

การพัฒนาเครื่องอบแห้งสับประรดทำอุเทนด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับรังสีอินฟราเรด ที่ควบคุมอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ด้วยระบบอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง Development of a Solar-Infrared Hybrid Dryer for Tha Uthen Pineapples with IoT - Controlled Temperature and Humidity

ทรงพล วิจารย์จักร¹ อำไพศักดิ์ ทิบุญมา² อภินันต์ นามเขต² ทรงสุภา พุ่มชุมพล²
อธิวัฒน์ สารโพคา³ และ กานต์ กอมณี^{1*}

Songpol Wijanjak¹ Umphisak Teeboonma² Apinunt Namkhet² Songsupa Pumchumpol²
Athiwut Sanpoka³ and Kan Komane^{1*}

¹สาขาวิชาเทคโนโลยีเครื่องกล คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยนครพนม จังหวัดนครพนม 48000

²ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี จังหวัดอุบลราชธานี 34190

³สาขาวิชาครุศาสตร์อุตสาหกรรมเครื่องกล คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
วิทยาเขตขอนแก่น จังหวัดขอนแก่น 40000

¹Program of Mechanical Technology, Faculty of Industrial Technology, Nakhon Phanom University,
Nakhon Phanom Province, 48000

²Program of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Ubon Ratchathani University,
Ubon Ratchathani Province, 34190

³Program of Mechanical Technical Education, Faculty of Technical Education,
Rajamangala University of Technology Isan Khonkaen Campus, Khon Kaen Province, 40000

*Corresponding author E-mail: kan.k@npu.ac.th

Received 7 May 2025, Accepted 16 March 2026, Published 18 March 2026

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้ประเมินสมรรถนะของเครื่องอบแห้งสับประรดทำอุเทนแบบผสมผสานพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับรังสีอินฟราเรดที่ควบคุมอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ด้วยระบบอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง (SD-IR-IoT) และเปรียบเทียบกับระบบ SD-IoT และเครื่องอบแห้งแบบดั้งเดิม (TSD) การทดลองดำเนินการภายใต้สภาวะแวดล้อมเดียวกันระหว่างเวลา 09:00–17:00 น. โดยใช้หลอดอินฟราเรดกำลัง 200 วัตต์ ควบคุมอุณหภูมิในช่วง 50–70°C และควบคุมพัดลมระบายอากาศให้อยู่ในช่วงความชื้นสัมพัทธ์ 30–50% ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า SD-IR-IoT สามารถรักษาอุณหภูมิภายในห้องอบแห้งสูงกว่าระบบอื่น 5–45% และลดความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ยลงได้ 10–30% ส่งผลให้ค่าสัดส่วนความชื้นลดลงจาก 1.0 เหลือประมาณ 0.15 ภายใน 8 ชั่วโมง ขณะที่ SD-IoT และ TSD ลดลง 0.35 และ 0.50 ตามลำดับ อัตราการอบแห้งของ SD-IR-IoT อยู่ในช่วง 0.4–0.8 กรัม/นาที่ ซึ่งสูงกว่าและมีความสม่ำเสมอกว่าระบบอื่นอย่างชัดเจน การวิเคราะห์เชิงเศรษฐศาสตร์พบว่าระบบมีระยะเวลาคืนทุนเพียง 0.36 ปี ผลการศึกษาชี้ให้เห็นว่าการบูรณาการพลังงานแสงอาทิตย์รังสีอินฟราเรด และการควบคุมแบบเรียลไทม์ด้วย IoT สามารถเพิ่มเสถียรภาพอุณหภูมิ เร่งอัตราการอบแห้ง และมีความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ เหมาะสำหรับการประยุกต์ใช้ในระดับชุมชนและเกษตรกรรายย่อย

คำสำคัญ: การอบแห้งด้วยแสงอาทิตย์ การอบแห้งด้วยอินฟราเรด อินเทอร์เน็ตของทุกสรรพสิ่ง

ABSTRACT

This study evaluated the performance of a solar–infrared hybrid dryer for Tha Uthen pineapples with Internet of Things control (SD-IR-IoT). The system was compared with a solar dryer with IoT control (SD-IoT) and a traditional solar dryer (TSD). Experiments were conducted under identical environmental conditions from 09:00 to 17:00. A 200 W infrared heater was used to maintain the chamber temperature between 50 and 70°C. The exhaust fan was controlled to operate within a relative humidity range of 30–50 %. The results showed that SD-IR-IoT maintained chamber temperatures 5–45% higher than the other systems. It also reduced the average relative humidity by 10–30%. As a result, the moisture ratio decreased from 1.0 to approximately 0.15 within 8 hours. In contrast, the final moisture ratios of SD-IoT and TSD were 0.35 and 0.50, respectively. The drying rate of SD-IR-IoT ranged from 0.4 to 0.8 g/min. This rate was clearly higher and more stable than those of the other systems. The economic analysis indicated a payback period of only 0.36 years. The findings demonstrate that integrating solar energy, infrared heating, and real-time IoT control improves temperature stability, enhances the drying rate, and provides strong economic feasibility. The system is suitable for community-level and small-scale agricultural applications.

Keywords: Solar drying, Infrared drying, Internet of Things

บทนำ

สับปะรดทำอุเทนเป็นพืชเศรษฐกิจที่มีชื่อเสียงในจังหวัดนครพนม โดยได้รับมาตรฐาน GAP และการจดทะเบียนเป็นสิ่งบ่งชี้ทางภูมิศาสตร์ (GI) สับปะรดทำอุเทนมีลักษณะเฉพาะที่แตกต่างจากสับปะรดทั่วไป ได้แก่ เนื้อแน่นละเอียด สีเหลืองเข้ม ตาตื้น รสชาติหวานฉ่ำ มีกลิ่นหอม ไม่ก่ดกลิ่น และแกนกรอบที่สามารถรับประทานได้ โดยมีพื้นที่การปลูกสับปะรดกระจายอยู่ในอำเภอทำอุเทนและบางส่วนของอำเภอโพนสวรรค์ โดยมีเกษตรกรประมาณ 300 ครัวเรือนที่ปลูกสับปะรดในพื้นที่ดังกล่าว รวมพื้นที่ปลูกทั้งหมดประมาณ 8,000 ไร่ ครอบคลุม 2 อำเภอ 5 ตำบล ได้แก่ ตำบลโนนตาลและตำบลท่าจำปาในอำเภอทำอุเทน และตำบลนาใน ในอำเภอโพนสวรรค์ มีสมาชิกเกษตรกรรวมประมาณ 400 คน ซึ่งส่วนใหญ่เน้นการขายสับปะรดสดเป็นหลัก (กลุ่มยุทธศาสตร์พัฒนาการเกษตร, 2566) แม้ว่าการขายสับปะรดสดจะเป็นแหล่งรายได้หลักของเกษตรกร แต่การจำหน่ายสับปะรดในรูปแบบผลไม้สดมีข้อจำกัดในเรื่องของอายุการเก็บรักษาที่สั้น และความเสี่ยงจากการเสียหายระหว่างการขนส่ง (Chen et al., 2023) การอบแห้งสับปะรดจึงเป็นทางเลือกที่มีความสำคัญในการเพิ่มมูลค่าและยืดอายุการเก็บรักษาของสับปะรด (Rani and Tripathy, 2022) นอกจากนี้ การอบแห้งยังช่วยลดการสูญเสียทางการเกษตรและสามารถนำไปใช้ในอุตสาหกรรมแปรรูปอาหารต่าง ๆ เช่น ขนมอบกรอบ แยม หรือผลิตภัณฑ์เสริมอาหาร (Ibrahim et al., 2023; Komanee et al., 2025a) การอบแห้งด้วยพลังงานแสงอาทิตย์เป็นวิธีการที่ใช้พลังงานธรรมชาติจากดวงอาทิตย์ในการลดความชื้นของผลิตภัณฑ์ กระบวนการนี้ได้รับความนิยมเนื่องจากเป็นวิธีที่ประหยัดพลังงานและเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม (Archvadze et al., 2022) อีกทั้ง การอบแห้งด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ช่วยลดต้นทุนการผลิตและไม่ต้องพึ่งพาแหล่งพลังงานอื่น (Fernandes et al., 2022) อย่างไรก็ตามการอบแห้งด้วยพลังงานแสงอาทิตย์เพียงอย่างเดียวไม่เพียงพอเนื่องจากสภาพอากาศที่ไม่คงที่ ซึ่งส่งผลต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ เช่น สี รสชาติและคุณค่าทางโภชนาการ ซึ่งเป็นปัญหาที่พบได้บ่อยในกระบวนการอบแห้งแบบดั้งเดิม (Behera et al., 2022) ดังนั้น การผสมผสานการใช้พลังงานแสงอาทิตย์กับรังสีอินฟราเรดจึงได้รับการเสนอแนะเป็นทางเลือกที่ดีกว่า เนื่องจาก รังสีอินฟราเรดซึ่งเป็นเทคโนโลยีที่น่าสนใจที่สามารถ

ลดความชื้นได้เร็วขึ้นและช่วยรักษาคุณภาพของสับปะรดได้ดีขึ้น การใช้รังสีอินฟราเรดยังช่วยให้กระบวนการอบแห้งมีความสม่ำเสมอและมีสมรรถนะสูงกว่าเทคนิคการอบแห้งแบบดั้งเดิม (Arslan, 2023; Komaneet et al., 2025b) การควบคุมอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์สำหรับกระบวนการอบแห้งเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ โดยการใช้ระบบอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง (IoT) ในการควบคุมและตรวจสอบกระบวนการอบแห้งช่วยให้กระบวนการมีความแม่นยำและสม่ำเสมอ (Jin et al., 2023) เนื่องจากการใช้ IoT คือการแสดงผลและควบคุมอุปกรณ์ผ่านเครือข่ายอินเทอร์เน็ตได้อย่างเรียลไทม์นอกจากนี้การใช้ IoT สามารถช่วยลดการสูญเสียพลังงานและเพิ่มสมรรถนะของกระบวนการอบแห้งได้อย่างมีนัยสำคัญ อีกทั้งยังช่วยบันทึกข้อมูลและวิเคราะห์ผลการอบแห้งทำให้สามารถปรับปรุงกระบวนการได้อย่างต่อเนื่อง (Alkahdery, 2023; Komaneet et al., 2025c)

จากงานวิจัยที่ผ่านมาการใช้การอบแห้งแบบแสงอาทิตย์ร่วมกับรังสีอินฟราเรดมีสมรรถนะในการรักษาคุณภาพและลดเวลาการอบแห้งได้ดีกว่าเทคนิคแบบเดิม เช่น Gilago and Chandramohan (2023) และ Malakar et al. (2023) พบว่า การใช้รังสีอินฟราเรดร่วมกับพลังงานแสงอาทิตย์ในการอบแห้งสับปะรดสามารถลดเวลาการอบแห้งได้ถึง 30 % เมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการอบแห้งด้วยพลังงานแสงอาทิตย์เพียงอย่างเดียว นอกจากนี้ Ghasemi et al. (2023) และ Hadibi et al. (2023) พบว่าการใช้รังสีอินฟราเรดร่วมกับพลังงานแสงอาทิตย์ช่วยให้กระบวนการอบแห้งมีสมรรถนะสูงขึ้น รักษาคุณภาพของผลิตภัณฑ์ได้ดีกว่าวิธีดั้งเดิม และลดการสูญเสียพลังงาน อุณหภูมิที่เหมาะสมในการอบแห้งอยู่ระหว่าง 50-65°C โดยมีค่าเฉลี่ยของการใช้พลังงานและสมรรถนะการอบแห้งที่ดีกว่า ทั้งนี้สามารถลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และเพิ่มความยั่งยืนในด้านพลังงานได้อีกทั้ง Sharma et al. (2022) ได้ศึกษาระบบอบแห้งแบบผสมที่ใช้พลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับเทคโนโลยี IoT และการเรียนรู้เชิงลึก เพื่อเพิ่มสมรรถนะในการอบแห้งผลผลิตทางการเกษตร ระบบนี้สามารถควบคุมและตรวจสอบอุณหภูมิของเครื่องอบแห้งแบบโดยอ้อม (Indirect solar dryer) ได้อย่างแม่นยำผ่าน IoT และใช้การเรียนรู้เชิงลึกในการตั้งค่าอุณหภูมิตามความต้องการของพืชแต่ละชนิด ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าระบบนี้สามารถลดการสูญเสียพลังงานและรักษาคุณภาพของผลิตภัณฑ์ได้ดีขึ้น

ถึงแม้ว่าการผสมการใช้พลังงานแสงอาทิตย์ รังสีอินฟราเรด และระบบ IoT ในการอบแห้งจะมีสมรรถนะสูงแต่ งานวิจัยที่ผ่านมาซึ่งขาดการศึกษาแบบองค์รวมที่นำเทคโนโลยีทั้งสามมาผสมผสานในการอบแห้งสับปะรด โดยเฉพาะการประยุกต์ใช้ IoT เพื่อการควบคุมอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ในกระบวนการอบแห้งสับปะรดอย่างละเอียดในทุกขั้นตอน การศึกษาเพิ่มเติมในด้านนี้ยังมีความจำเป็นเพื่อเพิ่มสมรรถนะและคุณภาพของผลิตภัณฑ์ให้ได้อย่างสูงสุด

ดังนั้น งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินสมรรถนะการอบแห้งสับปะรดทำอุเทนด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับรังสีอินฟราเรดและการควบคุมด้วยระบบ IoT เพื่อให้สามารถควบคุมอุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ในห้องอบแห้ง ตามเงื่อนไขที่ตั้งไว้ อีกทั้งบันทึกค่าของอุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ มวลผลิตภัณฑ์ในการอบแห้ง และตรวจสอบได้อย่างเรียลไทม์เพื่อให้การอบแห้งมีความรวดเร็ว ควบคุมได้และมีสมรรถนะที่มากขึ้น

วิธีการวิจัย

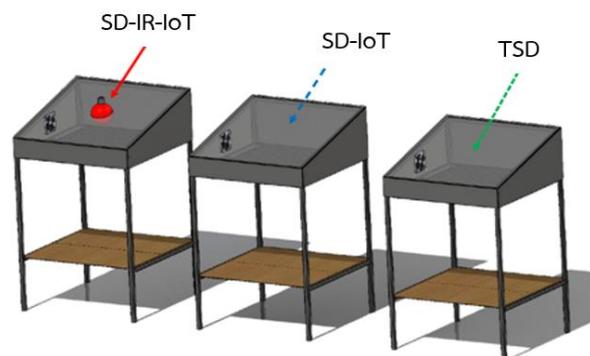
1. สับปะรดทำอุเทนที่ใช้ในการทดลอง

ในงานวิจัยนี้ ใช้สับปะรดทำอุเทนจากตลาดในอำเภอทำอุเทน จังหวัดนครพนม โดยเลือกผลที่มีมวลและความสุกใกล้เคียงกัน เพื่อให้ผลการทดลองมีความแม่นยำ จากนั้นหั่นสับปะรดให้มีความหนาเท่ากันโดยใช้เครื่องหั่น ซึ่งตั้งค่าความหนาเท่ากับ 10 มิลลิเมตร เพื่อลดความแปรปรวนในการทดลอง ก่อนเริ่มการทดลอง ได้สุ่มสับปะรดจำนวน 9 ชิ้นเพื่อวิเคราะห์ค่าความชื้นเริ่มต้นตามมาตรฐาน AOAC (AOAC, 2019) ซึ่งพบว่าสับปะรดทำอุเทนที่ใช้ทดลองมีค่าความชื้นเริ่มต้นเฉลี่ยเท่ากับ $370 \pm 39\%$ d.b. (Dry basis)

2. เครื่องอบแห้งที่ใช้ในการทดลอง

ห้องอบแห้งถูกออกแบบและสร้างขึ้นให้มีขนาด กว้างxยาวxสูง คือ 60x60x25 เซนติเมตร วัสดุที่ใช้สร้างห้องอบแห้ง คือ สังกะสีแผ่นเรียบ และหุ้มชั้นนอกด้วยวัสดุฉนวนอลูมิเนียมฟอยล์เพื่อป้องกันการสูญเสียความร้อนไปยังสิ่งแวดล้อมการรับ

พลังงานแสงอาทิตย์ใช้แผ่นโพลีคาร์บอเนตที่ทนความร้อน ซึ่งช่วยสร้างสภาวะเรือนกระจก ทำให้ความร้อนถูกกักเก็บและสะท้อนกลับภายในห้องอบแห้ง โดยแผ่นโพลีคาร์บอเนตถูกติดตั้งทำมุม 17 องศา และเอียงหันหน้าไปทางทิศใต้เพื่อรับพลังงานแสงอาทิตย์ได้อย่างเหมาะสม ภายในห้องอบแห้งใช้ตะแกรงอลูมิเนียมสำหรับวางสับปะรดในแนวนอน เพื่อให้การกระจายความร้อนและการไหลเวียนของอากาศเป็นไปอย่างทั่วถึง พัดลมขนาด 2.4 วัตต์ ถูกติดตั้งภายในห้องอบแห้งสำหรับดึงอากาศที่มีความชื้นสัมพัทธ์สูงออกจากห้องอบแห้งไปยังบรรยากาศภายนอก เพื่อลดผลกระทบจากความแปรปรวนของสภาพอากาศในแต่ละวัน งานวิจัยนี้ได้สร้างเครื่องอบแห้งจำนวน 3 ชุด สำหรับทดลอง 3 รูปแบบ ภายใต้สภาวะแวดล้อมเดียวกัน รายละเอียดของแต่ละรูปแบบมีดังนี้ 1) เครื่องอบแห้งแบบแสงอาทิตย์ร่วมกับอินฟราเรดควบคุมด้วย IoT (Solar dryer combined with infrared and IoT control, SD-IR-IoT) 2) เครื่องอบแห้งแสงอาทิตย์ควบคุมด้วย IoT (Solar dryer with IoT control, SD-IoT) 3) เครื่องอบแห้งแสงอาทิตย์แบบดั้งเดิม (Traditional solar dryer, TSD) ดังภาพที่ 1



ภาพที่ 1 เครื่องอบแห้งที่ใช้ในการทดลองทั้ง 3 รูปแบบ

3. อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

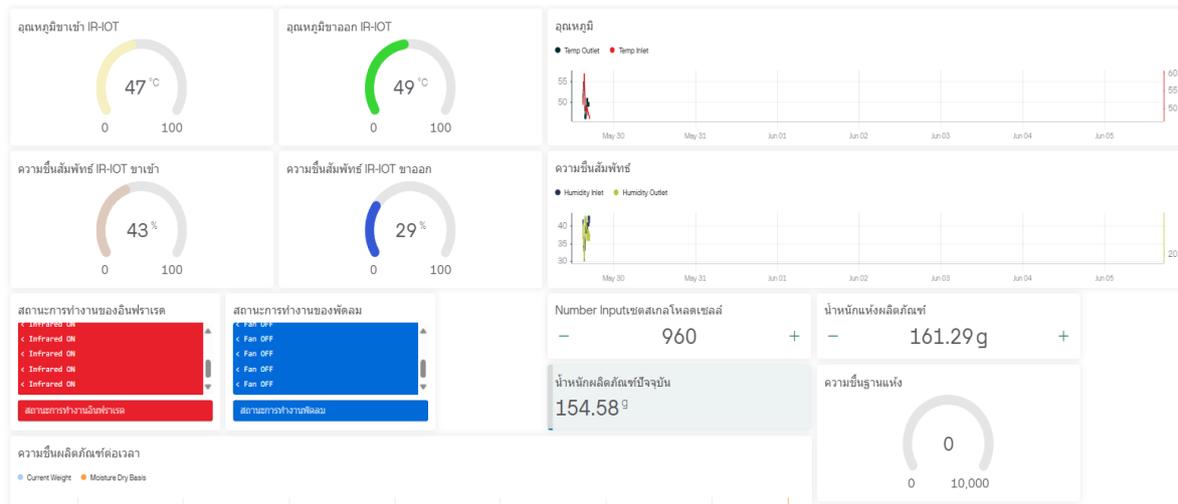
อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ภายในห้องอบแห้งถูกวัดโดยเซ็นเซอร์ DHT22 ไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP32 ถูกใช้เพื่อรับส่งข้อมูลและควบคุมการทำงานตามเงื่อนไขผ่านโมดูลรีเลย์ในการเปิด-ปิดอุปกรณ์ ในส่วนการวัดค่าพลังงานแสงอาทิตย์ใช้เครื่องวัดค่าพลังงานแสงอาทิตย์รุ่น SM206 สำหรับอุณหภูมิของผลิตภัณฑ์วัดโดยใช้ Thermocouple Type K ต่อพ่วงกับเครื่องบันทึกข้อมูล Graphtec M840 และติดตั้งโหลดเซลล์รุ่น YZC-1B พร้อมกับตัวแปลงสัญญาณ HX711 เพื่อวัดมวลของผลิตภัณฑ์ที่เปลี่ยนแปลงระหว่างกระบวนการอบแห้งแบบเรียลไทม์ รายละเอียดของอุปกรณ์ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 รายละเอียดอุปกรณ์ในการทดลอง

อุปกรณ์	รายละเอียด	คุณสมบัติ
เซ็นเซอร์ DHT22	วัดอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ภายในห้องอบแห้ง	ช่วงการวัด: อุณหภูมิ -40°C ถึง 80°C, ความชื้นสัมพัทธ์ 0-100%
ไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP32	ใช้เพื่อรับส่งข้อมูลและควบคุมตามเงื่อนไขในการทำงาน	แรงดันไฟฟ้าใช้งาน: 3.3V ถึง 7V, ความเร็วสัญญาณนาฬิกา: 160-240MHz
โมดูลรีเลย์ 5 V เครื่อง SM206	ควบคุมการเปิด/ปิดอุปกรณ์	รองรับโหลดหน้าสัมผัส: 250VAC/10A, 30VDC/10A
Thermocouple Type K	วัดอุณหภูมิของผลิตภัณฑ์	ช่วงการวัด: 0-5000 วัตต์, ความแม่นยำ: ±1%
Graphtec M840	ใช้บันทึกค่าอุณหภูมิ	ความไว: 41 $\mu\text{V}/^{\circ}\text{C}$, เวลาตอบสนอง: 0.5 วินาที
โหลดเซลล์รุ่น YZC-1B	วัดมวลของผลิตภัณฑ์ที่ชั่งน้ำหนัก	อัตราการสุ่มตัวอย่าง: 1-100Hz
ตัวแปลงสัญญาณ HX711	แปลงสัญญาณจากโหลดเซลล์	พิกัด 10 กิโลกรัม, ความจุเกินพิกัด: 150%
		แรงดันไฟฟ้าใช้งาน 3.3-5 V ย่านวัด: 64-128

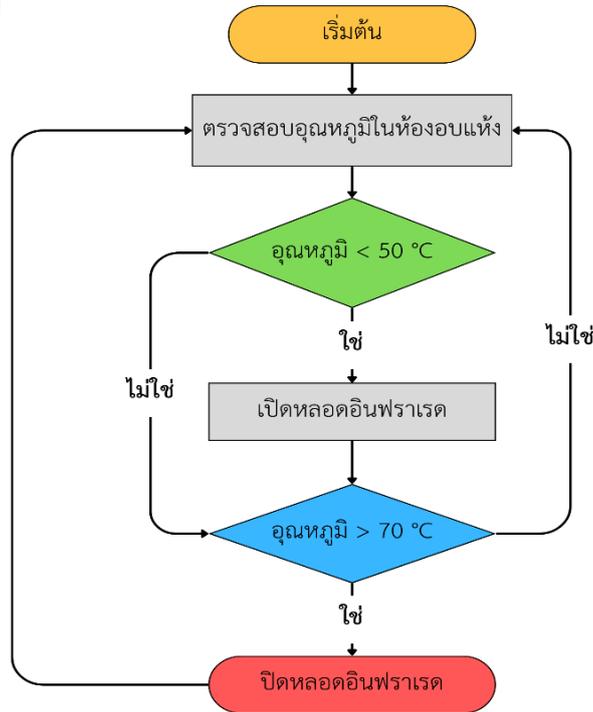
4. การออกแบบการทดลอง

พลังงานของแสงอาทิตย์วัดโดยวางเครื่องมือขนานกับแผ่นโพลีคาร์บอเนตที่รับพลังงานแสงอาทิตย์เข้าสู่ห้องอบแห้ง จากนั้นดำเนินการติดตั้งอุปกรณ์และเซ็นเซอร์เข้ากับเครื่องอบแห้งเพื่อใช้เก็บข้อมูลตลอดช่วงการทดลอง ข้อมูลต่าง ๆ จะถูกบันทึกและแสดงผลไปยังแอปพลิเคชัน Blynk ดังภาพที่ 2

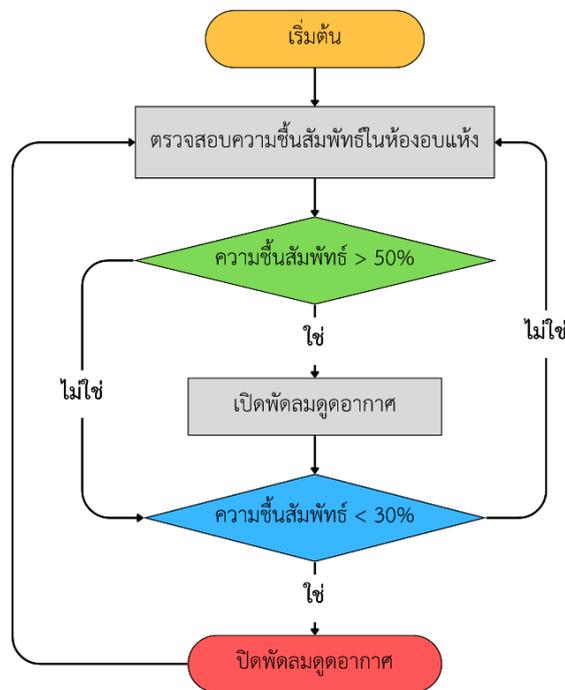


ภาพที่ 2 การเก็บข้อมูลและการแสดงผลผ่านแอปพลิเคชัน Blynk

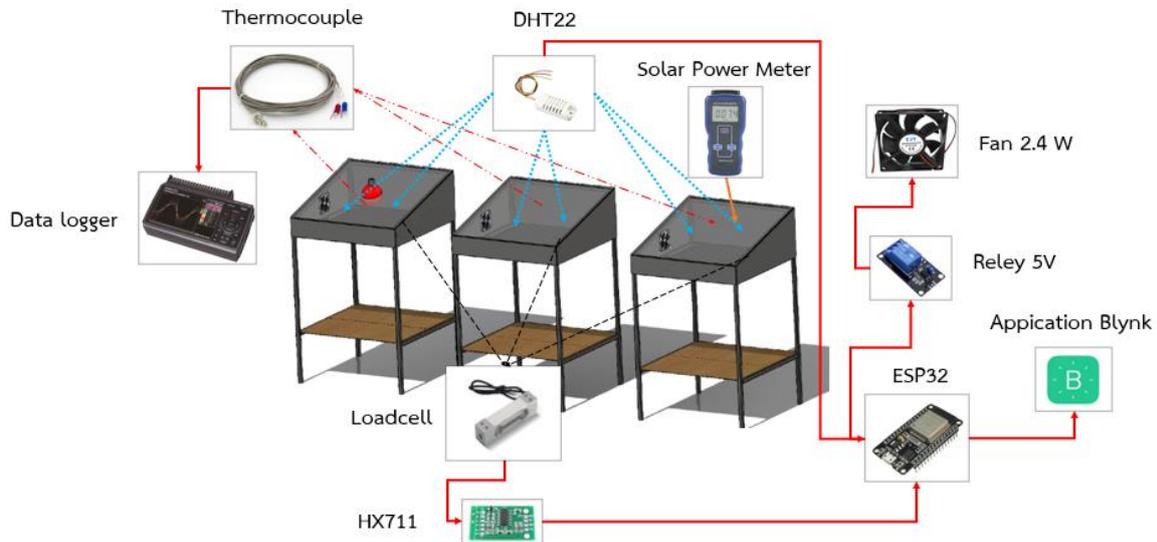
การติดตั้งหลอดอินฟราเรดขนาด 200 วัตต์ ที่เครื่องอบแห้งแบบแสงอาทิตย์ร่วมกับอินฟราเรดควบคุมด้วย IoT (SD-IR-IoT) โดยหลอดอินฟราเรดจะตั้งฉากกับสับประรดและตระแกรงอลูมิเนียม และมีระยะห่างระหว่างสับประรดกับหลอดอินฟราเรด 8 เซนติเมตร ควบคุมการเปิดปิดหลอดอินฟราเรดผ่านรีเลย์ ตามเงื่อนไขการควบคุมของเครื่องอบแห้งแบบ SD-IR-IoT ซึ่งมีรายละเอียด คือ หลอดอินฟราเรดจะเริ่มทำงานเมื่ออุณหภูมิภายในห้องอบแห้งต่ำกว่า 50°C และจะหยุดทำงานเมื่ออุณหภูมิภายในห้องอบแห้งสูงกว่า 70°C เพื่อรักษาอุณหภูมิในห้องอบแห้งให้อยู่ในช่วง 50-70°C ดังภาพที่ 3 ซึ่งเป็นช่วงอุณหภูมิอบแห้งที่เหมาะสม (Rahman and Hasanuzzaman, 2022) อีกทั้งการอบแห้งสับประรดในช่วง 50-70°C ยังสามารถรักษาสารประกอบชีวภาพสำคัญเช่น วิตามินซี โพลีฟีนอล ฟลาโวนอยด์ ไกลโคไซด์ (ElGamal et al., 2023) นอกจากนี้ติดตั้งพัดลมดูดอากาศขนาด 2.4 วัตต์เพื่อดึงความชื้นออกจากห้องอบแห้งในทุกระบบ อย่างไรก็ตามในส่วนเครื่อง SD-IR-IoT และ SD-IoT พัดลมระบายอากาศจะทำงานตามเงื่อนไข โดยจะทำงานเมื่อความชื้นสัมพัทธ์ภายในห้องอบแห้งสูงกว่า 50% และจะหยุดทำงานเมื่อความชื้นสัมพัทธ์ภายในห้องอบแห้งต่ำกว่า 30 % เพื่อรักษาความชื้นสัมพัทธ์ในห้องอบแห้งให้อยู่ในช่วง 30-50% ดังภาพที่ 4 ซึ่งป้องกันการเจริญเติบโตของเชื้อราแบคทีเรียและป้องกันการเน่าเสีย (Pérez-González et al., 2023; Zhu et al., 2023) โดยรายละเอียดของการทดลองดังภาพที่ 5



ภาพที่ 2 เส้นใยการควบคุมเปิด-ปิด พัดลมอินฟราเรด



ภาพที่ 4 เส้นใยการควบคุมเปิด-ปิด พัดลมดูดอากาศ



ภาพที่ 5 การบันทึก-ส่งต่อข้อมูลและการควบคุมของชุดทดลอง

5. การดำเนินการทดลอง

ในงานวิจัยนี้ได้เริ่มทดลองและเก็บข้อมูลตั้งแต่เวลา 09:00-17:00 น. โดยใช้สับประตทำอุเทน มวลเริ่มต้นเท่ากับ 500 กรัม ในทุกระบบ ข้อมูลถูกวัดและบันทึกข้อมูลทุก 5 นาที พร้อมทั้งแสดงผลแบบเรียลไทม์ ประกอบด้วยค่าพลังงาน แสงอาทิตย์ อุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ และมวลของสับประตทำอุเทนที่เปลี่ยนแปลง

6. สมการที่ใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูล

6.1. ความชื้นมาตรฐานแห้ง

ปริมาณความชื้นมาตรฐานแห้ง (Dry Basis) คือ ปริมาณน้ำที่มีอยู่ในวัสดุเมื่อเทียบกับมวลของวัสดุแห้งในรูปแบบสัดส่วนมวลของน้ำในวัสดุต่อมวลวัสดุแห้ง เมื่อคูณด้วย 100 จะได้ค่าเป็น % ซึ่งเขียนความสัมพันธ์ได้ดังสมการที่ (1)

$$M_d = \frac{(w - d) \times 100\%}{d} \quad (1)$$

โดยที่

M_d	คือ ความชื้นมาตรฐานแห้ง, %
w	คือ มวลเริ่มต้นของวัสดุขึ้น, กิโลกรัม
d	คือ มวลของวัสดุแห้ง, กิโลกรัม

6.2. สัดส่วนความชื้นของการอบแห้ง

สัดส่วนความชื้น (Moisture Ratio, MR) คือ ดัชนีชี้วัดปริมาณความชื้นที่เหลือหลังการอบแห้งกับปริมาณความชื้นเริ่มต้นเพื่อใช้ในการประเมินสมรรถนะของกระบวนการอบแห้ง (Zhu et al., 2023) โดยมีความสัมพันธ์ดังสมการที่ (2)

$$MR = \frac{(M_t - M_{eq})}{(M_i - M_{eq})} \approx \frac{M_t}{M_i} \quad (2)$$

โดยที่

MR	คือ สัดส่วนความชื้น (ไร้หน่วย)
M_t	คือ ความชื้นที่เวลาใด ๆ (%)
M_i	คือ ความชื้นเริ่มต้น (%)
M_{eq}	คือ ความชื้นสมดุล (%)

6.3. อัตราการอบแห้ง

อัตราการอบแห้ง (Drying Rate, DR) แสดงถึงความเร็วที่ความชื้นภายในผลิตภัณฑ์ถูกขับออกจากผลิตภัณฑ์ระหว่างกระบวนการอบแห้ง ซึ่งมีความสัมพันธ์ดังสมการที่ (3) (Delfiya et al., 2022)

$$DR = \frac{W_i - W_t}{t} \quad (3)$$

โดยที่

DR	คือ อัตราการอบแห้ง (กรัม/นาท)
W_i	คือ มวลที่เวลาเริ่มต้น (กรัม)
W_t	คือ มวลที่เวลาใด ๆ (กรัม)
t	คือ เวลาที่ใช้ในการอบแห้ง (นาท)

7. การประเมินความคุ้มค่าด้านเศรษฐศาสตร์

การประเมินความคุ้มค่าสำหรับการลงทุนเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมรังสีอินฟราเรดที่ควบคุมด้วยระบบอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง (SD-IR-IoT) เริ่มจากการรวบรวมข้อมูลด้านต้นทุนคงที่ ได้แก่ ต้นทุนสร้างเครื่องอบแห้ง มูลค่าซากและอัตราดอกเบี้ย รวมทั้งข้อมูลต้นทุนแปรผัน เช่น พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ ค่าไฟฟ้าต่อหน่วย ค่าแรงงานต่อรอบการผลิต จำนวนรอบการผลิตต่อปีและราคาจำหน่ายผลิตภัณฑ์แห้ง เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ต้นทุนรวมและระยะคืนทุนของเครื่องอบแห้ง (Philip et al., 2022) ในส่วนของการวิเคราะห์ใช้ข้อมูลและสมมติฐานดังนี้ ต้นทุนสร้างเครื่องอบแห้งและอายุการใช้งานเท่ากับ 7,000 บาท และ 10 ปี มูลค่าซากและค่าบำรุงรักษาเท่ากับ 10 และ 5% ของต้นทุนสร้างเครื่องอบแห้ง ราคาสับปะรดสดและสับปะรดแห้งเท่ากับ 20 และ 500 บาทต่อกิโลกรัม ใช้สับปะรดสด 2 กิโลกรัม จะได้สับปะรดแห้ง 0.5 กิโลกรัมต่อรอบการผลิต ค่าพลังงานไฟฟ้าเท่ากับ 5 บาทต่อรอบการผลิต ค่าแรงงาน 100 บาทต่อรอบการผลิต ผลิตจำนวน 200 รอบต่อปี และอัตราดอกเบี้ยเท่ากับ 8% ต่อปี

7.1. ต้นทุน

ต้นทุนรวมรายปี (Annual Total Cost: C_T) คือ ต้นทุนรวมทั้งหมดที่เกิดขึ้นในหนึ่งรอบการผลิตหรือหนึ่งปี ซึ่งสามารถเขียนความสัมพันธ์ได้ดังสมการที่ (4)

$$C_T = C_e + C_L + C_p + C_m + C_i - C_s \quad (4)$$

โดยที่

- C_e คือ ต้นทุนพลังงานไฟฟ้ารายปี (บาท/ปี)
- C_L คือ ค่าแรงงาน (บาท/ปี)
- C_p คือ ค่าสับปะรดสดรายปี (บาท/ปี)
- C_m คือ ค่าบำรุงรักษา รายปี (บาท/ปี) ซึ่งวิเคราะห์โดยใช้สมการที่ (5)
- C_i คือ เงินลงทุนเครื่องอบแห้งรายปี (บาท/ปี) โดยประเมินได้จากสมการที่ (6)
- C_s คือ มูลค่าซากเครื่องอบแห้งรายปี (บาท/ปี) ซึ่งวิเคราะห์โดยใช้ความสัมพันธ์ตามสมการที่ (7)

$$C_m = 0.05 \times \text{ต้นทุนสร้างเครื่องอบแห้ง} \quad (5)$$

$$C_i = \text{ต้นทุนสร้างเครื่องอบแห้ง} \times \left(\frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \right) \quad (6)$$

$$C_s = 0.10 \times \text{ต้นทุนสร้างเครื่องอบแห้ง} \times \left(\frac{i}{(1+i)^n - 1} \right) \quad (7)$$

เมื่อ

- i คือ อัตราดอกเบี้ยต่อปี (%)
- n คือ อายุการใช้งานเครื่องอบแห้ง (ปี)

7.2. ระยะเวลาคืนทุน

ระยะเวลาคืนทุน (Payback Period: PP) คือ ระยะเวลาจากการเริ่มต้นลงทุนถึงเวลาที่รายได้สุทธิของการใช้เครื่องอบแห้งมีค่าเท่ากับจำนวนเงินลงทุน ซึ่งมีความสัมพันธ์ดังสมการที่ (8)

$$PP = \frac{C}{B} \quad (8)$$

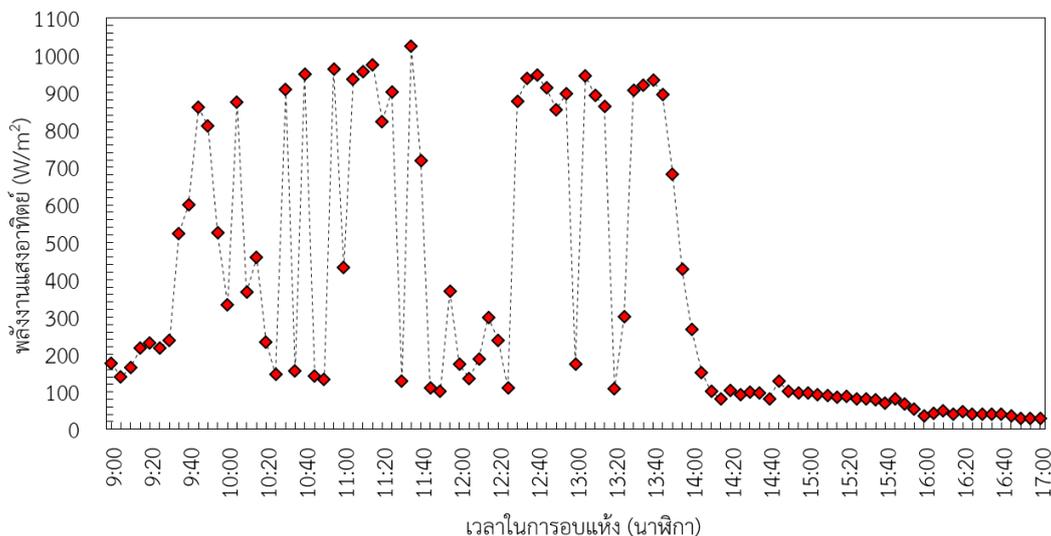
โดยที่

- PP คือ ระยะเวลาคืนทุน (ปี)
- C คือ ต้นทุนสร้างเครื่องอบแห้ง (บาท)
- B คือ รายได้สุทธิต่อปี (บาท/ปี)

ผลการวิจัยและการวิจารณ์ผลการวิจัย

1. พลังงานแสงอาทิตย์

การเปลี่ยนแปลงของพลังงานแสงอาทิตย์ที่ใช้ในกระบวนการอบแห้งมีการเปลี่ยนแปลงตลอดช่วงการอบแห้ง ดังภาพที่ 6 พบว่า ช่วงเช้า (9:00-12:00 น.) พลังงานแสงอาทิตย์มีการผันผวนอย่างชัดเจน โดยเฉพาะในช่วงเวลา 9:45-10:15 น. มีการเพิ่มขึ้นและลดลงอย่างรวดเร็วของพลังงานแสงอาทิตย์ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Fernandes and Tavares (2024) ที่ระบุว่าพลังงานแสงอาทิตย์มีความผันผวนตามช่วงเวลาของวันและสภาพอากาศ สำหรับในช่วงเที่ยง (12:00-14:00 น.) พลังงานแสงอาทิตย์ยังคงมีความผันผวนสูง แต่มีแนวโน้มที่ลดลงในบางช่วงเวลา โดยพลังงานตกกระทบสูงสุดพบในช่วงเวลา 12:30-12:45 น. และช่วงบ่าย (14:00-17:00 น.) พลังงานแสงอาทิตย์มีแนวโน้มลดลงอย่างต่อเนื่อง โดยเฉพาะหลังจากเวลา 14:30 น. พลังงานแสงอาทิตย์ลดลงจนเกือบไม่มีพลังงานแสงอาทิตย์ในช่วงเวลา 16:00-17:00 น. ซึ่งการผันผวนของพลังงานแสงอาทิตย์จะส่งผลกระทบต่อกระบวนการอบแห้งอย่างมาก เนื่องจากพลังงานแสงอาทิตย์เป็นแหล่งพลังงานหลักในการให้ความร้อน (Malakar et al., 2023) ดังนั้นการควบคุมอุณหภูมิและเวลาของกระบวนการอบแห้งจำเป็นต้องพิจารณาพลังงานแสงอาทิตย์ที่ได้รับในแต่ละช่วงเวลาเพื่อให้ได้ผลการอบแห้งที่มีสมรรถนะสูงสุด (Sharma et al., 2025)

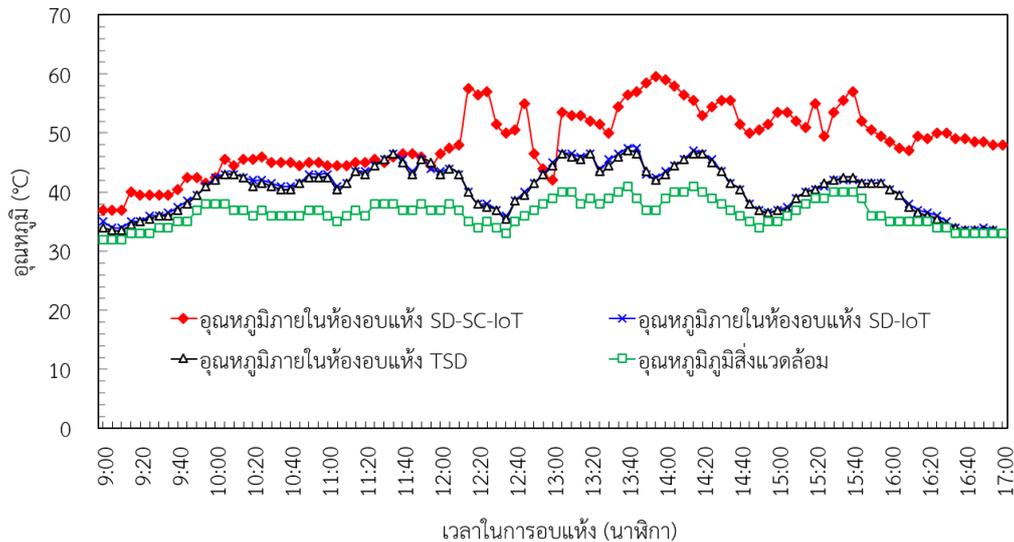


ภาพที่ 6 การเปลี่ยนแปลงพลังงานแสงอาทิตย์ตามเวลา

2. อุณหภูมิในห้องอบแห้ง

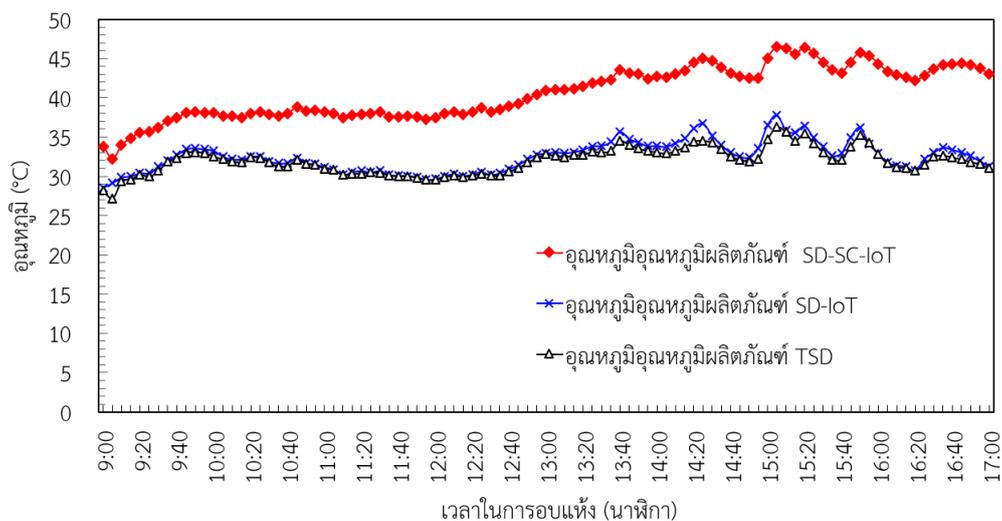
การเปลี่ยนอุณหภูมิภายในห้องอบแห้ง จากข้อมูลพบว่าอุณหภูมิในระบบ SD-IR-IoT สูงกว่า SD-IoT และสูงกว่า TSD ประมาณ 5-45 % ดังภาพที่ 7 โดยอุณหภูมิกึ่งที่ในช่วง 45-50°C ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Ghasemi et al. (2023) ที่ระบุว่า การผสมผสานระหว่างพลังงานแสงอาทิตย์และอินฟราเรดสามารถช่วยแก้ปัญหาความผันผวนของพลังงานแสงอาทิตย์และช่วยรักษาอุณหภูมิภายในห้องอบแห้งให้คงที่ ตามเงื่อนไขที่ควบคุมไว้ (50-70°C) ในส่วนระบบ SD-IoT และระบบ TSD มีแนวโน้มของอุณหภูมิที่ผันผวนอยู่ในช่วง 35-45°C ทั้งนี้เนื่องจากไม่ได้มีแหล่งพลังงานเสริมในช่วงที่พลังงานแสงอาทิตย์ผันผวนดัง

ภาพที่ (Ragasudha et al., 2023) จากข้อมูลจึงพบว่าระบบ SD-IR-IoT สามารถควบคุมอุณหภูมิภายในห้องอบแห้งให้อยู่ในช่วงที่ตั้งไว้ ซึ่งส่งผลต่ออัตราการอบแห้ง (Sharma et al., 2025)

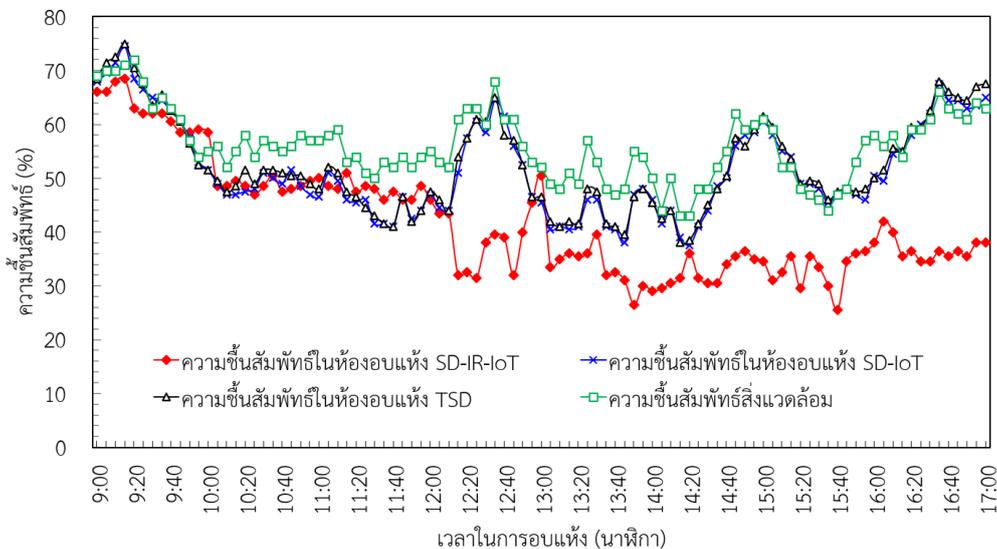


ภาพที่ 7 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในห้องอบแห้งตามเวลา

การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิผลิตภัณฑ์ในระหว่างการอบแห้ง ดังภาพที่ 8 พบว่า ระบบ SD-IR-IoT มีอุณหภูมิผลิตภัณฑ์สูงสุดและมีความผันผวนน้อยที่สุด ซึ่งเป็นผลจากการผสมผสานระหว่างพลังงานแสงอาทิตย์และอินฟราเรดที่ช่วยเพิ่มสมรรถนะการอบแห้ง (Malakar et al., 2023) อุณหภูมิของผลิตภัณฑ์ในระบบ SD-IR-IoT สูงกว่า TSD ประมาณ 24 % และสูงกว่า SD-IoT ประมาณ 25 % ในขณะที่อุณหภูมิผลิตภัณฑ์ในระบบ SD-IoT สูงกว่าระบบ TSD โดยเฉลี่ยประมาณ 1.3 % เนื่องจากระบบ SD-IoT พัฒนทำงานตามเงื่อนไขที่กำหนด ทำให้การระบายอากาศต่ำกว่าระบบ TSD ดังนั้นพลังงานความร้อนจึงสะสมมากกว่า และจากข้อมูลพบว่าทั้งระบบ SD-IoT และ TSD มีพฤติกรรมอุณหภูมิที่ผันผวนตามช่วงเวลาของวัน โดยเฉพาะในช่วงบ่ายที่มีการลดลงของอุณหภูมิ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Krabch et al. (2022) ที่ระบุว่า การอบแห้งด้วยพลังงานแสงอาทิตย์เพียงอย่างเดียว โดยไม่มีแหล่งพลังงานเสริมจะส่งผลให้อุณหภูมิผลิตภัณฑ์ลดลง



ภาพที่ 8 การเปลี่ยนอุณหภูมิผลิตภัณฑ์ตามเวลา



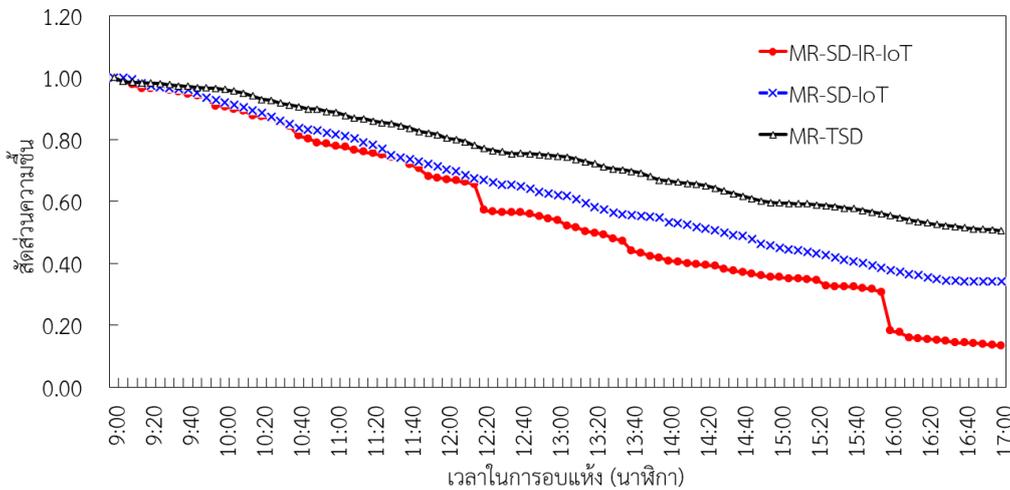
ภาพที่ 9 การเปลี่ยนความชื้นสัมพัทธ์อากาศตามเวลา

3. ความชื้นสัมพัทธ์

ความชื้นสัมพัทธ์ในระหว่างการอบแห้ง จากข้อมูลพบว่าระบบ SD-IR-IoT มีความชื้นสัมพัทธ์ต่ำที่สุดตลอดช่วงการอบแห้ง โดยมีความชื้นเฉลี่ยต่ำกว่าระบบ SD-IoT และ TSD ประมาณ 10-30% ดังภาพที่ 9 ทั้งนี้เกิดจากการผสมผสานระหว่างพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับอินฟราเรดซึ่งช่วยลดค่าความชื้นสัมพัทธ์และการควบคุมผ่าน IoT ที่แม่นยำการควบคุมนี้เป็นไปตามเงื่อนไขที่ตั้งค่าไว้ คือ พัดลมทำงานในช่วงความชื้นสัมพัทธ์อากาศ 30-50% ส่งผลให้ความชื้นสัมพัทธ์อากาศภายในห้องอบแห้งเปลี่ยนในรอบที่ควบคุม (Mehdipour and Ghaffari, 2021) ระบบ SD-IoT แม้มีการควบคุมของ IoT ซึ่งช่วยปรับความชื้นให้เหมาะสมแต่ยังไม่มีศักยภาพต่ำกว่าระบบ SD-IR-IoT ทั้งนี้เนื่องจากไม่มีการเสริมแหล่งความร้อนเสริมเพื่อแก้ไขปัญหาดังกล่าว ขณะที่ระบบ TSD มีความชื้นสัมพัทธ์สูงกว่าระบบ SD-IoT เล็กน้อย เนื่องจากพัดลมทำงานต่อเนื่อง ซึ่งจะช่วยให้เฉพาะในส่วนของการไหลเวียนของอากาศ แต่ไม่มีการควบคุมความชื้นเหมือนกับระบบ SD-IR-IoT และ SD-IoT

4. สัดส่วนความชื้น

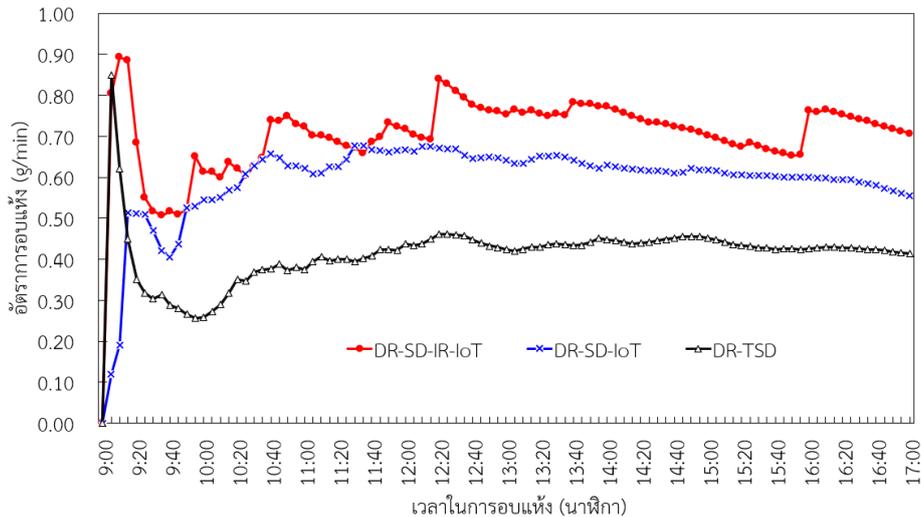
การเปลี่ยนแปลงสัดส่วนความชื้นตามเวลา จากข้อมูลพบว่าระบบ SD-IR-IoT สัดส่วนความชื้นลดลงรวดเร็วที่สุด โดยเริ่มจากสัดส่วนความชื้นเท่ากับ 1.0 และลดลงเหลือประมาณ 0.15 ภายในเวลา 17:00 น. ดังภาพที่ 10 ทั้งนี้เนื่องจากการใช้พลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับอินฟราเรดและการควบคุมผ่าน IoT สามารถควบคุมอุณหภูมิและการไหลเวียนของอากาศได้อย่างต่อเนื่องและเหมาะสม จึงส่งผลต่อศักยภาพการลดความชื้นของระบบ (Khan et al., 2026) สำหรับระบบ SD-IoT การลดสัดส่วนความชื้นมีความผันผวน โดยเริ่มจากสัดส่วนความชื้น 1.0 และลดลงเหลือ 0.35 ภายในเวลา 17:00 น. การผันผวนนี้เกิดขึ้นเนื่องจากการควบคุมพัดลมผ่าน IoT ที่ทำให้พัดลมทำงานเป็นช่วง ๆ ตามเงื่อนไขที่กำหนด เมื่อพัดลมหยุดทำงาน การระบายความชื้นจะลดลง เมื่อลมทำงานอีกครั้ง ความชื้นก็จะลดลง ส่วนระบบ TSD สัดส่วนความชื้นลดลงช้าที่สุด โดยลดลงจาก 1.0 เหลือ 0.50 ภายในเวลา 17:00 น. ทั้งนี้เนื่องจากไม่มีแหล่งพลังงานเสริม นอกจากนั้นพัดลมยังทำงานตลอด ส่งผลให้ความร้อนสะสมในระบบลดลง ดังนั้นผลการทดลองชี้ให้เห็นว่าระบบ SD-IR-IoT มีศักยภาพในการลดสัดส่วนความชื้นของผลิตภัณฑ์ ให้ความชื้นลดลงมากถึง 80%



ภาพที่ 10 การเปลี่ยนแปลงสัดส่วนความชื้นตามเวลา

5. อัตราการอบแห้ง

การเปลี่ยนแปลงอัตราการอบแห้งตามเวลา จากข้อมูลพบว่าระบบต่าง ๆ มีอัตราการอบแห้งที่แตกต่างกันอย่างชัดเจน ระบบ SD-IR-IoT มีอัตราการอบแห้งสูงกว่า TSD ตลอดระยะเวลาการอบแห้ง ดังภาพที่ 11 โดยเริ่มต้นที่ประมาณ 0.8 กรัม/นาที่ และค่อย ๆ ลดลงอย่างต่อเนื่องจนถึงประมาณ 0.4 กรัม/นาที่ ภายในเวลา 17:00 น. อัตราการอบแห้งที่เปลี่ยนแปลงค่อนข้างต่ำนี้เกิดจากการใช้พลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับอินฟราเรดซึ่งช่วยควบคุมอุณหภูมิและการไหลเวียนของอากาศที่เหมาะสมผ่าน IoT ลักษณะดังกล่าวสอดคล้องกับทฤษฎีจลนพลศาสตร์การอบแห้งที่อธิบายว่าการพาความร้อนแบบบังคับและการควบคุมอุณหภูมิอย่างต่อเนื่องจะส่งผลให้มีช่วงของอัตราการอบแห้งคงที่ยาวนานกว่าระบบการพาความร้อนแบบธรรมชาติ (Hidalgo et al., 2021) และมีค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นที่สูง ตามที่ Alfiya et al. (2025) สรุปไว้ว่าระบบการอบแห้งด้วยอินฟราเรดแบบพาความร้อน มีค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นสูงกว่าระบบการตากแดด ส่งผลให้อัตราการอบแห้งสูง จากข้อมูลพบว่าระบบ SD-IoT มีอัตราการอบแห้งที่ผันผวนมากกว่า การผันผวนนี้เกิดจากระบบขาดแหล่งพลังงานเสริมและการระบายอากาศ ส่งผลให้อุณหภูมิอบแห้งผันผวน ซึ่งลักษณะดังกล่าวสอดคล้องกับงานวิจัยของ Ghafar et al. (2025) ในส่วนของระบบ TSD มีอัตราการอบแห้งต่ำ เนื่องจากไม่มีแหล่งพลังงานเสริม อีกทั้งพัดลมยังทำงานต่อเนื่องขาดการควบคุมที่เหมาะสม ผลจากการศึกษาพบว่าระบบ SD-IR-IoT มีศักยภาพการอบแห้งสูงกว่าระบบอื่น สามารถควบคุมอุณหภูมิอบแห้งให้อยู่ในช่วงที่เหมาะสมซึ่งจะส่งผลต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ (Mishra et al., 2025)



ภาพที่ 11 การเปลี่ยนแปลงอัตราการรอบแหว่งตามเวลา

ตารางที่ 2 ผลการวิเคราะห์ด้านเศรษฐศาสตร์เครื่องแหว่ง SD-IR-IoT

รายการ	ข้อมูล	หน่วย
ต้นทุนสร้างเครื่องอบแห้ง, C	7,000	บาท
ค่าพลังงานไฟฟ้ารายปี, C_e	1,000	บาท/ปี
ค่าแรงงาน, C_L	20,000	บาท/ปี
เงินลงทุนซื้อสับปะรดสด, C_p	8,000	บาท/ปี
ค่าบำรุงรักษารายปี, C_m	350	บาท/ปี
เงินลงทุนเครื่องอบแห้งรายปี, C_i	1,043	บาท/ปี
มูลค่าซากเครื่องอบแห้งรายปี, C_s	48	บาท/ปี
รายรับจากการขายสับปะรดอบแห้ง, C_{pd}	50,000	บาท/ปี
ต้นทุนรวมรายปี, C_T	30,345	บาท/ปี
ผลกำไรสุทธิรายปี, B ($C_{pd} - C_T$)	19,655	บาท/ปี
ระยะคืนทุน, PP (C / B)	0.36	ปี

6. ผลการวิเคราะห์เชิงเศรษฐศาสตร์

ผลการวิเคราะห์ด้านเศรษฐศาสตร์เครื่องอบแห้ง SD-IR-IoT ดังตารางที่ 2 ผลจากการวิเคราะห์ภายใต้ข้อมูลและสมมติฐานข้างต้น พบว่าเครื่องอบแห้ง SD-IR-IoT มีต้นทุนรวมรายปี 30,345 บาท และให้ผลกำไรสุทธิ 19,655 บาทต่อปี โดยคิดเป็นระยะเวลาคืนทุน 0.36 ปี ซึ่งแสดงให้เห็นถึงความคุ้มค่าทางการลงทุน

ข้อสรุปและข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้ได้ประเมินสมรรถนะของเครื่องอบแห้งสับปะรดทำอุเทนแบบผสมผสานพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับรังสีอินฟราเรดที่ควบคุมอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ด้วยระบบอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง (SD-IR-IoT) เปรียบเทียบกับระบบ SD-IoT และ TSD ภายใต้สภาวะแวดล้อมเดียวกัน ผลการทดลองยืนยันว่า การผสมผสานแหล่งพลังงานเสริมอินฟราเรดขนาด 200 วัตต์ ร่วมกับการควบคุมแบบเรียลไทม์ผ่าน IoT สามารถรักษาอุณหภูมิในห้องอบให้อยู่ในช่วงที่กำหนด (50–70°C) ได้เสถียรกว่าระบบอื่น โดยมีค่าอุณหภูมิสูงกว่าระบบ SD-IoT และ TSD ประมาณ 5–45% และสามารถลดความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ยลงได้ 10–30% ส่งผลโดยตรงต่ออัตราการอบแห้ง ในด้านสมรรถนะการลดความชื้น ระบบ SD-IR-IoT สามารถลดค่าสัดส่วนความชื้นจาก 1.0 เหลือประมาณ 0.15 ภายใน 8 ชั่วโมง ขณะที่ SD-IoT และ TSD ลดลงเพียงประมาณ 0.35 และ 0.50 ตามลำดับ อัตราการอบแห้งของ SD-IR-IoT อยู่ในช่วง 0.4–0.8 กรัม/นาที ซึ่งสูงกว่าและมีความสม่ำเสมอกว่าระบบอื่นอย่างชัดเจน สะท้อนถึงประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนและความชื้นเป็นอย่างดี และสุดท้ายในด้านเศรษฐศาสตร์ ระบบ SD-IR-IoT มีต้นทุนรวมรายปี 30,345 บาท และให้ผลกำไรสุทธิ 19,655 บาทต่อปี คิดเป็นระยะเวลาคืนทุนเพียง 0.36 ปี แสดงถึงความคุ้มค่าทางการลงทุนในระดับชุมชน

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสาขาวิชาเทคโนโลยีเครื่องกล คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยนครพนม ที่ให้การสนับสนุนในเรื่องของสถานที่ในการทำวิจัยในครั้งนี้ และขอขอบคุณคณะที่มิวิจัยทุกท่านที่ช่วยเหลือให้การวิจัยสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

เอกสารอ้างอิง

- กลุ่มยุทธศาสตร์พัฒนาการเกษตร สำนักงานเกษตรและสหกรณ์จังหวัดนครพนม. (2566). **แผนพัฒนาการเกษตรและสหกรณ์ของจังหวัดนครพนม พ.ศ. 2566 - 2570**. นครพนม: สำนักงานเกษตรและสหกรณ์จังหวัดนครพนม.
- Alfiya, P., Jayashree, E., and Theertha, K. (2025). Conventional sun drying and infrared convective drying of spices: A comparative evaluation on kinetics and quality. *Solar Energy*, 291, 113396. doi: 10.1016/j.solener.2025.113396
- Alkhdery, L. A. (2023). Automated temperature and humidity control and monitoring system for improving the performance in drying system. *Eurasian Physical Technical Journal*, 20(2), 32–40. doi: 10.31489/2023No2/32-40
- AOAC. (2019). **Official methods of analysis of AOAC International (21sted.)**. Gaithersburg, MD: AOAC International.
- Archvadze, K., Chachava, I., Liparteliani, R., Khotenashvili, N., Chubinishvili, Z., and Tabukashvili, Z. (2022). On the issue of creating solar drying plants for the purpose of obtaining dried agricultural products. *World Science*, 4, 76. doi: 10.31435/rsglobal_ws/30062022/7836
- Arslan, E. (2023). Experimental performance analysis of infrared assisted solar air heater for continuous applications of drying. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 45(1), 1168–1185. doi: 10.1080/15567036.2023.2176572
- Behera, D. D., Mohanty, A. M., and Mohanty, R. C. (2022). Recent advances in solar drying technologies: A comprehensive review. *Journal of Energy Systems*, 6(4), 503–519. doi: 10.30521/jes.1050814

- Chen, Y., Zheng, L., and Peng, H. (2023). Assessing pineapple maturity in complex scenarios using an improved RetinaNet algorithm. **Engenharia Agricola**, 43(2).
doi: 10.1590/1809-4430-eng.agric.v43n2e20220180/2023
- Delfiya, D. S. A., Prashob, K., Murali, S., Alfya, P. V., Samuel, M. P., and Pandiselvam, R. (2022). Drying kinetics of food materials in infrared radiation drying: A review. **Journal of Food Process Engineering**, 45(6), e13810. doi: 10.1111/jfpe.13810
- ElGamal, R., Song, C., Rayan, A. M., Liu, C., Al-Rejaie, S., and ElMasry, G. (2023). Thermal degradation of bioactive compounds during drying process of horticultural and agronomic products: A comprehensive overview. **Agronomy**, 13(6). doi: 10.3390/agronomy13061580
- Fernandes, L., Fernandes, J. R., and Tavares, P. B. (2022). Design of a friendly solar food dryer for domestic over-production. **Solar**, 2(4), 495–508. doi: 10.3390/solar2040029
- Fernandes, L., and Tavares, P. B. (2024). A review on solar drying devices: Heat transfer, air movement and type of chambers. **Solar**, 4(1), 15–42. doi: 10.3390/solar4010002
- Ghfar, H., W. R., I., S. A. N., Mohd Yamin, A. F., and Yusoff, H. (2025). Implementation of an Internet of Things-based monitoring system to evaluate solar dryer performance on mullet fish. **Food Research**, 9(1). doi: 10.26656/fr.2017.9(S1).026
- Ghasemi, G., Moradi, M., Zare, D., Golbakhshi, H., and Namjoo, M. (2023). Energy and exergy-based threshold setting for the auxiliary heating source of a hybrid solar/IR drying system. **Sustainable Energy Technologies and Assessments**, 59, 103400. doi: 10.1016/j.seta.2023.103400
- Gilago, M. C., and Chandramohan, V. P. (2023). Study of drying parameters of pineapple and performance of indirect solar dryer supported with thermal energy storage: Comparing passive and active modes. **Journal of Energy Storage**, 61, 106810. doi: 10.1016/j.est.2023.106810
- Hadibi, T., Boubekri, A., Mennouche, D., Benhamza, A., Youcef-Ali, S., Boualit, H., and Benatallah, A. (2023). Drying characteristic, sustainability, and 4E (energy, exergy, and enviro-economic) analysis of dried date fruits using indirect solar-electric dryer: An experimental investigation. **Renewable Energy**, 218, 119291. doi: 10.1016/j.renene.2023.119291
- Hidalgo, L. F., Candido, M. N., Nishioka, K., Freire, J. T., and 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
- Ibrahim, A., Cattaneo, T. M. P., Amer, A., & Helyes, L. (2023). Drying technology evolution and global concerns related to food security and sustainability. In J. S. Tumuluru (Ed.), **Food processing and packaging technologies: Recent advances** (1st ed., pp. 135–182). London, UK: IntechOpen.
- Jin, Y., Yin, J., Xie, H., and Zhang, Z. (2023). Investigation of a precise control scheme for rice quality. **Applied Sciences**, 13(13), 7532. doi: 10.3390/app13137532
- Khan, S. A., Dwivedi, M., Dar, A. H., Singh, S. K., Sultan, U., and Haroon, A. (2026). Thermodynamic analysis of heat and mass transfer of strawberry slices in an IoT-based solar-infrared hybrid dryer. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**. doi: 10.1007/s10973-025-15150-3
- Komanee, K., Namkhat, A., Pumchumpol, S., and Teeboonma, U. (2025a). Effect of temperature and air velocity on kinetics and energy efficiency of fish fillets drying. **Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences**, 132(2), 1–17. doi: 10.37934/arfmts.132.2.117

- Komanee, K., Namkhat, A., and Teeboonma, U. (2025b). Integrating Internet of Things for performance enhancement of hot air dryer. **EUREKA: Physics and Engineering**, 5, 105–116. doi: 10.21303/2461-4262.2025.003896
- Komanee, K., Pumchumpol, S., Namkhat, A., Chaiyot, K., Patikanang, R., and Teeboonma, U. (2025c). Enhancing energy and exergy efficiency in hot air drying system using IoT-controlled adaptive air recirculation. **Journal of Advanced Research in Experimental Fluid Mechanics and Heat Transfer**, 21(1), 165–181. doi: 10.37934/arefmht.21.1.165181
- Krabch, H., Tadili, R., and Bargach, M. (2022). Indirect solar dryer with a single compartment for food drying. Application to the drying of the pear. **Solar Energy**, 240, 131–139. doi: 10.1016/j.solener.2022.05.025
- Malakar, S., Arora, V. K., Nema, P. K., and Yadav, D. K. (2023). Development of infrared-assisted hybrid solar dryer for drying pineapple slices: Investigation of drying characteristics, mass transfer parameters, and quality attributes. **Innovative Food Science & Emerging Technologies**, 88, 103437. doi: 10.1016/j.ifset.2023.103437
- Mehdipour, R., and Ghaffari, A. (2021). Solar dryer performance simulation: Experimental and numerical study. **Journal of Food Process Engineering**, 44(11), e13875. doi: 10.1111/jfpe.13875
- Mishra, L., Hauchhum, L., Gurung, J., and Gupta, R. (2025). Environmental impact and performance comparison of solar and grid-powered dryers. **Energy Sources**, 47(1), 61–73. doi: 10.1080/15567036.2024.2441417
- Pérez-González, E., Severiano-Pérez, P., Aviña-Jiménez, H. M., and Velázquez-Madrado, O. D. C. (2023). Geothermal food dehydrator system, operation and sensory analysis, and dehydrated pineapple quality. **Food Science and Nutrition**, 11(11), 6711–6727. doi: 10.1002/fsn3.3249
- Philip, N., Duraipandi, S., and Sreekumar, A. (2022). Techno-economic analysis of greenhouse solar dryer for drying agricultural produce. **Renewable Energy**, 199, 613–627. doi: 10.1016/j.renene.2022.08.148
- Rahman, M. Z., and Hasanuzzaman, M. (2022). Solar drying system. In M. Z. Rahman & M. Hasanuzzaman (Eds.), **Technologies for solar thermal energy** (1st ed., pp. 237–266). Cambridge, MA: Academic Press.
- Ragasudha, R., Karthickumar, P., Murali, S., Pradeep, R., Rathnakumar, K., Mercy Amrita, C., ... Manimehalai, N. (2023). Design and performance analysis of a PV-powered solar-infrared hybrid dryer for anchovy fish drying. **Biomass Conversion and Biorefinery**, 14(15), 17555–17566. doi: 10.1007/s13399-023-03944-0
- Rani, P., and Tripathy, P. P. (2022). Investigating shrinkage corrected drying characteristics, rehydration, color profile and microstructural evolution during solar drying of pineapple slices. **Journal of Food Process Engineering**, 45(8), e14036. doi: 10.1111/jfpe.14036
- Sharma, B. B., Gupta, G., Vaidya, P., Basheer, S., Memon, F. H., and Thakur, R. N. (2022). Internet of Things-based crop classification model using deep learning for indirect solar drying. **Wireless Communications and Mobile Computing**, 2022, 1–11. doi: 10.1155/2022/1455216
- Sharma, B. B., Vaidya, P., Kumar, N., Tiwari, A., Bansal, S., Faruque, M. R. I., and Al-Mugren, K. S. (2025). Enhancing post-harvest sustainability in temperate crops through smart IoT-integrated indirect solar dryer. **Scientific Reports**, 15(1), 28608. doi: 10.1038/s41598-025-13499-x
- Zhu, G., Raghavan, G. S. V., and Li, Z. (2023). Predicting the moisture ratio of a Hami melon drying process using image processing technology. **Foods**, 12(3), 672. doi: 10.3390/foods12030672