

การควบคุมสภาวะแวดล้อมและการวิเคราะห์ผลการฟักสายพันธุ์ไก่พื้นเมืองและสายพันธุ์ไก่ไข่ในตู้ฟักไข่อัตโนมัติ ชุมชนบ้านบุงไหม จังหวัดอุบลราชธานี

Environmental Condition Control and Hatching Performance Analysis of Native and Layer Chickens Using Eggs Incubator in Ban Bung Mai Community, Ubon Ratchathani Province

อชนี พลสวัสดิ์, ธิติพร ชาญศิริวัฒน์ และ วิลาสินี ทวีศรี*

Achinee Polsawat, Thitiporn Chansiriwat and Virasinee Thaweessri*

คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏอุบลราชธานี

Faculty of Industrial Technology, Ubon Ratchathani Rajabhat University

E-mail : achinee.p@ubru.ac.th, thitiporn.c@ubru.ac.th and virasinee.k@ubru.ac.th *

*Corresponding author

(Received: 19 May 2026, Revised: 1 October 2026, Accepted: 2 October 2026)

<https://doi.org/10.57260/stc.2026.1793>

บทคัดย่อ

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อ 1) วิเคราะห์และรายงานสภาพแวดล้อมภายในตู้ฟักไข่อัตโนมัติ IoT ตลอดระยะเวลา 14 วัน โดยเน้นแนวโน้มการสะสมของ CO₂ 2) เปรียบเทียบอัตราการรอดของตัวอ่อนตลอดระยะเวลาฟักระหว่างสายพันธุ์ไก่พื้นเมืองและสายพันธุ์ไก่ไข่ในช่วง 14 วันแรกของการฟัก และ (3) จำแนกระยะและรูปแบบการสูญเสียของตัวอ่อนตลอดระยะเวลาฟัก ระบบตู้ฟักไข่ที่พัฒนาขึ้นควบคุมการทำงานด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ บันทึกข้อมูลตลอดระยะเวลา 14 วัน ตัวแปรสภาพแวดล้อม 5 ตัวแปร ได้แก่ อุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ ความเข้มข้นของ CO₂ มุมพลิกไข่ และความเร็วพัดลม เก็บข้อมูลทุก 5 นาที รวม 4,032 แถว ทำการทดสอบฟักไข่จำนวน 22 ฟอง เป็นไก่พื้นเมือง 10 ฟอง และไก่ไข่ 12 ฟอง ประเมินพัฒนาการตัวอ่อนด้วยการส่องไฟในวันที่ 7 และ 14 ผลการศึกษาพบว่า อุณหภูมิเฉลี่ยตลอดการฟักอยู่ที่ 37.15 ± 0.38 °C (CV = 1.01%) ความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ย 60.45 ± 2.01 %RH ความเข้มข้น CO₂ เพิ่มขึ้นอย่างเป็นเส้นตรงจาก 405.57 ppm ถึง 695.87 ppm ในอัตรา 22.71 ppm ต่อวัน ($R^2 = 0.996$) อัตราการรอดของตัวอ่อนตลอดระยะเวลาฟักโดยรวมอยู่ที่ร้อยละ 68.18 โดยไก่ไข่มีอัตราการรอดของตัวอ่อนตลอดระยะเวลาฟักร้อยละ 75.00 สูงกว่าไก่พื้นเมืองที่ร้อยละ 60.00 การจำแนกการสูญเสียตัวอ่อนพบไข่ไม่มีเชื้อร้อยละ 13.64 ตัวอ่อนตายระยะต้นร้อยละ 9.09 และตัวอ่อนตายในเปลือกร้อยละ 9.09 ผลการวิจัยแสดงให้เห็นว่าระบบตู้ฟักไข่อัตโนมัติที่พัฒนาขึ้นสามารถรักษาสภาพแวดล้อมได้อย่างเสถียร และแนวโน้ม CO₂ สามารถใช้เป็นตัวชี้วัดพัฒนาการตัวอ่อนได้อย่างมีประสิทธิภาพ

คำสำคัญ: ตู้ฟักไข่อัตโนมัติ การควบคุมสภาวะแวดล้อมด้วย IoT อัตราการฟักไข่

Abstract

This study aimed to: 1) analyze and report the environmental conditions inside an IoT-based automatic egg incubator over a 14-day period, with particular emphasis on CO₂ accumulation trends; 2) compare embryo survival rates between native indigenous chickens and layer chickens during the first 14 days of incubation; and 3) classify the stages and patterns of embryonic mortality throughout the incubation period. The developed incubator was controlled by a microcontroller and continuously recorded five environmental variables, including temperature, relative humidity, CO₂ concentration, egg-turning angle, and fan speed, at 5-minute intervals over 14 days, yielding a total of 4,032 records. A total of 22 eggs were incubated, comprising 10 indigenous chicken eggs and 12-layer chicken eggs. Embryonic development was assessed through candling on days 7 and 14. The results revealed that the mean incubation temperature was 37.15 ± 0.38 °C (CV = 1.01%), while the mean relative humidity was 60.45 ± 2.01 %RH. CO₂ concentration exhibited a linear increase from 405.57 ppm to 695.87 ppm, at a rate of 22.71 ppm per day ($R^2 = 0.996$). The overall embryo survival rate throughout the incubation period was 68.18%, with layer chickens exhibiting a higher survival rate (75.00%) than indigenous chickens (60.00%). Classification of embryonic losses indicated that 13.64% of eggs were infertile, 9.09% experienced early embryonic mortality, and 9.09% resulted in late embryonic mortality. These findings demonstrate that the developed IoT-based automatic egg incubator can maintain stable environmental conditions.

Keywords: Automated incubator, IoT environmental control, Hatchability

บทนำ

การฟักไข่เป็นกระบวนการสำคัญในอุตสาหกรรมการเกษตรและการเลี้ยงสัตว์ปีก โดยเฉพาะในกลุ่มเกษตรกรรายย่อยซึ่งนิยมใช้ตู้ฟักไข่ขนาดเล็กที่ต้นทุนต่ำและสามารถใช้งานได้ง่าย อย่างไรก็ตามปัญหาของตู้ในลักษณะนี้คือความไม่เสถียรของอุณหภูมิและความชื้นภายในตู้และปัจจัยแวดล้อมที่ละเอียดอ่อนหลายประการ แม้ว่าในปัจจุบันจะนิยมนำระบบควบคุมเข้ามาใช้ในการควบคุมสภาพแวดล้อมภายในให้มีความเสถียรมากยิ่งขึ้น แต่ปัจจัยด้านสภาพแวดล้อม เช่น อุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ การระบายอากาศ และการพลิกไข่มีผลโดยตรงต่อการพัฒนาของตัวอ่อนและอัตราการฟักออก (Decuypere & Bruggeman, 2007) โดยอุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับการฟักไข่ในระยะ 18 วันแรก อยู่ในช่วง 37.50-37.70 °C และความชื้นสัมพัทธ์ในช่วง 19 วันแรกของการฟักควรอยู่ประมาณ 60% (รวีศ คำหาญพล และคณะ, 2568) ปัจจัยด้านสภาพแวดล้อมดังกล่าวจึงถือเป็นตัวแปรสำคัญที่ต้องได้รับการควบคุมอย่างเหมาะสม

ในปัจจุบันมีหลากหลายงานวิจัยที่นำเทคโนโลยีเข้ามาช่วยในการควบคุมสภาพแวดล้อมภายในตู้ฟักไข่ด้วยการนำเทคโนโลยี Internet of Things (IoT) ที่ช่วยให้สามารถติดตามและควบคุมสภาพแวดล้อมในตู้ฟักได้อย่างแม่นยำและต่อเนื่องตลอด 24 ชั่วโมง เช่นงานของ Prabowo et al. (2024) พัฒนาเครื่องฟักไข่อัตโนมัติโดยใช้ระบบควบคุมแบบ Proportional Integral Derivative (PID) ร่วมกับ IoT เพื่อควบคุมรักษาอุณหภูมิในช่วง 37.10-37.70 °C ได้อย่างเสถียร ขณะที่ ณณณ วทัญญูเลิศสกุล และ สาโรจน์ บุญศักดิ์ดี (2567) ในการพัฒนาเครื่องฟักไข่อัตโนมัติโดยใช้เทคนิคการประมวลผลภาพแบบเรียลไทม์ที่ระบบสามารถควบคุมอุณหภูมิให้อยู่ในช่วง 37.00-37.80 °C และความชื้นสัมพัทธ์ในช่วง 60-65% ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ในอีกแนวทางหนึ่ง Giri et al. (2025) พัฒนาระบบตู้ฟักไข่อัจฉริยะโดยนำ Machine learning มาใช้ตรวจสอบไข่ที่เสียหายผ่านตู้ฟักไข่ที่ควบคุมด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ NodeMCU ในการควบคุมอุณหภูมิให้คงอยู่ที่ 36°C และความชื้นที่ 32% ผู้ใช้งานสามารถติดตามและควบคุมระบบจากระยะไกลผ่านอินเทอร์เน็ตเฟชบนมือถือได้รับการแจ้งเตือนและสามารถปรับค่าการควบคุมภายในตู้ได้ทันที งานของ Chidiebere et al. (2025) ได้ใช้เทคนิค ANFIS ในระบบตู้ฟักไข่อัจฉริยะสำหรับการรักษาสภาวะที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการฟักไข่ไก่ ระบบสามารถควบคุมอุณหภูมิ ความชื้น ระดับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และการพลิกไข่ได้อย่างแม่นยำสูง ในขณะที่งานของ เจษฎา สาททอง และคณะ (2567) ได้ใช้โมดูล Wi-Fi ESP8266 ร่วมกับเซ็นเซอร์ DS18B20 และ DHT22 สำหรับการควบคุมเครื่องฟักไข่อัตโนมัติให้มีอุณหภูมิให้คงที่ระหว่าง 37-38 องศาเซลเซียส และมีความชื้นให้คงที่ระหว่าง 55-75 เปอร์เซ็นต์ ช่วยให้อัตราการรอดของไข่จากการฟักในเครื่องสูงกว่าแบบธรรมชาติ 30 เปอร์เซ็นต์ นอกจากอุณหภูมิและความชื้นภายในตู้ฟักไข่ ความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) ภายในตู้ฟักเป็นอีกหนึ่งตัวชี้วัดสำคัญของการพัฒนาตัวอ่อน ในสภาวะธรรมชาติ CO₂ ของแม่ไก่ขณะฟักไข่มีระดับสูงถึง 4,000 ppm ซึ่งสูงกว่าอากาศบรรยากาศทั่วไปที่ประมาณ 400 ppm ถึง 10 เท่า ในงานของ Liu et al. (2022) พบว่าการเพิ่มระดับ CO₂ ให้สูงขึ้น 1% ในช่วงต้นและปลายของการฟักสามารถเร่งการพัฒนาอวัยวะตัวอ่อน และลดระยะเวลาการฟักออกได้โดยไม่กระทบต่ออัตราการฟักออก ในขณะที่ Decuypere et al. (2001) อธิบายว่าการสะสมของ CO₂ ตามธรรมชาติในตู้ฟักสัมพันธ์โดยตรงกับอัตราการหายใจและกระบวนการเมตาบอลิซึมของตัวอ่อนที่เพิ่มขึ้นตามอายุการพัฒนา

การพลิกไข่ระหว่างการฟักเป็นอีกหนึ่งปัจจัยที่สำคัญ มีงานวิจัยได้ทดลองการพลิกไข่และได้ยืนยันว่ามุมพลิกที่แนะนำคือ 45 องศา และความถี่ที่แนะนำคือ 24 ครั้งต่อวัน (Elibol et al., 2002; Elibol & Brake, 2006) และในงานของ Oliveira et al., (2020) พบว่า การลดความถี่การพลิกจาก 24 ครั้งต่อวันเป็น 12 ครั้งต่อวันทำให้อัตราการฟักออกลดลง 6.61% และเพิ่มอัตราการตายของตัวอ่อนทั้งในระยะต้นและระยะปลาย

ในด้านสายพันธุ์ไก่ได้มีศึกษาเปรียบเทียบความสมบูรณ์ในอัตราการฟักของไก่แตกต่างสายพันธุ์ พบว่า ผลการฟักของไก่พื้นเมืองมีอัตราการฟักออกต่ำกว่าสายพันธุ์เชิงพาณิชย์หรือสายพันธุ์ปรับปรุง อย่างมีนัยสำคัญ Khalil et al., (2016) และรูปแบบการตายของตัวอ่อน สำหรับน้ำหนักไข่เริ่มต้นก็เป็นอีกหนึ่งปัจจัยที่อาจส่งผลต่อผลการฟัก โดย Kumar et al., (2024) พบว่า น้ำหนักไข่มีผลต่อการฟักในไก่พื้นเมือง แม้ว่าความสัมพันธ์ดังกล่าวอาจมีความแตกต่างกันตามแต่ละสายพันธุ์

การจำแนกประเภทการสูญเสียของตัวอ่อนผ่านการส่องตรวจไข่ (Candling) เป็นวิธีมาตรฐานที่นิยมใช้ในการวิจัยการฟักไข่ โดยแบ่งการสูญเสียออกเป็น 3 ระยะหลัก ได้แก่ ระยะต้น กลาง และปลาย Fathi et al., (2022) ในขณะทำงานวิจัยของ กฤษฎา ภาณุมนต์วาทิ และคณะ (2565) ใช้เวลาในการฟักไข่ไก่พื้นเมืองในตู้ฟักเป็นเวลา 21 วัน ตรวจสอบเพื่อประเมินจำนวนไข่มีเชื้อ ไม่มีเชื้อ และไข่เชื้อตาย โดยการส่องไข่วันที่ 7 และ 18 ของการฟัก ซึ่งช่วยให้ผู้วิจัยสามารถระบุสาเหตุของการสูญเสียและปรับปรุงเงื่อนไขการฟักได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ดังนั้น การบูรณาการระบบ IoT สำหรับการติดตามสภาพแวดล้อมร่วมกับการประเมินผลการฟักจึงเป็นแนวทางที่มีศักยภาพในการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างสภาพแวดล้อมกับการฟักได้อย่างครอบคลุม อย่างไรก็ตาม งานวิจัยที่ผ่านมาโดยรวม จะเห็นได้ว่างานส่วนใหญ่ยังมุ่งเน้นการควบคุมอุณหภูมิและความชื้นเป็นหลัก ขณะที่การติดตามค่า CO₂ อย่างต่อเนื่องและการนำมาวิเคราะห์ร่วมกับผลลัพธ์การรอดของตัวอ่อนยังปรากฏให้เห็นไม่มากนัก โดยเฉพาะในบริบทของไก่พื้นเมืองไทยซึ่งมีลักษณะทางพันธุกรรมและอัตราการรอดที่แตกต่างจากไก่สายพันธุ์เชิงพาณิชย์ และการจำแนกสาเหตุการตายของตัวอ่อนในไข่ในไก่พื้นเมืองและไก่ไข่ในบริบทของประเทศไทยยังมีอยู่น้อย ในงานวิจัยนี้จึงนำแนวคิดดังกล่าวมาเป็นการพัฒนาตู้ฟักไข่อัตโนมัติที่บูรณาการ IoT เข้ากับการตรวจวัด CO₂ อย่างต่อเนื่อง ดังนั้น การศึกษานี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อ 1) วิเคราะห์และรายงานสภาพแวดล้อมภายในตู้ฟักไข่อัตโนมัติ IoT ตลอดระยะเวลา 14 วัน โดยเน้นแนวโน้มการสะสมของ CO₂ 2) เปรียบเทียบอัตราการรอดของตัวอ่อนตลอดระยะฟักระหว่างสายพันธุ์ไก่พื้นเมืองและสายพันธุ์ไก่ไข่ในช่วง 14 วันแรกของการฟัก และ 3) จำแนกระยะและรูปแบบการสูญเสียของตัวอ่อนตลอดระยะเวลาฟัก โดยทำการทดลองในพื้นที่ชุมชนบ้านบึงใหม่ อำเภวารินชำราบ จังหวัดอุบลราชธานี

ระเบียบวิธีวิจัย

งานวิจัยนี้ใช้การออกแบบเชิงทดลองด้วยการพัฒนาระบบตู้ฟักไข่อัตโนมัติติดตั้งระบบ IoT สำหรับตรวจวัดและเก็บข้อมูลสภาพแวดล้อมภายในตู้ฟักตลอดระยะเวลา 14 วัน โดยมุ่งเน้นการประเมินประสิทธิภาพของระบบในการควบคุมสภาพแวดล้อมและผลกระทบที่มีต่ออัตราการรอดชีวิตของตัวอ่อนในช่วงพัฒนาการระยะต้นถึงระยะกลาง แบ่งการดำเนินงาน ดังนี้

ระบบตู้ฟักไข่และการเก็บข้อมูล

ออกแบบและพัฒนาตู้ฟักไข่อัตโนมัติควบคุมการทำงานด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ กำหนดพารามิเตอร์ควบคุมดังนี้

1. อุณหภูมิ (Temperature) ติดตั้งเซนเซอร์ DHT22 เพื่อตรวจวัดอุณหภูมิในตู้ฟักแบบเรียลไทม์ กำหนดอุณหภูมิเป้าหมายระหว่าง 36.50-37.50 องศาเซลเซียส (°C) ระบบให้ความร้อนด้วยหลอดไฟขนาด 100 วัตต์ โดยจะตัดการทำงานเมื่ออุณหภูมิแตะถึง 37.50 องศาเซลเซียส และเริ่มทำงานเมื่ออุณหภูมิลดต่ำกว่า 36.50 องศาเซลเซียส

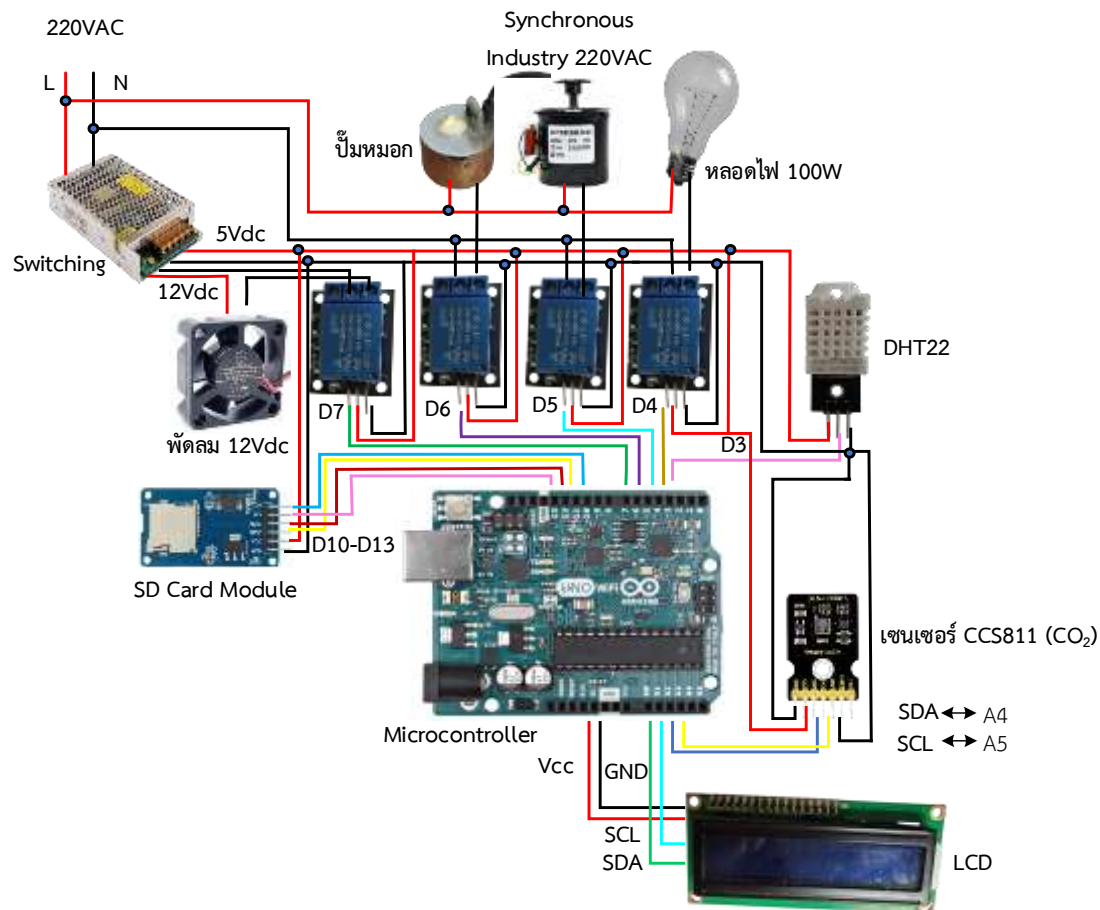
2. ความชื้นสัมพัทธ์ (Relative humidity) ติดตั้งเซนเซอร์ DHT22 เพื่อวัดค่าความชื้นสัมพัทธ์ในหน่วย %RH กำหนดค่าเป้าหมายระหว่าง 50-55% เมื่อตรวจพบว่าความชื้นต่ำกว่า 50% ไมโครคอนโทรลเลอร์จะสั่งให้ชุดปั๊มพ่นหมอกทำงานเพื่อเพิ่มปริมาณละอองน้ำในอากาศ และจะหยุดทำงานเมื่อความชื้นสูงเกินกว่า 55%

3. มุมพลิกไข่อัตโนมัติ (Egg-Turning angle) ติดตั้งมอเตอร์ซิงโครนัสเพื่อควบคุมการเอียงภาดฟักที่มุม ± 45 องศา โดยให้ทำงานอัตโนมัติทุกๆ 1 ชั่วโมง ทำงานขับเคลื่อนกลไก 1 นาทีต่อรอบ เพื่อป้องกันไม่ให้ตัวอ่อนติดกับเปลือกไข่

4. ความเร็วพัดลมระบายอากาศ (Fan speed) ชุดพัดลมระบายอากาศขนาดความเร็วรอบ 1,200 รอบต่อนาที (RPM) ซึ่งกำหนดให้ทำการระบายความร้อนเพื่อให้อุณหภูมิคงที่ตามที่กำหนดไว้

5. ความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) ติดตั้งเซนเซอร์ CCS811 เพื่อตรวจวัดความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในหน่วย ppm

พารามิเตอร์ทั้งหมดถูกบันทึกทุก 5 นาที ตลอด 14 วัน สรุปเป็นข้อมูลการทำงานของเซนเซอร์ รวมข้อมูล 4,032 แถว (ข้อมูลชุดที่ 1) แสดงผลการทำงานผ่านจอ LCD



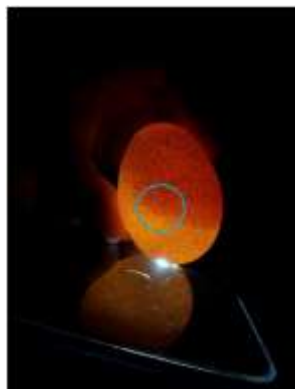
ภาพที่ 1 การออกแบบวงจรเครื่องฟกไข่ไก่อัตโนมัติโดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์

ระบบดำเนินการส่งผ่านข้อมูลจากบอร์ด Arduino Uno WiFi ไปยังคลาวด์แพลตฟอร์มผ่านเครือข่ายไร้สาย Wi-Fi ซึ่งประกอบด้วยอุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ และความเข้มข้นของก๊าซ CO₂ บนคลาวด์ ThingSpeak จะทำการบันทึกข้อมูลแบบอัตโนมัติ นำข้อมูลออกเป็นไฟล์ CSV การวิเคราะห์ผลทางสถิติ นอกจากนี้ยังสำรองข้อมูลไว้ใน SD Card Module เพื่อป้องกันกรณีสัญญาณ WiFi ขาดหาย

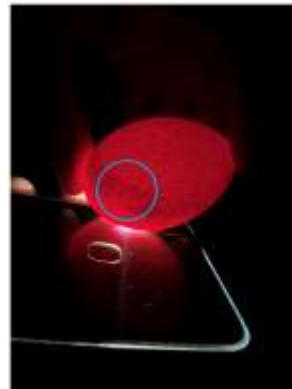


ภาพที่ 2 เครื่องฟกไข่ไก่อัตโนมัติโดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์

ทำการทดสอบโดยใช้ไข่ไก่จำนวน 22 ฟอง แบ่งเป็นสายพันธุ์ไก่พื้นเมือง (Native) จำนวน 10 ฟอง และไข่สายพันธุ์ไข่ไก่ (Layer) จำนวน 12 ฟอง ทั้งหมดอยู่ในสภาพเดียวกัน ติดตามและเก็บข้อมูลตลอดระยะเวลา 14 วัน ก่อนเริ่มการทดลองทำการวัดน้ำหนักไข่เริ่มต้นก่อนเข้าตู้ฟัก ระหว่างการทดสอบจะมีการตรวจสอบและประเมินพัฒนาการของตัวอ่อนด้วยการส่องไฟ (Candling) ในวันที่ 7 เพื่อแยกประเภทไข่เป็น Fertile (มีเชื้อ) หรือ Clear (ไม่มีเชื้อ) และ วันที่ 14 เพื่อแยกประเภทเป็น Living (ตัวอ่อนมีชีวิต) หรือ Quit (ตัวอ่อนตายระยะต้น) เมื่อครบ 14 วัน ในวันที่ 15 จะทำการย้ายไข่ออกมาและประเมินอัตราการรอดของตัวอ่อนขั้นสุดท้ายเมื่อสิ้นสุดระยะเวลาทดลอง บันทึกเป็นผลสรุปรายฟอง โดยแบ่งเป็นตัวอ่อนที่ยังมีชีวิตรอดและตัวอ่อนที่ตายหรือหยุดการพัฒนา



วันที่ 7



วันที่ 14

ภาพที่ 3 แสดงการส่องไฟของไข่ไก่ภายในตู้ฟัก วันที่ 7 และวันที่ 14



วันที่ 18



วันที่ 20

ภาพที่ 4 ระยะเวลาการฟักตัวของไข่ไก่ภายนอกตู้ฟัก วันที่ 18 และ 20

การเตรียมข้อมูล

ชุดข้อมูลหลักสองชุดได้รับการรวบรวมจากการทดลอง ได้แก่ ชุดข้อมูลการทำงานของเซนเซอร์ และชุดข้อมูลสรุปรายฟอง ชุดข้อมูลการทำงานของเซนเซอร์ประกอบด้วยค่าการตรวจวัดสภาพแวดล้อมแบบต่อเนื่องที่บันทึกโดยระบบตู้ฟักไข่อัตโนมัติ ในขณะที่ชุดข้อมูลสรุปรายฟองบันทึกตัวแปรทางชีววิทยาและผลลัพธ์ของไข่แต่ละฟอง ชุดข้อมูลทั้งสองได้รับตรวจสอบความถูกต้อง ความครบถ้วนสมบูรณ์และความสอดคล้องกันของข้อมูล

ในขั้นตอนการเตรียมข้อมูลสำหรับการวิเคราะห์ข้อมูล ได้ดำเนินการรวมข้อมูลทั้งสองชุดและสกัดสถิติเชิงสรุปจากข้อมูลเซนเซอร์รายฟอง ได้แก่ ค่าเฉลี่ย ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน ค่าต่ำสุด ค่าสูงสุด และสัดส่วนเวลาที่อุณหภูมินอกช่วงเป้าหมาย ตัวแปรเชิงหมวดหมู่ ได้แก่ สายพันธุ์ (Breed) ถูกแปลงให้เป็น 0 (Native: พันเมือง) และ 1 (Layer: ไก่ไข่) และ ผลส่องไฟ (Candling) วันที่ 7 และ 14 แปลงเป็น binary indicator ตัวแปรเป้าหมายผลการฟัก (Hatch_Result) กำหนดเป็น 1 สำหรับการฟักสำเร็จ และ 0 สำหรับไม่สำเร็จ

ตารางที่ 1 ชุดข้อมูลในการวิเคราะห์

ตัวแปร	คำอธิบาย	วิธีการคำนวณ
Breed	สายพันธุ์ไก่	0 = Native, 1 = Layer
Egg_Weight	น้ำหนักไข่ก่อนฟัก (g)	Raw measured value
Candling_D7	ผลส่องไฟวันที่ 7	0 = Clear, 1 = Fertile
Candling_D14	ผลส่องไฟวันที่ 14	0 = Quit, 1 = Living
Temp_mean	อุณหภูมิเฉลี่ย (°C)	Mean of all 4,032 sensor readings
Temp_std	S.D. อุณหภูมิ	Standard deviation of temperature
Temp_out_pct	% เวลาอุณหภูมิเกินช่วงเป้า	Derived: time fraction outside 36.5–37.5°C
Humidity_mean	ความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ย (%RH)	Mean of humidity readings
Humidity_std	S.D. ความชื้น	Standard deviation of humidity
CO ₂ _mean	CO ₂ เฉลี่ย (ppm)	Mean CO ₂ concentration
CO ₂ _max	CO ₂ สูงสุด (ppm)	Maximum CO ₂ observed over incubation
Hatch_Result	ผลการฟัก	1 = Hatch success, 0 = Hatch failure

การวิเคราะห์ทางสถิติ

ข้อมูลสภาพแวดล้อมจากเซนเซอร์นำมาคำนวณค่าเฉลี่ย ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน และค่าสัมประสิทธิ์การแปรผัน (CV%) รายวัน ทำการวิเคราะห์แนวโน้มการเพิ่มขึ้นของ CO₂ ด้วยการถดถอยเชิงเส้น (Linear Regression) เพื่อคำนวณ slope, intercept และค่า R²

สำหรับข้อมูลผลการฟักไข่ ทำการเปรียบเทียบน้ำหนักไข่ระหว่างกลุ่มที่ฟักสำเร็จและฟักไม่สำเร็จด้วย Independent samples t-test และเปรียบเทียบอัตราการฟักระหว่างสองสายพันธุ์ด้วย Fisher's exact test กำหนดระดับนัยสำคัญทางสถิติที่ $p < 0.05$

ผลการวิจัย

สภาพแวดล้อมภายในตู้ฟักไข่ตลอด 14 วัน

ระบบเซนเซอร์บันทึกข้อมูลสภาพแวดล้อมทุก 5 นาที ตลอด 14 วัน พบว่า อุณหภูมิเฉลี่ยตลอดระยะเวลาการฟักอยู่ที่ 37.15 ± 0.38 °C โดยมีค่าสัมประสิทธิ์การแปรผัน (CV) เพียง 1.01% แสดงให้เห็นถึงเสถียรภาพสูงของระบบควบคุมอุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ยอยู่ที่ร้อยละ 60.45 ± 2.01 ซึ่งสูงกว่าช่วงควบคุมที่กำหนด (50-55%) ตลอด 14 วัน สะท้อนให้เห็นว่าระบบควบคุมความชื้นยังคงมีข้อจำกัดด้านความแม่นยำ

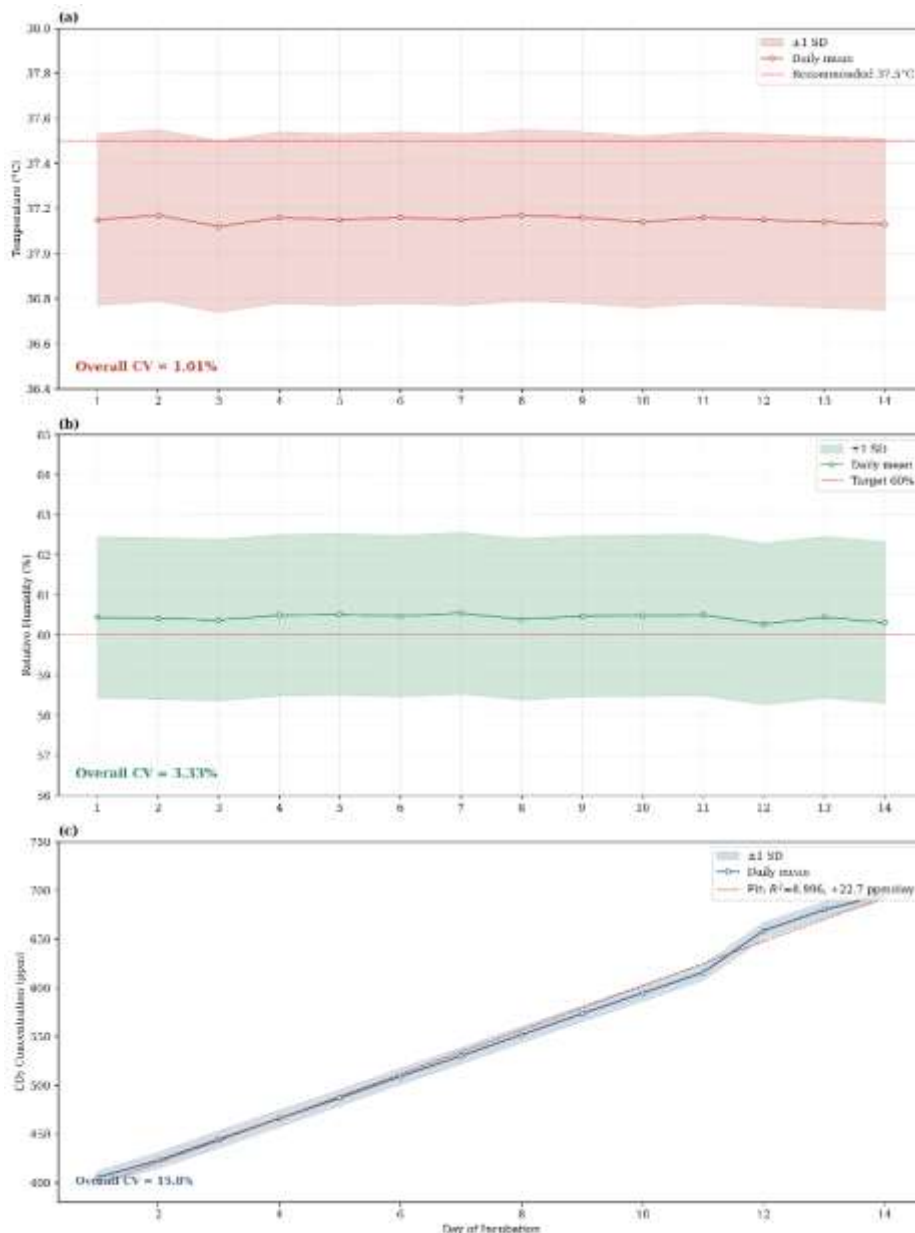
ตารางที่ 2 ค่าสถิติพารามิเตอร์ควบคุมสภาพแวดล้อมภายในตู้ฟักไข่ตลอด 14 วัน

พารามิเตอร์	ค่าเฉลี่ย $\pm$ SD	ค่าต่ำสุด	ค่าสูงสุด	CV (%)
Temperature (°C)	37.15 ± 0.38	36.50	37.80	1.01
Humidity (%)	60.45 ± 2.01	57.00	64.00	3.33
CO ₂ (ppm)	549.99 ± 86.84	389.00	711.00	15.78
Turning Angle (°)	0.00	± 45.00	± 45.00	24 ครั้ง/วัน
Fan Speed (rpm)	1,200	1,200	1,200	0.00

ความเข้มข้นของ CO₂ พบการเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องและสม่ำเสมอจาก 405.57 ppm ในวันแรกของการทดลองจนถึง 695.87 ppm ในวันที่ 14 อัตราการเพิ่มขึ้น 22.71 ppm ต่อวัน (intercept = 375.19, $R^2 = 0.996$, $p < 0.001$) ซึ่งสอดคล้องกับการเจริญเติบโตของตัวอ่อนที่มีอัตราการหายใจเพิ่มขึ้นตามอายุ

ตารางที่ 3 ค่าเฉลี่ย CO₂ รายวันภายในตู้ฟักไข่ตลอด 14 วัน

วันที่	CO ₂ Mean $\pm$ SD (ppm)	วันที่	CO ₂ Mean $\pm$ SD (ppm)
1	405.57 ± 6.42	8	552.02 ± 7.98
2	423.03 ± 8.06	9	573.60 ± 7.96
3	444.60 ± 8.63	10	594.71 ± 8.26
4	466.05 ± 8.43	11	615.92 ± 7.88
5	487.12 ± 8.07	12	658.87 ± 8.00
6	509.28 ± 8.07	13	680.14 ± 8.10
7	530.34 ± 8.17	14	695.87 ± 5.26



ภาพที่ 5 แสดงข้อมูลจากเซนเซอร์บันทึกสภาพแวดล้อม: อุณหภูมิ (a) ความชื้น (b) และ CO₂ (c)

ผลการรอดชีวิตของตัวอ่อนและการจำแนกการสูญเสียตัวอ่อน

จากการทดลองฟักไข่จำนวน 22 ฟอง เมื่อครบระยะเวลาเก็บข้อมูล 14 วัน พบว่า มีไข่ที่มีตัวอ่อนรอดชีวิตตลอดระยะฟักเป็นตัวสำเร็จจำนวน 15 ฟอง คิดเป็นอัตราการรอดของตัวอ่อนตลอดระยะฟักโดยรวมร้อยละ 68.18 เมื่อแยกตามสายพันธุ์ พบว่า สายพันธุ์ไก่ไข่ ฟักสำเร็จ 9 จาก 12 ฟอง (ร้อยละ 75.00) ส่วนสายพันธุ์ไก่พื้นเมือง ฟักสำเร็จ 6 จาก 10 ฟอง (ร้อยละ 60.00) แสดงให้เห็นว่าไข่สายพันธุ์ไก่ไข่ มีอัตราการรอดของตัวอ่อนตลอดระยะฟักที่สูงกว่าซึ่งสอดคล้องกับน้ำหนักไข่เฉลี่ยที่มากกว่า (สายพันธุ์ไก่ไข่ 58.70 กรัม เทียบกับ สายพันธุ์ไก่พื้นเมือง 52.56 กรัม) ผลการส่องไฟในวันที่ 7 พบว่าไข่มีเชื้อจำนวน 19 ฟอง และไม่มีเชื้อ 3 ฟอง ในจำนวนไข่มีเชื้อทั้งหมด มี 15 ฟองที่ฟักสำเร็จ และ 4 ฟองที่ไม่สำเร็จ

ตารางที่ 4 ผลการฟักไข่และการสูญเสียตัวอ่อนจำแนกตามสายพันธุ์

ผลการประเมิน	ไก่พื้นเมือง (n=10)	ไก่ไข่ (n=12)	รวม (n=22)	ร้อยละ
ไข่มีเชื้อ (Candling D7)	8 (80.00%)	11 (91.67%)	19	86.36%
ไข่ไม่มีเชื้อ (Clear D7)	2 (20.00%)	1 (8.33%)	3	13.64%
ตายระยะต้น (Quit D14)	1 (10.00%)	1 (8.33%)	2	9.09%
ตายในเปลือก	1 (10.00%)	1 (8.33%)	2	9.09%
ฟักสำเร็จ	6 (60.00%)	9 (75.00%)	15	68.18%

การจำแนกประเภทการสูญเสียตัวอ่อนพบว่า ไข่ไม่มีเชื้อคิดเป็น 13.64% ของไข่ทั้งหมด การตายของตัวอ่อนระยะต้น (วันที่ 7–14) คิดเป็น 9.09% และตัวอ่อนตายในเปลือก (หลังวันที่ 14) คิดเป็น 9.09% โดยไก่ไข่ (Layer) มีอัตราการฟักสำเร็จ 75.00% สูงกว่าไก่พื้นเมือง (Native) ที่ 60.00% อย่างไรก็ตาม เมื่อทดสอบด้วย Fisher's exact test พบว่าความแตกต่างดังกล่าวไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p = 0.651$) ซึ่งอาจเนื่องมาจากขนาดตัวอย่างที่มีขนาดเล็ก

ผลของน้ำหนักไข่เริ่มต้นต่อผลการฟัก

เมื่อเปรียบเทียบน้ำหนักไข่เริ่มต้นระหว่างสองกลุ่ม พบว่า กลุ่มที่ฟักสำเร็จมีน้ำหนักไข่เฉลี่ย 56.64 กรัม และกลุ่มฟักไม่สำเร็จ มีน้ำหนักเฉลี่ย 54.34 กรัม แม้กลุ่มที่ฟักสำเร็จจะมีค่าเฉลี่ยสูงกว่าประมาณ 2.30 กรัม แต่เมื่อทดสอบสถิติด้วย Independent sample t-test พบว่า ความแตกต่างดังกล่าวไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($t = 1.503$, $df = 20$, $p = 0.148$) นอกจากนี้ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของกลุ่มที่ฟักไม่สำเร็จสูงกว่า แสดงถึงความแปรปรวนของน้ำหนักที่สูงกว่าในกลุ่มนี้ ซึ่งอาจสะท้อนถึงความหลากหลายของสาเหตุที่ทำให้ไข่ไม่ฟักออก

ตารางที่ 5 เปรียบเทียบน้ำหนักไข่เริ่มต้นระหว่างกลุ่มฟักสำเร็จและกลุ่มฟักไม่สำเร็จ

ผลการฟัก	N	น้ำหนักเฉลี่ย $\pm$ SD (g)	p-value
กลุ่มฟักสำเร็จ	15	56.64 $\pm$ 2.94	0.148
กลุ่มฟักไม่สำเร็จ	7	54.34 $\pm$ 4.12	

การอภิปรายผล

ผลการวิจัยแสดงให้เห็นว่าระบบตู้ฟักไข่มีประสิทธิภาพในการรักษาสภาพแวดล้อมที่เสถียรตลอดระยะเวลา 14 วัน อุณหภูมิเฉลี่ย 37.15 °C ค่า CV = 1.01% ซึ่งเทียบได้กับ Prabowo et al., (2024) ที่ใช้ระบบ PID control ขั้นสูง ควบคุมอุณหภูมิอยู่ที่ 37.1–37.7 °C ใกล้เคียงกับผลการทดสอบในการพัฒนาเครื่องฟักไข่อัตโนมัติโดยใช้เทคนิคการประมวลผลภาพแบบเรียลไทม์ที่ระบบสามารถควบคุมอุณหภูมิให้อยู่ในช่วง 37.00–37.80 °C (ณณ วทัญญูเลิศสกุล และ สารโจน บัญศักดิ์ดี, 2567) และ เกษภา สารทอง และ คณะ (2567) ที่ควบคุมเครื่องฟักไข่อัตโนมัติให้มีอุณหภูมิให้คงที่ระหว่าง 37–38 องศาเซลเซียส ถึงแม้ว่าค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิในการทดลองนี้จะต่ำกว่าค่าเป้าหมายมาตรฐานอยู่เล็กน้อย แต่ยังคงอยู่ในช่วงยอมรับได้ที่

จะไม่ส่งผลเสียต่อตัวอ่อน ความเสถียรของอุณหภูมิ ($CV = 1.0\%$) ถือว่าดีสำหรับระบบตู้ฟักขนาดเล็กที่ไม่ได้ใช้ระบบตู้ฟักแบบหลายช่วงอายุ (Multistage incubator)

ความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ย 60.45 ($CV = 3.3\%$) อยู่ในช่วงที่เหมาะสมต่อการฟักไข่ของสัตว์ปีกที่ควรมีค่าเฉลี่ยความชื้นสัมพัทธ์อยู่ที่ 62.64% (ณณ วทัญญูเลิศสกุล และ สาโรจน์ บุญศักดิ์ดี, 2567) และในช่วงที่แนะนำ 50-65% สำหรับ 18 วันแรกของการฟักไข่ไก่ (รวีศ คำหาญพล และคณะ, 2568) ระดับความชื้นที่เหมาะสมมีความสำคัญในการควบคุมการสูญเสียน้ำจากไข่ซึ่งโดยทั่วไปควรอยู่ที่ประมาณ 11-13% ตลอดระยะการฟัก ความชื้นที่ต่ำเกินไปส่งผลให้ตัวอ่อนขาดน้ำและ โปร่งอากาศขยายใหญ่เกินไปส่งผลให้ตัวอ่อนอาจแห้งตายติดเปลือกก่อนฟัก ในขณะที่ความชื้นสูงเกินไปจะยับยั้งการระเหยน้ำที่จำเป็นและอาจทำให้ตัวอ่อนจมน้ำในระยะช่วงท้ายของการฟัก

แนวโน้มการสะสม CO_2 เพิ่มขึ้นจาก 405.57 ถึง 695.87 ppm เป็นเส้นตรงตลอด 14 วัน ($R^2 = 0.996$, slope = 22.71 ppm/วัน) สอดคล้องกับหลักการพื้นฐานของการฟักไข่ที่ว่า CO_2 ที่ตัวอ่อนผลิตออกมาสะท้อนถึงอัตราการหายใจของตัวอ่อนที่เพิ่มขึ้นตามลำดับของการพัฒนา โดยได้มีการอธิบายว่าตัวอ่อนในระยะแรกยังอาศัยกระบวนการสลายน้ำตาลแบบไม่ใช้ออกซิเจนไกลโคไลซิส (Glycolysis) เป็นแหล่งพลังงานหลัก ก่อนที่จะเปลี่ยนมาใช้กระบวนการ oxidative metabolism อย่างสมบูรณ์ในช่วงกลางและปลายของการฟัก ทำให้อัตราการผลิต CO_2 เพิ่มขึ้นอย่างสม่ำเสมอ (Decuyper et al., 2001) และยังสอดคล้องกันกับงานของ Chidiebere et al. (2025) ที่แสดงให้เห็นว่าแนวโน้มของ CO_2 ที่อยู่ในเกณฑ์ต่ำกว่า 1,000 ppm เป็นสภาวะที่ปลอดภัยต่อการพัฒนาของตัวอ่อนตลอดระยะเวลาการฟักตัว

อัตราการรอดของตัวอ่อนตลอดระยะฟักโดยรวม ณ วันที่ 14 อยู่ที่ร้อยละ 68.18 ต่ำกว่าค่าเฉลี่ยของอัตราการฟักออกเป็นตัวสำเร็จในกระบวนการฟักไข่เชิงพาณิชย์ที่ครบ 21 วัน ซึ่งโดยทั่วไปอยู่ที่ร้อยละ 80-85% เล็กน้อย (Elibol et al., 2002) ทั้งนี้ตัวเลขทั้งสองไม่สามารถเทียบกันได้โดยตรง เนื่องจากในงานวิจัยนี้ประเมินผลเพียงช่วง 14 วันแรกของการฟักเท่านั้น อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาเฉพาะไข่ที่มีเชื้อ อยู่ที่ร้อยละ 86.36 ซึ่งใกล้เคียงกับค่ามาตรฐานดังกล่าว บ่งชี้ว่าตัวอ่อนที่เริ่มพัฒนาแล้วส่วนใหญ่สามารถดำรงชีวิตอยู่ได้ตลอดช่วงเวลาที่ศึกษาภายใต้สภาพแวดล้อมที่ระบบได้ควบคุม เมื่อพิจารณาความแตกต่างระหว่างสายพันธุ์พบว่า ไก่ไข่อัตราการฟักอยู่ที่ร้อยละ 75.00 ในขณะที่ไก่พื้นเมืองอยู่ที่ร้อยละ 60.00 ซึ่งมีแนวโน้มสอดคล้องกับงานของ Khalil et al. (2016) และ Kumar et al. (2024) ที่ระบุว่าไก่พันธุ์พื้นเมืองมักมีอัตราการฟักสำเร็จต่ำกว่าไก่พันธุ์เชิงพาณิชย์หรือสายพันธุ์ปรับปรุง อย่างมีนัยสำคัญ

เมื่อเปรียบเทียบกับเครื่องฟักไข่อัตโนมัติที่มีจำหน่ายในท้องตลาดทั่วไป ส่วนใหญ่เน้นการควบคุมอุณหภูมิและความชื้น โดยไม่มีระบบเซนเซอร์ตรวจวัดค่า CO_2 หรือในงานวิจัยที่ผ่านมา เช่น งานของ Prabowo et al. (2024) ที่พัฒนาเครื่องฟักไข่อัตโนมัติโดยใช้ระบบควบคุมแบบ PID ร่วมกับ IoT เพื่อควบคุมรักษาอุณหภูมิ หรือในระบบตู้ฟักไข่อัจฉริยะแบบที่ใช้ Machine Learning ตรวจจับไข่ที่เสียหาย มีระบบการควบคุมอุณหภูมิ และความชื้น สามารถติดตามและควบคุมระบบจากระยะไกลได้ (Giri et al., 2025) ซึ่งระบบที่พัฒนาขึ้นมีข้อแตกต่างตรงที่มีการบูรณาการเซนเซอร์วัด CO_2 เพื่อติดตามแนวโน้มการสะสมก๊าซภายในตู้อย่างต่อเนื่อง และนำมาใช้เป็นตัวแปรร่วมในการวิเคราะห์รูปแบบการสูญเสียตัวอ่อน

บทสรุปและข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้ได้นำเสนอการออกแบบและประเมินผลระบบตู้ฟักไข่อัจฉริยะบน IoT ที่สามารถบันทึกข้อมูลสภาพแวดล้อม 5 ตัวแปรแบบต่อเนื่อง ระบบพิสูจน์ให้เห็นว่าการผนวก IoT เข้ากับตู้ฟักไข่ช่วยเพิ่มความสามารถในการตรวจสอบ วิเคราะห์กระบวนการฟักแบบเรียลไทม์ ซึ่งเป็นข้อแตกต่างที่ระบบตู้ฟักแบบดั้งเดิมไม่สามารถทำได้ การวิจัยในอนาคตควรขยายเวลาการเก็บข้อมูลให้ครบ 21 วันตามมาตรฐานการฟักไข่ไก่ เพื่อประเมินความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพของระบบ IoT กับอัตราการฟักออกเป็นตัวที่สมบูรณ์ ควบคู่กับการขยายกลุ่มตัวอย่างการทดลอง และพัฒนาโมเดล Machine Learning เพื่อทำนายผลการฟักจากข้อมูลเซ็นเซอร์

กิตติกรรมประกาศหรือคำขอบคุณ

ขอขอบคุณมหาวิทยาลัยราชภัฏอุบลราชธานี ที่สนับสนุนเครื่องมือวิจัยและห้องปฏิบัติการ ในการดำเนินงานวิจัยจนกระทั่งงานสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

เอกสารอ้างอิง

- กฤษฎา ภาณุมนต์วาที, นิกร ปรีชา และ สิทธิชัย ชูสำโรง. (2565). ระบบติดตามอุณหภูมิและความชื้นในการฟักไข่ไก่พื้นเมืองตู้ฟักไฟฟ้าด้วยเทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง. *Journal of Applied Research on Science and Technology (JARST)*, 21(2), 79–88. <https://ph01.tci-thaijo.org/index.php/rmutt-journal/article/view/249343>
- เจษฎา สาทอง, สัณญา ควรคิด, อติสร แก้วภักดี และ ชนิษฐา แซ่ลิ้ม. (2567). เครื่องฟักไข่แบบสมาร์ทและการตรวจสอบไข่ด้วยเทคโนโลยีใยแก้วนำแสง. *วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยสวนสุนันทา*, 12(2), 96-106. <https://ph01.tci-thaijo.org/index.php/fit-ssru/article/view/257892>
- ณนณ วทัญญูเลิศสกุล และสาโรจน์ บุญศักดิ์ดี. (2567). การพัฒนาเครื่องฟักไข่อัตโนมัติโดยใช้เทคนิคการประมวลผลภาพแบบเรียลไทม์. *วารสารนวัตกรรมการเรียนรู้และเทคโนโลยี*, 6(1), 62-73. <https://so06.tci-thaijo.org/index.php/JLIT/article/view/290356>
- รวีศ คำหาญพล, ศักดิ์ธีรพี ชุมนเพ็ชร, วิจิต มาลาเวช, ชัญญุรักษ์ ไชยพรรณ และ กริธา แก้วคงธรรม. (2568). การออกแบบและพัฒนาเครื่องฟักไข่อัตโนมัติสำหรับสายพันธุ์ไก่แจ้บ้านวังนาคพื้นที่จังหวัดนครศรีธรรมราชภาคใต้ของประเทศไทย. *วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยมหาสารคาม*, 44(1), 80-87. <https://li01.tci-thaijo.org/index.php/scimsujournal/article/view/261241>
- Chidiebere, M. E., Francis, I. S., & Ikechukwu, N. (2025). Design and Implementation of an Enhanced Neuro-Fuzzy-Based Smart System for Poultry Incubators. *Communication In Physical Sciences*, 12(5), 1583-1599. <https://journalcps.com/index.php/volumes/article/view/611>
- Decuypere, E., & Bruggeman, V. (2007). The endocrine interface of environmental and egg factors affecting chick quality. *Poultry Science*, 86(5), 1037–1042. <https://doi.org/10.1093/ps/86.5.1037>

- Decuypere, E., Tona, K., Bruggeman, V., & Bamelis, F. (2001). The day-old chick: A crucial hinge between breeders and broilers. *World's Poultry Science Journal*, 57(2), 127–138. <http://dx.doi.org/10.1079/WPS20010010>
- Elilbol, O., & Brake, J. (2006). Effect of egg turning angle and frequency during incubation on hatchability and incidence of unhatched broiler embryos with head in the small end of the egg. *Poultry Science*, 85(8), 1433–1437. <https://doi.org/10.1093/ps/85.8.1433>
- Elilbol, O., Peak, S. D., & Brake, J. (2002). Effect of flock age, length of egg storage, and frequency of turning during storage on hatchability of broiler hatching eggs. *Poultry Science*, 81(7), 945–950. <https://doi.org/10.1093/ps/81.7.945>
- Fathi, M., Abou-Emera, O., Al-Homidan, I., Galal, A., & Rayan, G. (2022). Effect of genotype and egg weight on hatchability properties and embryonic mortality pattern of native chicken populations. *Poultry Science*, 101(11), 102129. <https://doi.org/10.1016/j.psj.2022.102129>
- Giri, A., Das, S. R., Joy, A. Z. M. J. U., Akib, A. A. S., Misat, M. M. H., Khadgi, M., & Shahi, B. (2025). Smart IoT egg incubator system with machine learning for damaged egg detection. In *International conference on WorldS4* (pp. 236-245). Cham: Springer Nature Switzerland. https://doi.org/10.1007/978-3-032-11512-6_20
- Khalil, M. H., Shebl, M. K., Kosba, M. A., El-Sabrout, K., & Zaki, N. (2016). Estimate the contribution of incubation parameters influence egg hatchability using multiple linear regression analysis. *Veterinary World*, 9(8), 806. <https://doi.org/10.14202/vetworld.2016.806-810>
- Kumar, J., Jamwal, K. I. R. T. I., Bhardwaj, N. I. T. I. N., Sankhyan, V. A. R. U. N., Dinesh, K. R. I. S. H. A. N. E. N. D. E. R., & Katoch, S. H. I. V. A. N. I. (2024). Effects of egg size on hatchability parameters and chick quality in native chicken. *Indian Journal of Poultry Science*, 59(2), 193-198. <https://doi.org/10.5958/0974-8180.2024.00031.X>
- Liu, C., Zheng, W., Zhu, L., Tong, Q., & Li, D. (2022). Effect of elevated carbon dioxide on chicken eggs during the early and late incubation periods. *Animal*, 16(4), 100499. <https://doi.org/10.1016/j.animal.2022.100499>
- Oliveira, G. D. S., Dos Santos, V. M., Rodrigues, J. C., & Nascimento, S. T. (2020). Effects of different egg turning frequencies on incubation efficiency parameters. *Poultry Science*, 99(9), 4417–4420. <https://doi.org/10.1016/j.psj.2020.05.045>
- Prabowo, M. C. A., Sayekti, I., Astuti, S., Nursaputro, S. T., & Supriyati, S. (2024). Development of an IoT-based egg incubator with PID control system and web application. *JOIV: International Journal on Informatics Visualization*, 8(1), 465–472. <http://dx.doi.org/10.62527/joiv.8.1.2044>