำหนักผลผลิตแห้ง	0.385 kg
น้ำหนักเริ่มต้น	0.682 kg

เครื่องที่ 14

ระบบความร้อนเสริม

พัดลมระบายอากาศ



อุณหภูมิอากาศภายใน	58.8 °C
ความชื้นสัมพัทธ์อากาศภายใน	15.1 %
อุณหภูมิอากาศภายนอก	43.3 °C
ความชื้นสัมพัทธ์อากาศภายนอก	41.2 %
น้ำหนักผลผลิตแห้ง	0.424 kg
น้ำหนักเริ่มต้น	0.690 kg

เครื่องที่ 15

ระบบความร้อนเสริม

พัดลมระบายอากาศ



อุณหภูมิอากาศภายใน	52.8 °C
ความชื้นสัมพัทธ์อากาศภายใน	22.2 %
อุณหภูมิอากาศภายนอก	49.8 °C
ความชื้นสัมพัทธ์อากาศภายนอก	27.9 %
น้ำหนักผลผลิตแห้ง	0.415 kg
น้ำหนักเริ่มต้น	0.643 kg

เครื่องที่ 16

ระบบความร้อนเสริม

พัดลมระบายอากาศ



อุณหภูมิอากาศภายใน	34.3 °C
ความชื้นสัมพัทธ์อากาศภายใน	72.1 %
อุณหภูมิอากาศภายนอก	28.6 °C
ความชื้นสัมพัทธ์อากาศภายนอก	90.3 %
น้ำหนักผลผลิตแห้ง	0.198 kg
น้ำหนักเริ่มต้น	0.612 kg

เครื่องที่ 17

ระบบความร้อนเสริม

พัดลมระบายอากาศ

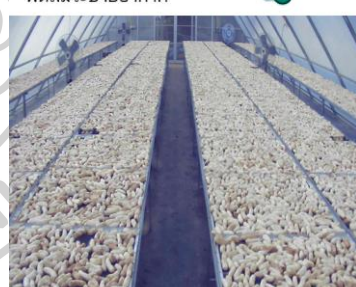


อุณหภูมิอากาศภายใน	59.9 °C
ความชื้นสัมพัทธ์อากาศภายใน	16.1 %
อุณหภูมิอากาศภายนอก	40.6 °C
ความชื้นสัมพัทธ์อากาศภายนอก	47.2 %
น้ำหนักผลผลิตแห้ง	0.111 kg
น้ำหนักเริ่มต้น	0.537 kg

เครื่องที่ 18

ระบบความร้อนเสริม

พัดลมระบายอากาศ



อุณหภูมิอากาศภายใน	44.7 °C
ความชื้นสัมพัทธ์อากาศภายใน	34.8 %
อุณหภูมิอากาศภายนอก	35.7 °C
ความชื้นสัมพัทธ์อากาศภายนอก	99.9 %
น้ำหนักผลผลิตแห้ง	0.252 kg
น้ำหนักเริ่มต้น	0.617 kg

### 3.4.3 ผลการวัดค่าแอกติวิตีของน้ำ

เมื่อการอบแห้งกล้วยน้ำว่าเสร็จสิ้น ผู้วิจัยได้นำกล้วยตัวอย่างที่อบแห้งภายในเครื่องอบแห้ง ทั้ง 18 เครื่อง มาวัดแอกติวิตีของน้ำเพื่อตรวจสอบว่ากล้วยที่อบแห้งจะปลอดภัยจากการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ที่เป็นสาเหตุของการเสื่อมสภาพหรือการเน่าเสียของกล้วย ซึ่งผลการวัดค่าแอกติวิตีของน้ำแสดงดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 ค่าแอกติวิตีของน้ำ ( $a_w$ ) ของกล้วยที่อบแห้งภายในเครื่องอบแห้ง

ลำดับของเครื่องอบแห้ง	ค่าแอกติวิตีของน้ำ ( $a_w$ )
1	0.61
2	0.68
3	0.67
4	0.69
5	0.69
6	0.65
7	0.61
8	0.64
9	0.66
10	0.61
11	0.62
12	0.60
13	0.62
14	0.69
15	0.68
16	0.68
17	0.64
18	0.69

จากตารางที่ 4 จะเห็นได้ว่าค่าแอกติวิตีของน้ำอยู่ในช่วง 0.60-0.69 โดยค่าแอกติวิตีของน้ำที่ จุลินทรีย์จะสามารถเจริญเติบโตได้ต้องมีค่ามากกว่า 0.7 ดังนั้นกล้วยอบแห้งนี้จึงปลอดภัยจากการ เจริญเติบโตของจุลินทรีย์ส่วนใหญ่

### 3.5 แบบจำลองสมการถดถอยที่มีเทอมจากตัวแปรอื่น (autoregressive model with exogenous variable, ARX)

การพัฒนาแบบจำลองการอบแห้งสามารถใช้เป็นเครื่องมือที่ช่วยทำนายความชื้นของผลิตภัณฑ์ได้อย่างสะดวก ทำให้ทราบความชื้นของผลิตภัณฑ์ในระหว่างการอบแห้งได้ โดยที่เราไม่จำเป็นต้องชั่งน้ำหนักของผลิตภัณฑ์ตัวอย่าง แบบจำลองที่พัฒนาขึ้นจึงมีประโยชน์อย่างมากในการทดลองอบแห้งครั้งต่อไป ดังนั้นในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยได้พัฒนาแบบจำลองสมการถดถอยที่มีเทอมจากตัวแปรอื่น (ARX) เพื่อจำลองการลดลงของความชื้นของกล้วยน้ำว้าที่อบแห้งภายในเครื่องอบแห้งทั้ง 18 เครื่อง

แบบจำลอง ARX จะถูกสร้างด้วยโปรแกรม MATLAB โดยข้อมูลการทดลองจะถูกแบ่งเป็น 2 ชุด ได้แก่ ข้อมูลสำหรับสร้างแบบจำลอง และข้อมูลสำหรับทดสอบแบบจำลอง ซึ่งผู้วิจัยเลือกใช้ข้อมูลการทดลองของเครื่องอบแห้งที่ 10 เป็นข้อมูลสำหรับสร้างแบบจำลอง เนื่องจากการทดลองดังกล่าวมีจำนวนข้อมูลเยอะที่สุดเพราะเป็นการทดลองที่ใช้เวลามากที่สุด จึงทำให้ได้ช่วงข้อมูลที่ครอบคลุมตั้งแต่ค่าน้อยไปจนถึงค่ามาก ส่วนการทดสอบแบบจำลองจะใช้ข้อมูลการทดลองของเครื่องอบแห้งทั้ง 18 เครื่อง โดยข้อมูลอินพุตที่ใช้ในการสร้างแบบจำลอง ประกอบด้วย อุณหภูมิของอากาศแวดล้อม (อินพุตที่ 1) ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศแวดล้อม (อินพุตที่ 2) และความเข้มรังสีอาทิตย์ (อินพุตที่ 3) ส่วนข้อมูลเอาต์พุตที่ต้องการคือ ความชื้นของกล้วยน้ำว้า ซึ่งผลที่ได้จากการสร้างแบบจำลอง ARX มีรายละเอียดดังนี้

#### 3.5.1 ผลการจำลอง

แบบจำลองที่ได้มีโครงสร้างเป็น  $na=5$ ,  $nb=[5 \ 5 \ 4]$ ,  $nk=[3 \ 4 \ 1]$  โดย  $na$  คือ จำนวนเทอมของเอาต์พุต  $nb$  คือ จำนวนเทอมอินพุต ประกอบด้วย อุณหภูมิของอากาศแวดล้อม ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศแวดล้อม และความเข้มรังสีอาทิตย์ ตามลำดับ และ  $nk$  คือ ลำดับของข้อมูลอินพุตในช่วงเวลาที่ย้อนหลังกลับไปไกลที่สุด โดยโครงสร้างของแบบจำลองดังกล่าวมีรูปแบบสมการดังนี้

$$A(z)y(t) = B(z)u(t) + e(t) \quad (41)$$

$$\text{โดยที่ } A(z) = 1 - 1.013 z^{-1} - 0.2091 z^{-2} + 0.1262 z^{-3} - 0.02464 z^{-4} + 0.134 z^{-5} \quad (42)$$

$$B(z) = -0.06623 z^{-3} - 0.2778 z^{-4} + 0.2023 z^{-5} + 0.1091 z^{-6} - 0.003544 z^{-7} \quad (43)$$



$$B2(z) = - 0.04997 z^{-4} + 0.08712 z^{-5} - 0.02058 z^{-6} + 0.007214 z^{-7} - 0.01034 z^{-8} \quad (44)$$

$$B3(z) = - 0.003677 z^{-1} + 0.001109 z^{-2} + 0.001159 z^{-3} + 0.001546 z^{-4} \quad (45)$$

- เมื่อ  $A(z)$  คือ สัมประสิทธิ์ความชันของกล้วยน้ำว้า  
 $B1(z)$  คือ สัมประสิทธิ์อุณหภูมิของอากาศแวดล้อม  
 $B2(z)$  คือ สัมประสิทธิ์ความชันสัมพัทธ์ของอากาศแวดล้อม  
 $B3(z)$  คือ สัมประสิทธิ์ความเข้มรังสีอาทิตย์

ผลการเปรียบเทียบความชันของกล้วยน้ำว้าที่ได้จากแบบจำลอง ARX กับความชันของกล้วยน้ำว้าที่ได้จากการทดลองอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งทั้ง 18 เครื่อง จะนำเสนอด้วยค่าทางสถิติ 3 ค่า คือ ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Coefficient of determination,  $R^2$ ) ค่าความแตกต่างในรูปความเอนเอียงเฉลี่ย (mean bias difference, MBD) และค่ารากที่สองของค่าเฉลี่ยความแตกต่างยกกำลังสอง (Root mean square difference, RMSD) ซึ่งค่าสถิติดังกล่าวสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 46-48 และผลที่ได้จากการเปรียบเทียบแสดงดังตารางที่ 5

ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Coefficient of determination)

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (M_{i,\text{exp}} - M_{i,\text{model}})^2}{\sum_{i=1}^N (M_{i,\text{exp}} - \overline{M}_{\text{exp}})^2} \quad (46)$$

- เมื่อ  $R^2$  คือ สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (-)  
 $M_{i,\text{exp}}$  คือ ความชันของผลิตภัณฑ์จากการทดลอง (% w.b.)  
 $M_{i,\text{model}}$  คือ ความชันของผลิตภัณฑ์จากแบบจำลอง (% w.b.)  
 $\overline{M}_{\text{exp}}$  คือ ความชันเฉลี่ยของผลิตภัณฑ์จากการทดลอง (% w.b.)  
 $N$  คือ จำนวนของข้อมูล

ค่าความแตกต่างในรูปความเอนเอียงเฉลี่ย (mean bias difference)

$$\text{MBD} = \frac{\frac{\sum_{i=1}^N (M_{i,\text{model}} - M_{i,\text{exp}})}{N}}{\frac{\sum_{i=1}^N M_{i,\text{exp}}}{N}} \times 100 \quad (47)$$

เมื่อ MBD คือ ค่าความแตกต่างในรูปความเอนเอียงเฉลี่ย (%)

ค่ารากที่สองของค่าเฉลี่ยความแตกต่างยกกำลังสอง (Root mean square difference)

$$\text{RMSD} = \frac{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (M_{i,\text{model}} - M_{i,\text{exp}})^2}{N}}}{\frac{\sum_{i=1}^N M_{i,\text{exp}}}{N}} \times 100 \quad (48)$$

เมื่อ RMSD คือ ค่ารากที่สองของค่าเฉลี่ยความแตกต่างยกกำลังสอง (%)

ตารางที่ 5 ผลการเปรียบเทียบความขึ้นของกล้วยน้ำว้าที่ได้จากแบบจำลอง ARX กับความขึ้นของกล้วยน้ำว้าที่ได้จากการทดลองอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งทั้ง 18 เครื่อง

ลำดับของเครื่องอบแห้ง	R <sup>2</sup>	% MBD	% RMSD
1	0.99	0.12	2.61
2	0.99	0.18	3.11
3	0.99	0.12	3.12
4	0.95	0.37	6.95
5	0.98	0.17	3.53
6	0.99	0.06	4.11
7	0.97	-0.95	7.22
8	0.96	-0.95	7.04
9	0.98	0.77	6.07
10	0.99	0.25	1.72
11	0.97	0.85	7.11
12	0.97	1.19	3.90
13	0.99	0.15	2.99
14	0.99	-0.05	2.58
15	0.99	0.04	1.68
16	0.97	0.26	5.11
17	0.98	0.27	5.22
18	0.99	0.10	1.82

จากตารางที่ 5 จะเห็นได้ว่าการทดลองทั้งหมดมี  $R^2 \approx 1$  ซึ่งบ่งบอกถึงค่าความขึ้นที่ได้จากการทดลองและความขึ้นที่ได้จากแบบจำลองมีความสัมพันธ์กันดี และเป็นไปในทิศทางเดียวกัน ส่วนค่า MBD อยู่ในช่วง -0.95-1.19% ซึ่งบ่งบอกถึงค่าความขึ้นที่ได้จากการทดลองและความขึ้นที่ได้จากแบบจำลองมีค่าแตกต่างกันเล็กน้อย และค่า RMSD อยู่ในช่วง 1.68-7.22% ซึ่งถือว่าความขึ้นที่ได้จากแบบจำลองมีความคลาดเคลื่อนค่อนข้างน้อย อยู่ในช่วงที่ยอมรับได้ โดยผลที่ได้เป็นไปตามงานวิจัยของอัมพร และคณะ (Aumporn et al., 2021) ที่ได้พัฒนาแบบจำลอง ARX เพื่อทำนายความขึ้นของกล้วยที่อบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ขนาดเล็กสำหรับใช้ในครัวเรือน ซึ่งพบค่า MBD และ RMSD อยู่ในช่วงนี้เช่นกัน

## บทที่ 4

### สรุป

ในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยได้พัฒนาระบบควบคุมและแสดงผลสถานะการอบแห้งสำหรับใช้งานในเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบเรือนกระจก โดยระบบแสดงผลสถานะการอบแห้งประกอบด้วย เซนเซอร์วัดอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ เครื่องชั่งน้ำหนักของตัวอย่างผลิตภัณฑ์ที่อยู่ภายในเครื่องอบแห้ง และกล้องถ่ายภาพผลิตภัณฑ์ภายในเครื่องอบแห้ง ส่วนระบบควบคุมสถานะการอบแห้ง ประกอบด้วย ระบบควบคุมการระบายอากาศที่จะทำหน้าที่ควบคุมการปิด - เปิดพัดลมชนิดที่ใช้ไฟฟ้ากระแสสลับ และระบบควบคุมความร้อนเสริมที่จะทำหน้าที่ควบคุมการปิด - เปิดเครื่องเผาไหม้แก๊ส LPG โดยระบบข้างต้นนี้สามารถทำงานผ่านเครือข่ายอินเทอร์เน็ต ซึ่งผู้ใช้งานสามารถติดตามและควบคุมสถานะการอบแห้งผ่านโทรศัพท์มือถือได้

ผู้วิจัยได้ดำเนินการติดตั้งระบบควบคุมและแสดงผลสถานะการอบแห้งที่พัฒนาขึ้นเข้ากับเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบเรือนกระจกขนาดใหญ่ (พื้นที่ฐาน 9.0 x 20.8 ตารางเมตร) จำนวน 18 เครื่อง ซึ่งเครื่องอบแห้งทั้งหมดตั้งอยู่ที่อำเภอบางกระทุ่ม จังหวัดพิษณุโลก จากนั้นผู้วิจัยได้ทำการทดสอบระบบควบคุมและแสดงผลสถานะการอบแห้ง พร้อมกับทดสอบสมรรถนะของเครื่องอบแห้งแต่ละเครื่องด้วยการทดลองอบแห้งกล้วยน้ำว้าปอกเปลือกแล้วจำนวน 1,000-1,200 กิโลกรัม ซึ่งผลการทดสอบการใช้งานระบบควบคุมและแสดงผลสถานะการอบแห้ง พบว่าระบบที่ติดตั้งเข้ากับเครื่องอบแห้งทั้ง 18 เครื่อง สามารถแสดงผลสถานะการอบแห้งในรูปของอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ น้ำหนักของผลิตภัณฑ์ที่กำลังอบแห้ง และภาพถ่ายของผลิตภัณฑ์ในเครื่องอบแห้งผ่านเครือข่ายอินเทอร์เน็ตได้ พร้อมทั้งสามารถควบคุมการปิด - เปิดของพัดลมระบายอากาศและการปิด - เปิดเครื่องเผาไหม้แก๊สผ่านเครือข่ายดังกล่าวได้ดี ซึ่งช่วยให้ผู้ใช้งานสามารถทราบสถานะการอบแห้งได้แบบเรียลไทม์ และสั่งการควบคุมสถานะการอบแห้งจากทางไกลได้ทันที ในด้านของสมรรถนะของเครื่องอบแห้งทั้ง 18 เครื่อง พบว่าอุณหภูมิอากาศภายในเครื่องอบแห้งมีค่าสูงกว่าอุณหภูมิอากาศสิ่งแวดล้อม ซึ่งช่วยให้ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศภายในเครื่องอบแห้งมีค่าต่ำกว่าความชื้นสัมพัทธ์อากาศของสิ่งแวดล้อม ส่งผลให้ความชื้นของกล้วยในเครื่องอบแห้งลดลงได้เร็วกว่าความชื้นของกล้วยที่ตากแห้งตามธรรมชาติอย่างเห็นได้ชัด ถึงแม้ว่าความเข้มข้นสีอาทิตย์ในระหว่างการทดลองจะมีค่าที่ค่อนข้างแปรปรวนก็ตาม

นอกจากนี้ผู้วิจัยยังได้สร้างแบบจำลองสมการถดถอยที่มีเทอมจากตัวแปรอื่น (ARX) เพื่อทำนายความขึ้นของกล้วยน้ำว้า โดยใช้ข้อมูลจากการทดลองอบแห้งกล้วยน้ำว้าด้วยเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบเรือนกระจกจำนวน 18 เครื่อง แบบจำลองถูกสร้างขึ้นด้วยข้อมูลการทดลอง 1 การทดลอง ส่วนการทดสอบแบบจำลองใช้ข้อมูลการทดลองทั้ง 18 การทดลอง ซึ่งผลการทดสอบแบบจำลอง พบว่า ความขึ้นของกล้วยน้ำว้าที่ได้จากแบบจำลองมีความสอดคล้องกันดีกับความขึ้นของกล้วยน้ำว้าที่ได้จากการทดลองอบแห้งในเครื่องอบแห้งทั้ง 18 เครื่อง โดยมีค่าทางสถิติ ได้แก่  $R^2 \approx 1$ , MBD อยู่ในช่วง  $-0.95-1.19\%$  และ RMSD อยู่ในช่วง  $1.68-7.22\%$

**ข้อเสนอแนะ** เนื่องจากระบบควบคุมและแสดงผลสถานะการอบแห้งช่วยอำนวยความสะดวกให้กับผู้ใช้งานได้เป็นอย่างดี ดังนั้นจึงเสนอแนะว่า ควรติดตั้งระบบควบคุมและแสดงผลสถานะการอบแห้งเข้ากับเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบเรือนกระจกที่ยังไม่ได้ติดตั้งระบบนี้



## รายการอ้างอิง

- Al-Ali, A. R., Nabulsi, A. A., Mukhopadkydy, S., Awal, M. S., Awal, J., & Ailabonni, K. (2009). IoT-solar energy powered smart farm irrigation system. *Journal of Electronic Science and Technology* 17, 100017- 100031.
- Alvinika, Y., Setyohadi, D. B., & Sulistyoningsih, M. (2021). IoT-Based Monitoring and Design of Automatic Fish Drying Equipment Using Fuzzy Logic. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* 704, 12042-12047.
- Aumporn, O., Janjai, S., Khunkaeo, T., & Bala, B. K. (2021). Development of a Household Scale Solar Dryer: Performance Evaluation and ARX Modeling. *Journal of Renewable Energy and Smart Grid Technology* 16(1), 1-11.
- Çengel, Y. A., & Ghajar, A. J. (2020). *Heat and mass transfer: fundamentals and applications* (6 ed.). New York: McGraw-Hill Education.
- Csap', J., Prokisch, J., Albert, C., & Sipos, P. (2019). Effect of UV light on food quality and safety. *The Journal of Sapientia Hungarian University of Transylvania* 12, 21-41.
- Dahere, P. S., Jadhav, V. N., Waghmare, P. R., & Lad, S. S. (2019). Solar Water pumping System and Dryer using IoT. *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)* 6(2), 1300-1304.
- DEDE. (2015). *Annual report, Department of Alternative Energy and Development*. Bangkok: Ministry of Energy of Thailand.
- Ekechukwu, O., & Norton, B. (1999). Review of solar-energy drying systems II: An overview of solar drying technology. *Energy Conversion and Management* 40(6), 615-655.
- El-Sebaai, A. A., & Shalaby, S. M. (2012). Solar drying of agricultural products: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 16(1), 37-43.
- Fudholi, A., Sopian, K., Ruslan, M., Alghoul, M., & Sulaiman, M. (2010). Review of solar dryers for agricultural and marine products. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 14(1), 1-30.
- Janjai, S., & Bala, B. K. (2012). Solar drying technology. *Food Engineering Reviews* 4(1), 16-54.



- Janjai, S., Chaichoet, C., & Intawee, P. (2005). Performance of PV-ventilated greenhouse dryer for drying bananas. *Asian Journal of Energy and Environment* 6(2), 133-139.
- Janjai, S., & Keawprasert, T. (2006). Design and Performance of a Solar Tunnel Dryer with a Polycarbonate Cover. *International Energy Journal* 7(3), 187-194.
- Janjai, S., Khamvongsa, V., & Bala, B. K. (2007). Development, design and performance of a PV-ventilated greenhouse dryer. *International Energy Journal* 8, 249-258.
- Janjai, S., & Mahayoothee, B. (2016). Development of dried banana production in a dried banana community of Bangkratum District, Phitsanulok Province. *Veridian E-Journal, Science and Technology Silpakorn University* 3(6), 310-322.
- Khan, M. I. H., MarkWellard, R., Nagy, S. A., Joardder, M. U. H., & Karima, M. A. (2017). Experimental investigation of bound and free water transport process during drying of hygroscopic food material. *International Journal of Thermal Sciences* 117, 266-273.
- Kumar, M., Sansaniwal, S. K., & Khatak, P. (2016). Progress in solar dryers for drying various commodities. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 55, 346-360.
- Labuza, T. P., McNally, L., Gallagher, D., Hawkes, J., & Hurtado, F. (1972). Stability of intermediate moisture foods. 1: Lipid oxidation. *Journal of Food Science* 37, 154-159.
- Lawand, T. A. (1966). A solar-cabinet dryer. *Solar Energy* 10(4), 158-163.
- Maloney, J. O. (2008). *Perry's Chemical Engineers' Handbook* (8 ed.). The United States of America: The McGraw-Hill Companies.
- Marebane, N., Jiya, I. N., & Gouws, R. (2018). Intelligently controlled solar-powered active fruit and vegetable dryer. *International Journal of Engineering & Technology* 7(4), 6019-6028.
- Murthy, M. V. R. (2009). A review of new technologies, models and experimental investigations of solar driers. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 13(4), 835-844.
- Mustayen, A. G. M. B., Mekhilef, S., & Saidur, R. (2014). Performance study of different solar dryers: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 34, 463-470.
- Nabard Consultancy Services. (2019). *Impact evaluation study report on "Greenhouse*

*solar dryers on farming community in Tamil Nadu*". India.

- Pankaew, P., Tohsing, K., Mahayothee, B., & Janjai, S. (2016). A Large-scale parabolic greenhouse type solar dryer: Field performance and utilization in agro-industries of dried bananas in Thailand. *Proceeding of the 20th International Drying Symposium (IDS 2016)*.
- Pirasteh, G., Saidur, R., Rahman, S., & Rahim, N. (2014). A review on development of solar drying applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 31, 133-148.
- Prakash, O., & Kumar, A. (2017). *Solar Drying Technology*. Singapore: Springer.
- Prakash, O., Kumar, A., & Laguri, V. (2016). Performance of modified greenhouse dryer with thermal energy storage. *Energy Reports* 2, 155-162.
- Roman, F., & Hensel, O. (2014). Real-time product moisture content monitoring in batch dryer using psychrometric and airflow measurement. *Computer and Electronics in Agriculture* 107, 97-103.
- Sangamithra, A., Swamy, G. J., Prema, R. S., Priyavarshini, R., Chandrasekar, V., & Sasikala, S. (2014). An overview of a polyhouse dryer. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 40, 902-910.
- Schirmer, P., Janjai, S., Esper, A., Smitabhidu, R., & Mühlbauer, W. (1996). Experimental investigation of the performance of the solar tunnel dryer for drying bananas. *Renewable Energy* 7(2), 119-129.
- Sharma, A., Chen, C., & Lan, N. V. (2009). Solar-energy drying systems: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 13(6), 1185-1210.
- Shove, G. C., Barton, G. W., Hall, M. D., & Peterson, W. H. (1981). Field studies of solar grain drying. *ASEA*, 81-4032.
- Singh, P., Shrivastava, V., & Kumar, A. (2018). Recent developments in greenhouse solar drying: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 82, 3250-3262.
- Soponronnarit, S. (1995). Solar drying in Thailand. *Energy for Sustainable Development* 2, 19-25.
- Soponronnarit, S., Watabutre, W., & Therdythin, A. (1986). A drying storage solar hut: The technical aspect. *Renewable Energy Review Journal* 8(1), 49-60.
- Srimaneechai, C., & Triwong, P. (2017). Study on the impact and value of promoting

solar drying systems (Greenhouse model) from government. *Proceeding of 13th Conference on Energy Network of Thailand*, 1409-1416.

Tohsing, K., Janjai, S., Lamler, N., Mundpookhier, T., Boonrod, Y., & Bala, B. K. (2017).

Experimental performance and artificial neural network modeling of solar drying of litchi in the parabolic greenhouse dryer. *Journal of Renewable Energy and Smart Grid Technology* 13(1), 83-95.

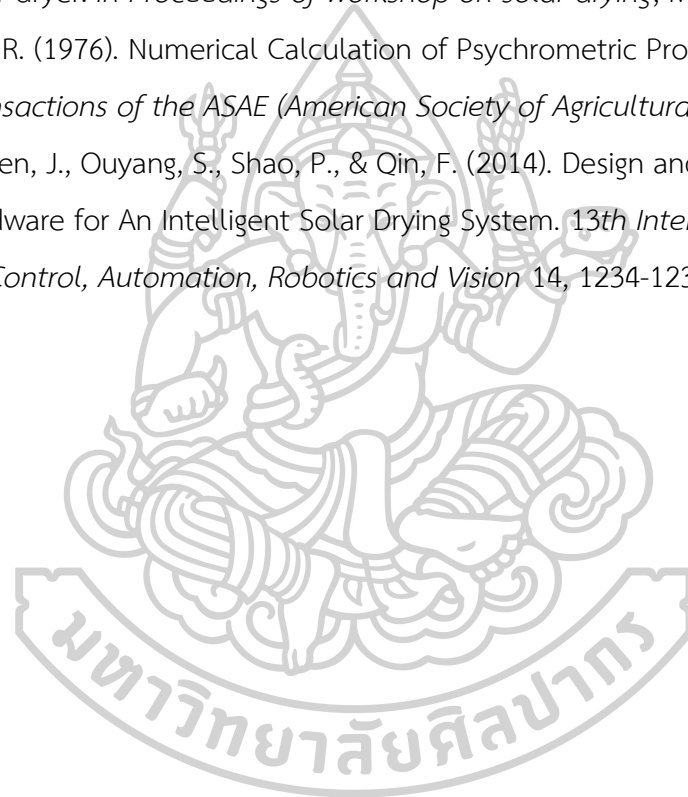
Wibulswas, P., & Niyomkorn, L. (1980). Development of solar air heater for cabinet-type solar dryer. *In Proceedings of workshop on solar drying*, Manila, Philippines.

Wilhelm, L. R. (1976). Numerical Calculation of Psychrometric Properties in SI Units.

*Transactions of the ASAE (American Society of Agricultural Engineers)*, 318-325.

Xiao, Q., Chen, J., Ouyang, S., Shao, P., & Qin, F. (2014). Design and Realization of the

Hardware for An Intelligent Solar Drying System. *13th International Conference on Control, Automation, Robotics and Vision* 14, 1234-1238.





## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	มงคล สังสัน
วัน เดือน ปี เกิด	4 สิงหาคม 2540
วุฒิการศึกษา	ปี พ.ศ. 2557 จบการศึกษาระดับมัธยม โรงเรียนอ่าวลึกประชาสรรค์ ปี พ.ศ. 2561 จบการศึกษาระดับปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชา ฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร
ที่อยู่ปัจจุบัน	16 หมู่ 4 ตำบลนาเหนือ อำเภออ่าวลึก จังหวัดกระบี่ รหัสไปรษณีย์ 81110

