



การพัฒนาตู้อบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบผสมผสาน 3 ชั้น ร่วมกับโซล่าคอลเลคเตอร์เพื่อ
เพิ่มสมรรถนะด้านความร้อน

Development of a Three-Layer Hybrid Solar Dryer with a Solar Collector for
Thermal Performance Improvement

รุ่งโรจน์ สวงวัฒนา*

Rungroj Sanguanwattana

เสาวลักษณ์ ยอดวิญญูวงศ์**

Saowaluk Yotwinyuwong

เทพ เกื้อทวีกุล**

Thep Kueathaweekun

ภาคิน มณีโชติ**

Pakin Maneechot

อัษฎางค์ บุญศรี**

Ussadang Boonsri

อิทธิพล เหลลาพรหม**

Ittipon Laoprom

วรวิทย์ บุตรดี**

Worawut Buddee

อานนท์ วงษ์มณี**

Arnon Wongmanee

จิรวัดน์ บุญจันทร์**

Jirawat Boonchan

Received : June 14, 2026

Revised : July 31, 2026

Accepted : August 24, 2026

*นักวิชาการศึกษา สำนักงานคณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏกำแพงเพชร

Academic staff, Office's Faculty of Industrial Technology, Kamphaeng Phet Rajabhat University

(Corresponding Author) e-mail: rungroj@kpru.ac.th

**อาจารย์ประจำสาขาวิศวกรรมเทคโนโลยี คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏกำแพงเพชร

Lecturer in the Department of Technology Engineering, Faculty of Industrial Technology,

Kamphaeng Phet Rajabhat University

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาระบบตู้อบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบสามชั้นที่ผสมผสานกับตัวเก็บรังสีอาทิตย์ เพื่อเพิ่มสมรรถนะด้านความร้อนและเพิ่มระยะเวลาในการอบแห้ง โดยใช้ น้ำ เป็นตัวกลางถ่ายเทความร้อนจากโซลาร์คอลเลคเตอร์เข้าสู่ตู้อบแห้งผ่านท่อทองแดงที่ติดตั้งอยู่ใต้ถาดตากผลิตภัณฑ์ทั้งสามชั้น ทดลองโดยบันทึกอุณหภูมิและเปรียบเทียบสมรรถนะด้านความร้อนกับตู้อบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบเดิม ทดลองอบแห้ง คือ กล้วยน้ำว่า จำนวน 10-12 ลูก ถูกควบคุมไว้ที่ 500 กรัมเท่ากัน เป็นวัสดุที่ใช้ทดลองเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักที่หายไป จำนวน 10 ครั้ง ผลการวิจัยพบว่า ระบบผสมผสานมีสมรรถนะด้านความร้อนเหนือกว่าอย่างชัดเจน โดยสามารถทำอุณหภูมิภายในตู้สูงสุดได้ถึง 80°C ในขณะที่ระบบเดิมทำได้เพียง 70°C การตากในตู้อบแห้งแบบเดิม โดยสามารถอบแห้งกล้วยได้รวดเร็วกว่า ในวันแรก น้ำหนักที่หายไปของกล้วยในตู้อบระบบเดิมทำได้ 14.60% น้ำหนักที่หายไปของกล้วยในตู้อบระบบผสมผสานทำได้ 44.20% ซึ่งช่วยลดความชื้นได้มากกว่า นอกจากนี้ การใช้ น้ำ ในการกักเก็บพลังงานความร้อนยังช่วยรักษาเสถียรภาพของอุณหภูมิ ทำให้ระบบสามารถแผ่ความร้อนอบแห้งได้อย่างต่อเนื่องและมีประสิทธิภาพนานขึ้นจากระบบเดิมอีกประมาณ 2 ชั่วโมง สรุปได้ว่าการผสมผสานระบบโซลาร์คอลเลคเตอร์ เป็นแนวทางที่คุ้มค่าช่วยเพิ่มระยะเวลาในการอบและมีสมรรถนะเชิงความร้อนที่มากกว่า ซึ่งเหมาะสมสำหรับกระบวนการอบแห้งผลิตภัณฑ์ทางการเกษตร เช่น กล้วย ใบชา ชานอ้อย เป็นต้น ที่ต้องการสมรรถนะด้านความร้อนในการอบ

คำสำคัญ : ตู้อบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ / สมรรถนะด้านความร้อน / โซลาร์คอลเลคเตอร์ /
ตู้อบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบผสมผสาน / การกักเก็บพลังงานความร้อน

ABSTRACT

This research aims to develop a three-tier hybrid solar dryer integrated with a solar collector to enhance thermal performance and prolong the drying period. The system employs water as a heat transfer fluid, circulating from the solar collector to the drying chamber via copper pipes installed beneath the product trays on all three tiers. The experimental methodology involved continuous temperature monitoring and comparative thermal performance analysis against a conventional solar dryer. Namwa bananas, precisely controlled at an initial weight of 500 grams (10-12 pieces) per batch, served as the test material to evaluate moisture reduction via weight loss percentage across 10 independent trials. Results indicated that the hybrid system's thermal performance was significantly superior, achieving a peak internal chamber temperature of 80°C, compared to 70°C in the conventional counterpart. Consequently, the hybrid configuration facilitated a more rapid drying process. On the initial day, the hybrid system achieved a weight loss of 44.20%, substantially outperforming the conventional

system's 14.60%, thereby demonstrating a superior moisture removal capacity. Furthermore, the application of water for thermal energy storage stabilized internal temperatures, allowing the system to continuously radiate effective drying heat for approximately two additional hours compared to the conventional baseline. In conclusion, the integration of a solar collector provides a cost-effective mechanism to extend operational drying time and elevate thermal efficiency. This innovation is highly viable for agricultural drying processes demanding robust thermal performance, such as bananas, tea leaves, and bagasse.

Keywords : Solar Dryer / Thermal Performance / Solar Collector / Hybrid Solar Dryer / Thermal Energy Storage

บทนำ

เทคโนโลยีการอบแห้งด้วยพลังงานแสงอาทิตย์มีบทบาทสำคัญในการเพิ่มมูลค่าผลผลิตทางการเกษตร และลดการสูญเสียหลังการเก็บเกี่ยว (ศิริวรรณ อาจบำรุง, 2562; Villagran et al., 2024) อย่างไรก็ตาม ตู้อบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบเดิมพึ่งพารังสีอาทิตย์เพียงอย่างเดียว ทำให้ขาดเสถียรภาพ เมื่อมีความเข้มแสงต่ำหรือหลังพระอาทิตย์ตก อุณหภูมิภายในตู้จะลดลงทันที อุณหภูมิไม่คงที่และไม่สามารถทำงานได้หลังพระอาทิตย์ตก ส่งผลให้กระบวนการอบแห้งล่าช้าและส่งผลกระทบต่อคุณภาพการอบผลิตภัณฑ์ (รัฐพงษ์ ไบ้เคน และ วิเศษศักดิ์ เสงี่ยมศักดิ์, 2563)

ในระดับชุมชน ปัญหาดังกล่าวมักถูกแก้ไขด้วยการใช้ตู้อบแห้งที่เสริมความร้อนจากแก๊สปิโตรเลียมเหลว (LPG) เพื่อให้กระบวนการอบแห้งดำเนินไปได้อย่างต่อเนื่องและรวดเร็ว แต่จากการสำรวจบริบทการใช้งานในพื้นที่พบว่า ระบบที่ใช้แก๊ส LPG ก่อให้เกิดปัญหาสำคัญต่อความเชื่อมั่นของผู้ใช้งาน การเผาไหม้ของ LPG มักเกิดสารประกอบไฮโดรคาร์บอนและมีสารเติมแต่งกลิ่น เช่น Ethyl Mercaptan ที่ใส่ไว้เตือนภัยแก๊สรั่ว สารเหล่านี้เมื่อระเหยจะเข้าไปเกาะติดเนื้อของผลผลิตที่มีรูพรุน เช่น ถั่วลิสง หรือผลไม้อบแห้ง เป็นต้น ทำให้รสชาติผิดเพี้ยนและมีกลิ่นแก๊สตกค้าง ทำลายความเชื่อมั่นของผู้บริโภค รวมถึงข้อกังวลด้านความปลอดภัยในการใช้งานและมาตรฐานสุขอนามัยในกระบวนการผลิต ซึ่งส่งผลโดยตรงต่อคุณภาพมาตรฐานของผลิตภัณฑ์ชุมชน (ภาคิน มณีโชติ และคณะ, 2564)

ผู้วิจัยจึงได้นำแนวคิดการประยุกต์ใช้ระบบโซล่าคอลเลคเตอร์ (Solar Collector) มาเป็นแหล่งกำเนิดความร้อนทดแทนการใช้เชื้อเพลิงฟอสซิล เมื่อเปรียบเทียบสมรรถนะของตู้อบแห้งที่พัฒนาขึ้นกับงานวิจัยที่ผ่านมา (ธีรพงศ์ บริรักษ์ และคณะ, 2564) พบว่า ระบบมีจุดเด่นที่แตกต่างจากตู้อบแห้งแบบผสมผสานของธีรพงศ์ บริรักษ์ และคณะ อย่างชัดเจน แม้ว่าการวิจัยดังกล่าวจะแก้ปัญหาคำตอบเนื่องในการอบแห้งด้วยการใช้ฮีตเตอร์ไฟฟ้า 1,800 วัตต์ เป็นแหล่งความร้อนเสริม แต่วิธีการดังกล่าวยังคงสร้างภาระต้นทุนด้านพลังงานไฟฟ้า ในขณะที่งานวิจัยฉบับนี้ เลือกใช้ระบบโซล่าคอลเลคเตอร์สร้างความร้อนถ่ายเท

สู่น้ำร้อนส่งผ่านท่อทองแดง ซึ่งไม่เพียงแต่ช่วยลดต้นทุนการใช้พลังงานฟอสซิลและไฟฟ้าได้อย่างสมบูรณ์แบบ แต่การใช้น้ำเป็นตัวกลางยังสร้างความเฉื่อยทางความร้อน (Thermal Inertia) ทำให้ระบบสามารถทำอุณหภูมิได้สูงถึง 80°C และรักษาความร้อนภายในตู้อบแห้งเพื่อขยายเวลาการอบแห้งได้ยาวนานกว่าระบบที่ใช้การเป่าลมร้อนเพียงอย่างเดียว

วิธีดำเนินการวิจัย

1. การออกแบบโครงสร้างตู้อบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ 3 ชั้น (Structural Design)



ภาพที่ 1 โครงสร้างตู้อบแห้งแบบ 3 ชั้น

จากภาพที่ 1 แสดงโครงสร้างตู้อบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบ 3 ชั้น ที่ออกแบบมาเพื่อเพิ่มพื้นที่การอบแห้งผลิตภัณฑ์ทางการเกษตร โดยตัวโครงสร้างถูกออกแบบให้มีการไหลเวียนอากาศตามหลักการพาความร้อนธรรมชาติ ร่วมกับการติดตั้งชุดท่อแดงแลกเปลี่ยนความร้อนภายในแต่ละชั้น เพื่อกระจายความร้อนจากโซล่าคอลเลกเตอร์ได้อย่างทั่วถึง นอกจากนี้ยังมีการติดตั้งระบบควบคุมและช่องระบายอากาศในแต่ละระดับความสูง เพื่อรักษาสมดุลของอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ภายในตู้ให้เหมาะสมกับการอบแห้งผลิตภัณฑ์ที่มีความหลากหลายและต้องการความแม่นยำทางอุณหภูมิสูง (วิเชียร ดวงสีเสน, 2565)

2. การออกแบบท่อทองแดงเพิ่มประสิทธิภาพความร้อน (Copper Heat Exchanger Design)



ภาพที่ 2 แสดงโครงสร้างท่อทองแดงและการติดตั้งใต้ถาดตากผลิตภัณฑ์แต่ละชั้น

จากภาพที่ 2 การออกแบบชุดท่อทองแดงแลกเปลี่ยนความร้อนภายในตู้อบแห้งได้รับการพิจารณาโดยคำนึงถึงประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อน (Heat Transfer Efficiency) และการกระจายความร้อนที่ทั่วถึงกันทุกชั้น โดยมีรายละเอียดโครงสร้างดังนี้

การติดตั้งแบบขนาน (Parallel Piping Configuration) ชุดท่อทองแดงจำนวน 9 เส้น ถูกติดตั้งในลักษณะขนานกันตลอดแนวความกว้างของตู้ อยู่ใต้ถาดวางผลิตภัณฑ์ เพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัส (Surface Area) ระหว่างท่อทองแดงกับอากาศภายในตู้ให้ได้มากที่สุด การจัดวางเช่นนี้ช่วยลดความต้านทานการไหลของอากาศ (Flow Resistance) และทำให้มวลอากาศร้อนสามารถแทรกซึมผ่านผลิตภัณฑ์ที่วางอยู่บนตะแกรงได้อย่างทั่วถึง

หลักการถ่ายเทความร้อน (Heat Transfer Mechanism) ท่อทองแดงถูกเลือกใช้เนื่องจากมีค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน (Thermal Conductivity) สูง ซึ่งช่วยให้ความร้อนจากน้ำที่อยู่ภายในโซล่าคอลเลคเตอร์ถูกถ่ายเทออกสู่บรรยากาศภายในตู้ผ่านการพาความร้อน (Convection) และการแผ่รังสีความร้อน (Radiation) จากผิวท่อทองแดงไปสู่ผลิตภัณฑ์ในตู้อบแห้งได้สูงสุด

การเพิ่มสมรรถนะด้านความร้อนการอบแห้งใน 3 ชั้น โดยการเดินท่อทองแดงผ่านใต้ถาดวางผลิตภัณฑ์ทั้ง 3 ชั้นในรูปแบบเดียวกัน ช่วยให้แต่ละระดับของผลิตภัณฑ์ได้รับพลังงานความร้อนในระดับที่ใกล้เคียงกัน (Thermal Uniformity) ลดปัญหาความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างชั้น (Temperature Gradient) ซึ่งเป็นอุปสรรคสำคัญในการควบคุมคุณภาพของผลิตภัณฑ์ให้แห้งพร้อมกันทุกชั้น

การติดตั้งชุดท่อทองแดงไว้ใต้ถาดวางผลิตภัณฑ์ช่วยให้ความร้อนลอยตัวขึ้นสู่ด้านบน (Natural Convection) ตามธรรมชาติ เสริมกับการไหลเวียนของอากาศภายในตู้ ทำให้เกิดกระบวนการอบแห้งที่มีสมรรถนะด้านความร้อนสูงกว่าการให้ความร้อนจากจุดเดียวหรือการพึ่งพาพลังงานแสงอาทิตย์เพียงอย่างเดียว

3. หลักการทำงานร่วมกับตัวเก็บรังสีอาทิตย์ (Solar collector)



ภาพที่ 3 การออกแบบระบบของตู้อบแห้งร่วมกับโซล่าคอลเลคเตอร์

จากภาพที่ 3 อธิบายหลักการทำงานร่วมกับโซล่าคอลเลคเตอร์ ดังนี้

1. เติมน้ำเข้าถังโซล่าคอลเลคเตอร์ ทางช่องเติมน้ำ (หมายเลข 1)
2. น้ำจะไหลออกจากถังเก็บน้ำร้อน (หมายเลข 2) เข้าแผงรับความร้อนจากแสงอาทิตย์ (หมายเลข 3) จากนั้นจะไหลเข้าสู่ตู้อบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ (หมายเลข 4) และไหลผ่านท่อทองแดงใต้ถาดวางผลิตภัณฑ์ชั้นบน ชั้นกลาง และชั้นล่างตามลำดับ
3. จากนั้นน้ำจะไหลออกจากตู้อบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ (หมายเลข 5) ไปตามท่อ (หมายเลข 6) เข้าถังเก็บน้ำ

4. เปิดก๊อกไอล้อมภายในระบบ (หมายเลข 7) เมื่อไอล้อมออกจากระบบหมดแล้วปิดก๊อกน้ำเข้า (หมายเลข 1) และก๊อกไอล้อม (หมายเลข 7) ทั้งหมด

ระบบน้ำทั้งหมดจะเป็นระบบปิดใช้หลักการถ่ายเทความร้อนจากถังเก็บน้ำร้อนของโซล่าคอลเลคเตอร์ ถ่ายเทความร้อนด้วยตัวกลาง คือ น้ำ ไปตามท่อทองแดงถ่ายเทไปยังแต่ละชั้นของตู้อบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบผสมผสาน

4. ขั้นตอนการทดลอง (Experimental Procedures)

การทดลองนี้ถูกออกแบบมาเพื่อเปรียบเทียบสมรรถนะด้านความร้อนระหว่างตู้อบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ระบบผสมผสาน และตู้อบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบเดิม มีขั้นตอนดังนี้

4.1 การเตรียมความพร้อม ทำการเตรียมกล้วยน้ำว้าที่มีระดับความสุกและน้ำหนักเริ่มต้นที่เท่ากัน เพื่อใช้เป็นผลิตภัณฑ์ทดลอง จำนวน 10-12 ลูก ถูกควบคุมไว้ที่ 500 กรัมเท่ากัน (กฤษฎางค์ ศุภระมูล และคณะ, 2564; Amer et al., 2010) จากนั้นทำการจัดเรียงกล้วยลงบนตะแกรงในตู้อบแห้งทั้งสองระบบ ใ้มีจำนวนและปริมาณต่อชั้นเท่ากันทุกประการ โดยงานวิจัยนี้ประเมินผลผ่าน "ร้อยละของน้ำหนักที่หายไป" หรือ "เปอร์เซ็นต์ความชื้นที่ลดลง (% Moisture Reduction)" โดยตั้งสมมติฐานว่าน้ำหนักที่หายไปทั้งหมดคือปริมาณน้ำ (ความชื้น) ที่ระเหยออกจากผลิตภัณฑ์ระหว่างการอบแห้ง

สูตรคำนวณน้ำหนักกล้วยที่หายไปและความชื้นในการวิจัยการอบแห้ง น้ำหนักที่หายไปจะถูกประเมินว่าเป็น "ปริมาณน้ำ (ความชื้น)" ที่ระเหยออกจากผลิตภัณฑ์ ดังสมการต่อไปนี้

สมการที่ 1 การหาน้ำหนักที่หายไป (Weight Loss)

$$\text{น้ำหนักที่หายไป (กรัม)} = W_i - W_t$$

โดยกำหนดให้ W_i (Initial Weight) คือ น้ำหนักของกล้วยก่อนตาก (กรัม)

W_t (Weight at time) คือ น้ำหนักของกล้วยที่ชั่งได้ ณ เวลาใดๆ ระหว่างการอบแห้ง (กรัม)

สมการที่ 2 การหาร้อยละของน้ำหนักที่หายไป หรือ เปอร์เซ็นต์ความชื้นที่ลดลง (% Moisture

$$\text{Reduction) ร้อยละของน้ำหนักที่หายไป (\%)} = \left(\frac{W_i - W_t}{W_i} \right) \times 100$$

โดยกำหนดให้ W_i (Initial Weight) คือ น้ำหนักของกล้วยก่อนตาก (กรัม)

W_t (Weight at time) คือ น้ำหนักของกล้วยที่ชั่งได้ ณ เวลาใดๆ ระหว่างการอบแห้ง (กรัม)

สมการที่ 3 คำนวณอัตราการอบแห้ง (Drying Rate)

อัตราการอบแห้ง (Drying Rate) คือปริมาณความชื้นหรือน้ำที่ระเหยออกจากวัสดุต่อหนึ่งหน่วยเวลา

$$DR = \frac{W_i - W_f}{\Delta t}$$

โดยกำหนดให้ DR = อัตราการอบแห้ง (เช่น g/min หรือ kg/h)

W_i = น้ำหนักของวัสดุเริ่มต้น (g หรือ kg)

W_f = น้ำหนักของวัสดุที่เวลาใดๆ (g หรือ kg)

Δt = ช่วงระยะเวลาที่ใช้ในการอบแห้ง (min หรือ h)

4.2 การวัดอุณหภูมิภายในตู้อบแห้งดำเนินการโดยใช้เครื่องบันทึกข้อมูลอัตโนมัติแบบหลายช่องสัญญาณ (Data Logger) ยี่ห้อ Graphtec รุ่น GL220 ซึ่งมีระบบประมวลผลความละเอียด 16-bit และใช้เทคโนโลยีแยกช่องสัญญาณแบบอิสระ (All channels isolated) ทำให้ข้อมูลอุณหภูมิที่บันทึกพร้อมกันทั้ง 6 ตำแหน่งมีความถูกต้องสูง ปรากฏจากการรบกวนข้ามช่องสัญญาณ โดยมีระดับความคลาดเคลื่อนตามคู่มือผู้ผลิตอยู่ที่ $\pm(0.05\% \text{ of reading} + 1.0^\circ\text{C})$ สำหรับการใช้งานใช้สายวัดเทอร์โมคัปเปิล ชนิด K ซึ่งมีมาตรฐานและเหมาะสมสำหรับการวิเคราะห์สมรรถนะเชิงความร้อนซึ่งถือเป็นความแม่นยำระดับเครื่องมือวัดมาตรฐาน (Instrumentation grade) เป็นที่ยอมรับในงานวิจัยระดับสากล



ภาพที่ 4 แสดงเครื่องมือวัดอุณหภูมิ ยี่ห้อ Graphtec รุ่น GL220

การติดตั้งเครื่องมือวัด ดำเนินการติดตั้งเซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิ (Temperature Sensor) ไว้แต่ละตำแหน่ง ดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 แสดงตำแหน่งจุดติดตั้งเซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิเพื่อบันทึกผลการทดลอง

ลำดับที่	ชื่อย่อ เพื่อบันทึกค่า	ตำแหน่งจุดติดตั้งเซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิ ($^{\circ}\text{C}$)
1	CH1	ชั้นบนสุดของตู้อบแห้งแบบผสมผสาน
2	CH2	ชั้นตรงกลางของตู้อบแห้งแบบผสมผสาน
3	CH3	ชั้นล่างสุดของตู้อบแห้งแบบผสมผสาน
4	CH4	ท่อทองแดงใต้ถาดตากผลิตภัณฑ์ของตู้อบแห้งแบบผสมผสาน
5	CH5	ภายในตู้อบแห้งแบบเดิม
6	CH6	อุณหภูมิภายนอก

การบันทึกข้อมูลอุณหภูมิ เริ่มต้นบันทึกข้อมูลอุณหภูมิภายในตู้อบทุกๆ 1 ชั่วโมง ในช่วงเวลาตั้งแต่ 08.00 น. จนถึง 20.00 น. ของทุกวันที่มีการทดลอง เพื่อให้ครอบคลุมช่วงที่มีความเข้มแสงอาทิตย์สูงสุด

การทดสอบค่าความเฉื่อยความร้อน (Thermal Inertia) หลังช่วงเวลา 17.00 น. หรือภายหลังจากพระอาทิตย์ตกดิน ให้ดำเนินการบันทึกอุณหภูมิภายในตู้อบต่อเนื่องอีกจนถึงเวลา 20.00 น. เพื่อศึกษาความสามารถของการถ่ายเทความร้อนน้ำและตัวกลางกักเก็บความร้อนในการรักษาอุณหภูมิภายในตู้อบแห้งแบบผสมผสาน



ภาพที่ 5 แสดงตำแหน่งจุดติดตั้งจริงเซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิเพื่อบันทึกผลการทดลอง

4.3 การประเมินค่าความเข้มรังสีอาทิตย์ (Solar Radiation) ในระหว่างการทดลอง ดำเนินการโดยใช้เครื่องวัดพลังงานแสงอาทิตย์แบบบันทึกข้อมูลอัตโนมัติ มีระบบบันทึกข้อมูลลง SD Card พร้อมประทับวันที่และเวลา (Built-in Clock and Calendar) อย่างเที่ยงตรง โดยสามารถตั้งความถี่ในการบันทึก (Sampling time) ได้ตั้งแต่ 1 ถึง 3,600 วินาที ทำให้ได้ชุดข้อมูลที่ต่อเนื่องและปราศจากความผิดพลาด จากการจดบันทึกด้วยมือ (Human Error)

เครื่องวัดพลังงานแสงอาทิตย์แบบบันทึกข้อมูลอัตโนมัติ ยี่ห้อ Lutron รุ่น SPM-1116SD ตัวเซ็นเซอร์ (ดังแสดงในภาพที่ 6) มีช่วงการตอบสนองเชิงสเปกตรัมที่ 400 ถึง 1,100 นาโนเมตร พร้อมระบบชดเชยค่ามุมตกกระทบของแสง (Cosine Correction) เพื่อลดความคลาดเคลื่อนจากการเคลื่อนที่ของดวงอาทิตย์ เครื่องมีวัดนี้มีความแม่นยำระดับ $\pm 10 \text{ W/m}^2$ (หรือ $\pm 5\%$ ของค่าที่อ่านได้) ควบคุมการทำงานด้วยวงจรไมโครโปรเซสเซอร์ LSI และสามารถบันทึกข้อมูลความเข้มแสงแบบเรียลไทม์ลงในหน่วยความจำ (SD Card) ตามรอบเวลาที่กำหนด ซึ่งช่วยยืนยันความถูกต้องและเสถียรภาพของชุดข้อมูลสภาพแวดล้อมที่นำมาใช้วิเคราะห์สมรรถนะเชิงความร้อนของตู้อบแห้งได้อย่างน่าเชื่อถือ



ภาพที่ 6 แสดงเครื่องมือวัดความเข้มแสง ยี่ห้อ Lutron รุ่น SPM-1116SD

4.4 การวางแผนการทดลองและการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติการศึกษาครั้งนี้ใช้แผนการทดลองแบบเปรียบเทียบ (Comparative Design) ประกอบด้วย 4 สภาวะการทดลองหลัก ได้แก่ 1) การใช้ตู้อบแห้งแบบดั้งเดิม ภายใต้สภาพอากาศที่ท้องฟ้าแจ่มใส 2) การใช้ตู้อบแห้งแบบดั้งเดิม สภาพอากาศแปรปรวน 3) การใช้ตู้อบแห้งแบบผสมผสาน ภายใต้สภาพอากาศที่ท้องฟ้าแจ่มใส และ 4) การใช้ตู้อบแห้งแบบผสมผสาน สภาพอากาศแปรปรวน (มีเมฆปกคลุม/ฝนตก) เพื่อให้ได้ข้อมูลที่มีความเชื่อมั่นทางสถิติ ผู้วิจัยได้กำหนดให้มีการทดลองซ้ำในแต่ละสภาวะจำนวน 10 ครั้ง ($n=10$) รวมจำนวนวันที่มีการเก็บข้อมูลสมบูรณ์ทั้งสิ้น 40 ครั้ง ข้อมูลอุณหภูมิและความเข้มรังสีอาทิตย์ที่บันทึกได้ในแต่ละชั่วโมง (08.00 - 20.00 น.) จะถูกนำมาวิเคราะห์ด้วยสถิติเชิงพรรณนา (Descriptive Statistics) โดยรายงานผลในรูปแบบของค่าเฉลี่ย (Mean) เพื่อแสดงแนวโน้มสมรรถนะเชิงความร้อน และใช้ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD) ในการประเมินเสถียรภาพของการกระจายความร้อนในแต่ละชั้นของตู้อบแห้ง โดยการนำเสนอผลผ่านตารางและกราฟเปรียบเทียบอุณหภูมิ

สถิติที่ใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูล

1. สถิติเชิงพรรณนา (Descriptive Statistics) ข้อมูลอุณหภูมิที่บันทึกได้ในแต่ละจุดเวลา (CH1 ถึง CH6) จะถูกนำมาประมวลผลทางสถิติเพื่อรายงานผลในรูปแบบของ ค่าเฉลี่ย $\pm$ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Mean $\pm$ SD) ดังนี้

1.1 ค่าเฉลี่ย (Mean: $\bar{X}$)

ใช้เป็นตัวแทนของอุณหภูมิในแต่ละช่วงเวลา เพื่อนำไปสร้างกราฟเส้นแนวโน้มการกระจายความร้อน (Temperature Profile)

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}$$

1.2 ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation: SD) ใช้เป็นตัวชี้วัด เสถียรภาพความร้อน (Thermal Stability) ของตู้อบแห้ง หากค่า SD มีค่าน้อย แสดงว่าระบบมีความสามารถในการรักษาอุณหภูมิให้คงที่ได้ดีในทุกๆ รอบการทดลอง

$$SD = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{X})^2}{n-1}}$$

2. สถิติที่ใช้ทดสอบสมมติฐาน

2.1 เปรียบเทียบสมรรถนะด้านอุณหภูมิระหว่างตู้อบแห้งแบบผสมผสานที่พัฒนาขึ้นกับตู้อบแห้งแบบเดิม ทั้งในวันที่ท้องฟ้าแจ่มใสและวันที่สภาพอากาศแปรปรวน ใช้สถิติ Mann-Whitney U Test เลือกใช้สถิติ Mann-Whitney U Test เพื่อเปรียบเทียบสมรรถนะด้านอุณหภูมิระหว่างตู้อบแห้งแบบผสมผสานที่พัฒนาขึ้นกับตู้อบแห้งแบบเดิม เนื่องจากข้อมูลอุณหภูมิของตู้อบทั้งสองแบบเป็นข้อมูลจาก กลุ่มที่เป็นอิสระต่อกัน และข้อมูลมีจำนวนตัวอย่างน้อยหรือมีการแจกแจงไม่เป็นปกติ จึงไม่เป็นไปตามข้อตกลงเบื้องต้นของสถิติ Independent Samples t-test ทั้งนี้ Mann-Whitney U Test เป็นสถิติไม่อิงพารามิเตอร์ที่ใช้เปรียบเทียบอันดับหรือการกระจายของข้อมูลระหว่างสองกลุ่มอิสระ โดยไม่กำหนดให้ข้อมูลมีการแจกแจงแบบปกติ ซึ่งในการวิเคราะห์ควรแยกทดสอบตามสภาพอากาศ ดังนี้

1. เปรียบเทียบอุณหภูมิของตู้อบแห้งแบบผสมผสานกับตู้อบแห้งแบบเดิมในวันที่ท้องฟ้าแจ่มใส
2. เปรียบเทียบอุณหภูมิของตู้อบแห้งแบบผสมผสานกับตู้อบแห้งแบบเดิมในวันที่สภาพอากาศแปรปรวน

สมมติฐานทางสถิติ ได้แก่

H_0 : สมรรถนะด้านอุณหภูมิของตู้อบแห้งทั้งสองแบบไม่แตกต่างกัน

H_1 : สมรรถนะด้านอุณหภูมิของตู้อบแห้งทั้งสองแบบแตกต่างกัน

ผลการวิจัย

ตอนที่ 1 ผลการศึกษาการพัฒนากระบวนการอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบผสมผสาน 3 ชั้น ร่วมกับตัวเก็บรังสีอาทิตย์ (Solar Collector) ดังนี้

ตารางที่ 2 แสดงอุณหภูมิ ($^{\circ}\text{C}$) ผลการทดลองซ้ำในแต่ละสภาวะจำนวน 10 ครั้ง ($n=10$)

ผล ครั้งที่	ตู้อบ แห้ง แบบ เดิม วันที่ ท้องฟ้า แจ่มใส ($^{\circ}\text{C}$)	ตู้อบแห้ง แบบเดิม วันที่ฝน ตกและมี เมฆปก คลุม	ตู้อบแห้ง แบบ ผสมผสาน ชั้นบนสุด วันที่ท้องฟ้า แจ่มใส	ตู้อบแห้ง แบบผสม ผสานชั้น บนสุด วันที่ฝน ตกและมี เมฆปก คลุม	ตู้อบ แห้ง แบบ ผสม ผสาน ชั้น กลาง วันที่ ท้องฟ้า แจ่มใส	ตู้อบ แห้ง แบบ ผสม ผสาน ชั้น กลาง วันที่ฝน ตกและ มีเมฆ ปกคลุม	ตู้อบ แห้ง แบบ ผสม ผสาน ชั้น ล่างสุด วันที่ฝน ตกและมี เมฆปก คลุม	ตู้อบแห้ง แบบผสม ผสานชั้น ล่างสุด วันที่ฝน ตกและมี เมฆปก คลุม
1	70	61	79	72	77	68	76	62

ตารางที่ 2 (ต่อ)

(n=10)

ผล ครั้งที่	ตู้อบ แห้ง แบบ เดิม วันที่ ท้องฟ้า แจ่มใส (°C)	ตู้อบแห้ง แบบเดิม วันที่ฝน ตกและมี เมฆปก คลุม	ตู้อบแห้ง แบบ ผสมผสาน ชั้นบนสุด วันที่ท้องฟ้า แจ่มใส	ตู้อบแห้ง แบบผสม ผสานชั้น บนสุด วันที่ฝน ตกและมี เมฆปก คลุม	ตู้อบ แห้ง แบบ ผสม ผสาน ชั้น กลาง วันที่ ท้องฟ้า แจ่มใส	ตู้อบ แห้ง แบบ ผสม ผสาน ชั้น กลาง วันที่ฝน ตกและ มีเมฆ ปกคลุม	ตู้อบ แห้ง แบบ ผสม ผสาน ชั้น ล่างสุด วันที่ ท้องฟ้า แจ่มใส	ตู้อบแห้ง แบบผสม ผสานชั้น ล่างสุด วันที่ฝน ตกและมี เมฆปก คลุม
2	71	60	80	71	76	69	76	61
3	70	61	81	72	77	69	77	62
4	70	61	80	72	78	68	76	62
5	70	60	80	72	77	69	75	62
6	69	61	81	71	77	69	76	62
7	71	60	81	70	76	69	76	62
8	70	61	80	72	78	70	76	60
9	70	60	80	72	77	69	77	62
10	70	61	81	71	77	68	76	62
$\bar{X}$	70	61	80	72	77	69	76	62
S.D.	0.57	0.52	0.68	0.70	0.66	0.63	0.56	0.67

จากตารางที่ 2 พบว่า ผลการทดลองซ้ำในแต่ละสภาวะจำนวน 10 ครั้ง ค่าเฉลี่ยอุณหภูมิสูงสุด คือ ตู้อบแห้งแบบผสมผสานชั้นบนสุดวันที่ท้องฟ้าแจ่มใส ($\bar{X}$ = 80, S.D. = 0.68) ช่วงเวลาในการเก็บผลการทดลอง 8 พ.ค. 69 ถึง 10 มิ.ย. 69

ตอนที่ 2 ผลการเปรียบเทียบสมรรถนะด้านอุณหภูมิระหว่างตู้อบแห้งแบบผสมผสานที่พัฒนาขึ้นกับตู้อบแห้งแบบเดิม ทั้งในวันที่ท้องฟ้าแจ่มใสและวันที่สภาพอากาศแปรปรวน

2.1 ผลการเปรียบเทียบสมรรถนะด้านอุณหภูมิระหว่างตู้อบแห้งแบบเดิมกับตู้อบแห้งแบบผสมผสานที่พัฒนาขึ้น ในวันที่ท้องฟ้าแจ่มใส

ตารางที่ 3 แสดงการเปรียบเทียบสมรรถนะด้านอุณหภูมิระหว่างตู้อบแห้งแบบเดิมกับตู้อบแห้งแบบผสมผสานที่พัฒนาขึ้น ในวันที่ท้องฟ้าแจ่มใส

ตู้อบแห้ง	N (จำนวนครั้ง)	Median	Mean Rank	Mann-Whitney U	Z	P-value
แบบเดิม	10	70.00	5.50	.000	-3.910	.000
แบบผสมผสาน	10	80.00	15.50			

จากตารางที่ 3 พบว่า ผลการเปรียบเทียบสมรรถนะด้านอุณหภูมิระหว่างตู้อบแห้งแบบเดิมกับตู้อบแห้งแบบผสมผสานที่พัฒนาขึ้นในวันที่ท้องฟ้าแจ่มใส โดยใช้สถิติ Mann-Whitney U Test พบว่า ตู้อบแห้งแบบผสมผสานมีค่ามัธยฐานของอุณหภูมิสูงกว่า (Median = 80.00) ตู้อบแห้งแบบเดิม (Median = 70.00) และมีค่าอันดับเฉลี่ยสูงกว่า (Mean Rank = 15.50 และ 5.50 ตามลำดับ) โดยความแตกต่างดังกล่าวมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ .05 ($U = 0.000$, $Z = -3.910$, $p < .001$) แสดงให้เห็นว่าตู้อบแห้งแบบผสมผสานมีประสิทธิภาพในการเพิ่มอุณหภูมิภายในระบบอบแห้งได้ดีกว่าตู้อบแห้งแบบเดิมอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

2.2 ผลการเปรียบเทียบสมรรถนะด้านอุณหภูมิระหว่างตู้อบแห้งแบบเดิมกับตู้อบแห้งแบบผสมผสานที่พัฒนาขึ้น ในวันที่สภาพอากาศแปรปรวน

ตารางที่ 4 แสดงการเปรียบเทียบสมรรถนะด้านอุณหภูมิระหว่างตู้อบแห้งแบบเดิมกับตู้อบแห้งแบบผสมผสานที่พัฒนาขึ้น ในวันที่สภาพอากาศแปรปรวน

ตู้อบแห้ง	N (จำนวนครั้ง)	Median	Mean Rank	Mann-Whitney U	Z	P-value
แบบเดิม	10	61.00	5.50	.000	-3.905	.000
แบบผสมผสาน	10	72.00	15.50			

จากตารางที่ 4 พบว่า ผลการเปรียบเทียบสมรรถนะด้านอุณหภูมิระหว่างตู้อบแห้งแบบเดิมกับตู้อบแห้งแบบผสมผสานที่พัฒนาขึ้นในวันที่สภาพอากาศแปรปรวน โดยใช้สถิติ Mann-Whitney U Test พบว่า ตู้อบแห้งแบบผสมผสานมีค่ามัธยฐานของอุณหภูมิสูงกว่า (Median = 72.00) ตู้อบแห้งแบบเดิม (Median = 61.00) และมีค่าอันดับเฉลี่ยสูงกว่า (Mean Rank = 15.50 และ 5.50 ตามลำดับ) โดยความแตกต่างดังกล่าวมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ .05 ($U = 0.000$, $Z = -3.910$, $p < .001$) แสดงให้เห็นว่าตู้อบแห้งแบบผสมผสานมีประสิทธิภาพในการเพิ่มอุณหภูมิภายในระบบอบแห้งได้ดีกว่าตู้อบแห้งแบบเดิมอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

ตารางที่ 5 แสดงค่าเฉลี่ยผลการทดลองระหว่างตู้อบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบเดิมและแบบผสมผสาน (n=10)

ลำดับ ที่	รูปแบบการตากแห้ง	ค่าเฉลี่ยผลการทดสอบ ($\bar{X}$)				
		ค่าความเข้ม แสงอาทิตย์ (W/m ²)	อุณหภูมิ ภายนอกตู้ (°C)	อุณหภูมิ ภายในตู้ ชั้นบนสุด (°C)	อุณหภูมิ ภายในตู้ ชั้นกลาง (°C)	อุณหภูมิ ภายในตู้ ชั้นล่างสุด (°C)
1	ตูแบบเดิมในวันที่ ท้องฟ้าแจ่มใส	1048	37	70	-	-
2	ตูแบบเดิมในวันที่ฝน ตกและมีเมฆปกคลุม	436	30	61	-	-
3	ตูแบบทำงานร่วมกับ โซลาร์คอลเลคเตอร์ใน วันที่ท้องฟ้าแจ่มใส	1048	37	80	77	76
4	ตูแบบทำงานร่วมกับ โซลาร์คอลเลคเตอร์ใน วันที่ฝนตกและมีเมฆ ปกคลุม	436	30	72	69	62

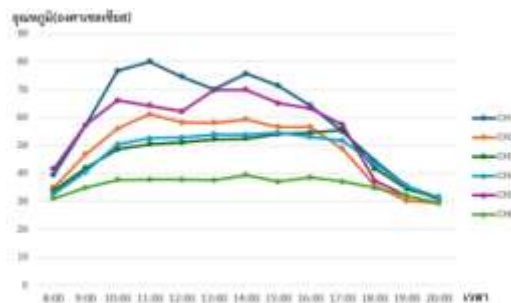
จากตารางที่ 5 วิเคราะห์ผลการทดลองจากตารางบันทึกผลแสดงให้เห็นถึงสมรรถนะด้านความร้อนของตูอบแห้งแบบผสมผสานได้อย่างชัดเจน โดยสามารถสรุปประเด็นการวิเคราะห์ได้ดังนี้

1. สมรรถนะในสถานะที่มีความเข้มแสงสูง ในสถานะที่ท้องฟ้าแจ่มใส ระบบที่พัฒนาทำงานร่วมกับโซลาร์คอลเลคเตอร์ (ลำดับที่ 3) สามารถทำอุณหภูมิในตู้ชั้นบนสุดได้สูงถึง 80°C ซึ่งสูงกว่าตูอบแห้งแบบเดิม (ลำดับที่ 1) ที่ทำได้เพียง 70°C การกระจายความร้อน ระบบผสมผสานไม่เพียงแต่ทำอุณหภูมิได้สูงกว่าแต่ยังสามารถกระจายความร้อนไปยังชั้นกลาง (77°C) และชั้นล่างสุด (76°C) ได้อย่างทั่วถึง ซึ่งถือเป็นการออกแบบท่อแดงแลกเปลี่ยนความร้อนทั้ง 3 ชั้น ที่สามารถถ่ายเทอุณหภูมิให้สมรรถนะด้านความร้อนใกล้เคียงกันในทุกชั้น

2. การตอบสนองต่อสภาวะอากาศแปรปรวน ตู้อบแห้งแบบผสมผสาน แม้ในวันที่ฟ้าครึ้มหรือมีฝนตก ซึ่งความเข้มแสงลดลงอย่างมาก ระบบที่ทำงานร่วมกับโซลาร์คอลเลคเตอร์ (ลำดับที่ 4) ยังคงรักษาอุณหภูมิในตู้ชั้นบนสุดได้ที่ 72°C ซึ่งสูงกว่า ตู้อบแห้งแบบเดิมในวันที่ฟ้าแจ่มใสเสียอีก (ซึ่งทำได้เพียง 70°C ตามลำดับที่ 1) ผลลัพธ์ ประเด็นนี้สะท้อนว่า โซลาร์คอลเลคเตอร์มีส่วนช่วยเพิ่มสมรรถนะด้านความร้อนจาก

แสงแดดได้อย่างดีเยี่ยม ทำให้กระบวนการอบแห้งสามารถดำเนินต่อไปได้แม้ในสภาวะที่ระบบแบบเดิมอาจไม่สามารถทำงานได้เต็มที่

3. สรรณะด้านอุณหภูมิ จากตารางแสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิในตู้อบแบบผสมผสานมีความเสถียรและทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงของสภาพอากาศได้ดีกว่าระบบเดิมอย่างเห็นได้ชัดความคุ้มค่า การที่ระบบผสมผสานสามารถทำอุณหภูมิในชั้นล่างสุดได้ถึง 62°C แม้ในวันที่ฟ้าครึ้ม เป็นเครื่องยืนยันว่า การใช้โซลาร์คอลเลคเตอร์เป็นตัวกลางกักเก็บและถ่ายเทความร้อนด้วยตัวกลางคือน้ำ ส่งผ่านท่อทองแดง เป็นทางออกเชิงเทคนิคที่ช่วยให้การอบแห้งมีมาตรฐาน (Consistency) และความเชื่อถือได้ (Reliability) สูงกว่าระบบแบบเดิม



ภาพที่ 7 แสดงกราฟเปรียบเทียบอุณหภูมิระหว่างตู้อบแห้งแบบเดิมและแบบผสมผสาน

จากภาพที่ 7 แสดงการบันทึกผลการทดลองการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิตู้อบแห้งระหว่างระบบผสมผสาน และระบบแบบเดิม ตั้งแต่เวลา 8.00 น. ถึง 20.00 น. โดยกราฟแต่ละเส้น คือ อุณหภูมิเซ็นเซอร์ของแต่ละช่องอธิบายดังนี้

กราฟเส้นสีน้ำเงิน (CH1) หมายถึง ตู้อบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบผสมผสานชั้นบนสุด

กราฟเส้นสีส้ม (CH2) หมายถึง ตู้อบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบผสมผสานชั้นตรงกลาง

กราฟเส้นสีเขียวเข้ม (CH3) หมายถึง ตู้อบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบผสมผสานชั้นล่างสุด

กราฟเส้นสีฟ้า (CH4) หมายถึง อุณหภูมิท่อแดงในตู้อบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบผสมผสาน

กราฟเส้นสีม่วง (CH5) หมายถึง ตู้อบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบเดิม

กราฟเส้นสีเขียวย่อ (CH6) หมายถึง อุณหภูมิอากาศภายนอก

สามารถสรุปประเด็นสำคัญได้ดังนี้

ช่วงเวลาที่มีความเข้มแสงอาทิตย์สูง 09.00-15.00 น. กราฟเส้นสีน้ำเงิน (CH1) ซึ่งแสดงอุณหภูมิของระบบผสมผสาน และกราฟเส้นสีม่วง (CH5) ซึ่งแสดงอุณหภูมิของระบบเดิม พบว่า กราฟเส้นสีน้ำเงิน (CH1) มีระดับอุณหภูมิสูงกว่าระบบเดิมอย่างเห็นได้ชัด กราฟเส้นสีน้ำเงิน (CH1) อุณหภูมิสูงสุดสามารถพุ่งสูงขึ้นถึง 80°C ในช่วงเวลาประมาณ 11.00 น. ซึ่งยืนยันถึงการเพิ่มสมรรถนะด้านความร้อนของโซลาร์คอลเลคเตอร์

เสถียรภาพและการกระจายความร้อนระบบผสมผสาน (CH1, CH2, CH3) แสดงแนวโน้มอุณหภูมิที่สูงและค่อนข้างคงที่ในช่วงเที่ยงวัน ซึ่งสะท้อนถึงประสิทธิภาพการทำงานของระบบแลกเปลี่ยนความร้อนที่ติดตั้งไว้ภายในตู้ ในขณะที่ตู้อบแห้งระบบเดิม (CH5) มีระดับอุณหภูมิที่ต่ำกว่าอย่างชัดเจน โดยมีอุณหภูมิสูงสุดเพียง

70 °C เท่านั้น ช่วงเวลาหลังพระอาทิตย์ตก 18.00 - 20.00 น. อุณหภูมิของทุกเส้นของกราฟมีแนวโน้มลดลงอย่างต่อเนื่องเพราะขาดแหล่งพลังงานแสงอาทิตย์ อย่างไรก็ตาม กราฟแสดงให้เห็นว่าระบบผสมผสานยังคงรักษาอุณหภูมิได้สูงกว่าระบบเดิมในช่วงแรกหลังพระอาทิตย์ตก ซึ่งเป็นหลักฐานเชิงประจักษ์ถึงคุณสมบัติการกักเก็บพลังงานความร้อน (Thermal storage) ของโซลาคอลเลคเตอร์ที่ทางผู้วิจัยได้ออกแบบและพัฒนาให้ทำงานร่วมกัน

ตารางที่ 6 แสดงผลการทดลองน้ำหนักกล้วยที่หายไปและความชื้นในการวิจัยการอบแห้ง

วันที่	รูปแบบการตาก	น้ำหนักเริ่มต้น (กรัม)	น้ำหนักที่หายไป (กรัม)	% น้ำหนักที่หายไป	รูปแบบการตาก	น้ำหนักเริ่มต้น (กรัม)	น้ำหนักที่หายไป (กรัม)	% น้ำหนักที่หายไป
1	แบบเดิม	500	73	14.60	แบบผสมผสาน (ชั้นบน)	500	121	24.20
2		427	95	22.25		379	82	21.64
3		332	52	15.66		297	53	17.85
4		280	35	12.50		244	23	9.43
5		245	23	9.39		221	12	5.43
6		222	11	4.95		209	8	3.83
7		211	6	2.84		201	6	2.99

จากตารางที่ 6 การเปรียบเทียบผลลัพธ์ระหว่างการตากกล้วย โดยเริ่มต้นที่น้ำหนัก 500 กรัม เท่ากัน พบว่า การตากในตู้อแห้งแบบผสมผสานชั้นบน มีประสิทธิภาพดีกว่า การตากในตู้อแห้งแบบเดิม โดยสามารถอบแห้งกล้วยได้รวดเร็วกว่า โดยเฉพาะในวันแรก และช่วยลดความชื้นได้มากกว่า และจะค่อยๆ ลดลงน้อยลงในวันท้ายๆ (วันที่ 5-7) เนื่องจากความชื้นในตัวกล้วยเหลือน้อยแล้ว

ตารางที่ 7 แสดงอัตราการระเหยน้ำมวลรวมรายวัน (Drying Rate)

วันที่	อัตราการอบแห้ง แบบเดิม (กรัม/วัน)	อัตราการอบแห้ง แบบผสมผสาน (กรัม/วัน)
1	73	121
2	95	82
3	52	53
4	35	23
5	23	12
6	11	8
7	6	6

จากตารางที่ 7 การประเมินอัตราการระเหยน้ำมวลรวมเฉลี่ยตลอดทั้งกระบวนการ (7 วัน) สามารถคำนวณได้โดยนำน้ำหนักที่หายไปทั้งหมดหารด้วยระยะเวลา รวม ดังนี้

แบบเดิม

$$\text{น้ำหนักที่ระเหยไปทั้งหมด} = 73 + 95 + 52 + 35 + 23 + 11 + 6 = 295 \text{ กรัม}$$

$$\text{อัตราการระเหยน้ำเฉลี่ย} = 295 \div 7 = 42.14 \text{ กรัม/วัน}$$

แบบผสมผสาน (ชั้นบน)

$$\text{น้ำหนักที่ระเหยไปทั้งหมด} = 121 + 82 + 53 + 23 + 12 + 8 + 6 = 305 \text{ กรัม}$$

$$\text{อัตราการระเหยน้ำเฉลี่ย} = 305 \div 7 = 43.57 \text{ กรัม/วัน}$$

จากการผลอัตราการระเหยน้ำ พบว่า ระบบแบบผสมผสานมีอัตราการระเหยน้ำมวลรวมเฉลี่ยที่สูงกว่า โดยเฉพาะในวันแรก มีอัตราการระเหยสูงถึง 121 กรัม/วัน ซึ่งแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพในการดึงความชื้นออกจากกล้วยในช่วงต้นของกระบวนการ



ภาพที่ 8 แสดงผลิตภัณฑ์กล้วยตากที่ได้จากการอบแห้งแบบผสมผสาน

อภิปรายผล

จากการทดลองพบว่า ระบบอบแห้งแบบผสมผสานมีสมรรถนะเชิงความร้อนสูงกว่าระบบแบบเดิมอย่างมีนัยสำคัญ โดยสามารถรักษาระดับอุณหภูมิภายในตู้อบสูงสุดที่ 80°C ซึ่งเป็นผลโดยตรงจากการถ่ายเทพลังงานความร้อนจากโซลาร์คอลเลกเตอร์ผ่านท่อแลกเปลี่ยนความร้อนภายในตู้ ส่งผลให้มีการสะสมความร้อนคงค้าง (Thermal storage) ที่มีประสิทธิภาพมากกว่าระบบเดิม ซึ่งสามารถขยายความในเชิงเทคนิคได้ดังนี้

1. สมรรถนะด้านร้อน

ระบบที่พัฒนาขึ้นไม่ได้พึ่งพาเพียงการพาความร้อนจากอากาศภายนอกแบบเดิมเท่านั้น ความได้เปรียบของระบบที่พัฒนาขึ้นในงานวิจัยนี้ใช้น้ำเป็นตัวกลาง เพื่อกักเก็บความร้อนที่สะสมไว้ งานวิจัยนี้จึงประยุกต์ใช้น้ำ ซึ่งน้ำมีความจุความร้อนจำเพาะสูงมาก (ประมาณ $4.18 \text{ kJ/kg} \cdot ^{\circ}\text{C}$ สูงกว่าอากาศถึง 4 เท่า) ทำให้มวลน้ำสามารถดูดซับและ "กักเก็บ (Storage)" พลังงานความร้อนจากโซลาร์คอลเลกเตอร์ได้มหาศาล จากนั้นจึงถูกปั๊มให้หมุนเวียนไปตามเครือข่าย "ท่อทองแดง" ที่เดินคู่ขนานไว้ใต้ถาดผลิตภัณฑ์ทั้ง 3 ชั้น แต่ยังไม่ได้นำซึ่งมีค่าความจุความร้อนจำเพาะ (Specific Heat Capacity) สูงกว่าอากาศมาก เป็นตัวกลางในการถ่ายเทความร้อนจากโซลาร์คอลเลกเตอร์เข้าสู่ตู้ผ่านท่อทองแดง ทำให้สามารถควบคุมและกระจายอุณหภูมิภายในแต่ละชั้นได้

สมรรถนะด้านความร้อนเพิ่มขึ้น ส่งผลให้การถ่ายเทความร้อนไปยังวัสดุอบแห้งเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพมากกว่าระบบพึ่งพาการพาความร้อนจากแสงแดดโดยตรงเพียงอย่างเดียว (Subramaniam et al., 2022) ในขณะที่งานวิจัยของ (Afzal et al., 2023) ต้องพึ่งพาการไหลของ ลมร้อน ซึ่งควบคุมได้ยากและสูญเสียความร้อนได้ง่าย นวัตกรรมในงานวิจัยนี้ได้เปลี่ยนมาใช้ "น้ำและท่อทองแดง" เป็นเส้นทางหลักในการกระจายความร้อน ซึ่งไม่เพียงแต่เพิ่มความจุความร้อนของระบบ แต่ยังช่วยให้สามารถบังคับทิศทางและปริมาณความร้อนให้ส่งตรงผ่านท่อทองแดงถึงวัสดุอบแห้งในทุกชั้นได้ตามต้องการ

2. ความสามารถในการกักเก็บพลังงานเชิงความร้อน (Thermal Inertia and Storage)

การใช้โซลาร์คอลเลกเตอร์ร่วมกับน้ำทำให้ระบบมีความเฉื่อยความร้อน (Thermal Inertia) ที่สูงกว่าระบบเดิมอย่างเห็นได้ชัด ในช่วงเวลาที่แสงแดดลดลงหรือหลังพระอาทิตย์ตกดิน ปริมาณความร้อนที่สะสมอยู่ในมวลน้ำภายในระบบบดยังคงทำหน้าที่เป็นแหล่งจ่ายพลังงานสำรอง ส่งผลให้ตู้อบสามารถรักษาอุณหภูมิการอบแห้งให้อยู่ในระดับที่ส่งผลต่อการระเหยน้ำได้นานขึ้นอีก 2 ชั่วโมง (18.00-20.00 น.) ซึ่งเป็นกลไกสำคัญในการเพิ่มผลผลิต (Productivity) และคุณภาพของผลิตภัณฑ์ที่ต้องการความร้อนต่อเนื่อง สอดคล้องกับผลการศึกษาของ (Rulazi et al., 2023)

3. การรักษาสถียรภาพและคุณภาพผลิตภัณฑ์ (Thermal Stability and Product Quality)

การที่ระบบสามารถทำอุณหภูมิสูงสุดได้ถึง 80°C และมีความต่อเนื่องของอุณหภูมิที่คงที่ ช่วยลดปัญหาความแปรปรวนของอุณหภูมิ (Temperature Fluctuation) ซึ่งเป็นอุปสรรคสำคัญในการควบคุมคุณภาพของผลิตภัณฑ์ เมื่อเปรียบเทียบกับระบบเดิมที่อุณหภูมิจะลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อขาดแสงแดด การควบคุมอุณหภูมิที่เสถียรนี้ไม่เพียงแต่ช่วยเพิ่มอัตราการอบแห้ง (Drying Rate) แต่ยังช่วยยกระดับความเชื่อมั่นด้านความสะอาดและความปลอดภัยของผู้ใช้งาน เนื่องจากกระบวนการผลิตมีความต่อเนื่องและไม่จำเป็นต้องพึ่งพาการเผาไหม้จากเชื้อเพลิงฟอสซิลที่อาจก่อให้เกิดการปนเปื้อน

สรุปผลการทดลอง

จากการศึกษาและเปรียบเทียบสมรรถนะระหว่างตู้อบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบผสมผสาน 3 ชั้นที่ทำงานร่วมกับโซลาร์คอลเลกเตอร์ และตู้อบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบเดิม พบว่าระบบที่พัฒนาขึ้นใหม่มีประสิทธิภาพเชิงความร้อนและอัตราการอบแห้งที่เหนือกว่าอย่างชัดเจน โดยสรุปสาระสำคัญได้ดังนี้

1. สมรรถนะด้านความร้อนสูงสุด ในวันที่สภาพอากาศและท้องฟ้าแจ่มใส ตู้อบแห้งแบบผสมผสานสามารถทำอุณหภูมิภายในตู้ชั้นบนสุดได้สูงสุดถึง 80°C ในขณะที่ตู้อบแห้งแบบเดิมทำได้เพียง 70°C

2. การกระจายอุณหภูมิที่สม่ำเสมอ การออกแบบเครือข่ายท่อทองแดงติดตั้งไว้ใต้ถาดตากผลิตภัณฑ์ทั้ง 3 ชั้น ช่วยให้ความร้อนถูกถ่ายเทได้อย่างทั่วถึง โดยอุณหภูมิเฉลี่ยของชั้นบนสุด ชั้นกลาง และชั้นล่างสุด มีค่าใกล้เคียงกันที่ 80°C, 77°C และ 76°C ตามลำดับ

3. ความทนทานต่อสภาพอากาศแปรปรวน ในวันที่ฝนตกหรือมีเมฆปกคลุม ระบบผสมผสานยังสามารถรักษาอุณหภูมิในชั้นบนสุดไว้ได้ที่ 72°C ซึ่งเป็นระดับความร้อนที่สูงกว่าอุณหภูมิสูงสุดของตู้อบแห้งแบบเดิมในวันที่ท้องฟ้าแจ่มใสเสียอีก

4. การกักเก็บความร้อนและการขยายเวลาอบแห้ง การใช้น้ำซึ่งมีค่าความจุความร้อนจำเพาะสูงเป็นตัวกลางในการรับพลังงานจากโซล่าคอลเลคเตอร์ สร้างความเฉื่อยทางความร้อน (Thermal Inertia) ที่ยอดเยี่ยม ทำให้ระบบสามารถกระจายความร้อนเพื่ออบแห้งผลิตภัณฑ์ได้อย่างต่อเนื่องนานขึ้นอีกประมาณ 2 ชั่วโมง (ช่วง 18.00-20.00 น.) หลังจากพระอาทิตย์ตกดิน

5. อัตราการอบแห้ง (Drying Rate) การทดลองอบแห้งกล้วยยืนยันว่าระบบผสมผสานมีอัตราการระเหยน้ำมวลรวมเฉลี่ยสูงกว่า โดยในวันแรกสามารถระเหยน้ำได้สูงถึง 121 กรัม/วัน เมื่อเทียบกับระบบเดิมที่ทำได้เพียง 73 กรัม/วัน ทำให้กระบวนการอบแห้งดำเนินไปได้อย่างรวดเร็ว

6. ทางสถิติ การทดสอบสมมติฐานด้วยสถิติ Mann-Whitney U Test ยืนยันว่า ความสามารถในการเพิ่มอุณหภูมิของตู้อบแห้งแบบผสมผสาน แตกต่างและสูงกว่าระบบเดิม ที่ระดับ .05 ($p < .001$) ทั้งในวันที่ท้องฟ้าแจ่มใสและวันที่สภาพอากาศแปรปรวน

โดยสรุป การผสมผสานโซล่าคอลเลคเตอร์ร่วมกับระบบหมุนเวียนน้ำผ่านท่อทองแดง เป็นเทคโนโลยีที่คุ้มค่าและมีประสิทธิภาพในการแก้ปัญหาความไม่คงที่ของอุณหภูมิ ช่วยรักษาระดับความร้อนได้อย่างมีประสิทธิภาพ และเพิ่มระยะเวลาในการอบแห้ง

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยความรู้ความสามารถและการสนับสนุนจากศูนย์การเรียนรู้พลังงานอัจฉริยะ และธุรกิจนวัตกรรมชุมชน คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม และผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณมหาวิทยาลัยราชภัฏกำแพงเพชร ที่ได้ให้การสนับสนุนสถานที่ และเครื่องมือในการทำวิจัยครั้งนี้เป็นอย่างสูง

เอกสารอ้างอิง

- กฤษฎางค์ สุกระมล, สัญลักษณ์ กิ่งทอง, จรูญ แก่นจันทร์, สถาปัตย์ ชะนากลาง, และมนัญญา คำวชิระพิทักษ์. (2564). การพัฒนาเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบตากแห้งโดยตรงสำหรับอบแห้งกล้วยน้ำว้าใช้ในระดับชุมชน. *วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม : มหาวิทยาลัยราชภัฏสวนสุนันทา*, 9(1), 33-43. <https://ph01.tci-thaijo.org/index.php/fit-ssru/article/view/248682/168580>
- ธีรพงศ์ บริรักษ์, พงษ์สวัสดิ์ คชภูมิ, วรลักษณ์ เสถียรรังสฤษฎ์, และณรงค์ ภู่อู่. (2564). ตู้อบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบผสมผสาน. *วารสารวิชาการมหาวิทยาลัยอีสเทิร์นเอเชีย*, 15(1), 180-195. <https://he01.tci-thaijo.org/index.php/EAUHJSci/article/view/247285/168474>
- ภาคิน มณีโชติ, ภูวดินทร์ ปรีเปรม, ศุภโชค วงษ์เวียง, คัทลียา ปัญญาอุด, วาสนา มณีโชติ, และเทพ เกื้อทวีกุล. (2564). การเพิ่มประสิทธิภาพและผลผลิตการอบข้าวแต๋นด้วยตู้อบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์พลังงานร่วมสำหรับกลุ่มวิสาหกิจชุมชนบ้านโนนใน. *วารสารวิชาการพลังงานทดแทนสู่ชุมชน*, 6(1), 53-60. https://reca.or.th/wp-content/uploads/2023/04/J-REC%E2%80%8B_Vol1_2566_06.pdf
- รัฐพงษ์ ปักเคน, และวิชิตศักดิ์ เสี่ยงศักดิ์. (2563). ตู้อบกล้วยพลังงานแสงอาทิตย์. *วารสารวิชาการการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีสารสนเทศ*, 6(1), 48-57. <https://ph02.tci-thaijo.org/index.php/project-journal/article/view/240075/164046>
- วิเชียร ดวงสีเสน. (2565). การพัฒนาระบบควบคุมอุณหภูมิภายในโรงเรือนปลูกเมล่อน. *สังกัด : วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี*, 9(1), 39-50. <https://li02.tci-thaijo.org/index.php/gts/article/view/1924/1283>
- ศิริวรรณ อาจบำรุง. (2562). ตู้อบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ประสิทธิภาพสูง [รายงานวิจัย]. มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม.
- Afzal, A., Iqbal, T., Ikram, K., Anjum, M. N., Umair, M., Azam, M., Akram, S., Hussain, F., Ameen ul Zaman, M., Ali, A., and Majeed, F. (2023). Development of a hybrid mixed-mode solar dryer for product drying. *Heliyon*, 9(3), Article e14144. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e14144>
- Amer, B. M. A., Hossain, M. A., and Gottschalk, K. (2010). Design and performance evaluation of a new hybrid solar dryer for banana. *Energy Conversion and Management*, 51(4), 813-820. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2009.11.016>
- Villagran, E., Espitia, J. J., Velázquez, F. A., and Rodriguez, J. (2024). Solar dryers: Technical insights and bibliometric trends in energy technologies. *AgriEngineering*, 6(4), 4041-4063. <https://doi.org/10.3390/agriengineering6040228>

Rulazi, E. L., Marwa, J., Kichonge, B., and Kivevele, T. (2023). Development and performance evaluation of a novel solar dryer integrated with thermal energy storage system for drying of agricultural products. *ACS Omega*, 8(45), 43304-43317.

<https://doi.org/10.1021/acsomega.3c07314>

Subramaniam, B. S. K., Sugumaran, A. K., and Athikesavan, M. M. (2022). Performance analysis of a solar dryer integrated with thermal energy storage using PCM-Al₂O₃ nanofluids. *Environmental Science and Pollution Research*, 29(33), 50617-50631.

<https://doi.org/10.1007/s11356-022-19170-6>