



การศึกษาผลของรังสีกระจายจากดวงอาทิตย์ต่อสมรรถนะของเครื่องอบแห้งแบบพาราโบลาโดม



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาฟิสิกส์ แผน ก แบบ ก 2 ระดับปริญญาโทมหาบัณฑิต

ภาควิชาฟิสิกส์

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

ปีการศึกษา 2564

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยศิลปากร

การศึกษาผลของรังสีกระจายจากดวงอาทิตย์ต่อสมรรถนะของเครื่องอบแห้งแบบ
พาราโบลาโตม



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาฟิสิกส์ แผน ก แบบ ก 2 ระดับปริญญาโทมหาบัณฑิต
ภาควิชาฟิสิกส์
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร
ปีการศึกษา 2564
ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยศิลปากร

A STUDY OF THE EFFECT OF DIFFUSE SOLAR RADIATION ON THE
PERFORMANCE OF A PARABOLA DOME SOLAR DRYER



By
MR. Phoothanet SAENGCHAROON

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

หัวข้อ	การศึกษาผลของรังสีกระจายจากดวงอาทิตย์ต่อสมรรถนะของ เครื่องอบแห้งแบบพาราโบลาโดม
โดย	นายภูธเนศ แสงจรรยา
สาขาวิชา	ฟิสิกส์ แผนก ก แบบ ก 2 ระดับปริญญาโทมหาบัณฑิต
อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก	ศาสตราจารย์ ดร. เสริม จันทร์ฉาย
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	ดร. อรรวรรณ อัมพร

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร ได้รับพิจารณาอนุมัติให้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

..... คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย
(รองศาสตราจารย์ ดร.จุไรรัตน์ นันทานิช)

พิจารณาเห็นชอบโดย

..... ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อิศระ มะศิริ)
..... อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก
(ศาสตราจารย์ ดร. เสริม จันทร์ฉาย)
..... อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม
(ดร. อรรวรรณ อัมพร)
..... ผู้ทรงคุณวุฒิภายนอก
(ดร. สราวุฒิ แนนเนียร)

630720014 : ฟิสิกส์ แผน ก แบบ ก 2 ระดับปริญญาโทบัณฑิต

คำสำคัญ : เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบพาราโบลา, การจำลองแบบ, ผลของรังสีกระจาย

นาย ภูธเนศ แสงจรรยา: การศึกษาผลของรังสีกระจายจากดวงอาทิตย์ต่อสมรรถนะของเครื่องอบแห้งแบบพาราโบลาโดม อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : ศาสตราจารย์ ดร. เสริม จันทร์ฉาย

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลกระทบของรังสีกระจายต่อเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบพาราโบลาโดยการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ โดยแบบจำลองนี้จะพิจารณาถึงคุณสมบัติทางอุณหพลศาสตร์ของเครื่องอบแห้งและเขียนให้อยู่ในรูปของสมการการถ่ายเทความร้อนและหาผลเฉลยทางคณิตศาสตร์ด้วยวิธีการผลต่างจำกัด (finite difference method) โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ซึ่งเขียนด้วยภาษาฟอร์แทรน (Fortran) จากนั้นได้ตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองโดยนำผลจากการจำลองแบบของอุณหภูมิกายในเครื่องอบแห้งเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการทดลอง พบว่าผลลัพธ์ที่ได้มีความสอดคล้องกันดี โดยมีค่าสัมประสิทธิ์การอธิบาย (R^2) เท่ากับ 0.8281 และ 0.9624 ตามลำดับ ค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย (MAE) เท่ากับ 0.7780°C และ 0.8330°C ตามลำดับ และค่ารากที่สองของค่าเฉลี่ยความผิดพลาดกำลังสอง (RMSE) เท่ากับ 1.0739°C และ 0.9283°C ตามลำดับ นอกจากนี้นอกจากนี้ผู้วิจัยได้ทำนายอุณหภูมิกายในเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบพาราโบลาโดยใช้ข้อมูลสภาพอากาศของ สถานีอุตุนิยมวิทยาทางภาคเหนือ (จังหวัดเชียงใหม่) สถานีอุตุนิยมวิทยาทางภาคตะวันออกเฉียงเหนือ (จังหวัดอุบลราชธานี) และสถานีอุตุนิยมวิทยาทางภาคใต้ (จังหวัดสงขลา) ซึ่งผลจากการจำลองแบบ พบว่าประสิทธิภาพในการทำความร้อนสูงสุดอยู่ในช่วง 12:00 – 14:00 น.

630720014 : Major (PHYSICS)

Keyword : parabola dome solar dryer, simulation, effect of diffuse solar radiation

MR. PHOOTHANET SAENGCHAROON : A STUDY OF THE EFFECT OF DIFFUSE SOLAR RADIATION ON THE PERFORMANCE OF A PARABOLA DOME SOLAR DRYER

THESIS ADVISOR : PROFESSOR SERM JANJAI, Ph.D.

The objective of this research is to study the effect of diffuse solar radiation on the parabola dome solar dryer using mathematical modeling. The model is based on heat transfer equations which consider the thermophysical properties. The solution of the model is solved using the finite difference method and using a Compaq Visual Fortran 6.6 for the numerical method. Validation of the model was carried out by comparing the simulation results calculated of the air temperature inside the dryer from the model and the results obtained from the experiments. The results were found that both results were in good agreement with $R^2 = 0.8281$ and 0.9624 , $MBE = 0.7780^\circ\text{C}$ and 0.8330°C , and $RMSE = 1.0739^\circ\text{C}$ and 0.9283°C respectively. Additionally, the researchers predicted the air temperature inside the dryer using the weather data of the Northern Meteorological Station (Chiang Mai Province), the Northeast Meteorological Station (Ubon Ratchathani Province), and the Southern Meteorological Station (Songkhla Province), between the simulation results were found that the highest thermal efficiency of the dryer was between 12:00 – 14:00 PM.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาในระดับวิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต (ฟิสิกส์) ในหัวข้อเรื่องการศึกษาผลของรังสีกระจายจากดวงอาทิตย์ต่อสมรรถนะของเครื่องอบแห้งแบบพาราโบลา โดม ซึ่งผู้วิจัยได้รับทุนการศึกษาและผู้ช่วยนักวิจัยจากห้องปฏิบัติการวิจัยพลังงานแสงอาทิตย์ ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร ผู้วิจัยจึงขอขอบพระคุณไว้ ณ ที่นี้

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ ศาสตราจารย์เกียรติคุณ ดร.เสริม จันทร์ฉาย ที่ให้ความกรุณาเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาหลัก และให้คำแนะนำทางด้านวิชาการ รวมทั้งยังสนับสนุนอุปกรณ์ที่ใช้ในการดำเนินงานวิจัย และขอขอบพระคุณอาจารย์ ดร.อรุวรรณ อัมพร อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ที่ช่วยให้คำแนะนำทางด้านวิชาการและให้ความช่วยเหลือในการสร้างแบบจำลองของเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบพาราโบลา ให้สำเร็จไปได้ด้วยดี

ผู้วิจัยขอบคุณ ดร.สรารุณี แนนเนียร ที่กรุณาสละเวลาในการเป็นกรรมการสอบจบของผู้วิจัย และให้คำแนะนำในการแก้ไขวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ รวมไปถึงการชี้แนะแนวทางในการนำงานวิจัยไปประยุกต์ใช้ในด้านอื่น ๆ นอกจากนี้ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ บิดา มารดา และคณาจารย์ภายในห้องปฏิบัติการวิจัยพลังงานแสงอาทิตย์ ที่สนับสนุนและให้กำลังใจในการทำวิทยานิพนธ์จนสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี และผู้วิจัยหวังเป็นอย่างยิ่งว่าวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะเป็นประโยชน์ต่อผู้ที่ทำการศึกษาไม่มากนัก



นาย ภูธเนศ แสงจรรูญ

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญรูปภาพ.....	ฎ
บทที่ 1 บทนำ.....	15
1.1 ความสำคัญและความเป็นมาของปัญหา.....	15
1.2 วัตถุประสงค์.....	16
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	17
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	17
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	18
2.1 ชนิดของรังสีอาทิตย์.....	18
2.1.1 รังสีตรง.....	19
2.1.2 รังสีกระจาย.....	19
2.2 การถ่ายเทความร้อน.....	20
2.2.1 การนำความร้อน (conductive heat transfer).....	21
2.2.2 การพาความร้อน (convective heat transfer).....	22
2.2.2.1 การพาความร้อนแบบบังคับ (forced convection).....	24
2.2.2.2 การพาความร้อนตามธรรมชาติ (natural convection).....	27
2.2.3 การแผ่รังสีความร้อน (radiative heat transfer).....	28

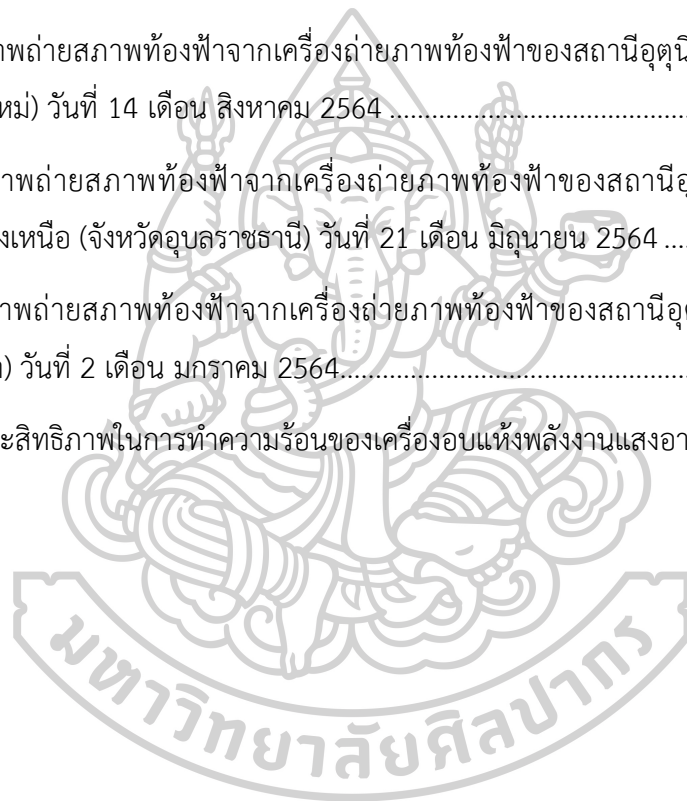
2.3 เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ (solar dryer).....	35
2.3.1 เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ประเภทพาความร้อนตามธรรมชาติ.....	36
2.3.2 เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ประเภทพาความร้อนแบบบังคับอากาศ.....	39
2.4 หลักการทำงานของเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบพาราโบลา	42
2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	43
บทที่ 3 การดำเนินการวิจัยและผลการวิจัย	49
3.1 เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบพาราโบลา.....	49
3.2 การทดลอง	50
3.2.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง.....	50
3.3 ผลการทดลอง.....	53
3.3 การพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์.....	56
3.3.1 เงื่อนไขของแบบจำลอง.....	56
3.3.2 การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์.....	57
3.3.2.1 สมการสมดุลความร้อน	57
3.3.2.2 สมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน.....	60
3.3.2.3 การหาผลเฉลยของแบบจำลอง.....	61
3.3.2.4 การเขียนโปรแกรมสำหรับการคำนวณหาผลเฉลย	64
3.3.3 การตรวจสอบแบบจำลอง.....	65
3.3.4 การจำลองแบบ.....	71
3.3.5 ผลของรังสีกระจายต่อประสิทธิภาพในการทำความร้อนของเครื่องอบแห้งพลังงาน แสงอาทิตย์แบบพาราโบลา	73
บทที่ 4 สรุป.....	76
ภาคผนวก.....	77
ภาคผนวก ก	78

ภาคผนวก ข	80
ภาคผนวก ค	90
รายการอ้างอิง	92
ประวัติผู้เขียน	97



สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 1 ประเภทของการปกคลุมท้องฟ้า	19
ตารางที่ 2 ข้อมูลสภาพอากาศของสถานีอุตุนิยมวิทยาทางภาคเหนือ (จังหวัดเชียงใหม่) สถานี อุตุนิยมวิทยาทางภาคตะวันออกเฉียงเหนือ (จังหวัดอุบลราชธานี) และสถานีอุตุนิยมวิทยาทาง ภาคใต้ (จังหวัดสงขลา).....	79
ตารางที่ 3 ภาพถ่ายสภาพท้องฟ้าจากเครื่องถ่ายภาพท้องฟ้าของสถานีอุตุนิยมวิทยาทางภาคเหนือ (จังหวัดเชียงใหม่) วันที่ 14 เดือน สิงหาคม 2564	81
ตารางที่ 4 ภาพถ่ายสภาพท้องฟ้าจากเครื่องถ่ายภาพท้องฟ้าของสถานีอุตุนิยมวิทยาทางภาค ตะวันออกเฉียงเหนือ (จังหวัดอุบลราชธานี) วันที่ 21 เดือน มิถุนายน 2564	84
ตารางที่ 5 ภาพถ่ายสภาพท้องฟ้าจากเครื่องถ่ายภาพท้องฟ้าของสถานีอุตุนิยมวิทยาทางภาคใต้ (จังหวัดสงขลา) วันที่ 2 เดือน มกราคม 2564.....	87
ตารางที่ 6 ประสิทธิภาพในการทำความร้อนของเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์	91



สารบัญรูปภาพ

	หน้า
รูปที่ 1 ชนิดของรังสีอาทิตย์ที่ตกกระทบบนพื้นผิวโลก.....	18
รูปที่ 2 สภาพท้องฟ้า ก) ท้องฟ้าปราศจากเมฆ ข) ท้องฟ้ามีเมฆบางส่วน และ ค) ท้องฟ้ามีเมฆเต็มท้องฟ้า	20
รูปที่ 3 การนำความร้อนในหนึ่งมิติ.....	22
รูปที่ 4 ขอบเขตของความเร็วก่เกิดขึ้นเมื่อของไหลไหลเหนือแผ่นของแข็ง (v คือความเร็วของของไหลก่อนไหลเข้าไปเหนือแผ่นของแข็ง และ δ เป็นความหนาของชั้นขอบเขตความเร็ว) (ดัดแปลงจาก เสริม จันทร์ฉาย, 2560a)	23
รูปที่ 5 ชั้นขอบเขตของความร้อนที่ก่เกิดขึ้นเมื่อของไหลซึ่งมีอุณหภูมิสม่ำเสมอ T ไหลเข้าไปเหนือแผ่นของแข็งที่มีอุณหภูมิที่ผิว T_s ($T_s > T$) โดย δ_t เป็นความหนาของชั้นขอบเขตความร้อน (ดัดแปลงจาก เสริม จันทร์ฉาย, 2560a)	24
รูปที่ 6 รูปแบบการไหลของของไหล (ก) การไหลแบบราบเรียบ (ข) การไหลแบบปั่นป่วน	26
รูปที่ 7 การพาความร้อนตามธรรมชาติ.....	27
รูปที่ 8 รังสีที่ตกกระทบในมุมตัน (ดัดแปลงจาก เสริม จันทร์ฉาย, 2560b)	29
รูปที่ 9 รังสีที่กระทบวัตถุทั้งหมด (ดัดแปลงจาก เสริม, 2560b)	30
รูปที่ 10 รังสีที่แผ่ออกจากผิวของวัตถุ (ดัดแปลงจาก เสริม จันทร์ฉาย, 2560b).....	31
รูปที่ 11 รังสีที่แผ่ออกจากวัตถุทั้งหมด (ดัดแปลงจาก เสริม จันทร์ฉาย, 2560b).....	31
รูปที่ 12 วัตถุดำที่มีอุณหภูมิแตกต่างกันจะถ่ายเทความร้อนโดยการแผ่รังสี	33
รูปที่ 13 สัดส่วนการแผ่รังสีระหว่างวัตถุที่ 1 และ 2 (ดัดแปลงจาก Gupta et al., 2017).....	34
รูปที่ 14 หลักการทำงานของเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ประเภทการพาความร้อนตามธรรมชาติแบบรับรังสีอาทิตย์โดยตรง	36
รูปที่ 15 เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ประเภทการพาความร้อนตามธรรมชาติแบบรับรังสีอาทิตย์โดยตรง (ดัดแปลงจาก Mane, 2017)	36

รูปที่ 16 หลักการทำงานของเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ประเภทการพาความร้อนตามธรรมชาติแบบรับรังสีอาทิตย์โดยอ้อม.....	37
รูปที่ 17 เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ประเภทการพาความร้อนตามธรรมชาติแบบรับรังสีอาทิตย์โดยอ้อม (Babar, Tarafdar, Malakar, Arora, & Nema, 2020)	37
รูปที่ 18 หลักการทำงานของเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ประเภทการพาความร้อนตามธรรมชาติแบบรับรังสีอาทิตย์แบบผสม.....	38
รูปที่ 19 เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ประเภทการพาความร้อนตามธรรมชาติแบบรับรังสีอาทิตย์แบบผสม (ดัดแปลงจาก Misha, Alqadhi, Mohd Rosli, & Yusof, 2018).....	38
รูปที่ 20 หลักการทำงานของเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ประเภทการพาความร้อนแบบบังคับอากาศแบบรับรังสีอาทิตย์โดยตรง.....	39
รูปที่ 21 เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ประเภทการพาความร้อนแบบบังคับอากาศแบบรับรังสีอาทิตย์โดยตรง (Jain & Tiwari, 2004).....	39
รูปที่ 22 หลักการทำงานของเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ประเภทการพาความร้อนแบบบังคับอากาศแบบรับรังสีอาทิตย์โดยอ้อม.....	40
รูปที่ 23 เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ประเภทการพาความร้อนแบบบังคับอากาศแบบรับรังสีอาทิตย์โดยอ้อม (ดัดแปลงจาก El-Sebaii & Shalaby, 2013).....	40
รูปที่ 24 หลักการทำงานของเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ประเภทการพาความร้อนแบบบังคับอากาศแบบรับรังสีอาทิตย์แบบผสม.....	41
รูปที่ 25 เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ประเภทการพาความร้อนแบบบังคับอากาศแบบรับรังสีอาทิตย์แบบผสม (Lakshmi, Muthukumar, Layek, & Nayak, 2019).....	41
รูปที่ 31 การส่งผ่านแสงของแผ่นโพลีคาร์บอเนต (Jankovic et al., 2016).....	42
รูปที่ 32 แผนภาพการทำงานของเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบพาราโบลา	43
รูปที่ 33 เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบพาราโบลา (Janjai et al., 2009).....	44
รูปที่ 34 เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ในสาธารณรัฐประชาธิปไตยประชาชนลาว (Janjai et al., 2011).....	45
รูปที่ 35 แผนภาพของเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ที่มีระบบทำความร้อนเสริมโดยใช้เตาชีวมวล (Tarigan, 2018).....	46

รูปที่ 36 เครื่องแห่งพลังงานแสงอาทิตย์แบบหลายภาคพร้อมส่วนทำลมร้อนหลายช่องแบบเอียง (Pierre Damien, 2018).....	47
รูปที่ 37 แผนภาพของเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์สำหรับอบแห้งยางพาราแผ่น (Aumporn et al., 2021).....	48
รูปที่ 38 เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบพาราโบลาที่ใช้ในงานวิจัยนี้	49
รูปที่ 39 เทอร์โมคัปเปิลชนิดเค.....	50
รูปที่ 40 เครื่องตรวจอากาศอัตโนมัติ ยี่ห้อ Young.....	51
รูปที่ 41 เครื่องวัดความเข้มรังสีอาทิตย์แบบเทอร์โมไพล์ ยี่ห้อ Kipp&Zonen รุ่น CMP11	51
รูปที่ 42 เครื่องบันทึกข้อมูล ยี่ห้อ Yokogawa รุ่น DC100.....	52
รูปที่ 43 เครื่องถ่ายภาพท้องฟ้า (sky viewer) ยี่ห้อ Prede รุ่น PSV-100W5	52
รูปที่ 44 ตำแหน่งในการวัดอุณหภูมิ ณ ตำแหน่งต่าง ๆ ภายในเครื่องอบแห้งแบบพาราโบลา อุณหภูมิ และความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศแวดล้อม และความเข้มรังสีอาทิตย์ โดยที่.....	53
รูปที่ 45 การแปรค่าความเข้มรังสีอาทิตย์เทียบกับเวลาในวันที่สภาพอากาศที่มีเมฆเต็มท้องฟ้าของการทดลองครั้งที่ 1 (18 กันยายน 2564)	54
รูปที่ 46 การแปรค่าอุณหภูมิอากาศภายในเครื่องอบแห้งเทียบกับเวลาในวันที่สภาพอากาศที่มีเมฆเต็มท้องฟ้าของการทดลองครั้งที่ 1 (18 กันยายน 2564).....	54
รูปที่ 47 การแปรค่าความเข้มรังสีอาทิตย์เทียบกับเวลาในวันที่สภาพอากาศที่มีเมฆเต็มท้องฟ้าของการทดลองครั้งที่ 2 (15 กุมภาพันธ์ 2565).....	55
รูปที่ 48 การแปรค่าอุณหภูมิอากาศภายในเครื่องอบแห้งเทียบกับเวลาในวันที่สภาพอากาศที่มีเมฆเต็มท้องฟ้าของการทดลองครั้งที่ 2 (15 กุมภาพันธ์ 2565).....	56
รูปที่ 49 การถ่ายเทความร้อนของเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบพาราโบลา	57
รูปที่ 50 การแบ่งส่วนในการพิจารณาอุณหภูมิขององค์ประกอบต่าง ๆ ของเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบพาราโบลาตามทิศทางการไหลของอากาศ.....	62
รูปที่ 51 แผนผังการทำงานของโปรแกรม.....	66
รูปที่ 52 การแปรค่าของอุณหภูมิอากาศภายในเครื่องอบแห้งจากแบบจำลอง (ใช้ข้อมูลจากการทดลองครั้งที่ 1).....	67

รูปที่ 53 การแปรค่าของอุณหภูมิแผ่นโพลีคาร์บอเนตจากแบบจำลอง (ใช้ข้อมูลจากการทดลองครั้งที่ 1)	67
รูปที่ 54 การแปรค่าของอุณหภูมิตั้งพื้นคอนกรีตจากแบบจำลอง (ใช้ข้อมูลจากการทดลองครั้งที่ 1)....	68
รูปที่ 55 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิอากาศภายในเครื่องอบแห้งจากแบบจำลองกับอุณหภูมิอากาศภายในเครื่องอบแห้งจากข้อมูลการทดลองครั้งที่ 1	68
รูปที่ 56 การแปรค่าของอุณหภูมิอากาศภายในเครื่องอบแห้งจากแบบจำลอง (ใช้ข้อมูลจากการทดลองครั้งที่ 2).....	69
รูปที่ 57 การแปรค่าของอุณหภูมิแผ่นโพลีคาร์บอเนตจากแบบจำลอง (ใช้ข้อมูลจากการทดลองครั้งที่ 2)	70
รูปที่ 58 การแปรค่าของอุณหภูมิตั้งพื้นคอนกรีตจากแบบจำลอง (ใช้ข้อมูลจากการทดลองครั้งที่ 2)....	70
รูปที่ 59 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิอากาศภายในเครื่องอบแห้งจากแบบจำลองกับอุณหภูมิอากาศภายในเครื่องอบแห้งจากข้อมูลการทดลองครั้งที่ 2	71
รูปที่ 60 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิอากาศภายในเครื่องอบแห้งจากแบบจำลองกับช่วงเวลาที่สภาวะอากาศมีเมฆเต็มท้องฟ้าของสถานีอุตุนิยมวิทยาทางภาคเหนือ (14 สิงหาคม 2564).....	72
รูปที่ 61 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิอากาศภายในเครื่องอบแห้งจากแบบจำลองกับช่วงเวลาที่สภาวะอากาศมีเมฆเต็มท้องฟ้าของสถานีอุตุนิยมวิทยาทางภาคตะวันออกเฉียงเหนือ (21 มิถุนายน 2564)....	72
รูปที่ 62 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิอากาศภายในเครื่องอบแห้งจากแบบจำลองกับช่วงเวลาที่สภาวะอากาศมีเมฆเต็มท้องฟ้าของสถานีอุตุนิยมวิทยาทางภาคใต้ (2 มกราคม 2564).....	73
รูปที่ 63 ประสิทธิภาพในการทำความร้อนของเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบพาราโบลาที่จังหวัดเชียงใหม่.....	74
รูปที่ 64 ประสิทธิภาพในการทำความร้อนของเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบพาราโบลาที่จังหวัดอุบลราชธานี.....	74
รูปที่ 65 ประสิทธิภาพในการทำความร้อนของเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบพาราโบลาที่จังหวัดสงขลา	75

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและความเป็นมาของปัญหา

ประเทศไทยเป็นประเทศเกษตรกรรมที่ตั้งอยู่ในพื้นที่เขตร้อนชื้นที่มีผลผลิตทางการเกษตรปริมาณมากและได้รับแสงอาทิตย์รายวันเฉลี่ยต่อปีประมาณ 20 – 24 MJ/m²-day ซึ่งเป็นพลังงานสะอาดและเป็นพลังงานหมุนเวียนที่เมื่อนำมาใช้แล้วสามารถเกิดขึ้นใหม่ได้เองตามธรรมชาติ ส่งผลให้ประเทศไทยมีศักยภาพในการแปลงพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้าและพลังงานความร้อน จึงมีนักวิจัยทำการศึกษาและพัฒนาการถนอมผลิตภัณฑ์ทางการเกษตรเหล่านั้นด้วยการแปรรูปผ่านพลังงานแสงอาทิตย์ให้สามารถยืดอายุของผลิตภัณฑ์ได้นานขึ้น

หนึ่งในวิธีการแปรรูปอาหารอย่างเช่น การตากแห้งตามธรรมชาติ เป็นการถนอมอาหารที่มีความเป็นมายาวนานก่อนคริสตกาล 12,000 ปี (Nummer & Brian, 2002) และมีวิวัฒนาการของการตากแห้งเปลี่ยนเป็นการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ ซึ่งเป็นที่นิยมที่นำมาใช้งานกันอย่างแพร่หลายในปัจจุบัน (Jain, 2005) เนื่องจากการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีคุณภาพที่ดี ถูกสุขลักษณะ และเพิ่มมูลค่าให้กับผลิตภัณฑ์มากยิ่งขึ้น (Dufera, Hofacker, Esper, & Hensel, 2021; Roratto, Monteiro, Carciofi, & Laurindo, 2021) เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์มีหลายชนิด รวมทั้งเครื่องอบแห้งแบบพาราโบลาซึ่งมีข้อดี คือ มีความจุมากและสามารถใช้งานได้ง่าย

เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบพาราโบลา มีโครงสร้างพื้นฐานของเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์เป็นโครงสร้างแบบปิด ซึ่งจะรับรังสีรวมจากดวงอาทิตย์และเก็บรังสีคลื่นยาวไว้ในเครื่องอบแห้งเพื่อสร้างสภาวะอากาศภายในเครื่องอบแห้งให้เหมาะสมกับการอบแห้ง (Jain & Tiwari, 2003) และนิยมใช้สำหรับการอบแห้งผลิตภัณฑ์ทางการเกษตรกันอย่างแพร่หลายในประเทศไทย เช่น การอบแห้งผลไม้ และพืชสมุนไพรต่าง ๆ เนื่องด้วยการใช้งานที่ง่าย สะดวก และอบแห้งผลิตผลสดได้ครั้งละจำนวนมาก (Dharmadurai et al., 2020; Krungkaew, Kingphadung, Kwonpongsagoon, & Mahayothee, 2020) นอกจากนี้ยังมีงานวิจัยที่พบว่าเครื่องอบแห้งประเภทนี้สามารถใช้งานได้ แม้ในช่วงเวลาที่มีเมฆปกคลุมท้องฟ้า จากงานวิจัยของ Aumporn, Pankaew, and Janjai (2021) ได้ทำการอบแห้งยางพาราแผ่นโดยใช้เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบพาราโบลา พบว่าแม้ในสภาวะอากาศที่แปรปรวน เช่น มีเมฆปกคลุมท้องฟ้าทั้งหมด (overcast sky) อุณหภูมิอากาศในเครื่องอบแห้ง ยังคงอยู่ในช่วงที่เหมาะสมต่อการอบแห้งยางพาราแผ่น และนอกจากนี้ยังมีงานวิจัยที่ศึกษาเกี่ยวผลกระทบของรังสีอาทิตย์ที่มีต่อเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ ซึ่งจากงานวิจัยของ Pierre Damien (2018) ได้ทำการศึกษาและจำลองแบบการอบแห้ง

ในประเทศวันดา พบว่าอุณหภูมิของอากาศแวดล้อมและความเข้มรังสีอาทิตย์เป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิอากาศที่ใช้ในการอบแห้งผลิตภัณฑ์ทางการเกษตร เช่นเดียวกับงานวิจัยของ Mobtaker, Ajabshirchi, Ranjbar, and Matloobi (2019) ที่พัฒนาและตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองเพื่อศึกษาปริมาณความเข้มรังสีอาทิตย์ที่ตกกระทบมายังเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ พบว่าผลที่ได้จากแบบจำลองมีความคลาดเคลื่อนเพียงเล็กน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับผลจากการทดลอง โดยมีค่า MPE, MBE และ RMSE เท่ากับ 1.12% 0.53°C และ 2.82°C ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าผลที่ได้จากแบบจำลองสามารถนำไปใช้งานได้จริง และนอกจากนี้ยังมีงานวิจัยของ Bekkioui (2021) ที่ทำการสร้างแบบจำลองเชิงตัวเลขของเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์สำหรับการอบแห้งไม้ พบว่าเครื่องอบแห้งที่มีพื้นที่รับรังสีอาทิตย์มากจะส่งผลให้อุณหภูมิอากาศในเครื่องอบแห้งสูงขึ้น และแผ่นปกคลุมเครื่องอบแห้งมีผลต่อการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิอากาศในเครื่องอบแห้งเช่นกัน

จากงานวิจัยข้างต้นจะเห็นว่าความเข้มรังสีอาทิตย์ส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิอากาศในเครื่องอบแห้งและเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบพาราโบลาสามารถอบแห้งผลิตภัณฑ์ทางการเกษตรได้แม้ในสภาวะอากาศที่มีเมฆเต็มท้องฟ้า ซึ่งมีเพียงรังสีกระจายเท่านั้นที่สามารถผ่านเข้ามายังเครื่องอบแห้งเป็นผลให้อากาศในเครื่องอบแห้งมีค่าสูงขึ้น จากสมมติฐานข้างต้นสามารถยืนยันได้โดยการทดลองหรือการสร้างแบบจำลอง เนื่องจากการคาดการณ์วันที่สภาพท้องฟ้ามีเมฆเต็มท้องฟ้าตลอดทั้งวันนั้นเป็นไปได้ยาก ดังนั้นการศึกษาผลจากการทดลองจึงไม่เหมาะสมในการนำมาใช้งาน และจากการศึกษางานวิจัยข้างต้นพบว่า การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (Mathematical modelling) สามารถทำนายอุณหภูมิอากาศภายในเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบพาราโบลาภายใต้สภาวะอากาศที่มีเมฆเต็มท้องฟ้าได้

งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์ในการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่สามารถนำมาใช้คำนวณอุณหภูมิอากาศภายในเครื่องอบแห้ง และศึกษาประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบพาราโบลาภายใต้สภาวะอากาศที่มีเมฆเต็มท้องฟ้า

1.2 วัตถุประสงค์

- 1) เพื่อสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่สามารถใช้คำนวณอุณหภูมิอากาศภายในเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบพาราโบลา ภายใต้สภาวะอากาศที่มีเมฆเต็มท้องฟ้า
- 2) เพื่อศึกษาผลของรังสีกระจายที่มีต่ออุณหภูมิอากาศภายในเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบพาราโบลา
- 3) เพื่อคำนวณหาประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบพาราโบลา ภายใต้สภาวะอากาศที่มีเมฆเต็มท้องฟ้า

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

ขอบเขตของงานวิจัยนี้จะจำกัดที่การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับคำนวณอุณหภูมิอากาศภายในเครื่องอบแห้งและประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเครื่องอบแห้ง ภายใต้สภาวะอากาศที่มีเมฆเต็มท้องฟ้า

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

งานวิจัยนี้จะทำให้ทราบว่าผลของรังสีกระจายที่มีต่อการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิอากาศภายในเครื่องอบแห้ง และภายใต้สภาวะอากาศที่มีเมฆเต็มท้องฟ้าเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบพาราโบลาที่มีประสิทธิภาพเพียงพอต่อการอบแห้งผลิตผลทางการเกษตรได้



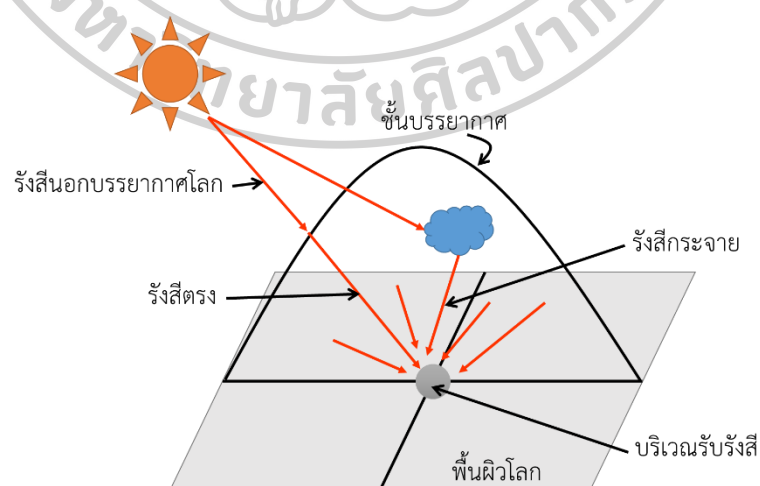
บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในบทนี้จะกล่าวถึงหลักการทางวิชาการพื้นฐานที่เกี่ยวข้องกับชนิดของรังสีอาทิตย์ การถ่ายเทความร้อน ชนิดของเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ สภาพท้องฟ้าในรูปแบบต่าง ๆ หลักการทำงานของเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบพาราโบลา และผลงานทางวิชาการที่เกี่ยวกับการสร้างแบบจำลองเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์

2.1. ชนิดของรังสีอาทิตย์

ดวงอาทิตย์จะแผ่รังสีออกไปยังอวกาศรอบ ๆ มีลักษณะการเคลื่อนที่ของรังสีเป็นเส้นตรง รังสีจากดวงอาทิตย์ที่ตกกระทบกับวัตถุต่าง ๆ ในอวกาศ เช่น แผงเซลล์สุริยะของดาวเทียม ฝืนอกของยานอวกาศ และดาวเคราะห์ต่าง ๆ ซึ่งอยู่นอกชั้นบรรยากาศของโลก (เสริม จันทร์ฉาย, 2560b) จะเรียกรังสีนี้ว่า รังสีอาทิตย์นอกบรรยากาศโลก (extraterrestrial solar radiation) ส่วนรังสีอาทิตย์ที่ผ่านชั้นบรรยากาศมายังพื้นผิวของโลกบางส่วนถูกลดทอนด้วยการกระเจิง (scattering) โดยองค์ประกอบทางบรรยากาศ เช่น ก๊าซต่าง ๆ อนุภาคของฝุ่นละออง และเมฆ ซึ่งรังสีที่กระเจิงออกมา เรียกว่า รังสีกระจาย (diffuse radiation) และรังสีอาทิตย์ที่พุ่งตรงมายังพื้นผิวโลกโดยปราศจากการกระเจิงด้วยตัวแปรต่าง ๆ ทางบรรยากาศ เรียกว่า รังสีตรง (beam radiation) ซึ่งผลรวมของรังสีตรงและรังสีกระจาย เรียกว่า รังสีรวม (total solar radiation หรือ global radiation) แสดงได้ดังรูปที่ 1 (Duffie, Beckman, & Blair, 2020) โดยรังสีแต่ละชนิดมีการใช้งานที่แตกต่างกันดังหัวข้อต่อไปนี้



รูปที่ 1 ชนิดของรังสีอาทิตย์ที่ตกกระทบบนพื้นผิวโลก

2.1.1 รังสีตรง

รังสีที่เดินทางจากดวงอาทิตย์เป็นเส้นตรงและผ่านชั้นบรรยากาศของโลกลงมายังพื้นโลกโดยปราศจากการกระเจิงขององค์ประกอบต่าง ๆ ในชั้นบรรยากาศจำพวกก้อนเมฆ อนุภาคเล็ก ๆ อย่างฝุ่นละออง หรือแม้แต่ไอน้ำ เรียกรังสีนี้ว่า รังสีตรง โดยส่วนใหญ่รังสีตรงถูกนำมาใช้พิจารณาในเรื่องของพลังงาน เช่น การผลิตความร้อนโดยใช้ตัวรับรังสีอาทิตย์เพื่อใช้สำหรับการผลิตน้ำร้อน (Gugliuzza & Basile, 2014) และการแปลงพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้าจากแผงโซลาร์เซลล์ (Goldschmidt & van Sark, 2022) เป็นต้น

2.1.2 รังสีกระจาย

รังสีกระจายเป็นรังสีที่เดินทางจากดวงอาทิตย์และผ่านชั้นบรรยากาศของโลกพื้นโลกโดยถูกลดทอนจากการกระเจิงขององค์ประกอบต่าง ๆ ในชั้นบรรยากาศ และการนำรังสีกระจายมาใช้ประโยชน์ เช่น การเจริญเติบโตของพืชจากการสังเคราะห์ด้วยแสง (Durand et al., 2021) และการอบแห้งผลิตผลทางการเกษตร เป็นต้น ในการพิจารณารังสีกระจายนั้นสามารถสังเกตได้จากการปกคลุมท้องฟ้า ซึ่งอธิบายได้ดังนี้

- การปกคลุมท้องฟ้า (sky cover amounts)

การปกคลุมท้องฟ้า หมายถึง จำนวนก้อนเมฆ หรือปรากฏการณ์ที่บดบังท้องฟ้า และสามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่า เป็นต้น โดยสามารถแบ่งจำนวนการปกคลุมท้องฟ้าได้ทั้งหมด 8 ส่วน กรณีที่ไม่มีก้อนเมฆบดบังท้องฟ้าและเห็นท้องฟ้าเป็นสีฟ้าจะเรียกสภาพท้องฟ้าประเภทนี้ว่า สภาพท้องฟ้าปราศจากเมฆ (clear sky condition) (รูปที่ 2ก) กรณีที่มีก้อนเมฆปกคลุมท้องฟ้าบางส่วนจะสามารถแบ่งท้องฟ้าได้เป็น 8 ส่วน หากมีก้อนเมฆอยู่ในส่วนที่ 1 ถึง 7 จะเรียกสภาพท้องฟ้าประเภทนี้ว่า สภาพท้องฟ้ามีเมฆบางส่วน (partly sky condition) (รูปที่ 2ข) และในกรณีที่มีก้อนเมฆบดบังท้องฟ้าทั้งหมดไม่สามารถมองเห็นสีฟ้าได้จะเรียกสภาพท้องฟ้าประเภทนี้ว่า สภาพท้องฟ้ามีเมฆเต็มท้องฟ้า (overcast sky condition) (รูปที่ 2ค) โดยจำนวนการปกคลุมของก้อนเมฆแสดงได้ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ประเภทของการปกคลุมท้องฟ้า

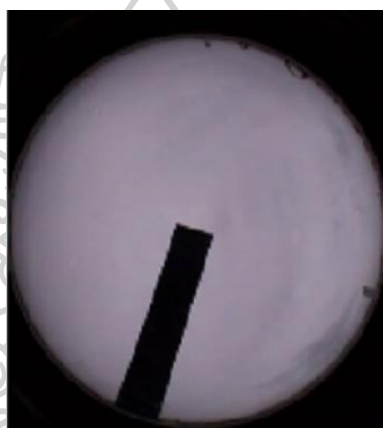
จำนวนการปกคลุมท้องฟ้า	ประเภทการปกคลุมท้องฟ้า
0	ท้องฟ้าปราศจากเมฆ
1-7	ท้องฟ้ามีเมฆบางส่วน
8	ท้องฟ้ามีเมฆเต็มท้องฟ้า



ก) ท้องฟ้าปราศจากเมฆ



ข) ท้องฟ้ามีเมฆบางส่วน



ค) ท้องฟ้ามีเมฆเต็มท้องฟ้า

รูปที่ 2 สภาพท้องฟ้า ก) ท้องฟ้าปราศจากเมฆ ข) ท้องฟ้ามีเมฆบางส่วน และ ค) ท้องฟ้ามีเมฆเต็มท้องฟ้า

2.2 การถ่ายเทความร้อน

ปรากฏการณ์การถ่ายเทความร้อนเป็นปรากฏการณ์ที่เกี่ยวข้องกับการถ่ายเทมวล โมเมนตัม และพลังงาน โดยที่พลักซ์ของการถ่ายเทความร้อน โมเมนตัม และมวล จะมีความสัมพันธ์โดยตรงกับแรงที่ทำให้เกิดการถ่ายเทความร้อน (driving force) และแปรผกผันกับความต้านทานการถ่ายเทความร้อน (resistance) เช่น เมื่อภายในวัตถุหรือระหว่างวัตถุมีความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิเกิดขึ้น จะเกิดการถ่ายเทพลังงานจากวัตถุที่มีอุณหภูมิสูงไปสู่วัตถุที่มีอุณหภูมิต่ำเสมอ เรียกว่า การถ่ายเทความร้อน (Heat transfer) ดังนั้นการถ่ายเทความร้อนจึงเกิดจากความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิภายในวัตถุหรือระหว่างวัตถุ ซึ่งในกรณีที่อุณหภูมิของตัวกลางหรือระหว่างตัวกลางมีค่าเท่ากันจะไม่เกิดการถ่ายเทความร้อน (Çengel & Ghajar, 2020) เราสามารถเขียนสมการพื้นฐานของการถ่ายเทความร้อนได้ดังสมการที่ 2.1

$$\text{Rate of transfer process} = \frac{\text{Driving force}}{\text{Resistance}} \quad (2.1)$$

กระบวนการถ่ายเทความร้อนสามารถแบ่งออกเป็น 3 ประเภท คือ การนำความร้อน (conduction) การพาความร้อน (convection) และการแผ่รังสีความร้อน (radiation) โดยการเคลื่อนที่ของความร้อนในแต่ละประเภทจะเกิดขึ้นเมื่อมีความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิของภายในวัตถุหรือระหว่างวัตถุ โดยกลไกในการทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของความร้อนแต่ละประเภทมีความแตกต่างกัน ซึ่งอธิบายดังหัวข้อต่อไปนี้

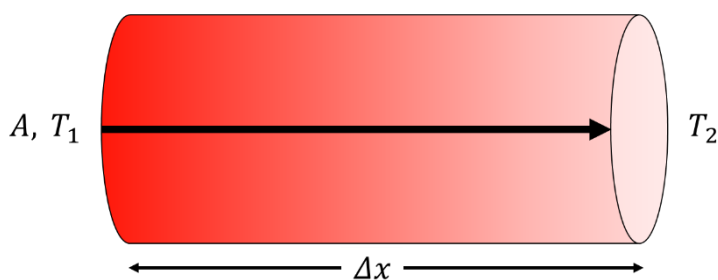
2.2.1 การนำความร้อน (conductive heat transfer)

ปรากฏการณ์การถ่ายเทพลังงานความร้อนที่เกิดขึ้นภายในวัตถุหรือระหว่างวัตถุสองชิ้นที่สัมผัสกัน ซึ่งกฎของฟูเรียร์ของการนำความร้อน (Fourier's law) กล่าวว่า “ฟลักซ์ของความร้อนเป็นสัดส่วนโดยตรงกับเกรเดียนต์ของอุณหภูมิ (gradient temperature)” (Aboudi, Arnold, & Bednarczyk, 2013) โดยทิศทางของการถ่ายเทพลังงานความร้อนจะเคลื่อนที่จากบริเวณที่มีอุณหภูมิสูงไปสู่บริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า ในขณะที่ตัวกลางไม่มีการเคลื่อนที่ (รูปที่ 3) โดยการนำความร้อนเป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นในระดับชั้นอะตอมของอนุภาค ในกรณีของโลหะ การนำความร้อนเป็นผลมาจากการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนอิสระ ในกรณีของของไหลและของแข็งที่มีสภาพการนำความร้อนต่ำ การนำความร้อนจะเกิดจากการสั่นของโมเลกุลข้างเคียง และในกรณีของก๊าซ การนำความร้อนเกิดขึ้นจากการสั่นระหว่างโมเลกุล ดังนั้นการนำความร้อนเป็นลักษณะการถ่ายเทความร้อนโดยตรงจากวัตถุหนึ่งไปยังอีกวัตถุหนึ่งโดยการสัมผัสกัน (Bekkioui, 2021) สามารถเขียนสมการการนำความร้อนตามกฎของฟูเรียร์ได้ดังสมการที่ 2.2

$$\dot{Q}_{cond} = -kA \frac{\Delta T}{\Delta x} \quad (2.2)$$

เมื่อ	\dot{Q}_{cond}	คือ อัตราการถ่ายเทความร้อนเนื่องจากการนำความร้อน, [W]
	k	คือ สัมประสิทธิ์การนำความร้อนของวัสดุ, [W/m·K]
	A	คือ พื้นที่หน้าตัดที่ความร้อนผ่าน, [m ²]
	ΔT	คือ ผลต่างของอุณหภูมิ, [K]
	Δx	คือ ความกว้างหรือความหนาของวัสดุ, [m]

$$\Delta T = T_1 - T_2$$



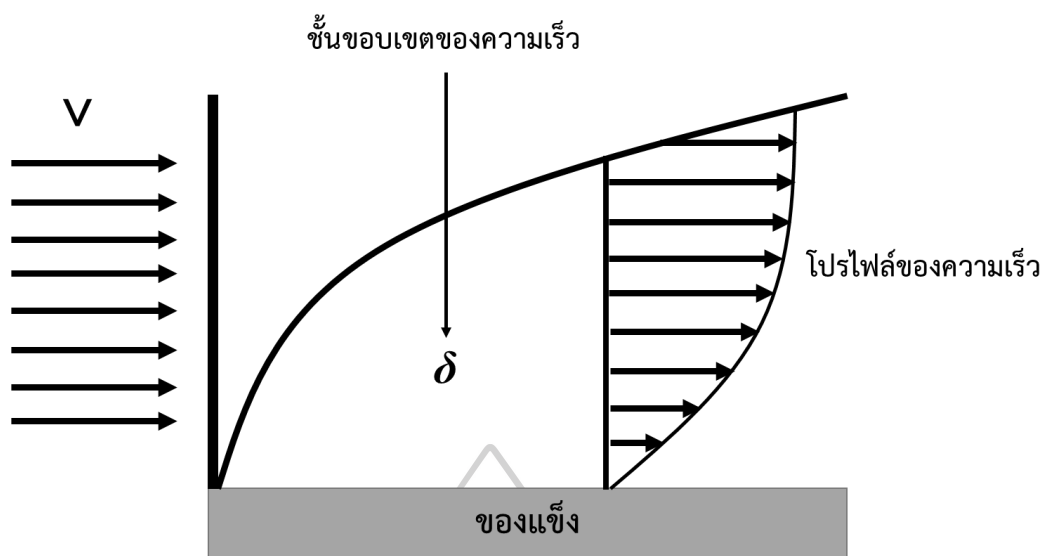
รูปที่ 3 การนำความร้อนในหนึ่งมิติ

2.2.2 การพาความร้อน (convective heat transfer)

พลังงานความร้อนที่เคลื่อนผ่านระหว่างผิวของของแข็งกับของไหลหรือก๊าซ ซึ่งเกิดจากของไหลเป็นตัวพาความร้อนมาให้ของแข็ง หรือของไหลพาความร้อนออกจากผิวของของแข็ง เรียกว่า การพาความร้อน การเคลื่อนที่ของความร้อนเกิดจากการพาความร้อนซึ่งเป็นผลจากการสะสมพลังงานความร้อนของการนำความร้อน (Duffie et al., 2020) โดยของไหลหรือก๊าซ เมื่อได้รับพลังงานความร้อนจะเกิดการขยายตัวของโมเลกุลทำให้ความหนาแน่นมีค่าลดลง และของไหลหรือก๊าซที่มีความหนาแน่นสูงกว่า (อุณหภูมิต่ำกว่า) จะเข้ามาแทนที่ ซึ่งการพาความร้อนสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท คือ การพาความร้อนแบบบังคับ และการพาความร้อนตามธรรมชาติ โดยทั้งสองกระบวนการมีปัจจัยที่แตกต่างกัน และในการเกิดการพาความร้อนทั้งสองแบบสามารถบอกได้จากค่าตัวเลขตัวแปรไร้มิติที่ได้จากชั้นขอบเขตความเร็วกับชั้นขอบเขตความร้อน ดังต่อไปนี้

- **ชั้นขอบเขตความเร็ว (velocity boundary layer)**

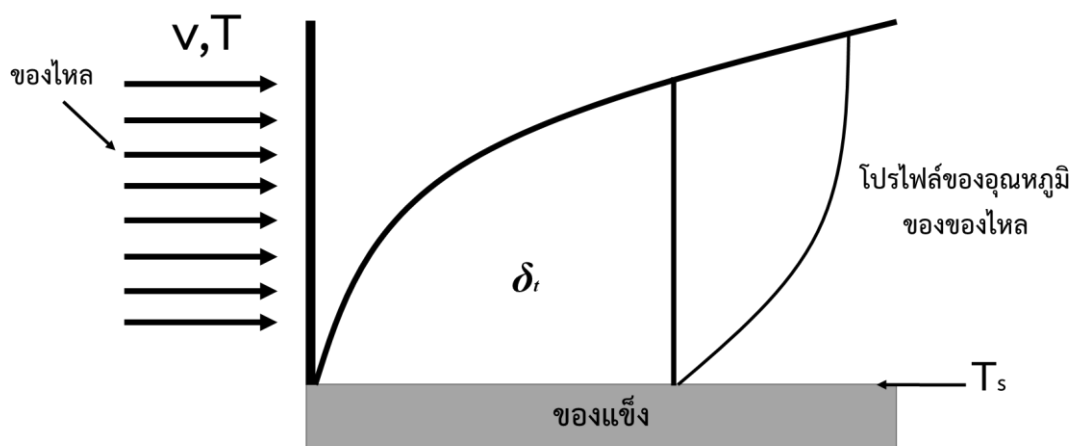
เมื่ออนุภาคของของไหลที่เคลื่อนที่ด้วยความเร็ว (v) สัมผัสกับแผ่นของแข็ง ความเร็วของของไหลจะเปลี่ยนแปลงเนื่องจากแรงเสียดทานที่เกิดจากผิวของของแข็ง (Bergman, Incropera, Dewitt, & Lavine, 2011) ซึ่งบริเวณจุดที่ของไหลสัมผัสกับผิวของแข็ง ความเร็วของของไหลจะมีค่าเป็นศูนย์ และเมื่อของไหลออกห่างจากผิวของของแข็ง ความเร็วของของไหลจะมีค่าเพิ่มขึ้นจนถึงระยะทางหนึ่งที่มีอิทธิพลจากผิวของของแข็งหมดไป (δ) โดยในทางปฏิบัติจะเป็นระยะทางที่ความเร็วของของไหลเท่ากับ $0.99v$ เราจะเรียกชั้นของของไหลที่ความเร็วของของไหลได้รับอิทธิพลจากผิวของของแข็งว่า “ชั้นขอบเขตของความเร็ว” ซึ่งโดยทั่วไปความหนาของชั้น δ จะแปรตามระยะทางในทิศทางไหลดังรูปที่ 4 (เสริม จันทร์ฉาย, 2560a)



รูปที่ 4 ขอบเขตของความเร็วที่เกิดขึ้นเมื่อของไหลไหลเหนือแผ่นของแข็ง (v คือความเร็วของของไหลก่อนไหลเข้าไปเหนือแผ่นของแข็ง และ δ เป็นความหนาของชั้นขอบเขตความเร็ว) (ดัดแปลงจาก เสริม จันทร์ฉาย, 2560a)

- **ชั้นขอบเขตความร้อน (thermal boundary layer)**

ของไหลที่มีอุณหภูมิสม่ำเสมอ (T) ที่ไหลผ่านเหนือบริเวณพื้นผิวของของแข็งที่แบนราบที่อุณหภูมิ (T_s) โดยถ้า T มีค่าแตกต่างจาก T_s จะเกิดการถ่ายเทพลังงานความร้อนระหว่างผิวของของแข็งกับของไหล ซึ่งในกรณีที่ T_s มีค่ามากกว่า T พลังงานความร้อนจะถ่ายเทจากผิวของของแข็งไปยังของไหล โดยความร้อนจากผิวของของแข็งจะถ่ายเทไปยังของไหลที่สัมผัสกับผิวดังกล่าวโดยการนำความร้อน (เสริม จันทร์ฉาย, 2560a) จากนั้นความร้อนจะเคลื่อนที่ตามการไหลของของไหล โดยอุณหภูมิของของไหลที่สัมผัสกับผิวของแข็งจะมีค่าเท่ากับอุณหภูมิของผิวของแข็ง จากนั้นอุณหภูมิของของไหลจะลดลงเมื่อระยะห่างจากผิวของของแข็งเพิ่มขึ้น และเกิดเป็นชั้นขอบเขตของความร้อน ดังรูปที่ 5 เช่นเดียวกับกรณีของความเร็ว โดยความหนา (δ_t) ที่แต่ละจุดในทิศทางการไหลจะเป็นระยะห่างจากผิวของของแข็งถึงระยะที่อุณหภูมิของของไหลเท่ากับ $0.99T$ (Bergman et al., 2011)



รูปที่ 5 ชั้นขอบเขตของความร้อนที่เกิดขึ้นเมื่อของไหลซึ่งมีอุณหภูมิสม่ำเสมอ T ไหลเข้าไปเหนือแผ่นของแข็งที่มีอุณหภูมิที่ผิว T_s ($T_s > T$) โดย δ_t เป็นความหนาของชั้นขอบเขตความร้อน (ดัดแปลงจาก เสริม จันทร์ฉาย, 2560a)

2.2.2.1 การพาความร้อนแบบบังคับ (forced convection)

การถ่ายเทความร้อนเนื่องจากการพาความร้อนขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่าง เช่น คุณสมบัติทางฟิสิกส์ของของไหล (ความหนืดเชิงพลวัต สภาพนำความร้อน ความหนาแน่น และความร้อนจำเพาะ เป็นต้น) ลักษณะทางเรขาคณิตของพื้นผิว (พื้นผิวเรียบ พื้นผิวขรุขระ) ลักษณะการไหล (การไหลแบบราบเรียบ การไหลแบบปั่นป่วน) เป็นต้น โดยจากกฎการเย็นตัวของนิวตัน (Newton's law of cooling) กล่าวว่า “การถ่ายเทพลังงานความร้อนขึ้นอยู่กับความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิของวัตถุกับสิ่งแวดล้อม” (Davidzon, 2012) ซึ่งการเคลื่อนที่ของความร้อนระหว่างผิวของของแข็งและของไหลนั้น ของไหลจะถูกบังคับให้เคลื่อนที่ด้วยแรงภายนอก (พัดลม เครื่องสูบลม) สามารถเขียนได้ดังสมการที่ 2.3

$$\dot{Q}_{conv} = Ah_c(T_s - T_f) \quad (2.3)$$

เมื่อ	\dot{Q}_{conv}	คือ อัตราการถ่ายเทความร้อนเนื่องจากการพาความร้อน, [W]
	h_c	คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเนื่องจากการพาความร้อน, [W/m ² ·K]
	A	คือ พื้นที่ที่ของไหลสัมผัส, [m ²]
	T_s	คือ อุณหภูมิที่บริเวณผิวของของแข็ง, [K]
	T_f	คือ อุณหภูมิของของไหล, [K]

และสามารถหาสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเนื่องจากการพาความร้อนได้จาก

$$h_c = \frac{\text{Nu} \cdot k}{L_f} \quad (2.4)$$

- เมื่อ h_c คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเนื่องจากการพาความร้อน, [W/m²·K]
 Nu คือ เลขนุสเซลต์ (Nusselt number), [-]
 k คือ สัมประสิทธิ์การนำความร้อนของแต่ละวัสดุ, [W/m·K]
 L_f คือ ความหนาของชั้นของไหล, [m]

จากสมการที่ 2.4 สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเนื่องจากการพาความร้อน (convective heat transfer coefficient, h_c) ขึ้นอยู่กับปัจจัยอื่น ๆ เช่น ลักษณะทางเรขาคณิตของของแข็ง ชนิดของการไหลของของไหล และสมบัติทางฟิสิกส์ของของไหล เป็นต้น นักวิทยาศาสตร์จึงลดความยุ่งยากโดยการหาความสัมพันธ์ระหว่าง h_c กับเลขนุสเซลต์ (เสริม จันทร์ฉาย, 2560a) เมื่อพิจารณาเลขนุสเซลต์ที่ชั้นขอบเขตความร้อนและสัมประสิทธิ์การเสียดสี (friction coefficient) ที่ชั้นขอบเขตความเร็ว พบว่าเลขนุสเซลต์มีความสัมพันธ์เชิงเส้นกับเลขพรานด์เทิล (Prandtl number, Pr) และเลขเรย์โนลด์ส (Reynolds number, Re) สามารถเขียนเป็นสมการเอมไพริคัลได้ดังสมการที่ 2.5 (Bergman et al., 2011)

$$\text{Nu} = C \cdot \text{Re}^m \cdot \text{Pr}^n \quad (2.5)$$

- เมื่อ Nu คือ เลขนุสเซลต์, [-]
 Re คือ เลขเรย์โนลด์ส, [-]
 Pr คือ เลขพรานด์เทิล, [-]
 C, m, n คือ ค่าคงตัวเอมไพริคัล ซึ่งขึ้นกับชนิดของการไหลและลักษณะทางเรขาคณิตของระบบ, [-]

ของไหลที่เคลื่อนที่ผ่านบริเวณพื้นผิวด้านบนของแผ่นของแข็งที่มีอุณหภูมิสูงกว่าของไหลจะเกิดชั้นขอบเขตความเร็วและความร้อน โดยความหนาของชั้นขอบเขตทั้งสอง ณ ตำแหน่งเดียวกันอาจมีค่าเท่ากันหรือแตกต่างกัน (เสริม จันทร์ฉาย, 2560a) ซึ่งขึ้นอยู่กับอัตราส่วนระหว่างความหนืดเชิงจลน์ (kinetic viscosity, ν) ต่อสภาพการแพร่ความร้อน (thermal diffusivity, α) หรือตัวแปรที่ไม่มีหน่วย คือ เลขพรานด์เทิล แสดงดังสมการที่ 2.6 (Bergman et al., 2011)

$$\text{Pr} = \frac{\nu}{\alpha} \quad (2.6)$$

- เมื่อ Pr คือ เลขพรานด์เทิล, [-]
 ν คือ ความหนืดของของไหลเชิงจลน์, [m^2/s]
 α คือ สภาพการแพร่ของความร้อน, [m^2/s]

ของไหลจะมีลักษณะการไหลที่แตกต่างกันออกไปขึ้นอยู่กับรูปทรงทางเรขาคณิตหรือลักษณะผิวของของแข็งที่ของไหลเคลื่อนที่ผ่าน อุณหภูมิ ความเร็ว และชนิดของของไหล เป็นต้น (เสริม จันทร ฉาย, 2560a) โดยนักคณิตศาสตร์ที่มีชื่อว่า ออสบอร์น เรย์โนลด์ส์ ได้ศึกษารูปแบบการไหลของน้ำในท่อ พบว่าลักษณะการไหลของน้ำขึ้นอยู่กับอัตราส่วนระหว่างแรงเฉื่อย (inertial force) กับแรงหนืด (viscous force) ซึ่งตัวแปรที่บอกถึงลักษณะการไหลของของไหล เรียกว่า เลขเรย์โนลด์ส์ (Menon, 2015) แสดงดังสมการที่ 2.7

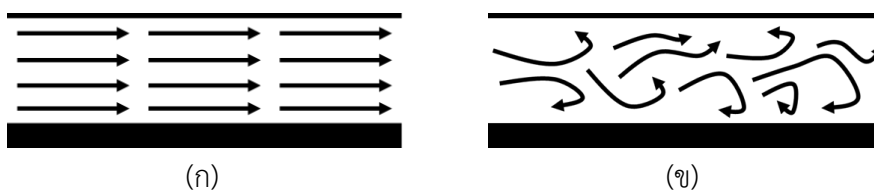
$$Re = \frac{\rho v D}{\mu} = \frac{v D}{\nu} \quad (2.7)$$

และสามารถหาความหนืดของของไหลเชิงจลน์ได้จาก

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (2.8)$$

- เมื่อ Re คือ เลขเรย์โนลด์ส์, [-]
 ρ คือ ความหนาแน่นของของไหล, [kg/m^3]
 v คือ ความเร็วของของไหล, [m/s]
 D คือ ความยาวบ่งลักษณะของระบบ, [m]
 μ คือ ความหนืดเชิงพลวัตของของไหล, [$kg/m \cdot s$]
 ν คือ ความหนืดเชิงจลน์ของของไหล, [m^2/s]

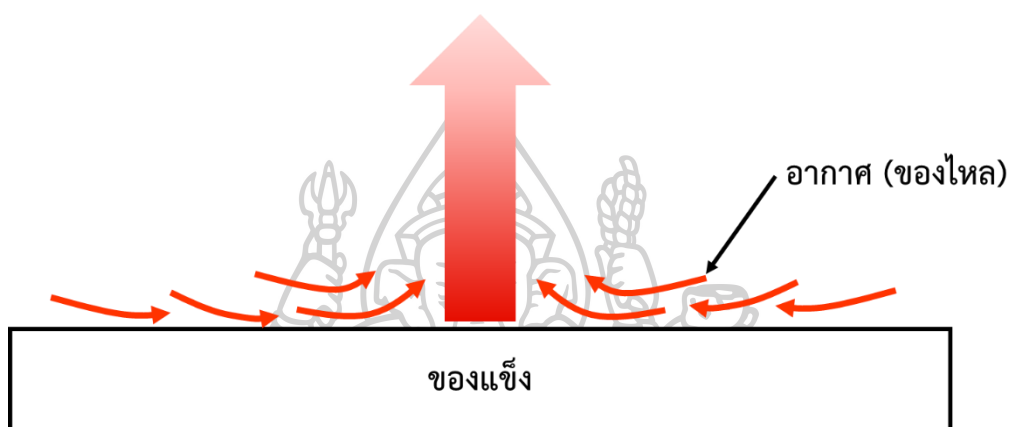
โดยทั่วไปลักษณะการไหลของของไหลเนื่องจากการพาความร้อนนั้นจะแบ่งออกเป็นสองประเภทด้วยกัน คือ (1) การไหลแบบราบเรียบ (laminar flow) และ (2) การไหลแบบปั่นป่วน (turbulent flow) ดังรูปที่ 6



รูปที่ 6 รูปแบบการไหลของของไหล (ก) การไหลแบบราบเรียบ (ข) การไหลแบบปั่นป่วน

2.2.2.2 การพาความร้อนตามธรรมชาติ (natural convection)

ของไหลที่อยู่ติดกับแผ่นของแข็งที่มีอุณหภูมิสูงจะได้รับความร้อนจากแผ่นของของแข็งทำให้มีความหนาแน่นน้อยกว่าของไหลที่ห่างออกไป (Bergman et al., 2011) ก่อให้เกิดแรงลอยตัว (buoyancy force) ยกของไหลให้ลอยตัวสูงขึ้นจากผิวของของแข็ง และอากาศที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าจะไหลเข้ามาแทนที่เกิดเป็นการพาความร้อนจากผิวของแข็งสู่อากาศที่ลอยอยู่ด้านบนของแข็ง ดังรูปที่ 7 (เสริม จันทรินาย, 2560a)



รูปที่ 7 การพาความร้อนตามธรรมชาติ

- การคำนวณอัตราการถ่ายเทความร้อนจากการพาความร้อนตามธรรมชาติ
การวิเคราะห์เชิงมิติ (dimensional analysis) ของอัตราการถ่ายเทความร้อนจากการพาความร้อนตามธรรมชาติ โดยสมการอนุกรมโมเมนต์ โมเมนตัม และพลังงาน ของการพาความร้อนตามธรรมชาติพบว่าเลขนุสเซลต์มีความสัมพันธ์เชิงเส้นกับเลขกราชอฟ (Grashof number, Gr) และเลขพรานด์เทิล แสดงได้ดังสมการที่ 2.9 (เสริม จันทรินาย, 2560a)

$$Nu = C(Gr \cdot Pr)^n \quad (2.9)$$

เมื่อ Nu คือ เลขนุสเซลต์, [-]

Gr คือ เลขกราชอฟ, [-]

Pr คือ เลขพรานด์เทิล, [-]

C, n คือ ค่าคงตัวเอมไพริคัล ซึ่งขึ้นกับชนิดของการไหลและลักษณะทางเรขาคณิตของระบบ, [-]

การไหลของของไหลในการพาความร้อนตามธรรมชาติจะเกิดขึ้นขอบเขตความร้อนและการไหลอาจเป็นแบบราบเรียบหรือแบบปั่นป่วน ขึ้นอยู่กับอิทธิพลของแรงลอยตัวของของไหลและแรง

จากความหนืดของของไหล เพื่อความสะดวกในการใช้งานจึงได้รวมอิทธิพลดังกล่าว ซึ่งเรียกว่า เลขกราชอฟ แสดงดังสมการที่ 2.10 (เสริม จันทรฉาย, 2560a)

$$\text{Gr} = \frac{g\beta(T_s - T_\infty)L^3}{\nu^2} \quad (2.10)$$

เมื่อ Gr คือ เลขกราชอฟ, [-]

g คือ ความเร่งเนื่องจากสนามแรงโน้มถ่วงของโลก, [m/s²]

β คือ สัมประสิทธิ์การขยายตัวเชิงปริมาตรของของไหล, [1/K]

T_s คือ อุณหภูมิพื้นผิวของของแข็ง, [K]

T_∞ คือ อุณหภูมิของของไหลที่ห่างจากผิวของแข็งมากหรืออยู่นอกชั้นขอบเขตความร้อน, [K]

L คือ ความยาวบ่งลักษณะของระบบ, [m]

ν คือ ความหนืดเชิงจลน์ของของไหล, [m²/s]

- การพาความร้อนที่เกิดจากการพัดพาของลม

ในการสร้างสมการการถ่ายเทความร้อนเนื่องจากการพาความร้อนตามธรรมชาติของเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ มักจะพบกรณีที่ผนังของเครื่องอบแห้งมีการสูญเสียความร้อนโดยลมที่พัดผ่าน โดยการพาความร้อนอาจเกิดทั้งแบบบังคับและแบบตามธรรมชาติขึ้นอยู่กับความเร็วลม อุณหภูมิของผนังและอุณหภูมิของอากาศแวดล้อม โดยทั่วไปจึงนิยมคำนวณการสูญเสียความร้อนจากลมที่พัดผ่านเป็นสมการเอมไพริคัล ดังสมการที่ 2.11 (Aumporn, 2017)

$$h_w = 1.32(T_c - T_{amb})^{0.25} + 3.12u_{air}^{0.8} \quad (2.11)$$

เมื่อ h_w คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเนื่องจากการพาความร้อนที่เกิดจากการพัดพาของลม, [W/m²·K]

T_c คือ อุณหภูมิพื้นผิวของแผ่นปกคลุม, [K]

T_{amb} คือ อุณหภูมิของลมที่พัดผ่านแผ่นปกคลุม, [K]

u_{air} คือ อัตราเร็วลม, [m/s]

2.2.3 การแผ่รังสีความร้อน (radiative heat transfer)

ปรากฏการณ์ที่มีการปลดปล่อยพลังงานออกจากวัตถุในรูปแบบของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Duffie et al., 2020) เกิดจากการสั่นเนื่องจากความร้อนของอะตอมหรือโมเลกุล ปรากฏการณ์นี้

เรียกว่า การแผ่รังสีความร้อน ซึ่งในงานวิจัยนี้จะพิจารณาการแผ่รังสีระหว่างองค์ประกอบของเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ โดยจะอธิบายองค์ประกอบของการแผ่รังสีความร้อน ดังหัวข้อต่อไปนี้

1) รังสีตกกระทบในมุมตัน (incident radiance)

รังสีที่กระทบวัตถุในมุมตัน คือ รังสีที่ตกกระทบมาในหนึ่งหน่วยมุมตันต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ซึ่งรังสีจะตั้งฉากกับพื้นผิวของวัตถุ โดยรังสีที่ตกกระทบมาในมุมตัน (\dot{Q}_i) ทิศทางของรังสีระบุได้จากมุมเซนิธ (zenith angle, θ) ที่เป็นมุมระหว่างมุมตันกับเส้นตรงที่ตั้งฉากกับพื้นผิวของวัตถุในแนวระนาบ และมุมอาซิมุท (azimuth angle, ϕ) ซึ่งเป็นมุมระหว่างแกน x กับแกน y (รูปที่ 8) แสดงได้ดังสมการที่ 2.12 (เสริม จันทรฉาย, 2560b)

$$I(\theta, \phi) = \frac{d\dot{Q}_i}{dA \cos \theta d\omega} \quad (2.12)$$

เมื่อ I คือ รังสีในมุมตัน, [$\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{Sr}$]

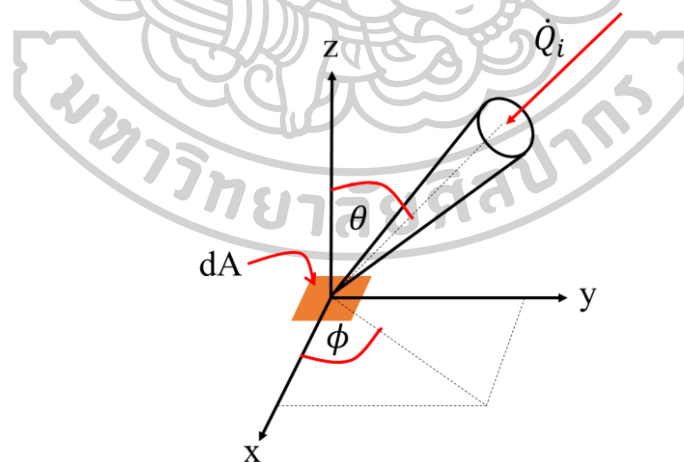
\dot{Q}_i คือ รังสีที่ตกกระทบวัตถุ, [W]

dA คือ พื้นที่ผิว, [m^2]

ω คือ มุมตัน, [Sr]

θ คือ มุมเซนิธ, [$^\circ$]

ϕ คือ มุมอาซิมุท, [$^\circ$]



รูปที่ 8 รังสีที่ตกกระทบในมุมตัน (ดัดแปลงจาก เสริม จันทรฉาย, 2560b)

2) รังสีตกกระทบทั้งหมด (irradiance)

เมื่อทำการปริพันธ์ (integrate) รังสีที่ตกกระทบในมุมตันจากทุกทิศทางของพื้นผิวของวัตถุ จะได้รังสีที่ตกกระทบวัตถุทั้งหมด (รูปที่ 9) สามารถเขียนได้ดังสมการ (เสริม จันทรฉาย, 2560b)

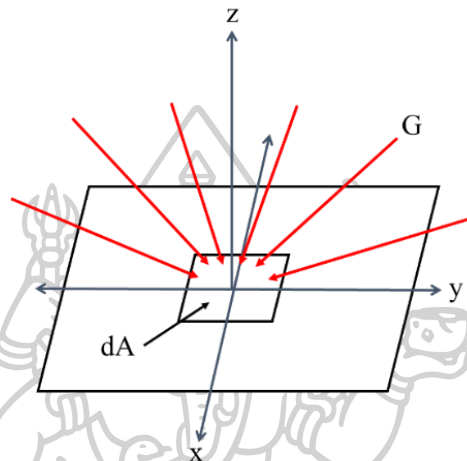
$$G = \int I(\theta, \phi) \cos \theta d\omega \quad (2.13)$$

เมื่อ G คือ รังสีที่ตกกระทบวัตถุทั้งหมด, [W/m^2]

I คือ รังสีที่แผ่ออกจากวัตถุ, [$\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{Sr}$]

ω คือ มุมตัน, [Sr]

θ คือ มุมเซนนิธ, [$^\circ$]



รูปที่ 9 รังสีที่กระทบวัตถุทั้งหมด (ดัดแปลงจาก เสริม, 2560b)

3) การแผ่รังสีในมุมตัน (emitted radiance)

วัตถุที่มีการแผ่รังสีออกในมุมตันเป็นรังสีที่แผ่ออกจากพื้นผิวของวัตถุในหนึ่งหน่วยพื้นที่ต่อหนึ่งหน่วยมุมตัน (I_e) ที่ตั้งฉากกับทิศทางของรังสี (รูปที่ 10) เช่นเดียวกับรังสีที่กระทบตกในมุมตัน (เสริม จันทร์ฉาย, 2560b) สามารถเขียนได้ดังสมการ

$$I_e(\theta, \phi) = \frac{d\dot{Q}_e}{dA \cos \theta d\omega} \quad (2.14)$$

เมื่อ I_e คือ รังสีในมุมตัน, [$\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{Sr}$]

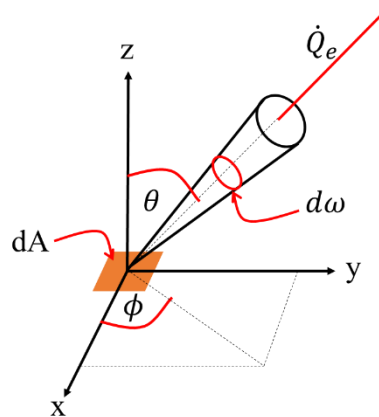
\dot{Q}_e คือ รังสีที่แผ่ออกจากวัตถุในมุมตัน, [W]

dA คือ พื้นที่ผิว, [m^2]

ω คือ มุมตัน, [Sr]

θ คือ มุมเซนนิธ, [$^\circ$]

ϕ คือ มุมอาซิมุธ, [$^\circ$]



รูปที่ 10 รังสีที่แผ่ออกจากผิวของวัตถุ (ดัดแปลงจาก เสริม จันทรฉาย, 2560b)

4) รังสีที่แผ่ออกจากวัตถุทั้งหมด (radiant exitance)

เช่นเดียวกับกรณีของรังสีตกกระทบทั้งหมด เมื่อทำการปริพันธ์การแผ่รังสีในมุมตันทั้งหมด (รูปที่ 11) จะได้เป็นรังสีทั้งหมดที่แผ่ออกจากวัตถุนั้น (เสริม จันทรฉาย, 2560b) สามารถเขียนได้ดังสมการ 2.15

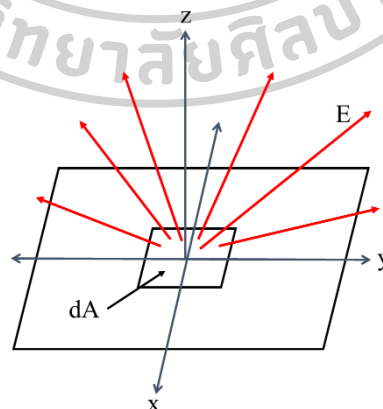
$$E = \int I_e(\theta, \phi) \cos \theta d\omega \quad (2.15)$$

เมื่อ E คือ รังสีที่แผ่ออกจากวัตถุทั้งหมด, $[\text{W}/\text{m}^2]$

I_e คือ รังสีที่แผ่ออกจากวัตถุในมุมตัน, $[\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{Sr}]$

ω คือ มุมตัน, $[\text{Sr}]$

θ คือ มุมเซนธิ์, $[\text{°}]$



รูปที่ 11 รังสีที่แผ่ออกจากวัตถุทั้งหมด (ดัดแปลงจาก เสริม จันทรฉาย, 2560b)

5) การแผ่รังสีความร้อนของวัตถุดำ

วัตถุที่มีอุณหภูมิสูงกว่าศูนย์องศาสัมบูรณ์ (0 K) จะแผ่รังสีออกมาโดยขึ้นอยู่กับพื้นผิวและอุณหภูมิของวัตถุนั้น กรณีที่วัตถุมีอุณหภูมิเท่ากันแต่ต่างชนิดกันจะมีการแผ่รังสีออกมาไม่เท่ากันในหนึ่งหน่วยพื้นที่ (เสริม จันท์ฉาย, 2560b) ซึ่งคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในการแผ่รังสีความร้อนจะอยู่ในช่วงความยาวคลื่น 0.3 – 10 μm โดยเมื่อรังสีความร้อนเคลื่อนที่ผ่านตัวกลางต่าง ๆ หรือกระทบกับวัตถุอื่น ๆ บางส่วนของรังสีจะถูกดูดกลืนโดยพื้นผิวของวัตถุนั้น ๆ (absorptivity) บางส่วนจะสะท้อนออกจากพื้นผิวของวัตถุ (reflectivity) และบางส่วนที่สามารถพุ่งผ่านพื้นผิวของวัตถุได้ (transmissivity) (Bergman et al., 2011) ดังสมการที่ 2.16 – 2.18

$$\tau = \frac{G_{tr}}{G} \quad (2.16)$$

$$\alpha = \frac{G_{ab}}{G} \quad (2.17)$$

$$\rho = \frac{G_{ref}}{G} \quad (2.18)$$

จากกฎการอนุรักษ์พลังงาน จะได้

$$G_{tr} + G_{ab} + G_{ref} = G \quad (2.19)$$

เมื่อคูณ G^{-1} ตลอดทั้งสมการ จะได้

$$\tau + \alpha + \rho = 1 \quad (2.20)$$

เมื่อ G_{tr} คือ รังสีที่ส่งผ่าน, [W/m^2]

G_{ab} คือ รังสีที่ถูกดูดกลืน, [W/m^2]

G_{ref} คือ รังสีที่สะท้อน, [W/m^2]

G คือ รังสีที่ตกกระทบ, [W/m^2]

τ คือ ค่าการส่งผ่านคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของวัตถุ, [-]

α คือ ค่าการดูดกลืนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของวัตถุ, [-]

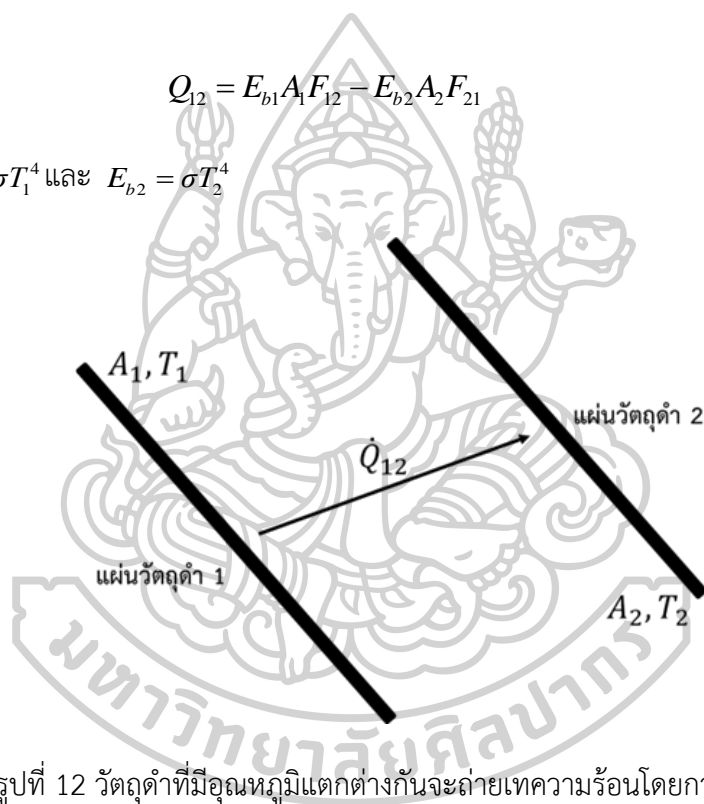
ρ คือ ค่าการสะท้อนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของวัตถุ, [-]

6) การแผ่รังสีระหว่างพื้นผิวของวัตถุดำ

การถ่ายเทความร้อนเนื่องจากการแผ่รังสีระหว่างพื้นผิวของวัตถุดำ 1 ที่มีอุณหภูมิ T_1 และมีพื้นที่ A_1 กับพื้นผิวของวัตถุดำ 2 ซึ่งมีอุณหภูมิและพื้นที่ที่เท่ากัน พลังงานทั้งหมดจากการแผ่รังสีในทิศทางจากพื้นผิวของวัตถุดำ 1 ($E_{b1}A_1$) และอัตราส่วนของพลังงานที่แผ่ไปยังพื้นผิวของวัตถุดำ 2 (F_{12}) ทำให้พลังงานที่วัตถุดำ 1 แผ่รังสีไปยังพื้นผิวของวัตถุดำ 2 มีค่าเท่ากับ $E_{b1}A_1F_{12}$ และในทำนองเดียวกัน พลังงานจากพื้นผิวของวัตถุดำ 2 ที่แผ่รังสีไปยังพื้นผิวของวัตถุดำ 1 จะเท่ากับ $E_{b2}A_2F_{21}$ (รูปที่ 12) ดังนั้นพลังงานสุทธิที่มีการแลกเปลี่ยนระหว่างพื้นผิวทั้งสองเขียนได้ดังสมการ 2.21

$$Q_{12} = E_{b1}A_1F_{12} - E_{b2}A_2F_{21} \quad (2.21)$$

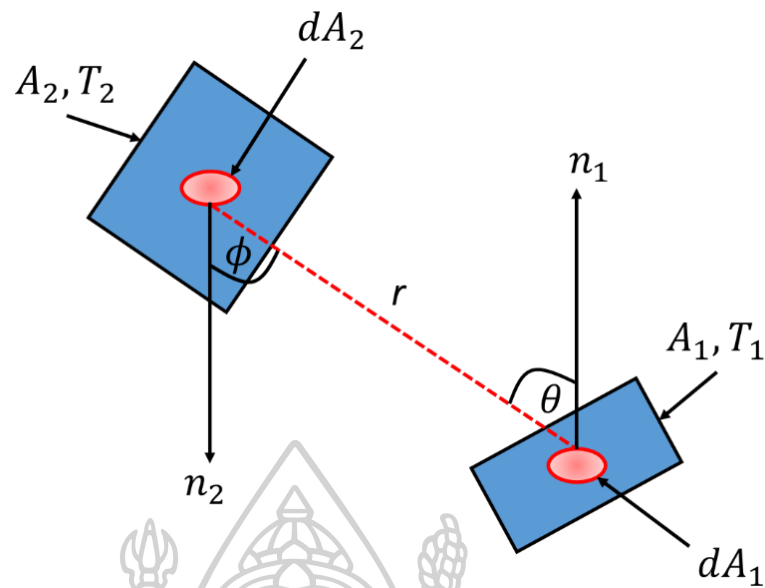
โดยที่ $E_{b1} = \sigma T_1^4$ และ $E_{b2} = \sigma T_2^4$



รูปที่ 12 วัตถุดำที่มีอุณหภูมิแตกต่างกันจะถ่ายเทความร้อนโดยการแผ่รังสี

7) สัดส่วนของการแผ่รังสี

เมื่อพิจารณาการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างพื้นที่ของวัตถุ dA_1 และ dA_2 โดยมีการแผ่รังสีออกจากพื้นที่ของทั้ง 2 วัตถุเป็นแบบวัตถุดำ ซึ่งมีพื้นที่ อุณหภูมิ และเส้นปกติ ของวัตถุที่ 1 และ 2 คือ A_1, T_1, n_1 และ A_2, T_2, n_2 ตามลำดับ นอกจากนี้พื้นที่ของวัตถุที่ 1 ทำมุมกับเส้นปกติเป็นมุม ϕ และพื้นที่ของวัตถุที่ 2 ทำมุม θ โดยพื้นที่ของวัตถุทั้งสองอยู่ห่างกันเป็นระยะ r (รูปที่ 13) แสดงได้ดังสมการที่ 2.23 (Gupta, Bumtariya, Shukla, Patel, & Khan, 2017)



รูปที่ 13 สัดส่วนการแผ่รังสีระหว่างวัตถุที่ 1 และ 2 (ดัดแปลงจาก Gupta et al., 2017)

$$F_{12} = \frac{1}{A_2} \int_{A_1} \int_{A_2} \frac{dA_1 dA_2 \cos \theta \cos \phi}{\pi r^2} \quad (2.23)$$

เมื่อ F_{12} คือ สัดส่วนของการแผ่รังสีที่แผ่หรือสะท้อนออกจากพื้นผิว 1 ไปสู่พื้นผิว 2, [-]

A_1, A_2 คือ พื้นผิวของวัตถุ 1 และ 2, [m²]

r คือ ระยะห่างระหว่างวัตถุ 1 กับวัตถุ 2, [m]

สำหรับค่าสัดส่วนของการแผ่รังสีที่แผ่หรือสะท้อนออกจากพื้นผิว (View factor) เป็นค่าที่ขึ้นอยู่กับความสัมพันธ์ทางเรขาคณิตระหว่างพื้นผิวทั้งสอง และมีความสัมพันธ์ดังนี้

$$A_1 F_{12} = A_2 F_{21} \quad (2.22)$$

8) การแผ่รังสีระหว่างพื้นผิวของวัตถุเทา

การแผ่รังสีจากพื้นผิวของวัตถุเทาจะมีรังสีที่ตกกระทบส่วนหนึ่งและมีการสะท้อนออกอีกส่วนหนึ่งด้วย ดังนั้น พื้นผิวของวัตถุเทาจึงไม่ได้ปลดปล่อยพลังงานจากการแผ่รังสีของตัวเองเท่านั้น แต่ยังปลดปล่อยพลังงานจากการแผ่รังสีของพื้นผิววัตถุเทาอื่นที่มาตกกระทบและสะท้อนออกไปอีกด้วย โดยการคำนวณการถ่ายเทความร้อนระหว่างวัตถุทั่วไปมีความซับซ้อนกว่าในกรณีของวัตถุดำ ซึ่งกรณีที่พื้นผิวทั้งสองเป็นวัตถุเทานั้น ค่าสัดส่วนของการแผ่รังสีที่แผ่หรือสะท้อนออกจากพื้นผิวระหว่างพื้นผิวทั้งสองจะมีค่าเท่ากับกรณีของวัตถุดำทุกประการ และเมื่อพิจารณาพลังงานที่วัตถุนั้นแผ่รังสีออกจากและตกกระทบพื้นผิวของวัตถุ 1 ซึ่งมีสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีของวัตถุ 1 (ϵ_1) และ

พื้นผิวของวัตถุ 2 ที่มีสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีของวัตถุ 2 (ε_2) จะได้สมการแสดงปริมาณความร้อนจากการแผ่รังสีดังนี้

$$Q_{12} = \frac{\sigma T_1^4 A_1 - \sigma T_2^4 A_2 F_{21}}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \left(\frac{1}{\varepsilon_2} - 1\right) F_{12}} \quad (2.24)$$

เมื่อ Q_{12} คือ ปริมาณความร้อนจากการแผ่รังสี, [W]

σ คือ ค่าคงที่ของสเตฟาน-โบลทซ์มานน์ (5.67×10^{-8} W/m²·K⁴)

T_1, T_2 คือ อุณหภูมิของวัตถุ 1 และ 2, [K]

A_1, A_2 คือ พื้นผิวของวัตถุค่า 1 และ 2, [m²]

F_{12} คือ สัดส่วนของการแผ่รังสีที่แผ่หรือสะท้อนออกจากพื้นผิว 1 ไปสู่พื้นผิว 2, [-]

F_{21} คือ สัดส่วนของการแผ่รังสีที่แผ่หรือสะท้อนออกจากพื้นผิว 2 ไปสู่พื้นผิว 1, [-]

ε_1 คือ สัมประสิทธิ์การแผ่รังสีของวัตถุ 1, [-]

ε_2 คือ สัมประสิทธิ์การแผ่รังสีของวัตถุ 2, [-]

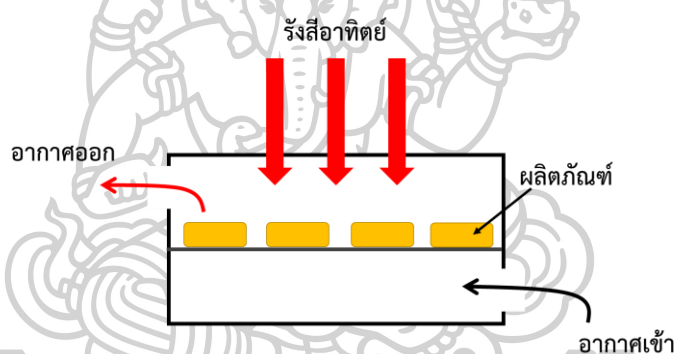
2.3 เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ (solar dryer)

เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ส่วนมากถูกพัฒนาขึ้นเพื่อใช้อบแห้งผลิตผลทางการเกษตรทดแทนการตากแห้งตามธรรมชาติและการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งเชิงกล (mechanical dryer) เพื่อแก้ปัญหาความเสียหายที่เกิดจากแมลง น้ำฝน และการปนเปื้อนฝุ่นละอองที่เกิดจากการตากแดดตามธรรมชาติ หรือลดค่าใช้จ่ายด้านพลังงานสำหรับใช้ในการอบแห้งผลิตผลทางการเกษตร ปัจจุบันนักวิจัยด้านเทคโนโลยีการอบแห้งได้ออกแบบและพัฒนาเครื่องอบแห้งพลังงานรังสีอาทิตย์ให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้น เพื่อใช้ในการอบแห้งผลิตผลทางการเกษตรแม้จะอยู่ในสภาวะอากาศที่ไม่อำนวยต่อการตากแดดตามธรรมชาติ โดยทั่วไปเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์จะประกอบไปด้วยส่วนสำคัญ 2 ส่วน ได้แก่ ส่วนรับรังสีอาทิตย์ (solar collector) และส่วนสำหรับวางผลิตภัณฑ์ ซึ่งทั้งสองส่วนอาจอยู่ในโครงสร้างส่วนเดียวกันหรือแยกส่วนกัน และจากการศึกษางานวิจัยต่าง ๆ สามารถแบ่งเครื่องอบแห้งตามการเคลื่อนที่ของอากาศภายในเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ออกเป็น 2 ประเภทตามการพาความร้อน ได้แก่ เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ประเภทการพาความร้อนตามธรรมชาติ (natural convection solar dryer) และเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ประเภทการพาความร้อนแบบบังคับ (forced convection solar dryer) (Hidalgo, Candido, Nishioka, Freire, & Vieira, 2021)

2.3.1 เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ประเภทพาความร้อนตามธรรมชาติ

การพาความร้อนตามธรรมชาติเกิดขึ้นเนื่องจากความแตกต่างของอุณหภูมิและความหนาแน่นของอากาศในเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ รวมถึงความสูงของช่องอากาศขาเข้าและความสูงของช่องอากาศขาออก ซึ่งเครื่องอบแห้งประเภทนี้สามารถแบ่งได้เป็น 3 ประเภทตามลักษณะการรับรังสีอาทิตย์ ได้แก่ เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ประเภทพาความร้อนตามธรรมชาติแบบรับรังสีอาทิตย์โดยตรง โดยอ้อม และแบบผสม

1) เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ประเภทพาความร้อนตามธรรมชาติแบบรับรังสีอาทิตย์โดยตรง (direct mode natural convection solar dryer) เป็นเครื่องอบแห้งที่เกิดจากการพาความร้อนตามธรรมชาติ ซึ่งส่วนรับรังสีอาทิตย์กับส่วนวางผลิตภัณฑ์เป็นส่วนเดียวกัน โดยที่ผลิตภัณฑ์จะรับรังสีอาทิตย์โดยตรง ทำให้น้ำที่บริเวณพื้นผิวของผลิตภัณฑ์ระเหยสู่อากาศภายในเครื่องอบแห้งที่มีอุณหภูมิสูงและลอยตัวออกสู่อากาศแวดล้อมบริเวณทางออกด้านบน (รูปที่ 14 และ 15)

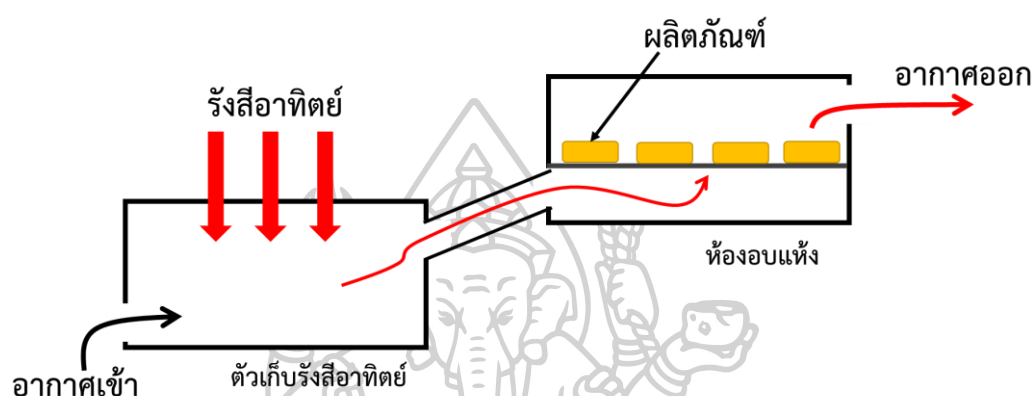


รูปที่ 14 หลักการทำงานของเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ประเภทพาความร้อนตามธรรมชาติแบบรับรังสีอาทิตย์โดยตรง



รูปที่ 15 เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ประเภทพาความร้อนตามธรรมชาติแบบรับรังสีอาทิตย์โดยตรง (ดัดแปลงจาก Mane, 2017)

2) เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ประเภทการพาความร้อนตามธรรมชาติแบบรับรังสีอ้อม (indirect mode natural convection solar dryer) เป็นเครื่องอบแห้งที่มีวัตถุประสงค์เพื่ออบแห้งผลิตภัณฑ์ที่ต้องการรักษาสีหรือองค์ประกอบทางชีวเคมี ซึ่งส่วนรับรังสีอ้อมจะรับรังสีอ้อมโดยตรงทำให้อากาศที่ไหลผ่านมีอุณหภูมิสูงขึ้นและไหลเข้าสู่ส่วนวางผลิตภัณฑ์ และพัดพาความชื้นที่บริเวณผิวของผลิตภัณฑ์กับอากาศที่อยู่ส่วนวางผลิตภัณฑ์ออกสู่อากาศแวดล้อม (รูปที่ 16 และ 17)

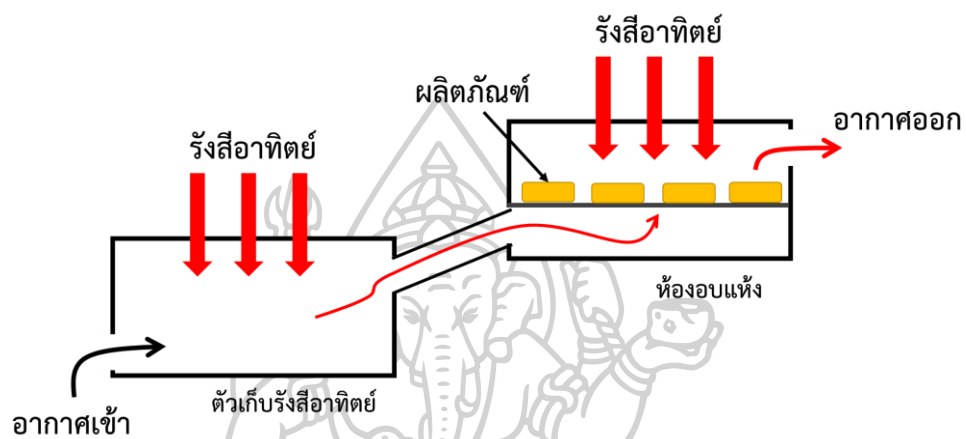


รูปที่ 16 หลักการทำงานของเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ประเภทการพาความร้อนตามธรรมชาติแบบรับรังสีอ้อมโดยอ้อม



รูปที่ 17 เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ประเภทการพาความร้อนตามธรรมชาติแบบรับรังสีอ้อมโดยอ้อม (Babar, Tarafdar, Malakar, Arora, & Nema, 2020)

3) เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ประเภทการพาความร้อนตามธรรมชาติแบบรับรังสีอาทิตย์แบบผสม (mixed mode natural convection solar dryer) เป็นเครื่องอบแห้งที่ส่วนรับรังสีอาทิตย์และส่วนวางผลิตภัณฑ์สามารถรับรังสีอาทิตย์โดยตรงทั้งสองส่วน โดยที่อากาศเมื่อไหลเข้าสู่ส่วนรับรังสีอาทิตย์จะทำให้อากาศมีอุณหภูมิที่สูงขึ้นเนื่องจากกายถ่ายเทความร้อนขององค์ประกอบต่าง ๆ ในส่วนรับรังสีอาทิตย์ และอากาศร้อนจะลอยตัวสู่ห้องอบแห้งพร้อมพัดพาน้ำอิสระที่บริเวณพื้นผิวของผลิตภัณฑ์ออกสู่อากาศแวดล้อม (รูปที่ 18 และ 19)



รูปที่ 18 หลักการทำงานของเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ประเภทการพาความร้อนตามธรรมชาติแบบรับรังสีอาทิตย์แบบผสม

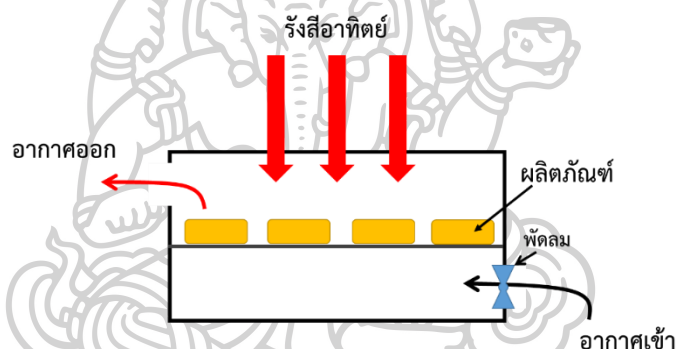


รูปที่ 19 เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ประเภทการพาความร้อนตามธรรมชาติแบบรับรังสีอาทิตย์แบบผสม (ดัดแปลงจาก Misha, Alqadhi, Mohd Rosli, & Yusof, 2018)

2.3.2 เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ประเภทพาความร้อนแบบบังคับอากาศ

เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ประเภทนี้ใช้หลักการพาความร้อนแบบบังคับอากาศ โดยจะมีพัดลมในการบังคับทิศทางเคลื่อนที่ของอากาศภายในเครื่องอบแห้ง เครื่องอบแห้งนี้สามารถแบ่งได้เป็น 3 ประเภทตามการรับรังสีอาทิตย์ ได้แก่ เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ประเภทพาความร้อนแบบบังคับอากาศแบบรับรังสีอาทิตย์โดยตรง โดยอ้อม และแบบผสม

1) เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ประเภทพาความร้อนแบบบังคับอากาศแบบรับรังสีอาทิตย์โดยตรง (direct mode forced convection solar dryer) เป็นเครื่องอบแห้งที่มีพัดลมบังคับทิศทางการไหลของอากาศ โดยที่ส่วนรับรังสีอาทิตย์กับส่วนวางผลิตภัณฑ์เป็นส่วนเดียวกัน และชั้นวางผลิตภัณฑ์จะสัมผัสกับรังสีอาทิตย์โดยตรงทำให้น้ำที่บริเวณพื้นผิวของผลิตภัณฑ์ระเหยสู่อากาศภายในเครื่องอบแห้งที่มีอุณหภูมิสูงและลอยตัวออกสู่บริเวณทางออกด้านบน จากนั้นอากาศชื้นจะถูกดันออกสู่อากาศแวดล้อม (รูปที่ 20 และ 21)

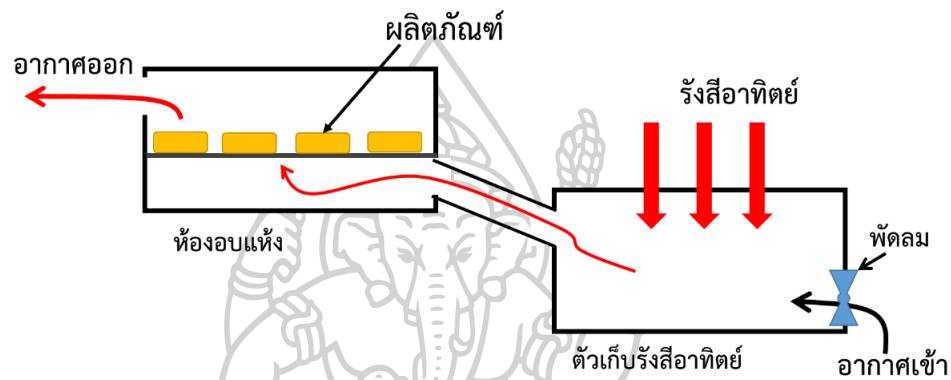


รูปที่ 20 หลักการทำงานของเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ประเภทพาความร้อนแบบบังคับอากาศแบบรับรังสีอาทิตย์โดยตรง



รูปที่ 21 เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ประเภทพาความร้อนแบบบังคับอากาศแบบรับรังสีอาทิตย์โดยตรง (Jain & Tiwari, 2004)

2) เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ประเภทการพาความร้อนแบบบังคับอากาศแบบรับรังสีอาทิตย์โดยอ้อม (indirect mode forced convection solar dryer) เป็นเครื่องอบแห้งที่มีวัตถุประสงค์เพื่ออบแห้งผลิตภัณฑ์ที่ต้องการรักษาสีหรือองค์ประกอบทางชีวเคมีเช่นเดียวกับเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ประเภทการพาความร้อนตามธรรมชาติแบบรับรังสีอาทิตย์โดยอ้อม ซึ่งส่วนรับรังสีอาทิตย์จะรับรังสีอาทิตย์โดยตรงทำให้อากาศที่ไหลผ่านมีอุณหภูมิสูงขึ้นและถูกพัดลมดันให้ไหลเข้าสู่ส่วนวางผลิตภัณฑ์ และพัดพาความชื้นที่บริเวณผิวของผลิตภัณฑ์กับอากาศที่อยู่ส่วนวางผลิตภัณฑ์ออกสู่อากาศแวดล้อม (รูปที่ 22 และ 23)

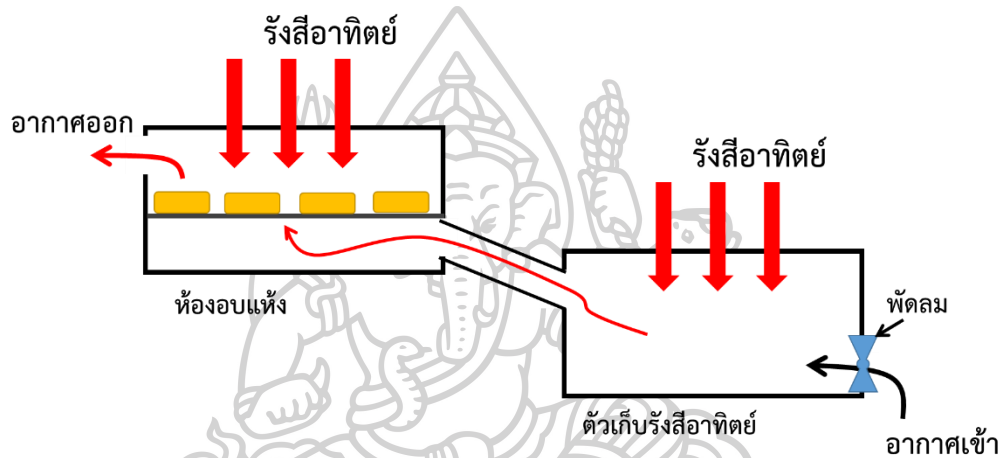


รูปที่ 22 หลักการทำงานของเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ประเภทการพาความร้อนแบบบังคับอากาศแบบรับรังสีอาทิตย์โดยอ้อม



รูปที่ 23 เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ประเภทการพาความร้อนแบบบังคับอากาศแบบรับรังสีอาทิตย์โดยอ้อม (ดัดแปลงจาก El-Sebaii & Shalaby,2013)

3) เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ประเภทการพาความร้อนแบบบังคับอากาศแบบรับรังสีอาทิตย์แบบผสม (mixed mode forced convection solar dryer) เป็นเครื่องอบแห้งที่ส่วนรับรังสีอาทิตย์และส่วนวางผลิตภัณฑ์รับรังสีอาทิตย์โดยตรงทั้งสองส่วนเช่นเดียวกับเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ประเภทการพาความร้อนตามธรรมชาติแบบรับรังสีอาทิตย์แบบผสม โดยที่พัดลมจะดันอากาศให้เข้าสู่ห้องอบแห้ง เมื่ออากาศร้อนเข้าสู่ห้องอบแห้งจะไหลผ่านพื้นผิวของผลิตภัณฑ์ทำให้น้ำที่บริเวณพื้นผิวของผลิตภัณฑ์ระเหยสู่อากาศภายในเครื่องอบแห้ง และลอยตัวขึ้นไปยังบริเวณทางออกด้านบน จากนั้นจึงไหลออกสู่อากาศแวดล้อม (รูปที่ 24 และ 25)



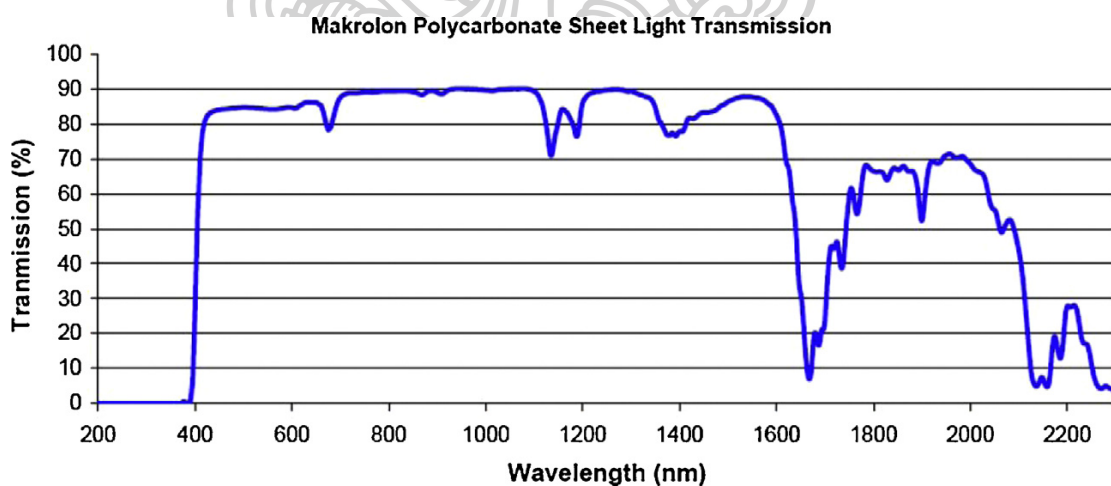
รูปที่ 24 หลักการทำงานของเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ประเภทการพาความร้อนแบบบังคับอากาศแบบรับรังสีอาทิตย์แบบผสม



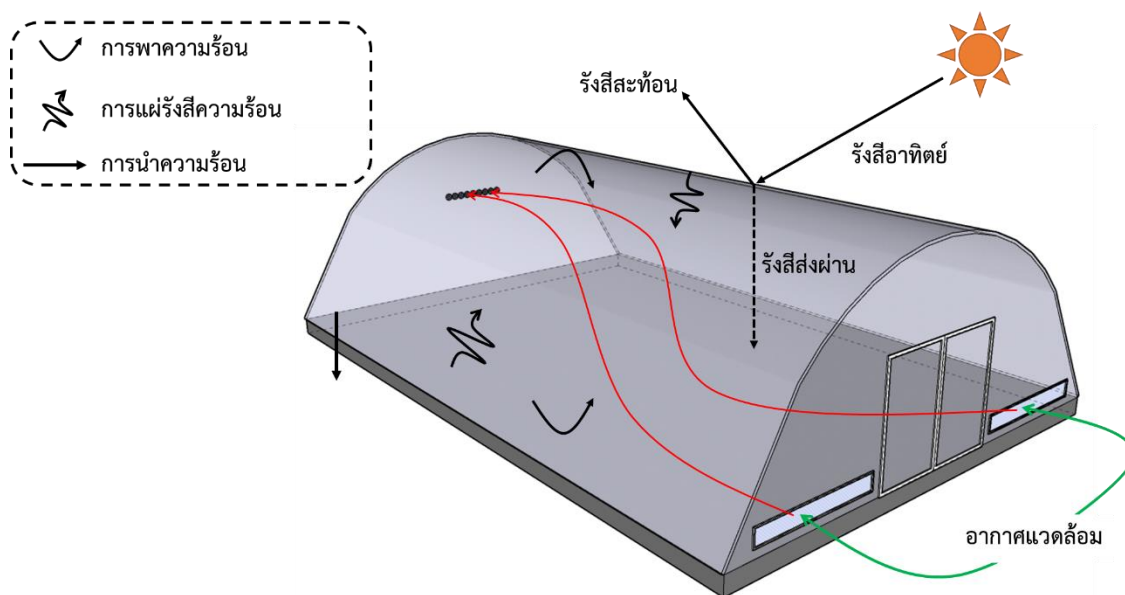
รูปที่ 25 เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ประเภทการพาความร้อนแบบบังคับอากาศแบบรับรังสีอาทิตย์แบบผสม (Lakshmi, Muthukumar, Layek, & Nayak, 2019)

2.4 หลักการทำงานของเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบพาราโบลา

เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบพาราโบลาประกอบด้วยโครงสร้างเหล็กชุบสังกะสีที่ปกคลุมด้วยแผ่นโพลีคาร์บอเนตและตั้งอยู่บนฐานคอนกรีตผสมกับผงคาร์บอน โดยหลักการทำงานของเครื่องอบแห้งนี้จะเกิดขึ้นเมื่อรังสีอาทิตย์ซึ่งเป็นรังสีคลื่นสั้นที่มีความยาวคลื่นน้อยกว่า $0.4 \mu\text{m}$ ตกกระทบบริเวณพื้นผิวของแผ่นโพลีคาร์บอเนตซึ่งเป็นแผ่นปกคลุมทำให้มีรังสีอาทิตย์บางส่วนสะท้อนออกไป รังสีบางส่วนที่ถูกดูดกลืนด้วยแผ่นโพลีคาร์บอเนต และรังสีบางส่วนที่สามารถส่งผ่านแผ่นโพลีคาร์บอเนตเข้าสู่ภายในเครื่องอบแห้ง รังสีส่วนนั้นจะถูกดูดกลืนด้วยส่วนประกอบต่าง ๆ ภายในเครื่องอบแห้ง เช่น โครงสร้างของเครื่องอบแห้ง อากาศภายในเครื่องอบแห้ง และพื้นคอนกรีตที่ผสมกับผงคาร์บอน เป็นต้น หลังจากนั้นองค์ประกอบต่าง ๆ จะแผ่รังสีความร้อนในช่วงความยาวคลื่น $8-15 \mu\text{m}$ (long-wavelength infrared ray) ออกมา และเนื่องจากรังสีความร้อนเป็นรังสีคลื่นยาวจึงไม่สามารถผ่านแผ่นโพลีคาร์บอเนตออกไปได้ (รูปที่ 31) ทำให้รังสีความร้อนสะท้อนกลับเข้ามาภายในเครื่องอบแห้งก่อให้เกิดปรากฏการณ์เรือนกระจก (Jankovic et al., 2016) ทำให้อุณหภูมิอากาศภายในเครื่องอบแห้งมีค่าสูงขึ้น ซึ่งอากาศที่มีอุณหภูมิสูงขึ้นจะมีความหนาแน่นของอากาศต่ำลงและลอยตัวสูงขึ้น และถูกพัดลมดูดอากาศร้อนออกสู่อากาศแวดล้อมบริเวณด้านหลังของเครื่องอบแห้ง และอากาศแวดล้อมซึ่งมีอุณหภูมิต่ำกว่าจะไหลผ่านช่องอากาศบริเวณด้านหน้าของเครื่องอบแห้งเข้ามาแทนที่อากาศที่ไหลออกจากเครื่องอบแห้ง (รูปที่ 32)



รูปที่ 26 การส่งผ่านแสงของแผ่นโพลีคาร์บอเนต (Jankovic et al., 2016)



รูปที่ 27 แผนภาพการทำงานของเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบพาราโบลา

2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

เนื่องจากงานวิจัยนี้เป็นการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบพาราโบลา ดังนั้นผู้วิจัยได้ทำการศึกษางานวิจัยเกี่ยวกับเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบพาราโบลา การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ และงานวิจัยที่ศึกษาเกี่ยวกับระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ภายใต้สภาวะอากาศที่มีเมฆเต็มท้องฟ้า สามารถสรุปได้ดังนี้

Janjai et al. (2009) ได้ศึกษาการอบแห้งลำไยและกล้วยน้ำว้าโดยใช้เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ที่โครงสร้างประกอบด้วยแผ่นปกคลุมรูปทรงพาราโบลาวางอยู่บนพื้นคอนกรีตขนาด $6 \times 8.2 \text{ m}^2$ และดูดอากาศขึ้นออกด้วยพัดลมกระแสตรงจำนวน 3 ตัว ที่ขับเคลื่อนด้วยแผงโซลาร์เซลล์กำลังไฟฟ้า 50 W (รูปที่ 33) โดยทำการทดลองทั้งหมด 10 ครั้ง แบ่งเป็นการอบแห้งลำไย 5 ครั้ง และอบแห้งกล้วยน้ำว้า 5 ครั้ง ในระหว่างการอบแห้งพบว่าปริมาณรังสีอาทิตย์มีการแปรค่าอยู่ระหว่าง $200 - 1,000 \text{ W/m}^2$ เนื่องด้วยสภาวะอากาศที่แปรปรวนจากการที่เมฆปกคลุม ทำให้อุณหภูมิอากาศมีค่าอยู่ในช่วง $30-60 \text{ }^\circ\text{C}$ โดยในการอบแห้งลำไยและกล้วยน้ำว้าใช้ระยะเวลา 3 และ 4 วัน ตามลำดับ ซึ่งแห้งเร็วกว่าการตากแห้งตามธรรมชาติที่ใช้เวลา 5-6 วัน และคุณภาพสีของผลิตภัณฑ์ได้ยังมีความสดมากกว่าการตากแห้งตามธรรมชาติ นอกจากนี้ยังทำการพัฒนาสมการเชิงอนุพันธ์ของการถ่ายเทความร้อนและมวลระหว่างการอบแห้งลำไยและกล้วยน้ำว้าภายในเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ และหาผลเฉลยของสมการโดยใช้วิธีการผลต่างจำกัดด้วยภาษา Fortran

พบว่าผลของการจำลองแบบของการอบแห้งทั้งสองมีความสอดคล้องกับผลที่ได้จากการทดลอง ดังนั้นแบบจำลองนี้สามารถนำมาใช้ในการพัฒนาการออกแบบให้เหมาะสมกับการอบแห้งผลิตภัณฑ์อื่น ๆ



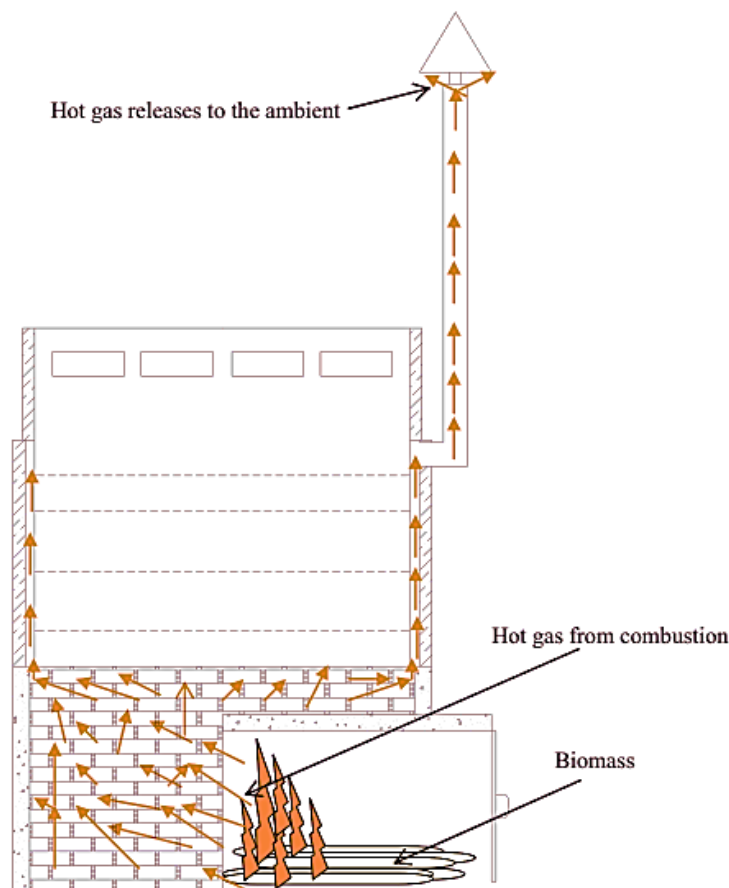
รูปที่ 28 เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบพาราโบลา (Janjai et al., 2009)

Janjai, Intawee, Kaewkiew, Sritus, and Khamvongsa (2011) ได้ทำการสร้างเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ในสาธารณรัฐประชาธิปไตยประชาชนลาว (15.13°N, 105.79°E) ซึ่งเครื่องอบแห้งประกอบด้วยแผ่นโพลีคาร์บอเนตปกคลุมเป็นรูปทรงพาราโบลาตั้งอยู่บนฐานคอนกรีตสี่ด้านขนาด 7.5×20 m² และมีพัดลมกระแสตรงจำนวน 9 ตัว สำหรับดูดอากาศขึ้นโดยขับเคลื่อนด้วยแผงโซลาร์เซลล์จำนวน 3 แผง กำลังไฟฟ้า 50 W (รูปที่ 34) สำหรับการอบแห้งพริก กุ้ง และกาแฟ ซึ่งเมื่อทำการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้ง พบว่าการอบแห้งของพริกมวลรวม 300 kg ที่มีความชื้นเริ่มต้น 75% (w.b.) ใช้ระยะเวลาเพียง 3 วัน เมื่อเทียบกับการตากแห้งตามธรรมชาติที่ใช้ระยะเวลา 5 วัน และในการอบแห้งกุ้งมวลรวม 1,000 kg ที่มีความชื้นเริ่มต้น 68% (w.b.) ใช้ระยะเวลาในการอบแห้ง 5 วัน เมื่อเทียบกับการตากแห้งตามธรรมชาติที่ใช้ระยะเวลา 7 วัน นอกจากนี้ยังทำการอบแห้งเมล็ดกาแฟมวลรวม 200 kg ที่มีความชื้นเริ่มต้น 52% (w.b.) โดยใช้ระยะเวลาในการอบแห้งเพียง 2 วัน เมื่อเทียบกับการตากแห้งตามธรรมชาติที่ใช้ระยะเวลา 4 วัน หลังจากการอบแห้งผลิตผลทางการเกษตรดังกล่าว พบว่าผลิตภัณฑ์ที่อบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบพาราโบลาแห้งเร็วกว่าการตากแห้งตามธรรมชาติ และมีระยะเวลาในการคืนทุนของเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบพาราโบลาประมาณ 2.5 ปี นอกจากนี้ยังทำการพัฒนาสมการการถ่ายเทความร้อนและมวลของการอบแห้งพริก กุ้ง และเมล็ดกาแฟ โดยหาผลเฉลยด้วยวิธีการผลต่างจำกัด โดยภาษาคอมพิวเตอร์ พบว่าผลของการจำลองแบบมีความสอดคล้องกับผลที่ได้จากการทดลอง และสามารถใช่แบบจำลองนี้ในการสร้างเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบพาราโบลาในพื้นที่อื่น ๆ ได้



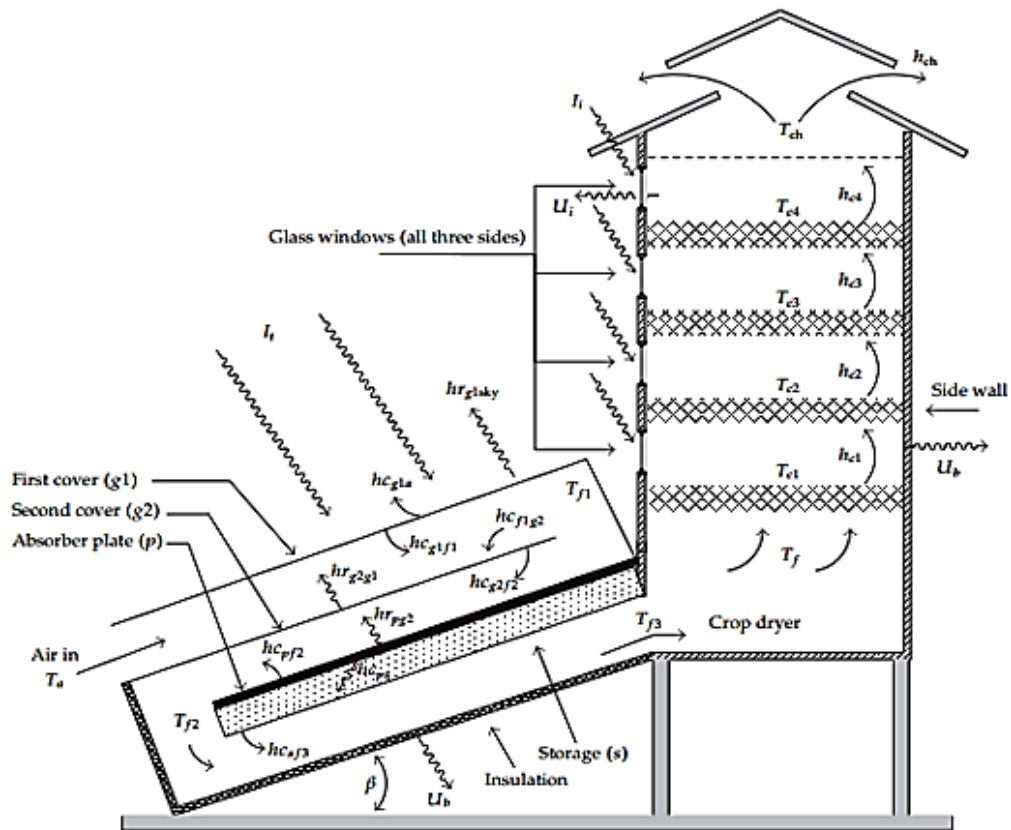
รูปที่ 29 เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ในสาธารณรัฐประชาธิปไตยประชาชนลาว (Janjai et al., 2011)

Tarigan (2018) ได้ทำการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และการจำลองของเครื่องอบแห้งแบบลมร้อนที่เสริมด้วยเตาเผาชีวมวลและตัวเก็บรังสีอาทิตย์ ซึ่งเครื่องอบแห้งนี้สร้างจากก้อนอิฐเป็นรูปทรงสี่เหลี่ยม มีช่องอากาศขาออกเป็นปล่องควัน และบริเวณด้านล่างเป็นช่องว่างสำหรับการนำไม้แห้งมาเผาเป็นเชื้อเพลิงให้ความร้อนผ่านพื้นและผนังของห้องอบแห้ง ในงานวิจัยนี้จะจำลองแบบเครื่องอบแห้งเพื่อให้เหมาะสมกับผลิตผลทางการเกษตรแบบเฉพาะเจาะจง ซึ่งในการจำลองแบบจะพิจารณาถึงการออกแบบและการทำงานของเครื่องอบแห้ง โดยจากการจำลองแบบพบว่าผลของอุณหภูมิอากาศที่ทางออกจากตัวเก็บรังสีอาทิตย์จากการจำลองแบบแสดงให้เห็นว่าฝากรอบกระจกมีผลทำให้อุณหภูมิอากาศในตัวเก็บรังสีอาทิตย์มีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมาก แต่การเพิ่มจำนวนและความหนาของแผ่นฉนวนมีผลเพียงเล็กน้อยต่อการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิอากาศภายในตัวเก็บรังสีอาทิตย์ นอกจากนี้การจำลองแบบพลศาสตร์ของของไหลเชิงคำนวณ (Computational Fluid Dynamics, CFD) แสดงให้เห็นการกระจายตัวของอุณหภูมิและรูปแบบการไหลของอากาศภายในห้องอบแห้ง โดยมีค่าเฉลี่ยประมาณ 56°C ซึ่งเหมาะสำหรับการอบแห้งผลิตผลทางการเกษตร



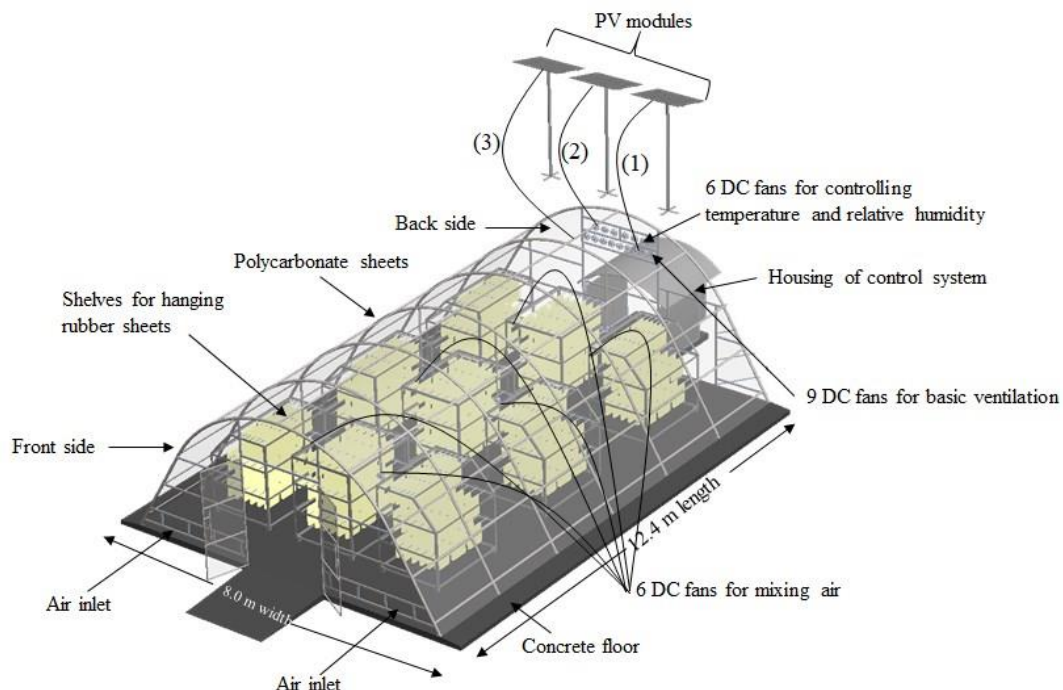
รูปที่ 30 แผนภาพของเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ที่มีระบบทำความร้อนเสริมโดยใช้เตาชีวมวล (Tarigan, 2018)

Pierre Damien (2018) ได้ทำการศึกษาเครื่องอบแห้งประเภทพาความร้อนแบบบังคับแบบรับรังสีโดยตรงสำหรับการอบแห้งผักและผลไม้ โดยทำการสร้างสมการการถ่ายเทความร้อนและมวล แล้วหาผลเฉลยด้วยวิธีการเชิงตัวเลข เพื่อศึกษาการออกแบบของเครื่องอบแห้งและผลกระทบจากพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่มีอิทธิพลต่อกระบวนการอบแห้งในกรณีที่เครื่องอบแห้งมีและไม่มีตัวเก็บรังสีอาทิตย์ภายใต้สภาพอากาศของประเทศเวียดนาม จากการอบแห้งพริกหยวกพบว่ามีระยะเวลาในการอบแห้งสั้นลงกว่าการตากแห้งตามธรรมชาติ โดยประสิทธิภาพของตัวเก็บรังสีอาทิตย์จะค่าสูงสุดที่เวลา 13:00 น. ที่อุณหภูมิ 48°C และอุณหภูมิภายในห้องอบแห้งมีค่าสูงสุดที่ 74°C เวลา 15:00 น. และจากการศึกษาการเพิ่มอุณหภูมิและความเร็วของอากาศจะทำให้ระยะเวลาในการอบแห้งสั้นลง รวมไปถึงประสิทธิภาพของส่วนทำความร้อนเสริมจะขึ้นอยู่กับมุมเอียงของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ โดยมุมเอียงที่มีความเหมาะสมที่สุดคือ 15° และอุณหภูมิของอากาศแวดล้อม ความเข้มรังสีอาทิตย์เป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิอากาศภายในเครื่องอบแห้ง



รูปที่ 31 เครื่องแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบหลายภาคพร้อมส่วนทำลมร้อนหลายช่องแบบเอียง (Pierre Damien, 2018)

Aumporn et al. (2021) ได้ศึกษาการอบแห้งยางพาราแผ่นโดยใช้เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบพาราโบลโดยการสร้างแบบจำลองถดถอยตัวเองที่มีสัญญาณขาเข้าภายนอก (Auto-Regressive with eXogenous, ARX) โดยโครงสร้างของเครื่องอบแห้งนี้ประกอบด้วยโครงสร้างหลังคาที่ปกคลุมด้วยแผ่นโพลีคาร์บอเนตเพื่อป้องกันรังสียูวี ชั้นสำหรับแขวนยางพาราแผ่น พื้นคอนกรีต และระบบระบายอากาศที่ควบคุมด้วยเซนเซอร์ตรวจวัดอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ ซึ่งเครื่องอบแห้งมีความยาว 12.4 m กว้าง 8 m และสูง 3.5 m สามารถใช้อบแห้งยางพาราแผ่นได้ 500 แผ่น โดยแต่ละแผ่นมีขนาด $0.46 \times 0.90 \times 0.005 \text{ m}^3$ จากผลของการทดลองความชื้นของยางพาราแผ่นลดลงจาก 30% (w.b.) จนถึงความชื้นสุดท้าย 1% (w.b.) โดยใช้ระยะเวลา 3 วัน และได้ยางพาราแผ่นที่มีคุณภาพสูง และจากการจำลองแบบโดยใช้วิธี ARX พบว่าแบบจำลองสามารถทำนายการลดลงของความชื้นของยางพาราแผ่นได้ดี นอกจากนี้ยังพบว่าแม้ในสภาวะอากาศที่แปรปรวน เช่น ฝนตก และมีเมฆปกคลุมท้องฟ้า หรือสภาพท้องฟ้าที่ทำให้ปริมาณความเข้มรังสีอาทิตย์มีค่าต่ำ อุณหภูมิอากาศภายในเครื่องอบแห้ง ยังคงอยู่ในช่วงที่เหมาะสมแก่การอบแห้งยางพาราแผ่น



รูปที่ 32 แผนภาพของเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์สำหรับอบแห้งยางพาราแผ่น (Aumporn et al., 2021)

จากการศึกษาวิจัยที่ผ่านมาพบว่ายังไม่มีงานวิจัยหรือการศึกษาแบบจำลองของเครื่องอบแห้งแบบพาราโบลาสำหรับใช้ศึกษาผลของรังสีกระจายจากดวงอาทิตย์ต่อสมรรถนะของเครื่องอบแห้งดังกล่าว ดังนั้นผู้วิจัยจึงเสนอที่จะพัฒนาแบบจำลองเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบพาราโบลา เพื่อใช้ในการศึกษาผลของรังสีกระจายที่มีต่อสมรรถนะของเครื่องอบแห้งแบบนี้ ซึ่งจะกล่าวถึงรายละเอียดในบทถัดไป

บทที่ 3

การดำเนินการวิจัยและผลการวิจัย

บทนี้จะกล่าวถึง โครงสร้างของเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบพาราโบลา การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเครื่องอบแห้ง ภายใต้สภาวะอากาศที่มีเมฆเต็มท้องฟ้า พร้อมทั้งตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง และการคำนวณประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบพาราโบลา

3.1 เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบพาราโบลา

งานวิจัยนี้ได้ทำการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบพาราโบลา (Aumporn, 2017) โดยออกแบบให้เครื่องอบแห้งประกอบไปด้วยองค์ประกอบหลัก 3 ส่วน ได้แก่ พื้นคอนกรีตผสมกับผงคาร์บอน ($8 \times 12.4 \text{ m}^2$) ทำหน้าที่ดูดกลืนรังสีอาทิตย์ แผ่นโพลีคาร์บอเนตแบบใสที่มีค่าการส่งผ่านแสงสำหรับรังสีคลื่นสั้นค่อนข้างสูง (0.8) ทำหน้าที่ป้องกันรังสียูวี (UV-ray) เข้าสู่ภายในเครื่องอบแห้งและป้องกันรังสีคลื่นยาว (8-15 μm) ออกสู่อากาศแวดล้อมจึงทำให้รังสีความร้อนสะท้อนกลับไปกลับมาภายในเครื่องอบแห้งแล้วเกิดปรากฏการณ์ที่เรียกว่า “ปรากฏการณ์เรือนกระจก” ซึ่งทำให้อุณหภูมิอากาศภายในเครื่องอบแห้งมีค่าสูงขึ้น และ อากาศภายในเครื่องอบแห้งทำหน้าที่เป็นตัวกลางในการพาความร้อนไปสู่ผลิตภัณฑ์และพาความชื้นที่บริเวณผิวของผลิตภัณฑ์ออกสู่อากาศภายนอกเครื่องอบแห้งด้วยพัดลมกระแสตรง (14.4 W) จำนวน 9 ตัว ที่ติดตั้งไว้ด้านหลังของเครื่องอบแห้ง ซึ่งทำงานโดยอาศัยพลังงานไฟฟ้าจากโซลาร์เซลล์ (50 W) จำนวน 3 แผง และบริเวณด้านหน้าของเครื่องอบแห้ง จะมีช่องอากาศจำนวน 2 ช่อง ขนาด $0.3 \times 2.2 \text{ m}^2$ สำหรับให้อากาศแวดล้อมไหลเข้าสู่ภายในเครื่องอบแห้ง (รูปที่ 38)



รูปที่ 33 เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบพาราโบลาที่ใช้ในงานวิจัยนี้

3.2 การทดลอง

ผู้วิจัยได้ทำการเก็บข้อมูลอุณหภูมิอากาศภายในเครื่องอบแห้ง อุณหภูมิอากาศและความชื้นสัมพัทธ์ของสิ่งแวดล้อม ความเข้มรังสีอาทิตย์ และภาพถ่ายท้องฟ้า โดยข้อมูลที่ได้จากการทดลองจะนำไปตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง มีรายละเอียดดังนี้

3.2.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

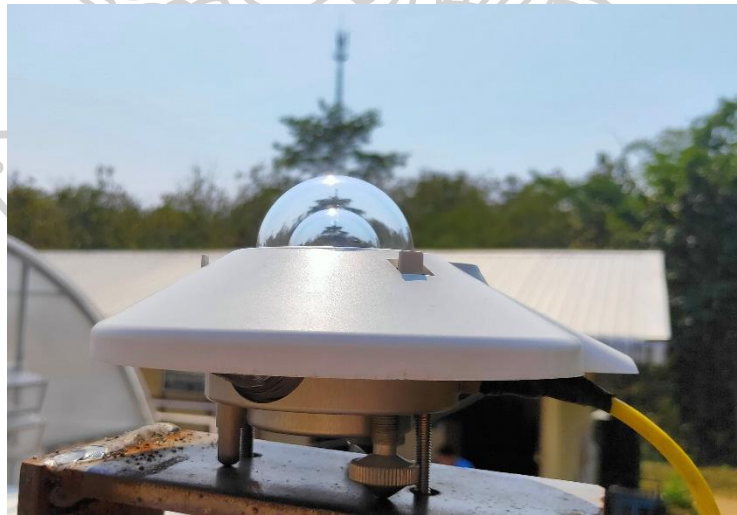
- 1) เทอร์โมคัปเปิลชนิดเค (K-type thermocouple) (รูปที่ 39)
- 2) เครื่องตรวจอากาศอัตโนมัติ (automatic weather station) ยี่ห้อ Young (รูปที่ 40)
- 3) เครื่องวัดความเข้มรังสีอาทิตย์แบบเทอร์โมไพล์ (thermopile pyranometer) ยี่ห้อ Kipp&Zonen รุ่น CMP11 (รูปที่ 41)
- 4) เครื่องบันทึกข้อมูล (data logger) ยี่ห้อ Yokogawa รุ่น DC100 (รูปที่ 42)
- 5) เครื่องถ่ายภาพท้องฟ้า (sky viewer) ยี่ห้อ Prede รุ่น PSV-100W5 (รูปที่ 43)



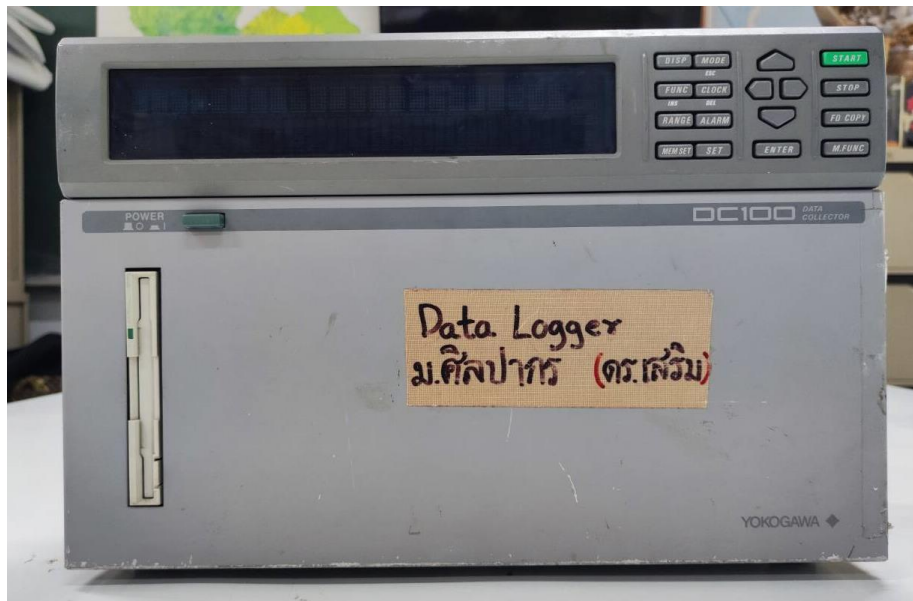
รูปที่ 34 เทอร์โมคัปเปิลชนิดเค



รูปที่ 35 เครื่องตรวจอากาศอัตโนมัติ ยี่ห้อ Young



รูปที่ 36 เครื่องวัดความเข้มรังสีอาทิตย์แบบเทอร์โมไพล์ ยี่ห้อ Kipp&Zonen รุ่น CMP11



รูปที่ 37 เครื่องบันทึกข้อมูล ยี่ห้อ Yokogawa รุ่น DC100

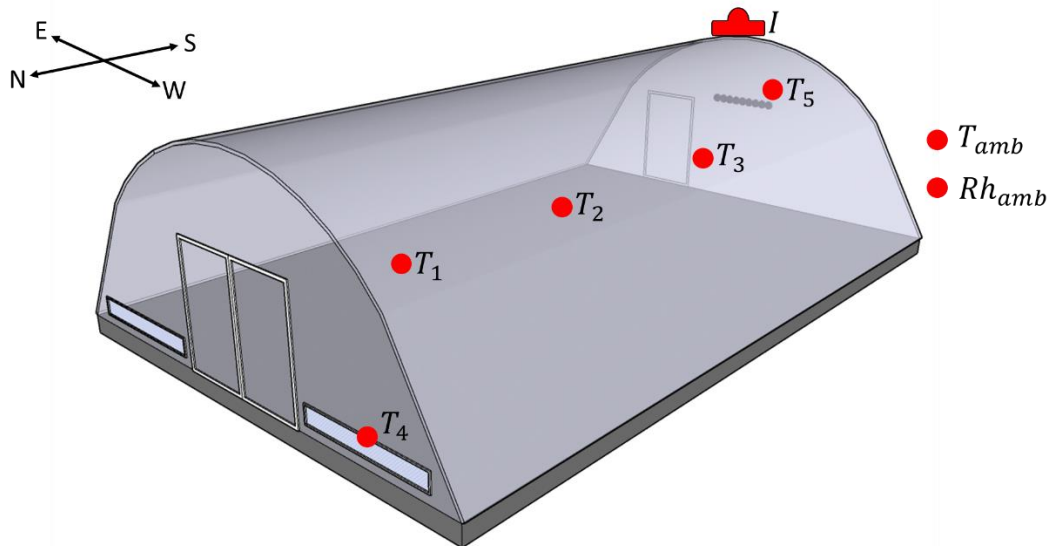


รูปที่ 38 เครื่องถ่ายภาพท้องฟ้า (sky viewer) ยี่ห้อ Prede รุ่น PSV-100W5

สำหรับการจำลองแบบเครื่องอบแห้งจำเป็นต้องทราบข้อมูลความเข้มรังสีอาทิตย์ อุณหภูมิ และความชื้นสัมพัทธ์อากาศแวดล้อม ซึ่งผู้วิจัยได้ทำการบันทึกข้อมูลทุก 1 นาที

3.3 ผลการทดลอง

ผู้วิจัยได้ทำการทดลองกับเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบพาราโบลาโดยติดตั้งอุปกรณ์ดังต่อไปนี้



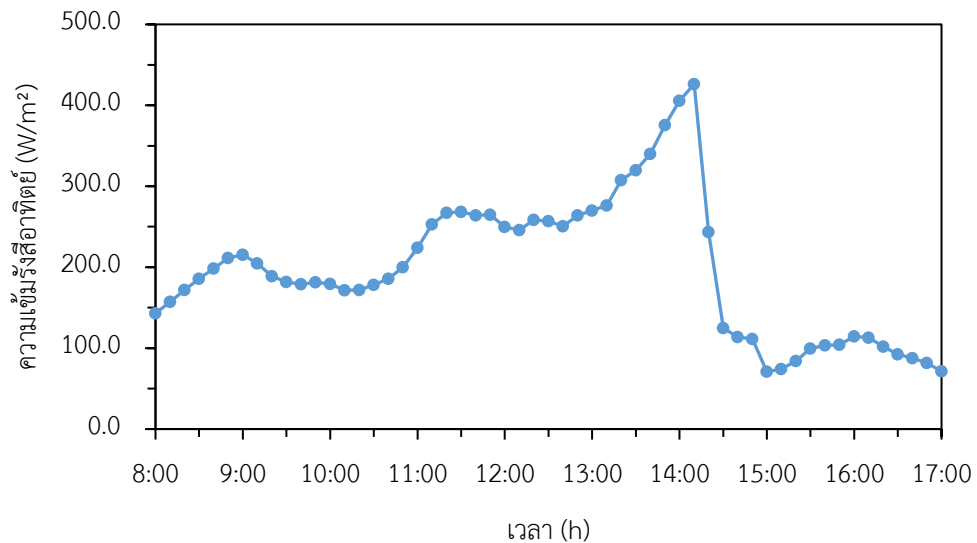
รูปที่ 39 ตำแหน่งในการวัดอุณหภูมิ ณ ตำแหน่งต่าง ๆ ภายในเครื่องอบแห้งแบบพาราโบลา อุณหภูมิ และความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศแวดล้อม และความเข้มรังสีอาทิตย์ โดยที่

T_1 = อุณหภูมิอากาศบริเวณด้านหน้า T_2 = อุณหภูมิอากาศบริเวณตรงกลาง
 T_3 = อุณหภูมิอากาศบริเวณด้านหลัง T_4 = อุณหภูมิบริเวณอากาศขาเข้า
 T_5 = อุณหภูมิบริเวณอากาศขาออก T_{amb} = อุณหภูมิอากาศแวดล้อม
 Rh_{amb} = ความชื้นสัมพัทธ์อากาศแวดล้อม I = ความเข้มรังสีอาทิตย์

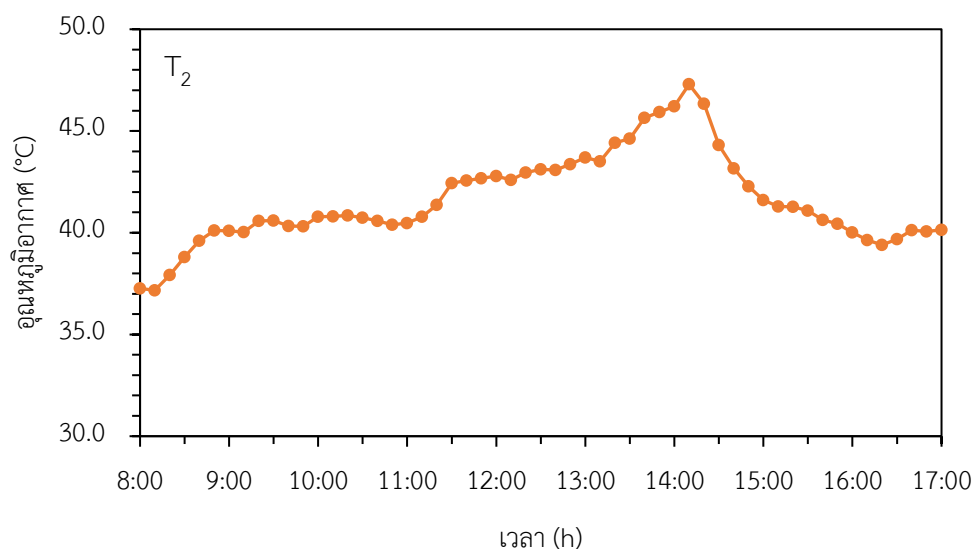
ผลการทดลองครั้งที่ 1 (18 กันยายน 2564)

รูปที่ 45 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มรังสีอาทิตย์กับระยะเวลาในการทดลอง ลักษณะการแปรค่ารังสีอาทิตย์จะมีลักษณะที่บ่งบอกรูปร่างไม่ได้ เนื่องจากในสภาวะอากาศที่มีเมฆเต็มท้องฟ้าปริมาณความเข้มรังสีอาทิตย์มีความแปรปรวน ซึ่งเกิดจากเมฆที่บดบังทางเดินของรังสีอาทิตย์ โดยมีค่าความเข้มรังสีอาทิตย์สูงสุดเท่ากับ 426.1 W/m^2 ที่เวลา 13:00 น. และลดต่ำลงในช่วงเวลา 14:00 – 17:00 น. ซึ่งในวันที่ทำการทดลองสภาพท้องฟ้ามีเมฆอยู่เต็มท้องฟ้าจึงส่งผลให้ความเข้มรังสีอาทิตย์มีค่าต่ำ ทำให้อุณหภูมิอากาศภายในเครื่องอบแห้งช่วงเช้ามีค่าค่อนข้างต่ำ และมีอุณหภูมิต่ำ ๆ สูงขึ้นจนมีค่าสูงสุดในช่วงเวลา 13:00 น. (รูปที่ 46) เนื่องจากการสะสมความร้อนจากภาวะเรือนกระจก (greenhouse effect) ในเครื่องอบแห้ง เป็นผลจากรังสีอาทิตย์ที่ส่องผ่านเข้ามา

ภายในเครื่องอบแห้งมีปริมาณมาก และรังสีคลื่นยาวที่แผ่จากองค์ประกอบภายในเครื่องอบแห้งส่งผ่านออกไปภายนอกได้น้อย ทำให้เกิดการสะสมของพลังงานความร้อนภายในเครื่องอบแห้ง อุณหภูมิอากาศภายในเครื่องอบแห้งจึงมีค่าสูงขึ้น หลังจากนั้นอุณหภูมิอากาศภายในเครื่องอบแห้งจะค่อย ๆ ลดลงซึ่งเป็นผลมาจากการคายความร้อนขององค์ประกอบต่าง ๆ และปริมาณรังสีอาทิตย์ที่ลดต่ำลง โดยอุณหภูมิอากาศภายในเครื่องอบแห้งมีค่าสูงสุดประมาณ 47.3°C



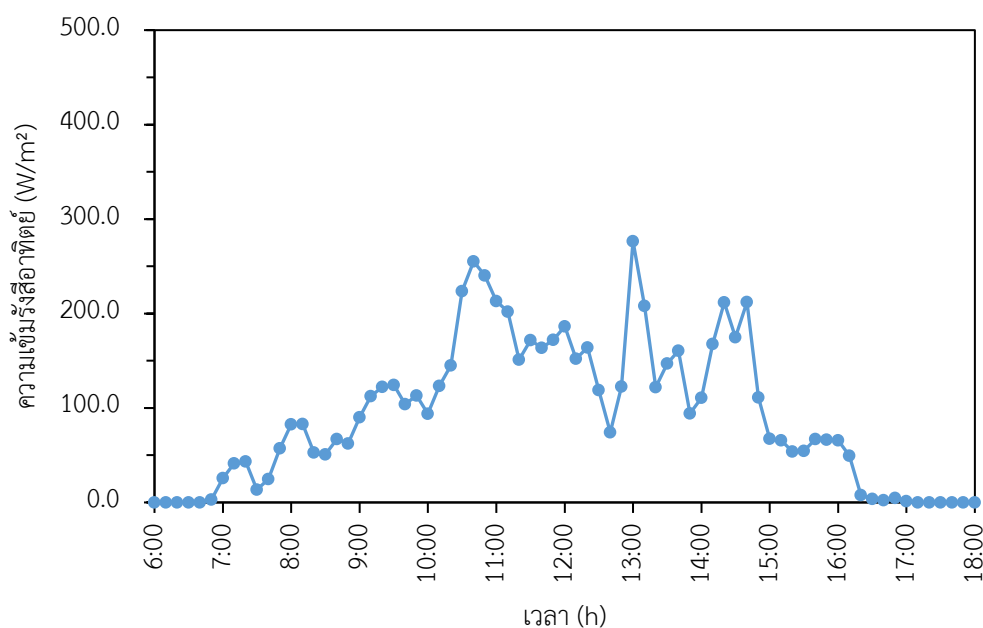
รูปที่ 40 การแปรค่าความเข้มรังสีอาทิตย์เทียบกับเวลาในวันที่สภาพอากาศที่มีเมฆเต็มท้องฟ้าของการทดลองครั้งที่ 1 (18 กันยายน 2564)



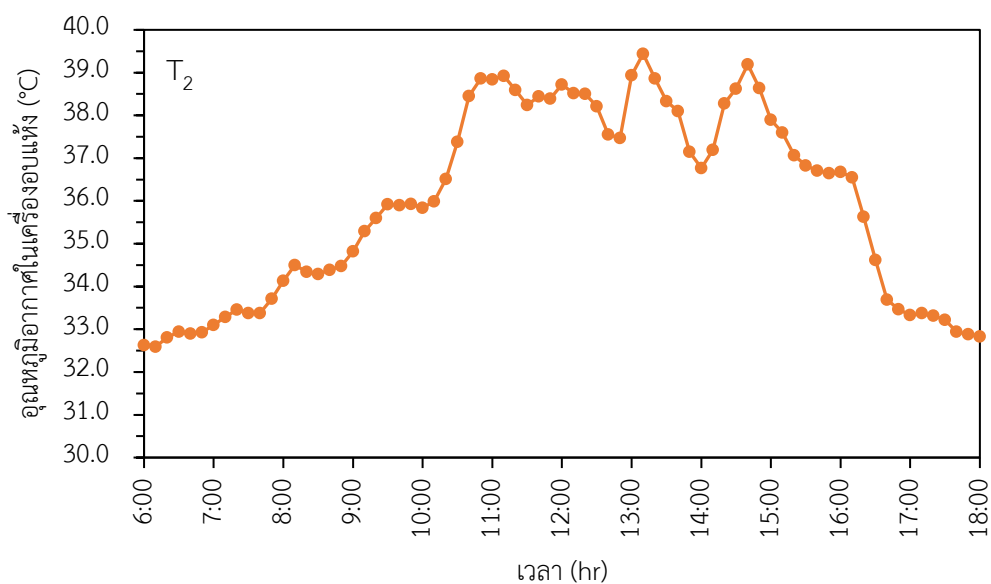
รูปที่ 41 การแปรค่าอุณหภูมิอากาศภายในเครื่องอบแห้งเทียบกับเวลาในวันที่สภาพอากาศที่มีเมฆเต็มท้องฟ้าของการทดลองครั้งที่ 1 (18 กันยายน 2564)

ผลการทดลองครั้งที่ 2 (15 กุมภาพันธ์ 2565)

รูปที่ 47 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มรังสีอาทิตย์กับระยะเวลาที่ใช้ในการทดลอง ซึ่งสภาพท้องฟ้ามีเมฆเต็มท้องฟ้า มีลักษณะการแปรค่ารังสีอาทิตย์มีลักษณะคล้ายกับรูปทรง พาราโบลาหัวตัด และจากการหมุนรอบตัวเองของโลกทำให้ความเข้มรังสีอาทิตย์ในเวลา 08:00 น. มีค่าต่ำ จากนั้นมีค่าเพิ่มสูงขึ้นจนมีค่าสูงสุดเท่ากับ 180.2 W/m^2 ที่เวลา 10:00 น. และลดต่ำลงในเวลา 12:00 น. เนื่องจากปริมาณเมฆที่เพิ่มขึ้นทำให้ความเข้มรังสีอาทิตย์มีค่าลดลง และเพิ่มขึ้นในช่วงเวลา 13:00 – 14:00 น. เนื่องจากเมฆได้เคลื่อนตัวออกไป นอกจากนี้ในวันที่ทำการทดลองสภาพท้องฟ้ามีเมฆอยู่เต็มท้องฟ้าซึ่งมีความเข้มรังสีอาทิตย์ค่อนข้างต่ำส่งผลให้อุณหภูมิอากาศภายในเครื่องอบแห้ง ช่วงเช้ามีค่าต่ำ และมีอุณหภูมิสูงขึ้นในช่วง 11:00 น. (รูปที่ 48) โดยมีค่าสูงสุดเท่ากับ 38.6°C เนื่องจากการสะสมความร้อนของส่วนประกอบต่าง ๆ ภายในเครื่องอบแห้ง หลังจากนั้นอุณหภูมิของอากาศในเครื่องอบแห้งจะค่อย ๆ ลดลงเนื่องจากปริมาณรังสีอาทิตย์ลดต่ำลง



รูปที่ 42 การแปรค่าความเข้มรังสีอาทิตย์เทียบกับเวลาในวันที่สภาพอากาศที่มีเมฆเต็มท้องฟ้าของการทดลองครั้งที่ 2 (15 กุมภาพันธ์ 2565)



รูปที่ 43 การแปรค่าอุณหภูมิอากาศภายในเครื่องอบแห้งเทียบกับเวลาในวันที่สภาพอากาศที่มีเมฆเต็มท้องฟ้าของการทดลองครั้งที่ 2 (15 กุมภาพันธ์ 2565)

3.3 การพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์เป็นเครื่องอบแห้งประเภทรังสีอาทิตย์โดยตรง โดยจะนำรังสีอาทิตย์มาใช้เป็นแหล่งพลังงานความร้อน ทำให้อุณหภูมิของส่วนประกอบต่าง ๆ มีค่าเพิ่มสูงขึ้น ซึ่งการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมินั้นจะขึ้นอยู่กับความเข้มรังสีอาทิตย์ที่มีความแปรปรวนตามสภาวะอากาศที่เปลี่ยนแปลง ในการทำนายประสิทธิภาพในการทำความร้อนให้กับอากาศภายในเครื่องอบแห้ง จำเป็นต้องใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการคำนวณ เนื่องจากการคาดการณ์วันที่สภาวะอากาศมีเมฆเต็มท้องฟ้านั้นเป็นไปได้ยาก ซึ่งในกรณีนี้ผู้วิจัยจะทำการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบพาราโบลาภายใต้สภาวะอากาศที่มีเมฆเต็มท้องฟ้า ดังหัวข้อต่อไปนี้

3.3.1 เงื่อนไขของแบบจำลอง

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ได้รับการพัฒนาขึ้นเพื่อทำนายประสิทธิภาพในการทำความร้อนให้กับอากาศภายในเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบพาราโบลา โดยมีเงื่อนไขในการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ดังนี้

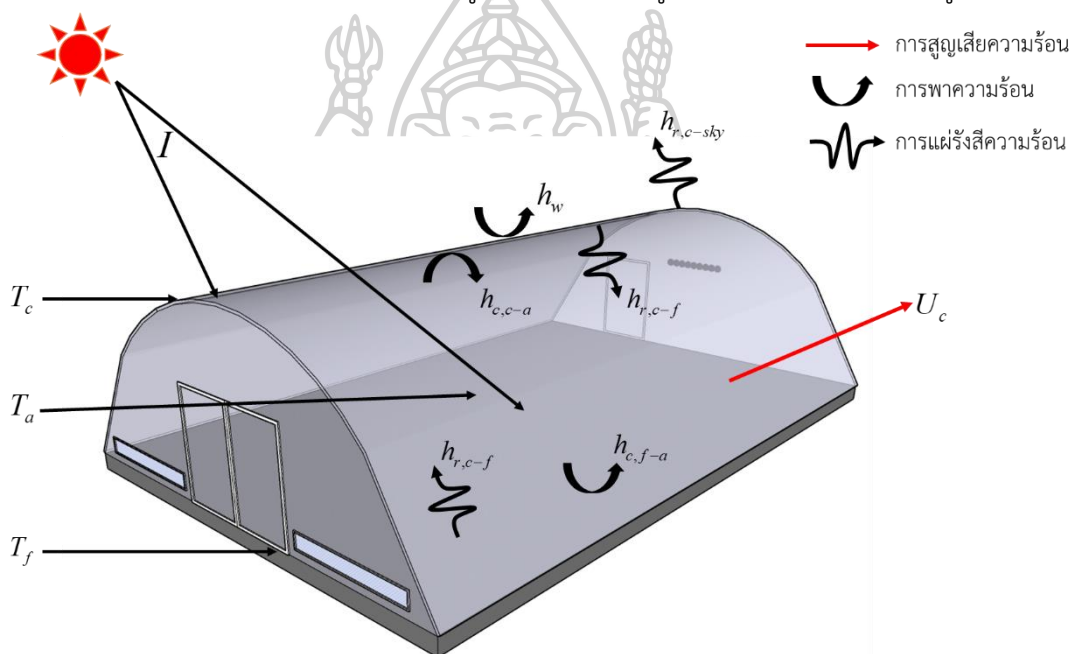
- (1) ไม่มีการแบ่งชั้นของอากาศภายในเครื่องอบแห้ง
- (2) คุณสมบัติทางกายภาพและทางอุณหพลศาสตร์ของอากาศมีค่าคงที่
- (3) การสูญเสียความร้อนจากพื้นคอนกรีตสู่พื้นดินมีค่าเพียงเล็กน้อย
- (4) อุณหภูมิอากาศเริ่มต้นของเครื่องอบแห้งมีค่าเท่ากับอุณหภูมิของสิ่งแวดล้อม

3.3.2 การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

จากที่กล่าวไว้ข้างต้น เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบพาราโบลาเป็นเครื่องอบแห้งประเภทรับรังสีอาทิตย์โดยตรง ซึ่งหากพิจารณาการรับรังสีอาทิตย์จะสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ส่วน ได้แก่ แผ่นโพลีคาร์บอเนต พื้นคอนกรีต และอากาศภายในเครื่องอบแห้ง ในหัวข้อนี้ผู้วิจัยจะทำการสร้างสมการการถ่ายเทความร้อนของแต่ละส่วนดังนี้

3.3.2.1 สมการสมดุลความร้อน

การถ่ายเทความร้อนภายในเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบพาราโบลาเกิดขึ้นจากอากาศที่ไหลเวียนภายในเครื่องอบแห้งซึ่งอากาศนี้จะได้รับความร้อนผ่านการถ่ายเทความร้อนจากพื้นคอนกรีตกับแผ่นโพลีคาร์บอเนต และมีการสูญเสียความร้อนสู่อากาศแวดล้อม แสดงดังรูปที่ 49



รูปที่ 44 การถ่ายเทความร้อนของเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบพาราโบลา

1) สมการการถ่ายเทความร้อนของแผ่นโพลีคาร์บอเนต

อัตราการเปลี่ยนแปลงเอนทัลปีของแผ่นโพลีคาร์บอเนต

= อัตราการถ่ายเทความร้อนโดยการพาความร้อนระหว่างแผ่นโพลีคาร์บอเนตกับอากาศ

+ อัตราการถ่ายเทความร้อนโดยการพาความร้อนระหว่างแผ่นโพลีคาร์บอเนตกับอากาศแวดล้อม

+ อัตราการถ่ายเทความร้อนโดยการแผ่รังสีความร้อนระหว่างแผ่นโพลีคาร์บอเนตกับท้องฟ้า

+ อัตราการถ่ายเทความร้อนโดยการแผ่รังสีความร้อนระหว่างแผ่นโพลีคาร์บอเนตกับพื้นคอนกรีต

+ การดูดกลืนรังสีอาทิตย์ของแผ่นโพลีคาร์บอเนต

แทนค่าแต่ละส่วนของสมการ จะได้ตั้งสมการที่ (4.1)

$$m_c C_{p,c} \frac{\partial T_c}{\partial t} = A_c h_{c,c-a} (T_a - T_c) + A_c h_w (T_{amb} - T_c) + A_c h_{r,c-sky} (T_{sky} - T_c) + A_c h_{r,c-f} (T_f - T_c) + A_c \alpha_c I \quad (4.1)$$

- เมื่อ A_c คือ พื้นที่ของแผ่นโพลีคาร์บอเนต, [m²]
 $C_{p,c}$ คือ ความจุความร้อนจำเพาะของแผ่นโพลีคาร์บอเนต, [J/kg·K]
 $h_{c,c-a}$ คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนโดยการพาความร้อนระหว่างแผ่นโพลีคาร์บอเนตกับอากาศ, [W/m²·K]
 h_w คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนโดยการพาความร้อนระหว่างแผ่นโพลีคาร์บอเนตกับอากาศแวดล้อม, [W/m²·K]
 $h_{r,c-f}$ คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนโดยการแผ่รังสีความร้อนระหว่างแผ่นโพลีคาร์บอเนตกับพื้นคอนกรีต, [W/m²·K]
 $h_{r,c-sky}$ คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนโดยการแผ่รังสีความร้อนระหว่างแผ่นโพลีคาร์บอเนตกับท้องฟ้า, [W/m²·K]
 I คือ ความเข้มรังสีอาทิตย์, [W/m²]
 m_c คือ มวลของแผ่นโพลีคาร์บอเนต, [kg]
 T_a คือ อุณหภูมิอากาศภายในเครื่องอบแห้ง, [K]
 T_{amb} คือ อุณหภูมิอากาศแวดล้อม, [K]
 T_c คือ อุณหภูมิแผ่นโพลีคาร์บอเนต, [K]
 T_f คือ อุณหภูมิพื้นคอนกรีต, [K]
 T_{sky} คือ อุณหภูมิท้องฟ้า, [K]
 t คือ เวลา, [s]
 α_c คือ สัมประสิทธิ์การดูดกลืนรังสีอาทิตย์ของแผ่นโพลีคาร์บอเนต, [-]

2) สมการการถ่ายเทความร้อนของอากาศภายในเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบพาราโบลา อัตราการเปลี่ยนแปลงเอนทัลปีของอากาศ

- = อัตราการถ่ายโอนความร้อนโดยการพาความร้อนระหว่างแผ่นโพลีคาร์บอเนตกับอากาศ
+ อัตราการถ่ายโอนความร้อนโดยการพาความร้อนระหว่างพื้นคอนกรีตกับอากาศ
+ การสูญเสียความร้อนสู่อากาศแวดล้อม
+ พลังงานที่ทำให้อุณหภูมิอากาศมีการเปลี่ยนแปลง

$$m_a C_{p,a} \frac{\partial T_a}{\partial t} = A_c h_{c,c-a} (T_c - T_a) + A_f h_{c,f-a} (T_f - T_a) + A_c U_c (T_{amb} - T_a) + Pu \quad (4.2)$$

เมื่อ A_c คือ พื้นที่ของแผ่นโพลีคาร์บอเนต, [m²]

A_f คือ พื้นที่ของพื้นคอนกรีต, [m²]

$C_{p,a}$ คือ ความจุความร้อนจำเพาะของอากาศ, [J/kg·K]

$h_{c,c-a}$ คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนโดยการพาความร้อนระหว่างแผ่นโพลีคาร์บอเนตกับอากาศ, [W/m²·K]

$h_{c,f-a}$ คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนโดยการพาความร้อนระหว่างพื้นคอนกรีตกับอากาศ, [W/m²·K]

m_a คือ มวลของอากาศ, [kg]

Pu คือ พลังงานที่ทำให้อุณหภูมิอากาศมีการเปลี่ยนแปลง, [W]

T_a คือ อุณหภูมิอากาศภายในเครื่องอบแห้ง, [K]

T_{amb} คือ อุณหภูมิอากาศแวดล้อม, [K]

T_c คือ อุณหภูมิแผ่นโพลีคาร์บอเนต, [K]

T_f คือ อุณหภูมิพื้นคอนกรีต, [K]

t คือ เวลา, [s]

U_c คือ สัมประสิทธิ์การสูญเสียความร้อนจากอากาศภายในเครื่องอบแห้งสู่อากาศแวดล้อม, [W/m²·K]

3) สมการการถ่ายเทความร้อนของพื้นคอนกรีต

อัตราการเปลี่ยนแปลงเอนทัลปีของพื้นคอนกรีต

= อัตราการถ่ายโอนความร้อนโดยการพาความร้อนระหว่างพื้นคอนกรีตกับอากาศ

+ อัตราการถ่ายโอนความร้อนโดยการแผ่รังสีระหว่างพื้นคอนกรีตกับแผ่นโพลีคาร์บอเนต

+ การดูดกลืนรังสีอาทิตย์ของพื้นคอนกรีต

$$m_f C_{p,f} \frac{\partial T_f}{\partial t} = A_f h_{c,f-a} (T_a - T_f) + A_f h_{r,f-c} (T_c - T_f) + A_f \tau_c \alpha_f I \quad (4.3)$$

เมื่อ A_f คือ พื้นที่ของพื้นคอนกรีต, [m²]

$C_{p,f}$ คือ ความจุความร้อนจำเพาะของพื้นคอนกรีต, [J/kg·K]

- $h_{r,f-c}$ คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนโดยการแผ่รังสีความร้อนระหว่างพื้นคอนกรีตกับแผ่นโพลีคาร์บอเนต, [W/m²·K]
- $h_{c,f-a}$ คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนโดยการพาความร้อนระหว่างพื้นคอนกรีตกับอากาศ, [W/m²·K]
- I คือ ความเข้มรังสีอาทิตย์, [W/m²]
- m_f คือ มวลของพื้นคอนกรีต, [kg]
- T_a คือ อุณหภูมิอากาศภายในเครื่องอบแห้ง, [K]
- T_c คือ อุณหภูมิแผ่นโพลีคาร์บอเนต, [K]
- T_f คือ อุณหภูมิพื้นคอนกรีต, [K]
- t คือ เวลา, [s]
- τ_c คือ สัมประสิทธิ์การส่งผ่านรังสีอาทิตย์ของแผ่นโพลีคาร์บอเนต, [-]
- α_f คือ สัมประสิทธิ์การดูดกลืนรังสีอาทิตย์ของพื้นคอนกรีต, [-]

3.3.2.2 สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน

- 1) สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนโดยการแผ่รังสีระหว่างแผ่นโพลีคาร์บอเนตกับพื้นคอนกรีต ($h_{r,f-c}$) (Duffie et al., 2020) หาได้จากสมการ

$$h_{r,f-c} = \frac{\sigma(T_f^2 + T_c^2)(T_f + T_c)}{\frac{1 - \epsilon_c}{\epsilon_c} + \frac{1}{F_{c-f}} + \frac{(1 - \epsilon_f)A_c}{\epsilon_f A_f}} \quad (4.4)$$

โดยที่วิวแฟคเตอร์ (view factor) (เสริม จันทร์ฉาย, 2560a) หาได้จาก

$$F_{c-f} = \frac{1}{A_f} \int_{A_f} \int_{A_c} \frac{I_c \cos \theta_c \cos \theta_f}{r^2} dA_c dA_f \quad (4.5)$$

- 2) สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนโดยการแผ่รังสีความร้อนระหว่างพื้นคอนกรีตกับแผ่นโพลีคาร์บอเนต ($h_{r,c-f}$) หาได้จากสมการ (Duffie et al., 2020)

$$h_{r,c-f} = \frac{\sigma(T_c^2 + T_f^2)(T_c + T_f)}{\frac{1 - \epsilon_f}{\epsilon_f} + \frac{1}{F_{f-c}} + \frac{(1 - \epsilon_c)A_f}{\epsilon_c A_c}} \quad (4.6)$$

3) สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนโดยการแผ่รังสีระหว่างแผ่นโพลีคาร์บอเนตกับท้องฟ้า ($h_{r,c-sky}$) หาได้จากสมการ (Sekyere, Adams, Davis, & Forson, 2020)

$$h_{r,c-sky} = \varepsilon_c \sigma (T_c^2 + T_{sky}^2) (T_c + T_{sky}) \quad (4.7)$$

โดยที่อุณหภูมิท้องฟ้า (T_{sky}) (Sekyere et al., 2020) หาได้จาก

$$T_{sky} = 0.552 T_{amb}^{1.5} \quad (4.8)$$

4) สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนโดยการพาความร้อนระหว่างอากาศภายในเครื่องอบแห้งกับแผ่นโพลีคาร์บอเนต ($h_{c,c-a}$) (Aumporn, 2017)

$$h_{c,c-a} = 1.32 |T_c - T_a|^{0.25} \quad (4.9)$$

5) สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนโดยการพาความร้อนระหว่างอากาศภายในเครื่องอบแห้งกับพื้นคอนกรีต (Aumporn, 2017)

$$h_{c,f-a} = 1.86 |T_f - T_a|^{0.33} \quad (4.10)$$

6) สัมประสิทธิ์การสูญเสียความร้อนจากอากาศภายในเครื่องอบแห้งสู่อากาศแวดล้อม

$$U_c = \frac{\lambda_c}{L_c} \quad (4.11)$$

7) ประสิทธิภาพในการทำความร้อนของเครื่องอบแห้ง (Aumporn, 2017)

$$\eta_s = \frac{Pu}{A_c I} \quad (4.12)$$

3.3.2.3 การหาผลเฉลยของแบบจำลอง

สมการที่ (4.1) – (4.3) เป็นสมการอนุพันธ์ซึ่งไม่สามารถหาผลเฉลยเชิงวิเคราะห์ (analytical solution) ดังนั้นในการหาผลเฉลยของสมการอนุพันธ์ดังกล่าวผู้วิจัยจะใช้วิธีการเชิงตัวเลขด้วยระเบียบวิธีการผลต่างจำกัด (finite difference method) โดยหลักการของระเบียบวิธีการผลต่างจำกัดคือ การแทนค่าเทอมที่เป็นอนุพันธ์ด้วยผลต่างในช่วงแคบ ๆ และทำการคำนวณหาผลเฉลยที่

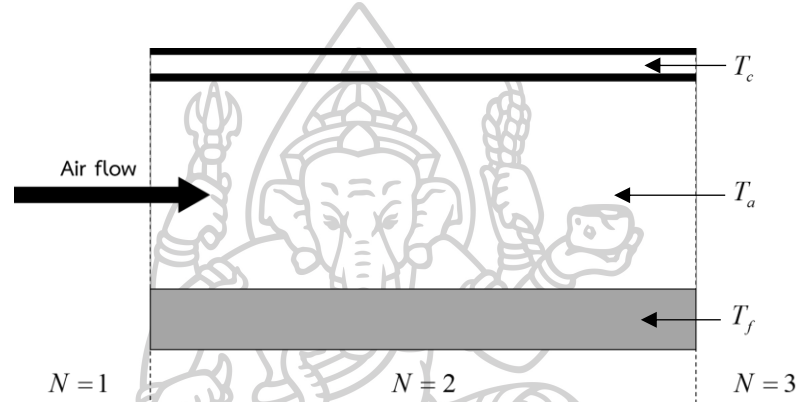
ต้องการโดยผลที่ได้จะอยู่ในรูปของตัวเลขทั่วไป รายละเอียดในการหาผลเฉลยของสมการที่ (4.1) – (4.3) แสดงดังต่อไปนี้

ในการสร้างแบบจำลอง จะเริ่มต้นจากการแบ่งเครื่องอบแห้งออกเป็นช่วง ๆ เพื่อพิจารณาการไหลของอากาศบริเวณทางเข้า ทางออก และภายในเครื่องอบแห้ง โดยในงานวิจัยนี้จะแบ่งออกเป็น 3 ช่วง (N=3) ด้วยกัน (รูปที่ 50)

โดย N=1 คือ บริเวณอากาศแวดล้อมไหลเข้าไปภายในเครื่องอบแห้ง

N=2 คือ บริเวณภายในเครื่องอบแห้ง

N=3 คือ บริเวณที่อากาศแวดล้อมไหลออกจากเครื่องอบแห้ง



รูปที่ 45 การแบ่งส่วนในการพิจารณาอุณหภูมิขององค์ประกอบต่าง ๆ ของเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบพาราโบลาตามทิศทางการไหลของอากาศ

ต่อมาผู้วิจัยจะทำการแก้สมการที่ (4.1) – (4.3) ด้วยระเบียบวิธีการผลต่างจำกัดแบบผลต่างทางหน้า (forward difference) ซึ่งจะได้ผลเฉลยออกมาแบบโดยปริยาย (implicit value) โดยเขียนให้อยู่ในรูปของสมการต่อไปนี้

$$m_c C_{p,c} \frac{(T_{c,t+\Delta t} - T_{c,t})}{\Delta t} = A_c h_{c,c-a} (T_{a,t+\Delta t} - T_{c,t+\Delta t}) + A_c h_w (T_{amb,t+\Delta t} - T_{c,t+\Delta t}) + A_c h_{r,c-sky} (T_{sky,t+\Delta t} - T_{c,t+\Delta t}) + A_c h_{r,c-f} (T_{f,t+\Delta t} - T_{c,t+\Delta t}) + A_c \alpha_c I_{t+\Delta t} \quad (4.13)$$

$$m_a C_{p,a} \frac{(T_{a,t+\Delta t} - T_{a,t})}{\Delta t} = A_c h_{c,c-a} (T_{c,t+\Delta t} - T_{a,t+\Delta t}) + A_f h_{c,f-a} (T_{f,t+\Delta t} - T_{a,t+\Delta t}) + A_c U_c (T_{amb,t+\Delta t} - T_{a,t+\Delta t}) + Pu \quad (4.14)$$

$$m_f C_{p,f} \frac{(T_{f,t+\Delta t} - T_{f,t})}{\Delta t} = A_f h_{c,f-a} (T_{a,t+\Delta t} - T_{f,t+\Delta t}) + A_f h_{r,f-c} (T_{c,t+\Delta t} - T_{f,t+\Delta t}) + A_f \tau_c \alpha_f I_{t+\Delta t} \quad (4.15)$$

จากสมการที่ (4.13) - (4.15) จัดให้อยู่ในรูปแบบสมการเชิงเส้นของตัวแปร T_a T_c และ T_f ที่เวลา $t + \Delta t$ ได้ดังนี้

$$\left(\frac{m_c C_{p,c}}{\Delta t} + A_c h_{c,c-a} + A_c h_w + A_c h_{r,c-sky} + A_c h_{r,c-f} \right) T_{c,t+\Delta t} - A_c h_{c,c-a} T_{a,t+\Delta t} - A_c h_{r,c-f} T_{f,t+\Delta t} \quad (4.16)$$

$$= \frac{m_c C_{p,c}}{\Delta t} T_{c,t} + A_c h_w (T_{amb,t+\Delta t} - T_{c,t+\Delta t}) + A_c h_{r,c-sky} T_{sky,t+\Delta t} + A_c \alpha_c I_{t+\Delta t}$$

$$\left(\frac{m_a C_{p,a}}{\Delta t} + A_c h_{c,c-a} + A_f h_{c,f-a} + A_c U_c \right) T_{a,t+\Delta t} - A_c h_{c,c-a} T_{c,t+\Delta t} - A_f h_{c,f-a} T_{f,t+\Delta t} \quad (4.17)$$

$$= \frac{m_a C_{p,a}}{\Delta t} T_{a,t} + A_c U_c T_{amb,t+\Delta t} + Pu$$

$$\left(\frac{m_f C_{p,f}}{\Delta t} + A_f h_{c,f-a} + A_f h_{r,f-c} \right) T_{f,t+\Delta t} - A_f h_{c,f-a} T_{a,t+\Delta t} - A_f h_{r,f-c} T_{c,t+\Delta t} \quad (4.18)$$

$$= \frac{m_f C_{p,f}}{\Delta t} T_{f,t} + A_f \tau_c \alpha_f I_{t+\Delta t}$$

จากสมการที่ (4.16) - (4.18) จัดให้อยู่ในระบบเมทริกซ์ (matrix) ดังสมการที่ (4.19) เพื่อนำมาหาผลเฉลยของสมการคือ T_a T_c และ T_f ที่เวลา $t + \Delta t$

$$\begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_c \\ T_a \\ T_f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \end{bmatrix} \quad (4.19)$$

โดยที่ $a_{11} = \frac{m_c C_{p,c}}{\Delta t} + A_c h_{c,c-a} + A_c h_w + A_c h_{r,c-sky} + A_c h_{r,c-f}$

$$a_{12} = -A_c h_{c,c-a}$$

$$a_{13} = -A_c h_{r,c-f}$$

$$a_{21} = -A_c h_{c,c-a}$$

$$a_{22} = \frac{m_a C_{p,a}}{\Delta t} + A_c h_{c,c-a} + A_f h_{c,f-a} + A_c U_c$$

$$a_{23} = -A_f h_{c,f-a}$$

$$a_{31} = -A_f h_{r,f-c}$$

$$a_{32} = -A_f h_{c,f-a}$$

$$a_{33} = \frac{m_f C_{p,f}}{\Delta t} + A_f h_{c,f-a} + A_f h_{r,f-c}$$

$$y_1 = \frac{m_c C_{p,c}}{\Delta t} T_{c,t} + A_c h_w (T_{amb,t+\Delta t} - T_{c,t+\Delta t}) + A_c h_{r,c-sky} T_{sky,t+\Delta t} + A_c \alpha_c I_{t+\Delta t}$$

$$y_2 = \frac{m_a C_{p,a}}{\Delta t} T_{a,t} + A_c U_c T_{amb,t+\Delta t} + Pu$$

$$y_3 = \frac{m_f C_{p,f}}{\Delta t} T_{f,t} + A_f \tau_c \alpha_f I_{t+\Delta t}$$

3.3.2.4 การเขียนโปรแกรมสำหรับการคำนวณหาผลเฉลย

เนื่องจากการคำนวณอุณหภูมิอากาศภายในเครื่องอบแห้ง แผ่นโพลีคาร์บอนเนต และพื้นคอนกรีต มีขั้นตอนในการคำนวณหลายขั้นตอน และต้องทำซ้ำทุก Δt ดังนั้นผู้วิจัยจึงทำการเขียนโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อใช้ในการคำนวณหาผลเฉลยด้วยภาษาฟอร์แทรน โดยใช้คอมไพเลอร์เป็น Compaq Visual FORTRAN 6.5

การทำงานเริ่มต้นของโปรแกรมจะเริ่มจากการคำนวณข้อมูลสภาพอากาศ (ความเข้มรังสีอาทิตย์ อุณหภูมิอากาศแวดล้อม และความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศแวดล้อม) จากนั้นจะนำข้อมูลสภาพอากาศที่ได้มาใช้ในการคำนวณหาสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนต่าง ๆ รวมถึงอุณหภูมิแผ่นโพลีคาร์บอนเนต พื้นคอนกรีต และอากาศภายในเครื่องอบแห้ง และทำการเปรียบเทียบอุณหภูมิที่ได้จากการคำนวณกับอุณหภูมิก่อนหน้า โดยผลต่างของอุณหภูมิจจะต้องไม่เกิน 0.01 โปรแกรมจึงจะหยุด

ทำงาน และแสดงผลอุณหภูมิที่คำนวณได้ หากผลต่างของอุณหภูมิมีค่ามากกว่า 0.01 จะเริ่มการคำนวณอุณหภูมิใหม่ และทำซ้ำขั้นตอนเดิมจนกว่าจะได้ผลตามต้องการ โดยจะทำการคำนวณในช่วงเวลา $\Delta t=600$ และกระบวนการนี้จะทำซ้ำจนกว่าจะถึงเวลาสุดท้ายที่กำหนดไว้ แผนผังการทำงานของโปรแกรมแสดงดังรูปที่ 51

3.3.3 การตรวจสอบแบบจำลอง

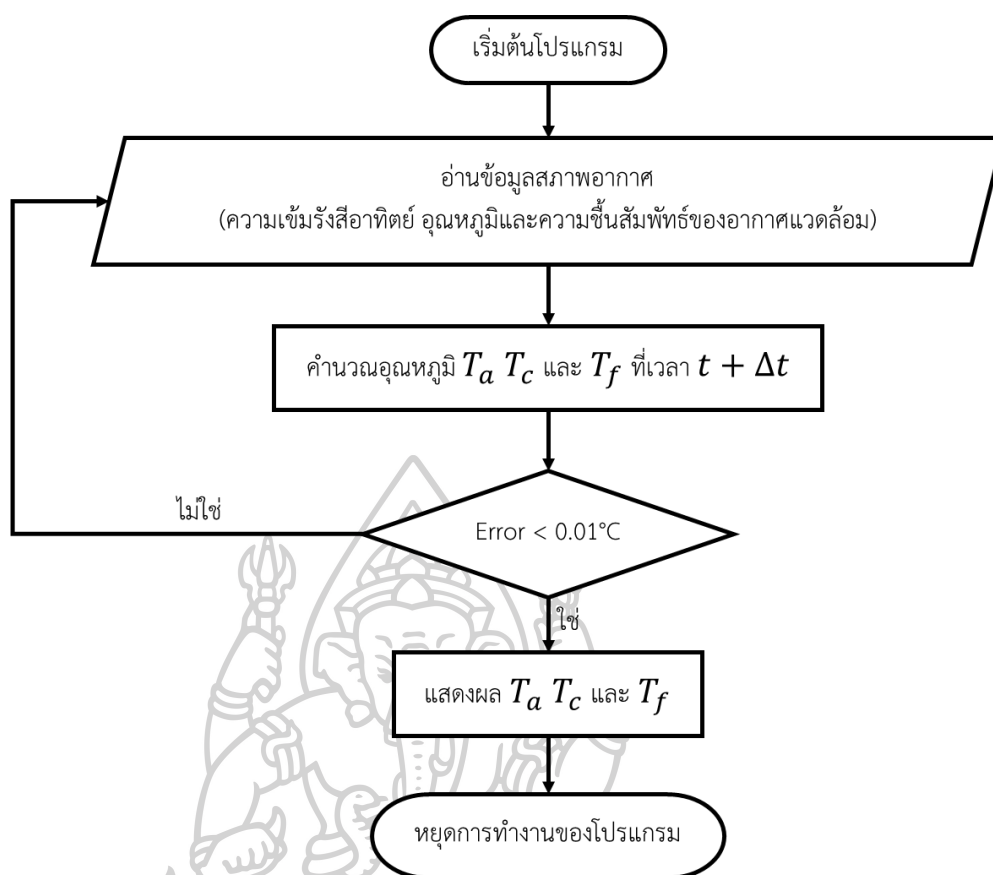
ในการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง ผู้วิจัยจะทำการจำลองแบบเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบพาราโบลาภายใต้สภาวะอากาศที่มีเมฆเต็มท้องฟ้า และนำผลที่ได้มาเปรียบเทียบกับผลการทดลอง สำหรับตัวแปรต่าง ๆ ที่ใช้ในแบบจำลอง เช่น ขนาดของเครื่องอบแห้งจะกำหนดตามระบบโรงอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบเรือนกระจกแบบ (พพ. 2) สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนต่าง ๆ จะคำนวณตามสมการที่กล่าวไปแล้ว และข้อมูลความเข้มรังสีอาทิตย์ อุณหภูมิอากาศแวดล้อม รวมทั้งความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศแวดล้อมจะใช้ค่าที่ได้จากการบันทึกจริงของการทดลอง โดยผลที่ได้จากการจำลองจะนำมาเปรียบเทียบกับค่าอุณหภูมิขององค์ประกอบของเครื่องอบแห้งที่ได้จากการบันทึกจริง (รูปที่ 55 – 57) นอกจากนี้ผู้วิจัยยังได้ทำการหาค่าความคลาดเคลื่อนของอุณหภูมิกายในเครื่องอบแห้ง แผ่นโพลีคาร์บอเนต และพื้นคอนกรีต โดยใช้พารามิเตอร์ทางสถิติสามชนิดคือ ค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย (Mean Bias Error, MBE) สัมประสิทธิ์การอธิบาย (coefficient of determination, R^2) และรากที่สองของค่าเฉลี่ยความผิดพลาดกำลังสอง (Root Mean Square Error, RMSE) เพื่อตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง

$$R^2 = \frac{\sum_i (T_{\text{predicted},i} - \bar{T}_{\text{predicted}})^2}{\sum_i (T_{\text{observation},i} - \bar{T}_{\text{observation}})^2} \quad (4.20)$$

$$MBE = \frac{\sum_{i=1}^N (T_{\text{predicted},i} - T_{\text{observation},i})}{N} \quad (4.21)$$

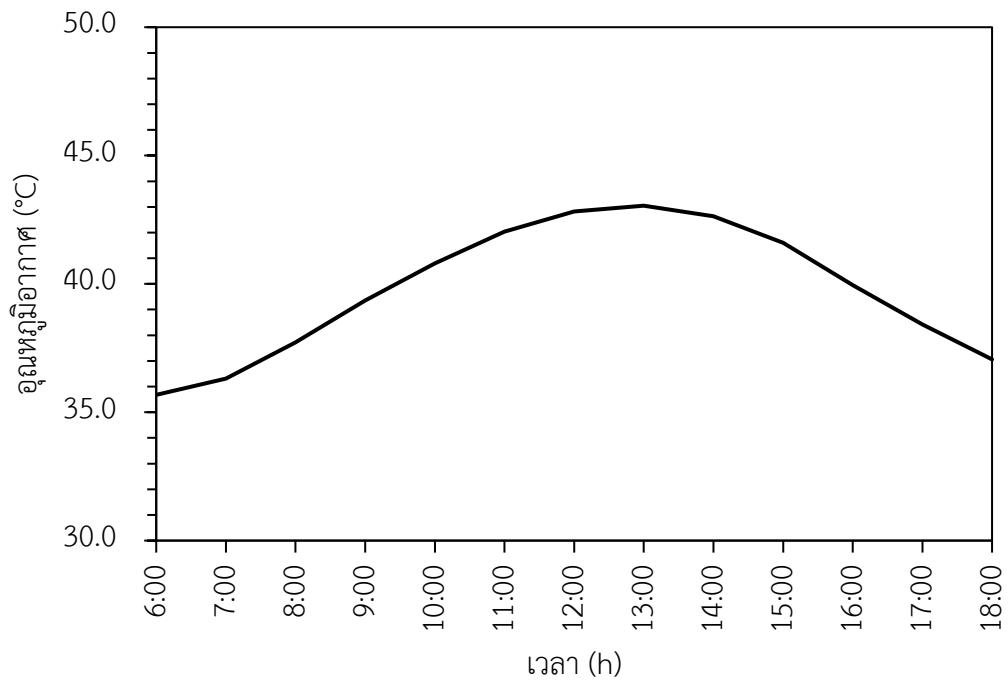
$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (T_{\text{predicted},i} - T_{\text{observation},i})^2}{N}} \quad (4.22)$$

เมื่อ	$T_{\text{predicted},i}$	คือ อุณหภูมิจากการจำลองครั้งที่ i , [°C]
	$T_{\text{observation},i}$	คือ อุณหภูมิจากการทดลองครั้งที่ i , [°C]
	N	คือ จำนวนข้อมูลทั้งหมด, [-]

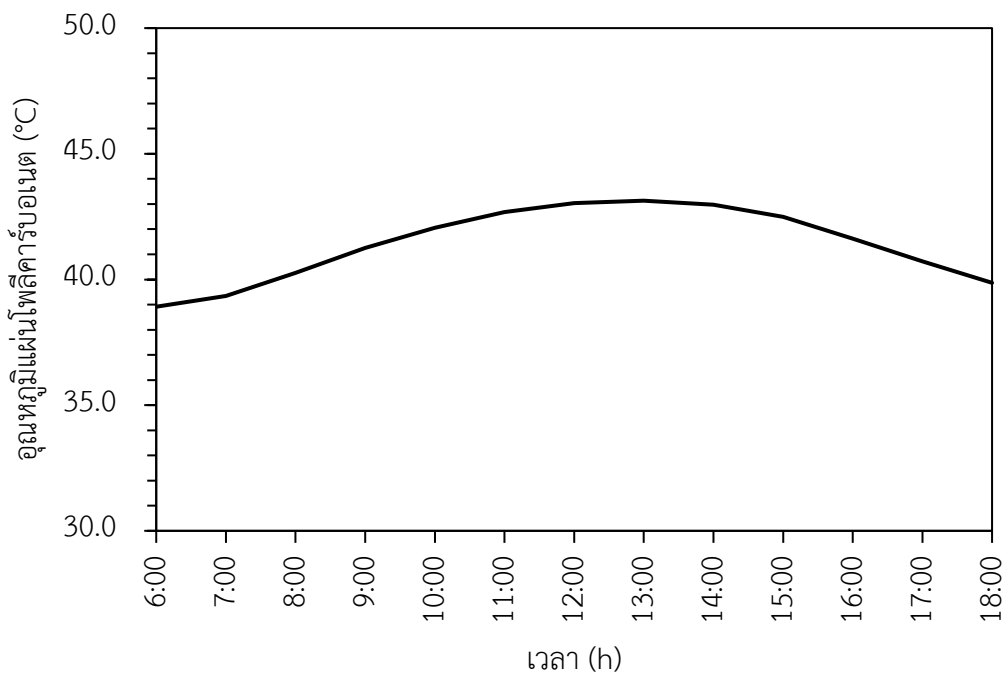


รูปที่ 46 แผนผังการทำงานของโปรแกรม

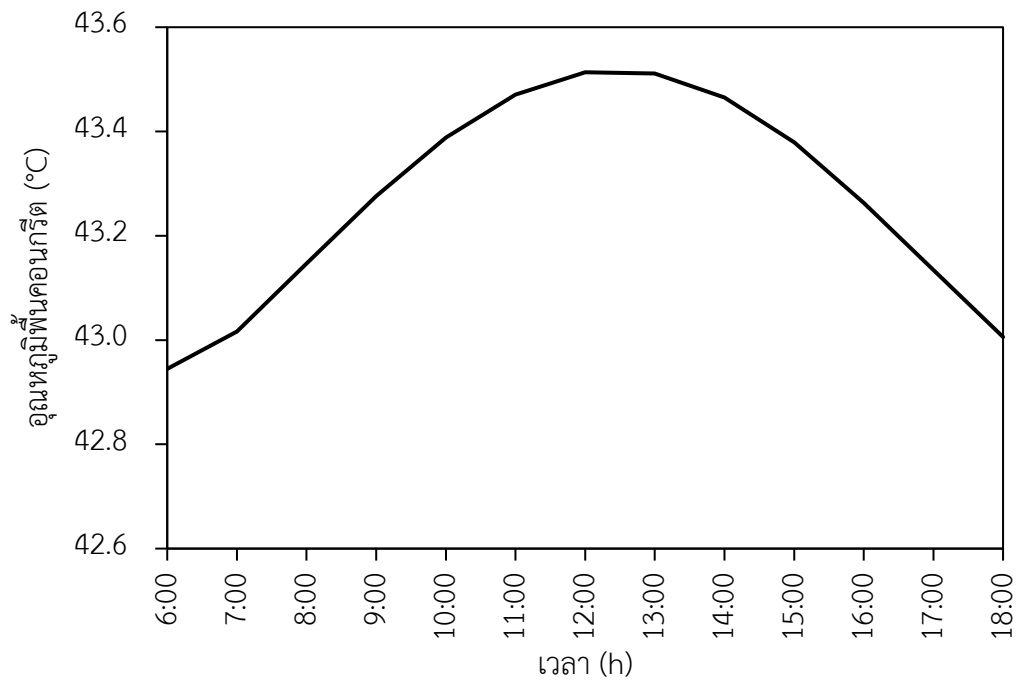
จากการจำลองแบบเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบพาราโบลาภายใต้สภาวะอากาศที่มีเมฆเต็มท้องฟ้า เปรียบเทียบกับผลจากการทดลองครั้งที่ 1 พบว่าอุณหภูมิของอากาศในเครื่องอบแห้งมีค่าเพิ่มสูงขึ้นเนื่องจากได้รับพลังงานความร้อนโดยการพาความร้อนจากแผ่นโพลีคาร์บอเนตกับพื้นคอนกรีต (รูปที่ 52) และจากการเปรียบเทียบแบบจำลองกับผลที่ได้จากการทดลองของอุณหภูมิอากาศภายในเครื่องอบแห้ง พบว่าผลที่ได้จากแบบจำลองมีความสอดคล้องกับผลที่ได้จากแบบจำลองกับผลที่ได้จากการทดลอง โดยมีค่า R^2 เท่ากับ 0.8281 MBE เท่ากับ 0.7780°C และ RMSE เท่ากับ 1.0739°C และพบว่าอุณหภูมิของแผ่นโพลีคาร์บอเนตมีค่าเพิ่มสูงขึ้นเนื่องจากได้รับพลังงานความร้อนจากการแผ่รังสีความร้อนของพื้นคอนกรีต รวมทั้งยังดูดกลืนพลังงานความร้อนจากการแผ่รังสีจากดวงอาทิตย์ (รูปที่ 53) นอกจากนี้ยังพบว่าอุณหภูมิของพื้นคอนกรีตมีค่าเพิ่มขึ้นเนื่องจากรับพลังงานความร้อนจากการดูดซับรังสีอาทิตย์ (รูปที่ 54)



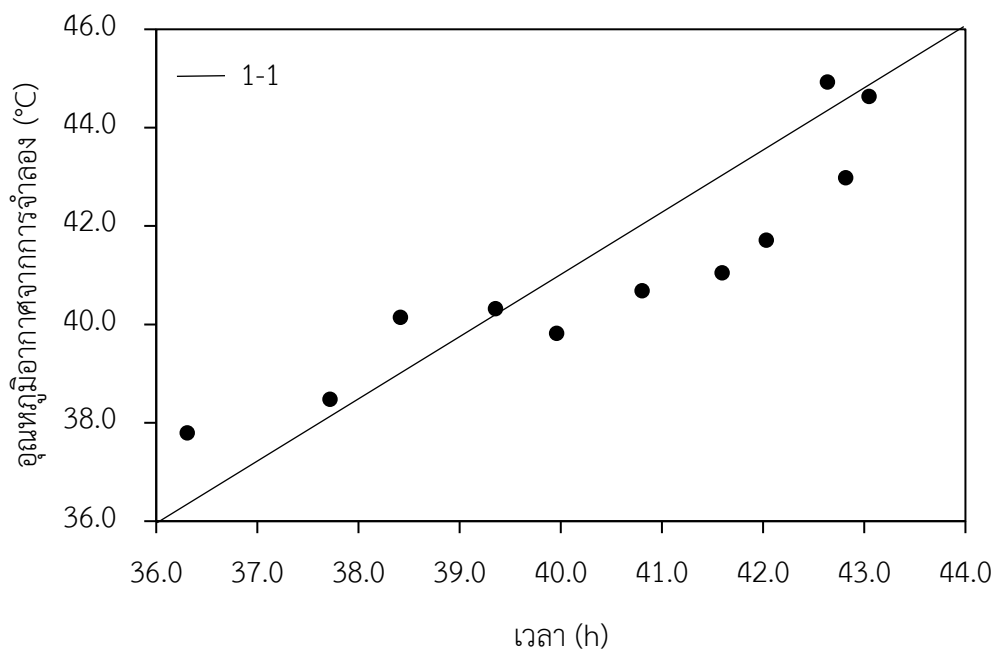
รูปที่ 47 การแปรค่าของอุณหภูมิอากาศภายในเครื่องอบแห้งจากแบบจำลอง (ใช้ข้อมูลจากการทดลองครั้งที่ 1)



รูปที่ 48 การแปรค่าของอุณหภูมิแผ่นโพลีเอทิลีนคาร์บอนเนตจากแบบจำลอง (ใช้ข้อมูลจากการทดลองครั้งที่ 1)

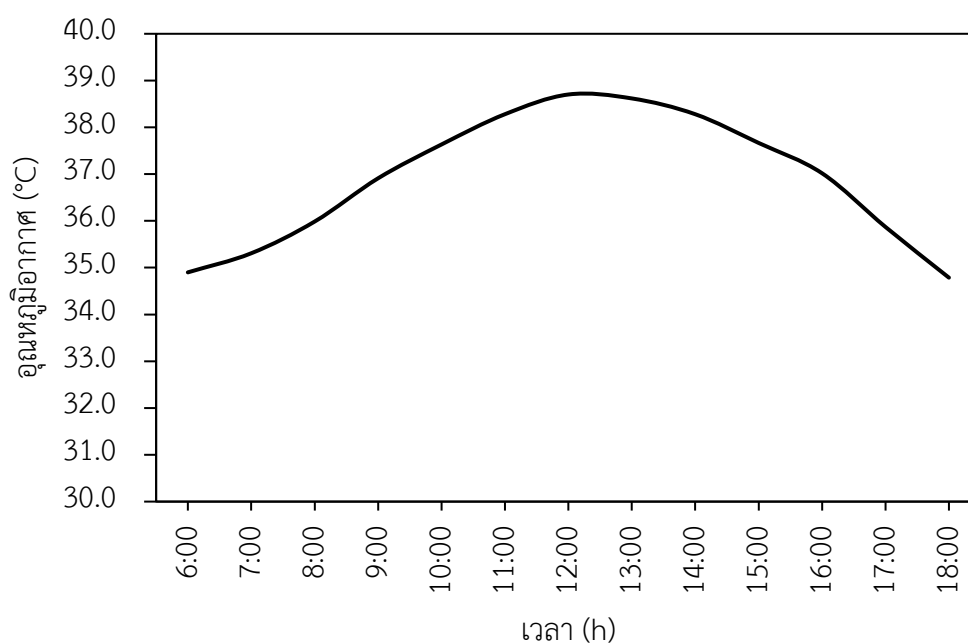


รูปที่ 49 การแปรค่าของอุณหภูมิพื้นคอนกรีตจากแบบจำลอง (ใช้ข้อมูลจากการทดลองครั้งที่ 1)

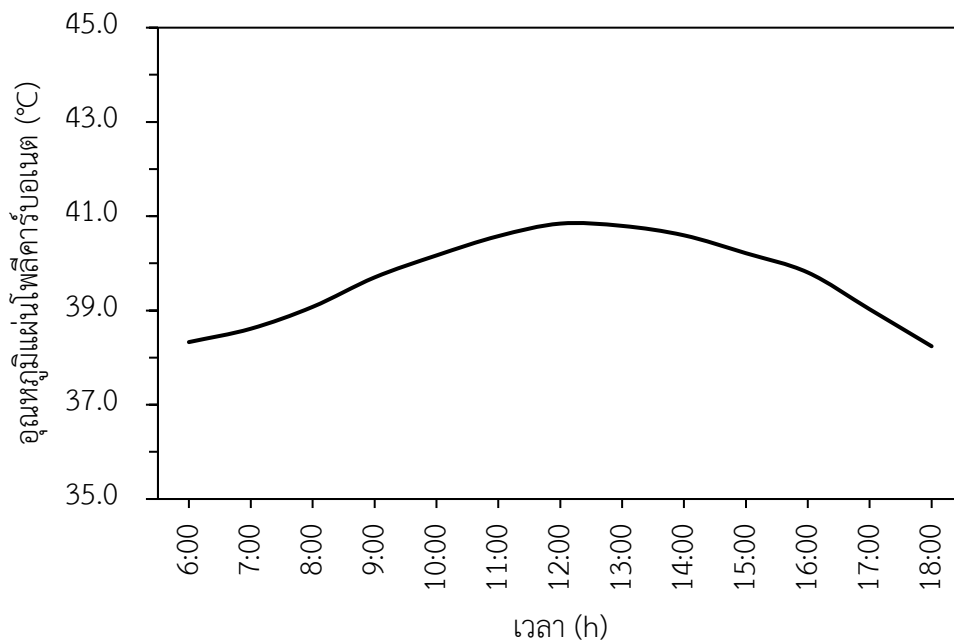


รูปที่ 50 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิอากาศภายในเครื่องอบแห้งจากแบบจำลองกับอุณหภูมิอากาศภายในเครื่องอบแห้งจากข้อมูลการทดลองครั้งที่ 1

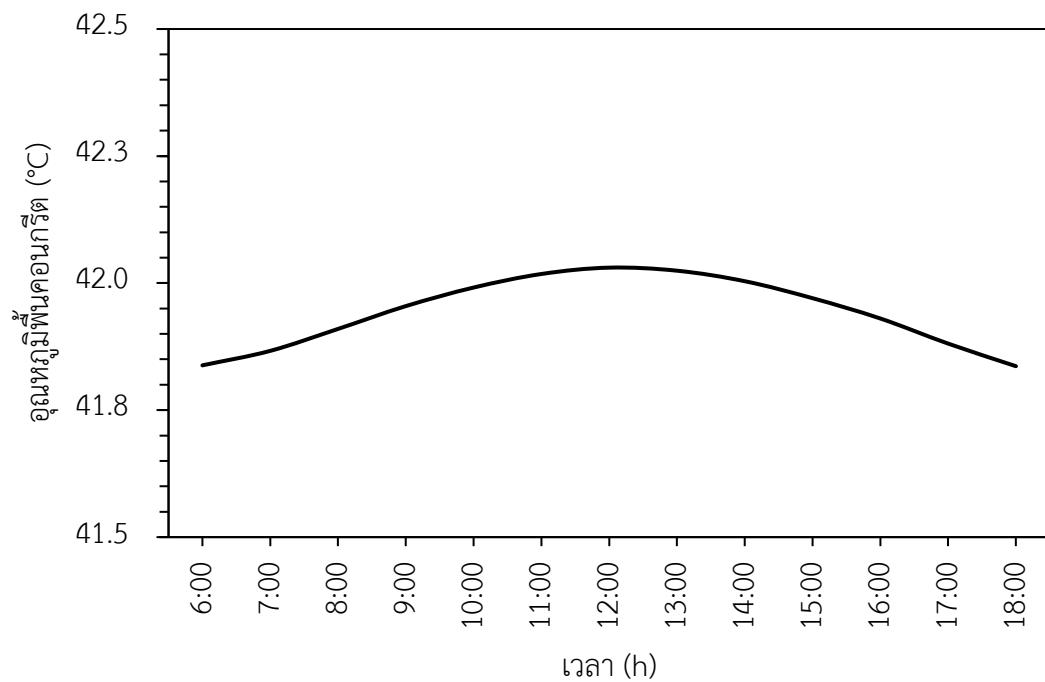
จากการเปรียบเทียบกับผลการทดลองครั้งที่ 2 พบว่าอุณหภูมิของอากาศภายในเครื่องอบแห้งมีค่าเพิ่มสูงขึ้นเนื่องจากอากาศได้รับการถ่ายเทความร้อนโดยการพาความร้อนจากพื้นคอนกรีต และจากแผ่นโพลีคาร์บอเนต (รูปที่ 56) และพบว่าอุณหภูมิของแผ่นโพลีคาร์บอเนตมีค่าเพิ่มสูงขึ้นเนื่องจากแผ่นโพลีคาร์บอเนตได้รับพลังงานความร้อนจากการดูดซับรังสีอาทิตย์ และจากการแผ่รังสีความร้อนจากพื้นคอนกรีต (รูปที่ 57) นอกจากนี้ยังพบว่าอุณหภูมิของพื้นคอนกรีตมีค่าเพิ่มขึ้นเนื่องจากพื้นคอนกรีตได้รับพลังงานความร้อนจากการดูดซับรังสีอาทิตย์ (รูปที่ 58) ได้ความร้อนจากการแผ่รังสีความร้อนจากแผ่นโพลีคาร์บอเนต และจากการเปรียบเทียบผลลัพธ์ที่ได้จากแบบจำลองกับผลจากการทดลองของอุณหภูมิอากาศภายในเครื่องอบแห้ง พบว่าผลที่ได้จากแบบจำลองมีความสอดคล้องกับผลที่ได้จากการทดลอง โดยมีค่า R^2 เท่ากับ 0.9624 ค่า MAE เท่ากับ 0.8330°C ค่า RMSE เท่ากับ 0.9283°C



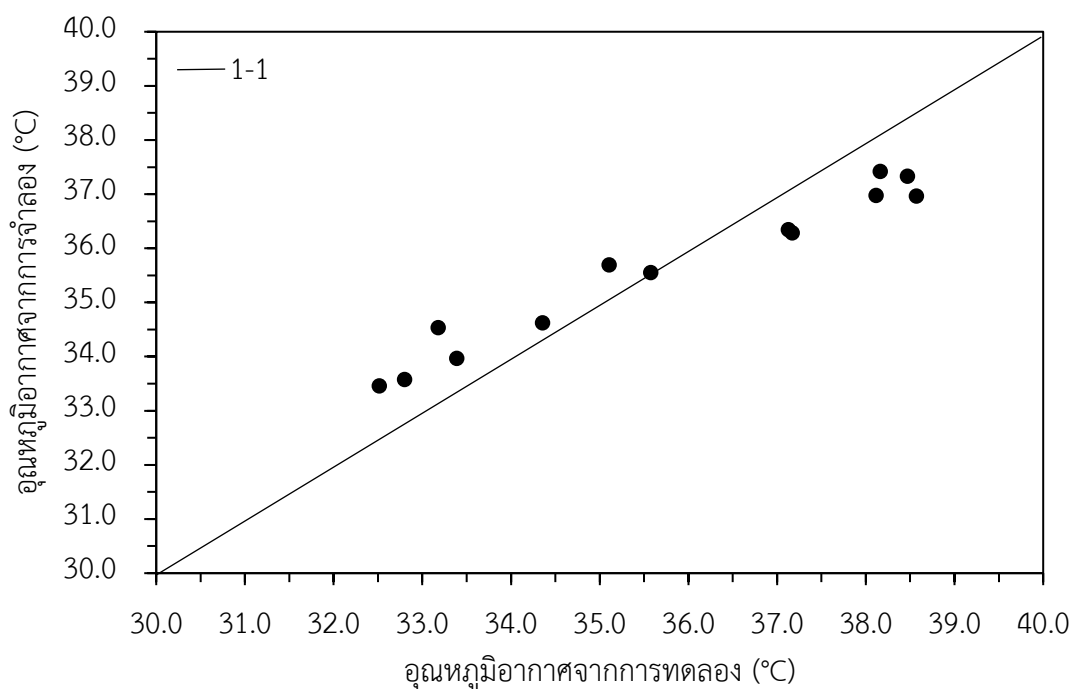
รูปที่ 51 การแปรค่าของอุณหภูมิอากาศภายในเครื่องอบแห้งจากแบบจำลอง (ใช้ข้อมูลจากการทดลองครั้งที่ 2)



รูปที่ 52 การแปรค่าของอุณหภูมิแผ่นโพลีคาร์บอเนตจากแบบจำลอง (ใช้ข้อมูลจากการทดลองครั้งที่ 2)



รูปที่ 53 การแปรค่าของอุณหภูมิพื้นคอนกรีตจากแบบจำลอง (ใช้ข้อมูลจากการทดลองครั้งที่ 2)

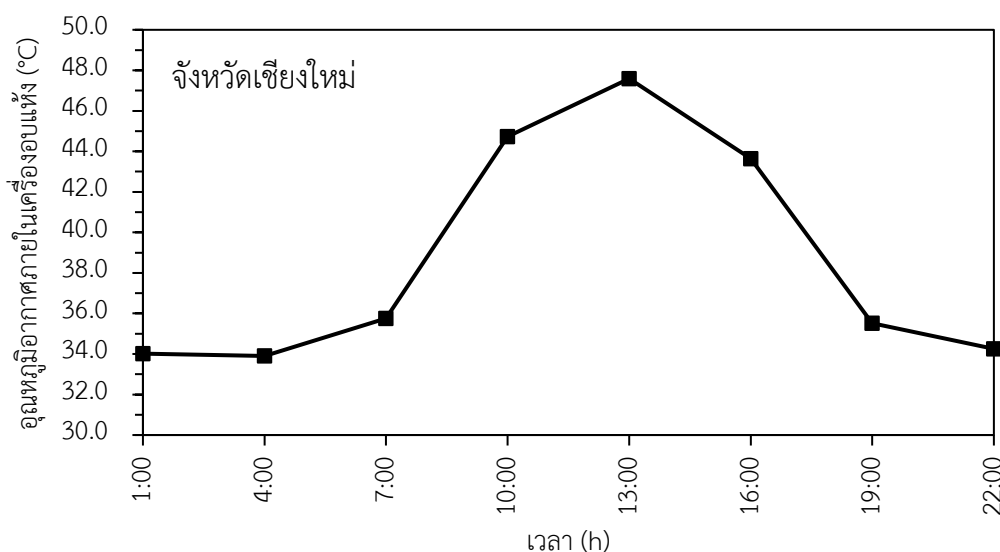


รูปที่ 54 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิอากาศภายในเครื่องอบแห้งจากแบบจำลองกับอุณหภูมิอากาศภายในเครื่องอบแห้งจากข้อมูลการทดลองครั้งที่ 2

จากผลของการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์นี้สามารถนำมาใช้งานได้จริงในการทำนายอุณหภูมิอากาศในเครื่องอบแห้ง แผ่นโพลีคาร์บอเนต และพื้นคอนกรีต ในสภาวะอากาศที่มีเมฆเต็มท้องฟ้า นอกจากนี้ยังสามารถศึกษาตัวแปรอื่น ๆ ที่มีผลต่ออุณหภูมิขององค์ประกอบของเครื่องอบแห้งเพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนาเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบพาราโบลาให้มีประสิทธิภาพในการทำความร้อนมากยิ่งขึ้น

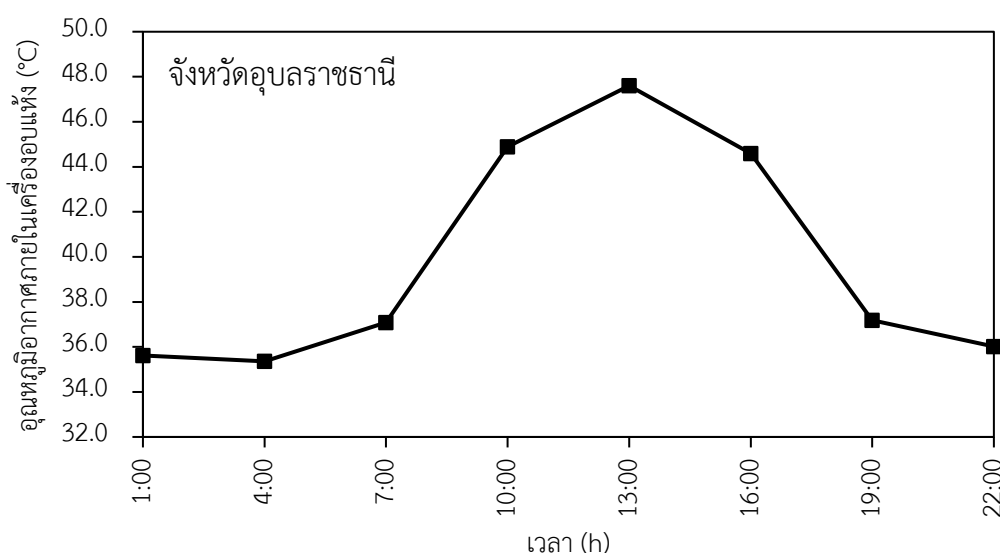
3.3.4 การจำลองแบบ

แบบจำลองที่ได้รับการตรวจสอบความถูกต้องเรียบร้อยแล้วจากขั้นตอนข้างต้น จะนำมาใช้ในการทำนายอุณหภูมิอากาศและประสิทธิภาพในการทำความร้อนของเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบพาราโบลาภายใต้สภาวะอากาศที่มีเมฆเต็มท้องฟ้า โดยใช้ข้อมูลสภาพอากาศ (ความเข้มรังสีอาทิตย์ อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศแวดล้อม) ในวันที่สภาพท้องฟ้ามีเมฆปกคลุมทั้งหมดจากสถานีอุตุนิยมวิทยา 3 ภูมิภาค ได้แก่ สถานีอุตุนิยมวิทยาทางภาคเหนือ (จังหวัดเชียงใหม่) สถานีอุตุนิยมวิทยาทางภาคตะวันออกเฉียงเหนือ (จังหวัดอุบลราชธานี) และสถานีอุตุนิยมวิทยาทางภาคใต้ (จังหวัดสงขลา) ซึ่งเป็นตัวแทนของแต่ละภูมิภาค จากนั้นทำการหาประสิทธิภาพในการทำความร้อนของเครื่องอบแห้ง



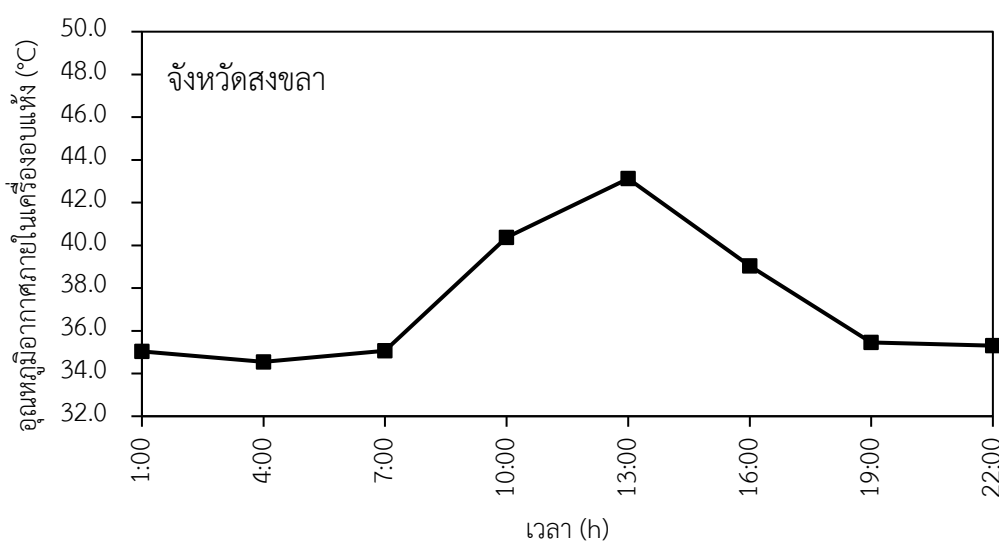
รูปที่ 55 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิอากาศภายในเครื่องอบแห้งจากแบบจำลองกับช่วงเวลาที่มีสถานะอากาศมีเมฆเต็มท้องฟ้าของสถานีอุตุนิยมวิทยาทางภาคเหนือ (14 สิงหาคม 2564)

รูปที่ 60 แสดงการแปรค่าของอุณหภูมิอากาศภายในเครื่องอบแห้งจากการจำลองแบบโดยใช้ข้อมูลสภาพอากาศของสถานีอุตุนิยมวิทยาทางภาคเหนือ (จังหวัดเชียงใหม่) ในวันที่ 14 สิงหาคม 2564 พบว่าอุณหภูมิของอากาศภายในเครื่องอบแห้งในช่วง 1:00 น. – 7:00 น. มีอุณหภูมิประมาณ 34°C และเมื่อเวลาผ่านไปอุณหภูมิมีค่าเพิ่มตามความเข้มรังสีอาทิตย์จนกระทั่งมีค่าสูงสุดเท่ากับ 48°C ในช่วงเวลา 13:00 น. และมีค่าลดลงเนื่องจากการคายร้อนและการลดลงของความเข้มรังสีอาทิตย์



รูปที่ 56 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิอากาศภายในเครื่องอบแห้งจากแบบจำลองกับช่วงเวลาที่มีสถานะอากาศมีเมฆเต็มท้องฟ้าของสถานีอุตุนิยมวิทยาทางภาคตะวันออกเฉียงเหนือ (21 มิถุนายน 2564)

รูปที่ 61 แสดงการแปรค่าอุณหภูมิอากาศภายในเครื่องอบแห้งจากการจำลองแบบโดยใช้ข้อมูลสภาพอากาศของสถานีอุตุนิยมวิทยาทางภาคตะวันออกเฉียงเหนือ (จังหวัดอุบลราชธานี) ในวันที่ 21 มิถุนายน 2564 พบว่าอุณหภูมิของอากาศภายในเครื่องอบแห้งในช่วง 1:00 น. – 7:00 น. มีอุณหภูมิประมาณ 35-36°C และเมื่อเวลาผ่านไปอุณหภูมิมีค่าเพิ่มตามความเข้มรังสีอาทิตย์จนกระทั่งมีค่าสูงสุดเท่ากับ 48°C ในช่วงเวลา 13:00 น. และมีค่าลดลงเนื่องจากการคายร้อนและการลดลงของความเข้มรังสีอาทิตย์



รูปที่ 57 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิอากาศภายในเครื่องอบแห้งจากแบบจำลองกับช่วงเวลาที่มีสภาพอากาศมีเมฆเต็มท้องฟ้าของสถานีอุตุนิยมวิทยาทางภาคใต้ (2 มกราคม 2564)

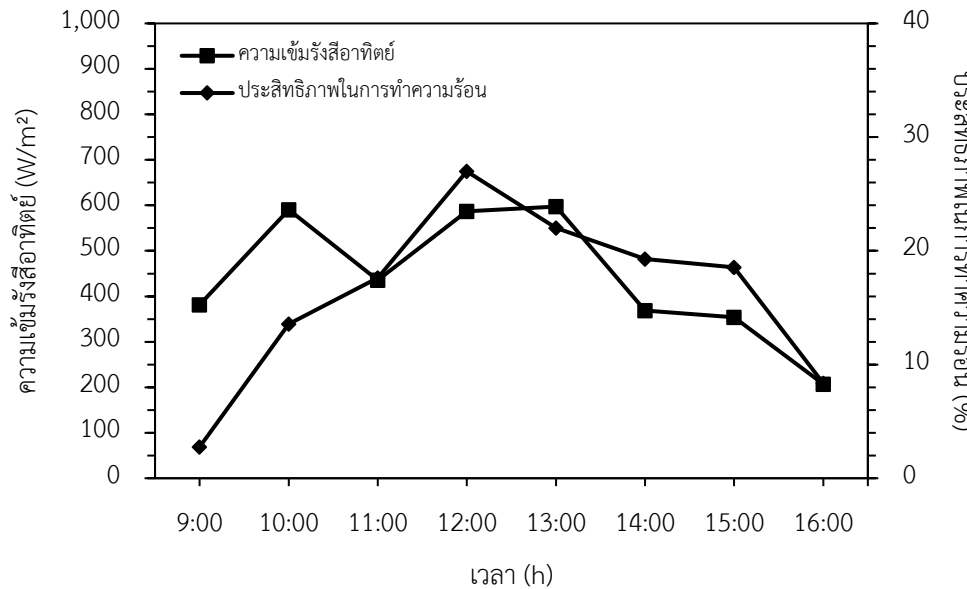
รูปที่ 62 แสดงการแปรค่าอุณหภูมิอากาศภายในเครื่องอบแห้งจากการจำลองแบบโดยใช้ข้อมูลสภาพอากาศของสถานีอุตุนิยมวิทยาทางภาคใต้ (จังหวัดสงขลา) ในวันที่ 2 มกราคม 2564 จากกราฟพบว่าอุณหภูมิของอากาศภายในเครื่องอบแห้งในช่วง 1:00 น. – 7:00 น. มีอุณหภูมิอยู่ในช่วงประมาณ 34-35°C และเมื่อเวลาผ่านไปอุณหภูมิมีค่าเพิ่มตามความเข้มรังสีอาทิตย์มีค่าสูงสุดเท่ากับ 43°C ในช่วงเวลา 13:00 น. และมีค่าลดลงเนื่องจากการคายร้อนและการลดลงของความเข้มรังสีอาทิตย์

3.3.5 ผลของรังสีกระจายต่อประสิทธิภาพในการทำความร้อนของเครื่องอบแห้งพลังงาน

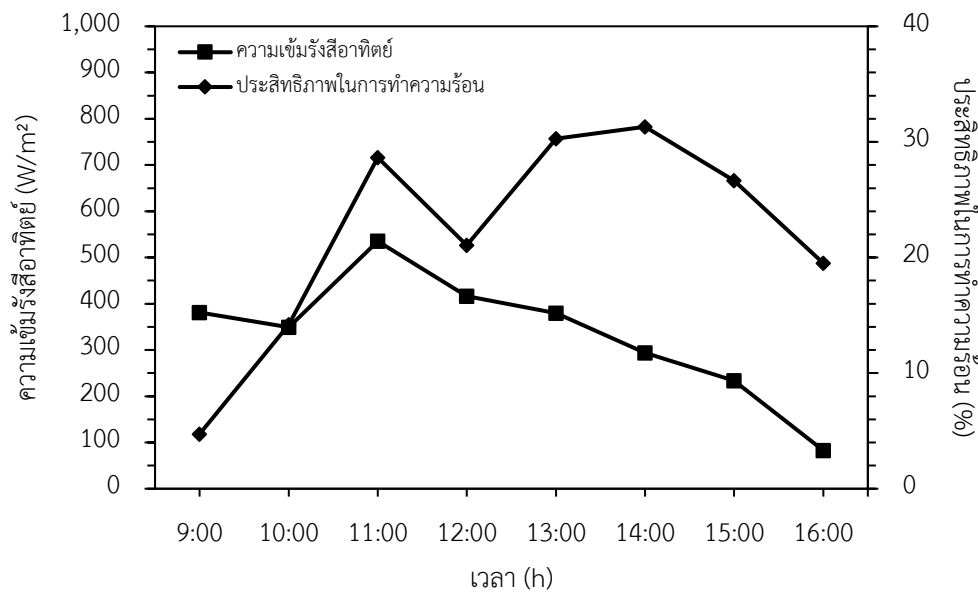
แสงอาทิตย์แบบพาราโบลา

จากการจำลองแบบโดยใช้ข้อมูลสภาพอากาศที่มีเต็มท้องฟ้าของสถานีอุตุนิยมวิทยาทั้ง 3 สถานี พบว่าประสิทธิภาพในการทำความร้อนสูงสุดของสถานีเชียงใหม่มีค่า 26.99% (รูปที่ 63) สถานีอุบลราชธานีมีค่า 31.31% (รูปที่ 64) และสถานีสงขลามีค่า 6.77% (รูปที่ 65) ดังนั้นในการ

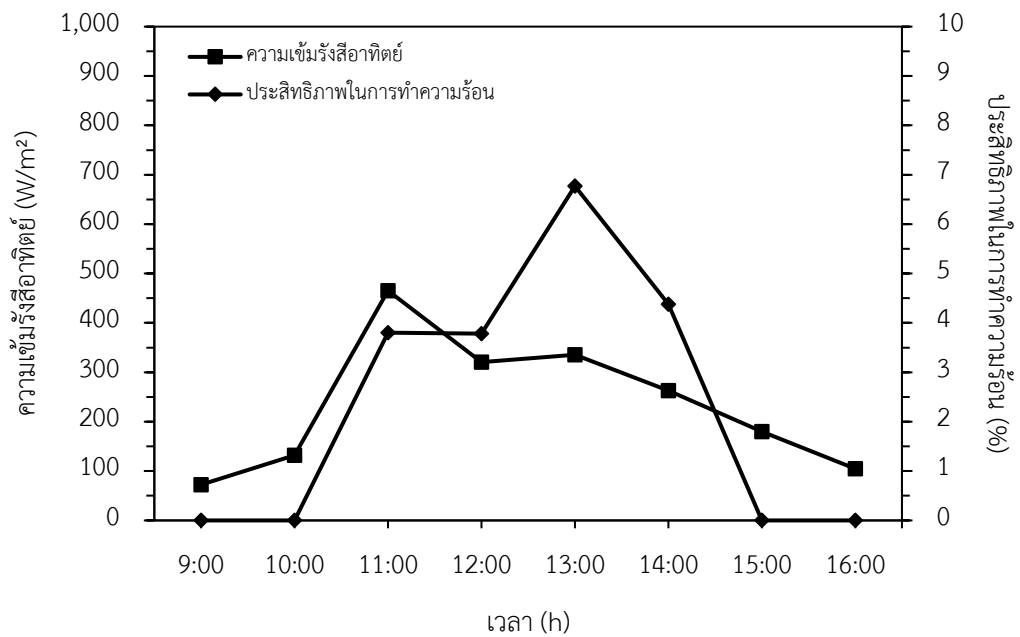
ติดตั้งเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบพาราโบลาจึงมีความเหมาะสมในการนำไปติดตั้งที่จังหวัด เชียงใหม่และอุบลราชธานีเนื่องจากมีอุณหภูมิและประสิทธิภาพในการทำความร้อนของเครื่องอบแห้ง ที่เหมาะสมในการอบแห้งผลิตภัณฑ์ได้



รูปที่ 58 ประสิทธิภาพในการทำความร้อนของเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบพาราโบลาที่ จังหวัดเชียงใหม่



รูปที่ 59 ประสิทธิภาพในการทำความร้อนของเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบพาราโบลาที่ จังหวัดอุบลราชธานี



รูปที่ 60 ประสิทธิภาพในการทำความร้อนของเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบพาราโบลาที่จังหวัดสงขลา



บทที่ 4

สรุป

ในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยได้ทำการศึกษาผลของรังสีกระจายจากดวงอาทิตย์ที่มีต่อสมรรถนะของเครื่องอบแห้งแบบพาราโบลา โดยสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบพาราโบลาภายใต้สภาวะอากาศที่มีเมฆเต็มท้องฟ้าจากสมการการถ่ายเทความร้อนระหว่างองค์ประกอบของเครื่องอบแห้ง และหาผลเฉลยโดยใช้ระเบียบวิธีการผลต่างจำกัดแบบผลต่างทางด้านหน้าซึ่งให้ผลเฉลยเป็นแบบโดยปริยาย และหลังจากนั้นได้ทำการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองโดยใช้ข้อมูลจากการบันทึกจริง 2 ครั้ง ในวันที่สภาพท้องฟ้ามีเมฆปกคลุมทั้งหมดที่จังหวัดนครปฐม มาเปรียบเทียบเพื่อหาความคลาดเคลื่อนของอุณหภูมิอากาศภายในเครื่องอบแห้ง จากการจำลองแบบโดยมีค่า R^2 เท่ากับ 0.8281 และ 0.9624 ตามลำดับ ค่า MBE เท่ากับ 0.7780°C และ 0.8330°C ตามลำดับ และค่า RMSE เท่ากับ 1.0739°C และ 0.9283°C ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าแบบจำลองนี้สามารถนำไปใช้งานได้จริง และผลจากการจำลองแบบพบว่าอุณหภูมิอากาศภายในเครื่องอบแห้งแปรค่าตามความเข้มรังสีอาทิตย์ โดยอุณหภูมิของอากาศจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามค่ารังสีอาทิตย์ที่เพิ่มขึ้น และมีค่าลดลงตามความเข้มรังสีอาทิตย์ที่ลดลงเช่นกัน

นอกจากนี้ผู้วิจัยได้นำแบบจำลองที่ผ่านการตรวจสอบความถูกต้องแล้วมาใช้งานโดยใช้ข้อมูลสภาพอากาศที่เมฆปกคลุมเต็มท้องฟ้า ได้แก่ ความเข้มรังสีอาทิตย์ อุณหภูมิอากาศและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศแวดล้อมจากสถานีอุตุนิยมวิทยา 3 สถานี ในแต่ละภูมิภาคของประเทศไทย ได้แก่ สถานีอุตุนิยมวิทยาทางภาคเหนือ (จังหวัดเชียงใหม่) สถานีอุตุนิยมวิทยาทางภาคตะวันออกเฉียงเหนือ (จังหวัดอุบลราชธานี) และสถานีอุตุนิยมวิทยาทางภาคใต้ (จังหวัดสงขลา) ซึ่งผลจากการจำลองแบบ พบว่าประสิทธิภาพในการทำความร้อนของเครื่องอบแห้งที่สถานีอุตุนิยมวิทยาทางภาคตะวันออกเฉียงเหนือ (จังหวัดอุบลราชธานี) มีค่าสูงที่สุดเท่ากับ 31.31% ประสิทธิภาพในการทำความร้อนของเครื่องอบแห้งที่สถานีอุตุนิยมวิทยาทางภาคเหนือ (จังหวัดเชียงใหม่) มีค่าเท่ากับ 26.99% และประสิทธิภาพในการทำความร้อนของเครื่องอบแห้งที่สถานีอุตุนิยมวิทยาทางภาคใต้ (จังหวัดสงขลา) มีค่าเท่ากับ 6.77% ดังนั้นจากประสิทธิภาพในการทำความร้อนของเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบพาราโบลา ภายใต้สภาวะอากาศที่เมฆปกคลุมเต็มท้องฟ้า พบว่าสภาวะอากาศที่จังหวัดเชียงใหม่และอุบลราชธานีมีความเหมาะสมในการติดตั้งเครื่องอบแห้งเนื่องจากอุณหภูมิอากาศอยู่ในช่วงที่เหมาะสมต่อการอบแห้งผลิตผลทางการเกษตร





ภาคผนวก ก

ข้อมูลสภาพอากาศของ 3 สถานี ได้แก่ สถานีอุตุนิยมวิทยาทางภาคเหนือ (จังหวัดเชียงใหม่)
สถานีอุตุนิยมวิทยาทางภาคตะวันออกเฉียงเหนือ (จังหวัดอุบลราชธานี) และสถานีอุตุนิยมวิทยาทาง
ภาคใต้ (จังหวัดสงขลา)

ตารางที่ 2 ข้อมูลสภาพอากาศของสถานีอุตุนิยมวิทยาทางภาคเหนือ (จังหวัดเชียงใหม่)

สถานีอุตุนิยมวิทยาทางภาคตะวันออกเฉียงเหนือ (จังหวัดอุบลราชธานี)

และสถานีอุตุนิยมวิทยาทางภาคใต้ (จังหวัดสงขลา)




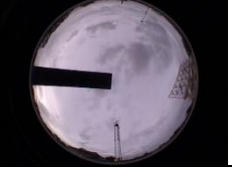
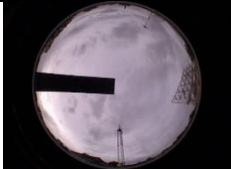
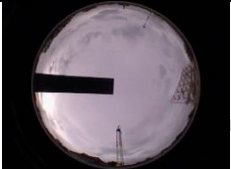
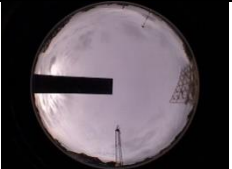
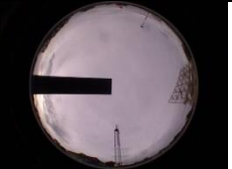


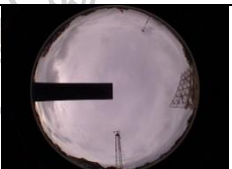
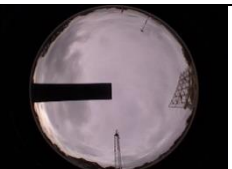
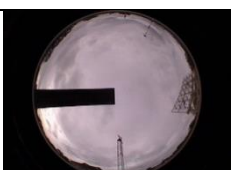


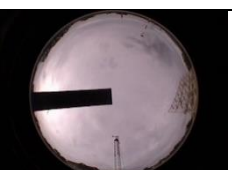



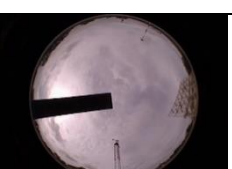
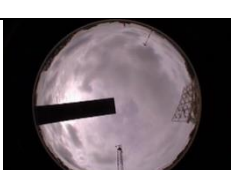
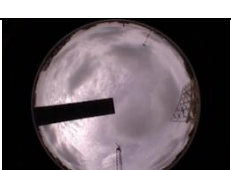
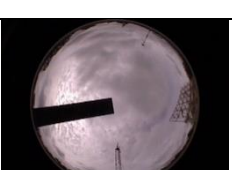
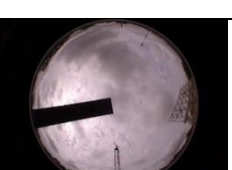
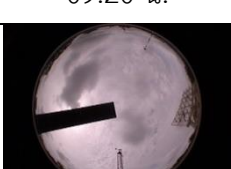
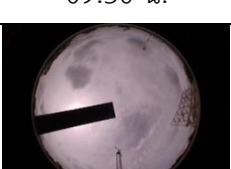

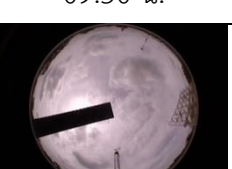
เวลา (hh:mm)	ความเข้มรังสีอาทิตย์ (W/m ²)		
	จังหวัดเชียงใหม่ วันที่ 14 สิงหาคม 2564	จังหวัดอุบลราชธานี วันที่ 21 มิถุนายน 2564	จังหวัดสงขลา วันที่ 2 มกราคม 2564
00:00	-1.63	0.00	0.00
01:00	-1.63	0.00	0.00
02:00	-1.63	0.00	0.00
03:00	-1.65	0.68	0.00
04:00	-1.95	39.65	0.00
05:00	-1.77	130.18	0.00
06:00	23.24	389.46	2.13
07:00	118.36	320.88	34.08
08:00	272.66	381.27	128.03
09:00	381.06	349.50	72.35
10:00	590.64	535.18	131.96
11:00	435.32	416.32	465.24
12:00	586.98	379.47	320.55
13:00	597.27	293.93	335.37
14:00	369.07	233.65	262.80
15:00	354.15	82.83	180.00
16:00	207.03	0.62	104.35
17:00	68.72	0.00	31.27
18:00	8.01	0.00	0.00
19:00	-2.11	0.00	0.00
20:00	-0.82	0.00	0.00
21:00	-0.82	0.00	0.00
22:00	-0.82	0.00	0.00
23:00	-0.82	0.00	0.00



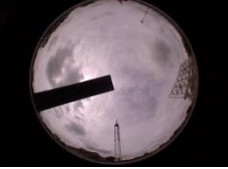
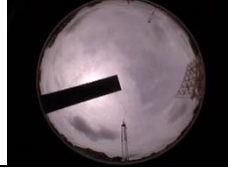
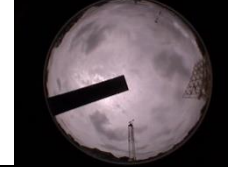

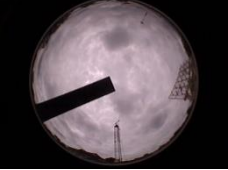
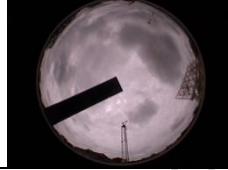
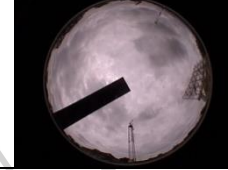
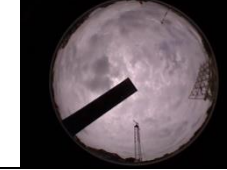
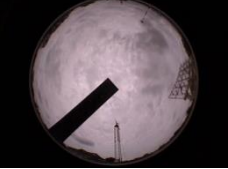
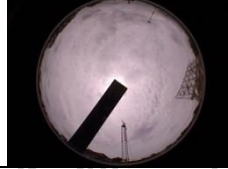
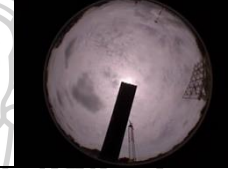
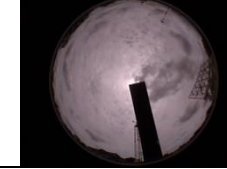
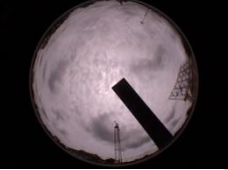
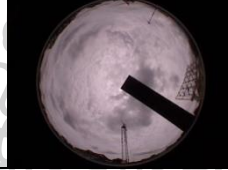
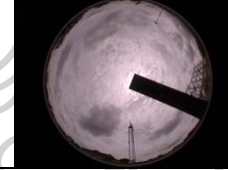
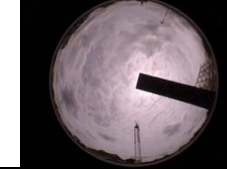
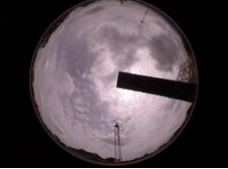
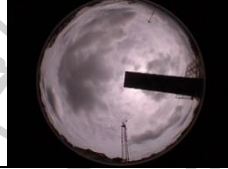
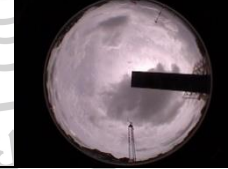
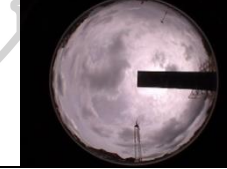
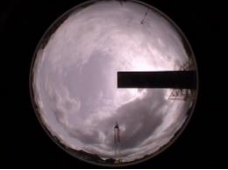
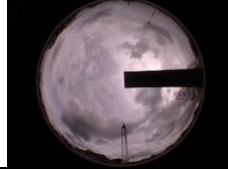
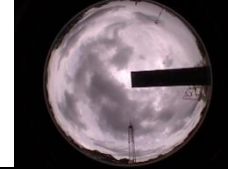
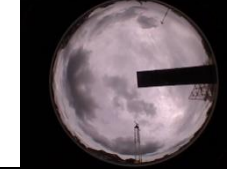
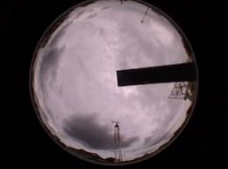
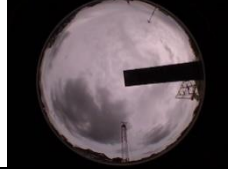
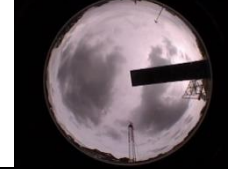

ภาคผนวก ข

ภาพถ่ายสภาพท้องฟ้าจากเครื่องถ่ายภาพท้องฟ้าของ 3 สถานี ได้แก่ สถานีอุตุนิยมวิทยาภาคเหนือ (จังหวัดเชียงใหม่) สถานีอุตุนิยมวิทยาทางภาคตะวันออกเฉียงเหนือ (จังหวัดอุบลราชธานี) และ สถานีอุตุนิยมวิทยาทางภาคใต้ (จังหวัดสงขลา)

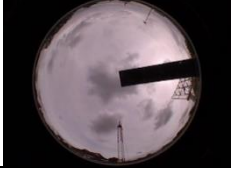

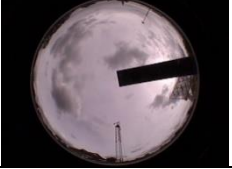
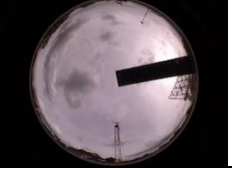
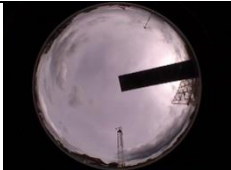
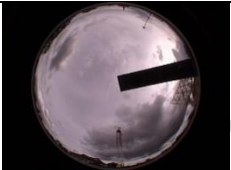
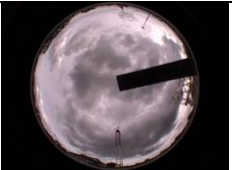
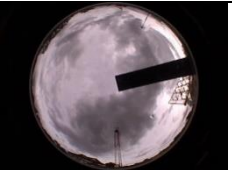
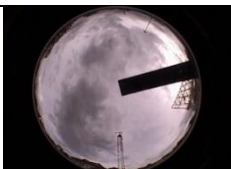
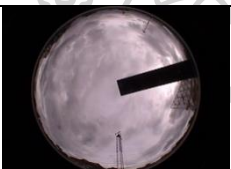

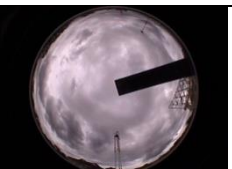
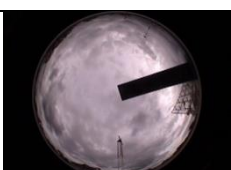


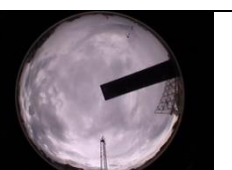
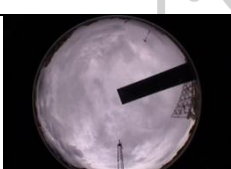
ตารางที่ 3 ภาพถ่ายสภาพท้องฟ้าจากเครื่องถ่ายภาพท้องฟ้าของสถานีอุตุนิยมวิทยาทางภาคเหนือ
(จังหวัดเชียงใหม่) วันที่ 14 เดือน สิงหาคม 2564

			
06:00 น.	06:10 น.	06:20 น.	6:30 น.
			
06:40 น.	06:50 น.	07:00 น.	07:10 น.
			
07:20 น.	07:30 น.	07:40 น.	07:50 น.
			
08:00 น.	08:10 น.	08:20 น.	08:30 น.
			
08:40 น.	08:50 น.	09:00 น.	09:10 น.
			
09:20 น.	09:30 น.	09:40 น.	09:50 น.
			
10:00 น.	10:10 น.	10:20 น.	10:30 น.




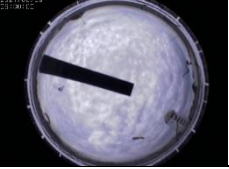










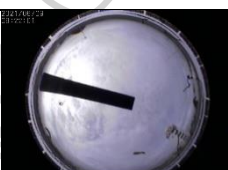
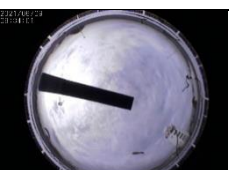


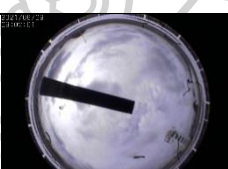
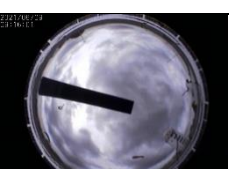
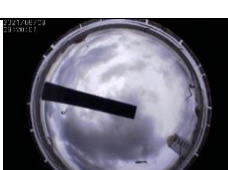


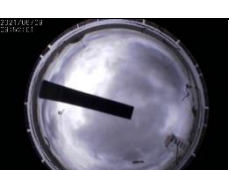




ตารางที่ 3 ภาพถ่ายสภาพท้องฟ้าจากเครื่องถ่ายภาพท้องฟ้าของสถานีอุตุนิยมวิทยาทางภาคเหนือ
(จังหวัดเชียงใหม่) วันที่ 14 เดือน สิงหาคม 2564 (ต่อ)

			
10:40 น.	10:50 น.	11:00 น.	11:10 น.
			
11:20 น.	11:30 น.	11:40 น.	11:50 น.
			
12:00 น.	12:10 น.	12:20 น.	12:30 น.
			
12:40 น.	12:50 น.	13:00 น.	13:10 น.
			
13:20 น.	13:30 น.	13:40 น.	13:50 น.
			
14:00 น.	14:10 น.	14:20 น.	14:30 น.
			
14:40 น.	14:50 น.	15:00 น.	15:10 น.

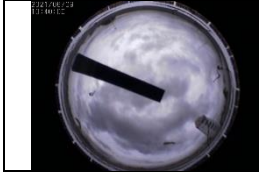
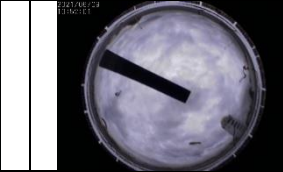
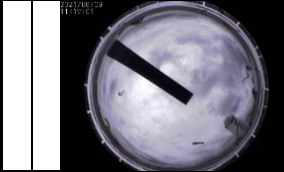
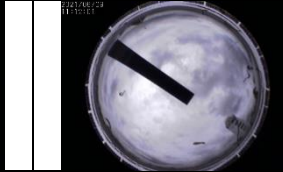



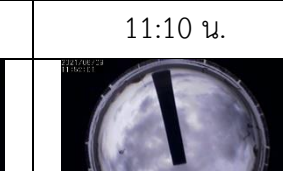
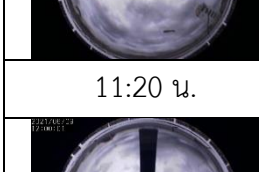



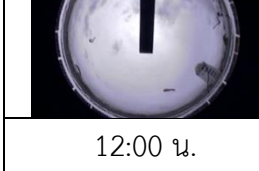
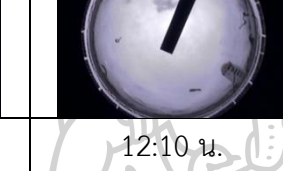
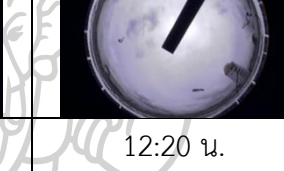
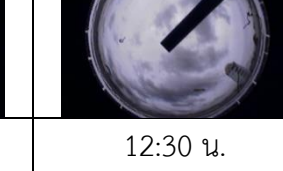







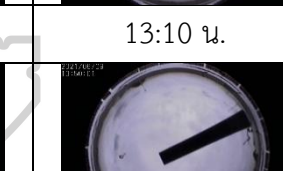




ตารางที่ 3 ภาพถ่ายสภาพท้องฟ้าจากเครื่องถ่ายภาพท้องฟ้าของสถานีอุตุนิยมวิทยาทางภาคเหนือ
(จังหวัดเชียงใหม่) วันที่ 14 เดือน สิงหาคม 2564 (ต่อ)

			
15:20 น.	15:30 น.	15:40 น.	15:50 น.
			
16:00 น.	16:10 น.	16:20 น.	16:30 น.
			
16:40 น.	16:50 น.	17:00 น.	17:10 น.
			
17:20 น.	17:30 น.	17:40 น.	17:50 น.
			
18:00 น.			




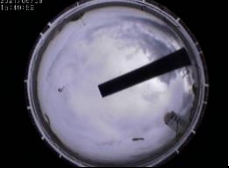



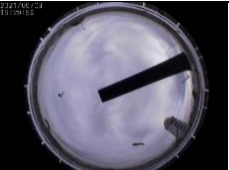









ตารางที่ 4 ภาพถ่ายสภาพท้องฟ้าจากเครื่องถ่ายภาพท้องฟ้าของสถานีอุตุนิยมวิทยาทางภาค
ตะวันออกเฉียงเหนือ (จังหวัดอุบลราชธานี) วันที่ 21 เดือน มิถุนายน 2564

			
06:00 น.	06:10 น.	06:20 น.	6:30 น.
			
06:40 น.	06:50 น.	07:00 น.	07:10 น.
			
07:20 น.	07:30 น.	07:40 น.	07:50 น.
			
08:00 น.	08:10 น.	08:20 น.	08:30 น.
			
08:40 น.	08:50 น.	09:00 น.	09:10 น.
			
09:20 น.	09:30 น.	09:40 น.	09:50 น.
			
10:00 น.	10:10 น.	10:20 น.	10:30 น.



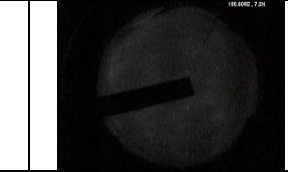




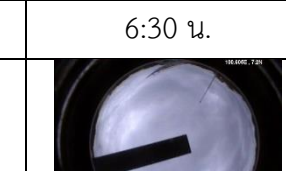










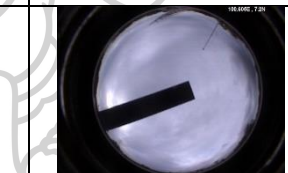
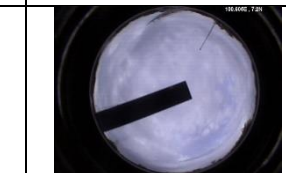

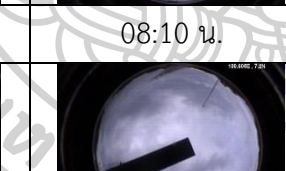
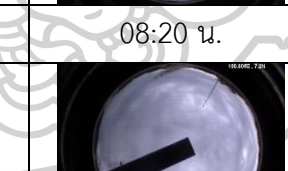
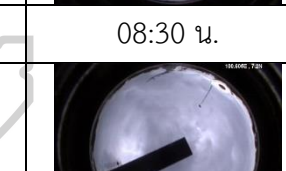

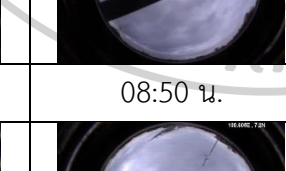


ตารางที่ 4 ภาพถ่ายสภาพท้องฟ้าจากเครื่องถ่ายภาพท้องฟ้าของสถานีอุตุนิยมวิทยาทางภาค
ตะวันออกเฉียงเหนือ (จังหวัดอุบลราชธานี) วันที่ 21 เดือน มิถุนายน 2564 (ต่อ)

			
10:40 น.	10:50 น.	11:00 น.	11:10 น.
			
11:20 น.	11:30 น.	11:40 น.	11:50 น.
			
12:00 น.	12:10 น.	12:20 น.	12:30 น.
			
12:40 น.	12:50 น.	13:00 น.	13:10 น.
			
13:20 น.	13:30 น.	13:40 น.	13:50 น.
			
14:00 น.	14:10 น.	14:20 น.	14:30 น.
			
14:40 น.	14:50 น.	15:00 น.	15:10 น.

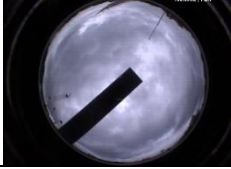
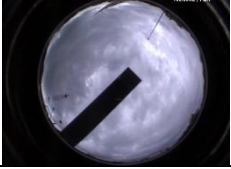
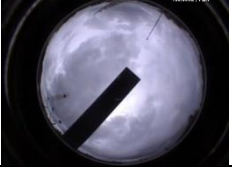
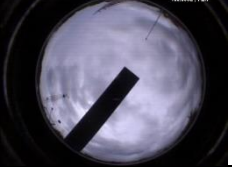
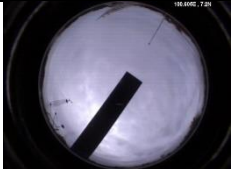
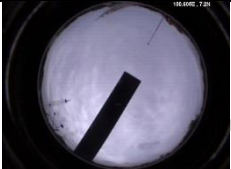

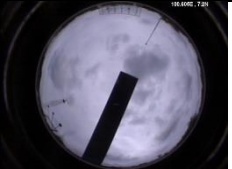
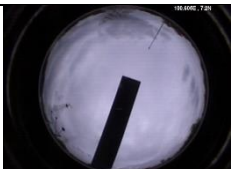

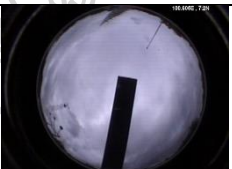
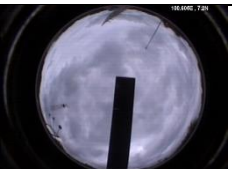


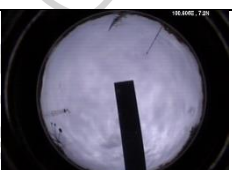
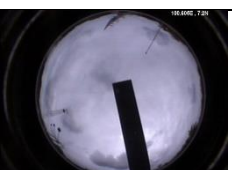
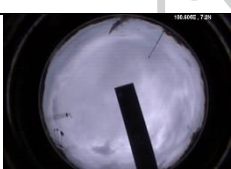


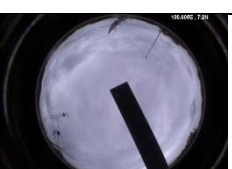

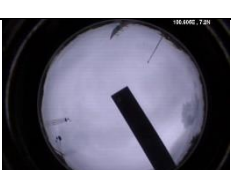
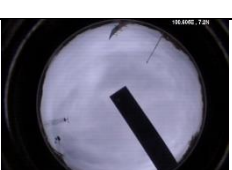
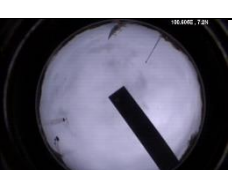




ตารางที่ 4 ภาพถ่ายสภาพท้องฟ้าจากเครื่องถ่ายภาพท้องฟ้าของสถานีอุตุนิยมวิทยาทางภาค
ตะวันออกเฉียงเหนือ (จังหวัดอุบลราชธานี) วันที่ 21 เดือน มิถุนายน 2564 (ต่อ)

			
15:20 น.	15:30 น.	15:40 น.	15:50 น.
			
16:00 น.	16:10 น.	16:20 น.	16:30 น.
			
16:40 น.	16:50 น.	17:00 น.	17:10 น.
			
17:20 น.	17:30 น.	17:40 น.	17:50 น.
			
18:00 น.			

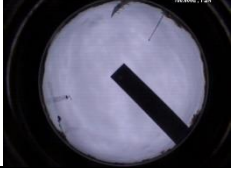
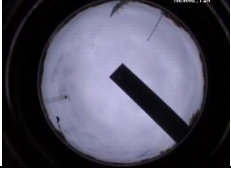

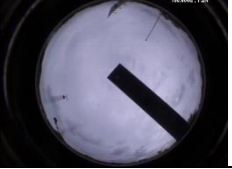
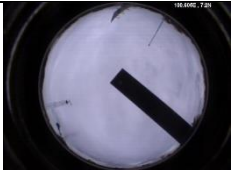
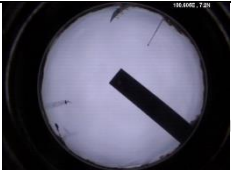
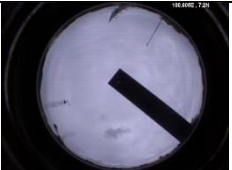
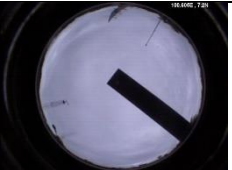


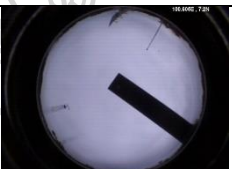

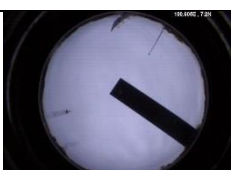
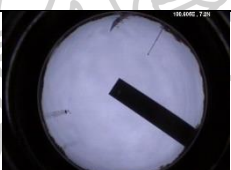
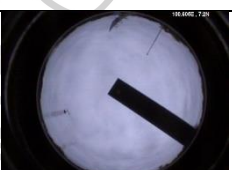
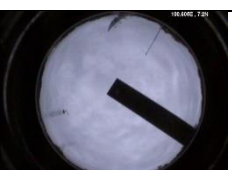

ตารางที่ 5 ภาพถ่ายสภาพท้องฟ้าจากเครื่องถ่ายภาพท้องฟ้าของสถานีอุตุนิยมวิทยาทางภาคใต้
(จังหวัดสงขลา) วันที่ 2 เดือน มกราคม 2564

			
06:00 น.	06:10 น.	06:20 น.	6:30 น.
			
06:40 น.	06:50 น.	07:00 น.	07:10 น.
			
07:20 น.	07:30 น.	07:40 น.	07:50 น.
			
08:00 น.	08:10 น.	08:20 น.	08:30 น.
			
08:40 น.	08:50 น.	09:00 น.	09:10 น.
			
09:20 น.	09:30 น.	09:40 น.	09:50 น.
			
10:00 น.	10:10 น.	10:20 น.	10:30 น.

ตารางที่ 5 ภาพถ่ายสภาพท้องฟ้าจากเครื่องถ่ายภาพท้องฟ้าของสถานีอุตุนิยมวิทยาทางภาคใต้
(จังหวัดสงขลา) วันที่ 2 เดือน มกราคม 2564 (ต่อ)

			
10:40 น.	10:50 น.	11:00 น.	11:10 น.
			
11:20 น.	11:30 น.	11:40 น.	11:50 น.
			
12:00 น.	12:10 น.	12:20 น.	12:30 น.
			
12:40 น.	12:50 น.	13:00 น.	13:10 น.
			
13:20 น.	13:30 น.	13:40 น.	13:50 น.
			
14:00 น.	14:10 น.	14:20 น.	14:30 น.
			
14:40 น.	14:50 น.	15:00 น.	15:10 น.

ตารางที่ 5 ภาพถ่ายสภาพท้องฟ้าจากเครื่องถ่ายภาพท้องฟ้าของสถานีอุตุนิยมวิทยาทางภาคใต้
(จังหวัดสงขลา) วันที่ 2 เดือน มกราคม 2564 (ต่อ)

			
15:20 น.	15:30 น.	15:40 น.	15:50 น.
			
16:00 น.	16:10 น.	16:20 น.	16:30 น.
			
16:40 น.	16:50 น.	17:00 น.	17:10 น.
			
17:20 น.	17:30 น.	17:40 น.	17:50 น.
			
18:00 น.			

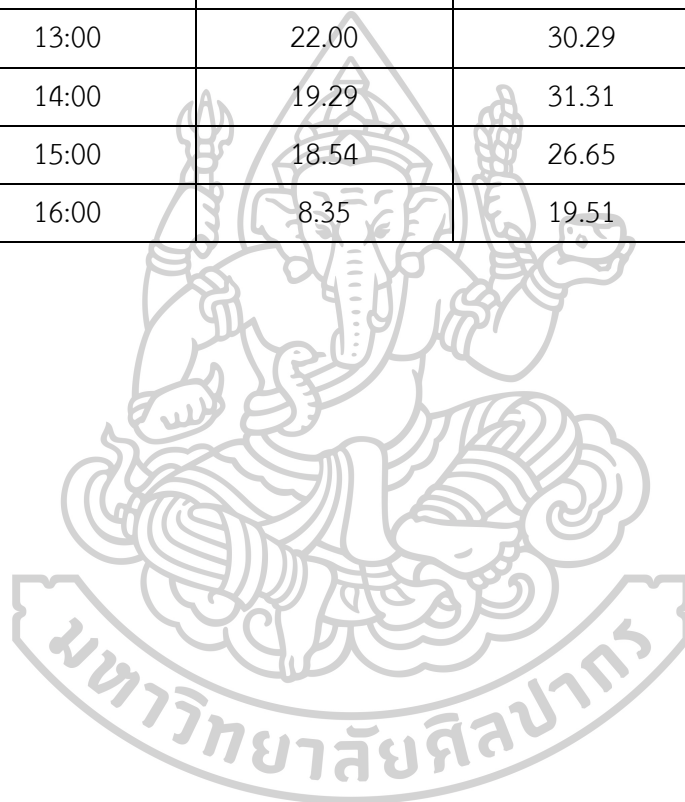


ภาคผนวก ค

ประสิทธิภาพในการทำความร้อนของเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์จากผลของการจำลองแบบ

ตารางที่ 6 ประสิทธิภาพในการทำความร้อนของเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์

เวลา (hh:mm)	ประสิทธิภาพในการทำความร้อน (%)		
	เชียงใหม่	อุบลราชธานี	สงขลา
9:00	2.75	4.73	0.00
10:00	13.58	14.18	0.00
11:00	17.61	28.65	3.80
12:00	26.99	21.06	3.78
13:00	22.00	30.29	6.77
14:00	19.29	31.31	4.38
15:00	18.54	26.65	0.00
16:00	8.35	19.51	0.00



รายการอ้างอิง

- Aboudi, J., Arnold, S. M., & Bednarczyk, B. A. (2013). *Micromechanics of composite materials: a generalized multiscale analysis approach*: Butterworth-Heinemann.
- Aumporn, O. (2017). *Contribution à l'étude des performances d'un séchoir serre avec stockage de chaleur dans des matériaux à changement de phase*. Perpignan,
- Aumporn, O., Pankaew, P., & Janjai, S. (2021). Experimental Performance and Auto-Regressive with exogenous Input (ARX) Modelling of an Anti-UV Polycarbonate Sheet-covered Solar Dryer Equipped with a Control System for Drying Para Rubber Sheets. *Journal of Renewable Energy and Smart Grid Technology*, 16(2), 68-80.
- Babar, O. A., Tarafdar, A., Malakar, S., Arora, V. K., & Nema, P. K. (2020). Design and performance evaluation of a passive flat plate collector solar dryer for agricultural products. *Journal of Food Process Engineering*, 43(10), e13484. doi:<https://doi.org/10.1111/jfpe.13484>
- Bekkioui, N. (2021). Performance comparison and economic analysis of three solar dryer designs for wood using a numerical simulation. *Renewable Energy*, 164, 815-823.
- Bergman, T. L., Incropera, F. P., Dewitt, D. P., & Lavine, A. S. (2011). *Fundamentals of heat and mass transfer*: John Wiley & Sons.
- Çengel, Y., & Ghajar, A. (2020). *Heat and Mass Transfer: Fundamentals [and] Applications*. New York City. In: United States: McGraw-Hill Education.
- Davidzon, M. I. (2012). Newton's law of cooling and its interpretation. *International journal of heat and mass transfer*, 55(21-22), 5397-5402.
- Dharmadurai, P. L., Vasanthaseelan, S., Bharathwaaj, R., Dharmaraj, V., Gnanasekaran, K., Balaji, D., & Sathyamurthy, R. (2020). A comparative study on solar dryer using external reflector for drying grapes. *Materials Today: Proceedings*.
- Dufer, L. T., Hofacker, W., Esper, A., & Hensel, O. (2021). Physicochemical quality of twin layer solar tunnel dried tomato slices. *Heliyon*, 7(5), e07127.
- Duffie, J. A., Beckman, W. A., & Blair, N. (2020). *Solar engineering of thermal processes, photovoltaics and wind*: John Wiley & Sons.

- Durand, M., Murchie, E. H., Lindfors, A. V., Urban, O., Aphalo, P. J., & Robson, T. M. (2021). Diffuse solar radiation and canopy photosynthesis in a changing environment. *Agricultural and Forest Meteorology*, 311, 108684. doi:<https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2021.108684>
- El-Sebaei, A. A., & Shalaby, S. M. (2013). Experimental investigation of an indirect-mode forced convection solar dryer for drying thymus and mint. *Energy conversion and management*, 74, 109-116. doi:<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2013.05.006>
- Goldschmidt, J. C., & van Sark, W. G. J. H. M. (2022). Luminescent Solar Concentrator. In T. M. Letcher (Ed.), *Comprehensive Renewable Energy (Second Edition)* (pp. 561-581). Oxford: Elsevier.
- Gugliuzza, A., & Basile, A. (2014). *Membranes for clean and renewable power applications*: Woodhead Publishing.
- Gupta, M. K., Buntariya, K. J., Shukla, H., Patel, P., & Khan, Z. (2017). Methods for evaluation of radiation view factor: a review. *Materials Today: Proceedings*, 4(2), 1236-1243.
- Hidalgo, L. F., Candido, M. N., Nishioka, K., Freire, J. T., & Vieira, G. N. A. (2021). Natural and forced air convection operation in a direct solar dryer assisted by photovoltaic module for drying of green onion. *Solar Energy*, 220, 24-34. doi:10.1016/j.solener.2021.02.061
- Jain, D. (2005). Modeling the performance of greenhouse with packed bed thermal storage on crop drying application. *Journal of Food Engineering*, 71(2), 170-178.
- Jain, D., & Tiwari, G. (2003). Modeling and optimal design of ground air collector for heating in controlled environment greenhouse. *Energy conversion and management*, 44(8), 1357-1372.
- Jain, D., & Tiwari, G. N. (2004). Effect of greenhouse on crop drying under natural and forced convection I: Evaluation of convective mass transfer coefficient. *Energy conversion and management*, 45(5), 765-783. doi:[https://doi.org/10.1016/S0196-8904\(03\)00178-X](https://doi.org/10.1016/S0196-8904(03)00178-X)
- Janjai, S., Intawee, P., Kaewkiew, J., Sritus, C., & Khamvongsa, V. (2011). A large-scale solar greenhouse dryer using polycarbonate cover: Modeling and testing in a tropical environment of Lao People's Democratic Republic. *Renewable Energy*, 36(3),

1053-1062.

- Janjai, S., Lamlert, N., Intawee, P., Mahayothee, B., Bala, B. K., Nagle, M., & Müller, J. (2009). Experimental and simulated performance of a PV-ventilated solar greenhouse dryer for drying of peeled longan and banana. *Solar Energy*, 83(9), 1550-1565.
- Jankovic, J., Ogle, B. R., Zontek, T. L., Biegalski, M. D., Hollenbeck, S. M., & Wells, T. M. (2016). Suitability of polycarbonate safety glasses for UV laser eye protection. *Journal of Chemical Health & Safety*, 23(2), 29-33.
- Krungrakaw, S., Kingphadung, K., Kwonpongsagoon, S., & Mahayothee, B. (2020). Costs and benefits of using parabolic greenhouse solar dryers for dried herb products in Thailand. *GEOMATE Journal*, 18(67), 96-101.
- Lakshmi, D. V. N., Muthukumar, P., Layek, A., & Nayak, P. K. (2019). Performance analyses of mixed mode forced convection solar dryer for drying of stevia leaves. *Solar Energy*, 188, 507-518. doi:<https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.06.009>
- Mane, S. (2017). *DESIGN AND PERFORMANCE EVALUATION OF DIRECT MODE SOLAR DRYER*.
- Menon, E. S. (2015). Fluid flow in pipes. *Transmission Pipeline Calculations and Simulations Manual*, 149-234.
- Misha, S., Alqadhi, A., Mohd Rosli, M. A., & Yusof, A. (2018). Experimental investigation on indirect, natural and forced convection mixed mode solar dryer. *International Journal of Mechanical and Mechatronics Engineering*, 18, 87-96.
- Mobtaker, H. G., Ajabshirchi, Y., Ranjbar, S. F., & Matloobi, M. (2019). Simulation of thermal performance of solar greenhouse in north-west of Iran: an experimental validation. *Renewable Energy*, 135, 88-97.
- Nummer, B. A., & Brian, A. (2002). Historical origins of food preservation. *National Center for Home Food Preservation. University of Illinois Extension*.
- Pierre Damien, U. (2018). *Study And Simulation Of A Solar System For Drying Purpose In Rwanda*. Institut Teknologi Sepuluh Nopember,
- Roratto, T. B., Monteiro, R. L., Carciofi, B. A., & Laurindo, J. B. (2021). An innovative hybrid-solar-vacuum dryer to produce high-quality dried fruits and vegetables. *LWT*, 140, 110777.

Sekyere, C., Adams, F., Davis, F., & Forson, F. (2020). Mathematical modelling and validation of the thermal buoyancy characteristics of a mixed mode natural convection solar crop dryer with back up heater. *Scientific African*, 8, e00441.

Tarigan, E. (2018). Mathematical modeling and simulation of a solar agricultural dryer with back-up biomass burner and thermal storage. *Case studies in thermal engineering*, 12, 149-165.

เสริม จันทร์ฉาย. (2560a). เทคโนโลยีการอบแห้งด้วยพลังงานรังสีอาทิตย์. นครปฐม: หน่วยวิจัยพลังงานแสงอาทิตย์ ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร.

เสริม จันทร์ฉาย. (2560b). รังสีอาทิตย์ (พิมพ์ครั้งที่ 2 (ปรับปรุง) ed.). นครปฐม: หน่วยวิจัยพลังงานแสงอาทิตย์ ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร.





ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	นายภูธเนศ แสงจรรยา
วัน เดือน ปี เกิด	3 มิถุนายน 2541
สถานที่เกิด	โรงพยาบาลสระบุรี
วุฒิการศึกษา	วิทยาศาสตรบัณฑิต ฟิสิกส์
ที่อยู่ปัจจุบัน	106 หมู่ 9 ต.วังม่วง อ.วังม่วง จ.สระบุรี 18220
ผลงานตีพิมพ์	ภูธเนศ แสงจรรยา และ สราวุฒิ แนบเนียร. (2562). การพัฒนาและทดสอบสมรรถนะเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์สำหรับอบแห้งกล้วยน้ำว้า. วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีเทพสตรี. 1(2), หน้า 1-12.
รางวัลที่ได้รับ	1.รางวัลชนะเลิศ ด้านคณิตศาสตร์ / วิทยาศาสตร์ / วิทยาศาสตร์ประยุกต์ แบบบรรยาย เรื่อง การศึกษาเชิงตัวเลขและการตรวจสอบความถูกต้องของเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบพาราโบลาภายใต้สภาวะอากาศที่มีเมฆเต็มท้องฟ้า ในงานประชุมวิชาการระดับชาติด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีเครือข่ายภาคใต้ ครั้งที่ 7 2.รางวัลระดับดีเยี่ยม ประเภทการนำเสนอแบบปากเปล่า (Oral Presentation) กลุ่มวัสดุศาสตร์ และฟิสิกส์ประยุกต์ เรื่อง การศึกษาเชิงตัวเลขของอิทธิพลของรังสีอาทิตย์ที่มีต่อเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบพาราโบลา ในงานประชุมวิชาการระดับชาติ วิทยาศาสตร์ เทคโนโลยี และนวัตกรรม ครั้งที่ 3 ประจำปี 2565