

การออกแบบและพัฒนาเครื่องอบลมร้อนแบบหมุนเวียนภายใน โดยใช้อินเทอร์เน็ตทุกสรรพสิ่ง

Design and Development of an Internal Circulating Hot Air Oven Using the Internet of Things

ชลทิศ มิอุบล¹, สุรเดช เรืองศรี², จิรวินญ์ ดีเจริญชิตพงษ์³

¹เทคโนโลยีสารสนเทศและนวัตกรรมดิจิทัล, มหาวิทยาลัยนอร์ทกรุงเทพ, chonlatis.meea@northbkk.ac.th

²เทคโนโลยีสารสนเทศและนวัตกรรมดิจิทัล, มหาวิทยาลัยนอร์ทกรุงเทพ, suradath.ruea@northbkk.ac.th

³เทคโนโลยีสารสนเทศและนวัตกรรมดิจิทัล, มหาวิทยาลัยนอร์ทกรุงเทพ, jirawin.de@northbkk.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อ 1) ออกแบบและพัฒนาเครื่องอบลมร้อนแบบหมุนเวียนภายในโดยใช้เทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตทุกสรรพสิ่ง (IoT) 2) พัฒนาระบบควบคุมอุณหภูมิให้รักษาอุณหภูมิภายในตู้อบได้อย่างเหมาะสมและมีเสถียรภาพ 3) พัฒนาระบบหมุนเวียนลมร้อนให้กระจายความร้อนได้อย่างสม่ำเสมอ และ 4) ทดสอบและประเมินประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องอบลมร้อนที่พัฒนาขึ้น เครื่องอบแห้งแบบตั้งเดิมมักประสบปัญหาการควบคุมอุณหภูมิที่ไม่สม่ำเสมอและขึ้นอยู่กับสภาพอากาศ งานวิจัยนี้จึงพัฒนาระบบที่ใช้ ESP32 เป็นหน่วยประมวลผลหลัก ร่วมกับเซ็นเซอร์ MAX6675 (K-Type Thermocouple, $\pm 1.5^{\circ}\text{C}$, 0–1024 $^{\circ}\text{C}$) ควบคุมฮีตเตอร์และพัดลม 4 ชุด กำลังรวม 232 วัตต์ ผ่านรีเลย์ 16 แชนแนล และติดตามสั่งงานแบบเรียลไทม์ผ่านแอปพลิเคชัน Blynk ผลการทดสอบพบว่าระบบรักษาอุณหภูมิได้ในช่วง 90–95 $^{\circ}\text{C}$ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน $\pm 1.1^{\circ}\text{C}$ ความแตกต่างระหว่าง 5 ตำแหน่งไม่เกิน 2.3 $^{\circ}\text{C}$ เข้าสู่ช่วงเป้าหมายภายใน 35 นาที และสามารถลดความชื้นผลไม้จาก 72.5–88.6% เหลือ 18.2–22.3% ภายใน 6–9 ชั่วโมง อัตราการลดน้ำหนักเฉลี่ย 73.6% ผลการวิจัยแสดงให้เห็นว่าการบูรณาการ IoT กับระบบอบแห้งสามารถเพิ่มประสิทธิภาพและความสะดวกในการใช้งานได้อย่างมีนัยสำคัญ เหมาะสำหรับครัวเรือนและอุตสาหกรรมแปรรูปขนาดเล็ก

คำหลัก: เครื่องอบลมร้อน, อินเทอร์เน็ตทุกสรรพสิ่ง, ESP32, การควบคุมอุณหภูมิ, การอบแห้งผลไม้

Abstract

This research aimed to: 1) design and develop an internal hot air recirculating oven using Internet of Things (IoT) technology, 2) develop a temperature control system to maintain an optimal and stable temperature inside the oven, 3) develop a hot air

circulation system to distribute heat evenly, and 4) test and evaluate the performance of the developed system. Conventional drying systems often suffer from inconsistent temperature control and weather dependency. This study developed a system using an ESP32 as the main processing unit, combined with a MAX6675 sensor (K-Type Thermocouple, $\pm 1.5^{\circ}\text{C}$, 0-1024 $^{\circ}\text{C}$), controlling four heater-fan units with a total power of 232 watts via 16-channel relays, with real-time monitoring through the Blynk application. Experimental results showed that the developed system maintained the oven temperature within the range of 90-95 $^{\circ}\text{C}$ with a standard deviation of $\pm 1.1^{\circ}\text{C}$, a maximum temperature difference of 2.3 $^{\circ}\text{C}$ across five measurement positions, and reached the target temperature within 35 minutes. The system reduced fruit moisture content from 72.5-88.6% to 18.2-22.3% within 6-9 hours, achieving an average weight reduction of 73.6%. The findings demonstrate that IoT integration with drying systems significantly improves operational efficiency and convenience for household and small-scale industrial applications.

Keywords: Hot Air Oven, Internet of Things, ESP32, Temperature Control, Fruit Drying

ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันกระบวนการอบแห้งมีบทบาทสำคัญต่อภาคเกษตรกรรมและอุตสาหกรรมแปรรูป เนื่องจากช่วยลดความชื้นของวัตถุดิบ เพิ่มอายุการเก็บรักษา และรักษาคุณภาพของผลิตภัณฑ์ อย่างไรก็ตาม เครื่องอบแห้งแบบดั้งเดิมมักประสบปัญหาการควบคุมอุณหภูมิที่ไม่สม่ำเสมอ ส่งผลให้การอบแห้งใช้เวลานานและคุณภาพของผลิตภัณฑ์ไม่คงที่ ดังนั้น การพัฒนาเครื่องอบลมร้อนที่สามารถควบคุมอุณหภูมิและการกระจายลมร้อนได้อย่างมีประสิทธิภาพจึงเป็นแนวทางหนึ่งที่จะช่วยแก้ไขปัญหาดังกล่าว (จิรศักดิ์, 2563)

การนำระบบหมุนเวียนลมร้อนภายในมาใช้กับเครื่องอบลมร้อนช่วยให้ความร้อนกระจายตัวอย่างทั่วถึง ลดความแตกต่างของอุณหภูมิภายในตู้อบ และเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการอบแห้ง อีกทั้งการพัฒนา ระบบควบคุมอุณหภูมิอัตโนมัติรวมกับการใช้เซ็นเซอร์และไมโครคอนโทรลเลอร์ ยังช่วยให้สามารถควบคุมสภาวะการอบได้อย่างแม่นยำและต่อเนื่อง ซึ่งสอดคล้องกับแนวคิดการพัฒนา ระบบควบคุมอัจฉริยะในงานด้านวิศวกรรมและเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (กิตติชัย, 2562)

นอกจากนี้ เทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตทุกสรรพสิ่ง (Internet of Things: IoT) ได้ถูกนำมาประยุกต์ใช้กับระบบควบคุมอัตโนมัติอย่างแพร่หลาย โดยช่วยเพิ่มความสะดวกในการติดตามและควบคุมการทำงานของอุปกรณ์ผ่านเครือข่ายอินเทอร์เน็ตแบบเรียลไทม์ งานวิจัยที่ผ่านมาเกี่ยวกับระบบ IoT สำหรับการเกษตร

อัจฉริยะ เช่น การควบคุมสภาพแวดล้อมโรงเรือนและระบบชลประทานอัตโนมัติ แสดงให้เห็นถึงศักยภาพของ IoT ในการเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตทางการเกษตร (ณรงค์ศักดิ์, 2561) อย่างไรก็ตาม ยังมีช่องว่างการวิจัย (Research Gap) ในด้านการบูรณาการ IoT กับระบบอบแห้งผลไม้แบบหมุนเวียนลมร้อนภายใน ซึ่งเป็นสิ่งที่งานวิจัยนี้มุ่งศึกษาและพัฒนา ด้วยเหตุนี้ งานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นการออกแบบและพัฒนาเครื่องอบลมร้อนแบบหมุนเวียนภายในโดยใช้เทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตทุกสรรพสิ่ง เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพและความสะดวกในการใช้งาน

วัตถุประสงค์

1. เพื่อออกแบบและพัฒนาเครื่องอบลมร้อนแบบหมุนเวียนภายในโดยใช้เทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตทุกสรรพสิ่ง (Internet of Things: IoT)
2. เพื่อพัฒนาระบบควบคุมอุณหภูมิของเครื่องอบลมร้อนให้สามารถควบคุมและรักษาอุณหภูมิภายในตู้อบได้อย่างเหมาะสมและมีเสถียรภาพ
3. เพื่อพัฒนาระบบหมุนเวียนลมร้อนภายในตู้อบให้สามารถกระจายความร้อนได้อย่างสม่ำเสมอ
4. เพื่อทดสอบและประเมินประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องอบลมร้อนแบบหมุนเวียนภายในที่พัฒนาขึ้น

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ประโยชน์ทางวิชาการ
 - 1.1 ได้ต้นแบบเครื่องอบลมร้อนที่บูรณาการ IoT ซึ่งสามารถใช้เป็นแนวทางในการพัฒนาระบบอบแห้งอัจฉริยะในงานวิจัยต่อไป
 - 1.2 ได้องค์ความรู้ด้านการควบคุมอุณหภูมิและการหมุนเวียนลมร้อนด้วยระบบ IoT ที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในสาขาวิศวกรรมและเทคโนโลยีอุตสาหกรรม
2. ประโยชน์เชิงอุตสาหกรรม
 - 2.1 ลดภาระและความผิดพลาดจากการควบคุมเครื่องอบด้วยตนเอง เพิ่มประสิทธิภาพและความสม่ำเสมอของกระบวนการอบแห้ง
 - 2.2 สามารถนำองค์ความรู้และระบบที่พัฒนาขึ้นไปประยุกต์ใช้หรือต่อยอดในด้านการเกษตรและอุตสาหกรรมแปรรูปอาหารระดับครัวเรือนและเชิงพาณิชย์

กรอบแนวคิด

การวิจัยนี้ใช้กรอบแนวคิดแบบ Input-Process-Output (IPO) เพื่อแสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร ในระบบ ดังแสดงในตาราง 1

ตาราง 1 กรอบแนวคิดการวิจัยแบบ Input-Process-Output

ตัวแปรต้น (Input)	กระบวนการ (Process)	ตัวแปรตาม (Output)
• ระบบควบคุมอุณหภูมิ	• ESP32 ประมวลผลหลัก	• ค่าเบี่ยงเบน SD (°C)
• ระบบหมุนเวียนลมร้อน	• MAX6675 วัดอุณหภูมิ	• ความแตกต่าง 5 ตำแหน่ง
• เทคโนโลยี IoT	• รีเลย์ 16 ช่อง ควบคุมอุปกรณ์	• อัตราลดความชื้น (%)
• พัดลม 4 ชุด	• แอปพลิเคชัน Blynk	• อัตราลดน้ำหนัก (%)
• ฮีตเตอร์ 4 ชุด		• ประสิทธิภาพการอบ

วิธีดำเนินการวิจัย

การออกแบบและพัฒนาเครื่องอบลมร้อนแบบหมุนเวียนภายในโดยใช้เทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตทุกสรรพสิ่ง เป็นการวิจัยเชิงพัฒนา (Research and Development) โดยมีขั้นตอนการดำเนินงานอย่างเป็นระบบ เพื่อให้ได้เครื่องอบลมร้อนต้นแบบที่สามารถควบคุมอุณหภูมิและการหมุนเวียนลมร้อนได้อย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งสามารถสรุปขั้นตอนการดำเนินการวิจัยได้ดังนี้

1. การศึกษาข้อมูลและวิเคราะห์ความต้องการของระบบ

1.1 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับระบบงาน

การศึกษาข้อมูลและวิเคราะห์ความต้องการของระบบเป็นขั้นตอนพื้นฐานที่มีความสำคัญต่อการออกแบบและพัฒนาเครื่องอบลมร้อนต้นแบบ เพื่อให้ระบบสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพและสอดคล้องกับการใช้งานจริง ระบบเครื่องอบลมร้อนเป็นระบบที่ใช้พลังงานความร้อนร่วมกับการไหลเวียนของอากาศร้อนเพื่อทำการลดความชื้นของวัตถุดิบ โดยเฉพาะผลไม้และผลิตภัณฑ์ทางการเกษตร การอบแห้งด้วยลมร้อนช่วยยืดอายุการเก็บรักษา ลดการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ และช่วยคงคุณภาพของผลิตภัณฑ์ให้เหมาะสมต่อการบริโภค (สมชาย, 2560) ทั้งนี้ ประสิทธิภาพของกระบวนการอบแห้งขึ้นอยู่กับปัจจัยสำคัญ ได้แก่ อุณหภูมิในการอบ ระยะเวลาในการอบ และการหมุนเวียนของอากาศร้อนภายในตู้อบ ซึ่งมีผลโดยตรงต่อสี กลิ่น รสชาติ และคุณค่าทางโภชนาการของผลิตภัณฑ์ที่ได้ (ศิริชัย, 2561)



ภาพ 1 ตัวอย่างผลไม้ที่สามารถอบแห้งได้

1.2 เทคโนโลยีที่ใช้ในการดำเนินงาน

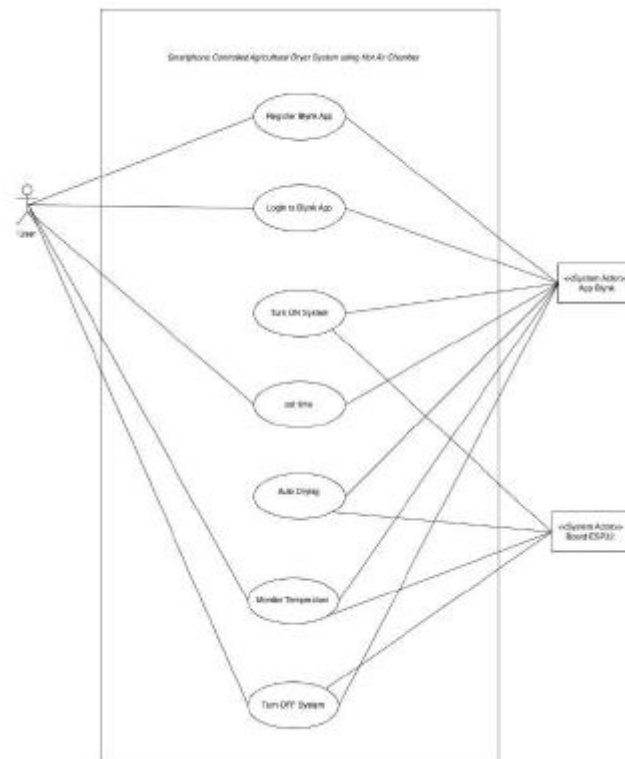
ในการพัฒนาเครื่องอบลมร้อนต้นแบบ ได้มีการศึกษาทฤษฎี แนวคิด และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับระบบควบคุมอุณหภูมิ ระบบหมุนเวียนลมร้อน และการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตทุกสรรพสิ่ง เพื่อกำหนดแนวทางในการออกแบบระบบให้เหมาะสมกับการใช้งานจริง เทคโนโลยีที่นำมาใช้ในการดำเนินงานประกอบด้วยเทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตทุกสรรพสิ่ง แอปพลิเคชันสำหรับควบคุมระบบ การออกแบบการทำงานของระบบด้วยยูสเคสไดอะแกรม และซอฟต์แวร์สำหรับออกแบบโครงสร้างของเครื่องอบลมร้อนต้นแบบ ดังรายละเอียดต่อไปนี้

1.2.1 เทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตทุกสรรพสิ่ง (Internet of Things: IoT) ถูกนำมาใช้เป็นโครงสร้างหลักในการเชื่อมต่ออุปกรณ์ภายในเครื่องอบลมร้อนต้นแบบเข้ากับเครือข่ายอินเทอร์เน็ต เพื่อให้สามารถรับ-ส่งข้อมูลและควบคุมการทำงานของระบบได้แบบเรียลไทม์ ระบบควบคุมอุณหภูมิอัตโนมัติที่เชื่อมต่อกับ IoT ช่วยให้สามารถตรวจวัดอุณหภูมิภายในตู้อบ ควบคุมการทำงานของฮีตเตอร์ และพัดลม รวมถึงบันทึกข้อมูลการทำงานของระบบได้อย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งช่วยเพิ่มความแม่นยำในการควบคุมและลดความผิดพลาดจากการควบคุมด้วยแรงงานคน (ณรงค์ศักดิ์, 2561; ชัยณรงค์, 2563)

1.2.2 แอปพลิเคชัน Blynk ถูกนำมาใช้เป็นเครื่องมือสำหรับควบคุมและติดตามการทำงานของเครื่องอบลมร้อนต้นแบบผ่านสมาร์ตโฟนหรืออุปกรณ์พกพา ผู้ใช้งานสามารถตั้งค่าอุณหภูมิ กำหนดระยะเวลาในการอบ ตรวจสอบสถานะการทำงานของระบบ และสั่งเปิด-ปิดอุปกรณ์ต่าง ๆ ภายในตู้อบได้จากกระยะไกล การใช้งานแอปพลิเคชันดังกล่าวช่วยเพิ่มความสะดวก ลดข้อจำกัดด้านสถานที่ และสอดคล้องกับแนวคิดของระบบอัจฉริยะในยุคดิจิทัล

1.2.3 ยูสเคสไดอะแกรมของระบบเครื่องอบลมร้อนต้นแบบ ถูกนำมาใช้เพื่ออธิบายภาพรวมการทำงานของระบบเครื่องอบลมร้อนต้นแบบและความสัมพันธ์ระหว่างผู้ใช้งานกับระบบ โดยแสดงบทบาทของผู้ใช้งานในการควบคุม ตรวจสอบ และสั่งงานระบบผ่านเทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตทุกสรรพ

สิ่งและแอปพลิเคชัน Blynk ยูสเคสไดอะแกรมช่วยให้เห็นขอบเขตการทำงานของระบบอย่างชัดเจน และใช้เป็นแนวทางในการออกแบบและพัฒนาระบบให้ตรงตามความต้องการของผู้ใช้งาน



ภาพ 2 แสดงยูสเคสไดอะแกรม

จากยูสเคสไดอะแกรม แสดงให้เห็นว่าผู้ใช้งานสามารถตั้งค่าอุณหภูมิ ตรวจสอบสถานะการทำงาน สั่งเปิด-ปิดอุปกรณ์ภายในระบบ และติดตามข้อมูลการทำงานของเครื่องอบลมร้อนแบบเรียลไทม์ผ่านเครือข่ายอินเทอร์เน็ต ซึ่งช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการควบคุมและใช้งานระบบโดยรวม

1.2.4 โปรแกรม SketchUp 2024 ถูกนำมาใช้เป็นเครื่องมือในการออกแบบและสร้างแบบจำลองสามมิติของโครงสร้างเครื่องอบลมร้อนต้นแบบ เพื่อแสดงรายละเอียดด้านขนาด รูปทรง และตำแหน่งการติดตั้งอุปกรณ์ภายในตู้อบ เช่น พัดลม ฮีตเตอร์ เซ็นเซอร์ และแผงควบคุม การใช้โปรแกรม SketchUp ช่วยให้สามารถมองเห็นภาพรวมของโครงสร้างได้อย่างชัดเจนก่อนการสร้างต้นแบบจริง ลดความผิดพลาดในการออกแบบ และช่วยในการปรับปรุงรูปแบบของเครื่องอบให้เหมาะสมกับการใช้งานและการติดตั้งอุปกรณ์ต่าง ๆ ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

1.3 เครื่องมือที่ใช้ในการดำเนินงาน

1.3.1 บอร์ดควบคุม ESP32 ทำหน้าที่เป็นหน่วยประมวลผลหลักของระบบ ใช้ควบคุมการทำงานของอุปกรณ์ต่าง ๆ ภายในเครื่องอบลมร้อนต้นแบบ รวมถึงการประมวลผลข้อมูลจากเซ็นเซอร์และการส่งข้อมูลเข้าสู่ระบบเครือข่าย เพื่อรองรับการควบคุมและติดตามการทำงานของระบบผ่านเทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตทุกสรรพสิ่ง

1.3.2 เซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิ MAX6675 ใช้สำหรับตรวจวัดอุณหภูมิภายในตู้อบ โดยแปลงสัญญาณเทอร์โมคัปเปิลประเภท K เป็นสัญญาณดิจิทัลผ่าน SPI มีความแม่นยำ $\pm 1.5^{\circ}\text{C}$ รองรับช่วงอุณหภูมิ 0°C ถึง $+1024^{\circ}\text{C}$ และมีวงจรชดเชยจุดเชื่อมต่อยึดในตัว ทำให้ระบบสามารถปรับการทำงานของตัวทำความร้อนให้สอดคล้องกับอุณหภูมิที่กำหนดได้อย่างแม่นยำ

1.3.3 รีเลย์ 16 แชนแนล ใช้สำหรับควบคุมการเปิด-ปิดอุปกรณ์ไฟฟ้าภายในระบบ เช่น ฮีตเตอร์และพัดลม โดยทำหน้าที่เป็นตัวกลางระหว่างบอร์ดควบคุมและอุปกรณ์กำลังไฟฟ้า เพื่อเพิ่มความปลอดภัยในการทำงานของระบบ

1.3.4 พัดลมขนาด 12 โวลต์ กำลังไฟ 5 วัตต์ ความเร็วรอบ 1,500 RPM จำนวน 4 ชุด ใช้สำหรับควบคุมการไหลเวียนของอากาศร้อนภายในตู้อบ ช่วยให้ความร้อนกระจายอย่างสม่ำเสมอ และเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการอบแห้ง

1.3.5 ตัวทำความร้อนขนาด 12 โวลต์ กำลังไฟ 50 วัตต์/ชุด จำนวน 4 ชุด (รวม 200 วัตต์) ทำหน้าที่เป็นแหล่งกำเนิดความร้อนภายในตู้อบ โดยสามารถสร้างอุณหภูมิสูงสุดประมาณ 110°C องศาเซลเซียส เพื่อให้เหมาะสมกับกระบวนการอบแห้งผลไม้และผลิตภัณฑ์ทางการเกษตร

1.3.6 จอแสดงผลแบบ TFT (Thin-Film Transistor) เชื่อมต่อผ่านระบบสื่อสารแบบ SPI ใช้สำหรับแสดงผลข้อมูลการทำงานของระบบ เช่น ค่าอุณหภูมิและสถานะการทำงานของอุปกรณ์ เพื่อให้สามารถตรวจสอบการทำงานได้อย่างสะดวก

1.3.7 แหล่งจ่ายไฟ (Power Supply) ขนาด 12V/20A (240W) ใช้สำหรับแปลงแรงดันไฟฟ้าจาก 220 โวลต์ AC เป็น 12 โวลต์ DC เพื่อจ่ายพลังงานให้กับอุปกรณ์ต่าง ๆ ภายในระบบอย่างเหมาะสมและปลอดภัย

1.3.8 หลอดไฟขนาด 12 โวลต์ กำลังไฟ 3 วัตต์ จำนวน 3 ดวง ใช้เพื่อให้แสงสว่างภายในตู้อบ ช่วยให้สามารถมองเห็นสภาพของวัตถุดิบระหว่างการอบได้โดยไม่ต้องเปิดฝาดู (กิตติชัย, 2562; วรชัย, 2562)

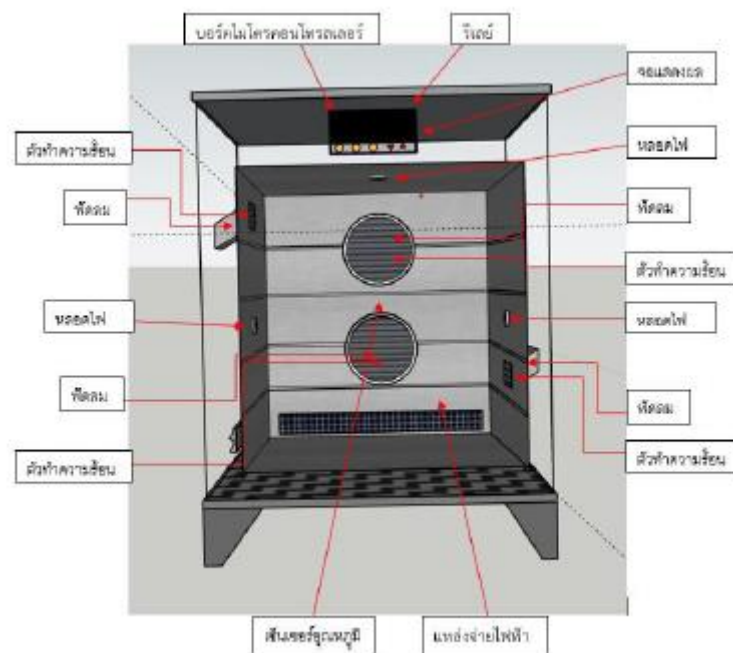
ข้อมูลจำเพาะด้านไฟฟ้าของอุปกรณ์ทั้งหมดในระบบสรุปไว้ในตารางที่ 2 โดยระบบใช้กำลังไฟรวมประมาณ 232 วัตต์ Power Supply ขนาด 12V/20A (240W) ที่เลือกใช้จึงมีความเพียงพอ และมีกั้นชนความปลอดภัยร้อยละ 3.3

ตาราง 2 ข้อมูลจำเพาะด้านไฟฟ้าของอุปกรณ์ในระบบเครื่องอบลมร้อนต้นแบบ

อุปกรณ์	แรงดัน (V)	กระแส (A)	กำลังไฟ (W)	หมายเหตุ
Heater 12V (x4)	12	4.17	50/ชุด = 200	อุณหภูมิสูงสุด ~110°C
พัดลม 12V (x4)	12	0.42	5/ชุด = 20	1,500 RPM
หลอดไฟ LED 12V (x3)	12	0.25	3/ชุด = 9	แสงสว่างภายในตู้
ESP32	5	0.24	1.2	จ่ายผ่าน 5V regulator
รีเลย์ 16 แชนแนล	5	0.36	1.8	
จอแสดงผล TFT SPI	3.3	0.12	0.4	
รวมกำลังไฟทั้งหมด			232.4 W	Power Supply 12V/20A (240W) เพียงพอ

2. การออกแบบโครงสร้างเครื่องอบและระบบควบคุม

ดำเนินการออกแบบโครงสร้างของเครื่องอบลมร้อนแบบหมุนเวียนภายใน โดยคำนึงถึงการกระจายลมร้อนและความปลอดภัยในการใช้งาน พร้อมทั้งออกแบบระบบควบคุมอุณหภูมิและระบบหมุนเวียนลมร้อน โดยเลือกใช้อุปกรณ์ที่เหมาะสม เช่น ตัวทำความร้อน พัดลม เซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิ และไมโครคอนโทรลเลอร์ เพื่อให้ระบบสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ (จิรศักดิ์, 2563)



ภาพ 3 ตำแหน่งการติดตั้งอุปกรณ์หลัก

3. การพัฒนาและติดตั้งระบบควบคุมด้วยเทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตทุกสรรพสิ่ง

การพัฒนาและติดตั้งระบบควบคุมการทำงานของเครื่องอบลมร้อนต้นแบบดำเนินการโดยประยุกต์ใช้เทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตทุกสรรพสิ่ง (Internet of Things: IoT) เพื่อให้ระบบสามารถตรวจวัด แสดงผล และควบคุมอุณหภูมิ รวมถึงการทำงานของพัดลมได้แบบเรียลไทม์ผ่านแอปพลิเคชันบนสมาร์ทโฟน ระบบใช้บอร์ดควบคุม ESP32 เป็นหน่วยประมวลผลหลัก ทำหน้าที่รับค่าข้อมูลอุณหภูมิจากเซ็นเซอร์และสั่งการอุปกรณ์ต่าง ๆ ผ่านรีเลย์ โดยประกอบด้วยชุดตัวทำความร้อนและพัดลมจำนวน 4 ชุด แบ่งเป็น 2 ชุดที่ติดตั้งด้านหลังของตู้อบเพื่อเพิ่มอุณหภูมิภายใน และอีก 2 ชุดที่ติดตั้งด้านซ้ายและด้านขวา ซึ่งสามารถทำงานร่วมกันหรือแยกการทำงานได้ เพื่อให้เกิดการหมุนเวียนของลมร้อนอย่างทั่วถึงภายในตู้อบ ส่งผลให้การกระจายความร้อนมีความสม่ำเสมอและมีประสิทธิภาพ (ณรงค์ศักดิ์, 2561)

ในระหว่างการทำงาน เซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิจะตรวจวัดอุณหภูมิภายในตู้อบอย่างต่อเนื่องและส่งข้อมูลไปยังระบบควบคุมเพื่อรักษาอุณหภูมิให้อยู่ในช่วงที่กำหนดไว้ประมาณ 90-95 องศาเซลเซียส ภายในตู้อบติดตั้งหลอดไฟจำนวน 3 จุดเพื่อให้แสงสว่างตลอดเวลาการทำงาน ระบบทั้งหมดใช้แหล่งจ่ายไฟจาก Power Supply เพื่อแปลงแรงดันไฟฟ้าจาก 220 โวลต์เป็น 12 โวลต์สำหรับจ่ายพลังงานให้กับอุปกรณ์ต่าง ๆ อย่างปลอดภัย ข้อมูลการทำงานของระบบจะแสดงผลผ่านจอแสดงผลแบบ TFT และสามารถตรวจสอบรวมถึงควบคุมการทำงานผ่านแอปพลิเคชัน Blynk แบบเรียลไทม์ ช่วยเพิ่มความสะดวก ความยืดหยุ่น และประสิทธิภาพในการควบคุมเครื่องอบลมร้อนต้นแบบให้เหมาะสมต่อการใช้งานจริง

4. การทดสอบและปรับปรุงการทำงานของระบบ

หลังจากพัฒนาและติดตั้งระบบควบคุมเครื่องอบลมร้อนต้นแบบเรียบร้อยแล้ว ได้ดำเนินการทดสอบการทำงานของระบบในสภาพการใช้งานจริง เพื่อประเมินความถูกต้องและประสิทธิภาพของระบบควบคุมอุณหภูมิ ระบบหมุนเวียนลมร้อน และระบบควบคุมผ่านเทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตทุกสรรพสิ่ง โดยกำหนดขอบเขตการทดสอบดังนี้: ทดสอบควบคุมอุณหภูมิที่ 90-95°C ต่อเนื่อง 120 นาที บันทึกค่าทุก 5 นาที จาก 5 ตำแหน่งภายในตู้อบ (ด้านหน้า ด้านหลัง ด้านซ้าย ด้านขวา และกลางตู้) และทดสอบอบผลไม้ 4 ชนิด (กล้วย มะม่วง สับปะรด มะละกอ) น้ำหนักชนิดละ 500 กรัม โดยทำการทดลองซ้ำ 3 รอบต่อชนิดเพื่อหาค่าเฉลี่ย จากนั้นนำผลการทดสอบที่ได้มาวิเคราะห์เพื่อปรับปรุงการทำงานของระบบ เช่น การปรับตำแหน่งการทำงานของพัดลม การตั้งค่าการทำงานของตัวทำความร้อน และการปรับค่าการตอบสนองของระบบควบคุมอุณหภูมิ เพื่อให้เครื่องอบลมร้อนต้นแบบมีความเสถียร มีประสิทธิภาพในการทำงาน และเหมาะสมต่อการนำไปใช้งานจริง (กิตติชัย, 2562; จิรศักดิ์, 2563)

5. สถิติที่ใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูล

งานวิจัยนี้ใช้สถิติพื้นฐานในการวิเคราะห์ข้อมูล ได้แก่ ค่าเฉลี่ย (Mean) และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation: S.D.) ในการประเมินความเสถียรของอุณหภูมิและความสม่ำเสมอของ

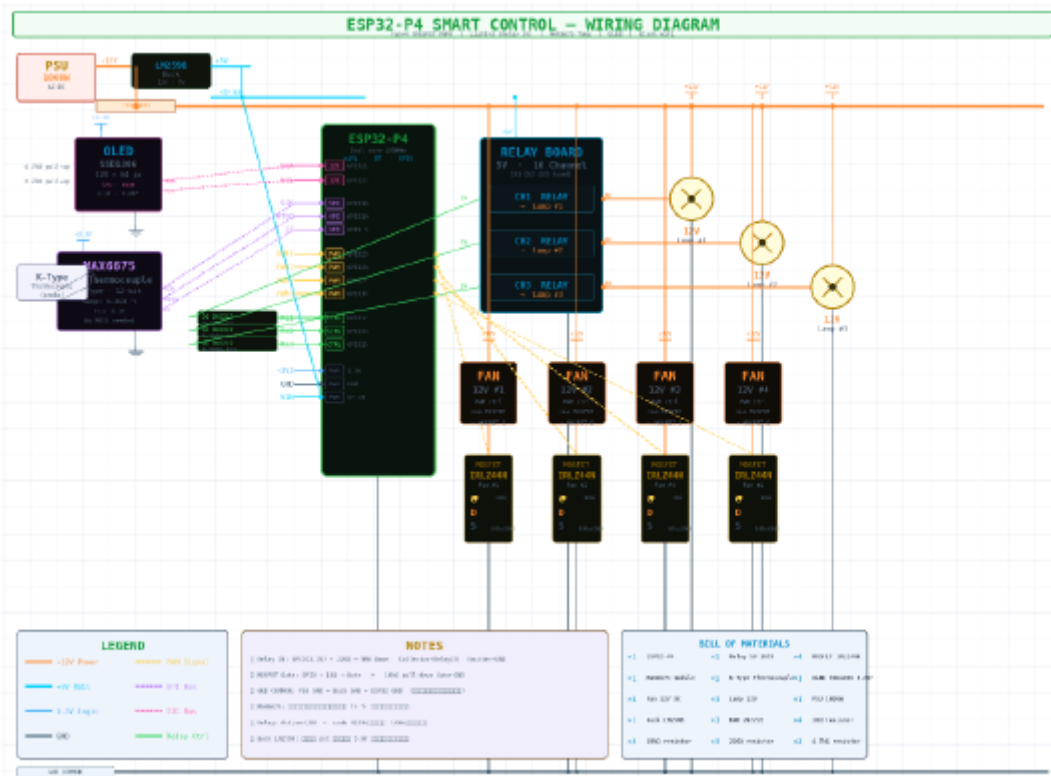
การกระจายลมร้อน รวมถึงค่าสูงสุดและต่ำสุดของอุณหภูมิในแต่ละตำแหน่ง เพื่อใช้เป็นเกณฑ์ในการประเมินประสิทธิภาพของระบบ

ผลการวิจัย

ผลการวิจัยเรื่องการออกแบบและพัฒนาเครื่องอบลมร้อนแบบหมุนเวียนภายในโดยใช้เทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตทุกสรรพสิ่ง สามารถสรุปผลการวิจัยตามวัตถุประสงค์ที่กำหนดไว้ได้ดังนี้

1. ผลการพัฒนาเครื่องอบลมร้อนต้นแบบ

จากการออกแบบและพัฒนาเครื่องอบลมร้อนแบบหมุนเวียนภายใน พบว่าสามารถพัฒนาเครื่องอบลมร้อนต้นแบบให้ทำงานได้ครบถ้วนตามระบบที่ออกแบบไว้ โดยประกอบด้วยระบบควบคุมอุณหภูมิ ระบบหมุนเวียนลมร้อนภายในตู้อบ และระบบควบคุมผ่านเทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตทุกสรรพสิ่ง อุปกรณ์ต่าง ๆ ภายในระบบสามารถทำงานร่วมกันได้อย่างเป็นระบบ ส่งผลให้การควบคุมการทำงานของเครื่องอบมีความสะดวกและมีประสิทธิภาพ สอดคล้องกับแนวคิดการพัฒนาเครื่องอบลมร้อนด้วยระบบควบคุมอัตโนมัติ (กิตติชัย, 2562)



ภาพ 4 แบบจำลองการต่อวงจร

2. ผลการควบคุมอุณหภูมิและการหมุนเวียนลมร้อน

ผลการทดสอบการทำงานของระบบควบคุมอุณหภูมิพบว่า เครื่องอบลมร้อนต้นแบบสามารถควบคุมอุณหภูมิภายในตู้อบให้อยู่ในช่วงที่กำหนดประมาณ 90-95 องศาเซลเซียสได้อย่างต่อเนื่องและมีความเสถียร ระบบหมุนเวียนลมร้อนภายในตู้อบช่วยให้การกระจายความร้อนเป็นไปอย่างทั่วถึง ลดความแตกต่างของอุณหภูมิในแต่ละตำแหน่งภายในตู้อบ ส่งผลให้กระบวนการอบมีความสม่ำเสมอ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยที่ระบุว่า การหมุนเวียนลมร้อนมีผลโดยตรงต่อประสิทธิภาพการอบแห้ง (จิรศักดิ์, 2563)

ผลการวัดอุณหภูมิจาก 5 ตำแหน่งภายในตู้อบตลอดระยะเวลา 2 ชั่วโมง (บันทึกทุก 5 นาที) แสดงไว้ในตาราง 3 และผลการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิตามเวลาตั้งแต่เริ่มเปิดเครื่องจนถึงเสถียรภาพแสดงในตาราง 4

ตาราง 3 ค่าอุณหภูมิจาก 5 ตำแหน่งภายในตู้อบ (เป้าหมาย 90-95°C ทดสอบ 2 ชั่วโมง)

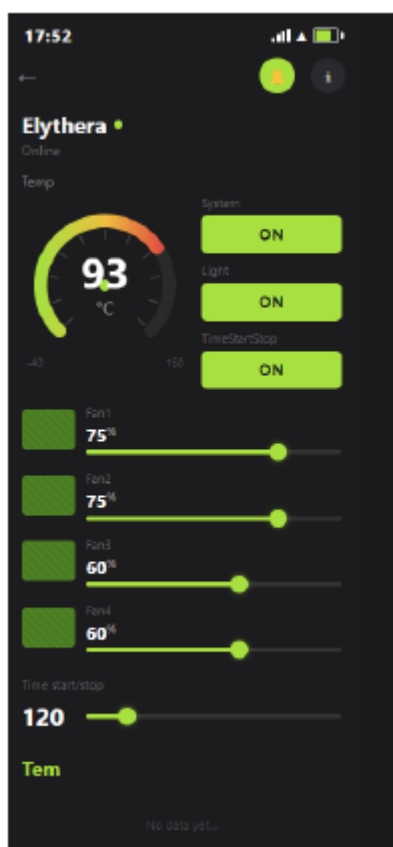
พารามิเตอร์	ด้านหน้า	ด้านหลัง	ด้านซ้าย	ด้านขวา	กลางตู้
อุณหภูมิเฉลี่ย (°C)	91.2	93.5	92.1	92.8	92.4
อุณหภูมิสูงสุด (°C)	93.8	95.0	94.2	94.5	94.0
อุณหภูมิต่ำสุด (°C)	89.5	91.8	90.3	91.0	90.8
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (°C)	±1.1	±0.8	±0.9	±0.9	±0.8
ความแตกต่างสูงสุด (°C)	2.3°C (ด้านหน้า vs ด้านหลัง) — อยู่ในเกณฑ์ยอมรับได้				

ตาราง 4 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในตู้อบตามเวลาตั้งแต่เริ่มเปิดเครื่อง

เวลา (นาที)	0	5	10	20	30	40	60
อุณหภูมิ (°C)	28.5	48.2	67.3	88.4	92.1	93.5	93.2
เวลา (นาที)	80	100	120	เฉลี่ย	สูงสุด	ต่ำสุด	SD (°C)
อุณหภูมิ (°C)	92.8	93.1	92.9	92.7	93.5	91.8	±0.5

3. ผลการใช้งานระบบควบคุมผ่านเทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตทุกสรรพสิ่ง

ผลการใช้งานระบบควบคุมผ่านเทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตทุกสรรพสิ่งพบว่า ระบบสามารถแสดงผลข้อมูลอุณหภูมิแบบเรียลไทม์ และสามารถสั่งงานเปิด-ปิด รวมถึงปรับค่าการทำงานของเครื่องอบลมร้อนผ่านแอปพลิเคชันบนสมาร์ตโฟนได้อย่างสะดวก ช่วยเพิ่มความคล่องตัวในการใช้งาน ลดข้อจำกัดของการควบคุมระบบแบบเดิม และเพิ่มความยืดหยุ่นในการบริหารจัดการระบบ ซึ่งสอดคล้องกับแนวคิดการประยุกต์ใช้เทคโนโลยี IoT ในระบบควบคุมอัตโนมัติ (ณรงค์ศักดิ์, 2561)



ภาพ 5 หน้าจอแอปพลิเคชันควบคุมเครื่องอบลมร้อนผ่านระบบ IoT

4. ผลการประเมินประสิทธิภาพของเครื่องอบลมร้อนต้นแบบ

การประเมินผลการทำงานของเครื่องอบลมร้อนต้นแบบดำเนินการครอบคลุม 4 ด้านหลัก ได้แก่ ความเสถียรของการควบคุมอุณหภูมิ ความสม่ำเสมอของการกระจายลมร้อน ประสิทธิภาพการอบแห้งผลไม้ และความสามารถของระบบควบคุมผ่านเทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตทุกสรรพสิ่ง ผลการทดสอบในแต่ละด้านมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

4.1 ระบบควบคุมอุณหภูมิที่พัฒนาขึ้นโดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP32 ร่วมกับเซ็นเซอร์ MAX6675 (K-Type Thermocouple) แสดงสมรรถนะที่ดีในการรักษาอุณหภูมิภายในตู้อบให้อยู่ในช่วงเป้าหมาย 90-95°C อย่างต่อเนื่อง การวัดค่าอุณหภูมิตลอดระยะเวลา 120 นาทีพบว่า อุณหภูมิเฉลี่ยอยู่ที่ 92.7°C มีส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ และระบบสามารถเข้าสู่ช่วงอุณหภูมิเป้าหมายได้ภายใน 35 นาทีนับจากเริ่มเปิดเครื่อง ความแม่นยำดังกล่าวเป็นผลจากการประมวลผลแบบวนซ้ำของ ESP32 ที่ตรวจวัดและปรับการทำงานของฮีตเตอร์ผ่านรีเลย์ได้อย่างรวดเร็ว ซึ่งสอดคล้องกับเกณฑ์คุณภาพการอบแห้งผลไม้ที่ต้องการความคงที่ของอุณหภูมิสูง ก่อนการทดสอบจริง เซ็นเซอร์ MAX6675 ได้รับการสอบเทียบ (Calibration) โดยเปรียบเทียบค่าที่อ่านได้กับเทอร์โมมิเตอร์มาตรฐานในช่วงอุณหภูมิ 80-100°C พบว่าค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยอยู่ภายใน $\pm 1.5^{\circ}\text{C}$ ซึ่งอยู่ในเกณฑ์ความแม่นยำที่ระบุไว้ในข้อมูล

จำเพาะของผู้ผลิต สอดคล้องกับงานวิจัยที่รายงานว่า การสอบเทียบเซ็นเซอร์ก่อนใช้งานช่วยเพิ่มความน่าเชื่อถือของข้อมูลการวัด (Mishra et al., 2023)

4.2 ความสม่ำเสมอของการกระจายลมร้อน การวัดอุณหภูมิจาก 5 ตำแหน่งภายในตู้อบ ได้แก่ ด้านหน้า ด้านหลัง ด้านซ้าย ด้านขวา และบริเวณกลางตู้ ตลอดระยะเวลาทดสอบ 2 ชั่วโมง บันทึกค่าทุก 5 นาที พบว่า อุณหภูมิเฉลี่ยจากทุกตำแหน่งอยู่ในช่วง 91.2-93.5°C ซึ่งอยู่ภายในเกณฑ์เป้าหมาย ความแตกต่างสูงสุดระหว่างตำแหน่งเท่ากับ 2.3°C (ระหว่างด้านหน้าและด้านหลัง) ซึ่งอยู่ในระดับที่ยอมรับได้สำหรับการอบแห้งผลไม้ โดยส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานในแต่ละตำแหน่งอยู่ระหว่าง ± 0.8 - ± 1.1 °C

การกระจายความร้อนที่สม่ำเสมอนี้เป็นผลจากการจัดวางชุดพัดลม 4 ชุดในตำแหน่งที่เหมาะสม (ด้านหลัง 2 ชุด ด้านซ้าย-ขวาอย่างละ 1 ชุด) ทำให้เกิดการไหลเวียนของลมร้อนรอบผลิตภัณฑ์อย่างทั่วถึง ส่งผลให้ผลไม้ที่ผ่านการอบมีคุณภาพสม่ำเสมอทั้งด้านสี เนื้อสัมผัส และปริมาณความชื้น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยที่ระบุว่า การหมุนเวียนลมร้อนมีผลโดยตรงต่อประสิทธิภาพการอบแห้ง (จิรศักดิ์, 2563)

4.3 ประสิทธิภาพการอบแห้งผลไม้ การทดสอบอบผลไม้ 4 ชนิด น้ำหนักเริ่มต้นชนิดละ 500 กรัม ที่อุณหภูมิ 90-95°C พบว่า เครื่องอบลมร้อนต้นแบบสามารถลดความชื้นได้อย่างมีประสิทธิภาพในทุกชนิด ดังสรุปในตารางที่ 5 โดยกล้วยใช้เวลาน้อยที่สุดเพียง 6 ชั่วโมง สามารถลดความชื้นจาก 72.5% เหลือ 18.2% และมีอัตราการลดน้ำหนัก 71.6% ส่วนมะละกอซึ่งมีความชื้นเริ่มต้นสูงที่สุด (88.6%) ต้องใช้เวลา 9 ชั่วโมง ลดความชื้นเหลือ 22.3% น้ำหนักลดลง 74.8%

เมื่อเทียบกับการอบแดดแบบดั้งเดิมที่ต้องใช้เวลา 2-3 วัน เครื่องอบลมร้อนต้นแบบสามารถลดระยะเวลาลงได้ 5-10 เท่า ในขณะที่ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพสม่ำเสมอกว่า ไม่ขึ้นอยู่กับสภาพอากาศ และสามารถควบคุมกระบวนการได้อย่างแม่นยำ ดังแสดงในตาราง 6

ตาราง 5 ผลการทดสอบอบผลไม้ 4 ชนิดที่อุณหภูมิ 90-95°C (ค่าเฉลี่ยจาก 3 รอบการทดลอง)

พารามิเตอร์	กล้วย	มะม่วง	สับปะรด	มะละกอ
ความชื้นก่อนอบ (%)	72.5	83.1	87.3	88.6
ความชื้นหลังอบ (%)	18.2	21.4	19.8	22.3
ระยะเวลาอบ (ชั่วโมง)	6	8	7	9
น้ำหนักก่อนอบ (กรัม)	500	500	500	500
น้ำหนักหลังอบ (กรัม)	142	133	128	126
% การลดน้ำหนัก	71.6%	73.4%	74.4%	74.8%

ตาราง 6 การเปรียบเทียบเครื่องอบลมร้อน IoT กับการอบแดดแบบดั้งเดิม

หัวข้อเปรียบเทียบ	เครื่องอบลมร้อน IoT (งานวิจัยนี้)	เครื่องอบลมร้อนไฟฟ้าทั่วไป
ระยะเวลาอบกล้วย	6 ชั่วโมง	6-8 ชั่วโมง
ความสม่ำเสมออุณหภูมิ	$\pm 1.1^{\circ}\text{C}$	$\pm 3-5^{\circ}\text{C}$
ควบคุมจากระยะไกล	ผ่าน Blynk IoT	ไม่ได้
ติดตามข้อมูลแบบ Real-time	มี	ไม่มี
แสดงอุณหภูมิขณะใช้งาน	TFT + แอปพลิเคชัน	หน้าจอตัวเครื่อง
การใช้พลังงาน	$\sim 232\text{ W}$	800-2000 W
คุณภาพผลิตภัณฑ์	สม่ำเสมอ สูง	สม่ำเสมอ ปานกลาง
ต้นทุนเบื้องต้น	ปานกลาง (DIY)	สูง (ซื้อสำเร็จรูป)
การปรับแต่งระบบ	ปรับได้ตามต้องการ	ปรับได้จำกัด

ข้อมูลเปรียบเทียบอ้างอิงจากข้อมูลจำเพาะของเครื่องอบลมร้อนไฟฟ้าทั่วไปในท้องตลาด (ศิริชัย, 2561; สมชาย, 2560)

4.4 ประสิทธิภาพของระบบควบคุมผ่านเทคโนโลยี IoT ระบบควบคุมผ่านเทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตทุกสรรพสิ่งโดยใช้แอปพลิเคชัน Blynk แสดงสมรรถนะที่ดีในทุกฟังก์ชันที่ทดสอบ ระบบสามารถแสดงค่าอุณหภูมิแบบเรียลไทม์ผ่านจอแสดงผล TFT และแอปพลิเคชันพร้อมกัน การสั่งเปิด-ปิด อุปกรณ์และการปรับค่าพารามิเตอร์จากระยะไกลทำงานได้อย่างถูกต้องและต่อเนื่องตลอดการทดสอบ ซึ่งสอดคล้องกับแนวคิดการประยุกต์ใช้ IoT ในระบบควบคุมอัตโนมัติ (ณรงค์ศักดิ์, 2561)

การใช้งานระบบ IoT ช่วยลดข้อจำกัดด้านสถานที่ในการดูแลกระบวนการอบ ลดความเสี่ยงจากความผิดพลาดในการควบคุมด้วยตนเอง และเพิ่มความยืดหยุ่นในการบริหารจัดการเวลา ผลการทดสอบยังพบว่าระบบมีความเสถียรในการเชื่อมต่อและตอบสนองต่อคำสั่งจากระยะไกลได้อย่างแม่นยำตลอดระยะเวลาการทดสอบ

สรุปผลการวิจัย

การวิจัยเรื่องการออกแบบและพัฒนาเครื่องอบลมร้อนแบบหมุนเวียนภายในโดยใช้เทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตทุกสรรพสิ่ง มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาเครื่องอบลมร้อนต้นแบบที่สามารถควบคุมอุณหภูมิและการหมุนเวียนลมร้อนได้อย่างมีประสิทธิภาพ พร้อมทั้งสามารถควบคุมและติดตามการทำงานของระบบผ่านอุปกรณ์พกพา ผลการวิจัยพบว่าสามารถพัฒนาเครื่องอบลมร้อนต้นแบบให้ทำงานได้ครบถ้วนตามที่ออกแบบไว้ ระบบควบคุมอุณหภูมิสามารถรักษาอุณหภูมิภายในตู้อบให้อยู่ในช่วงที่กำหนดได้อย่างต่อเนื่องและมีความเสถียร ขณะที่ระบบหมุนเวียนลมร้อนช่วยให้การกระจายความร้อนภายในตู้อบเป็นไปอย่างสม่ำเสมอ

นอกจากนี้ ระบบควบคุมด้วยเทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตทุกสรรพสิ่งสามารถแสดงผลข้อมูลและควบคุมการทำงานของเครื่องอบลมร้อนแบบเรียลไทม์ผ่านแอปพลิเคชันบนสมาร์ตโฟน ช่วยเพิ่มความสะดวกและความยืดหยุ่นในการใช้งาน จากการประเมินประสิทธิภาพโดยรวมพบว่าเครื่องอบลมร้อนต้นแบบที่พัฒนาขึ้นมีประสิทธิภาพเหมาะสมต่อการนำไปใช้งานจริง และสามารถนำไปประยุกต์ใช้หรือพัฒนาต่อยอดในงานด้านการอบแห้งวัสดุประเภทต่าง ๆ ได้ในอนาคต

อย่างไรก็ตาม งานวิจัยนี้มีข้อจำกัดที่ควรพิจารณา ได้แก่ การทดสอบดำเนินการในสภาพแวดล้อมควบคุม ซึ่งอาจแตกต่างจากสภาพการใช้งานจริงในภาคสนาม และการใช้งานแอปพลิเคชัน Blynk แบบ Free tier มีข้อจำกัดด้านจำนวนข้อมูลที่สามารถส่งได้ต่อวัน ซึ่งอาจส่งผลต่อการใช้งานในระยะยาว

อภิปรายผล

จากผลการวิจัยพบว่าเครื่องอบลมร้อนแบบหมุนเวียนภายในที่พัฒนาขึ้นสามารถทำงานได้ตามวัตถุประสงค์ที่กำหนด ระบบควบคุมอุณหภูมิสามารถรักษาอุณหภูมิภายในตู้อบให้อยู่ในช่วงที่เหมาะสมได้อย่างต่อเนื่องและมีความเสถียร โดยมีส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานไม่เกิน $\pm 1.1^{\circ}\text{C}$ โดยมีส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานไม่เกิน $\pm 1.1^{\circ}\text{C}$ ซึ่งดีกว่าค่ามาตรฐานทั่วไปของเครื่องอบลมร้อนในท้องตลาดที่มักมีค่า S.D. $\pm 3-5^{\circ}\text{C}$ (ศิริชัย, 2561) แสดงให้เห็นถึงความเหมาะสม แสดงให้เห็นถึงความเหมาะสมของการประยุกต์ใช้ระบบควบคุมอัตโนมัติร่วมกับเซ็นเซอร์อุณหภูมิในกระบวนการอบลมร้อน ซึ่งสอดคล้องกับแนวคิดด้านการควบคุมอุณหภูมิที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการอบแห้ง (กิตติชัย, 2562)

นอกจากนี้ ระบบหมุนเวียนลมร้อนภายในตู้อบที่มีการจัดวางพัดลมในหลายตำแหน่งช่วยให้การกระจายความร้อนเป็นไปอย่างทั่วถึง ลดความแตกต่างของอุณหภูมิภายในตู้อบให้ไม่เกิน 2.3°C ส่งผลให้กระบวนการอบมีความสม่ำเสมอมากขึ้น สอดคล้องกับงานวิจัยที่ชี้ให้เห็นถึงบทบาทของการไหลเวียนลมร้อนต่อคุณภาพการอบแห้ง (จิรศักดิ์, 2563)

ในด้านการควบคุมและติดตามระบบผ่านเทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตทุกสรรพสิ่ง การใช้งานแอปพลิเคชันบนสมาร์ตโฟนช่วยเพิ่มความสะดวกในการตรวจสอบและสั่งงานระบบแบบเรียลไทม์ ลดข้อจำกัดด้านสถานที่และเวลา สอดคล้องกับแนวคิดการประยุกต์ใช้ IoT ในระบบควบคุมอัตโนมัติ (ณรงค์ศักดิ์, 2561) โดยภาพรวมเครื่องอบลมร้อนต้นแบบมีความเหมาะสมต่อการนำไปใช้งานจริง และสามารถพัฒนาต่อยอดเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพและขยายการใช้งานในอนาคตได้ งานวิจัยที่เกี่ยวข้องในระดับนานาชาติ เช่น Mishra et al. (2023) และ Viviane et al. (2023) ยืนยันว่าการใช้ระบบ IoT ร่วมกับไมโครคอนโทรลเลอร์ และเซ็นเซอร์อุณหภูมิในระบบอบแห้งสามารถเพิ่มประสิทธิภาพและความแม่นยำในการควบคุมกระบวนการได้อย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิจัยนี้

ข้อเสนอแนะ

1. ควรพัฒนาระบบให้สามารถบันทึกข้อมูลอุณหภูมิ ระยะเวลาในการอบ และสถานะการทำงานของอุปกรณ์ในระยะยาว เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ประสิทธิภาพของระบบและปรับปรุงกระบวนการอบลมร้อนให้มีความเหมาะสมมากยิ่งขึ้น
2. ควรเพิ่มเติมเซ็นเซอร์ชนิดอื่น ๆ เช่น เซ็นเซอร์วัดความชื้น เพื่อเพิ่มความแม่นยำในการควบคุมกระบวนการอบแห้ง และช่วยให้สามารถประเมินคุณภาพของผลิตภัณฑ์ที่ผ่านการอบได้ดียิ่งขึ้น
3. ควรปรับปรุงโครงสร้างและวัสดุของเครื่องอบลมร้อนให้มีความแข็งแรงและรองรับการใช้งานต่อเนื่องเป็นเวลานาน เพื่อให้สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานในระดับเชิงพาณิชย์หรือระดับอุตสาหกรรมได้
4. ควรพัฒนาแอปพลิเคชันควบคุมระบบให้มีฟังก์ชันการแจ้งเตือนอัตโนมัติ เช่น การแจ้งเตือนเมื่ออุณหภูมิสูงหรือต่ำกว่าค่าที่กำหนด หรือเมื่อการอบเสร็จสิ้น เพื่อเพิ่มความสะดวกและความปลอดภัยในการใช้งาน
5. ควรมีการทดสอบประสิทธิภาพของเครื่องอบลมร้อนกับวัตถุดิบที่หลากหลายมากขึ้น เช่น ผลไม้หรือผลิตภัณฑ์ทางการเกษตรชนิดอื่น ๆ เพื่อประเมินความเหมาะสมของระบบในสภาพการใช้งานที่แตกต่างกัน

เอกสารอ้างอิง

- กิตติชัย พูลสวัสดิ์. (2562). ระบบควบคุมอุณหภูมิอัจฉริยะสำหรับงานอุตสาหกรรม. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- จิรัชศักดิ์ ศรีสุข. (2563). การพัฒนาระบบอบแห้งด้วยลมร้อนแบบหมุนเวียนเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการถนอมอาหาร. *วารสารวิศวกรรมศาสตร์*, 15(2), 45-54.
- ณรงค์ศักดิ์ วัฒนานุกูล. (2561). การประยุกต์ใช้อินเทอร์เน็ตทุกสรรพสิ่งในระบบควบคุมอัตโนมัติ. *วารสารเทคโนโลยีสารสนเทศ*, 10(1), 1-10.
- ชัยณรงค์ สุขเกษม. (2563). การพัฒนาระบบควบคุมอุณหภูมิผ่านเทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตทุกสรรพสิ่ง. *วารสารวิทยาการคอมพิวเตอร์*, 14(2), 55-64.
- ศิริชัย แสงทอง. (2561). *หลักการและเทคโนโลยีการอบแห้ง*. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- สมชาย สุขสันต์. (2560). *เทคโนโลยีการอบแห้งผลิตภัณฑ์ทางการเกษตร*. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- สุรัชย์ พงษ์พิพัฒน์. (2560). การออกแบบเครื่องอบแห้งด้วยลมร้อนสำหรับผลิตภัณฑ์ทางการเกษตร. *วารสารวิศวกรรมเกษตร*, 12(1), 23-31.
- วรชัย อินทร์ประเสริฐ. (2562). *ระบบควบคุมอัตโนมัติและการประยุกต์ใช้งาน*. กรุงเทพฯ: ซีเอ็ดดูเคชั่น.

- สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ. (2564). อินเทอร์เน็ตทุกสรรพสิ่ง (IoT) กับการพัฒนาระบบอัจฉริยะ. สืบค้นจาก <https://www.nstda.or.th>.
- Blynk Inc. (n.d.). Blynk IoT platform documentation. Retrieved from <https://docs.blynk.io>.
- Hercog, D., Lerher, T., Truntič, M., & Težak, O. (2023). Design and implementation of ESP32-based IoT devices. *Sensors*, 23(15), 6739. <https://doi.org/10.3390/s23156739>.
- Miano, J. I., Nabua, M. A., Gaw, A. R., & Bico, A. R. (2023). Optimizing drying efficiency through an IoT-based direct solar dryer system. *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, 14(7). <https://doi.org/10.14569/IJACSA.2023.0140726>.
- Mishra, N., Jain, S. K., & Agrawal, N. (2023). Development of drying system by using Internet of Things for food quality monitoring and controlling. *Energy Nexus*, 11, 100219. <https://doi.org/10.1016/j.nexus.2023.100219>.
- Trimble Inc. (2024). *SketchUp user guide*. Retrieved from <https://www.sketchup.com>.
- Viviane, I., Habimana, J. D., Nsanzumukiza, V. M., & Niyitegeka, D. (2023). IoT-based real-time crop drying and storage monitoring system. *International Journal of Distributed Sensor Networks*, 2023, 4803000. <https://doi.org/10.1155/2023/4803000>.