



FEAT JOURNAL

FARM ENGINEERING AND AUTOMATION TECHNOLOGY JOURNAL

วารสารวิศวกรรมฟาร์มและเทคโนโลยีการควบคุมอัตโนมัติ

ระบบโรงเรือนเพาะเห็ดนางรมดำแบบปรับตัวได้ด้วยการควบคุมการเปิด-ปิดอัตโนมัติ
ตามระดับคาร์บอนไดออกไซด์

Self-Adjusting Greenhouse System for Black Oyster Mushroom Cultivation Using
Automatic CO₂ Responsive Ventilation Control

จาริณี จงปลื้มปิติ¹⁾, วารีย์ ศรีสอน¹⁾, พีรณัฐ อันสุรีย์¹⁾,
ทยาวิทย์ หนูบุญ¹⁾, ดารณีย์ เป็ล้องสันเทียะ²⁾ และ พลเทพ เวงสูงเนิน^{1)*}
Jarinee Jongpluempiti¹⁾, Waree Srison¹⁾, Peeranat Ansuree¹⁾,
Thayawee Nuboon¹⁾, Daranee Plueangsantia²⁾ and Ponthep Vengsungnle^{1)*}

¹⁾สาขาวิศวกรรมเครื่องจักรกลเกษตรอัจฉริยะ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี

²⁾สาขาสังคมศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์และศิลปศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน

¹⁾Department of Smart Agricultural Machinery Engineering, Faculty of Engineering and Technology

²⁾Department of Social Sciences, Faculty of Science and Liberal Arts

Rajamangala University of Technology Isan

Received: 28 November 2025

Revised: 15 December 2025

Accepted: 20 December 2025

Available online: 26 December 2025

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มุ่งพัฒนาระบบโรงเรือนเพาะเห็ดนางรมดำแบบปรับตัวได้ที่สามารถควบคุมการเปิด-ปิดช่องระบายอากาศโดยอัตโนมัติตามระดับของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ภายในโรงเรือน โดยอาศัยเซ็นเซอร์แบบไม่กระจายรังสีอินฟราเรดร่วมกับไมโครคอนโทรลเลอร์และระบบอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่งเพื่อเก็บข้อมูลและสั่งการแบบเรียลไทม์ การทดลองดำเนินการในโรงเรือนสองรูปแบบ ได้แก่ โรงเรือนที่ไม่มีระบบระบายอากาศและโรงเรือนที่มี

ระบบระบายอากาศอัตโนมัติ โดยติดตั้งเซ็นเซอร์ CO₂ ตำแหน่งกึ่งกลางโรงเรือนเพื่อเปรียบเทียบระดับความเข้มข้นของก๊าซในสภาวะจริง การวิเคราะห์ข้อมูลด้วยสถิติ t-test พบว่าระดับ CO₂ เฉลี่ยภายในโรงเรือนที่มีระบบระบายอากาศอยู่ที่ 727.61 ppm ซึ่งต่ำกว่าสภาวะที่ไม่มีระบบระบายอากาศ (1,198.30 ppm) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) และลดลงประมาณ 39.3% พร้อมลดค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานจาก 348.8 เป็น 85.5 ppm สะท้อนถึงเสถียรภาพของสภาพแวดล้อมที่เพิ่มขึ้นกว่า 4 เท่า การวิเคราะห์เชิงเวลาแสดงให้เห็นว่าระบบสามารถรักษาความเข้มข้น CO₂ ให้อยู่ในช่วง 700–1,000 ppm ซึ่งเป็นระดับที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของเห็ดนางรมดำทั้งในเวลากลางวันและกลางคืน ผลการศึกษาชี้ชัดว่าระบบควบคุมอัตโนมัติที่พัฒนาขึ้นสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการจัดการสภาพแวดล้อมในโรงเรือน ลดภาระแรงงาน และยกระดับกระบวนการเพาะเห็ดสู่ระบบเกษตรอัจฉริยะที่มีความแม่นยำและยั่งยืน

คำสำคัญ: โรงเรือนอัจฉริยะ การเพาะเห็ดนางรมดำ การควบคุมการระบายอากาศอัตโนมัติ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ อินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง

Abstract

This study aimed to develop an adaptive smart greenhouse system for oyster mushroom cultivation capable of automatically controlling ventilation based on carbon dioxide concentration. The system utilized a Non-Dispersive Infrared sensor integrated with a microcontroller and an Internet of Things (IoT) platform to collect real-time data and actuate the ventilation mechanism. Experiments were conducted in two identical mushroom houses: one without a ventilation system and another equipped with an automatic ventilation control system. A CO₂ sensor was installed at the central position of each house to monitor the environmental concentration under actual cultivation conditions. Statistical analysis using a paired sample t-test revealed that the average CO₂ concentration inside the greenhouse with automatic ventilation was 727.61 ppm, significantly lower than the 1,198.30 ppm measured in the unventilated house ($p < 0.05$). The system effectively reduced CO₂ accumulation by approximately 39.3% and decreased the standard deviation from 348.8 ppm to 85.5 ppm, indicating over fourfold improvement in environmental stability. Time-series analysis showed that the system consistently maintained CO₂ levels between 700–1,000 ppm, which is optimal for oyster mushroom growth throughout day and night cycles. These results confirm that the developed automated control system enhances environmental stability, reduces labor demand, and provides a reliable and sustainable solution for precision mushroom cultivation under the concept of smart agriculture.

Keywords: oyster mushroom cultivation: automatic ventilation control: carbon dioxide: smart greenhouse: Internet of Things

*ติดต่อ: ponthep.ve@rmuti.ac.th

1. บทนำ

เห็ดนางรมดำ (Pleurotus ostreatus var. columbinus) เป็นหนึ่งในเห็ดเศรษฐกิจที่ได้รับความนิยมอย่างแพร่หลายในประเทศไทย เนื่องจากมีคุณค่าทางโภชนาการสูง เจริญเติบโตได้ดีในสภาพอากาศเขตร้อน และสามารถเพาะเลี้ยงได้ตลอดทั้งปี การเจริญเติบโตของเห็ดได้รับอิทธิพลจากปัจจัยสิ่งแวดล้อมหลายด้าน ได้แก่ อุณหภูมิ ความชื้น ความเข้มแสง และองค์ประกอบของอากาศในโรงเรือน โดยเฉพาะความเข้มข้นของออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ซึ่งมีบทบาทสำคัญต่อการพัฒนาและรูปร่างของเห็ดในแต่ละระยะการเจริญเติบโต [1-3] ผลผลิตและคุณภาพของเห็ดยังมีความไวต่อสภาวะแวดล้อม โดยเฉพาะความเข้มข้น CO_2 ซึ่งมีอิทธิพลโดยตรงต่อการพัฒนาโครงสร้างของดอกเห็ด ความเข้มข้นของ CO_2 สูงมีผลต่อรูปร่างของดอกเห็ด โดยทำให้หมวกเห็ด (pileus) ไม่พัฒนาเต็มที่ และก้านเห็ด (stipe) ยาวเรียวยาวผิดปกติ จากการศึกษา ก่อนหน้าพบว่าระดับ CO_2 ที่เหมาะสมต่อการเจริญของเห็ดนางรมทั่วไปในระยะบ่มเส้นใยอยู่ที่ประมาณ 5,000–10,000 ppm ขณะที่ระยะเปิดดอกควรควบคุมให้อยู่ในช่วงไม่เกิน 1,000 ppm เพื่อให้ได้หมวกเห็ดที่มีรูปร่างสมบูรณ์ เนื่องจาก CO_2 ส่งผลอย่างเด่นชัดต่อเห็ดในช่วงระยะต้นของการพัฒนา [4] มีงานวิจัยรายงานว่าหากในช่วงเจริญเติบโตของดอกเห็ดมีปริมาณ CO_2 ที่สูงเกิน 1,200 ppm ส่งผลเสียต่อ

คุณภาพเห็ด เช่น ทำให้เนื้อเห็ดนุ่มลงและเพิ่มการเกิดสีน้ำตาล [5] หรือการกระจายสปอร์ลดลง และเกิดการชะงักของกระบวนการสร้างดอก ส่งผลให้ผลผลิตและคุณภาพลดลงอย่างมีนัยสำคัญ

การศึกษามลกระทบของ CO_2 ต่อการเจริญเติบโตและการพัฒนาการของเห็ดนางรมดำ (Pleurotus ostreatus) เป็นประเด็นสำคัญในสาขาวิชาวิทยาเห็ดและเทคโนโลยีการเพาะเลี้ยง เนื่องจาก CO_2 มีบทบาทโดยตรงต่อกระบวนการสรีรวิทยา การสังเคราะห์โปรตีน และการสร้างโครงสร้างผลผลิตของเห็ด งานวิจัยในช่วงปี ค.ศ. 2021-2025 พบว่ามีการพัฒนาความรู้ในเชิงกลไกทางสรีรวิทยาและเทคนิคการเพาะเลี้ยงอย่างต่อเนื่อง อย่างไรก็ตาม ยังพบช่องว่างขององค์ความรู้หลายด้านที่สามารถนำไปต่อยอดเพื่อพัฒนาองค์ความรู้เชิงลึกและประยุกต์ใช้ในระบบควบคุมสิ่งแวดล้อมอัจฉริยะได้ เห็ดเป็นสิ่งมีชีวิตกลุ่ม heterotroph หมายถึง ไม่สามารถสังเคราะห์แสงเพื่อสร้างอาหารได้เหมือนพืช แต่จะใช้ออกซิเจน (O_2) จากอากาศและปล่อย CO_2 ออกมาในกระบวนการเมแทบอลิซึม เห็ดจึงจัดอยู่ในกลุ่มสิ่งมีชีวิตที่หายใจได้ และ CO_2 ที่พบในโรงเพาะส่วนใหญ่ไม่ได้มาจากสิ่งแวดล้อมภายนอก แต่เกิดจากกระบวนการหายใจของเห็ดเอง ส่วนที่ทำหน้าที่หายใจมากที่สุดคือ เส้นใยไมซีเลียม (mycelium) ซึ่งย่อยสลายวัสดุเพาะ เช่น ขี้เลื่อย ฟางข้าว หรือรำข้าว เพื่อดึงพลังงานมาใช้ในการเจริญเติบโต ในกระบวนการย่อยสลายดังกล่าวจะเกิด

การปล่อย CO₂ ออกมาจำนวนมาก โดยเฉพาะใน ระยะที่ไม่ซีเลียมเติบโตเร็วที่สุด ระดับ CO₂ ภายในโรง เพาะหรือโรงเรือนสามารถเพิ่มขึ้นเกิน 5,000 ppm ได้ ภายในไม่กี่ชั่วโมง หากไม่มีการระบายอากาศ

งานวิจัยเชิงปริมาณระบุว่า เห็ดนางรมดำสามารถ ผลิต CO₂ ได้เฉลี่ย 0.9–1.3 กิโลกรัมต่อเห็ดสด 1 กิโลกรัม ที่เก็บเกี่ยว และจากการวัดอัตราการหายใจ พบว่า เห็ดจะใช้ ออกซิเจนประมาณ 135–319 mlO₂/kg·h และปล่อย CO₂ ประมาณ 165–336 mlCO₂/kg·h โดยมีความแปรผันตามอุณหภูมิและ อัตราการเจริญเติบโตของเห็ด [9] CO₂ ภายในโรง เพาะเห็ดจึงมีแหล่งกำเนิดหลักสองประการ ได้แก่ จาก เห็ดเอง ซึ่งเกิดจากกระบวนการหายใจของเส้นใยและ ดอกเห็ด จากการย่อยสลายอินทรีย์วัตถุในวัสดุเพาะ โดยมีจุลินทรีย์อื่นช่วยย่อยร่วมด้วย ในช่วงเจริญของ เส้นใย (spawn run) เห็ดต้องการระดับ CO₂ ค่อนข้าง สูง เพื่อส่งเสริมการเจริญของเนื้อเยื่อและการขยาย เส้นใย แต่เมื่อเข้าสู่ช่วงออกดอก (fruiting stage) ต้อง รักษา ระดับ CO₂ ให้อยู่ในช่วง 700–1,000 ppm เพื่อ ป้องกันไม่ให้เกิดก้านเห็ดยาว หมวกเล็ก หรือรูปร่าง บิดเบี้ยว อย่างไรก็ตามการควบคุมระดับ CO₂ ในโรงเรือน เพาะเห็ดของเกษตรกรไทยส่วนใหญ่ยังคงอาศัยการ เปิด-ปิดประตูหรือช่องระบายอากาศด้วยมือ ซึ่งไม่ สามารถตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงของก๊าซใน เวลาเฉพาะได้ทันที ทำให้ระดับ CO₂ ผันผวน และ ส่งผลกระทบต่อคุณภาพผลผลิตโดยรวม นอกจากนี้ ยังเพิ่มภาระด้านแรงงานและพลังงานโดยไม่จำเป็น

ในช่วงทศวรรษที่ผ่านมา แนวคิดโรงเรือนอัจฉริยะ (Smart Greenhouse) ได้รับการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง โดยประยุกต์ใช้เทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง (Internet of Things: IoT) และระบบควบคุมอัตโนมัติ

(Automation Control System) เพื่อจัดการสภาวะ แวดล้อม เช่น อุณหภูมิ ความชื้น และการระบาย อากาศแบบเรียลไทม์ อย่างไรก็ตาม งานวิจัยจำนวนมากมุ่งเน้นที่การเพาะพืชผักหรือไม้ผล ขณะที่งาน ด้านโรงเรือนเพาะเห็ด โดยเฉพาะเห็ดนางรมดำในเขต ร้อน ยังคงมีช่องว่างด้านการพัฒนาเทคโนโลยีควบคุม ระดับ CO₂ แบบอัตโนมัติที่มีความแม่นยำและ เหมาะสมกับสภาพโรงเรือนไทย แสงเป็นปัจจัยสำคัญ ที่ควบคุมการสังเคราะห์แสง ส่งผลให้เกิดการ เปลี่ยนแปลงแบบ diurnal (กลางวัน-กลางคืน) ของ ความเข้มข้น CO₂ ในบรรยากาศ [6] การระบาย อากาศและระบบควบคุม การเปิดระบบระบายอากาศ หรือกำจัด CO₂ จะทำให้ความเข้มข้นลดลงเป็น ระยะเวลา [7,8]

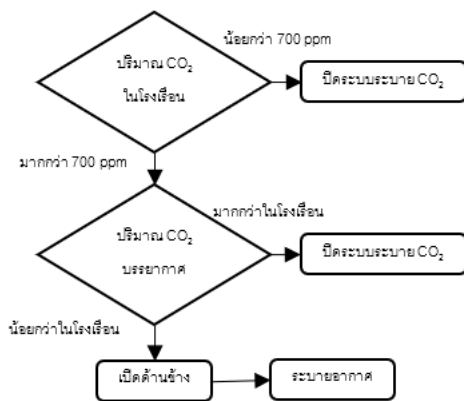
ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นไปที่ การพัฒนาโรงเรือน อัจฉริยะปรับตัว (Adaptive Smart Greenhouse) ที่ สามารถตรวจวัดและควบคุมการเปิด-ปิดช่องระบาย อากาศโดยอัตโนมัติ เมื่อระดับ CO₂ ภายในโรงเรือน สูงหรือต่ำกว่าค่าที่กำหนด ระบบดังกล่าวจะอาศัย เซนเซอร์ CO₂ แบบ NDIR (Non-Dispersive Infrared) ร่วมกับไมโครคอนโทรลเลอร์เพื่อสั่งการมอเตอร์เปิด- ปิดบานพับระบายอากาศ โดยมีการบันทึกข้อมูลและ แจ้งเตือนผ่านแพลตฟอร์ม IoT เพื่อให้ผู้เพาะเห็ด สามารถตรวจสอบสถานะและปรับค่าการควบคุมได้ แบบเรียลไทม์ผ่านสมาร์ทโฟนหรือคอมพิวเตอร์

2. ระเบียบวิธีวิจัย

2.1. การปรับตั้งค่าระบบควบคุมอัตโนมัติ

ในงานวิจัยนี้จะทำการติดตั้งเซนเซอร์ที่ใช้วัดอุณหภูมิ และความชื้นอากาศ เซนเซอร์วัดปริมาณ CO₂ ที่มีการ ติดตั้งไว้บริเวณภายนอกและภายในโรงเรือน เพื่อวัด

ความแตกต่างระหว่างคุณภาพอากาศภายในและภายนอกโรงเรียน หากมองในมุมมองด้านบนแล้ว ตำแหน่งที่ติดตั้งเซ็นเซอร์ภายในโรงเรียนติดตั้งในตำแหน่งกึ่งกลางของโรงเรียน สูงจากพื้นดิน 1.9 m ข้อมูลที่วัดค่าจากเซ็นเซอร์จะถูกส่งขึ้นไปยังระบบ Cloud เพื่อใช้ในการติดตามประเมินผลทั้ง 2 โรงเรียน มีจำนวนเซ็นเซอร์และระบบทั้งหมดเหมือนกัน ความแตกต่างกัน คือโรงเรียนที่ 1 จะไม่มีการสั่งให้ด้านข้างมีการเปิดปิดและไม่สั่งการให้พัดลมระบาย CO₂ ออกทางด้านข้าง ส่วนโรงเรียนที่ 2 จะมีการสั่งให้มอเตอร์เปิดปิดผนังโรงเรียนด้านข้าง และมีการสั่งพัดลมให้มีการทำงานเพื่อระบาย CO₂ เมื่อปริมาณ CO₂ ด้านในโรงเรียนมีปริมาณสูงกว่า 700 ppm และมีปริมาณสูงกว่าด้านนอก แต่ถ้าหากมีปริมาณ CO₂ ที่ต่ำกว่าด้านนอกระบบจะไม่มีการเปิด เนื่องจากจะเป็นการเพิ่มปริมาณ CO₂ ในโรงเรียน ให้เพิ่มมากขึ้น โดยเงื่อนไขในการสร้างระบบ สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 1



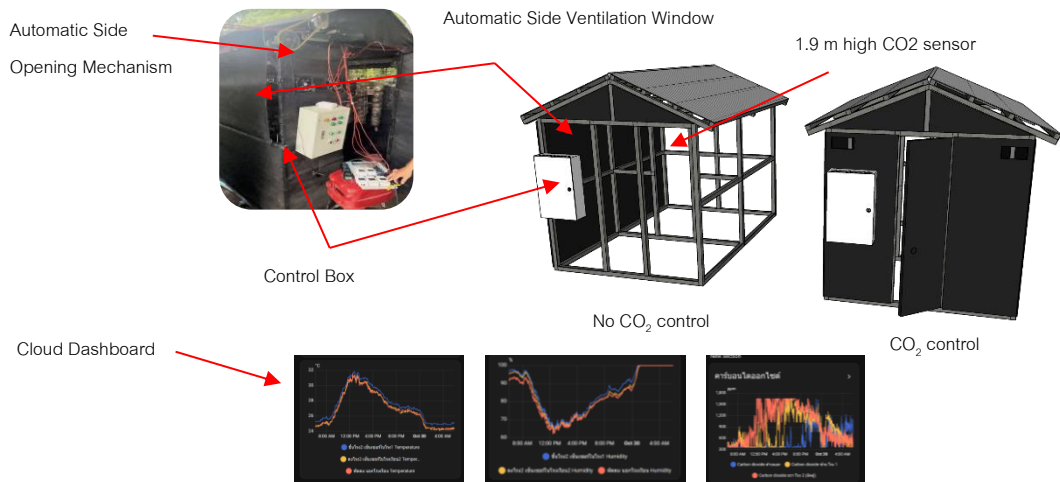
รูปที่ 1 เงื่อนไขการเปิดระบบระบาย CO₂

2.2. การติดตั้งระบบควบคุมอัตโนมัติในโรงเรียน

รูปที่ 2 แสดงให้เห็นโรงเรียน กลไก การติดตั้งระบบควบคุม และตำแหน่งของเซ็นเซอร์ที่ติดตั้ง โดยโรงเรียนที่ใช้ทดสอบมีขนาดกว้างยาวสูงเท่ากับ 2.00 m x 3.00 m x 2.50 m ตามลำดับ ด้านข้างสามารถเปิดปิดได้ด้วยกลไกที่มีต้นกำลังมาจากมอเตอร์ สามารถสั่งให้เปิดปิดได้ผ่านระบบ IoT ระบบควบคุมอัตโนมัติที่ใช้ในการศึกษาประกอบไปด้วยเซ็นเซอร์ที่ใช้วัดอุณหภูมิและความชื้นอากาศ เซ็นเซอร์วัดปริมาณ CO₂ โดยส่งข้อมูลที่ได้ขึ้นระบบ Cloud เพื่อใช้ในการติดตามประเมินผล การศึกษาจะแบ่งโรงเรียนออกเป็น 2 โรงเรียน โรงเรียนที่ 1 จะไม่มีการเปิดปิดด้านข้างของโรงเรียนเพื่อระบาย CO₂ ส่วนโรงเรียนที่ 2 จะมีระบบนี้ ส่วนระบบการให้น้ำจะมีการกำหนดเงื่อนไขเหมือนกัน คือให้น้ำเข้า และเย็น โดยมีการให้น้ำในเวลา 7:00 และเวลา 17:00 น. มีอัตราการให้น้ำประมาณ 30 ml/time/bag ในโรงเรียนเพาะเห็ด 500 ก้อน

2.3. การวิเคราะห์ผลทางสถิติ

การวิเคราะห์ผลทางสถิติในงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินค่า CO₂ ที่ตรวจวัดได้จากเซ็นเซอร์ที่ติดตั้งภายในและภายนอกโรงเรียนเพาะเห็ดนางรมดำ เพื่อใช้ในการพัฒนาและปรับปรุงระบบควบคุมการเปิด-ปิดอัตโนมัติของโรงเรียนให้ตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงของระดับ CO₂ ได้อย่างเหมาะสมต่อการเจริญของเส้นใยและดอกเห็ด เซ็นเซอร์คาร์บอนไดออกไซด์ถูกติดตั้งในตำแหน่งกึ่งกลางของโรงเรียนเพาะเห็ดจำนวน 1 จุดต่อโรงเรียน



รูปที่ 2 โรงเรียนที่ไม่มี และมีระบบไหลเวียนอากาศตามระดับของ CO₂

เพื่อให้ได้ค่าที่เป็นตัวแทนของบรรยากาศภายในโดยรวม และติดตั้งอีก 1 จุดภายนอกโรงเรียน เพื่อเปรียบเทียบกับสภาวะแวดล้อมภายนอก การเก็บข้อมูลดำเนินการในระยะเวลา 1 นาทีต่อครั้ง ต่อเนื่องตลอด 24 ชั่วโมง เป็นระยะเวลา 14 วัน โดยข้อมูลทั้งหมดถูกส่งเข้าสู่ระบบฐานข้อมูล IoT ผ่านเครือข่าย Wi-Fi เพื่อจัดเก็บและนำมาวิเคราะห์ภายหลังด้วยโปรแกรมทางสถิติ

ระดับ CO₂ ทั้งภายในและภายนอกโรงเรียนจะถูกนำมาวิเคราะห์เพื่อคำนวณค่าทางสถิติเชิงพรรณนา ได้แก่ Mean หมายถึงค่าเฉลี่ยของข้อมูลซึ่งแสดงค่ากลางโดยรวม ส่วน Standard Error เป็นค่าความคลาดเคลื่อนของค่าเฉลี่ยที่บ่งบอกความแม่นยำของการประมาณค่าเฉลี่ย, Median คือค่ากึ่งกลางของข้อมูล, Mode คือค่าที่พบมากที่สุด, Standard Deviation และ Sample Variance แสดงระดับการกระจายตัวของข้อมูลรอบค่าเฉลี่ย, Kurtosis และ Skewness ใช้บ่งบอกรูปร่างของการกระจายข้อมูลว่า

มีความโด่งหรือเบ้ไปด้านใด, Range คือ ช่วงความแตกต่างระหว่างค่ามากที่สุดและค่าน้อยสุด, Minimum และ Maximum คือค่าต่ำสุดและสูงสุดที่พบในชุดข้อมูล, Sum คือผลรวมทั้งหมดของข้อมูล, Count คือจำนวนข้อมูลที่ใช้ในการคำนวณ และ Confidence Level (95%) คือ ช่วงค่าที่คาดว่าค่าเฉลี่ยจริงของประชากรจะอยู่ในนั้นด้วยระดับความเชื่อมั่น 95% ทั้งหมดนี้ช่วยให้สามารถมองเห็นภาพรวมของข้อมูลในเชิงแนวโน้ม การกระจาย ความสมมาตร และความน่าเชื่อถือก่อนทำการทดสอบสมมติฐานทางสถิติได้อย่างถูกต้อง

เพื่อประเมินความแตกต่างของระดับ CO₂ ระหว่างภายในและภายนอกโรงเรียน ใช้วิธีทดสอบสมมติฐานด้วย t-test ทางเดียว (One-tailed test) ซึ่งเป็นค่าสถิติที่ใช้วัดความแตกต่างระหว่างค่าเฉลี่ยของกลุ่มข้อมูลเทียบกับความผันผวนของข้อมูลในกลุ่มนั้นๆ โดยอิงกับการแจกแจงแบบ t ของ Student (Student's t-distribution) [10] โดยคำนวณได้จากสมการที่ (1)

โดยที่ $\bar{X}_1 - \bar{X}_2$ หมายถึงความแตกต่างของค่าเฉลี่ยระหว่างสองกลุ่ม S_p หมายถึงส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานรวม n_1 และ n_2 หมายถึงจำนวนข้อมูลแต่ละกลุ่ม [11,12]

การทดสอบสถิติมีการกำหนดตามสมมติฐานที่ว่า การมีระบบระบายอากาศจะช่วยลดระดับ CO_2 ภายในโรงเรียนให้ต่ำลงจากกรณีที่ไม่มีการระบายอากาศอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ โดยตั้งสมมติฐานดังนี้

H_0 : ค่าเฉลี่ย CO_2 ภายในโรงเรียนที่มีระบบระบายเท่ากับภายในโรงเรียนที่ไม่มีระบบระบาย

H_1 : ค่าเฉลี่ย CO_2 ภายในโรงเรียนที่มีระบบระบายน้อยกว่าภายในโรงเรียนที่ไม่มีระบบระบาย

กำหนดความเชื่อมั่นที่ 95% เพื่อใช้ในการตรวจสอบถึงความแตกต่างของระดับ CO_2 อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ โดยเฉพาะในช่วงเวลา 18.00–06.00 น. ซึ่งเป็นช่วงที่การระบายอากาศลดลงและมีการสะสมของ CO_2 ภายในมากที่สุด

$$t = \frac{\bar{X}_1 - \bar{X}_2}{S_p \sqrt{\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2}}} \quad (1)$$

3. ผลการศึกษา

จากรูปที่ 1 แสดงแนวโน้มระดับ CO_2 ที่แสดงในช่วงเวลาต่อเนื่องหลายวัน สามารถสังเกตได้ว่าการมีหรือไม่มีระบบระบายอากาศส่งผลต่อความเข้มข้นของ CO_2 ภายในโรงเรียนอย่างชัดเจน เส้นสีน้ำเงินซึ่งแทนสถานะที่ไม่มีระบบระบายอากาศมีลักษณะยอดแหลมขึ้นเป็นคาบ โดยค่าจะเพิ่มสูงขึ้นมากในช่วงกลางวันจนแตะระดับกว่า 2,000 ppm และค่อยๆ

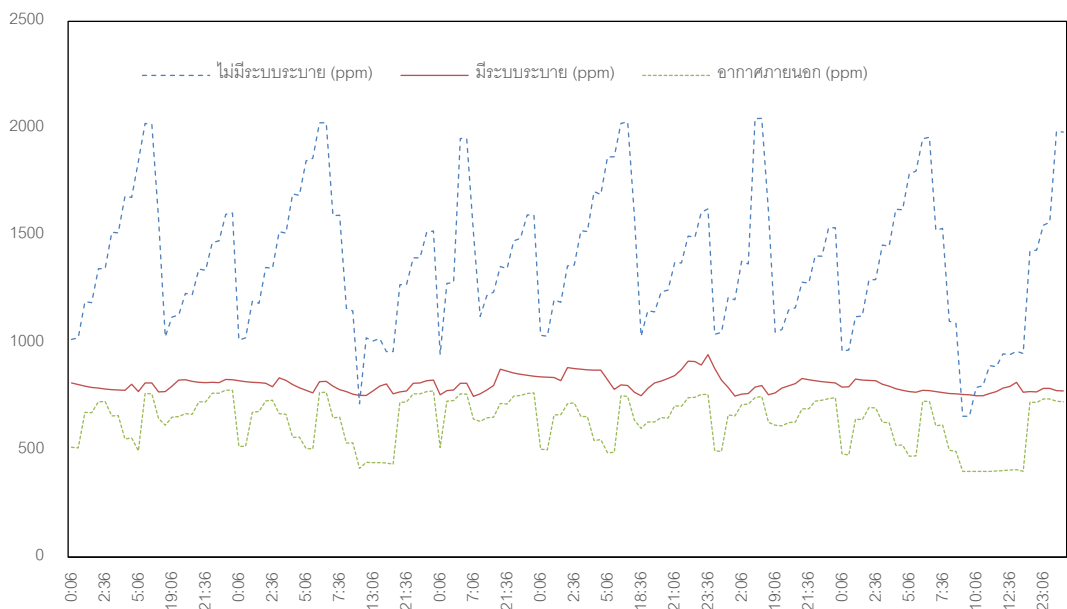
ลดลงในช่วงกลางวัน สะท้อนให้เห็นถึงการสะสมของ CO_2 จากการหายใจของเห็ดนางรมดำโดยไม่มีการถ่ายเทอากาศ ส่งผลให้บรรยากาศภายในโรงเรียนอยู่ในสภาพไม่เสถียร ส่วนเส้นสีส้มซึ่งแทนสถานะมีระบบระบายอากาศอัตโนมัติมีความราบเรียบและค่าความเข้มข้นอยู่ในช่วงประมาณ 600–850 ppm โดยมีการแกว่งตัวอย่างสม่ำเสมอ แสดงถึงการตอบสนองของระบบควบคุมที่ทำงานตามค่าที่กำหนดได้อย่างต่อเนื่องและแม่นยำ ผลการวิเคราะห์พบว่าในช่วงเวลากลางคืน ค่า CO_2 ภายในโรงเรียนมีค่ามากกว่าภายนอก ซึ่งสอดคล้องกับช่วงเวลาที่เห็ดนางรมดำมีการหายใจและปล่อย CO_2 สูงสุด และในช่วงกลางวันเมื่อระบบพัดลมระบายอากาศทำงาน ค่า CO_2 ภายในจะลดลงจนใกล้เคียงกับค่าภายนอก

เมื่อเปรียบเทียบกับเส้นสีเขียวซึ่งเป็นอากาศภายนอกโรงเรียนจะเห็นว่าค่ามีการเปลี่ยนแปลงตามธรรมชาติระหว่าง 400–800 ppm โดยมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นในเวลากลางคืนและลดลงในช่วงกลางวัน อันเป็นผลจากกระบวนการสังเคราะห์แสงของพืชและการหายใจของสิ่งมีชีวิตโดยรอบ ความแตกต่างของระดับ CO_2 ระหว่างภายในและภายนอกในกรณีที่มีระบบระบายอากาศจึงอยู่ในระดับเหมาะสมต่อการเจริญของเห็ดนางรมดำ ซึ่งอยู่ในช่วง 700–1,000 ppm ข้อมูลจากกราฟจึงยืนยันว่า ระบบควบคุมอัตโนมัติสามารถรักษาสมดุลของบรรยากาศภายในให้คงที่ ลดการสะสมของ CO_2 ที่เกินค่ามาตรฐานและสร้างสภาพแวดล้อมที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตและผลผลิตของเห็ดได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ผลการวิเคราะห์ทางสถิติในตารางที่ 1 แสดงให้เห็นว่า CO_2 ในบรรยากาศ มีการเปลี่ยนแปลงตามเวลาในแต่ละวัน โดยภายในสภาพแวดล้อมที่ไม่มีมลพิษ ค่าความเข้มข้นของ CO_2 จะต่ำสุดประมาณ 398.73 ppm ในช่วงเที่ยงวัน และสูงสุดประมาณ 779.21 ppm ในช่วงเที่ยงคืนถึงเช้ามืดซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยก่อนหน้านี้ [8,13] ระบบระบายอากาศช่วยลดระดับ CO_2 ภายในโรงเรือนได้ประมาณ 39.3% เมื่อเทียบกับกรณีไม่ระบายอากาศและยังคงมีค่ามากกว่าอากาศภายนอกเพียงราว 171 ppm ซึ่งอยู่ในช่วงที่เหมาะสมต่อการเจริญของเห็ดนางรมดำ

ค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation) ลดลงจาก 348.8 ไปเป็น 85.5 ppm เมื่อใช้ระบบระบายอากาศ แสดงว่า ระบบควบคุมสามารถรักษาสีเขียวภาพของ CO_2 ภายในโรงเรือนได้ถึง 4 เท่า ซึ่งถือว่าดีกว่าเดิม ระบบระบายอากาศช่วยให้รูปแบบ

การกระจายของข้อมูลเปลี่ยนจากเบ้ขวาไปเป็นสมมาตรซึ่งแสดงให้เห็นว่าระบบสามารถป้องกันการสะสมของ CO_2 เกินค่ากำหนดได้อย่างต่อเนื่องผลการวิเคราะห์เชิงสถิติแสดงให้เห็นว่า ระบบระบายอากาศอัตโนมัติสามารถลดระดับ CO_2 ภายในโรงเรือนเพาะเห็ดนางรมดำได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยค่าความเข้มข้นเฉลี่ยลดลงจาก 1,198.3 ppm เหลือเพียง 727.6 ppm และมีช่วงความเชื่อมั่นที่แคบที่สุด (± 9.4 ppm) เมื่อเทียบกับสถานะไม่มีการระบายอากาศ (± 38.3 ppm) และอากาศภายนอก (± 13.6 ppm) สะท้อนให้เห็นถึงความเสถียรและความน่าเชื่อถือของระบบควบคุมบรรยากาศภายในโรงเรือน ซึ่งสามารถรักษาระดับ CO_2 ให้อยู่ในช่วงเหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของเห็ดนางรมดำได้อย่างต่อเนื่องและมีเสถียรภาพสูง



รูปที่ 1 ปริมาณ CO_2 ของตำแหน่งข้างอิง

ตารางที่ 1

ค่าสถิติในการศึกษา

	ไม่มีระบบระบาย (ppm)	มีระบบระบาย (ppm)	อากาศภายนอก (ppm)
Mean	1198.300187	727.6056698	556.1229595
Standard Error	19.46882662	4.772575863	6.90042102
Median	1119.73	735.9	532.9
Mode	#N/A	772.09	398.73
Standard Deviation	348.8127039	85.50772596	123.631206
Sample Variance	121670.3024	7311.571199	15284.67509
Kurtosis	-0.490357257	-0.867006496	-1.385459433
Skewness	0.668446831	-0.125354219	0.2406923
Range	1407.94	411.42	379.21
Minimum	639.22	533.47	398.73
Maximum	2047.16	944.89	779.21
Sum	384654.36	233561.42	178515.47
Count	321	321	321
Confidence Level (95.0%)	38.30306633	9.389589491	13.57592264

ผลการทดสอบสมมติฐานด้วยสถิติ t-test แบบจับคู่ (Paired Sample) พบว่าค่าเฉลี่ยของ CO₂ ภายในโรงเรือนที่ไม่มีระบบระบายอากาศเท่ากับ 1,198.30 ppm ในขณะที่โรงเรือนที่มีระบบระบายอากาศมีค่าเฉลี่ยเพียง 727.61 ppm จากข้อมูลทั้งหมด 321 คู่ พบค่า t Stat = 26.9163 ซึ่งมากกว่าค่า t Critical (one-tail) = 1.6493 อย่างมาก และมีค่า p-value = 1.68×10^{-84} ซึ่งน้อยกว่า 0.05 อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ แสดงให้เห็นว่าระดับ CO₂ ในโรงเรือนที่มีระบบระบายอากาศต่ำกว่ากรณีที่ไม่มีระบบระบายอากาศอย่างชัดเจน จึงสามารถสรุปได้ว่าระบบระบายอากาศอัตโนมัติมีประสิทธิภาพสูงในการลดการสะสมของ CO₂ ภายในโรงเรือนและช่วยรักษาสภาวะบรรยากาศให้อยู่ในระดับที่เหมาะสมต่อการเจริญของเห็ดนางรมดำ

4. สรุปผล

งานวิจัยนี้ประสบความสำเร็จในการพัฒนา ระบบโรงเรือนเพาะเห็ดนางรมดำแบบปรับตัวได้ด้วยการควบคุมการเปิด-ปิดอัตโนมัติตามระดับ CO₂ โดยใช้เซ็นเซอร์ทำงานร่วมกับไมโครคอนโทรลเลอร์และระบบ IoT เพื่อควบคุมการระบายอากาศตามค่าที่ตรวจวัดได้แบบเรียลไทม์ ผลการทดลองเปรียบเทียบระหว่างโรงเรือนที่มีและไม่มีระบบควบคุมอัตโนมัติแสดงให้เห็นว่า ระบบที่พัฒนาขึ้นสามารถลดระดับ CO₂ เฉลี่ยจาก 1,198.30 ppm เหลือเพียง 727.61 ppm หรือลดลงประมาณ 39.3% พร้อมทั้งลดค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานจาก 348.8 ppm เหลือ 85.5 ppm ซึ่งสะท้อนถึงเสถียรภาพของบรรยากาศภายในที่เพิ่มขึ้นกว่า 4 เท่า ผลการทดสอบทางสถิติแบบ t-test ให้ค่า p-value = 1.68×10^{-84} ซึ่งน้อยกว่า 0.05 อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ยืนยันว่าการมีระบบระบายอากาศ

ช่วยลดการสะสมของ CO₂ ได้อย่างมีประสิทธิภาพ และน่าเชื่อถือ การวิเคราะห์แนวโน้มเชิงเวลาแสดงให้เห็นว่าระบบสามารถตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงระดับก๊าซตลอดรอบวัน โดยรักษาความเข้มข้นให้อยู่ในช่วงเหมาะสมต่อการเจริญของเห็ดนางรมดำทั้งในเวลากลางวันและกลางคืน นอกจากนี้ระบบยังสามารถทำงานได้ต่อเนื่องโดยไม่ต้องอาศัยแรงงานคน ช่วยลดความผันผวนของสภาพแวดล้อมภายในและเพิ่มประสิทธิภาพของการเพาะเห็ดเชิงพาณิชย์ได้อย่างเป็นรูปธรรม แต่อย่างไรก็ตามหากมีการนำไปประยุกต์ใช้กับงานจริงอาจจะจำเป็นต้องมีการเพิ่มจุดที่ใช้ในการตรวจวัดปริมาณ CO₂ เพื่อความแม่นยำและความน่าเชื่อถือของข้อมูลที่ได้ และควรมีการทดสอบผลผลิตของดอกเห็ดที่ได้เมื่อมีภาวะของ CO₂ ที่แตกต่างกันออกไป เพื่อยืนยันว่า CO₂ ส่งผลกระทบต่อผลผลิตอย่างมีนัยสำคัญ เพื่อเป็นการยกระดับกระบวนการเพาะเห็ดสู่แนวทางการเกษตรอัจฉริยะที่มีความแม่นยำ ประสิทธิภาพสูง และยั่งยืนต่อสิ่งแวดล้อม

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณงบประมาณสำหรับสนับสนุนงานวิจัยพื้นฐาน กองทุนส่งเสริมวิทยาศาสตร์วิจัยและนวัตกรรม (กองทุน ววน.) ที่อนุเคราะห์งบประมาณในการทำวิจัย และขอขอบพระคุณคณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ที่กรุณาอนุญาตให้ใช้พื้นที่ในการทำงานวิจัย

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Yang H, Lei M, Huang L, Wang Y, Sun N, Ban L, et al. Study on the effects of environmental factors on enzyme activities during growth of *Hypsizygus marmoreus*. PLoS One. 2022;17:e0268107. doi:10.1371/journal.pone.0268107.
- [2] Tian Y, Zheng S, Zhang J, Chen Q, Zhang R. Fatty acid synthesis: a critical factor determining mycelial growth rate in *Pleurotus tuoliensis*. Food Chem Mol Sci. 2025;11:100285. doi:10.1016/j.fochms.2025.100285.
- [3] Lu CP, Liaw JJ. A novel image measurement algorithm for common mushroom caps based on convolutional neural network. Comput Electron Agric. 2020;171:105336. doi:10.1016/j.compag.2020.105336.
- [4] Sakamoto Y. Influences of environmental factors on fruiting body induction, development and maturation in mushroom-forming fungi. Fungal Biol Rev. 2018;32:236–48. doi:10.1016/j.fbr.2018.02.003.
- [5] Zhang L, Liu Z, Sun Y, Wang X, Li L. Combined antioxidant and sensory effects of active chitosan/zein film containing α -tocopherol on *Agaricus bisporus*. Food Packag Shelf Life.

- 2020;24:100470.
doi:10.1016/j.fpsl.2020.100470.
- [6] Wei S, Han G, Jia X, Song W, Chu X, He W, et al. Tidal effects on ecosystem CO₂ exchange at multiple timescales in a salt marsh in the Yellow River Delta. *Estuar Coast Shelf Sci.* 2020;238:106727. doi:10.1016/j.ecss.2020.106727.
- [7] Zender-Swiercz E. Improvement of indoor air quality by way of using decentralised ventilation. *J Build Eng.* 2020;32:101663. doi:10.1016/j.job.2020.101663.
- [8] Sinha A, Thakkar H, Rezaei F, Kawajiri Y, Realf MJ. Reduced building energy consumption by combined indoor CO₂ and H₂O composition control. *Appl Energy.* 2022;322:119526. doi:10.1016/j.apenergy.2022.119526.
- [9] Rai DR, Paul S. Transient state in-pack respiration rates of mushroom under modified atmosphere packaging based on enzyme kinetics. *Biosyst Eng.* 2007;98:383–92. doi:10.1016/j.biosystemseng.2007.07.012.
- [10] Lord D. Exploratory analyses of safety data. In: *Statistical methods in crash safety analysis.* 2021. p. 389–404. doi:10.1016/B978-0-12-816818-9.00015-9.
- [11] Liang J, Yuen SY. An edge detection with automatic scale selection approach to improve coherent visual attention model. *Pattern Recognit Lett.* 2013;34:1943–51. doi:10.1016/j.patrec.2013.06.004.
- [12] Liu SC, Yang JJ, Shao KN, Chueh PJ. RNA interference targeting tNOX attenuates cell migration via a mechanism that involves membrane association of Rac. *Biochem Biophys Res Commun.* 2008;365:720–6. doi:10.1016/j.bbrc.2007.11.025.
- [13] Miracco G, Nicoletti F, Ferraro V, Kaliakatsos D. Innovative mechanical ventilation control for enhanced indoor air quality and energy efficiency. *Energy Eng.* 2025;122:1–14. doi:10.32604/ee.2025.060750.