

การพัฒนาตู้อบเห็ดหูหนูพลังงานแสงอาทิตย์ควบคุมด้วยเทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตในทุกสรรพสิ่ง เพื่อส่งเสริมการแปรรูปของกลุ่มวิสาหกิจชุมชนเพาะเห็ด

Development of a Solar Dryer for Jew's Ear Mushroom with Internet of Things Technology to Promote the Processing of a Mushroom Farming Community Enterprise Group

พิภพ มณีจันทน์^{1*}, ปริญญา บัวทอง², เอกสิทธิ์ สิทธิสมาน³

Pipop Maneejamnong^{1*}, Pariyakorn Buathong², Akkasit Sittisaman³

¹วิทยาลัยน่าน มหาวิทยาลัยราชภัฏอุดรดิตต์

¹Nan College Uttaradit Rajabhat University

²สาขาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ คณะเทคโนโลยีการเกษตรและเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบูรณ์

²Department of Computer Engineering, Faculty of Agricultural and Industrial Technology,
Phetchabun Rajabhat University

³ภาควิชาวิทยาศาสตร์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏนครสวรรค์

³Department of Applied Science, Faculty of Science and Technology, Nakhon Sawan Rajabhat University

บทคัดย่อ

การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบ พัฒนา และประเมินประสิทธิภาพของตู้อบเห็ดหูหนูพลังงานแสงอาทิตย์ที่ควบคุมด้วยเทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตในทุกสรรพสิ่ง (IoT) เพื่อแก้ไขปัญหาและส่งเสริมการแปรรูปผลผลิตของกลุ่มวิสาหกิจชุมชนเพาะเห็ดในตำบลทุ่งศรีทอง จังหวัดน่าน งานวิจัยนี้เป็นรูปแบบการวิจัยและพัฒนา โดยได้สร้างตู้อบแบบเรือนกระจกที่ใช้การพาความร้อนแบบบังคับ ควบคุมด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP32 และเซนเซอร์ AM2305 เพื่อรักษาสภาวะการอบแห้งให้เหมาะสมโดยอัตโนมัติ การประเมินประสิทธิภาพใช้วิธีการทดลองเปรียบเทียบระหว่างกลุ่มทดลอง (การใช้ตู้อบ) และกลุ่มควบคุม (การตากแดดแบบดั้งเดิม) โดยใช้เห็ดหูหนูสดน้ำหนักเริ่มต้น 1,000 กรัม และทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง ผลการวิจัยพบว่าตู้อบที่พัฒนาขึ้นมีประสิทธิภาพสูงกว่าวิธีการดั้งเดิมอย่างชัดเจน โดยมีอัตราการแห้งเฉลี่ยสูงถึง 103.1 กรัม/ชั่วโมง ในขณะที่วิธีดั้งเดิมมีอัตราเพียง 49.2 กรัม/ชั่วโมง ภายในระยะเวลา 7 ชั่วโมง ตู้อบสามารถลดน้ำหนักของเห็ดได้เฉลี่ย 72.2% ในขณะที่การตากแดดลดน้ำหนักได้เพียง 34.4% ประสิทธิภาพที่เหนือกว่านี้เป็นผลมาจากการที่ตู้อบสามารถสร้างอุณหภูมิเฉลี่ยได้สูงถึง 53.8°C ซึ่งสูงกว่าอุณหภูมิเฉลี่ยของสภาวะภายนอก (35.7°C) และยังสามารถควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ได้ดีกว่า นอกจากนี้ ผลผลิตที่ได้จากตู้อบยังมีคุณภาพทางกายภาพดีกว่าในด้านสี รูปทรง และความสะดวก โดยสรุป นวัตกรรมตู้อบพลังงานแสงอาทิตย์ควบคุมด้วยระบบ IoT ที่พัฒนาขึ้นนี้ เป็นเทคโนโลยีที่มีประสิทธิภาพสูง สามารถช่วยลดระยะเวลาการผลิต ลดความเสี่ยงจากสภาพอากาศ และยกระดับคุณภาพผลิตภัณฑ์ ซึ่งเป็นเครื่องมือที่เหมาะสมอย่างยิ่งในการสร้างมูลค่าเพิ่มและส่งเสริมความเข้มแข็งทางเศรษฐกิจให้กับวิสาหกิจชุมชนได้อย่างยั่งยืน

คำสำคัญ: ตู้อบพลังงานแสงอาทิตย์ อินเทอร์เน็ตในทุกสรรพสิ่ง เห็ดหูหนู วิสาหกิจชุมชน การสร้างมูลค่าเพิ่ม

* Corresponding author : pipopmanee@uru.ac.th

Abstract

This study aimed to design, develop, and evaluate the efficiency of a solar dryer for Wood Ear mushroom (*Auricularia* spp.) controlled by Internet of Things (IoT) technology, in order to address processing limitations and promote value-added production for a mushroom-farming community enterprise in Thung Si Thong Subdistrict, Nan Province. A research and development (R&D) approach was adopted. A greenhouse-type dryer using forced convection which is automatically regulated by an ESP32 microcontroller together with an AM2305 sensor to maintain suitable drying conditions. The efficiency was assessed through a comparative experiment between an experimental group (the developed dryer) and a control group (traditional open-sun drying), using fresh mushrooms with an initial weight of 1,000 g. The experiment was repeated by three trials. The results showed that the developed dryer performed markedly better than the traditional one. The average drying rate of the proposed dryer was 103.1 g/h compared with only 49.2 g/h for open-sun drying, and reduced the mushroom weight by an average of 72.2%, whereas open-sun drying reduced it by only 34.4% within a 7-hour duration. This superior performance resulted from the proposed dryer's ability to generate a higher average internal temperature of 53.8°C — above the average ambient temperature of 35.7°C — while maintaining a lower average relative humidity (59.7% RH versus 66.5% RH). In addition, the dried products from the dryer exhibited better physical quality in terms of color, shape, and cleanliness. In conclusion, the developed IoT-controlled solar dryer is a highly effective technology that can shorten production time, reduce weather-related risks, and enhance product quality, making it a highly suitable tool for adding value and strengthening the economic resilience of community enterprises in a sustainable manner.

Keywords: Solar Dryer, Internet of Things (IoT), Jew's Ear mushroom, Community Enterprise, Value Creation

1. บทนำ

เห็ดเป็นพืชอาหารที่มีคุณค่าทางโภชนาการสูงและเป็นที่ต้องการของตลาด แต่เกษตรกรผู้เพาะเห็ดรายย่อยจำนวนมากยังคงประสบปัญหาด้านราคาผลผลิตตกต่ำและการสูญเสียรายได้ โดยเฉพาะกลุ่มวิสาหกิจชุมชนเพาะเห็ดตำบลทุ่งศรีทอง จังหวัดน่าน ซึ่งปัจจุบันยังจำหน่ายผลผลิตในรูปแบบดอกเห็ดสดเพียงอย่างเดียว ทำให้มีมูลค่าต่ำและเน่าเสียง่าย ปัญหาหลักที่กลุ่มเผชิญคือข้อจำกัดในการแปรรูปเห็ดให้แห้งอย่างมีประสิทธิภาพ โดยวิธีการตากแดดแบบดั้งเดิมต้องใช้เวลา 2-3 วัน มีความเสี่ยงสูงจากสภาพอากาศที่แปรปรวน และเสี่ยงต่อการปนเปื้อน ขณะที่การใช้ตู้อบไฟฟ้ามีต้นทุนด้านพลังงานสูง

จากปัญหาดังกล่าว การนำนวัตกรรมตู้ปลาส่งแสงอาทิตย์ที่ควบคุมด้วยเทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตในทุกสรรพสิ่ง (Internet of Things - IoT) จึงเป็นแนวทางที่เหมาะสมในการแก้ไขปัญหา โดยนวัตกรรมนี้ใช้พลังงานแสงอาทิตย์เป็นแหล่งพลังงานหลักเพื่อลดต้นทุน และใช้เทคโนโลยี IoT ในการควบคุมสภาวะแวดล้อมภายในตู้ปลาโดยอัตโนมัติ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยหลายชิ้นที่ชี้ว่าการควบคุมอุณหภูมิและความชื้นด้วยระบบ IoT สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตและลดระยะเวลาการอบแห้งได้อย่างชัดเจน (ชยางกูร ไชยวงศ์ และคณะ, 2564) งานวิจัยนี้จึงมุ่งพัฒนานวัตกรรมดังกล่าวเพื่อยกระดับการแปรรูปเห็ดหูหนูของกลุ่มวิสาหกิจชุมชนให้มีประสิทธิภาพและยั่งยืน

ทั้งนี้ วิสาหกิจชุมชนถือเป็นกลไกสำคัญในการสร้างความเข้มแข็งทางเศรษฐกิจระดับฐานราก ตามพระราชบัญญัติส่งเสริมวิสาหกิจชุมชน พ.ศ. 2548 ที่มุ่งส่งเสริมให้ชุมชนพึ่งพาตนเองและเพิ่มขีดความสามารถในการแข่งขัน โดยการแปรรูปผลผลิตเพื่อสร้างมูลค่าเพิ่มนับเป็นแนวทางสำคัญที่ช่วยยกระดับรายได้และลดการสูญเสียของผลผลิตทางการเกษตร

การอบแห้งด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ได้รับความสนใจอย่างกว้างขวาง เนื่องจากใช้พลังงานหมุนเวียนที่มีต้นทุนต่ำและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม โดยอาศัยหลักการกักเก็บความร้อนจากรังสีดวงอาทิตย์ผ่านปรากฏการณ์เรือนกระจก เพื่อยกระดับอุณหภูมิภายในตู้ปลาให้สูงกว่าสภาวะภายนอก ส่งผลให้อัตราการระเหยของน้ำเพิ่มสูงขึ้น (เสริม จันทรฉาย, 2560) อย่างไรก็ตาม ประสิทธิภาพของการอบแห้งขึ้นอยู่กับความชื้นสัมพัทธ์ และการระบายอากาศอย่างเหมาะสม ซึ่งวิธีการตากแดดธรรมชาติยังขาดการควบคุมปัจจัยเหล่านี้อย่างเป็นระบบ (สมชาติ โสภณธรณฤทธิ์, 2540)

สำหรับการอบแห้งเห็ด อุณหภูมิและระยะเวลาในการอบแห้งเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อทั้งอัตราการสูญเสียความชื้นและคุณภาพทางเคมีกายภาพของผลิตภัณฑ์ โดย พิบูลย์ สีคำ และคณะ (2565) พบว่าการเลือกเทคนิคและสภาวะการอบแห้งที่เหมาะสม โดยเฉพาะการควบคุมอุณหภูมิและรูปแบบการให้ความร้อน ส่งผลโดยตรงต่อระยะเวลา ประสิทธิภาพการอบแห้ง และคุณภาพของผลิตภัณฑ์เห็ดหูหนูแห้ง ขณะที่การควบคุมความชื้นสุดท้ายของผลิตภัณฑ์ให้อยู่ในระดับที่เหมาะสมเป็นสิ่งจำเป็นต่อการเก็บรักษาและความปลอดภัยของอาหาร เนื่องจากความชื้นและค่าออกซิเจนที่มากเกินไปจะเอื้อต่อการเจริญของจุลินทรีย์และการเสื่อมเสียของผลิตภัณฑ์ (นิธิยา รัตนพานนท์, 2553)

เทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตในทุกสรรพสิ่ง แนวคิดการเชื่อมต่ออุปกรณ์เข้ากับเครือข่ายอินเทอร์เน็ตเพื่อรับส่งและประมวลผลข้อมูลโดยอัตโนมัติ (Ashton, 2009) ซึ่งมีองค์ประกอบหลักประกอบด้วยเซนเซอร์สำหรับตรวจวัดสภาวะแวดล้อม หน่วยประมวลผล และการเชื่อมต่อเครือข่ายเพื่อแสดงผลและสั่งการ (International Telecommunication Union, 2012) ในงานด้านการเกษตร IoT ถูกนำมาประยุกต์ใช้ควบคุมอุณหภูมิและความชื้นแบบเรียลไทม์ผ่านไมโครคอนโทรลเลอร์ เช่น ESP32 ร่วมกับเซนเซอร์ตรวจวัดสภาพแวดล้อม (ภาสกร พาเจริญ, 2565)

จากการทบทวนวรรณกรรมข้างต้นจะเห็นว่า แม้การอบแห้งด้วยพลังงานแสงอาทิตย์และการควบคุมด้วยระบบ IoT จะได้รับการศึกษาไว้พอสมควร แต่ยังมีงานวิจัยจำนวนน้อยที่บูรณาการทั้งสองเทคโนโลยีเข้า

ด้วยกันเพื่อแก้ปัญหาการแปรรูปเห็ดหูหนูในบริบทของกลุ่มวิสาหกิจชุมชนโดยตรง โดยเฉพาะการนำไปใช้และประเมินผลในสภาพการใช้งานจริง งานวิจัยนี้จึงมุ่งพัฒนาตู้อบเห็ดหูหนูพลังงานแสงอาทิตย์ที่ควบคุมด้วยระบบ IoT พร้อมประเมินประสิทธิภาพเปรียบเทียบกับวิธีการตากแดดแบบดั้งเดิม เพื่อยกระดับการแปรรูปผลผลิตของกลุ่มวิสาหกิจชุมชนเพาะเห็ดให้มีประสิทธิภาพและยั่งยืน

2. วัตถุประสงค์การวิจัย

1. เพื่อออกแบบและสร้างตู้อบเห็ดหูหนูพลังงานแสงอาทิตย์ที่ควบคุมการทำงานด้วยเทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตในทุกสรรพสิ่ง
2. เพื่อศึกษาสภาวะการทำงานของตู้อบในการอบแห้งเห็ดหูหนู
3. เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของการอบแห้งระหว่างตู้อบที่สร้างขึ้นกับวิธีการตากแดดแบบดั้งเดิม

3. วิธีดำเนินการวิจัย

การวิจัยนี้ผู้วิจัยได้พัฒนาตู้อบเห็ดหูหนูพลังงานแสงอาทิตย์ที่ควบคุมการทำงานด้วยเทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตในทุกสรรพสิ่ง เพื่อศึกษาและเปรียบเทียบประสิทธิภาพของการอบแห้งระหว่างตู้อบที่สร้างขึ้นกับวิธีการตากแดดแบบดั้งเดิม โดยมีรายละเอียดดังนี้

3.1 รูปแบบการวิจัย

เป็นการวิจัยและพัฒนา (Research and Development) โดยมีขั้นตอนดังนี้ ขั้นตอนแรกเป็นการพัฒนาต้นแบบนวัตกรรม โดยมีการศึกษาข้อมูล การออกแบบ และการสร้าง "ตู้อบเห็ดหูหนูพลังงานแสงอาทิตย์ควบคุมด้วยระบบ IoT" ขึ้น ขั้นตอนที่สองเป็นการทดลองเพื่อประเมินประสิทธิภาพ เป็นการนำต้นแบบที่สร้างขึ้นมาทดลองใช้งานจริง โดยเปรียบเทียบประสิทธิภาพระหว่าง กลุ่มทดลอง และ กลุ่มควบคุม เพื่อเก็บข้อมูลเชิงปริมาณมาวิเคราะห์และสรุปผล

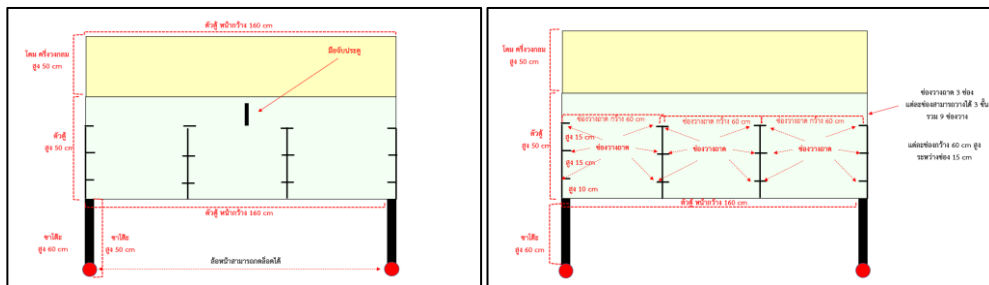
3.2 กลุ่มตัวอย่างที่ใช้ในการทดลอง

กลุ่มตัวอย่างที่ใช้คือ เห็ดหูหนูสดจากกลุ่มวิสาหกิจชุมชนเพาะเห็ด ตำบลทุ่งศรีทอง ที่ผ่านการคัดเลือกตามความสมบูรณ์และขนาดที่ใกล้เคียงกัน นำมาชั่งน้ำหนักและสุ่มแบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม ได้แก่ กลุ่มควบคุม (Control Group) นำไปตากด้วยวิธีการตากแดดแบบดั้งเดิม และกลุ่มทดลอง (Experimental Group) จะนำไปอบด้วยตู้อบพลังงานแสงอาทิตย์ที่พัฒนาขึ้น

3.3 การออกแบบตู้อบเห็ดหูหนูพลังงานแสงอาทิตย์ต้นแบบ

การออกแบบตู้อบเห็ดหูหนูพลังงานแสงอาทิตย์ต้นแบบที่เหมาะสมสำหรับกลุ่มวิสาหกิจชุมชน ตัวตู้มีขนาดภายนอก กว้าง 1.2 เมตร ยาว 1.6 เมตร และสูง 1.6 เมตร (รวมล้อ) ติดตั้งล้อเลื่อน 4 ล้อพร้อมที่ล้อสำหรับการเคลื่อนที่ตู้ตากเพื่อรับแสงอาทิตย์ โครงสร้างทำจากเหล็กกล้าไนซ์ป้องกันสนิม บุด้วยแผ่นโพลีคาร์บอเนต (Polycarbonate Sheet) ชนิดใสมุก ความหนา 6 มิลลิเมตร ภายในประกอบด้วยฉนวนฉนวน

จำนวน 4 ถาด ทำจากสแตนเลสเกรด 304 (Food Grade Stainless Steel) ขนาด 52 x 114 เซนติเมตร มีลิ้นชักสำหรับนำถาดเข้า-ออกทางด้านหน้าเพื่อความสะดวก ดังภาพที่ 1



ภาพที่ 1 การออกแบบตู้อบเห็ดอุณหภูมิสูงแสงอาทิตย์ต้นแบบด้านหน้าและด้านในตู้ตาก

มีการติดตั้งระบบไฟฟ้าใช้แผงโซลาร์เซลล์ขนาด 10 วัตต์ จำนวน 1 แผง เพื่อจ่ายไฟให้ระบบควบคุม และมีการติดตั้ง รวมถึงระบบระบายอากาศโดยใช้พัดลมดูดความชื้น DC ขนาด 4.5 นิ้ว จำนวน 2 ตัว ทำหน้าที่ระบายอากาศและความชื้นออกจากตู้ ดังภาพที่ 2



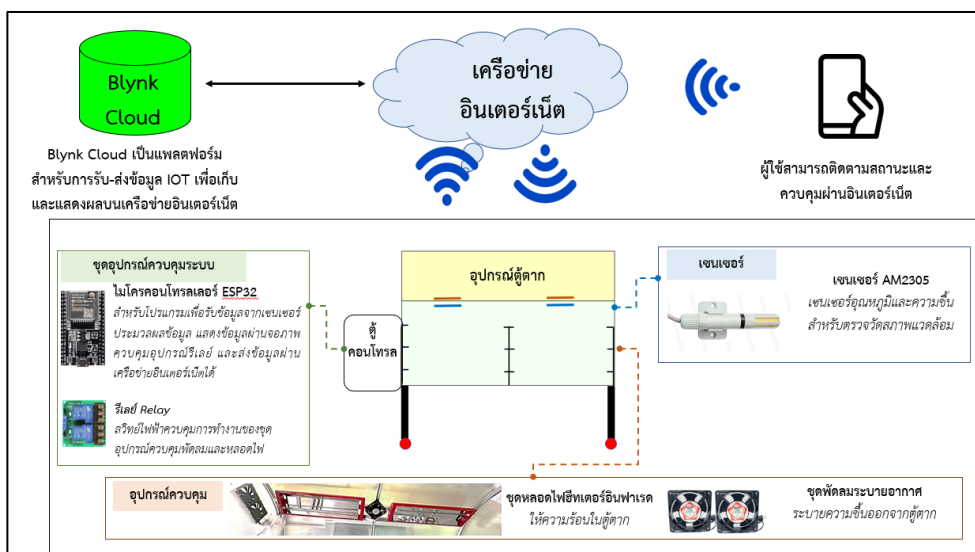
ภาพที่ 2 การติดตั้งแผงโซลาร์เซลล์ และพัดลมระบายความชื้นด้านข้างตัวตู้

3.4 ระบบควบคุม IoT (IoT Control System)

ระบบควบคุม IoT ทำหน้าที่ควบคุมสถานะแวดล้อมภายในตู้อบให้เหมาะสมกับการอบแห้งโดยอัตโนมัติ และช่วยให้ติดตามการทำงานผ่านอินเทอร์เน็ต โดยระบบประกอบด้วยหลักการทำงาน 3 ส่วนหลักดังนี้

ส่วนที่ 1 ส่วนรับข้อมูล (Input/Sensing) ใช้เซนเซอร์ AM2305 สำหรับวัดอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ภายในตู้แบบเรียลไทม์และส่งข้อมูลในรูปแบบสัญญาณดิจิทัลไปยังไมโครคอนโทรลเลอร์เพื่อทำการประมวลผลต่อไป ส่วนที่ 2 ส่วนประมวลผลและสั่งการ ใช้อุปกรณ์ไมโครคอนโทรลเลอร์ (ESP32) ทำหน้าที่

ประมวลผลกลาง เมื่อรับข้อมูลจากเซนเซอร์ AM2305 มาเปรียบเทียบกับเงื่อนไขการควบคุมดังนี้ ถ้าค่าความชื้นสัมพัทธ์ในตู้ สูงกว่าค่าที่กำหนดไว้ (เช่น 60%RH) และ อุณหภูมิอยู่ในช่วงที่เหมาะสม (เช่น 45-60°C) แล้ว ไมโครคอนโทรลเลอร์จะส่งสัญญาณลอจิก "HIGH" ไปยังโมดูลรีเลย์ เพื่อสั่งเปิดการทำงานของพัดลมระบายอากาศทั้ง 2 ตัว เพื่อขับไล่ความชื้นออกไป ถ้าค่าความชื้นสัมพัทธ์ลดลงต่ำกว่าค่าที่กำหนดแล้ว จะส่งสัญญาณลอจิก "LOW" เพื่อสั่ง ปิด การทำงานของพัดลม เพื่อรักษาระดับอุณหภูมิและประหยัดพลังงาน ส่วนที่ 3 ส่วนเชื่อมต่อและแสดงผล (Output and Visualization) ไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP32 เชื่อมต่อกับเครือข่าย Wi-Fi เพื่อส่งข้อมูลที่วัดได้ (อุณหภูมิ, ความชื้น) และสถานะการทำงานของพัดลม (เปิด/ปิด) ขึ้นไปยังคลาวด์ Blynk Platform ที่ทำหน้าที่เป็นตัวกลางในการจัดเก็บและแสดงผลข้อมูล ผู้ใช้สามารถเข้าถึงข้อมูลผ่านแอปพลิเคชันบนสมาร์ตโฟน ซึ่งบนแดชบอร์ดจะทำหน้าที่แสดงผล ดังภาพที่ 3



ภาพที่ 3 แสดงการออกแบบระบบควบคุม IoT ภายในตู้ตู้

3.5 ขั้นตอนการดำเนินการทดลอง

การดำเนินการทดลองในส่วนนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อเก็บรวบรวมข้อมูลเชิงปริมาณสำหรับเปรียบเทียบประสิทธิภาพการอบแห้งทั้ง 2 กลุ่ม ระหว่างวิธีการตากแดดแบบดั้งเดิม (กลุ่มควบคุม) และการใช้ตู้อบพลังงานแสงอาทิตย์ที่พัฒนาขึ้น (กลุ่มทดลอง) โดยดำเนินการทดลองในพื้นที่กลุ่มวิสาหกิจชุมชนเพาะเห็ด ตำบลทุ่งศรีทอง จังหวัดน่าน จำนวน 3 รอบ ในวันที่ 16, 23 และ 30 กรกฎาคม 2568 (รอบละ 1 วัน ห่างกันสัปดาห์ละ 1 ครั้ง) เพื่อให้ครอบคลุมความผันแปรของสภาพอากาศตามธรรมชาติในแต่ละวัน โดยมีขั้นตอนการดำเนินงานที่เป็นระบบและควบคุมตัวแปรอย่างรัดกุม ดังนี้

1. การเตรียมการทดลอง โดยคัดเลือกเห็ดหูหนูตามเกณฑ์ที่กำหนด น้ำหนักกลุ่มละ 1,000 กรัม แล้วเริ่มบันทึกน้ำหนัก

2. การจัดชุดการทดลอง สำหรับกลุ่มควบคุมนำเห็ดหูหนูสด 1,000 กรัม เกลี่ยบนตะแกรงสแตนเลส แล้วนำไปวางในพื้นที่โล่งแจ้งซึ่งได้รับแสงแดดโดยตรง เพื่อจำลองวิธีการตากแดดแบบดั้งเดิม สำหรับกลุ่มทดลอง นำเห็ดหูหนูสด 1,000 กรัม เกลี่ยบนถาดตะแกรงในตู้อบพลังงานแสงอาทิตย์ และปิดฝาให้สนิท แล้วเริ่มต้นดำเนินการทดลองพร้อมกันทั้งสองกลุ่ม ณ เวลา 09.00 น. ของแต่ละวัน เพื่อให้สภาวะอากาศเริ่มต้นและปริมาณรังสีดวงอาทิตย์มีความใกล้เคียงกันมากที่สุด

3. การเก็บรวบรวมข้อมูลระหว่างการทดลอง ดำเนินการเก็บข้อมูลน้ำหนักของเห็ดหูหนูของทั้งสองกลุ่มทุก ๆ 1 ชั่วโมง ตั้งแต่เวลาเริ่มต้น (09.00 น.) จนถึงสิ้นสุดการทดลอง (16.00 น.) รวมระยะเวลา 7 ชั่วโมงต่อรอบ และดำเนินการในลักษณะเดียวกันครบทั้ง 3 รอบตามวันที่กำหนดข้างต้น ดังภาพที่ 4



ภาพที่ 4 แสดงกระบวนการจัดชุดการทดลองของกลุ่มทดลองที่อบเห็ดหูหนูในตู้อบพลังงานแสงอาทิตย์

3.6 การเก็บรวบรวมข้อมูล

จากกระบวนการทดลองได้ดำเนินการเก็บรวบรวมข้อมูลทั้งในส่วนของคุณสมบัติปฐมภูมิและข้อมูลทุติยภูมิ เพื่อให้ได้ข้อมูลที่ครบถ้วนสำหรับการพัฒนาและประเมินผลนวัตกรรม โดยมีรายละเอียดดังนี้ ข้อมูลปฐมภูมิ (Primary Data) เป็นข้อมูลเชิงปริมาณที่ผู้วิจัยเก็บรวบรวมโดยตรงจากการดำเนินการทดลองเปรียบเทียบประสิทธิภาพการอบแห้งเห็ดหูหนูระหว่างกลุ่มควบคุมและกลุ่มทดลอง ซึ่งดำเนินการซ้ำทั้งหมด 3 รอบ โดยมีข้อมูลที่จัดเก็บดังนี้

1. น้ำหนักของเห็ดหูหนู วัดค่าเป็นกรัม (g) โดยใช้เครื่องชั่งดิจิทัล บันทึกข้อมูลทุกๆ 1 ชั่วโมง ตั้งแต่เริ่มต้นจนถึงสิ้นสุดการทดลอง

2. อุณหภูมิ (Temperature) วัดค่าเป็นองศาเซลเซียส (°C) โดยบันทึกข้อมูลทุกๆ 1 ชั่วโมง จาก 2 แหล่ง คือ กลุ่มควบคุม วัดจากเทอร์โมมิเตอร์แบบดิจิทัล ณ บริเวณที่ตากแดด และกลุ่มทดลอง วัดจากเซนเซอร์ AM2305 ที่ติดตั้งอยู่ในตู้อบ

3. ความชื้นสัมพัทธ์ (Relative Humidity) วัดค่าเป็น เปอร์เซ็นต์ (%RH) โดยบันทึกข้อมูลทุกๆ 1 ชั่วโมง จาก 2 แหล่ง คือ กลุ่มควบคุม วัดจากเทอร์โมมิเตอร์แบบดิจิทัล ณ บริเวณที่ตากแดด และกลุ่มทดลอง วัดจากเซนเซอร์ AM2305 ที่ติดตั้งอยู่ภายในตู้อบ

4. ระยะเวลา (Time) วัดค่าเป็น ชั่วโมง (hr) โดยบันทึกระยะเวลาที่ใช้ทั้งหมดในกระบวนการอบแห้งของแต่ละกลุ่ม จนกระทั่งน้ำหนักของเห็ดคงที่

3.7 การวิเคราะห์ข้อมูล

การวิเคราะห์ข้อมูลได้นำข้อมูลเชิงปริมาณที่รวบรวมได้จากการทดลอง มาวิเคราะห์โดยใช้สถิติเชิงพรรณนา (Descriptive Statistics) เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพระหว่างกลุ่มควบคุมและกลุ่มทดลอง โดยมีรายละเอียดดังนี้ ค่าเฉลี่ยเลขคณิต (Mean) ใช้เพื่อวิเคราะห์หาค่ากลางของข้อมูลที่สนใจ ได้แก่ ระยะเวลาเฉลี่ยที่ใช้ในการอบแห้ง (ชั่วโมง) อุณหภูมิเฉลี่ย ($^{\circ}\text{C}$) ตลอดกระบวนการ ความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ย (%RH) ตลอดกระบวนการ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation) ใช้เพื่อวิเคราะห์การกระจายตัวของข้อมูลจากค่าเฉลี่ย เพื่อดูความสม่ำเสมอและความคงที่ของสภาวะในการทดลอง เช่น ความคงที่ของอุณหภูมิภายในตู้อบ เทียบกับความผันผวนของอุณหภูมิภายนอก และ ร้อยละการเปลี่ยนแปลง (Percentage Change) ใช้เพื่อวิเคราะห์การลดลงของน้ำหนักเห็ดหูหนู เพื่อประเมินอัตราการสูญเสียความชื้น

นอกจากนี้ ได้เปรียบเทียบความแตกต่างของอัตราการอบแห้งและร้อยละการลดลงของน้ำหนักระหว่างกลุ่มทดลองและกลุ่มควบคุม ด้วยการทดสอบค่าที่แบบสองกลุ่มอิสระ (Independent samples t-test) ที่ระดับนัยสำคัญทางสถิติ .05

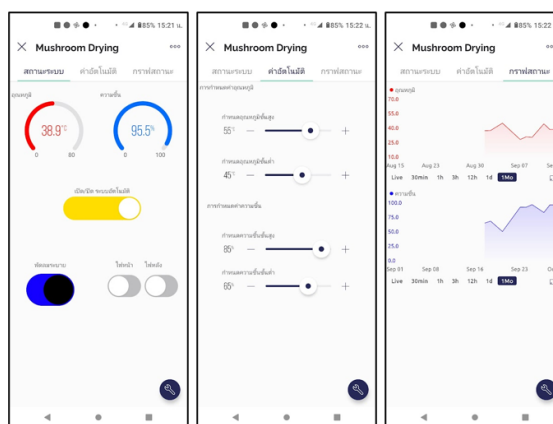
4. ผลการวิจัย

4.1 ผลการพัฒนาตู้อบล้างงานแสงอาทิตย์

ผู้วิจัยได้สร้าง "ตู้อบเห็ดหูหนูพลังงานแสงอาทิตย์ควบคุมด้วยระบบ IoT" ต้นแบบเสร็จสมบูรณ์ตามคุณลักษณะที่ออกแบบไว้ ดังภาพที่ 5 ระบบควบคุม IoT สามารถทำงานได้อย่างสมบูรณ์ โดยสามารถติดตามค่าอุณหภูมิและความชื้นภายในตู้อบได้แบบเรียลไทม์ผ่านแอปพลิเคชัน Blynk ในภาพที่ 6 และสั่งการพัดลมระบายอากาศได้โดยอัตโนมัติตามเงื่อนไขที่ตั้งไว้



ภาพที่ 5 ตู้อบเห็ดหูหนูพลังงานแสงอาทิตย์ต้นแบบที่สร้างเสร็จสมบูรณ์



ภาพที่ 6 หน้าจอแอปพลิเคชัน Blynk แสดงผลอุณหภูมิและความชื้นแบบเรียลไทม์

4.2 ผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการอบแห้ง

จากการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง พบว่าตู้อบพลังงานแสงอาทิตย์มีประสิทธิภาพสูงกว่าวิธีการตากแดดแบบดั้งเดิม อย่างชัดเจน (ตารางที่ 1) ภายในระยะเวลา 7 ชั่วโมง กลุ่มทดลอง (ตู้อบฯ) สามารถลดน้ำหนักของเห็ดได้เฉลี่ย 72.2% ในขณะที่กลุ่มควบคุม (ตากแดด) ลดน้ำหนักได้เฉลี่ยเพียง 34.4% ส่งผลให้กลุ่มทดลองมีอัตราการแห้งเฉลี่ย สูงถึง 103.1 กรัม/ชั่วโมง ซึ่งสูงกว่ากลุ่มควบคุม (49.2 กรัม/ชั่วโมง) ถึง 2.1 เท่า

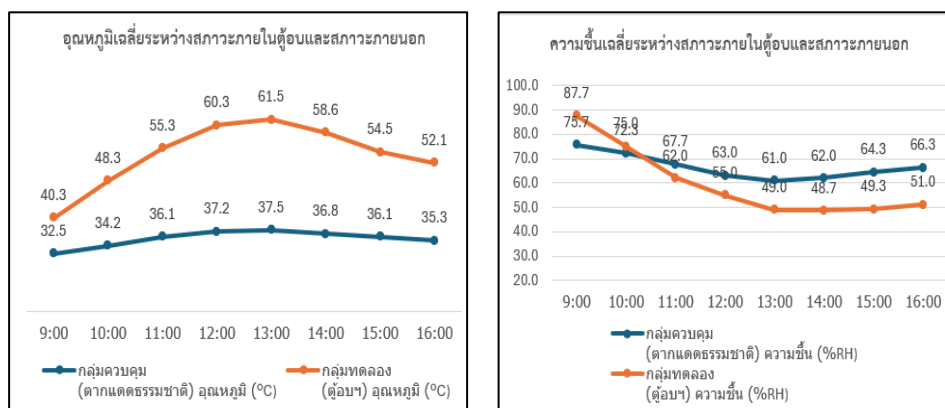
ตารางที่ 1 ตารางสรุปและเปรียบเทียบผลการทดลองอบแห้งเห็ดจากการทำซ้ำ 3 ครั้ง

รายการเปรียบเทียบ	กลุ่มควบคุม (ตากธรรมชาติ)	กลุ่มทดลอง (ตู้อบฯ)
น้ำหนักเริ่มต้นเฉลี่ย (กรัม)	1,000	1,000
น้ำหนักสุดท้ายเฉลี่ย (กรัม)	655.7	278
น้ำหนักที่ลดลงเฉลี่ย (กรัม)	344.3	722
ร้อยละการลดลงของน้ำหนักเฉลี่ย (%)	34.43 ± 0.57	72.20 ± 0.75
อัตราการแห้งเฉลี่ย (กรัม/ชั่วโมง)	49.19 ± 0.81	103.14 ± 1.07
อุณหภูมิเฉลี่ยตลอดการทดลอง (°C)	35.7 ± 0.7	53.8 ± 0.8
ความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ย (%RH)	66.5 ± 2.7	59.7 ± 0.5

หมายเหตุ: ค่าทุกค่าในตารางเป็นค่าเฉลี่ย (Mean) จากการทดลองซ้ำ 3 รอบ โดยแต่ละรอบใช้เห็ดหูหนูสดน้ำหนักเริ่มต้นกลุ่มละ 1,000 กรัม จึงรายงานเป็นค่าเฉลี่ยต่อรอบ

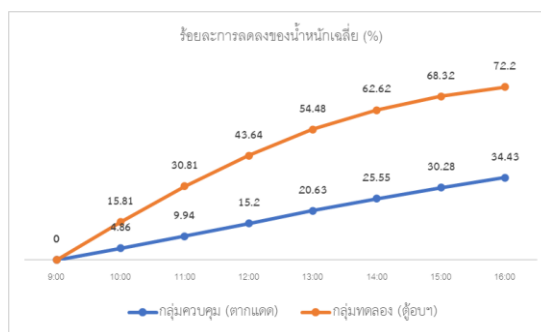
เมื่อทดสอบทางสถิติพบว่า ความแตกต่างของอัตราการอบแห้งและร้อยละการลดลงของน้ำหนักระหว่างสองกลุ่มมีนัยสำคัญทางสถิติ ($t = 69.6$, $df = 4$, $p < .001$) ซึ่งสนับสนุนว่าตู้อบพลังงานแสงอาทิตย์มีประสิทธิภาพสูงกว่าการตากแดดธรรมชาติอย่างชัดเจน

ประสิทธิภาพที่แตกต่างกันนี้เป็นผลโดยตรงจากความสามารถในการสร้างสภาวะแวดล้อมของตู้อบฯ ซึ่งสามารถสร้างอุณหภูมิเฉลี่ยได้สูงถึง 53.8°C เทียบกับ 35.7°C ของการตากแดดธรรมชาติ และยังสามารถควบคุมความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ยให้ต่ำกว่าได้ ดังภาพ 7



ภาพที่ 7 แผนภูมิเปรียบเทียบอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ยระหว่างสภาวะภายในตู้อบและสภาวะภายนอก

จากภาพที่ 8 แสดงให้เห็นว่ากลุ่มทดลอง (เส้นสีส้ม) มีอัตราการระเหยของน้ำที่รวดเร็วมาก โดยน้ำหนักลดลงกว่า 50% ตั้งแต่ช่วงเที่ยงวัน และลดลงอย่างต่อเนื่องจนถึง 72.2% ในตอนท้ายของการทดลอง ในส่วนกลุ่มควบคุม (เส้นสีน้ำเงิน) มีความชื้นน้อยกว่าและค่อนข้างคงที่ แสดงถึงอัตราการแห้งที่ช้าและสม่ำเสมอตลอดทั้งวัน โดยมีร้อยละการลดลงของน้ำหนักสุดท้ายอยู่ที่ 34.4% ซึ่ง ความแตกต่างของความชื้นระหว่างกลุ่มทดลองและกลุ่มควบคุมให้เห็นถึงประสิทธิภาพที่เหนือกว่าของตู้อบพลังงานแสงอาทิตย์ในการเร่งกระบวนการอบแห้งได้อย่างชัดเจน



ภาพที่ 8 แผนภูมิเปรียบเทียบร้อยละการลดลงของน้ำหนักเฉลี่ยของเห็ดหูหนูระหว่างกลุ่มทดลองและกลุ่มควบคุมตลอดระยะเวลาการอบแห้ง

และการเปรียบเทียบดังภาพที่ 7 จะแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพในการอบแห้งที่แตกต่างกันเป็นผลโดยตรงจากความสามารถในการสร้างและควบคุมสภาวะแวดล้อมของตู้อบฯ สามารถสร้างและรักษาสภาวะที่เอื้อต่อการอบแห้งได้ดีกว่าอย่างยิ่ง โดยมี อุณหภูมิเฉลี่ย ตลอดการทดลองสูงถึง 53.8°C ในขณะที่สภาวะการตากแดดธรรมชาติมีอุณหภูมิเฉลี่ยเพียง 35.7°C ในส่วนความชื้นสัมพัทธ์ พบว่ากลุ่มทดลองมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ $59.7\%\text{RH}$ ซึ่งต่ำกว่ากลุ่มควบคุมที่มีค่าเฉลี่ย $66.5\%\text{RH}$ แสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพของระบบระบายอากาศในการขับไล่ความชื้นที่ระเหยออกมาจากเห็ดได้อย่างต่อเนื่อง ความแตกต่างของสภาวะแวดล้อมทั้งสองรูปแบบตลอดระยะเวลาการทดลอง

นอกจากนี้ คุณภาพทางกายภาพของเห็ดหูหนูแห้งจากกลุ่มทดลองยังดีกว่าอย่างชัดเจน ทั้งในด้านสีที่สม่ำเสมอ รูปร่างที่ไม่บิดเบี้ยว และความสะอาดที่ปราศจากฝุ่นละออง (ภาพที่ 9)



ภาพที่ 9 ลักษณะทางกายภาพของเห็ดหูหนูแห้งจากกลุ่มควบคุม (ซ้าย) และกลุ่มทดลอง (ขวา)

5. อภิปรายผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 อภิปรายผลการวิจัย

ผลการวิจัยแสดงให้เห็นว่าตู้อบพลังงานแสงอาทิตย์ควบคุมด้วยระบบ IoT มีประสิทธิภาพสูงกว่าวิธีดั้งเดิมอย่างชัดเจน ปัจจัยสำคัญคือความสามารถในการสร้างอุณหภูมิที่สูงกว่า (เฉลี่ย 53.8°C) จากปรากฏการณ์เรือนกระจก ซึ่งช่วยเร่งการระเหยของน้ำออกจากเห็ดได้เร็วกว่า นอกจากนี้ ระบบควบคุม IoT ยังมีบทบาทสำคัญในการจัดการความชื้น โดยส่งการพัดลมให้ระบายอากาศขึ้นออกไปโดยอัตโนมัติ ทำให้สภาวะภายในตู้เอื้อต่อการอบแห้งอย่างต่อเนื่อง

5.1.1 การออกแบบและพัฒนาตู้อบ

ผลการวิจัยตามวัตถุประสงค์ที่ 1 แสดงให้เห็นว่าตู้อบเห็ดหูหนูพลังงานแสงอาทิตย์ที่ควบคุมด้วยระบบ IoT สามารถพัฒนาและทำงานได้อย่างสมบูรณ์ตามที่ออกแบบไว้ โดยโครงสร้างแบบเรือนกระจกร่วมกับการพาความร้อนแบบบังคับช่วยกักเก็บและกระจายความร้อนได้อย่างมีประสิทธิภาพ ขณะที่ระบบ

ควบคุมซึ่งใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP32 ร่วมกับเซนเซอร์ AM2305 และแพลตฟอร์ม Blynk สามารถตรวจวัดและแสดงผลอุณหภูมิและความชื้นแบบเรียลไทม์ พร้อมสั่งการพัดลมระบายอากาศโดยอัตโนมัติ ซึ่งสอดคล้องกับแนวทางการประยุกต์ใช้ ESP32 และเซนเซอร์ในระบบควบคุมอัตโนมัติ (ภาสกร พาเจริญ, 2565) และสนับสนุนผลการศึกษาที่ผ่านมาที่ระบุว่าการนำระบบ IoT มาใช้กับตู้บปล้งงานแสงอาทิตย์เป็นแนวทางที่เป็นไปได้ในทางปฏิบัติ (อภิญญา สายศรีแก้ว และคณะ, 2565)

5.1.2 สภาพะการทำงานที่เหมาะสมของตู้บ

สำหรับวัตถุประสงค์ที่ 2 ผลการทดลองสะท้อนสภาพะการทำงานที่เหมาะสมของตู้บในการอบแห้งเห็ดหูหนู กล่าวคือ ระบบสามารถรักษาอุณหภูมิภายในตู้ให้อยู่ในช่วงประมาณ 50–60 องศาเซลเซียส (เฉลี่ย 53.8 องศาเซลเซียส) ซึ่งเป็นช่วงที่เหมาะสมต่อการเร่งการระเหยของน้ำโดยไม่ทำให้เกิดผลิตภัณฑ์เสียคุณภาพ และควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ภายในตู้ให้ต่ำกว่าสภาวะภายนอกผ่านการสั่งงานพัดลมระบายอากาศเมื่อความชื้นสัมพัทธ์สูงกว่าค่าที่กำหนด (60%RH) โดยทดลองกับเห็ดหูหนูสดในอัตราประมาณ 1 กิโลกรัมต่อถาด (รวม 4 ถาดต่อรอบ) สภาพะการทำงานดังกล่าวสามารถใช้เป็นแนวทางอ้างอิงในการตั้งค่าระบบควบคุมสำหรับการอบแห้งเห็ดหูหนูในเชิงปฏิบัติได้ ซึ่งสอดคล้องกับหลักการที่ว่า การควบคุมอุณหภูมิและความชื้นอย่างเหมาะสมเป็นปัจจัยกำหนดประสิทธิภาพการอบแห้ง (สมชาติ โสภณธรณฤทธิ์, 2540)

5.1.3 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการอบแห้ง

ในส่วนของวัตถุประสงค์ที่ 3 ผลการเปรียบเทียบแสดงให้เห็นว่าตู้บปล้งงานแสงอาทิตย์มีประสิทธิภาพเหนือกว่าการตากแดดแบบดั้งเดิมอย่างชัดเจน โดยมีอัตราการอบแห้งสูงกว่าประมาณ 2.1 เท่า ปัจจัยสำคัญคือความสามารถในการสร้างอุณหภูมิเฉลี่ยภายในตู้ได้สูงถึง 53.8 องศาเซลเซียส ซึ่งสูงกว่าอุณหภูมิเฉลี่ยของการตากแดดธรรมชาติ (35.7 องศาเซลเซียส) คิดเป็นประมาณร้อยละ 50.7 อันเป็นผลจากปรากฏการณ์เรือนกระจกที่ช่วยเร่งการระเหยของน้ำ (Duffie & Beckman, 2013) ประกอบกับระบบ IoT ที่สั่งการพัดลมระบายความชื้นออกโดยอัตโนมัติ ทำให้สภาวะภายในตู้เอื้อต่อการอบแห้งอย่างต่อเนื่อง ผลดังกล่าวสอดคล้องกับ พิบูลย์ สีคำ และคณะ (2565) ที่พบว่าเทคนิคและสภาวะการอบแห้งที่เหมาะสมส่งผลโดยตรงต่อระยะเวลาการอบแห้งและคุณภาพของผลิตภัณฑ์เห็ดหูหนูแห้ง และสอดคล้องกับงานวิจัยที่นำระบบ IoT มาควบคุมตู้บปล้งงานแสงอาทิตย์ซึ่งรายงานว่าจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพและลดระยะเวลาการอบแห้งได้ (อภิญญา สายศรีแก้ว และคณะ, 2565)

ทั้งนี้ ในการประเมินคุณภาพของเห็ดหูหนูอบแห้งเชิงพาณิชย์ การลดลงของน้ำหนักมิใช่ตัวชี้วัดคุณภาพโดยตรง แต่ต้องพิจารณาความชื้นสุดท้ายของผลิตภัณฑ์เป็นเกณฑ์สำคัญ โดยมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน (มผช.) กำหนดให้ผลิตภัณฑ์เห็ดแห้งต้องมีความชื้นไม่เกินร้อยละ 12 และค่าวอเตอร์แอกทิวิตี (a_w) ไม่เกิน 0.85 เพื่อให้เก็บรักษาได้นานและปลอดภัยจากการเจริญของจุลินทรีย์ ผลิตภัณฑ์ที่ผ่านเกณฑ์ความชื้นดังกล่าวเท่านั้นจึงจะจำหน่ายและสร้างมูลค่าเพิ่มได้อย่างแท้จริง ดังนั้น การที่กลุ่มทดลองมีอัตราการลดน้ำหนักสูงกว่าจึงสะท้อนความสามารถของตู้บในการ เร่ง กระบวนการอบแห้งให้เข้าสู่เกณฑ์มาตรฐานได้รวดเร็วว่าการตากแดดแบบดั้งเดิมอย่างมาก อนึ่ง การทดลองครั้งนี้กำหนดรอบเวลาเปรียบเทียบไว้ที่ 7 ชั่วโมงต่อวันภายใต้สภาวะเริ่มต้นเดียวกัน เพื่อเปรียบเทียบ อัตราการอบแห้ง ระหว่างสองวิธีเป็นหลัก ซึ่งภายในรอบเวลาดังกล่าว

ผลิตภัณฑ์ยังมีความชื้นสูงกว่าเกณฑ์มาตรฐาน จึงต้องอบต่อเนื่องจนความชื้นลดลงถึงระดับมาตรฐาน อย่างไรก็ตาม ด้วยอัตราการอบแห้งที่สูงกว่าประมาณ 2.1 เท่า ตู้อบที่พัฒนาขึ้นย่อมนำผลิตภัณฑ์เข้าสู่เกณฑ์มาตรฐานได้ในระยะเวลาที่สั้นกว่าการตากแดดอย่างชัดเจน ซึ่งสอดคล้องกับหลักการอบแห้งด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ (เสริมจันทร์ฉาย, 2560)

ข้อจำกัดของงานวิจัย การทดลองนี้มุ่งเปรียบเทียบอัตราการอบแห้งภายในกรอบเวลา 7 ชั่วโมง จึงยังมิได้อบแห้งจนผลิตภัณฑ์มีความชื้นถึงระดับมาตรฐานการเก็บรักษา (ไม่เกินร้อยละ 12) และยังมีได้ตรวจวัดความชื้นสุดท้ายและค่า a_w ของผลิตภัณฑ์โดยตรง ประกอบกับทดลองซ้ำเพียง 3 รอบด้วยสถิติเชิงพรรณนา ผลการศึกษาจึงควรตีความในฐานะการเปรียบเทียบประสิทธิภาพเชิงอัตราเป็นหลัก

5.2 การวิเคราะห์ความคุ้มค่าเชิงเศรษฐศาสตร์เบื้องต้น

ต้นทุนการพัฒนาตู้อบพลังงานแสงอาทิตย์ควบคุมด้วยระบบ IoT รวมประมาณ 24,000 บาท (โครงสร้างตู้และวัสดุประมาณ 16,000 บาท และระบบควบคุม IoT พร้อมเซนเซอร์ประมาณ 8,000 บาท) ในด้านต้นทุนการอบแห้ง ตู้อบที่พัฒนาขึ้นใช้พลังงานแสงอาทิตย์เป็นหลัก โดยมีเพียงพัดลมกระแสตรงที่รับไฟจากแผงโซลาร์เซลล์ขนาด 10 วัตต์ จึงมีต้นทุนค่าพลังงานในการอบแห้งใกล้เคียงศูนย์ ในขณะที่การอบแห้งด้วยตู้อบไฟฟ้าเพื่อไล่ความชื้นในปริมาณเดียวกันมีต้นทุนค่าไฟฟ้าประมาณ 36 บาทต่อกิโลกรัมเห็ดแห้ง ซึ่งเป็นต้นทุนเนื่องตลอดอายุการใช้งาน

ในด้านผลตอบแทน เนื่องจากกลุ่มวิสาหกิจมีผลผลิตเห็ดหูหนูสดเฉลี่ยประมาณ 65 กิโลกรัมต่อสัปดาห์ ซึ่งมีอายุการเก็บรักษาสั้นและเน่าเสียง่าย ทำให้ผลผลิตส่วนหนึ่งจำหน่ายไม่ทันและสูญเสียรายได้ การนำผลผลิตส่วนที่จำหน่ายไม่ทันมาแปรรูปเป็นเห็ดหูหนูอบแห้งซึ่งเก็บรักษาด้านานจึงช่วยรักษามูลค่าไว้ได้ โดยหากกลุ่มสามารถนำผลผลิตสดที่เดิมสูญเสียประมาณร้อยละ 15-20 (ราว 390-520 กิโลกรัมต่อปี) มาอบแห้ง (อัตราส่วนสดต่อแห้งประมาณ 6.8 ต่อ 1) จะได้เห็ดแห้งประมาณ 58-77 กิโลกรัมต่อปี คิดเป็นรายได้เพิ่มประมาณ 29,000-38,000 บาทต่อปี (ที่ราคาจำหน่ายเห็ดแห้ง 500 บาทต่อกิโลกรัม และราคารับซื้อเห็ดสด 60-80 บาทต่อกิโลกรัมในพื้นที่จังหวัดน่าน) ส่งผลให้ระยะเวลาคืนทุนของการลงทุนอยู่ที่ประมาณ 7-10 เดือน

ทั้งนี้ ประมาณการดังกล่าวยังไม่รวมประโยชน์ด้านการลดความเสี่ยงจากสภาพอากาศ การยกระดับคุณภาพผลิตภัณฑ์ และการสร้างตราสินค้าของชุมชน อย่างไรก็ตาม ตัวเลขข้างต้นเป็นการประมาณการเบื้องต้นภายใต้สมมติฐานด้านราคา ปริมาณผลผลิต และอัตราการสูญเสีย ความคุ้มค่าที่แท้จริงจึงขึ้นอยู่กับเงื่อนไขการดำเนินงานจริงของกลุ่มวิสาหกิจในแต่ละช่วงเวลา

5.3 ข้อเสนอแนะ

1. ข้อเสนอแนะในการนำไปใช้ประโยชน์: ควรส่งเสริมให้กลุ่มวิสาหกิจชุมชนนำนวัตกรรมนี้ไปใช้เป็นเครื่องมือหลักในการแปรรูปเห็ดหูหนู พร้อมทั้งพัฒนาบรรจุภัณฑ์และสร้างตราสินค้าของชุมชนเพื่อเพิ่มขีดความสามารถทางการตลาด

2. ครอบคลุมทั้งจนผลิตภัณฑ์มีความขึ้นถึงเกณฑ์มาตรฐาน มผช. (ไม่เกินร้อยละ 12) พร้อมตรวจวัดความชื้นสุดท้ายและค่า a_w เพื่อยืนยันคุณภาพและอายุการเก็บรักษา รวมถึงวิเคราะห์ระยะเวลาและความคุ้มค่าเชิงเศรษฐศาสตร์ในการอบแห้งให้ถึงมาตรฐาน

3. ข้อเสนอแนะในการทำวิจัยครั้งต่อไป: ควรมีการศึกษาประสิทธิภาพของตู้อบในฤดูกาลที่แตกต่างกัน, พัฒนาสู่ขนาดเชิงพาณิชย์, ขยายผลสู่ผลิตภัณฑ์ทางการเกษตรชนิดอื่น และวิเคราะห์ความคุ้มค่าเชิงเศรษฐศาสตร์อย่างละเอียด

6. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณมหาวิทยาลัยราชภัฏอุตรดิตถ์ และกองทุนส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม (ววน.) ที่ได้อนุมัติทุนอุดหนุนการวิจัย และขอบคุณกลุ่มวิสาหกิจชุมชนเพาะเห็ดตำบลทุ่งศรีทองที่ให้ความร่วมมืออย่างดียิ่งในการดำเนินงานวิจัยภาคสนาม

7. เอกสารอ้างอิง

- ชยางกูร ไชยวงศ์, ธวัชไชย ลิมสุวรรณ์, รวิวัฒน์ คำหวาน, และ ศิวณัฐ เป็ดสุวรรณ์. (2564). การควบคุมอุณหภูมิและความชื้นของตู้อบล้างงานแสงอาทิตย์ด้วยระบบ IoT. *วารสารวิชาการสถาบันการอาชีวศึกษาภาคใต้ 1*, 6(2), 66-74. https://ph01.tci-thaijo.org/index.php/csnp_veis1/article/view/244010
- นิธิยา รัตนานพนธ์. (2553). *เคมีอาหาร* (พิมพ์ครั้งที่ 4). โอเดียนสโตร์.
- พระราชบัญญัติส่งเสริมวิสาหกิจชุมชน พ.ศ. 2548. (2548, 18 มกราคม). *ราชกิจจานุเบกษา*. เล่ม 122, ตอนที่ 6 ก, หน้า 1-13. https://www.senate.go.th/assets/portals/93/fileups/257/files/rk/47_62/2548/29.pdf
- พิบูลย์ สีสคำ, ปริญ คงกระพันธ์, และ หยาดฝน ทนงการกิจ. (2565). การออกแบบ สร้าง และทดสอบระบบอบแห้งแบบผสมผสาน กรณีศึกษา การผลิตเห็ดหูหนูดำอบแห้งของเกษตรกร อำเภอสนทราย จังหวัดเชียงใหม่. *วารสารวิชาการ มหาวิทยาลัยราชภัฏอุตรดิตถ์*, 17(2), 19-35. <https://ph01.tci-thaijo.org/index.php/uruj/article/view/247856>
- ภาสกร พาเจริญ. (2565). *พัฒนา IoT บนแพลตฟอร์ม Arduino ด้วย ESP32*. โปรวิชั่น.
- สมชาติ โสภณธนฤทธิ. (2540). *การอบแห้งเมล็ดพืชและอาหารบางประเภท*. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- เสริม จันทรฉาย. (2560). *เทคโนโลยีการอบแห้งด้วยพลังงานรังสีอาทิตย์*. ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร.
- อภิญา สายศรีแก้ว, อัษฎา วรรณกายนต์, อภิชัย ไพโรสินธุ์, และ สุชาติ ดุมนิล. (2565). การพัฒนาตู้อบล้างงานแสงอาทิตย์เพื่อการแปรรูปอาหารควบคุมด้วยระบบ Internet of Things (IoT). *วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏสุรินทร์*, 7(2), 42-52. <https://ph02.tci-thaijo.org/index.php/journalindus/article/view/247186>

- Ashton, K. (2009). That 'Internet of Things' thing. *RFID Journal*, 22(7), 97-114.
<https://www.rfidjournal.com/expert-views/that-internet-of-things-thing/73881/>
- Duffie, J. A., & Beckman, W. A. (2013). *Solar engineering of thermal processes (4th ed.)*. John Wiley & Sons. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/book/10.1002/9781118671603>
- International Telecommunication Union. (2012). *Overview of the Internet of things (ITU-T Y.2060)*. ITU. <https://www.itu.int/rec/t-rec-y.2060-201206-i>