การพัฒนาระบบควบคุมสภาพแวดล้อมอัตโนมัติด้วยเทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่งเพื่อเพิ่มผลผลิตเห็ดนางฟ้าในระดับกึ่งพาณิชย์

ณัฐพล ภู่ระหงษ์ [1] ธนภัทร มะณีแสง [2*] สุธิรา เบญจานุกรม [3]
คณะเทคโนโลยีการเกษตรและเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบูรณ์ [1 2* 3]
อีเมล์ : nazzdex.man@pcru.ac.th [2*]

วันที่รับบทความ 23 มีนาคม 2569
วันแก้ไขบทความ 14 พฤษภาคม 2569
วันตอบรับบทความ 25 พฤษภาคม 2569

บทคัดย่อ

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินประสิทธิภาพของระบบควบคุมโรงเรือนอัจฉริยะที่ประยุกต์ใช้เทคโนโลยี IoT ต่อผลผลิตเห็ดนางฟ้าในระดับกึ่งพาณิชย์ โดยดำเนินการทดลองในโรงเรือนขนาด 60 ตารางเมตร รองรับความจุ 2,000 ก้อน เปรียบเทียบระหว่างโรงเรือนแบบควบคุมสภาพแวดล้อมอัตโนมัติ และโรงเรือนสภาวะปกติ ใน 3 ช่วงเวลา การเก็บข้อมูลทำโดยสุ่มตัวอย่างก้อนเห็ดเพื่อนำมาชั่งน้ำหนักผลผลิต และวิเคราะห์ความแตกต่างของค่าเฉลี่ยด้วยสถิติ Independent Samples t-test ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ผลการทดลองพบว่าโรงเรือนแบบควบคุมสภาพแวดล้อมอัตโนมัติ ให้ผลผลิตเฉลี่ยสูงกว่าโรงเรือนสภาวะปกติ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ในทุกช่วงเวลาการทดลอง สะท้อนถึงประสิทธิภาพของระบบควบคุมอัตโนมัติในการเพิ่มผลผลิตและลดความผันผวนของการผลิต อย่างไรก็ตาม การวิเคราะห์ความแตกต่างระหว่างช่วงเวลาด้วย One-way ANOVA พบว่าช่วงเวลาที่แตกต่างกันมีผลต่อปริมาณผลผลิตอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) โดยช่วงฤดูร้อนให้ผลผลิตต่ำกว่าสองช่วงเวลาแรกอย่างชัดเจน แสดงให้เห็นว่าปัจจัยภูมิอากาศภายนอกยังคงมีอิทธิพลต่อระบบ แม้จะมีการควบคุมสภาพแวดล้อมภายในแล้วก็ตาม ผลการศึกษาในครั้งนี้จึงยืนยันเชิงประจักษ์ว่าการประยุกต์ใช้ระบบควบคุมอัตโนมัติในโรงเรือนขนาดกึ่งพาณิชย์สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตเห็ดนางฟ้าได้อย่างมีนัยสำคัญ

คำสำคัญ : โรงเรือนอัจฉริยะ เทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง เห็ดนางฟ้า การควบคุมสภาพแวดล้อม

Development of an Automated Environmental Control System Using Internet of Things Technology to Enhance Semi-Commercial Phoenix Mushroom Productivity

Nuttapon Phurahong [1], Thanapat Maneesaeng [2*], Sutira Benchanukrom[3]
Faculty of Agricultural Technology and Industrial Technology
Phetchabun Rajabhat University [1,2*,3]
E – mail : nazzdex.man@pcru.ac.th [2*]

Received 23 March 2026
Revised 14 May 2026
Accepted 25 May 2026

Abstract

This study aimed to evaluate the effectiveness of a smart greenhouse control system utilizing IoT technology on oyster mushroom yield under semi-commercial production conditions. The experiment was conducted in a 60-square-meter greenhouse with a capacity of 2,000 substrate bags, comparing an automatically controlled environmental system with a conventional (uncontrolled) greenhouse across three production periods. Yield data were collected by randomly sampling substrate bags and measuring fresh weight. Differences in mean yield were analyzed using the Independent Samples t-test at a significance level of 0.05. The results indicated that the automatically controlled greenhouse produced significantly higher mean yields than the conventional greenhouse in all production periods ($p < 0.05$), demonstrating the effectiveness of the automated control system in enhancing productivity and reducing yield variability. However, further analysis using One-way ANOVA revealed that production period had a significant effect on yield ($p < 0.05$). The summer period exhibited noticeably lower yields than the first two periods, indicating that external climatic factors continue to influence production performance despite internal environmental control. These findings provide empirical evidence that implementing an automated control system in a semi-commercial greenhouse significantly improves oyster mushroom production efficiency.

Keywords : Environmental control, IoT technology, Phoenix Mushroom, Smart greenhouse

1. บทนำ

เห็ดนางฟ้าจัดเป็นพืชเศรษฐกิจที่มีความสำคัญต่อระบบเศรษฐกิจฐานรากของประเทศไทย เนื่องจากมีวงจรการผลิตสั้นและสามารถสร้างรายได้หมุนเวียนได้ตลอดปี อย่างไรก็ตามประสิทธิภาพในการผลิตปัจจุบันกำลังเผชิญกับความท้าทายจากสภาวะโลกร้อนและการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศที่ทวีความรุนแรงขึ้น ซึ่งส่งผลกระทบโดยตรงต่อเสถียรภาพของระบบนิเวศภายในโรงเรือน (กรมวิชาการเกษตร, 2564) โดยเฉพาะในช่วงเดือนมกราคมซึ่งเป็นช่วงรอยต่อฤดูกาลที่มีความผันผวนของมวลอากาศเย็นสลับกับอุณหภูมิที่สูงขึ้นในระหว่างวัน กลายเป็นปัจจัยเร่งที่ดึงดูดและเอื้อต่อการแพร่กระจายของศัตรูพืชอย่างรุนแรง (กระทรวงเกษตรและสหกรณ์, 2561) ปัญหาที่วิกฤตที่สุดคือการระบาดของหนอนแมลงวันเชียริด (Sciarid fly) ความชื้นและสภาพแวดล้อมของวัสดุเพาะที่มีการเจริญของเส้นใยสามารถปล่อยสารระเหย (volatile organic compounds) ซึ่งมีบทบาทในการดึงดูดแมลงวันเชียริดให้เข้ามาวางไข่ โดยพบว่าสารระเหยจากเชื้อราและวัสดุเพาะมีผลทั้งต่อการดึงดูดและกระตุ้นพฤติกรรมการวางไข่ของตัวเต็มวัย (Cloonan et al., 2016; Kecskeméti et al., 2020) ขณะเดียวกัน ตัวอ่อนจะเข้าทำลายเส้นใย และตัวเต็มวัยสามารถเป็นพาหะนำเชื้อรา เช่น Trichoderma aggressivum ส่งผลให้เกิดการสูญเสียผลผลิตอย่างมีนัยสำคัญ (Anderson, 2024; Marčić, 2025) ความเสียหายดังกล่าวส่งผลกระทบต่อคุณภาพและปริมาณผลผลิตอย่างมีนัยสำคัญ ดังนั้นการเปลี่ยนมาใช้ระบบโรงเรือนปิดจึงเป็นกลยุทธ์ที่มีประสิทธิภาพสูงสุดในการแก้ปัญหาความแปรปรวนของสภาพภูมิอากาศและการระบาดของหนอนแมลงวันเชียริด โดยพบว่าสามารถลดความเสียหายจากศัตรูพืชได้ถึงร้อยละ 70 หัวใจสำคัญของระบบนี้คือการตัดวงจรการเข้าถึงของแมลงและการรักษาเสถียรภาพของปัจจัยแวดล้อมให้เหมาะสม โดยตัวโรงเรือนจะทำหน้าที่เป็นปราการป้องกันควบคุมทางเข้าและออกช่องระบายอากาศอย่างมิดชิด ป้องกันแมลงวันเข้าวางไข่ในวัสดุเพาะ ส่วนในด้านการจัดการอากาศ ระบบมีการระบายอากาศที่สามารถควบคุมระดับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ไม่ให้สะสมเกินเกณฑ์มาตรฐาน ซึ่งอาจส่งผลให้ดอกเห็ดเกิดการผิดรูปหรือเน่าเสีย (จารีณี จงปลื้มปิติ และคณะ, 2568)

จากแนวโน้มดังกล่าว มีงานวิจัยจำนวนมากในประเทศไทยที่นำเทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง (IoT) มาประยุกต์ใช้ในการควบคุมสภาพแวดล้อมโรงเรือนเพาะเห็ด ลดความเสียหายจากศัตรูพืชได้อย่างมีประสิทธิภาพ ตัวอย่างเช่น วีรศักดิ์ ฟองเงิน และคณะ (2561) ได้ศึกษาการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง (IoT) ในโรงเรือนเห็ดนางฟ้า จำนวน 300 ก้อน และพบว่า การรักษาเสถียรภาพของอุณหภูมิและความชื้นสามารถเพิ่มน้ำหนักเฉลี่ยของดอกเห็ดได้อย่างมีนัยสำคัญเมื่อเปรียบเทียบกับระบบดั้งเดิม (วีรศักดิ์ ฟองเงิน และคณะ ,2564) สอดคล้องกับแนวคิดของ Bunluewong และ Surinta (2021) ที่พัฒนาระบบควบคุมกึ่งอัตโนมัติผ่านแอปพลิเคชันเพื่อลดภาระแรงงานและเพิ่มประสิทธิภาพในการติดตามสภาวะแบบเรียลไทม์ (Bunluewong และ Surinta, 2021) นอกจากด้านซอฟต์แวร์แล้วการพัฒนายังครอบคลุมถึงนวัตกรรมการจัดการอุณหภูมิในโรงเรือนเชิงวิศวกรรม โดยปรีชา ทุมมะ และคณะ (2564) ได้นำเสนอการใช้ระบบทำความเย็นแบบท่อใต้ดินร่วมกับระบบพ่นหมอกอัตโนมัติในโรงเรือนขนาดเล็ก ซึ่งสามารถลดอุณหภูมิภายในโรงเรือนได้ถึง 4–5 °C และรักษาความชื้นสัมพัทธ์ได้สูงกว่าร้อยละ 80 อย่างต่อเนื่อง ส่งผลให้ผลผลิตเพิ่มขึ้นถึงร้อยละ 23 (ปรีชา ทุมมะ และ คณะ ,2564) ปัจจุบันงานวิจัยได้ก้าวเข้าสู่ยุคการควบคุมพารามิเตอร์ที่แม่นยำ ดังจะเห็นได้จากงานของ เอนกวงศ์ ยอดดำเนิน และ สุริยา ต๊ะศรีเรือน (2568) ที่มีการบูรณาการเซนเซอร์วัดค่าความเข้มแสงและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ผ่านโปรโตคอล MQTT ซึ่งให้ความแม่นยำในการสั่งการสูง (เอนกวงศ์ ยอดดำเนิน และ สุริยา ต๊ะศรีเรือน, 2568) ควบคู่ไปกับงานของ

ชัยสิทธิ์ แก้วจรูญ และ อภิสิทธิ์ ชิตวาณิช (2568) ที่เน้นการควบคุมในโรงเรือนขนาดเล็ก กับการผลิตก้อนเชื้อจำนวน 120 ก้อน โดยสามารถบริหารจัดการให้ได้ผลผลิตที่มีคุณภาพและประหยัดพลังงานไปพร้อมกัน (ชัยสิทธิ์ แก้วจรูญ และ อภิสิทธิ์ ชิตวาณิช, 2568) งานวิจัยเหล่านี้ล้วนสะท้อนให้เห็นถึงการเปลี่ยนผ่านสู่การบริหารจัดการเชิงข้อมูล เพื่อสร้างความมั่นใจในคุณภาพและปริมาณผลผลิตท่ามกลางความผันผวนของสภาพอากาศ

แม้การทบทวนวรรณกรรมข้างต้นจะชี้ให้เห็นถึงศักยภาพของเทคโนโลยี IoT ในการยกระดับการผลิตเห็ดนางฟ้า แต่อย่างไรก็ตาม งานวิจัยส่วนใหญ่มักจำกัดอยู่ในโรงเรือนทดลองขนาดเล็ก ซึ่งยังไม่สามารถสะท้อนสภาวะการผลิตจริงในโรงเรือนระดับกึ่งพาณิชย์ที่มีความหนาแน่นสูงได้ นอกจากนี้ ความผันผวนของภูมิอากาศยังเป็นตัวแปรสำคัญที่ท้าทายความเสถียรของระบบควบคุมอัตโนมัติ โดยเฉพาะในด้านการตัดวงจรศัตรูพืชอย่างหนอนแมลงวันเซียริด ซึ่งยังขาดข้อมูลเชิงประจักษ์ที่ยืนยันถึงประสิทธิภาพของระบบ IoT ในโรงเรือนขนาดมาตรฐาน ด้วยเหตุนี้ ผู้วิจัยจึงมุ่งเน้นการศึกษาประสิทธิภาพของระบบควบคุมในโรงเรือนขนาดมาตรฐาน (6 x 10 เมตร) ซึ่งรองรับการผลิตที่ความจุ 2,000 ก้อน เพื่อให้ได้ข้อมูลที่สะท้อนสภาวะการเพาะปลูกระดับกึ่งพาณิชย์อย่างแท้จริง การศึกษานี้ไม่เพียงแต่มุ่งทดสอบความเสถียรของนวัตกรรม IoT ท่ามกลางสภาพอากาศที่แปรปรวน แต่ยังมุ่งเป้าไปที่การสร้างมาตรฐานการบริหารจัดการโรงเรือนที่สามารถควบคุมปัจจัยแวดล้อมและตัดวงจรศัตรูพืชได้อย่างเป็นระบบ ซึ่งผลลัพธ์จากงานวิจัยจะเป็นข้อมูลเชิงประจักษ์ที่สำคัญในการยกระดับขีดความสามารถของเกษตรกรไทย ให้สามารถผลิตเห็ดนางฟ้าที่มีคุณภาพสม่ำเสมอและสร้างความมั่นคงทางรายได้อย่างยั่งยืน

2. วัตถุประสงค์

2.1 เพื่อพัฒนาระบบควบคุมสภาพแวดล้อมอัตโนมัติด้วยเทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง (IoT) สำหรับโรงเรือนเพาะเห็ดนางฟ้าขนาดเชิงพาณิชย์

2.2 เพื่อการเปรียบเทียบผลผลิตระหว่างโรงเรือนแบบเปิดและโรงเรือนควบคุมระบบปิด

3. วิธีการวิจัย

ในการศึกษานี้ ผู้วิจัยได้กำหนดแผนการทดลองเพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพระหว่างโรงเรือนแบบดั้งเดิมและโรงเรือนที่มีระบบควบคุม

3.1 พื้นที่ดำเนินการและกลุ่มตัวอย่าง

3.1.1 สถานที่ทดลอง: ฟาร์มเห็ดนางฟ้าแห่งหนึ่งในจังหวัดเพชรบูรณ์

3.1.2 โรงเรือน:

3.1.2.1 โรงเรือนในสภาวะปกติ โรงเรือนเพาะเห็ดนางฟ้าขนาด 60 ตารางเมตร ถูกออกแบบมาเป็นทรงจั่วซึ่งช่วยให้การระบายความร้อนในพื้นที่เขตร้อนทำได้ดีเนื่องจากอากาศร้อนจะลอยตัวขึ้นสู่ที่สูง โดยภายในมีการบรรจุก้อนเชื้อเห็ดจำนวน 2,000 ก้อน โครงสร้างหลักมุงด้วยหลังคาสังกะสีและใช้สแลนสีดำกรุผนังเพื่อทำหน้าที่พรางแสงและควบคุมการไหลเวียนของอากาศให้เหมาะสมต่อการออกดอกดังรูปที่ 1

3.1.2.2 โรงเรือนในสภาวะที่มีการควบคุม โครงสร้างภายนอกของโรงเรือนเพาะเห็ดนางฟ้าอัจฉริยะถูกออกแบบเป็นอาคารทรงจั่วขนาด พื้นที่รวม 60 ตารางเมตร โดยมีลักษณะเป็นโครงสร้างถาวรที่ฐานรากและผนังส่วนล่างก่อด้วยอิฐบล็อก หลังคามุงด้วยวัสดุแผ่นเมทัลชีทซึ่งมีความคงทนต่อสภาพอากาศและเอื้อต่อการไหลเวียนของมวลอากาศร้อนให้ลอยตัวขึ้นสู่ที่สูงตามสัดส่วนของรูปทรงจั่ว นอกจากนี้ ผนังส่วนบนยังได้รับการปรับปรุงจากโรงเรือนสแลนแบบเดิมให้กลายเป็นระบบปิดที่มิดชิดเพื่อป้องกันการเข้าทำลายของแมลงศัตรูเห็ด ดังรูปที่ 2 ภายในมีชั้นสำหรับวางก้อนเห็ดทั้งหมด 4 แถว โดยสามารถบรรจุเห็ดได้ทั้งหมดประมาณ 2,000 ก้อน

3.1.3 กลุ่มตัวอย่าง: เห็ดนางฟ้าจำนวนรวม 2,000 ก้อนต่อการทดลองเพื่อเปรียบเทียบภายใต้สภาวะควบคุมและสภาวะปกติ



รูปที่ 1 โรงเรือนที่อยู่ในสภาวะปกติที่ไม่มีการควบคุม



รูปที่ 2 โรงเรือนที่อยู่ในสภาวะที่มีการควบคุม

3.2 การพัฒนาระบบควบคุมสภาวะแวดล้อมภายในโรงเรือน

ระบบควบคุมภายในโรงเรือนทำงานโดยมีบอร์ด Arduino NodeMCU ESP32 เป็นหน่วยประมวลผลกลาง ทำหน้าที่รับและส่งข้อมูลร่วมกับเซนเซอร์วัดค่าสภาวะแวดล้อมเพื่อสั่งการอุปกรณ์โดยอัตโนมัติ ดังนี้:

3.2.1 การตรวจวัดและประมวลผล: ระบบใช้เซนเซอร์ SHT20 ในการตรวจวัดอุณหภูมิ (รองรับช่วง -45 ถึง 120 °C) และความชื้นสัมพัทธ์ (0-100% RH) ซึ่งเป็นรุ่นที่สามารถกันน้ำได้ พร้อมทั้งติดตั้งเซนเซอร์ MH-Z14A เพื่อตรวจวัดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ในช่วง 0–5,000 PPM โดยผู้ใช้งานสามารถตรวจสอบสภาพแวดล้อมในโรงเรือนผ่านตู้ควบคุมได้ดังรูปที่ 3





รูปที่ 3 ตู้ควบคุมการทำงาน และหน้าจอแสดงผล

3.2.2 ระบบควบคุมอุณหภูมิและความชื้นในโรงเรือน: เมื่อตรวจพบความชื้นต่ำกว่าเกณฑ์ ระบบจะสั่งการให้ปั๊มแรงดันต่ำขนาด 36 วัตต์ ทำงานผ่านหัวพ่นหมอกขนาด 0.2 มิลลิเมตร จำนวน 60 หัว ซึ่งความพิเศษของระบบนี้คือการใช้น้ำจากบ่อน้ำใต้ดินที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าพื้นดินถึง 7 °C มาช่วยเพิ่มความชื้นและลดอุณหภูมิได้อย่างมีประสิทธิภาพ และจะหยุดทำงานเมื่อความชื้นสูงกว่าค่าที่ตั้งไว้ 5% RH ควบคู่กับระบบลดอุณหภูมิแบบระเหย (Evaporative Cooling System) ที่จะสั่งให้ปั๊มน้ำหอยโข่งขนาด 350 วัตต์ สูบน้ำเย็นเข้าสู่แผงทำความเย็น (Cooling Pad) และหน่วงเวลา 20 วินาทีเพื่อให้แผงชุ่มน้ำ ก่อนที่พัดลมดูดอากาศขนาด 36 นิ้วจะเริ่มทำงานเพื่อกระจายไอเย็นให้ทั่วถึงทุ โดยระบบจะตัดการทำงานเมื่ออุณหภูมิลดลงต่ำกว่าค่าที่ตั้งไว้ 3 °C โดยรูปที่ 4 แสดงการติดตั้งอุปกรณ์ระบบควบคุมอุณหภูมิและความชื้นในโรงเรือน



รูปที่ 4 การติดตั้งอุปกรณ์ระบบควบคุมอุณหภูมิและความชื้นในโรงเรือน

3.2.4 ระบบระบายและรักษาคุณภาพอากาศในโรงเรือน: ในกรณีที่ปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สูงเกินกว่าเกณฑ์ที่กำหนด ระบบจะสั่งให้พัดลมดูดอากาศทำงานทันทีเพื่อระบายก๊าซออกจากโรงเรือน และจะหยุดทำงานเมื่อค่า CO_2 ลดลงต่ำกว่าจุดที่กำหนด 50 PPM ดังรูปที่ 5 เนื่องจากในระบบโรงเรือนแบบปิด เมื่อเห็ดหายใจจะมีการปล่อยก๊าซ CO_2 ออกมาอย่างต่อเนื่อง หากไม่มีการระบายอากาศที่เหมาะสมจะเกิดการสะสมของก๊าซในปริมาณสูง ส่งผลให้ดอกเห็ดเจริญเติบโตผิดปกติ มีลักษณะก้านยาว ดอกเล็กลีบ หรือหยุดการเจริญเติบโตเนื่องจากขาดก๊าซออกซิเจน นอกจากนี้ระบบระบายอากาศอัตโนมัตินี้ยังมีความสำคัญอย่างยิ่งต่อสุขอนามัยของผู้ปฏิบัติงาน โดยจะช่วยเจือจางปริมาณสปอร์เห็ดนางฟ้าที่ลอยอยู่ในอากาศภายในโรงเรือนปิด ซึ่งหากเกษตรกรสูดดมเข้าไปในปริมาณมากอาจส่งผลเสียต่อระบบทางเดินหายใจและก่อให้เกิดอาการแพ้ได้



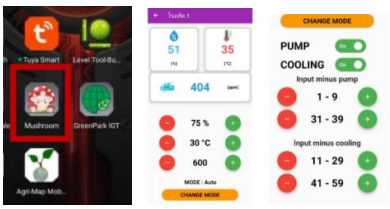
รูปที่ 5 ระบบระบายและรักษาคุณภาพอากาศในโรงเรือน

3.3 ระบบการเก็บและการเข้าถึงเข้าถึงข้อมูลของผู้ใช้งานระบบ

3.3.1 การเก็บข้อมูล ในการดำเนินงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยได้วางระบบการจัดเก็บข้อมูลสภาพแวดล้อมภายในโรงเรือนอย่างเป็นระบบ เพื่อนำข้อมูลมาวิเคราะห์และประเมินประสิทธิภาพการทำงาน โดยมีรายละเอียดดังนี้

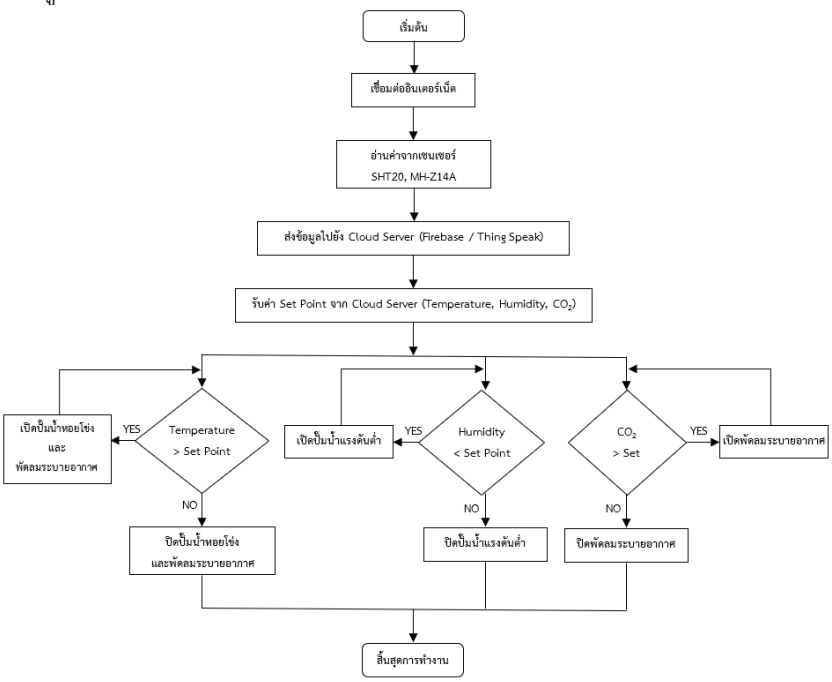
3.3.1.1 กระบวนการส่งข้อมูล (Data Transmission): ข้อมูลสภาวะแวดล้อมที่วัดได้จากเซนเซอร์ ได้แก่ ค่าอุณหภูมิ ความชื้น และปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ รวมถึงสถานะการทำงานของอุปกรณ์ควบคุม (ปั๊มน้ำพ่นหมอก, ปั๊มน้ำหอยโข่ง และพัดลมดูดอากาศ) จะถูกส่งผ่านการเชื่อมต่อระบบเครือข่ายไร้สาย (Wi-Fi) จากบอร์ด ESP32

3.3.1.2 ตัวกลางและการจัดเก็บ (Cloud Storage): ระบบจะส่งข้อมูลไปยัง Firebase ซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวกลาง (Middleware) ในการรับส่งข้อมูลแบบ Real-time จากนั้นข้อมูลจะถูกนำไปจัดเก็บไว้ในระบบ Cloud Server บนแพลตฟอร์ม ThingSpeak ดังรูปที่ 6



รูปที่ 6 ระบบการเก็บและการเข้าถึงเข้าถึงข้อมูลของผู้ใช้งานระบบ

3.3.2 การเข้าถึงข้อมูลของผู้ใช้งานระบบ ผู้ใช้งานระบบทั้งเกษตรกรและผู้วิจัยสามารถเข้าถึงและตรวจสอบค่าสภาวะการเพาะปลูกย้อนหลังรวมถึงสถิติต่างๆ ได้แบบเรียลไทม์ผ่านทางเว็บไซต์หรือแอปพลิเคชันบนสมาร์ทโฟน ซึ่งช่วยในการวิเคราะห์และกำหนดสภาวะการเพาะปลูกที่เหมาะสมที่สุด โดยแอปพลิเคชันดังกล่าวถูกพัฒนาขึ้นด้วยภาษา Python เพื่อให้ผู้ใช้สามารถปรับตั้งค่าควบคุม (Set point) สภาพแวดล้อม ทั้งอุณหภูมิ ความชื้น และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ให้สอดคล้องกับความต้องการของเห็ดในแต่ละช่วงวัย ซึ่งระบบจะมีความถี่ในการอัปเดตข้อมูลสูง โดยเซนเซอร์จะทำการส่งค่าสภาวะแวดล้อมไปยังบอร์ดประมวลผล Arduino NodeMCU ESP32 ทุกๆ 10 วินาที เพื่อการแสดงผลและการตัดสินใจที่แม่นยำ ดังรายละเอียดที่แสดงในรูปที่ 6 และ แผนผังการทำงานของระบบในรูปที่ 7



รูปที่ 7 แผนผังการทำงานของระบบควบคุมสภาวะแวดล้อมในโรงเรือน

3.4 การทดสอบประสิทธิภาพการควบคุมสภาวะแวดล้อมเชิงเปรียบเทียบระหว่างโรงเรือนในสภาวะปกติและโรงเรือนระบบปิดที่มีการควบคุม

3.4.1 การทดสอบการทำงานของระบบ ในขั้นตอนการทดลองจะทำการบันทึกข้อมูลอย่างต่อเนื่องเป็นระยะเวลา 3 วัน เพื่อประเมินเสถียรภาพของระบบ โดยกำหนดช่วงเวลาการทำงานและเก็บข้อมูลหลักตั้งแต่เวลา 06.00 – 18.00 น. ของทุกวัน ข้อมูลที่จัดเก็บประกอบด้วย ค่าอุณหภูมิ (°C) และความชื้นสัมพัทธ์ (%RH) ที่วัดจากเซนเซอร์ SHT20 รวมถึงปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (PPM) ที่วัดจากเซนเซอร์ MH-Z14A การบันทึกข้อมูลด้วยความถี่ระดับนี้จะช่วยให้ผู้วิจัยสามารถติดตามแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของสภาพอากาศในแต่ละช่วงเวลาได้อย่างละเอียด เพื่อนำไปใช้ประเมินประสิทธิภาพการตอบสนองของระบบควบคุมอัตโนมัติ

3.4.2 การเปรียบเทียบผลผลิตระหว่างโรงเรือนแบบเปิดและโรงเรือนควบคุมระบบปิด

3.4.2.1 การสุ่มตัวอย่างการทดลอง ในการศึกษาครั้งนี้ได้กำหนดขนาดตัวอย่างโดยอ้างอิงหลักการวิเคราะห์กำลังการทดสอบทางสถิติ (power analysis) สำหรับการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยสองกลุ่มด้วย Independent t-test โดยกำหนดระดับนัยสำคัญที่ α = 0.05 และกำลังการทดสอบ (Power) เท่ากับ 0.90 เพื่อเพิ่มความเชื่อมั่นในการตรวจพบความแตกต่างของผลผลิตระหว่างโรงเรือนที่มีและไม่มีการควบคุมสภาพแวดล้อม

ทั้งนี้จากการประมาณค่าความแตกต่างของผลผลิตเฉลี่ยที่คาดหวังประมาณ 50 กรัมต่อก้อน และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานประมาณ 80 กรัม คำนวณได้ค่า effect size (Cohen's d) ประมาณ 0.63 ซึ่งอยู่ในระดับปานกลางถึงค่อนข้างสูง ส่งผลให้ต้องใช้ตัวอย่างอย่างน้อยประมาณ 70 ก้อนต่อกลุ่ม เพื่อให้การทดสอบมีความน่าเชื่อถือ ดังนั้นในการทดลอง 3 รอบ จึงกำหนดสุ่มเก็บข้อมูลรอบละ 25 ก้อนต่อโรงเรือน รวมทั้งสิ้น 75 ก้อนต่อโรงเรือน หรือ 150 ตัวอย่างตลอดการศึกษา เพื่อให้เพียงพอต่อการวิเคราะห์ทางสถิติและลดความคลาดเคลื่อนของผลการทดลอง

ตารางที่ 1 รอบการทดลองเพาะเห็ดนางฟ้า

รอบการเพาะเลี้ยง	ช่วงเดือนโดยประมาณ
รอบที่ 1	กันยายน – พฤศจิกายน
รอบที่ 2	ธันวาคม - กุมภาพันธ์
รอบที่ 3	มีนาคม - พฤภาคม

3.4.2.2 การวิเคราะห์ข้อมูล

1) การเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยผลผลิตระหว่างโรงเรือนควบคุมและโรงเรือนสภาวะปกติในการศึกษาครั้งนี้ ผู้วิจัยได้วิเคราะห์เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยผลผลิตเห็ดนางฟ้าต่อก้อน (กรัม) ระหว่างโรงเรือนที่มีการควบคุมสภาพแวดล้อมกับโรงเรือนสภาวะปกติ โดยใช้สถิติ Independent Samples t-test ผ่านโปรแกรม Minitab เนื่องจากกลุ่มตัวอย่างเป็นอิสระต่อกัน (เป็นโรงเรือนคนละแห่ง) การวิเคราะห์ทั้งหมดกำหนดระดับนัยสำคัญทางสถิติไว้ที่ 0.05 ก่อนดำเนินการทดสอบความแตกต่างของค่าเฉลี่ย ได้ตรวจสอบข้อตกลงเบื้องต้นของข้อมูล (assumptions) โดยทดสอบการแจกแจงแบบปกติด้วยสถิติ Shapiro–Wilk test เพื่อยืนยันว่าข้อมูลมีการกระจายตัวใกล้เคียงปกติ

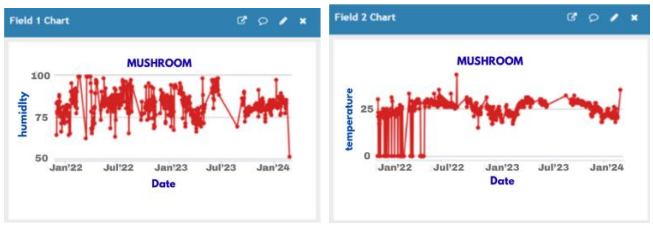
2) การวิเคราะห์ความแตกต่างของผลผลิตตามช่วงเวลาในการศึกษาครั้งนี้ ผู้วิจัยได้วิเคราะห์ความแตกต่างของค่าเฉลี่ยผลผลิตระหว่าง 3 ช่วงเวลา โดยใช้สถิติ One-way ANOVA เพื่อทดสอบว่าฤดูกาลหรือช่วงเวลาการผลิตส่งผลต่อปริมาณผลผลิตหรือไม่ ภายใต้ระดับนัยสำคัญทางสถิติที่ 0.05 โดยกำหนดให้ช่วงเวลาเป็นตัวแปรอิสระ และผลผลิต (กรัมต่อก้อน) เป็นตัวแปรตาม หากผลการทดสอบพบค่า p-value น้อยกว่า 0.05 จะสรุปได้ว่ามีอย่างน้อยหนึ่งช่วงเวลาที่ให้ค่าเฉลี่ยผลผลิตแตกต่างจากช่วงอื่นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

4. ผลการวิจัย

4.1 ผลการทดสอบการทำงานของระบบควบคุมสภาพแวดล้อมอัตโนมัติ เพื่อให้การวิเคราะห์ประสิทธิภาพสมรรถนะของระบบเป็นไปอย่างครบถ้วน การแสดงผลลัพธ์ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงกลไกการบริหารจัดการข้อมูลสภาวะแวดล้อมภายในโรงเรือน ซึ่งประกอบด้วยค่าอุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ และปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ รวมถึงสถานะการทำงานของอุปกรณ์ควบคุมในระบบพ่นหมอกและระบบลดอุณหภูมิ โดยข้อมูลทั้งหมดจะถูกส่งผ่านเครือข่ายไร้สาย (Wi-Fi) ไปยังฐานข้อมูล Firebase เพื่อทำหน้าที่เป็นตัวกลางในการประสานข้อมูลแบบเรียลไทม์ก่อนจะนำไปบันทึกไว้อย่างเป็นระบบบน Cloud Server

4.1.1 การควบคุมความชื้น ในช่วงการทดลองวันที่ 22–24 การรักษาเสถียรภาพของความชื้น ข้อมูลส่วนใหญ่ในแผนภูมิแสดงให้เห็นว่าระบบสามารถควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ให้คงอยู่ในช่วง 70% ถึง 95% RH อย่างต่อเนื่องตลอดระยะเวลาการทดลอง ซึ่งเป็นช่วงความชื้นที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการเจริญเติบโตของเห็ดนางฟ้า การที่กราฟมีการแกว่งตัวในลักษณะฟันปลา (Oscillation) สะท้อนถึงการทำงานของระบบควบคุมอัตโนมัติที่สั่งการให้ชุดพ่นหมอกทำงานทันทีเมื่อความชื้นต่ำกว่าเกณฑ์ และตัดการทำงานเมื่อความชื้นสูงกว่าค่าที่ตั้งไว้ 5% RH เพื่อรักษาความสมดุล และแม้สภาวะอากาศภายนอกจะมีการเปลี่ยนแปลง แต่ระบบยังคงสามารถดึงค่าความชื้นกลับเข้าสู่เกณฑ์มาตรฐานได้เสมอ

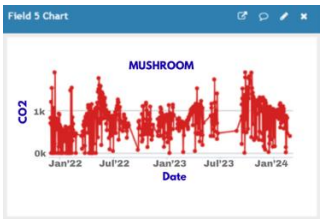
4.1.2 การควบคุมอุณหภูมิ ในช่วงการทดลองวันที่ 22–24 ระบบสามารถรักษาเสถียรภาพอุณหภูมิให้อยู่ในช่วง 18°C ถึง 28°C โดยมีค่าเฉลี่ยคงที่ประมาณ 25°C ซึ่งเป็นสภาวะที่เหมาะสมที่สุดต่อการพัฒนาของดอกเห็ด ความสำเร็จนี้เกิดจากประสิทธิภาพของบอร์ด NodeMCU ESP32 ที่รับข้อมูลจากเซนเซอร์ SHT20 ทุก 10 วินาที เพื่อสั่งการระบบ Evaporative Cooling ที่ใช้ปั๊มน้ำหอยโข่งร่วมกับพัดลมดูดอากาศขนาด 36 นิ้ว โดยมีระบบหน่วงเวลาพัดลม 20 วินาทีเพื่อให้แผงความเย็นชุ่มน้ำก่อน ทำให้การลดอุณหภูมิเป็นไปอย่างแม่นยำและรวดเร็ว



รูปที่ 7 ตัวอย่างผลลัพธ์การควบคุมความชื้นและอุณหภูมิในโรงเรือน

4.1.3 การควบคุมและรักษาคุณภาพอากาศในโรงเรือน

ระบบบริหารจัดการคุณภาพอากาศถูกออกแบบมาเพื่อป้องกันการสะสมของก๊าซเสียจากการหายใจของก้อนเห็ดในเกณฑ์มาตรฐาน จากแผนภูมิในรูปที่ 8 พบว่าระบบสามารถควบคุมปริมาณ CO_2 ส่วนใหญ่ให้คงอยู่ในช่วง 400 ถึง 1,000 PPM อย่างต่อเนื่อง ซึ่งเป็นระดับที่ไม่ส่งผลกระทบต่อสรีรวิทยาของเห็ดนางฟ้า การที่กราฟมีการแกว่งตัวขึ้นลงอย่างรวดเร็วแสดงถึงการทำงานของเซนเซอร์ MH-Z14A ที่ส่งค่าไปยังบอร์ด NodeMCU ESP32 ทุก 10 วินาที เพื่อประมวลผลและตัดสินใจระบายอากาศแบบเรียลไทม์ เมื่อปริมาณก๊าซ CO_2 พุ่งสูงขึ้นเกินเกณฑ์ที่กำหนด (Set point) ระบบจะสั่งการให้พัดลมดูดอากาศขนาด 36 นิ้วทำงานทันที จากกราฟจะเห็นว่าเมื่อค่า CO_2แตะระดับประมาณ 1,000 PPM จะมีการดึงค่ากลับลงมาสู่ระดับปกติอย่างรวดเร็ว และระบบจะหยุดทำงานเมื่อค่าลดลงต่ำกว่าจุดที่กำหนด 50 PPM เพื่อประหยัดพลังงานและรักษาความชื้นภายในโรงเรือนไปพร้อมกัน



รูปที่ 8 ตัวอย่างผลลัพธ์การควบคุมปริมาณ CO_2 ในโรงเรือน

4.2 ผลลัพธ์การเปรียบเทียบผลผลิตระหว่างโรงเรือนแบบเปิดและโรงเรือนควบคุมระบบปิด

จากตารางผลผลิตเห็ดนางฟ้าต่อก้อนในแต่ละช่วงเวลา โดยผลลัพธ์ทั้งหมดแสดงในตารางที่ 2 และ สามารถอธิบายภาพรวมได้ดังนี้

4.2.1 ผลลัพธ์โดยภาพรวม

4.2.1.1 ช่วงกันยายน–พฤศจิกายน โรงเรือนควบคุมให้ผลผลิตสูงกว่าสภาวะปกติค่อนข้างชัดเจนเกือบทุกก้อน โดยกลุ่มควบคุมส่วนใหญ่อยู่ราว 340–440 กรัม ขณะที่สภาวะปกติอยู่ประมาณ 200–280 กรัม แสดงให้เห็นแนวโน้มว่าการควบคุมสภาพแวดล้อมช่วยเพิ่มผลผลิตได้

4.2.1.2 ช่วงธันวาคม–กุมภาพันธ์ เป็นช่วงที่ผลผลิตโดยรวมค่อนข้างสูงทั้งสองแบบ แต่โรงเรือนควบคุมยังให้ค่ามากกว่าอย่างสม่ำเสมอ หลายก้อนอยู่ในช่วงประมาณ 380–420 กรัม ขณะที่สภาวะปกติส่วนใหญ่อยู่ราว 220–310 กรัม แนวโน้มความแตกต่างยังเห็นได้ชัด

4.2.1.3 ช่วงมีนาคม–พฤษภาคม เป็นช่วงหน้าร้อนที่เกษตรกรมักหลีกเลี่ยงเนื่องจากสภาวะแวดล้อมที่ไม่เอื้ออำนวยส่งผลให้ผลผลิตของโรงเรือนสภาวะปกติลดลงชัดเจน หลายก้อนต่ำกว่า 200 กรัม ในขณะที่โรงเรือนทั้ง 3 ช่วงเวลา โรงเรือนควบคุมให้ผลผลิตเฉลี่ยสูงกว่าสภาวะปกติอย่างต่อเนื่อง และช่วงมีนาคม–พฤษภาคมดูเหมือนจะมีความแตกต่างชัดที่สุด อย่างไรก็ตาม สิ่งที่กล่าวมานี้เป็นเพียงการดูแนวโน้มจากตัวเลขเท่านั้น จึงจำเป็นต้องทดสอบทางสถิติ เช่น Independent Samples t-test ในแต่ละช่วงเวลา และใช้ One-way ANOVA เพื่อวิเคราะห์ผลผลิตระหว่างช่วงเวลาเพื่อยืนยันว่าความแตกต่างที่เห็นนั้นมีนัยสำคัญทางสถิติ



รูปที่ 9 การเพาะเห็ดในโรงเรือนควบคุม

ตารางที่ 2 ผลลัพธ์การสุ่มก้อนเห็ดเพื่อเปรียบเทียบผลผลิตระหว่างโรงเรือนแบบเปิดและโรงเรือนควบคุมระบบปิด

ก้อนที่	เดือน กันยายน. – พฤศจิกายน		ธันวาคม - กุมภาพันธ์		มีนาคม – พฤษภาคม	
	ปกติ (กรัม)	ควบคุม (กรัม)	ปกติ (กรัม)	ควบคุม (กรัม)	ปกติ (กรัม)	ควบคุม (กรัม)
1	224.7	376.53	246.92	377.21	206.77	296.8
2	246.84	344.04	275.14	411.18	235.7	338.1
3	235.96	364.74	259.91	408.0	159.64	298.2
4	225.23	360.48	247.62	375.77	186.78	312.13
5	227.9	363.22	249.17	413.22	206.47	311.65
6	227.16	368.54	250.63	409.66	280.00	260.00
7	272.29	352.88	301.47	404.38	258.78	320.45
8	207.57	348.83	228.70	412.8	149.09	320.11
9	279.53	380.69	310.00	391.53	236.73	313.92
10	232.64	387.36	258.53	399.97	130.63	308.64
11	237.4	373.95	263.14	363.36	173.55	339.16
12	238.65	381.67	258.62	409.29	181.02	270.90
13	221.85	375.67	248.04	410.83	173.12	340.27
14	202.08	362.56	220.05	391.37	206.89	309.53
15	212.17	347.31	229.70	419.38	130.46	294.81
16	206.22	372.06	223.25	375.14	147.37	340.23
17	249.9	345.12	274.74	373.83	247.22	332.57
18	200.22	358.08	216.35	393.93	211.3	325.78
19	228.36	395.0	252.43	380.08	204.27	286.72
20	220.23	446.48	243.61	412.4	198.51	315.52
21	230.32	428.06	255.82	425.56	125.71	335.84
22	239.94	439.44	261.53	404.34	203.39	323.15
23	280.0	430.07	304.13	401.66	203.64	281.61

ตารางที่ 2 (ต่อ)

ก้อนที่	เดือน กันยายน. – พฤศจิกายน		ธันวาคม - กุมภาพันธ์		มีนาคม – พฤษภาคม	
	ปกติ (กรัม)	ควบคุม (กรัม)	ปกติ (กรัม)	ควบคุม (กรัม)	ปกติ (กรัม)	ควบคุม (กรัม)
24	215.62	442.72	240.67	382.62	235.13	309.52
25	209.68	441.34	229.52	395.09	209.98	305.64

จากตารางที่ 2 พบว่า การใช้ระบบควบคุมโรงเรือนอัจฉริยะสามารถเพิ่มผลผลิตเห็ดได้อย่างชัดเจนในทุกช่วงฤดูกาล เมื่อพิจารณาค่าเฉลี่ย พบว่าใน ช่วงเดือนกันยายน–พฤศจิกายน ค่าเฉลี่ยผลผลิตเพิ่มขึ้นจาก 230.90 เป็น 383.47 กรัม หรือเพิ่มขึ้นเฉลี่ย 152.58 กรัม (ร้อยละ 66.10) ช่วงเดือนธันวาคม–กุมภาพันธ์ ค่าเฉลี่ยผลผลิตเพิ่มขึ้นจาก 253.99 เป็น 397.70 กรัม หรือเพิ่มขึ้นเฉลี่ย 143.72 กรัม (ร้อยละ 56.59)

ช่วงเดือนมีนาคม–พฤษภาคม ค่าเฉลี่ยผลผลิตเพิ่มขึ้นจาก 196.09 เป็น 311.65 กรัม หรือเพิ่มขึ้นเฉลี่ย 115.56 กรัม (ร้อยละ 58.93) โดยภาพรวม ระบบควบคุมสามารถเพิ่มผลผลิตเฉลี่ยได้ประมาณ 137.28 กรัม หรือคิดเป็นร้อยละ 60.54 เมื่อเทียบกับการเพาะแบบปกติ

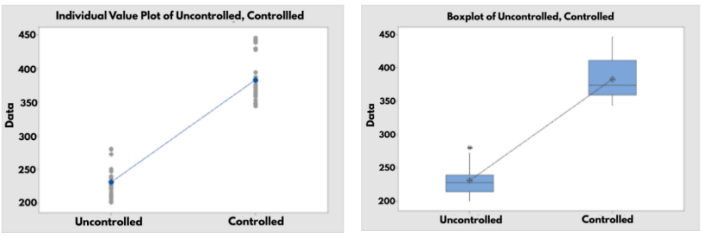
4.2.2 การเปรียบเทียบผลผลิตระหว่างโรงเรือนแบบเปิดและโรงเรือนควบคุมระบบปิดในการศึกษาเพื่อยืนยันประสิทธิภาพของโรงเรือนที่ปรับปรุงใหม่ ผู้วิจัยได้ทำการวิเคราะห์เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยผลผลิตเห็ดนางฟ้าต่อก้อนระหว่างโรงเรือนที่มีการควบคุมสภาพแวดล้อมอัตโนมัติและโรงเรือนสภาวะปกติ (ไม่มีการควบคุม) โดยใช้สถิติ Independent Samples t-test (Welch's t-test) ผ่านโปรแกรม Minitab ซึ่งผลการวิเคราะห์แสดงในตารางที่ 3 ซึ่งสามารถอธิบายผลลัพธ์โดยดังเสปดังต่อไปนี้

ตารางที่ 3 ผลการวิเคราะห์เปรียบเทียบประสิทธิภาพการผลิตระหว่างการจัดการแบบปกติและการจัดการแบบควบคุมในแต่ละช่วงเดือนด้วยการทดสอบค่าที (t-test)

ช่วงเดือน	กลุ่ม	n	$\overline{X}$	$S.D.$	Δ (ปกติ - ควบคุม)	t	df	$p-value$
ก.ย. – พ.ย.	ปกติ	25	230.90	21.53	152.57	-18.87*	41	< .001
	ควบคุม	25	383.47	33.27				
ธ.ค. - ก.พ.	ปกติ	25	253.99	24.33	143.71	-24.08*	41	< .001
	ควบคุม	25	397.70	16.22				
มี.ค. - พ.ค.	ปกติ	25	196.09	40.04	115.56	-12.50*	36	< .001
	ควบคุม	25	311.65	21.17				

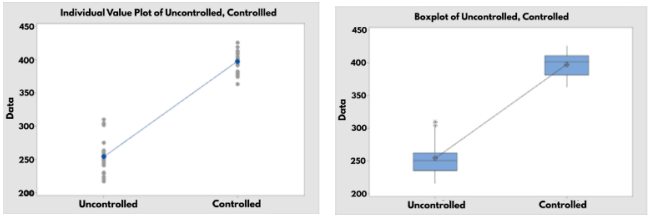
* มีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ .05

4.2.2.1 ช่วงระยะเวลาแรก (กันยายน. – พฤศจิกายน) ผลการทดสอบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยผลผลิตระหว่างโรงเรือน Uncontrolled และ Controlled พบว่าโรงเรือน Uncontrolled มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 230.9 หน่วย ขณะที่โรงเรือน Controlled มีค่าเฉลี่ย 383.5 หน่วย โดยค่าความแตกต่างของค่าเฉลี่ย (Uncontrolled – Controlled) เท่ากับ –152.58 หน่วย มีค่าสถิติ t = –18.87 และค่า p-value < 0.001 ซึ่งต่ำกว่า 0.05 อย่างชัดเจน จึงปฏิเสธสมมติฐานศูนย์ และสรุปได้ว่าโรงเรือน Controlled ให้ผลผลิตสูงกว่าโรงเรือน Uncontrolled อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ และ เมื่อพิจารณาจากกราฟ Individual Value Plot และ Boxplot ในรูปที่ 10 พบว่า กลุ่ม Controlled มีค่าผลผลิตสูงกว่ากลุ่ม Uncontrolled อย่างเห็นได้ชัด ค่าเฉลี่ยและค่ามัธยฐานของกลุ่ม Controlled อยู่สูงกว่า โดยข้อมูลส่วนใหญ่กระจุกตัวในช่วงประมาณ 350–420 หน่วย ขณะที่กลุ่ม Uncontrolled อยู่ราว 200–250 หน่วย แม้ว่าการกระจายตัวของกลุ่ม Control จะกว้างกว่าเล็กน้อย แต่ช่วงข้อมูลของทั้งสองกลุ่มแทบไม่ทับซ้อนกัน



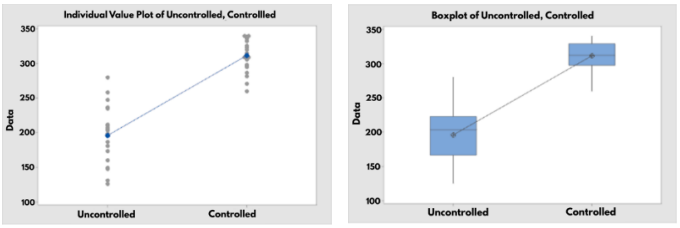
รูปที่ 10 ความแตกต่างค่าเฉลี่ยผลผลิตระหว่างโรงเรือน Uncontrolled และ Controlled ในช่วงระยะเวลาแรก

4.2.2.2 ช่วงระยะเวลาที่สอง (ธันวาคม - กุมภาพันธ์) ผลการทดสอบความแตกต่างพบว่า Uncontrolled และ มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 254.0 หน่วย ขณะที่โรงเรือน Controlled มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 397.7 หน่วย และค่า p-value < 0.001 ซึ่งน้อยกว่า 0.05 อย่างมีนัยสำคัญ จึงปฏิเสธสมมติฐานศูนย์ และสรุปได้ว่าโรงเรือน Controlled ให้ผลผลิตสูงกว่าโรงเรือน Uncontrolled อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ เช่นเดียวกับในช่วงระยะเวลาแรก และหากพิจารณาจากกราฟ Individual Value Plot ในรูปที่ 11 พบว่าค่าผลผลิตของโรงเรือน Controlled สูงกว่า Uncontrolled อย่างชัดเจน โดยค่าเฉลี่ยของ Controlled อยู่ประมาณ 400 หน่วย ขณะที่ Uncontrolled อยู่ประมาณ 250 หน่วย และกลุ่มข้อมูลแทบไม่ทับซ้อนกัน ส่วน Boxplot แสดงให้เห็นว่าค่ามัธยฐานของ Controlled สูงกว่าอย่างเด่นชัด



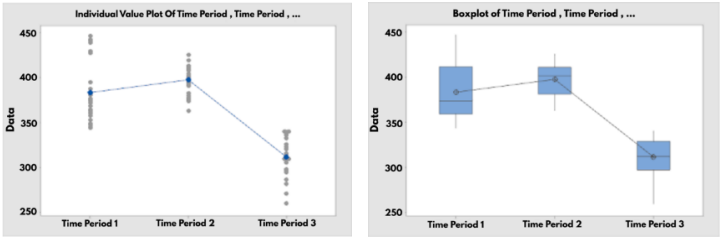
รูปที่ 11 ความแตกต่างค่าเฉลี่ยผลผลิตระหว่างโรงเรือน Uncontrolled และ Controlled ในช่วงระยะเวลาที่สอง

4.2.2.3 ช่วงระยะเวลาที่สาม (ธันวาคม - กุมภาพันธ์) ผลการทดสอบความแตกต่าง พบว่าโรงเรือน Uncontrolled มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 196.1 หน่วย ขณะที่โรงเรือน Controlled มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 311.6 หน่วย และค่า p-value < 0.001 ซึ่งน้อยกว่า 0.05 อย่างมีนัยสำคัญ จึงปฏิเสธสมมติฐานศูนย์ และสรุปได้ว่าโรงเรือน Controlled ให้ผลผลิตสูงกว่าโรงเรือน Uncontrolled อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ เช่นเดียวกับทั้ง 2 ช่วงเวลา และกราฟ Individual Value Plot ในรูปที่ 12 แสดงให้เห็นว่าค่าเฉลี่ยผลผลิตของโรงเรือน Controlled สูงกว่าโรงเรือน Uncontrolled และจุดข้อมูลของทั้งสองกลุ่มแยกออกจากกันค่อนข้างชัดเจน ส่วน Boxplot แสดงให้เห็นว่าค่ามัธยฐานของ Controlled สูงกว่าอย่างเด่นชัด เช่นเดียวกัน แต่เป็นที่น่าสังเกตว่า กลุ่ม Uncontrolled มีความแปรปรวนของผลผลิตสูงกว่ากลุ่ม Controlled อย่างชัดเจน โดยช่วงการกระจายของข้อมูลกว้างและมีค่าผลผลิตกระจายตั้งแต่ระดับต่ำถึงค่อนข้างสูง สะท้อนถึงความไม่สม่ำเสมอของผลผลิตภายใต้สภาวะที่ไม่มีการควบคุมสิ่งแวดล้อม ในขณะที่กลุ่ม Controlled มีการกระจายตัวของข้อมูลแคบกว่าและมีแนวโน้มสม่ำเสมอมากกว่า แสดงให้เห็นว่าการควบคุมสภาพแวดล้อมอาจช่วยลดความผันผวนของผลผลิตและเพิ่มเสถียรภาพในการผลิตได้



รูปที่ 12 ความแตกต่างค่าเฉลี่ยผลผลิตระหว่างโรงเรือน Uncontrolled และ Controlled ในช่วงระยะเวลาที่สาม

4.2.3 การวิเคราะห์ความแตกต่างของผลผลิตในโรงเรือนที่มีการควบคุมตามช่วงเวลา จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียว (One-way ANOVA) เพื่อทดสอบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยผลผลิตเห็ดนางฟ้าระหว่าง 3 ช่วงเวลา พบว่าช่วงเวลามีผลต่อปริมาณผลผลิตอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 ($F = 84.35$, $p < 0.001$) โดยผลผลิตเฉลี่ยในแต่ละช่วงเวลามีความแตกต่างกันอย่างชัดเจน กล่าวคือ ช่วงเวลาที่ 2 ให้ผลผลิตเฉลี่ยสูงสุดที่ 397.70 กรัม รองลงมาคือช่วงเวลาที่ 1 (383.47 กรัม) และช่วงเวลาที่ 3 (311.62 กรัม) ตามลำดับ นอกจากนี้ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) ที่เท่ากับ 70.09% ยังชี้ให้เห็นว่าปัจจัยด้านช่วงเวลาสามารถอธิบายความแปรปรวนหรือความผันแปรของปริมาณผลผลิตที่เกิดขึ้นได้ถึงร้อยละ 70 จึงสรุปได้ว่าสภาพแวดล้อมที่เปลี่ยนไปในแต่ละช่วงเวลามีอิทธิพลสำคัญต่อประสิทธิภาพการผลิตเห็ดนางฟ้าอย่างมีนัยสำคัญ



รูปที่ 13 การกระจายของข้อมูลดิบและเส้นเชื่อมค่าเฉลี่ยของแต่ละช่วงเวลา

5. อภิปรายผลและสรุปผล

5.1 สรุปผล จากการทดสอบสมมติฐานเพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพระหว่างโรงเรือนทั้งสองระบบ พบว่าผลผลิตจากการสุ่มตัวอย่างในแต่ละช่วงเวลา เมื่อนำมาวิเคราะห์ด้วยสถิติ Independent Samples t-test ให้ผลลัพธ์ที่สอดคล้องไปในทิศทางเดียวกันทั้งหมด โดยโรงเรือนที่มีการควบคุมสภาพแวดล้อมอัตโนมัติ (Controlled) สามารถทำผลผลิตเฉลี่ยได้สูงกว่าโรงเรือนสภาวะปกติ (Uncontrolled) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ในทุกช่วงเวลาการทดลอง ผลลัพธ์นี้จึงเป็นการยืนยันอย่างชัดเจนว่าระบบควบคุมอัตโนมัติสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตได้จริงตามสมมติฐานที่ตั้งไว้ อย่างไรก็ตาม เมื่อวิเคราะห์ความแตกต่างระหว่างช่วงเวลาการผลิต พบประเด็นสำคัญว่าปัจจัยภายนอกตามฤดูกาลยังคงมีอิทธิพลต่อปริมาณผลผลิตอย่างมีนัยสำคัญ โดยเฉพาะในช่วงฤดูร้อนที่พบว่าปริมาณผลผลิตลดต่ำกว่าสองช่วงเวลาแรกอย่างเห็นได้ชัด

5.2 อภิปรายผล จากการวิเคราะห์ข้อมูลเชิงประจักษ์พบว่า โรงเรือนระบบปิดที่มีการควบคุมสภาวะแวดล้อม (Controlled System) มีสมรรถนะในการผลิตเห็ดนางฟ้าสูงกว่าโรงเรือนสภาวะปกติ (Uncontrolled) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 ($p < 0.001$) ซึ่งสอดคล้องกับภาพแสดงการกระจายตัวของข้อมูลในกลุ่ม Controlled ที่มีความสม่ำเสมอมากกว่าอย่างชัดเจน ประสิทธิภาพที่เพิ่มขึ้นนี้เป็นผลโดยตรงจากการที่ระบบสามารถรักษาเสถียรภาพของปัจจัยจำกัด (Limiting factors) โดยเฉพาะอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ให้อยู่ใน

สภาวะที่เหมาะสมต่อสรีรวิทยาของเห็ดนางฟ้าได้อย่างต่อเนื่อง การควบคุมผ่านระบบ Evaporative Cooling และการพ่นหมอกอัตโนมัติช่วยลดความเครียดทางความร้อน ของก้อนเห็ด ส่งผลให้กระบวนการเมแทบอลิซึมและการเจริญเติบโตของดอกเห็ดเป็นไปอย่างเต็มประสิทธิภาพ อย่างไรก็ตาม แม้ระบบควบคุมอัตโนมัติจะสามารถยกระดับผลผลิตได้ แต่ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียว (One-way ANOVA) ชี้ให้เห็นว่าปัจจัยด้านช่วงเวลายังคงมีอิทธิพลต่อความผันแปรของผลผลิตอย่างมีนัยสำคัญ ($F = 84.35$, $p < 0.001$) โดยมีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) สูงถึง 70.09% ซึ่งสะท้อนว่าปริมาณผลผลิตยังคงแปรผันตามอิทธิพลแฝงจากสภาวะภูมิอากาศภายนอกตามฤดูกาล โดยเฉพาะในช่วงที่มีความเข้มแสงหรืออุณหภูมิภายนอกพุ่งสูงเกินขีดความสามารถของระบบระบายอากาศ

แนวทางการเปลี่ยนจากการเพาะปลูกแบบดั้งเดิมมาสู่ระบบเกษตรอัจฉริยะในงานวิจัยนี้ แสดงให้เห็นถึงทิศทางการพัฒนาที่สอดคล้องกับงานวิจัยหลายฉบับในประเทศไทย โดยเฉพาะประเด็นการควบคุมสภาพแวดล้อมเพื่อเพิ่มศักยภาพของผลผลิต ซึ่งเป็นไปในทิศทางเดียวกับข้อค้นพบของ วีรศักดิ์ ฟองเงิน และคณะ (2561) และ ปรีชา ทุมมะ และคณะ (2564) ที่เน้นย้ำว่าการจัดการความร้อนและอุณหภูมิด้วยระบบวิศวกรรม คือปัจจัยหลักที่ช่วยให้เห็ดเจริญเติบโตได้ดีและให้ผลผลิตที่เพิ่มขึ้น ขณะเดียวกัน การนำเซนเซอร์ตรวจวัดก๊าซ CO_2 และระบบคลาวด์มาใช้บริหารจัดการโรงเรือนขนาด 2,000 ก้อนในการศึกษานี้ ถือเป็นการต่อยอดแนวคิดเรื่องความแม่นยำและการลดภาระแรงงานที่ เอนกวงศ์ ยอดดำเนิน และสุริยา ต๊ะศรีเรือน (2568) รวมถึง Bunluewong และ Surinta (2021) ได้เคยนำเสนอไว้ แม้ในความเป็นจริงเราจะพบว่าระบบควบคุมยังไม่สามารถตัดขาดอิทธิพลของฤดูกาลภายนอกได้ทั้งหมด แต่การเลือกใช้โซลูชันที่ช่วยกระจายความชื้นได้อย่างทั่วถึงและประหยัดพลังงานตามแนวทางของ ชัยสิทธิ์ แก้วจรูญ และอภิสิทธิ์ ชิตวาณิช (2568) ก็เป็นเครื่องยืนยันว่า การบริหารจัดการฟาร์มโดยใช้ข้อมูลที่เที่ยงตรง (Data-Driven) คือหัวใจสำคัญที่จะช่วยให้เกษตรกรสามารถรับมือกับความผันผวนของสภาพอากาศในปัจจุบันได้อย่างมีประสิทธิภาพที่สุด

6. ข้อเสนอแนะ

6.1 การพัฒนาระบบควบคุมแบบปรับตัวตามสภาพภูมิอากาศภายนอก (Adaptive and Predictive Control) เนื่องจากผลการวิจัยพบว่าปัจจัยฤดูกาลยังคงส่งผลต่อผลผลิตอย่างมีนัยสำคัญ ($R^2 = 70.09$ %) การวิจัยในก้าวถัดไปควรเปลี่ยนจากการตั้งค่าแบบคงที่ (Fixed Setpoint) มาเป็นการใช้ Machine Learning เพื่อพยากรณ์อากาศล่วงหน้าและปรับระดับการทำงานของระบบ Evaporative Cooling ล่วงหน้าก่อนที่ความร้อนภายนอกจะเข้าสู่โรงเรือน เพื่อลดค่าความเบี่ยงเบนของอุณหภูมิในช่วงฤดูร้อน

6.2 เมื่อมีการขยายขนาดการผลิต การทำงานของปั๊มน้ำและพัดลมดูดอากาศขนาดใหญ่มีผลต่อต้นทุนค่าไฟฟ้าโดยตรง ควรมีการศึกษาวิจัยเพิ่มเติมเกี่ยวกับการใช้ระบบปรับความเร็วรอบพัดลมตามความจำเป็นจริง หรือการนำพลังงานหมุนเวียน มาบูรณาการร่วมกับระบบ IoT เพื่อประเมินความคุ้มค่าของการลงทุน (ROI) และหาจุดสมดุลระหว่างปริมาณผลผลิตที่เพิ่มขึ้นและค่าใช้จ่ายด้านพลังงาน

6.3 เพื่อให้ระบบมีความแม่นยำในระดับสูงสุด (Precision Farming) งานวิจัยถัดไปควรเพิ่มเซนเซอร์ที่ตรวจวัดความสมบูรณ์ของดอกเห็ดโดยตรง เช่น การใช้การประมวลผลด้วยภาพ (Image Processing**)** เพื่อวิเคราะห์ขนาดและสีของดอกเห็ดในโรงเรือน แล้วนำข้อมูลนั้นมาสั่งการให้ระบบปรับค่า CO_2 หรือการให้ความชื้นสอดคล้องกับระยะการเจริญเติบโตของเห็ดแต่ละรุ่น ซึ่งจะช่วยลดความผันผวนของน้ำหนักเห็ดต่อก้อนให้ดียิ่งขึ้น

7. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนงบประมาณอุดหนุนทุนวิจัยจากงบประมาณรายได้ ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2566 ประเภททุนอุดหนุนงานวิจัย โดยงบประมาณผ่านกองทุนส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม (สกสว) ภายใต้แผนงานยุทธศาสตร์การวิจัยและนวัตกรรม รหัสโครงการสัญญา 182071 ผ่านสถาบันวิจัยและพัฒนา

มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบูรณ์ ผู้วิจัยขอขอบพระคุณหน่วยงานที่เกี่ยวข้องทุกภาคส่วนที่ให้การสนับสนุนจนการวิจัยครั้งนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี

เอกสารอ้างอิง

กระทรวงเกษตรและสหกรณ์. (2561). *เห็ดสกุลนางรมเตรียมรับมือ 2 หนอนแมลงวัน.* เว็บไซต์กระทรวงเกษตรและสหกรณ์. https://www.moac.go.th/news-preview-401091791039.

จารีณี จงปลื้มปิติ วารี ศรีสอน พีรณัฐ อันสุรีย์ ทยาวี หนูนูญ ดารณี เปล่งสันเทียะ และพลเทพ เวสูงเนิน. (2568). ระบบโรงเรือนเพาะเห็ดนางรมดำแบบปรับตัวได้ด้วยการควบคุมการเปิด-ปิดอัตโนมัติตามระดับคาร์บอนไดออกไซด์. *FEAT Journal (Farm Engineering and Automation Technology Journal), 11*(2), 23–33.

ชัยสิทธิ์ แก้วจรูญ และอภิสิทธิ์ ชิตวาณิช. (2568). นวัตกรรมระบบไอโอทีสำหรับโรงเรือนเพาะเห็ดนางฟ้าแบบการกระจายความชื้นด้วยผ้าเปียก. *RMUTTO Research Journal, 18*(2).

ปรีชา ทุมมะ, ธนากร กองบาง, คมสัน มูลเพียและวีรชาติ คงทวี. (2564). การประยุกต์ใช้เทคโนโลยีทำความเย็นแบบท่อใต้ดินเพื่อควบคุมอุณหภูมิและความชื้นในโรงเรือนเพาะเห็ดนางฟ้า. *วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, 31*(4), 624–637.

วีรศักดิ์ ฟองเงิน สุรพงษ์ เพ็ชร์หาญ และรัฐสิทธิ์ ยะจ่อ. (2561). การประยุกต์ใช้เทคโนโลยีไอโอทีควบคุมฟาร์มอัจฉริยะในโรงเรือนเพาะเห็ดนางฟ้า. *วารสารวิชาการการจัดการเทคโนโลยีสารสนเทศและนวัตกรรม, 5*(1), 172–182.

เอนกวงศ์ ยอดดำเนิน และสุริยา ต๊ะศรีเรือน. (2568). โรงเห็ดขนาดเล็กออนไลน์ด้วยเทคโนโลยีไอโอที. *วารสารวิชาการ มหาวิทยาลัยราชภัฏอุตรดิตถ์, 20*(2), 163–176.

Bunluewong, K., & Surinta, O. (2021). Semi-automated mushroom cultivation house using Internet of Things. *Engineering Access, 7*(2), 181–188.

Cloonan, K. R., Andreadis, S. S., Chen, H., Jenkins, N. E., & Baker, T. C. (2016). Attraction, oviposition and larval survival of the fungus gnat, Lycoriella ingenua, on fungal species isolated from adults, larvae, and mushroom compost. *PLOS ONE, 11*(12), e0167074.

Cloyd, R. A. (2015). Ecology of fungus gnats (*Bradysia* spp.) in greenhouse production systems associated with ornamental plants. *Insects, 6*(3), 597–613.

Kecskeméti, S., Molnár, B. P., Keszthelyi, S., & Tóth, M. (2020). Fungal volatiles as olfactory cues for female fungus gnats. *Scientific Reports, 10*, 9350.

คุณค่าทางวิชาการ

งานวิจัยนี้มีคุณค่าทางวิชาการในฐานะหลักฐานเชิงประจักษ์ที่ยืนยันประสิทธิภาพของระบบควบคุมโรงเรือนอัจฉริยะในระดับกึ่งพาณิชย์ โดยผลการวิเคราะห์ทางสถิติช่วยเสริมความน่าเชื่อถือของการประยุกต์ใช้ IoT ในการผลิตเห็ด และชี้ให้เห็นอิทธิพลของปัจจัยฤดูกาล ซึ่งเป็นข้อมูลสำคัญต่อการพัฒนาระบบให้เหมาะสมกับสภาพภูมิอากาศจริง ในเชิงบริการวิชาการ สามารถถ่ายทอดองค์ความรู้สู่กลุ่มผู้เพาะเห็ดผ่านการอบรมและการใช้งานจริง ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการผลิต ลดความผันผวนของผลผลิต และเพิ่มมูลค่าเชิงพาณิชย์ในระยะยาว