

การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์
แบบพาราโบลาภายใต้สภาวะอากาศที่มีเมฆเต็มท้องฟ้า
Mathematical Modelling of a Parabolic Solar Dryer
under Overcast Sky Condition

อรวรรณ อัมพร^{1*} ภูธเนศ แสงจรรยา¹ และเสริม จันทร์ฉาย¹
Orawan Aumporn^{1*} Phoothanet Saengcharoon¹ and Serm Janjai¹

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบพาราโบลาภายใต้สภาวะอากาศที่มีเมฆเต็มท้องฟ้า แบบจำลองนี้มีพื้นฐานจากสมการการถ่ายโอนความร้อน โดยจะพิจารณาถึงคุณสมบัติทางอุณหพลศาสตร์ของอากาศภายในเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบพาราโบลาที่สภาวะคงที่ และหาผลเฉลยทางคณิตศาสตร์ด้วยวิธีผลต่างอันตะ โดยใช้โปรแกรม compaq visual FORTRAN 6.5 จากนั้นตรวจสอบความถูกต้องของผลที่ได้จากแบบจำลองด้วยการเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการทดลอง พบว่าผลลัพธ์ที่ได้มีความสอดคล้องกัน โดยมีค่า R^2 เท่ากับ 0.897 และ RMSE เท่ากับ 1.083

คำสำคัญ: เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ การสร้างแบบจำลอง การถ่ายโอนความร้อน สภาวะอากาศที่มีเมฆเต็มท้องฟ้า

¹ ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร

* Corresponding author e-mail: aumporn_o@silpakorn.edu

Received: 21 March 2022, Revised: 18 April 2022, Accepted: 21 April 2022

Abstract

The objective of this paper is to develop mathematical modelling of a parabolic solar dryer under overcast sky condition. The model is based on heat transfer equation which considers the thermophysical properties of drying air at steady state. The solution of this model is solved using a Finite difference method from the heat transfer equation. The numerical method using a Compaq Visual FORTRAN 6.5 program. Validation of the model was carried out by comparing the simulation results calculated from the model and the results obtained from the experiments. It was found that both results were in good consistency with $R^2 = 0.897$ and $RMSE = 1.083$.

Keywords: Solar dryer, Modelling, Heat transfer, Overcast sky condition

ศัพท์เฉพาะ

A_c	พื้นที่ผิวของแผ่นโพลีคาร์บอเนต	m^2
A_f	พื้นที่ผิวของพื้นคอนกรีต	m^2
$C_{p,a}$	ความจุความร้อนจำเพาะของอากาศ	$J/kg \cdot K$
$C_{p,c}$	ความจุความร้อนจำเพาะของแผ่นโพลีคาร์บอเนต	$J/kg \cdot K$
$C_{p,f}$	ความจุความร้อนจำเพาะของพื้นคอนกรีต	$J/kg \cdot K$
$h_{c,c-a}$	สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนโดยการพาความร้อนระหว่างแผ่นโพลีคาร์บอเนตกับอากาศ	$W/m^2 \cdot K$
$h_{c,f-a}$	สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนโดยการพาความร้อนระหว่างพื้นคอนกรีตกับอากาศ	$W/m^2 \cdot K$
h_w	สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนโดยการพาความร้อนระหว่างแผ่นโพลีคาร์บอเนตกับอากาศแวดล้อม	$W/m^2 \cdot K$
$h_{r,c-sky}$	สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนโดยการแผ่รังสีความร้อนระหว่างแผ่นโพลีคาร์บอเนตกับท้องฟ้า	$W/m^2 \cdot K$
$h_{r,c-f}$	สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนโดยการแผ่รังสีความร้อนระหว่างแผ่นโพลีคาร์บอเนตกับพื้นคอนกรีต	$W/m^2 \cdot K$
I	ความเข้มรังสีอาทิตย์	W/m^2
k_c	การนำความร้อนของแผ่นโพลีคาร์บอเนต	$W/m \cdot K$
m_a	มวลของอากาศ	kg
m_c	มวลของแผ่นโพลีคาร์บอเนต	kg
m_f	มวลของพื้นคอนกรีต	kg

ศัพท์เฉพาะ

P_u	พลังงานที่ทำให้อากาศมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ	W
T_a	อุณหภูมิของอากาศ	K
T_{amb}	อุณหภูมิอากาศของสิ่งแวดล้อม	K
T_c	อุณหภูมิของแผ่นโพลีคาร์บอเนต	K
T_f	อุณหภูมิของพื้นคอนกรีต	K
T_{sky}	อุณหภูมิของท้องฟ้า	K
U_c	สัมประสิทธิ์การสูญเสียความร้อนจากอากาศภายในเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบพาราโบลาสุญญากาศ	W/m ² ·K
σ	ค่าคงที่ของ Stefan-Boltzmann	W/m ² ·K
δ_c	ความหนาของแผ่นโพลีคาร์บอเนต	m
τ_c	สัมประสิทธิ์การส่งผ่านรังสีอาทิตย์ของแผ่นโพลีคาร์บอเนต	-
α_c	สัมประสิทธิ์การดูดกลืนรังสีอาทิตย์ของแผ่นโพลีคาร์บอเนต	-
α_f	สัมประสิทธิ์การดูดกลืนรังสีอาทิตย์ของพื้นคอนกรีต	-
ε_c	สัมประสิทธิ์การแผ่รังสีของแผ่นโพลีคาร์บอเนต	-

บทนำ

พลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานหมุนเวียนประเภทหนึ่งที่ใช้แล้วเกิดขึ้นใหม่ได้เองตามธรรมชาติ อีกทั้งยังมีศักยภาพสูงในการนำไปใช้ประโยชน์ ส่งผลให้มีการนำมาใช้งานอย่างหลากหลาย ทั้งในรูปแบบของการผลิตความร้อนและการผลิตกระแสไฟฟ้า มนุษย์ใช้ประโยชน์จากพลังงานแสงอาทิตย์มาเป็นเวลานาน โดยเฉพาะในด้านการถนอมอาหารหรือที่เรียกว่า การตากแห้ง ซึ่งเป็นวิธีถนอมอาหารที่ถูกใช้มานาน (Prakash and Kumar, 2013; Pirasteh *et al.*, 2014) ปัจจุบันมีการพัฒนาการตากแห้งให้มีคุณภาพมากขึ้น โดยการใช้เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีคุณภาพดีและถูกสุขลักษณะ ทั้งยังสามารถเพิ่มมูลค่าให้กับผลิตภัณฑ์ได้อีกทางหนึ่ง (Nabnean *et al.*, 2016; Udomkun *et al.*, 2020)

ประเทศไทยจัดเป็นประเทศเกษตรกรรม โดยบางฤดูกาลมีผลผลิตทางการเกษตรเป็นจำนวนมากเกินความต้องการของตลาด จึงพัฒนาการแปรรูปผลผลิตเหล่านั้น หนึ่งในวิธีการแปรรูปคือ การอบแห้งโดยใช้เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ โดยเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบพาราโบลาเป็นเครื่องอบแห้งที่ใช้งานอย่างแพร่หลายในปัจจุบัน โดยเฉพาะอย่างยิ่งในอุตสาหกรรมแปรรูปอาหาร เช่น การแปรรูปกล้วยน้ำว้า ยางพาราแผ่น และพืชสมุนไพร (Laksono *et al.*, 2017; Aumporn *et al.*, 2021; Nabnean and Nimnuan, 2021) เนื่องจากสามารถใช้งานได้สะดวกและอบแห้งผลผลิตสดได้ครั้งละจำนวนมาก (เสริม และบุศราภรณ์, 2559; Aumporn *et al.*, 2021) อีกทั้งเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบพาราโบลาสามารถทำงานได้โดยไม่อาศัยพลังงานไฟฟ้า จึงมีความเหมาะสมในการนำไปใช้ในพื้นที่ห่างไกล นอกจากนี้บางงานวิจัยยังพบว่าเครื่องอบแห้งประเภทนี้สามารถใช้งานได้ แม้ช่วงเวลาที่ไม่มีแสงแดดหรือมีเมฆปกคลุมท้องฟ้า พิจารณาได้จากอุณหภูมิอากาศในเครื่องอบแห้งที่มีค่าเหมาะสมแก่การอบแห้งผลิตภัณฑ์

Uwitije (2018) ได้ทำการศึกษาและจำลองแบบการอบแห้งในประเทศรวันดา พบว่าอุณหภูมิของอากาศแวดล้อมและความเข้มรังสีอาทิตย์เป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่ออุณหภูมิอากาศที่ใช้ในการอบแห้งผลิตภัณฑ์ทางการเกษตร และจากงานวิจัยของภูธนศ (2562) ที่ทำการทดลองอบแห้งกล้วยน้ำว้าด้วยเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบพาราโบลาขนาดครัวเรือน พบว่าในสภาพอากาศที่มีฝนตกหรือมีเมฆเต็มท้องฟ้าในช่วงของการทดลอง จะส่งผลให้อุณหภูมิอากาศภายในเครื่องอบแห้งมีค่าลดลง แต่ยังสามารถอบแห้งผลิตภัณฑ์จนกระทั่งผลิตภัณฑ์แห้ง โดยใช้ระยะเวลาอบแห้งน้อยกว่าการตากแดดตามธรรมชาติ เช่นเดียวกับงานวิจัยของ Aumporn *et al.* (2021) ได้ทำการอบแห้งยางพาราแผ่นโดยใช้เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบพาราโบลา พบว่าแม้ในสภาวะอากาศที่แปรปรวน เช่น ฝนตก และมีเมฆปกคลุมท้องฟ้า อุณหภูมิอากาศในเครื่องอบแห้ง ยังคงอยู่ในช่วงที่เหมาะสมต่อการอบแห้งยางพาราแผ่น จากการศึกษาวิจัยเชิงการจำลองแบบของ Mobtaker *et al.* (2019) ได้พัฒนาและตรวจสอบแบบจำลองเพื่อศึกษาปริมาณความเข้มรังสีอาทิตย์ที่ตกกระทบมายังเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ พบว่าผลที่ได้จากแบบจำลองมีความคลาดเคลื่อนเพียงเล็กน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับผลจากการทดลอง โดยมีค่า MPE MBE และ RMSE เท่ากับ 1.12 เปอร์เซ็นต์ 0.53 องศาเซลเซียส และ 2.82 องศาเซลเซียส ตามลำดับ นอกจากนี้ยังมี Bekkioui (2021) ที่ทำการสร้างแบบจำลองเชิงตัวเลขของเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์สำหรับการอบแห้งไม้ พบว่าเครื่องอบแห้งที่มีพื้นที่รับรังสีอาทิตย์มากจะส่งผลให้อุณหภูมิอากาศในเครื่องอบแห้งสูงขึ้น และแผ่นปกคลุมเครื่องอบแห้งมีผลต่ออุณหภูมิอากาศในเครื่องอบแห้งเช่นกัน

จากงานวิจัยต่าง ๆ ที่กล่าวมาข้างต้นจะเห็นว่าเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบพาราโบลาสามารถทำงานได้ แม้ในสภาวะอากาศที่มีเมฆเต็มท้องฟ้า ซึ่งไม่มีรังสีอาทิตย์ตรงผ่านเข้าในเครื่องอบแห้ง จึงมีเพียงรังสีกระจายเท่านั้นที่สามารถทำความร้อนให้แก่เครื่องอบแห้งได้ ซึ่งความคิดข้างต้นนี้สามารถยืนยันได้โดยอาศัยการทดลองหรือการสร้างแบบจำลอง แต่เนื่องจากการคาดการณ์วันที่สภาพท้องฟ้ามีเมฆเต็มท้องฟ้าเป็นไปได้ยาก วิธีการทดลองจึงมีความไม่เหมาะสมในการนำมาใช้งาน ดังนั้นวิธีที่จะสามารถนำมายืนยันความคิดดังกล่าวได้ดี คือ การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (mathematical modelling) สำหรับใช้แสดงให้เห็นผลของความเข้มรังสีอาทิตย์ในสภาวะอากาศที่มีเมฆเต็มท้องฟ้าต่ออุณหภูมิของอากาศในเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบพาราโบลา

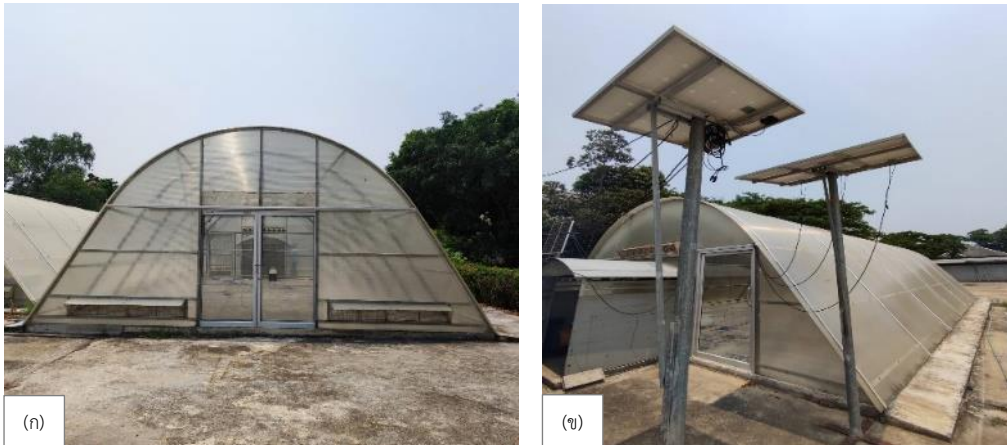
งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่สามารถนำมาใช้คำนวณอุณหภูมิอากาศในเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบพาราโบลา ในสภาวะอากาศที่มีเมฆเต็มท้องฟ้า

วิธีดำเนินการวิจัย

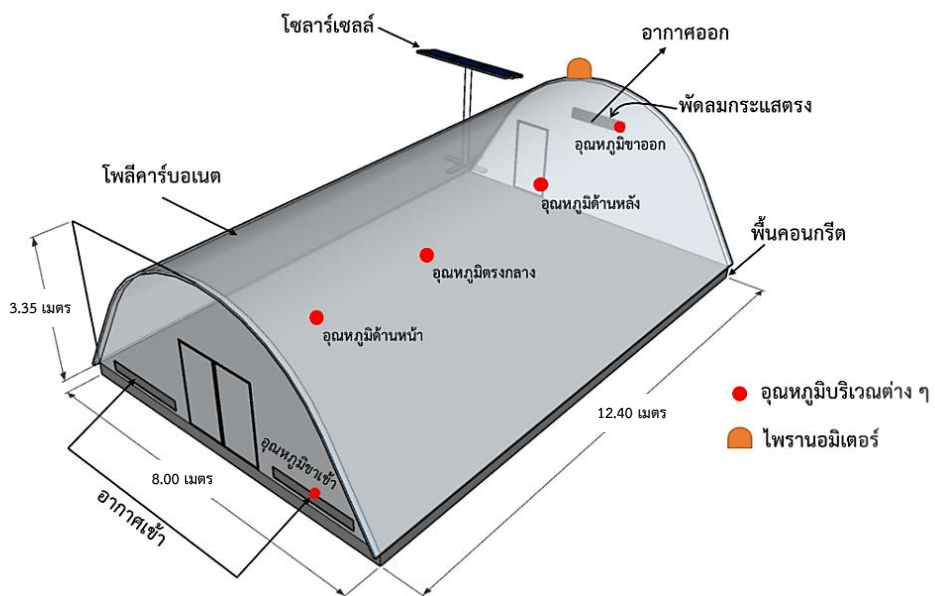
1. เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบพาราโบลา

เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบพาราโบลาติดตั้ง ณ ลานทดลองพลังงานแสงอาทิตย์ ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร จังหวัดนครปฐม (ละติจูด 13.8667°N ลองจิจูด 100.1917°E) เครื่องอบแห้งนี้ประกอบด้วยหลังคารูปทรงพาราโบลาซึ่งทำจากโพลีคาร์บอเนตโปร่งแสง วางอยู่บนพื้นคอนกรีต โดยแผ่นปกคลุมโพลีคาร์บอเนตมีค่าการส่งผ่านแสงสำหรับรังสีคลื่นสั้นค่อนข้างสูง (0.8) ในขณะที่ค่าการส่งผ่านแสงของรังสีคลื่นยาวมีค่าต่ำ (0.2)

(Aumporn, 2017) จึงทำให้เกิดปรากฏการณ์เรือนกระจกภายในเครื่องอบแห้งได้ดี โครงสร้างของเครื่องอบแห้งทำจากเหล็กชุบกัลวาไนซ์เพื่อกันสนิมที่ด้านหลังของเครื่องอบแห้ง ติดตั้งพัดลมไฟฟ้ากระแสตรง (14.4 วัตต์) จำนวน 9 ตัว ซึ่งทำงานโดยอาศัยพลังงานไฟฟ้าจากโซลาร์เซลล์ (50 วัตต์) จำนวน 3 แผง สำหรับดูดอากาศขึ้นภายในเครื่องอบแห้งออกสู่อากาศแวดล้อม และที่บริเวณด้านหน้าของเครื่องอบแห้ง จะมีช่องอากาศเข้าขนาด 0.3×2.2 ตารางเมตร (ภาพที่ 1 และ 2)



ภาพที่ 1 เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบพาราโบลา (ก) ด้านหน้า (ข) ด้านหลัง



ภาพที่ 2 โครงสร้างของเครื่องอบแห้งแบบพาราโบลาและตำแหน่งการวัดอุณหภูมิอากาศที่บริเวณต่าง ๆ พร้อมทั้งตำแหน่งที่วัดความเข้มรังสีอาทิตย์

2. ขั้นตอนการทดลอง

การทดลองนี้บันทึกค่าความเข้มรังสีอาทิตย์ในช่วงที่ท้องฟ้ามีสภาพอากาศแบบมีเมฆเต็มท้องฟ้าด้วยเครื่องวัดรังสีอาทิตย์ (pyranometer ยี่ห้อ Kipp & Zonen รุ่น CMP11, accuracy $\pm 0.5\%$) ที่ถูกติดตั้งไว้บริเวณด้านบนของเครื่องอบแห้ง และวัดอุณหภูมิของอากาศภายในเครื่องอบแห้ง จำนวน 4 ตำแหน่ง (ภาพที่ 2) ด้วยเทอร์โมคัปเปิล ชนิดเค ซึ่งอุปกรณ์ทั้งสองถูกเชื่อมต่อเข้ากับเครื่องบันทึกข้อมูล (data logger ยี่ห้อ Yokogawa รุ่น DC100) เพื่อบันทึกข้อมูลทุก 1 นาที ตั้งแต่เวลา 08.00 น. ถึง 17.00 น. ของวันที่ทำการบันทึกข้อมูล

3. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ได้รับการพัฒนาขึ้นเพื่อทำนายประสิทธิภาพของเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบพาราโบลา โดยมีเงื่อนไขในการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ดังนี้

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

$$m_c C_{p,c} \frac{\partial T_c}{\partial t} = A_c h_{c-a}(T_a - T_c) + A_c h_w(T_{amb} - T_c) + A_c h_{r,c-sky}(T_{sky} - T_c) + A_c h_{r,c-f}(T_f - T_c) + A_c \alpha_{cl} \quad (1)$$

เมื่อ $m_c C_{p,c} \frac{\partial T_c}{\partial t}$ คือ อัตราการเปลี่ยนแปลงเอนทัลปีของแผ่นโพลีคาร์บอเนต (วัตต์)

$A_c h_{c-a}(T_a - T_c)$ คือ อัตราการถ่ายโอนความร้อนโดยการพาความร้อนระหว่างแผ่นโพลีคาร์บอเนตกับอากาศ (วัตต์)

$A_c h_w(T_{amb} - T_c)$ คือ อัตราการถ่ายโอนความร้อนโดยการพาความร้อนระหว่างแผ่นโพลีคาร์บอเนตกับอากาศแวดล้อม (วัตต์)

$A_c h_{r,c-sky}(T_{sky} - T_c)$ คือ อัตราการถ่ายโอนความร้อนโดยการแผ่รังสีความร้อนระหว่างแผ่น โพลีคาร์บอเนตกับท้องฟ้า (วัตต์)

$A_c h_{r,c-f}(T_f - T_c)$ คือ อัตราการถ่ายโอนความร้อนโดยการแผ่รังสีความร้อนระหว่างแผ่น โพลีคาร์บอเนตกับพื้นคอนกรีต (วัตต์)

$A_c \alpha_{cl}$ คือ การดูดกลืนรังสีอาทิตย์ของแผ่นโพลีคาร์บอเนต (วัตต์)

สมการการถ่ายโอนความร้อนของอากาศในเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบพาราโบลา แสดงดังสมการ (2)

$$m_a C_{p,a} \frac{\partial T_a}{\partial t} = A_c h_{c-a}(T_c - T_a) + A_c h_{c,f-a}(T_f - T_a) + A_c U_c(T_{amb} - T_a) + P_u \quad (2)$$

เมื่อ $m_a C_{p,a} \frac{\partial T_a}{\partial t}$ คือ อัตราการเปลี่ยนแปลงเอนทัลปีของอากาศ (วัตต์)

$A_{ch_{c-a}}(T_c - T_a)$ คือ อัตราการถ่ายโอนความร้อนโดยการพาความร้อนระหว่างแผ่นโพลีคาร์บอเนตกับอากาศ (วัตต์)

$A_{fh_{c-f-a}}(T_f - T_a)$ คือ อัตราการถ่ายโอนความร้อนโดยการพาความร้อนระหว่างพื้นคอนกรีตกับอากาศ (วัตต์)

$A_c U_c (T_{amb} - T_a)$ คือ การสูญเสียความร้อนสู่อากาศแวดล้อม (วัตต์)

P_u คือ พลังงานที่ทำให้อากาศมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ (วัตต์)

สมการการถ่ายโอนความร้อนของพื้นคอนกรีต แสดงดังสมการ (3)

$$m_f C_{p,f} \frac{\partial T_f}{\partial t} = A_{fh_{c-f-a}}(T_a - T_f) + A_{fh_{r,c-f}}(T_c - T_f) + A_{ftc} \alpha_{ft} \quad (3)$$

เมื่อ $m_f C_{p,f} \frac{\partial T_f}{\partial t}$ คือ อัตราการเปลี่ยนแปลงเอนทัลปีของพื้นคอนกรีต (วัตต์)

$A_{fh_{c-f-a}}(T_a - T_f)$ คือ อัตราการถ่ายโอนความร้อนโดยการพาความร้อนระหว่างพื้นคอนกรีตกับอากาศในเครื่องอบแห้ง (วัตต์)

$A_{fh_{r,c-f}}(T_c - T_f)$ คือ อัตราการถ่ายโอนความร้อนโดยการแผ่รังสีความร้อนระหว่างพื้นคอนกรีตกับแผ่นโพลีคาร์บอเนต (วัตต์)

$A_{ftc} \alpha_{ft}$ คือ การดูดกลืนรังสีอาทิตย์ของพื้นคอนกรีต (วัตต์)

สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนโดยการพาความร้อนระหว่างแผ่นโพลีคาร์บอเนตกับอากาศแวดล้อม สามารถคำนวณได้จากสมการ (4) (Aumporn, 2017)

$$h_w = 1.32 |T_c - T_{amb}|^{0.25} \quad (4)$$

สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนโดยการรังสีความร้อนระหว่างแผ่นโพลีคาร์บอเนตกับท้องฟ้าสามารถคำนวณได้จากสมการ (5) (Aumporn, 2017)

$$h_{r,c-sky} = \epsilon_c \sigma (T_c^2 + T_{sky}^2) (T_c + T_{sky}) \quad (5)$$

สัมประสิทธิ์การสูญเสียความร้อนจากอากาศภายในเครื่องอบแห้งสู่สภาพแวดล้อม สามารถคำนวณได้จากสมการ (6) (Aumporn, 2017)

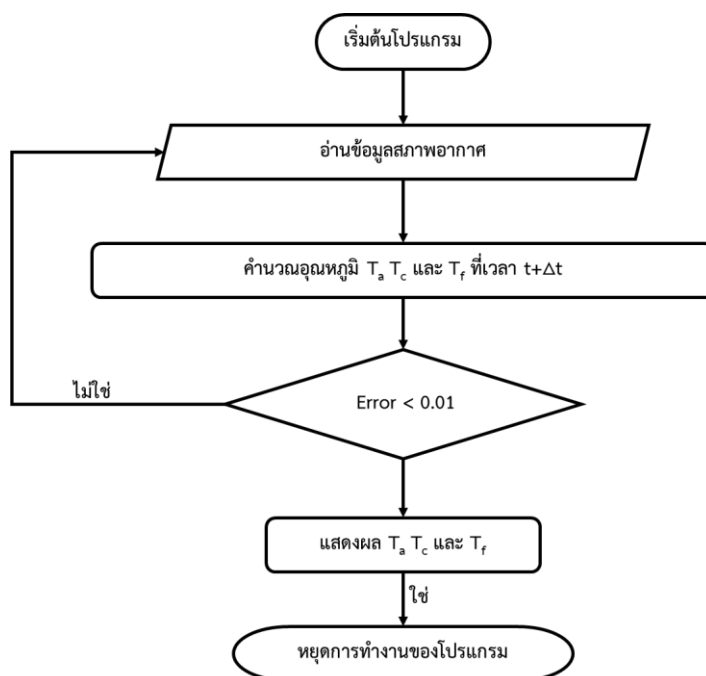
$$U_c = k_c / \delta_c \quad (6)$$

4. ขั้นตอนการแก้ปัญหา

เริ่มต้นโดยการแก้สมการที่ (1) - (3) ด้วยวิธีการผลต่างอันดับ (finite difference method) และเพื่อให้สะดวกต่อการหาผลเฉลยของสมการ ผู้วิจัยจึงจัดสมการที่ (1) - (3) หลังจากแก้สมการด้วยวิธีการผลต่างอันดับให้อยู่ในระบบเมทริกซ์ (matrix) ดังสมการที่ (7)

$$\begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_c \\ T_a \\ T_f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \end{bmatrix} \quad (7)$$

จากนั้นจะเขียนโปรแกรมโดยใช้ compact visual FORTRAN 6.5 เพื่อคำนวณอุณหภูมิอากาศภายในเครื่องอบแห้ง โดยโปรแกรมจะเริ่มต้นจากการคำนวณข้อมูลสภาพอากาศ (ความชื้นรังสีอาทิตย์ อุณหภูมิอากาศแวดล้อม และความชื้นสัมพัทธ์อากาศแวดล้อม) จากนั้นจะนำสภาพอากาศที่ได้มาใช้ในการคำนวณหาสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนต่าง ๆ รวมถึงอุณหภูมิแผ่นโพลีคาร์บอเนต พื้นคอนกรีต และอากาศในเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ และทำการเปรียบเทียบอุณหภูมิที่ได้จากการคำนวณกับอุณหภูมิสิ่งแวดล้อม โดยผลต่างของอุณหภูมิจะต้องไม่เกิน 0.01 โปรแกรมจึงจะหยุดทำงาน (ภาพที่ 3) และแสดงผลอุณหภูมิที่คำนวณได้ หากผลต่างของอุณหภูมิมียิ่งกว่า 0.01 จะเริ่มการคำนวณอุณหภูมิใหม่ และทำซ้ำขั้นตอนเดิมจนกว่าจะได้ผลตามต้องการ โดยจะทำการคำนวณในช่วงเวลา Δt เท่ากับ 600 และกระบวนการนี้จะทำซ้ำจนกว่าจะถึงเวลาสุดท้ายที่กำหนดไว้



ภาพที่ 3 แผนผังการทำงานของโปรแกรม compaq visual FORTRAN 6.5

สำหรับการตรวจสอบความถูกต้องของเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบพาราโบลา ผู้วิจัยใช้พารามิเตอร์ทางสถิติสองชนิด คือ รากที่สองของค่าเฉลี่ยความผิดพลาดกำลังสอง (root mean square error: RMSE) (เสริม, 2560) และสัมประสิทธิ์การอธิบาย (coefficient of determination: R^2) (Thakur, 2022) เพื่อตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง ดังสมการ (8) และ (9)

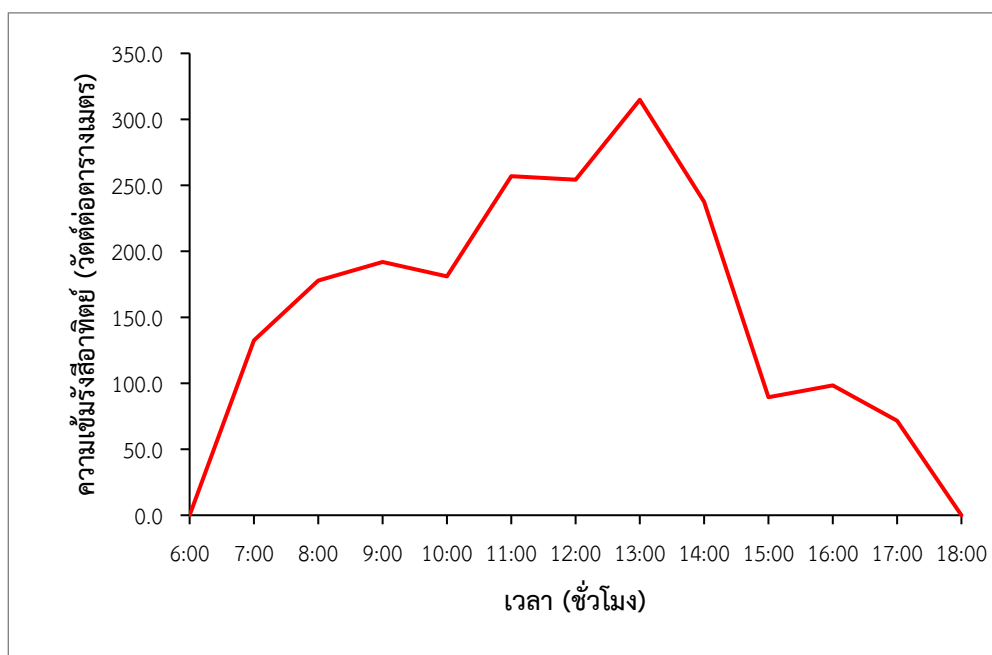
$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (y_{pre,i} - y_{meas,i})^2}{N}} \quad (8)$$

$$R^2 = \left(\frac{\sum [(X - X_m) \cdot (Y - Y_m)]}{\sqrt{[\sum (X - X_m)^2 \cdot \sum (Y - Y_m)^2]}} \right)^2 \quad (9)$$

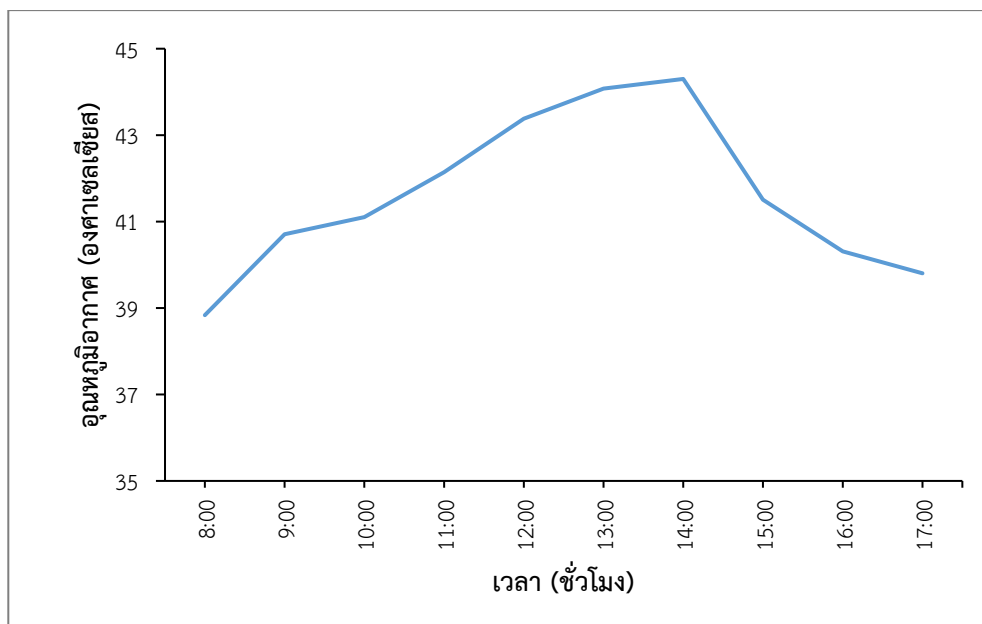
ผลการวิจัย

1. ผลการทดลอง

จากภาพที่ 4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มรังสีอาทิตย์กับระยะเวลาในการทดลอง โดยกราฟการแปรค่ารังสีอาทิตย์จะมีลักษณะคล้ายกับรูปทรงพาราโบลา เนื่องจากการหมุนรอบตัวเองของโลกทำให้ปริมาณรังสีอาทิตย์มีค่าต่ำในช่วงเช้า จากนั้นจะมีค่าเพิ่มสูงขึ้น และลดต่ำลงในช่วงเวลาเที่ยงจนถึงเย็น (เสริม, 2560) ซึ่งในวันที่ทำการทดลองสภาพท้องฟ้ามีเมฆอยู่เต็มท้องฟ้า จึงส่งผลให้ความเข้มรังสีอาทิตย์มีค่าต่ำ ส่งผลให้อุณหภูมิอากาศภายในเครื่องอบแห้ง ช่วง 08.00 - 11.00 น. มีค่าประมาณ 40 องศาเซลเซียส และมีอุณหภูมิสูงขึ้นในช่วง 12.00 - 14.00 น. (ภาพที่ 5) เนื่องจากปรากฏการณ์เรือนกระจก (greenhouse effect) ซึ่งรังสีอาทิตย์สามารถส่งผ่านเข้ามาในเครื่องอบแห้งได้มาก และรังสีคลื่นยาวที่แผ่จากองค์ประกอบภายในเครื่องอบแห้งส่งผ่านออกไปภายนอกได้น้อย ทำให้เกิดการสะสมของพลังงานความร้อนภายในเครื่องอบแห้ง อุณหภูมิอากาศภายในเครื่องอบแห้งจึงมีค่าสูงขึ้น (Srinivasan and Muthukumar, 2021) หลังจากนั้นอุณหภูมิของอากาศภายในเครื่องอบแห้งจะค่อย ๆ ลดลงเนื่องจากปริมาณรังสีอาทิตย์ลดต่ำลง โดยอุณหภูมิอากาศภายในเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบพาราโบลา มีค่าสูงสุดประมาณ 44 องศาเซลเซียส



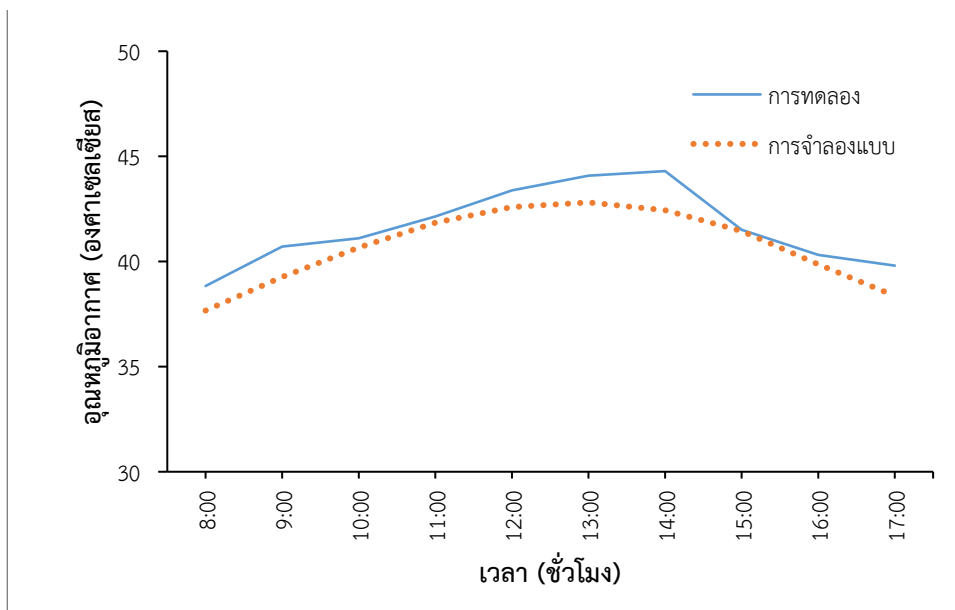
ภาพที่ 4 การแปรค่าความเข้มรังสีอาทิตย์เทียบกับเวลาในวันที่สภาพอากาศที่มีเมฆเต็มท้องฟ้า (วันที่ 18 กันยายน 2563)



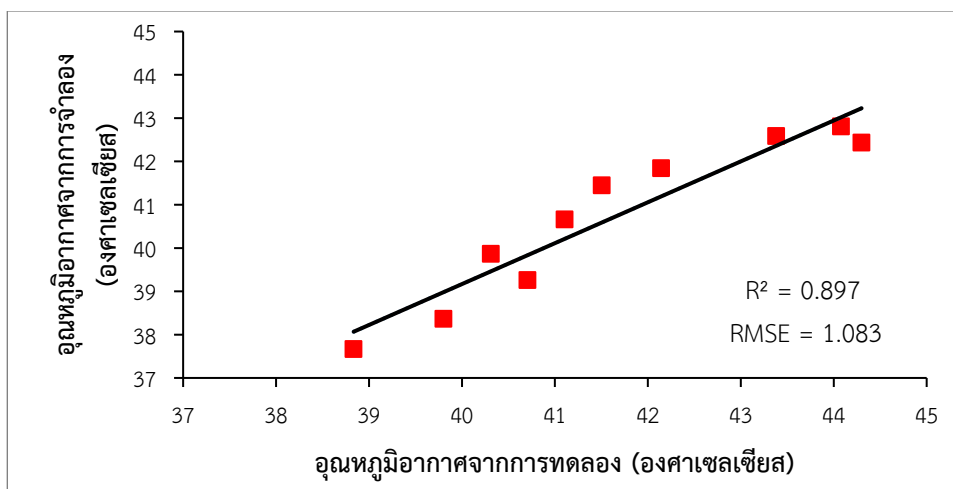
ภาพที่ 5 การแปรค่าอุณหภูมิอากาศภายในเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบพาราโบลาเทียบกับเวลาในวันที่สภาพอากาศมีเมฆเต็มท้องฟ้า (วันที่ 18 กันยายน 2563)

2. ผลการจำลองแบบ

จากภาพที่ 6 แสดงการเปรียบเทียบระหว่างอุณหภูมิอากาศภายในเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบพาราโบลาที่ได้จากการจำลองแบบกับอุณหภูมิอากาศที่ได้จากการทดลองในช่วงระยะเวลาการทดลองภายใต้สภาวะอากาศที่มีเมฆเต็มท้องฟ้า พบว่าอุณหภูมิอากาศที่ได้จากแบบจำลองและการทดลองมีแนวโน้มไปในทางเดียวกัน โดยมีอุณหภูมิสูงขึ้นในช่วง 08.00 - 14.00 น. จากนั้นจะค่อย ๆ ลดต่ำลง และพบว่าอุณหภูมิจากการจำลองแบบภายใต้สภาวะอากาศที่มีเมฆเต็มท้องฟ้ามีค่าต่ำกว่าการทดลองเพียงเล็กน้อย และการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิอากาศที่ได้จากแบบจำลองและการทดลองพบว่ามีค่า R^2 เท่ากับ 0.897 และค่า RMSE เท่ากับ 1.083 (ภาพที่ 7) ซึ่งแสดงให้เห็นว่าค่าที่ได้มีความสอดคล้องกัน



ภาพที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิอากาศจากแบบจำลองกับอุณหภูมิอากาศจากการทดลองในช่วงเวลาทำการทดลอง



ภาพที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิอากาศจากแบบจำลองกับอุณหภูมิอากาศจากการทดลอง

การอภิปรายผลการวิจัย

ผลอุณหภูมิของอากาศในเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบพาราโบลาที่ได้จากการจำลองแบบเมื่อเปรียบเทียบกับผลจากการทดลอง พบว่ามีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน โดยผลของอุณหภูมิอากาศภายในเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบพาราโบลาที่ได้จากการจำลองแบบมีค่าต่ำกว่าผลจากการทดลอง ซึ่งเกิดจากการนำค่าสภาวะอากาศ (ความชื้นรังสีอาทิตย์ อุณหภูมิอากาศ แวลลุ่ม และความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศแวลลุ่ม) ที่ได้จากการคำนวณ โดยอาศัยข้อมูลของสภาวะ

อากาศที่มีเมฆเต็มท้องฟ้าที่บันทึกไว้ในระยะเวลา 1 ปี มาใช้ในการสร้างแบบจำลองเพื่อนำมาเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากผลการทดลอง จึงทำให้มีความคลาดเคลื่อนและมีค่าน้อยกว่าผลการทดลอง และจากการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิอากาศที่ได้จากแบบจำลองและการทดลองพบว่าค่าที่ได้มีความสอดคล้องกัน โดยมีค่า R^2 เท่ากับ 0.897 และค่า RMSE เท่ากับ 1.083 ซึ่งสามารถยอมรับได้ เนื่องจากในงานวิจัยนี้ได้กำหนดเงื่อนไขให้ความร้อนส่งผ่านจากพื้นคอนกรีตไปยังพื้นดินมีค่าน้อยมาก ดังนั้นจึงไม่นำการถ่ายโอนความร้อนระหว่างคอนกรีตและพื้นดินมาพิจารณาในสมการการถ่ายโอนความร้อน นอกจากนี้สมการสำหรับการคำนวณสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนเป็นสมการเอมไพริคัล ซึ่งอาจส่งผลต่อการจำลอง ดังนั้นหากเลือกใช้สมการที่เหมาะสมมากยิ่งขึ้นอาจทำให้ R^2 และ RMSE มีค่าที่ดีมากยิ่งขึ้น

สรุปผลการวิจัย

สภาพภูมิอากาศที่แปรปรวน เช่น มีเมฆเต็มท้องฟ้า เป็นปัญหาที่สำคัญของเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ เนื่องจากทำให้ประสิทธิภาพของเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบพาราโบลาลดลง งานวิจัยนี้จึงทำการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบพาราโบลาภายใต้สภาพอากาศที่มีเมฆเต็มท้องฟ้า เพื่อศึกษาผลของรังสีอาทิตย์ที่ส่งผลต่ออุณหภูมิอากาศภายในเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบพาราโบลา พบว่าผลที่ได้จากแบบจำลองมีความสอดคล้องกับผลที่ได้จากการทดลอง โดยมีค่า R^2 เท่ากับ 0.897 และค่า RMSE เท่ากับ 1.083 ซึ่งสามารถยอมรับได้และแบบจำลองนี้สามารถนำมาใช้งานได้จริง

เอกสารอ้างอิง

- ภูธเนศ แสงเจริญ. (2562). การปรับปรุงเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ในระดับครัวเรือนแบบมหาวิทยาลัยราชภัฏเทพสตรีสำหรับการอบแห้งกล้วยน้ำว้า. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรบัณฑิต. มหาวิทยาลัยราชภัฏเทพสตรี, ลพบุรี.
- เสริม จันทรฉาย และบุศราภรณ์ มหาโยธี. (2559). การพัฒนาการผลิตกล้วยตากในชุมชนกล้วยตากอำเภอบางกระทุ่ม จังหวัดพิษณุโลก. *Veridian E-Journal Science and Technology Silpakorn University*, 3(6), 310-322.
- เสริม จันทรฉาย. (2560). *รังสีอาทิตย์*. (พิมพ์ครั้งที่ 2). นครปฐม: บริษัท เพชรเกษมพรินติ้ง กรุ๊ป จำกัด.
- Aumporn, O. (2017). *Contribution à l'étude des performances d'un séchoir serre avec stockage de chaleur dans des matériaux à changement de phase*. Thèse pour obtenir le grade de docteur, Université de Perpignan via Domitia, Perpignan.
- Aumporn, O., Pankaew, P., Chanpen, N., and 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.

- Aumporn, O., Wattan, R., Pattarapanitchai, S., Sangsan, M. and Janjai, S. (2021). Study of large-scale solar dryer equipped with monitoring and control systems for banana drying. *Journal of Renewable Energy and Smart Grid Technology*, 16(2), 1-16.
- Bekkioui, N. (2021). Performance comparison and economic analysis of three solar dryer designs for wood using a numerical simulation. *Renewable Energy*, 164, 815-823, doi: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.09.126>.
- Laksono, W.P., Damayanti, W.R., Cahyono, I.S. and Arif Muttaqin, I.B. (2017). Performance evaluation of solar dryer with a biomass stove to meet Indonesian National Standard of ginger simplisia. *Energy Technology and Policy*, 13(4), 378-398, doi: <https://doi.org/10.1504/IJETP.2017.10006308>.
- Mobtaker, H.G., Ajabshirchi, Y., Ranjbar S.F. and Matloob, M. (2019). Simulation of thermal performance of solar greenhouse in north-west of Iran: An experimental validation. *Renewable Energy*, 135, 88-97, doi: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.10.003>.
- Nabnean, S., Janjai, S., Thepa, S., Sudaprasert, K., Songprakorp, R. and Bala, B.K. (2016). Experimental performance of a new design of solar dryer for drying osmotically dehydrated cherry tomatoes. *Renewable Energy*, 94, 147-156, doi: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.03.013>.
- Nabnean, S., Nimnuan, P. (2020). Experimental performance of direct forced convection household solar dryer for drying banana. *Thermal Science and Engineering Progress*, 22, doi: <https://doi.org/10.1016/j.csite.2020.100787>.
- Pirasteh, G., Saidur, R., Rahman, S.M.A. and Rahim, N.A. (2014). A review on development of solar drying applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 31, 133-148, doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.11.052>.
- Prakash, O. and Kumar, A. (2013). Historical review and recent trends in solar drying systems. *International Journal of Green Energy*, 10(7), 690-738, doi: <https://doi.org/10.1080/15435075.2012.727113>.
- Srinivasan, G. and Muthukumar, P. (2021). A review on solar greenhouse dryer: Design, thermal modelling, energy, economic and environmental aspects. *Solar Energy*, 229, 3-21, doi: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2021.04.058>.
- Thakur, M. (2022). *Coefficient of Determination Formula*. Retrieved 10 April 2022, from: <https://www.educba.com/coefficient-of-determination-formula/>.
- Udomkun, P., Romuli, S., Schock, S., Mahayothee, B., Sartas, M., Wossen, T., Njukwe, E., Vanlauwe, B. and Müller, J. (2020). Review of solar dryers for agricultural products in Asia and Africa: An innovation landscape approach. *Journal of Environmental Management*, 268, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110730>.
- Uwitije, D.P. (2018). *Study and simulation of a solar system for drying purpose in Rwanda*. Master's program. Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya.