

# ระบบมอนิเตอร์พลังงานและควบคุมอุณหภูมิในบ่อเลี้ยงจิ้งหรีดแบบบูรณาการ สำหรับฟาร์มระดับชุมชนผ่าน Home Assistant An Integrated Energy and Environmental Monitoring System for Community-Scale Cricket Farming via Home Assistant

พานูวิชญ์ พุทธรักษา<sup>1</sup> สราวุธ พลวงษ์ศรี<sup>1\*</sup> ธัญลักษณ์ สันเดช<sup>1</sup> ชวโรจน์ ใจสิน<sup>1</sup> และสุลักษณา มงคล<sup>1</sup>  
Panuwit Puttaraksa<sup>1</sup> Sarawut Polvongsri<sup>1\*</sup> Thanyaluck Sundach<sup>1</sup> Chawaroj Jaisin<sup>1</sup> and  
Sulucksana Mongkong<sup>1</sup>

Received: July 22, 2025; Revised: October 2, 2025; Accepted: October 3, 2025

## บทคัดย่อ

การเพาะเลี้ยงจิ้งหรีดในระบบฟาร์มกึ่งปิดจำเป็นต้องควบคุมอุณหภูมิให้อยู่ในช่วงเหมาะสม ซึ่งมักใช้พลังงานไฟฟ้าสูง ส่งผลให้ต้นทุนการผลิตเพิ่มขึ้น อีกทั้งระบบมอนิเตอร์ที่ใช้เซนเซอร์ราคาต่ำยังไม่เคยมีการสอบเทียบกับเครื่องมือมาตรฐาน และยังไม่มีการบูรณาการพลังงานหมุนเวียนร่วมกับระบบควบคุมอัจฉริยะในฟาร์มแมลงเศรษฐกิจ งานวิจัยนี้ได้นำเสนอระบบมอนิเตอร์และควบคุมอุณหภูมิสำหรับฟาร์มจิ้งหรีด โดยใช้พลังงานจากระบบผลิตไฟฟ้าและความร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ (Solar PVT) ขนาด 4.40 kW<sub>p</sub> ร่วมกับปั๊มความร้อนขนาด 10.80 kW<sub>th</sub> เพื่อรักษาอุณหภูมิระหว่าง 28 - 30 °C ในบ่อเลี้ยงจำนวน 20 บ่อ ระบบควบคุมพัฒนาบนแพลตฟอร์ม Home Assistant โดยใช้โมดูล Tuya IoT ซึ่งควบคุมอุณหภูมิได้อย่างมีประสิทธิภาพตามเงื่อนไขที่กำหนดไว้ และช่วยให้มั่นใจได้ถึงการดำเนินงานที่เสถียรตลอดกระบวนการเลี้ยง ผลการทดสอบพบว่าเซนเซอร์ Tuya IoT มีความแม่นยำสูง ( $R^2 > 0.99$ , RMSE 0.496 °C, 0.0295 kW และ MAPE <2%) แสดงถึงความน่าเชื่อถือของระบบ ทั้งยังช่วยลดการใช้พลังงานจากโครงข่ายได้ 41.50 % การวิเคราะห์เพิ่มเติมชี้ว่าระบบสามารถผลิตไฟฟ้าได้ 7,570.63 kWh/ปี ลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก 3,784.56 kgCO<sub>2</sub>e/ปี และมีระยะเวลาคืนทุน 5.50 ปี สะท้อนถึงความเหมาะสมด้านเทคนิค เศรษฐศาสตร์ และสิ่งแวดล้อมในการประยุกต์ใช้กับฟาร์มชุมชน

**คำสำคัญ :** ฟาร์มเลี้ยงจิ้งหรีด; Tuya IoT; Home Assistant; ระบบผลิตไฟฟ้าและความร้อนพลังงานแสงอาทิตย์; ปั๊มความร้อน

<sup>1</sup> วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้

<sup>1</sup> School of Renewable Energy, Maejo University

\* Corresponding Author, Tel. 09 0330 2479, E - mail: sarawut\_p@mju.ac.th

## Abstract

Cricket farming in semi-closed systems requires maintaining an optimal temperature range, which typically demands high electricity consumption and increases production costs. Moreover, low-cost monitoring sensors used in agriculture have rarely been calibrated against standard instruments, and the integration of renewable energy with intelligent control systems for insect farming remains limited. This study presents a temperature monitoring and control system for cricket farms powered by a 4.4 kW<sub>p</sub> solar photovoltaic-thermal hybrid system (Solar PVT) and 10.8 kW<sub>th</sub> heat pump, designed to maintain the temperature of 20 rearing bins within 28 - 30 °C. The control system was developed on the Home Assistant platform with a Tuya IoT module, which effectively regulates the temperature according to predefined conditions, ensuring stable operation throughout the rearing process. Experimental results demonstrated that the Tuya IoT sensors achieved high accuracy ( $R^2 > 0.99$ , RMSE 0.496 °C, 0.0295 kW, and MAPE <2%), confirming the system's reliability. Furthermore, the system reduced grid electricity consumption by 41.5 %. Additional analysis indicated an annual electricity generation of 7,570.63 kWh, a reduction in greenhouse gas emissions of 3,784.56 kgCO<sub>2</sub>e/year, and a payback period of 5.5 years. These findings highlight the system's technical, economic, and environmental feasibility for adoption in community-scale cricket farms.

**Keywords:** Cricket Farming; Tuya IoT; Home Assistant; Solar Photovoltaic-Thermal (Solar PVT) Hybrid System; Heat Pump

## บทนำ

ภาคการเกษตรในปัจจุบันได้พัฒนาไปสู่รูปแบบที่พึ่งพาเทคโนโลยีมากขึ้น ไม่ว่าจะเป็นด้านการจัดการแหล่งน้ำ การควบคุมสภาพแวดล้อม หรือการเพิ่มประสิทธิภาพการผลิต หนึ่งในแนวทางที่ได้รับความสนใจคือการเพาะเลี้ยงแมลงเศรษฐกิจ เช่น จิ้งหรีด ซึ่งเป็นแหล่งโปรตีนทางเลือกที่ใช้ทรัพยากรอย่างมีประสิทธิภาพ อย่างไรก็ตาม การเลี้ยงจิ้งหรีดในโรงเรือนแบบกึ่งปิด โดยเฉพาะช่วงฤดูหนาวหรือในพื้นที่ที่มีความแปรปรวนของอากาศ จำเป็นต้องมีระบบควบคุมอุณหภูมิที่เหมาะสมซึ่งมักใช้พลังงานไฟฟ้าสูง ส่งผลให้ต้นทุนการผลิตเพิ่มขึ้น การตรวจวัดและวิเคราะห์การใช้พลังงานในระดับฟาร์มยังคงประสบปัญหา เช่น ขาดเครื่องมือวัดที่มีความแม่นยำและสามารถเข้าถึงได้แบบต้นทุนต่ำ หรือขาดระบบติดตามผลที่ใช้งานได้ต่อเนื่อง จึงทำให้ขาดข้อมูลเชิงประจักษ์ที่นำมาใช้ปรับปรุงการจัดการพลังงานได้อย่างเป็นระบบ ระบบมอนิเตอร์จึงเป็นทางเลือกสำคัญ โดยมีการประยุกต์ใช้หลากหลายระดับ เช่น (Thaipreecha and Puntusavase, 2023) ใช้ Google Data Studio และ Power BI เพื่อบริหารจัดการข้อมูลในโรงงาน (Maity et al., 2024; Anal and Kaur, 2024) พัฒนาเครื่องมือมอนิเตอร์สภาพการทำงานของเครื่องจักรเพื่อลดการหยุดชะงัก (Suwannahong, 2018; Bar-Gill et al., 2024) พัฒนาแดชบอร์ดสำหรับวิสาหกิจขนาดกลางและขนาดย่อม (Small and Medium Enterprises: SME) เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพธุรกิจ ในระดับครัวเรือนก็มีการนำมาใช้เพื่อลดค่าใช้จ่ายด้านพลังงาน เช่น (Mansattha et al., 2023; Naidu et al., 2024; G et al., 2024) ในภาคเกษตรกรรมเองมีการนำระบบมอนิเตอร์มาใช้ เช่น การตรวจวัดอุณหภูมิ ความชื้นในดิน การเคลื่อนไหวของสัตว์ (Naidu et al., 2024) การใช้เทคโนโลยีการสำรวจระยะไกลเพื่อประเมินผลผลิต (Verma et al., 2024; Omia et al., 2023; Hassan et al., 2021) และในประเทศไทยเองก็มีการพัฒนา เช่น ระบบติดตามโคเนื้อ (Suwannapong and Chaibong, 2015) และการตรวจวัดพลังงานในกระบวนการผลิตผัก (Salee et al., 2020) ซึ่งแสดงให้เห็นถึงความสำคัญของระบบมอนิเตอร์ต่อการบริหารจัดการต้นทุน พลังงาน และสิ่งแวดล้อมในภาคการเกษตร เทคโนโลยี Home Assistant ซึ่งเป็นแพลตฟอร์มโอเพนซอร์สสำหรับควบคุมอุปกรณ์

อัจฉริยะในบ้าน เริ่มได้รับความนิยมในงานวิจัย เช่น (Huang et al., 2023; Aavild et al., 2024; Islam et al., 2022) ด้วยข้อดีด้านต้นทุนต่ำ ความสามารถในการเชื่อมต่อกับ IoT และการแสดงผลที่เข้าใจง่าย จึงมีศักยภาพสูงในการประยุกต์ใช้กับฟาร์มระดับชุมชน โดยเฉพาะด้านการมอนิเตอร์พลังงานและสิ่งแวดล้อม จากการทบทวนวรรณกรรม พบว่ายังไม่มีรายงานการประยุกต์ใช้แพลตฟอร์ม Home Assistant สำหรับฟาร์มแมลงเศรษฐกิจโดยตรง อีกทั้งการใช้เซนเซอร์ IoT ราคาต่ำเพื่อมอนิเตอร์พลังงานและสภาพแวดล้อมยังไม่เคยมีการสอบเทียบกับเครื่องมือมาตรฐานในภาคเกษตรอย่างเป็นระบบ รวมถึงยังไม่ปรากฏงานวิจัยที่บูรณาการระบบผลิตไฟฟ้าและความร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ (Solar PVT) ร่วมกับปั๊มความร้อนและ IoT เพื่อควบคุมอุณหภูมิในฟาร์มจิ้งหรีดอย่างครบวงจร

ดังนั้นงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาระบบมอนิเตอร์พลังงานและสิ่งแวดล้อมสำหรับฟาร์มจิ้งหรีดระดับชุมชน โดยใช้แพลตฟอร์ม Home Assistant ร่วมกับอุปกรณ์ตรวจวัดต้นทุนต่ำ เพื่อประเมินความแม่นยำของเซนเซอร์ที่ใช้ตรวจวัดแรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า พลังงาน และอุณหภูมิเมื่อเปรียบเทียบกับเครื่องมือมาตรฐาน และเพื่อวิเคราะห์ศักยภาพของระบบในการช่วยเกษตรกรติดตามการทำงานของอุปกรณ์แบบเรียลไทม์และปรับปรุงการจัดการพลังงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ทั้งนี้งานวิจัยตั้งสมมติฐานว่า (1) ระบบมอนิเตอร์ที่พัฒนาขึ้นสามารถตรวจวัดและบันทึกค่าพลังงานและอุณหภูมิได้อย่างต่อเนื่องและเสถียร (2) เซนเซอร์ที่ใช้มีความแม่นยำไม่แตกต่างจากเครื่องมือมาตรฐาน โดยมีค่า RMSE ต่ำกว่า  $1^{\circ}\text{C}$  สำหรับอุณหภูมิ และ MAPE ต่ำกว่า 5 % สำหรับพลังงานไฟฟ้า และ (3) ระบบสามารถรักษาอุณหภูมิในบ่อเลี้ยงจิ้งหรีดให้อยู่ในช่วง  $28 - 30^{\circ}\text{C}$  ได้ตามเงื่อนไขที่กำหนด

## วิธีการดำเนินงานวิจัย

### 1. การออกแบบระบบตรวจวัดและควบคุมอุณหภูมิ

ระบบตรวจวัดและควบคุมอุณหภูมิภายในบ่อเลี้ยงจิ้งหรีดได้รับการออกแบบให้ใช้แหล่งพลังงานจากแผงผลิตไฟฟ้าและความร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ (Solar PVT) ร่วมกับปั๊มความร้อน หลักการทำงานเริ่มจากแผงผลิตไฟฟ้าและความร้อนดูดกลืนความร้อนจากรังสีอาทิตย์ถ่ายเทความร้อนให้กับน้ำโดยการหมุนเวียนด้วยปั๊มน้ำร้อนที่ 1 (Hot Water Pump-1) สำหรับผลิตน้ำร้อนไว้ในถังเก็บน้ำร้อนที่ 1 (Hot Water Tank-1) ขณะเดียวกันแผงเปลี่ยนแสงเป็นพลังงานไฟฟ้ากระแสตรงเข้าสู่อินเวอร์เตอร์ (Inverter) เปลี่ยนเป็นไฟฟ้ากระแสสลับจ่ายให้กับปั๊มความร้อนสำหรับผลิตน้ำร้อนไว้ในถังเก็บน้ำร้อนที่ 2 (Hot Water Tank-2) เมื่ออุณหภูมิอากาศในบ่อเลี้ยงจิ้งหรีด (Cricket Container) ต่ำกว่าเงื่อนไขที่กำหนดปั๊มน้ำที่ 3 (Hot Water Pump-3) ทำหน้าที่จ่ายน้ำร้อนจากถังเก็บน้ำร้อนที่ 1 เข้าสู่เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน (Heat Exchanger) ขณะเดียวกันพัดลม (Blower) ทำหน้าที่ดูดอากาศในบ่อเลี้ยงมารับความร้อนที่เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนเพื่อรักษาอุณหภูมิไว้ที่  $28 - 30^{\circ}\text{C}$  และเมื่อความร้อนในถังที่ 1 ไม่เพียงพอระบบควบคุมสมาร์ตสวิตช์ (SmartRelay Switch) จะสลับมาใช้ความร้อนในถังเก็บน้ำร้อนทันทีผ่านการทำงานของ (Solenoid Valves: SV) ผังการทำงานโดยรวมของระบบดังรูปที่ 1

การทำงานของระบบทั้งหมดถูกกำหนดเงื่อนไขตามอุณหภูมิและช่วงเวลา เพื่อให้สามารถใช้พลังงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ รายละเอียดเงื่อนไขการทำงานของอุปกรณ์แต่ละชนิดดังตารางที่ 1 และรายละเอียดของแหล่งผลิตและการเก็บน้ำร้อนดังตารางที่ 2

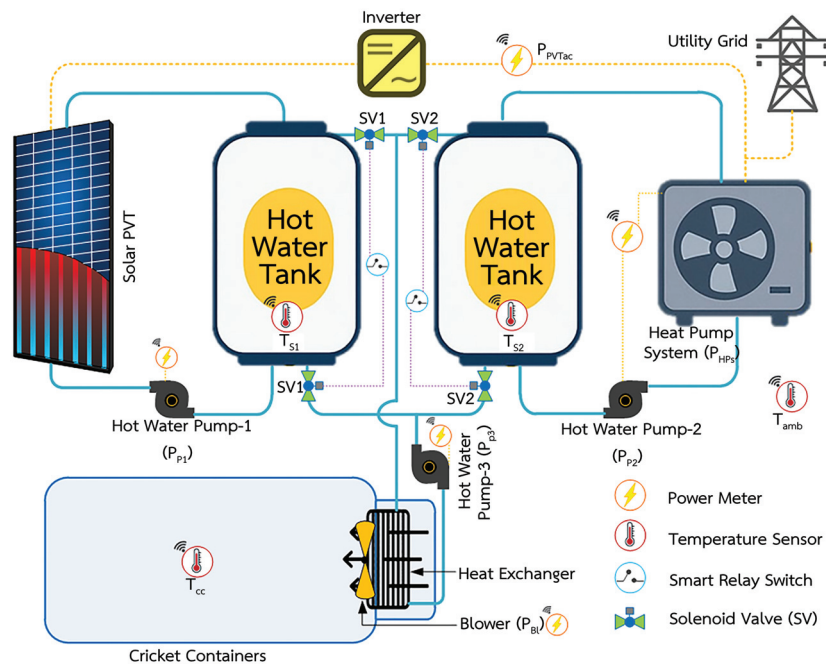
ตารางที่ 1 เงื่อนไขการทำงานของอุปกรณ์

| อุปกรณ์                       | เงื่อนไขการทำงาน                                                                   |                                       | ช่วงเวลา/กำลังไฟฟ้า                                                                                                            |
|-------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                               | ทำงาน                                                                              | หยุดทำงาน                             |                                                                                                                                |
| Hot Water Pump-1 ( $P_{P1}$ ) | -                                                                                  | -                                     | 10.30 - 15.30 น. (0.374 kW)<br>09.30 - 15.30 น. และ 02.30 - 05.30 น.<br>(ความร้อน 10.8 kWth)<br>(กำลังไฟฟ้าของระบบ 3 - 3.9 kW) |
| Heat Pump ( $P_{HPs}$ )       | $T_{S2} < 45\text{ }^{\circ}\text{C}$                                              | $T_{S2} > 55\text{ }^{\circ}\text{C}$ |                                                                                                                                |
| Hot Water Pump-3 ( $P_{P3}$ ) | $T_{cc} < 28\text{ }^{\circ}\text{C}$                                              | $T_{cc} > 30\text{ }^{\circ}\text{C}$ | 0.374 kW                                                                                                                       |
| Blower ( $P_{Bl}$ )           | $T_{cc} < 28\text{ }^{\circ}\text{C}$                                              | $T_{cc} > 30\text{ }^{\circ}\text{C}$ | 22 W $\times$ 3 ตัว/บ่อ<br>(รวม 1.32 kW)                                                                                       |
| SV1 : (Hot Water Tank-1)      | $T_{S1} > 32\text{ }^{\circ}\text{C}$                                              | $T_{S1} < 32\text{ }^{\circ}\text{C}$ | -                                                                                                                              |
| SV2 : (Hot Water Tank-2)      | $T_{S1} < 32\text{ }^{\circ}\text{C}$ และ<br>$T_{S2} > 32\text{ }^{\circ}\text{C}$ | $T_{S2} < 32\text{ }^{\circ}\text{C}$ | -                                                                                                                              |

ตารางที่ 2 แหล่งผลิตและเก็บน้ำร้อน

| องค์ประกอบ                      | รายละเอียด                                                      |
|---------------------------------|-----------------------------------------------------------------|
| ถังน้ำร้อน 1 (Hot Water Tank-1) | ความจุ 1,000 L รับน้ำร้อนจาก Solar PVT                          |
| ถังน้ำร้อน 2 (Hot Water Tank-2) | ความจุ 2,500 L รับน้ำร้อนจากปั๊มความร้อน                        |
| แผง Solar PVT                   | 8 แผง ขนาด 550 W (รวม 4.4 kWp) พื้นที่ 2.57 m <sup>2</sup> /แผง |
| การใช้น้ำร้อน                   | ใช้ถึงที่ 1 ก่อน หากต่ำกว่า 32 °C จึงสลับใช้ถึงที่ 2            |

ระบบตรวจวัดพลังงานและสิ่งแวดล้อม ประกอบด้วย วัดพลังงานไฟฟ้า วัดอุณหภูมิน้ำร้อน และวัดอุณหภูมิอากาศ ณ จุดต่าง ๆ อาศัย Tuya IoT Module ที่มีองค์ประกอบเป็นไมโครคอนโทรลเลอร์ (Microcontroller: MCU) เชื่อมต่อกับเซนเซอร์ตัววัดอุณหภูมิ DS18B20 เซนเซอร์วัดพลังงานไฟฟ้า 1 เฟส รุ่น ATMS1603 และรีเลย์ เป็นต้น ระบบมอนิเตอร์พลังงานและสิ่งแวดล้อมที่พัฒนาขึ้นในงานวิจัยนี้ มีเป้าหมายเพื่อตรวจสอบและบันทึกค่าพลังงานไฟฟ้าในระบบไฟฟ้าของอาคารและระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ และสภาพแวดล้อมภายในฟาร์มจิ้งหรีด โดยใช้แพลตฟอร์ม Home Assistant เป็นศูนย์กลางในการเชื่อมโยงและแสดงผลข้อมูลทั้งหมดผ่านแดชบอร์ดที่ผู้ใช้งานสามารถปรับแต่งเองได้

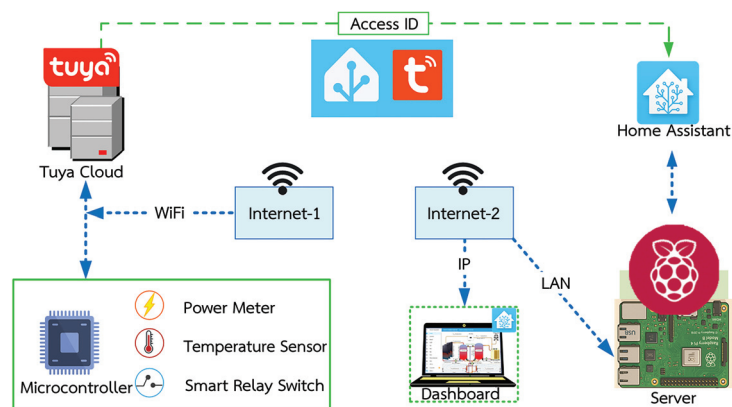


รูปที่ 1 ระบบควบคุมอุณหภูมิอากาศด้วยแหล่งความร้อนจากระบบผลิตไฟฟ้าและความร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับปั๊มความร้อน

## 2. การออกแบบระบบมอนิเตอร์และบันทึกข้อมูลบนแพลตฟอร์ม Home Assistant

หลักการทำงานของระบบมอนิเตอร์และบันทึกข้อมูลบนแพลตฟอร์ม Home Assistant ดังรูปที่ 2 การรับข้อมูลจากเซนเซอร์ผ่านระบบ Tuya: ระบบ Tuya เชื่อมต่อกับ Tuya Cloud ผ่านอินเทอร์เน็ต โดยทำหน้าที่เป็นศูนย์กลางในการจัดการข้อมูลและควบคุมอุปกรณ์ เมื่อผู้ใช้เรียกดูหรือสั่งงานผ่าน Home Assistant คำขอจะถูกส่งไปยัง Tuya Cloud ผ่าน Tuya Integration ซึ่งใช้ API ในการสื่อสาร หลังจากนั้น Tuya Cloud จะตอบกลับด้วยข้อมูลล่าสุด หรือส่งคำสั่งไปยังอุปกรณ์ปลายทาง และส่งสถานะกลับมาให้แสดงผลแบบเรียลไทม์ ผู้ใช้ต้องเชื่อมบัญชี Tuya กับ Home Assistant ด้วย Access ID เพื่อเปิดสิทธิ์เข้าถึงข้อมูล

การแสดงผลและควบคุมอุปกรณ์ผ่าน Home Assistant: Raspberry Pi 4 ทำหน้าที่เป็นเซิร์ฟเวอร์หลักที่ติดตั้ง Home Assistant พร้อมแดชบอร์ดสำหรับควบคุมและตรวจสอบอุปกรณ์ต่าง ๆ ภายในเครือข่าย โดยเชื่อมต่อผ่านเราเตอร์ที่กำหนด IP อัตโนมัติด้วย DHCP (เช่น <http://192.168.1.123:8123>) ผู้ใช้สามารถเข้าถึงระบบผ่านอุปกรณ์ที่อยู่ในเครือข่ายเดียวกัน เพื่อดูข้อมูลแบบเรียลไทม์ ทั้งนี้ควรกำหนด IP ให้คงที่ผ่าน Static IP หรือ DHCP Reservation เพื่อเสถียรภาพของระบบ



รูปที่ 2 ระบบมอนิเตอร์และบันทึกข้อมูลบนแพลตฟอร์ม Home Assistant

### 3. การหาความคลาดเคลื่อนของเซนเซอร์ตรวจวัดพลังงานและสิ่งแวดล้อม

#### 3.1) ค่าความผิดพลาดสัมบูรณ์เฉลี่ย (Mean Absolute Error: MAE)

การหาค่าเฉลี่ยของข้อผิดพลาดในชุดค่าทำนายโดยไม่คำนึงถึงทิศทางของข้อผิดพลาด โดยวัดเป็นความแตกต่างสัมบูรณ์เฉลี่ยระหว่างค่าที่ของอุปกรณ์ที่เลือกใช้ประโยชน์กับค่าที่ได้จากเครื่องมือที่มีการทดสอบมาตรฐานสามารถหาได้จากสมการที่ (1)

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i - x_i| \quad (1)$$

#### 3.2) เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์ (Mean Absolute Percent Error: MAPE)

วิธีนี้จะคำนวณจากผลรวมของค่าสัมบูรณ์ของค่าที่เกิดขึ้นจริงจากเครื่องมือที่มีการทดสอบมาตรฐาน ลบด้วยค่าอุปกรณ์ที่นำมาใช้ประโยชน์หารด้วยค่าที่เกิดขึ้นจริงจากเครื่องมือที่มีการทดสอบมาตรฐาน คูณร้อยและหารด้วยจำนวนข้อมูลทั้งหมด สามารถหาได้จากสมการที่ (2)

$$MAPE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|y_i - x_i|}{y_i} \times 100 \quad (2)$$

เมื่อ

$n$  คือ จำนวนข้อมูลทั้งหมด  
 $y_i$  คือ พารามิเตอร์จากเซนเซอร์  
 $x_i$  คือ พารามิเตอร์จากเครื่องมือที่ได้มาตรฐานการทดสอบ

#### 3.3) รากที่สองของค่าความผิดพลาดเฉลี่ย (Root Mean Squared Error: RMSE)

เป็นตัววัดความแตกต่างระหว่างค่าที่คาดการณ์ไว้และค่าที่สังเกตได้ โดยทั่วไปใช้เพื่อประเมินประสิทธิภาพของการสอบเทียบของอุปกรณ์ ค่ารากที่สองของค่าความผิดพลาดเฉลี่ยยิ่งน้อย แสดงว่าอุปกรณ์ที่เลือกใช้มีความถูกต้องและแม่นยำ สามารถหาได้จากสมการที่ (3)

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - x_i)^2}{n}} \quad (3)$$

### 4. การเก็บข้อมูล

4.1) การสอบเทียบอุณหภูมิทำการทดสอบโดยใช้น้ำเป็นตัวกลาง เริ่มต้นที่อุณหภูมิ 8.3 °C และเพิ่มอุณหภูมิจนถึง 83.7 °C โดยทำการบันทึกข้อมูลจากเซนเซอร์ Tuya IoT Module สอบเทียบค่าอุณหภูมิใช้เทอร์โมคัปเปิลชนิดเค (Thermocouple Type K) เชื่อมต่อกับเครื่องบันทึกอุณหภูมิ Lutron TM-1947SD ผ่านการทดสอบคุณภาพมาตรฐาน ISO 9001 ทุก ๆ 1 นาที โดยทำการทดสอบซ้ำจำนวน 3 ครั้ง เพื่อนำผลมาเปรียบเทียบและวิเคราะห์ค่าความคลาดเคลื่อน

4.2) การสอบเทียบทางไฟฟ้าทำการตรวจวัดค่ากำลังไฟฟ้าของอุปกรณ์ไฟฟ้าหลากหลายชนิด โดยมีช่วงกำลังไฟฟ้าตั้งแต่ 0.19 - 3.22 kW ข้อมูลจากเซนเซอร์ Tuya ถูกเปรียบเทียบกับค่าที่วัดได้จากเครื่องบันทึกและวิเคราะห์ HIOKI PQ3100 Series Power Quality Analyzer ซึ่งมีความน่าเชื่อถือเนื่องจากมีมาตรฐานระดับ Class S (IEC61000-4-30) ทุก ๆ 1 นาที โดยทำการทดสอบซ้ำจำนวน 3 ครั้ง เพื่อประเมินความแม่นยำของการตรวจวัดพลังงานไฟฟ้า

4.3) การทดลองดำเนินการในฟาร์มเลี้ยงจิ้งหรีดระดับชุมชน ณ กวินธิดาฟาร์ม อำเภอสนักำแพง จังหวัดเชียงใหม่ โดยนำเสนอตัวอย่างข้อมูลจำนวน 3 วัน ในช่วงฤดูหนาว เพื่อประเมินระบบควบคุมสภาพอากาศในบ่อเลี้ยงจิ้งหรีด ข้อมูลที่เก็บประกอบด้วย อุณหภูมิภายในบ่อเลี้ยงจิ้งหรีด ( $T_{cc}$ ) อุณหภูมิน้ำในถังเก็บน้ำร้อน ( $T_{s1}$  และ  $T_{s2}$ )

อุณหภูมิอากาศแวดล้อม ( $T_{amb}$ ) และกำลังไฟฟ้าของอุปกรณ์ ซึ่งตรวจวัดด้วยเซนเซอร์ของระบบ Tuya IoT เชื่อมต่อกับแพลตฟอร์ม Home Assistant ข้อมูลถูกบันทึกแบบเรียลไทม์ทุก 5 นาที และจัดเก็บในรูปแบบไฟล์ .csv เพื่อนำไปวิเคราะห์หาค่าพลังงานไฟฟ้า พลังงานความร้อน และการควบคุมอุณหภูมิในบ่อเลี้ยงจิ้งหรีด

### 5. การวิเคราะห์ด้านพลังงาน

การวิเคราะห์พลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จากระบบผลิตไฟฟ้าและความร้อนพลังงานแสงอาทิตย์และพลังงานไฟฟ้าจากภาระโหลดที่ใช้ในระบบ สามารถหาได้จากสมการที่ (4)

$$E = P \times t_{OP} \quad (4)$$

เมื่อ

|          |     |                                      |
|----------|-----|--------------------------------------|
| $E$      | คือ | พลังงานไฟฟ้า (kWh)                   |
| $P$      | คือ | กำลังไฟฟ้า (kW)                      |
| $t_{OP}$ | คือ | เวลาในการทำงานของระบบหรืออุปกรณ์ (h) |

การวิเคราะห์การผลิตและใช้ประโยชน์พลังงานความร้อนในถังเก็บน้ำร้อนที่ 1 ที่ผลิตจากระบบพลังงานแสงอาทิตย์สามารถหาได้จากสมการที่ (5) และการผลิตและใช้ประโยชน์พลังงานความร้อนของบิ๊มความร้อนสามารถหาได้จากสมการที่ (6)

$$Q_{SI} = M_1 C_{p_w} (T_{SI}^{t+\Delta t} - T_{SI}^t) \quad (5)$$

$$Q_{S2} = M_2 C_{p_w} (T_{S2}^{t+\Delta t} - T_{S2}^t) \quad (6)$$

เมื่อ

|                                            |     |                                                                           |
|--------------------------------------------|-----|---------------------------------------------------------------------------|
| $Q_{SI}, Q_{S2}$                           | คือ | พลังงานความร้อนของถังเก็บน้ำร้อนที่ 1 และถังเก็บน้ำร้อนที่ 2 (KJ)         |
| $M_1, M_2$                                 | คือ | ขนาดของถังเก็บน้ำร้อนที่ 1 และถังเก็บน้ำร้อนที่ 2 (kg)                    |
| $C_{p_w}$                                  | คือ | ค่าความจุความร้อนจำเพาะของน้ำ (kJ/kg · K)                                 |
| $T_{SI}^{t+\Delta t}, T_{S2}^{t+\Delta t}$ | คือ | อุณหภูมิในถังเก็บน้ำร้อนที่ 1 และถังเก็บน้ำร้อนที่ 2 ที่เวลาเปลี่ยนไป (K) |
| $T_{SI}^t, T_{S2}^t$                       | คือ | อุณหภูมิในถังที่ 1 และถังเก็บน้ำร้อนที่ 2 ณ เวลาเริ่มต้น (K)              |

### 6. การประเมินพลังงานไฟฟ้า การลดปริมาณความเข้มข้นของคาร์บอน และการประเมินผลทางเศรษฐศาสตร์

การศึกษานี้ได้ประเมินผลการลดการใช้ไฟฟ้าจากโครงข่ายการไฟฟ้า (Grid Electricity) ภายหลังจากติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าและความร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ (Solar PVT) ซึ่งเป็นพลังงานทดแทน โดยพิจารณาจากปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จริงจากระบบตลอดทั้งปี  $E_{PV/T,annual}$  ดังสมการที่ (7) การประเมินใช้ค่าประสิทธิภาพของระบบเฉลี่ยจากการทดสอบจริง ( $Eff_{sys} = 19.97\%$ ) และใช้ค่าความเข้มรังสีอาทิตย์จาก RETScreen Expert ที่ละติจูด  $18.8^\circ$  และลองจิจูด  $99.1^\circ$

$$E_{PV/T,annual} = Eff_{sys} \times A_{PV/T} \times N_{PV/T} \times G \quad (7)$$

เมื่อ

|            |     |                                    |
|------------|-----|------------------------------------|
| $A_{PV/T}$ | คือ | พื้นแผง Solar PVT ( $m^2$ )        |
| $N_{PV/T}$ | คือ | จำนวนแผง Solar PVT (panel)         |
| $G$        | คือ | ความเข้มรังสีอาทิตย์ ( $kWh/m^2$ ) |

จากสมการที่ (7) สามารถประเมินการลดปริมาณความเข้มข้นของคาร์บอนได้ดังสมการที่ (8) โดยใช้ค่า Emission factor ( $EF_{Elc}$ ) ของการประเมินคาร์บอนระดับองค์กร (Carbon Footprint for Organization: CFO) ที่มีค่าของการใช้พลังงานไฟฟ้าจากโครงข่ายการไฟฟ้าเท่ากับ  $0.4999 \text{ kgeqCO}_2/\text{kWh}$  อ้างอิงจากองค์การบริหารจัดการก๊าซเรือนกระจกแห่งประเทศไทย (อบก.) และสามารถหาผลประหยัดของค่าใช้จ่ายด้านพลังงานในสมการที่ (9) โดยใช้ค่าเฉลี่ยค่าไฟฟ้าของฟาร์มเลี้ยงจิ้งหรีด ( $C_{Elc}$ ) มีค่าเท่ากับ  $4.97 \text{ บาท/kWh}$

$$CO_2 = E_{PV/T, annual} \times EF_{Elc} \quad (8)$$

$$E_{Savi} = E_{PV/T, annual} \times C_{Elc} \quad (9)$$

เมื่อ  $E_{Savi}$  คือ ผลประหยัดของค่าใช้จ่ายด้านพลังงาน (บาท)

การประเมินผลทางเศรษฐศาสตร์ในงานวิจัยนี้เสนอผลการวิเคราะห์ระยะเวลาคืนทุน (Payback Period: PB) ดังสมการที่ (10)

$$PB = Inv / E_{Savi} \quad (10)$$

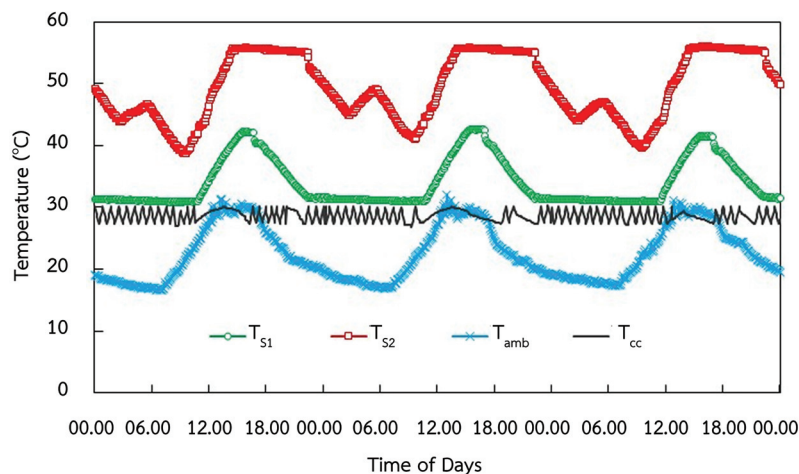
เมื่อ  $Inv$  คือ เงินลงทุนติดตั้งระบบ (บาท)

## ผลการศึกษา

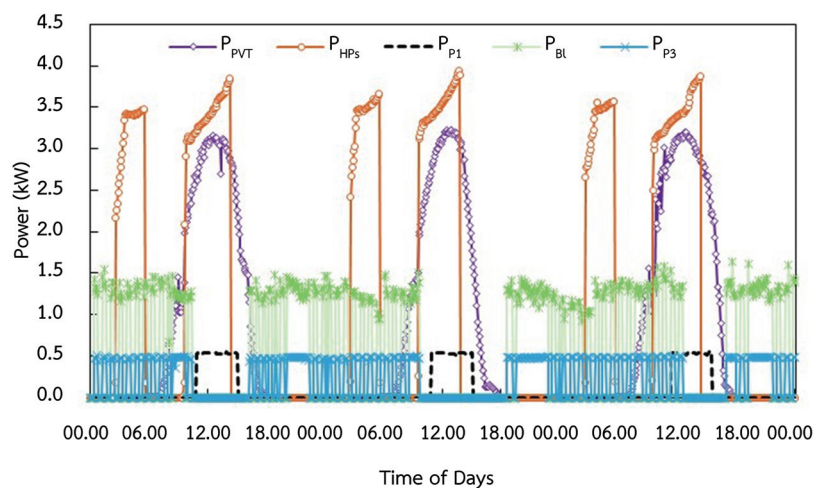
### 1. ผลของการตรวจวัดค่าอุณหภูมิและค่าทางไฟฟ้า

รูปที่ 3 แสดงผลการตรวจวัดค่าอุณหภูมิในถังเก็บน้ำร้อนที่ 1, 2 ( $T_{s1}$ ,  $T_{s2}$ ) อุณหภูมิอากาศแวดล้อม ( $T_{amb}$ ) และอุณหภูมิในบ่อเลี้ยงจิ้งหรีด ( $T_{cc}$ ) พบว่าอุณหภูมิอากาศแวดล้อมมีค่าระหว่าง  $16.6 - 32.1 \text{ }^{\circ}\text{C}$  และมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ  $22.5 \text{ }^{\circ}\text{C}$  ระบบผลิตน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ (Solar PVT) เริ่มผลิตน้ำร้อนตั้งแต่เวลา  $10.30 - 15.30 \text{ น.}$  สามารถเพิ่มอุณหภูมิของน้ำร้อนได้  $42 - 43 \text{ }^{\circ}\text{C}$  ขึ้นอยู่กับความเข้มรังสีอาทิตย์ในแต่ละวัน น้ำร้อนจากถังที่ 1 ถูกส่งผ่านเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนร่วมกับพัดลมดูดลมจากภายในบ่อเลี้ยงจิ้งหรีดเพื่อนำมาให้ความร้อน เพื่อรักษาอุณหภูมิที่  $28 - 30 \text{ }^{\circ}\text{C}$  สามารถดำเนินต่อเนื่องได้จนถึงเวลาประมาณ  $22.00 \text{ น.}$  หลังจากนั้นอุณหภูมิในถังลดลงจนไม่เพียงพอต่อการรักษาอุณหภูมิที่ต้องการ จึงต้องเปลี่ยนไปใช้ความร้อนจากระบบปั๊มความร้อนแทน

ระบบปั๊มความร้อนจะทำงานในสองช่วงเวลา ช่วงที่ 1 เวลา  $09.30 - 14.20 \text{ น.}$  ผลิตน้ำร้อนเก็บไว้ในถังที่ 2 ที่อุณหภูมิ  $55.5 - 56 \text{ }^{\circ}\text{C}$  โดยใช้พลังงานไฟฟ้าจากระบบ Solar PVT เป็นหลัก น้ำร้อนในถังเก็บน้ำร้อนที่ 2 ถูกใช้งานต่อจากถังเก็บน้ำร้อนที่ 1 จนอุณหภูมิต่ำกว่า  $45 \text{ }^{\circ}\text{C}$  จากนั้นถูกปั๊มความร้อนเสริมอุณหภูมิให้กับน้ำร้อน ช่วงที่ 2 เวลา  $02.30 - 05.30 \text{ น.}$  ผลิตน้ำร้อนที่อุณหภูมิ  $44.8 - 49.1 \text{ }^{\circ}\text{C}$  เนื่องจากอุณหภูมิอากาศแวดล้อมที่ลดลงทำให้เกิดการสูญเสียความร้อนในบ่อเลี้ยงจิ้งหรีด พลังงานความร้อนในการรักษาอุณหภูมิต้องใช้เพิ่มขึ้นเพื่อให้เพียงพอตลอดทั้งคืนและในช่วงเช้าของวันถัดไป โดยการป้อนความร้อนให้กับเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่เพียงพอทำให้สามารถรักษาอุณหภูมิได้ตามเงื่อนไขที่ต้องการ และจากการสังเกตพฤติกรรมของระบบพบว่า ในช่วงเวลา  $10.30 - 16.00 \text{ น.}$  ระบบไม่มีความจำเป็นต้องจ่ายความร้อนเข้าสู่บ่อเลี้ยงจิ้งหรีด เนื่องจากอุณหภูมิอากาศแวดล้อมสูงกว่า  $28 \text{ }^{\circ}\text{C}$  ซึ่งอยู่ในช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสมทำให้ไม่มีการสูญเสียความร้อนออกจากบ่อเลี้ยง ส่งผลให้ระบบไม่ต้องเสริมพลังงานความร้อนเพิ่มเติมในช่วงเวลานี้ อย่างไรก็ตาม ในช่วงเวลาอื่น ๆ โดยเฉพาะกลางคืนและเช้ามืด ระบบมีการจ่ายน้ำร้อนเข้าสู่เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนอย่างต่อเนื่องเพื่อชดเชยความร้อนที่สูญเสียไป และรักษาอุณหภูมิภายในให้อยู่ในเงื่อนไขที่ต้องการ ซึ่งผลการใช้งานดังกล่าวสอดคล้องกับพฤติกรรมของการใช้กำลังไฟฟ้างดังรูปที่ 4



รูปที่ 3 ผลของการเปลี่ยนแปลงค่าอุณหภูมิน้ำร้อนและอุณหภูมิอากาศ



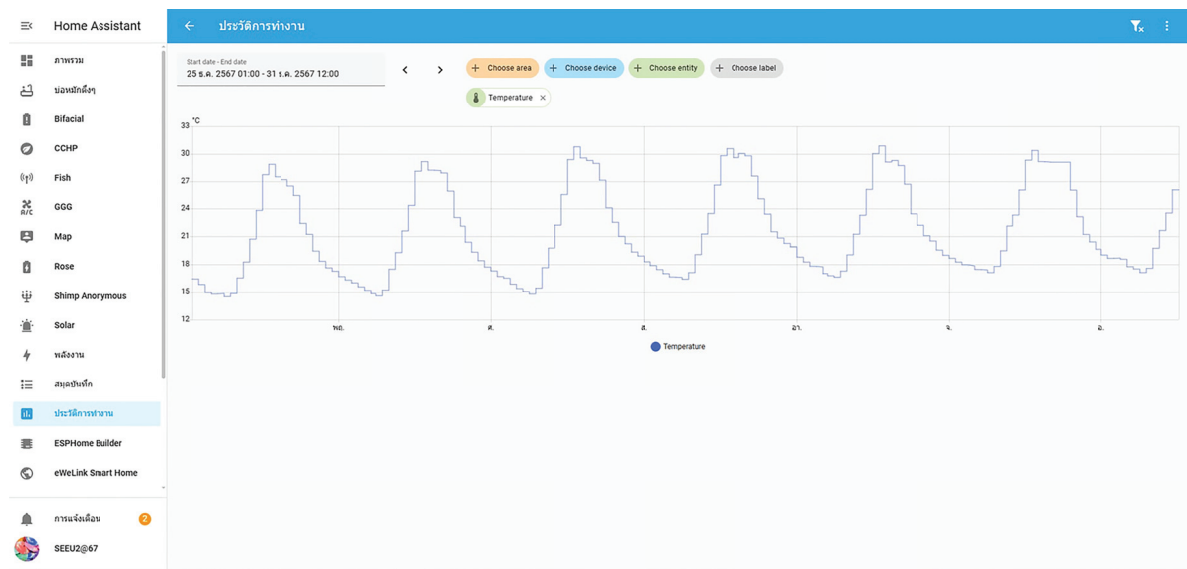
รูปที่ 4 พฤติกรรมกำลังไฟฟ้าของการผลิตไฟฟ้าและภาระโหลดทางไฟฟ้า

รูปที่ 4 พฤติกรรมการผลิตและการใช้กำลังไฟฟ้าของระบบในแต่ละวัน โดยระบบผลิตไฟฟ้าจากแผง Solar PVT เริ่มจ่ายไฟระหว่างเวลา 07.15 - 17.40 น. และมีกำลังไฟฟ้าสูงสุด 3.1 - 3.2 kW ช่วง 12.30 - 12.40 น. สำหรับปั๊มความร้อน ( $P_{HP1}$ ) ซึ่งประกอบด้วยคอมเพรสเซอร์ พัดลม และปั๊มน้ำร้อนที่ 2 แสดงพฤติกรรมการใช้ไฟฟ้าเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิในถังเก็บน้ำร้อนเนื่องจากคอมเพรสเซอร์ทำงานหนักขึ้น สำหรับอัดสารทำงานให้ความดันสูงขึ้นเพื่อให้สามารถควบแน่นและถ่ายเทความร้อนออกมาได้ในระดับอุณหภูมิที่สูงพอจึงมีการใช้กำลังไฟฟ้าเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิที่สูงขึ้น สอดคล้องกับงานของ Moon et al. (2024), Natale et al. (2025), Wanchupela and Polvongsri (2021) โดยกำลังไฟฟ้าสูงสุดอยู่ที่ 3.8 - 3.9 kW ในช่วงที่ 1 และ 3.5 - 3.7 kW ในช่วงที่ 2 ขึ้นอยู่กับลักษณะการทำงานรายวัน ปั๊มน้ำร้อนที่ 1 ( $P_{P1}$ ) ใช้กำลังไฟฟ้าคงที่เฉลี่ย 0.53 kW จนถึงเวลา 15.30 น. ขณะที่ปั๊มน้ำร้อนที่ 3 ( $P_{P3}$ ) และพัดลมหมุนเวียนอากาศ ( $P_{B1}$ ) ทำงานตามเงื่อนไขอุณหภูมิภายในบ่อเลี้ยง กล่าวคือ เริ่มทำงานเมื่ออุณหภูมิต่ำกว่า 28 °C และหยุดเมื่อเกิน 30 °C โดยใช้กำลังไฟฟ้าเฉลี่ย 0.49 kW และ 1.3 kW ข้อมูลเหล่านี้สามารถใช้ในการวิเคราะห์การใช้พลังงานไฟฟ้าเชิงลึกได้ดังรูปที่ 7

## 2. ผลการตรวจวัดค่าพารามิเตอร์บนแพลตฟอร์ม

รูปที่ 5 ตัวอย่างการตรวจวัดค่าพารามิเตอร์ในระบบควบคุมอุณหภูมิภายในฟาร์มเลี้ยงจิ้งหรีด โดยใช้แพลตฟอร์ม Home Assistant สำหรับการติดตามค่าต่าง ๆ แบบเรียลไทม์ ประกอบด้วย รูปที่ 5(ก) ผลการตรวจวัดอุณหภูมิอากาศแวดล้อม แสดงให้เห็นความผันแปรของอุณหภูมิในแต่ละวัน โดยมีค่าสูงสุดและต่ำสุดที่เปลี่ยนแปลง

ตามช่วงเวลากลางวันและกลางคืน รูปที่ 5(ข) ผลการตรวจวัดอุณหภูมิน้ำในถังที่ 1 ซึ่งเป็นตัวแทนของแหล่งความร้อนที่เก็บสะสมไว้ โดยพบว่าอุณหภูมิน้ำมีลักษณะขึ้นลงตามช่วงเวลาการทำงานของระบบผลิตความร้อนจากระบบผลิตไฟฟ้าและความร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ รูปที่ 5(ค) ผลการตรวจวัดกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากระบบ Solar PVT ซึ่งแสดงการผลิตไฟฟ้าที่ใช้ในแต่ละวัน โดยมีกำลังการผลิตสูงสุดในช่วงเที่ยงถึงบ่ายของวัน ดังรูปที่ 3(ง) ผลการตรวจวัดกำลังไฟฟ้าที่ปั้มน้ำร้อนที่ 1 แสดงพฤติกรรมการใช้กำลังไฟฟ้าของระบบหมุนเวียนน้ำสำหรับผลิตน้ำร้อน



(ก) ผลการตรวจวัดอุณหภูมิอากาศแวดล้อม



(ข) ผลการตรวจวัดอุณหภูมิน้ำในถังที่ 1

รูปที่ 5 ตัวอย่างผลการตรวจวัดค่าพารามิเตอร์บนแพลตฟอร์ม



(ค) ผลการตรวจวัดกำลังไฟฟ้าจาก Solar PVT

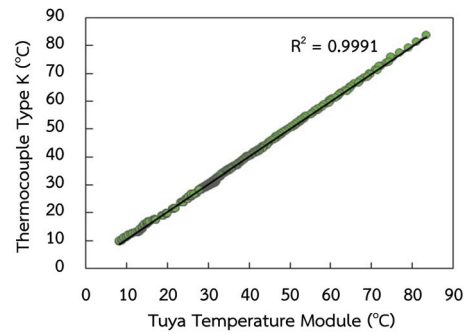
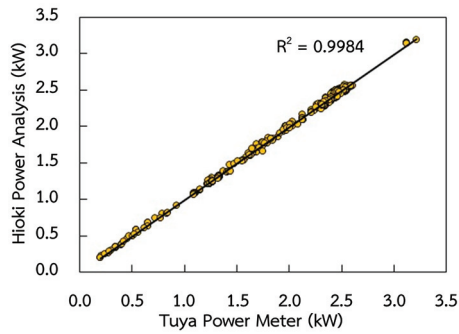


(ง) ผลการตรวจวัดกำลังไฟฟ้าของปั้มน้ำร้อนที่ 1

รูปที่ 5 ตัวอย่างผลการตรวจวัดค่าพารามิเตอร์บนแพลตฟอร์ม (ต่อ)

### 3. ผลการตรวจสอบความถูกต้องและความคลาดเคลื่อนของเซนเซอร์

การตรวจสอบความถูกต้องและความคลาดเคลื่อนของการสอบเทียบข้อมูลของเซนเซอร์ตรวจวัดกำลังไฟฟ้า และตรวจวัดอุณหภูมิได้ทำการวิเคราะห์การถดถอยของข้อมูล (Regression Analysis) เป็นการหาความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลที่ได้จากเซนเซอร์ (Tuya Sensor) และข้อมูลที่ได้จากเครื่องมือที่ได้ทดสอบตามมาตรฐานที่ได้รับการยอมรับ เพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ ( $R^2$  หรือ r-squared) ดังรูปที่ 6



(ก) การถดถอยแบบเชิงเส้นของค่ากำลังไฟฟ้า

(ข) การถดถอยแบบเชิงเส้นของค่าอุณหภูมิ

### รูปที่ 6 การวิเคราะห์การถดถอยแบบเชิงเส้นของข้อมูล

จากผลการวิเคราะห์ความสอดคล้องของข้อมูลระหว่างโมดูล Tuya และอุปกรณ์มาตรฐาน พบว่าความสัมพันธ์ระหว่างค่าที่อ่านจาก Tuya Power Meter และเครื่องวัดกำลังไฟฟ้าของ Hioki มีความสอดคล้องกันสูง โดยมีค่า  $R^2 = 0.9984$  ดังรูปที่ 6(ก) ในทำนองเดียวกันค่าที่ได้จาก Tuya Temperature Module เปรียบเทียบกับ Thermocouple Type K ให้ค่า  $R^2$  ที่สูงมากเช่นกันเท่ากับ 0.9991 ดังรูปที่ 6(ข) ผลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าอุปกรณ์ของระบบที่ใช้โมดูล Tuya มีความน่าเชื่อถือ ซึ่งสอดคล้องกับงานของ Araújo et al. (2020) นอกจากนี้ยังยืนยันความแม่นยำด้วยการหาค่าความคลาดเคลื่อนของข้อมูลดังตารางที่ 3

### ตารางที่ 3 ค่าความคลาดเคลื่อนของข้อมูล

| Error            | MAE    | RMSE   | MAPE   |
|------------------|--------|--------|--------|
| Power (kW)       | 0.0258 | 0.0295 | 1.45 % |
| Temperature (°C) | 0.357  | 0.496  | 1.67 % |

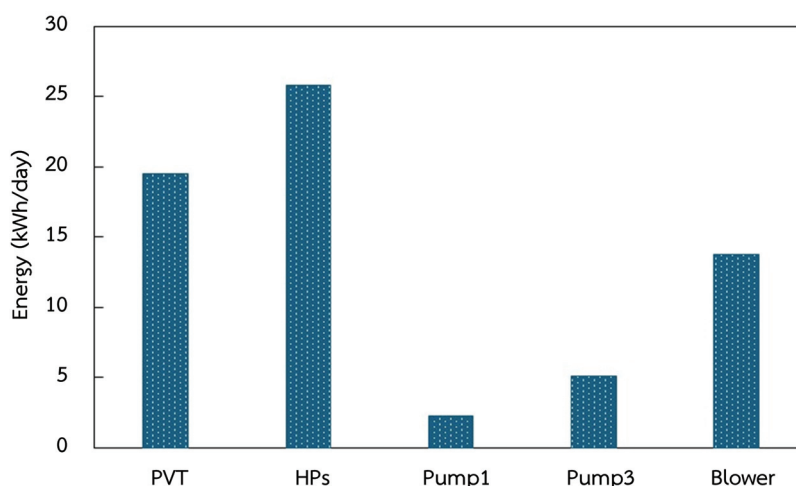
จากการประเมินความแม่นยำของเซนเซอร์ Tuya เทียบกับเครื่องมือที่ได้มาตรฐาน โดยใช้ตัวชี้วัดค่าความคลาดเคลื่อน ได้แก่ ค่าความผิดพลาดสัมบูรณ์เฉลี่ย (MAE) รากที่สองของค่าความผิดพลาดเฉลี่ย (RMSE) และเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์ (MAPE) ของค่ากำลังไฟฟ้าและอุณหภูมิพบว่า มีค่า MAE = 0.0258 kW และ 0.357 °C ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับงานของ Siswoyo (2025) ค่า RMSE = 0.0295 kW และ 0.496 °C และค่า MAPE = 1.45 % และ 1.67 % ค่าความคลาดเคลื่อนที่อยู่ในระดับต่ำดังกล่าว แสดงถึงความแม่นยำที่ดีของเครื่องมือซึ่งมีความเหมาะสมต่อการนำไปประยุกต์ใช้ในการควบคุมพลังงานและอุณหภูมิในระบบต่าง ๆ ความคลาดเคลื่อนดังกล่าวมีความนิยมใช้เป็นอย่างมาดงานวิจัยของ Phaphan and Phutthamat (2023), Koponen et al. (2020), Zhang et al. (2014) นอกจากการพัฒนากระบวนการควบคุมด้วย Tuya และ Home Assistant แล้ว งานวิจัยนี้ยังได้ทำการเปรียบเทียบกับระบบควบคุมและแพลตฟอร์มอื่นที่นิยมนำมาใช้ในงานสมาร์ทฟาร์ม เพื่อประเมินความแตกต่างด้านราคา ความง่ายในการใช้งาน ความยืดหยุ่นในการขยายระบบ รวมถึงความสามารถในการบำรุงรักษาโดยเกษตรกร ดังตารางที่ 4 พบว่า Tuya ร่วมกับ Home Assistant มีความเหมาะสมที่สุดสำหรับฟาร์มชุมชน เนื่องจากมีต้นทุนอุปกรณ์ต่ำ ใช้งานง่าย ไม่จำเป็นต้องมีทักษะการเขียนโปรแกรม และเกษตรกรสามารถบำรุงรักษาหรือเปลี่ยนอุปกรณ์ได้ด้วยตนเอง ต่างจากระบบอื่นที่มักต้องอาศัยผู้เชี่ยวชาญด้านเทคนิค ทำให้ระบบที่พัฒนาขึ้นมีความยั่งยืนมากกว่าในระยะยาว

#### ตารางที่ 4 การเปรียบเทียบระบบควบคุมและมอนิเตอร์

| ระบบควบคุม            | ราคาอุปกรณ์ (เบื้องต้น)                                        | ความง่ายในการใช้งาน                                           | การบำรุงรักษาโดยเกษตรกร                                                                                 | ความเหมาะสมกับฟาร์มชุมชน                               |
|-----------------------|----------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------|
| Tuya + Home Assistant | ต่ำ-ปานกลาง (อุปกรณ์ Tuya หาซื้อง่าย ราคาถูก เริ่มต้นหลักร้อย) | ง่าย (Dashboard พร้อมใช้, Integration อัตโนมัติ)              | <input checked="" type="checkbox"/> เกษตรกรสามารถเปลี่ยน/เพิ่มอุปกรณ์ได้เอง                             | เหมาะสมที่สุด: ต้นทุนคุ้มค่า ใช้งาน-ดูแลได้เอง         |
| Blynk IoT Platform    | ต่ำ-ปานกลาง (ESP8266/ESP32 + แอป Blynk, Subscription บางส่วน)  | ง่ายในส่วน การดูข้อมูลผ่านแอป แต่ ต้องเขียนโค้ด สำหรับอุปกรณ์ | <input checked="" type="checkbox"/> เกษตรกรทั่วไป บำรุงรักษาเองไม่ได้ ต้องพึ่งผู้ที่มีทักษะเขียนโปรแกรม | เหมาะกับฟาร์มทดลอง/งานวิจัย ไม่เหมาะเกษตรกรชุมชนโดยตรง |
| Node-RED + MQTT       | ต่ำ-ปานกลาง (ขึ้นกับ Server/Hardware)                          | ปานกลาง-ยาก (ต้องออกแบบ Flow เอง)                             | <input checked="" type="checkbox"/> เกษตรกรบำรุงรักษาเองไม่ได้ ต้องพึ่งนักพัฒนา                         | เหมาะกับงานวิจัย/ระบบทดลองเชิงวิศวกรรม                 |
| SCADA ขนาดเล็ก        | สูง (หลายหมื่น-แสนบาท)                                         | ปานกลาง (มี HMI สำเร็จรูป แต่ต้องฝึกใช้งาน)                   | <input checked="" type="checkbox"/> เกษตรกรดูแลเองไม่ได้ ต้องพึ่งวิศวกร/ช่างเทคนิค                      | ไม่เหมาะกับฟาร์มชุมชน ต้นทุนสูงเกิน                    |

#### 4. ผลการวิเคราะห์ด้านพลังงาน

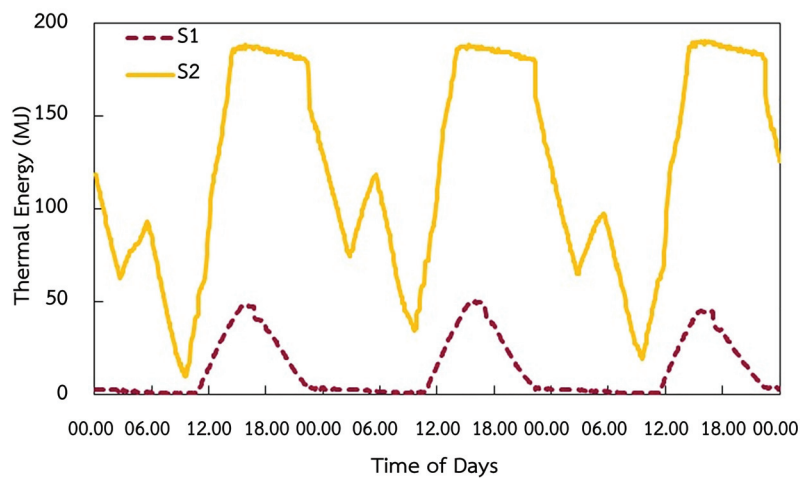
การวิเคราะห์ผลด้านพลังงานนำเสนอข้อมูลทางด้านพลังงานไฟฟ้าและความร้อนของทั้ง 3 วัน ดังรูปที่ 7 และ 8 โดยรูปที่ 7 แสดงปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จากระบบผลิตไฟฟ้าและความร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ (PVT) เฉลี่ย 19.5 kWh/day ขณะที่การใช้พลังงานไฟฟ้ารวมของอุปกรณ์ภายในระบบเฉลี่ย 46.97 kWh/day แบ่งเป็น ปั๊มความร้อน (HP) ปั๊มน้ำร้อนที่ 1 (Pump<sub>1</sub>) ปั๊มน้ำร้อนที่ 3 (Pump<sub>3</sub>) และพัดลมหมุนเวียนอากาศ (Blower) มีค่า 28.5 2.3 5.1 และ 13.8 kWh/day ตามลำดับ อุปกรณ์ที่ใช้พลังงานสูงสุดคือ ปั๊มความร้อน ซึ่งสอดคล้องกับรูปที่ 4 ที่แสดงให้เห็นถึงค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดในระบบ ขณะที่พัดลมหมุนเวียนอากาศ แม้จะใช้กำลังไฟฟ้าน้อยกว่าประมาณหนึ่งในสามของปั๊มความร้อน แต่ทำงานต่อเนื่องยาวนานจึงมีการใช้พลังงานรวมค่อนข้างสูง โดยรวมระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์สามารถช่วยลดการใช้พลังงานได้ประมาณ 41.5 % แต่เมื่อใช้นอกฤดูหนาวและจะสามารถช่วยลดการใช้พลังงานไฟฟ้าภายในฟาร์มได้มากกว่า 90 % เนื่องจากไม่ภาระโหลดที่สูงเช่นปั๊มความร้อนสามารถแสดงรายละเอียดการผลิตไฟฟ้าจากระบบพลังงานแสงอาทิตย์ตลอดทั้งปีดังรูปที่ 9



รูปที่ 7 พลังงานไฟฟ้าของการผลิตไฟฟ้าและภาระโหลดทางไฟฟ้า

รูปที่ 8 พฤติกรรมความร้อนในถังเก็บน้ำร้อนทั้งสองถัง โดยถังเก็บน้ำร้อนที่ 1 (S1) ได้รับความร้อนจากระบบผลิตไฟฟ้าและความร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ ซึ่งเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องจนถึงเวลาประมาณ 15:30 น. โดยมีพลังงานความร้อนอยู่ที่ 44.4 - 48.6 MJ ขึ้นอยู่กับความเข้มรังสีอาทิตย์และสภาพอากาศของแต่ละวัน หลังจากนั้น

ความร้อนจะถูกใช้งานต่อเนื่องจนลดลงใกล้ศูนย์ในเวลาประมาณ 22.30 น. และเริ่มผลิตใหม่ในวันถัดไป สำหรับถังเก็บน้ำร้อนที่ 2 (S2) ได้รับความร้อนจากปั๊มความร้อน ซึ่งเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องเช่นกันจนถึงเวลา 15.00 น. โดยมีพลังงานความร้อนสูงสุดประมาณ 187.2 MJ จากนั้นความร้อนลดลงจากการสูญเสียประมาณ 7.1 MJ และถูกนำไปใช้งานต่อจากถังเก็บน้ำร้อนที่ 1 ทำให้เหลืออยู่ประมาณ 62.2 - 74.1 MJ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความถี่ในการใช้งานและอุณหภูมิอากาศในแต่ละวัน ในช่วงเวลา 02.30 - 05.30 น. ถังปั๊มความร้อนเสริมพลังงานเข้าอีกครั้ง ทำให้ความร้อนเพิ่มขึ้นประมาณ 92 - 117 MJ ก่อนจะลดลงอีกเนื่องจากการใช้งานอย่างต่อเนื่อง โดยเฉพาะช่วงเวลา 04.00 - 08.00 น. ซึ่งมีความถี่ในการใช้ความร้อนสูง เพื่อรักษาอุณหภูมิในบ่อเลี้ยง ประกอบกับการสูญเสียความร้อนที่มากขึ้น ส่งผลให้ความร้อนคงเหลือเพียง 9.2 - 34.4 MJ และถูกเสริมด้วยปั๊มความร้อนอีกครั้งในช่วง 09.30 น. โดยความร้อนที่แสดงมีการประเมินดังตารางที่ 5



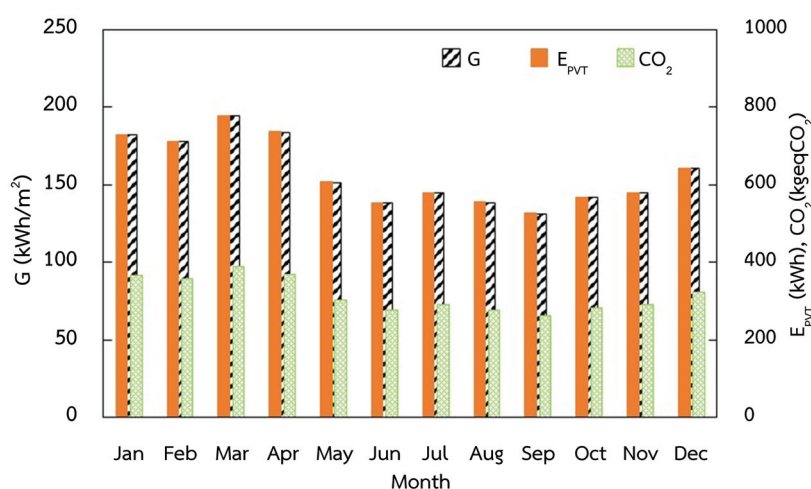
รูปที่ 8 พลังงานความร้อนที่ผลิตและใช้ประโยชน์ของระบบ

ตารางที่ 5 ค่าพารามิเตอร์และผลการคำนวณพลังงานความร้อน (ใช้ข้อมูลของวันที่ 1)

| คุณสมบัติ                                                                                    | ค่า               | หน่วย   |
|----------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------|---------|
| <u>ปริมาณความร้อนในถังเก็บน้ำร้อนที่ 1 (ช่วงเวลาที่ผลิตความร้อนตั้งแต่ 10.50 - 15.30 น.)</u> |                   |         |
| ขนาดของถังเก็บน้ำร้อนที่ 1 ( $M_1$ )                                                         | 1,000             | kg      |
| ค่าความจุความร้อนจำเพาะของน้ำ ( $C_{pw}$ )                                                   | 4.187             | kJ/kg·K |
| อุณหภูมิในถังเก็บน้ำร้อนที่ 1 ที่เวลาเปลี่ยนไป ( $T_{S1}^{t+\Delta t}$ ): ณ 15.30 น.         | 315.35            | K       |
| อุณหภูมิในถังที่ 1 ณ เวลาเริ่มต้น ( $T_{S1}^t$ ): ณ 10.50 น.                                 | 304.15            | K       |
| พลังงานความร้อนของถังเก็บน้ำร้อนที่ 1 ( $Q_{S1}$ )                                           | 46,894.4 / 1,000  | MJ      |
| <u>ปริมาณความร้อนในถังเก็บน้ำร้อนที่ 2 (ช่วงเวลาที่ผลิตความร้อนตั้งแต่ 09.30 - 14.30 น.)</u> |                   |         |
| ขนาดของถังเก็บน้ำร้อนที่ 2 ( $M_2$ )                                                         | 2,500             | kg      |
| ค่าความจุความร้อนจำเพาะของน้ำ ( $C_{pw}$ )                                                   | 4.187             | kJ/kg·K |
| อุณหภูมิในถังเก็บน้ำร้อนที่ 2 ที่เวลาเปลี่ยนไป ( $T_{S2}^{t+\Delta t}$ ): ณ 14.30 น.         | 328.75            | K       |
| อุณหภูมิในถังที่ 2 ณ เวลาเริ่มต้น ( $T_{S2}^t$ ): ณ 09.30 น.                                 | 311.85            | K       |
| พลังงานความร้อนของถังเก็บน้ำร้อนที่ 2 ( $Q_{S2}$ )                                           | 176,900.8 / 1,000 | MJ      |

## 5. ผลการประเมินพลังงาน ความเข้มข้นทางคาร์บอนรายปี และประเมินเศรษฐศาสตร์

ผลการวิเคราะห์ดังรูปที่ 9 แสดงให้เห็นว่าช่วงที่รังสีอาทิตย์มีค่าสูงเกิดขึ้นในเดือนมีนาคมมีค่าเท่ากับ  $194.4 \text{ kWh/m}^2$  เป็นช่วงที่ท้องฟ้าโปร่งใสทำให้ความเข้มข้นรังสีอาทิตย์มีค่าสูง ขณะที่ค่าต่ำสุดเกิดขึ้นในเดือนกันยายนเท่ากับ  $131.4 \text{ kWh/m}^2$  และมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ  $157.51 \text{ kWh/m}^2$  จากค่าเฉลี่ยความเข้มข้นรังสีอาทิตย์ของจังหวัดเชียงใหม่ นำมาคำนวณพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จากระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ และปริมาณการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก ปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้มีความสัมพันธ์โดยตรงกับค่าความเข้มข้นรังสีอาทิตย์ที่ตกกระทบ โดยเดือนมีนาคมให้ค่าพลังงานไฟฟ้าสูงที่  $778.52 \text{ kWh}$  สามารถลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกได้มากที่สุด  $389.18 \text{ kgCO}_2\text{eq}$  ขณะที่เดือนกันยายนซึ่งเป็นช่วงฤดูฝนมีค่าต่ำสุดอยู่ที่  $526.30 \text{ kWh}$  และ  $263.10 \text{ kgCO}_2\text{eq}$  และมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ  $630.89 \text{ kWh}$  และ  $377.65 \text{ kgCO}_2\text{eq}$  คิดตลอดทั้งปีระบบสามารถผลิตไฟฟ้าได้รวม  $7,570.63 \text{ kWh/ปี}$  และลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกได้รวม  $3,784.56 \text{ kgCO}_2\text{eq/ปี}$



รูปที่ 9 ค่าความเข้มข้นรังสีอาทิตย์ พลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ และการลดความเข้มข้นของปริมาณคาร์บอน

## ตารางที่ 6 ผลการประเมินความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์

| รายละเอียด                                                                                                                | เงินลงทุน<br>(บาท) | ผลประโยชน์ของค่าใช้จ่าย<br>ด้านพลังงาน : $E_{savi}$ (บาท/ปี) | ระยะเวลา<br>คืนทุน : PB (ปี) |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------|--------------------------------------------------------------|------------------------------|
| 1. แผง Solar PVT จำนวน 8 แผง                                                                                              | 80,000             |                                                              |                              |
| 2. ค่าอินเวอร์เตอร์และค่าติดตั้งระบบทางไฟฟ้า                                                                              | 60,800             |                                                              |                              |
| 3. ค่าติดตั้งระบบทางความร้อน ประกอบด้วย<br>ถังน้ำร้อนพร้อมฉนวน บิ๊มน้ำร้อน ระบบควบคุม<br>ระบบท่อน้ำร้อน และค่าติดตั้งระบบ | 66,080             | 37,626.1                                                     | 5.50                         |
| รวมเงินลงทุนทั้งหมด (Inv)                                                                                                 | 206,880            |                                                              |                              |

จากตารางที่ 6 แสดงรายละเอียดการลงทุนในการติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าและความร้อนด้วยแผง Solar PVT จำนวน 8 แผง พร้อมด้วยอุปกรณ์ประกอบ ได้แก่ อินเวอร์เตอร์และอุปกรณ์ติดตั้งระบบไฟฟ้า รวมถึงระบบควบคุมความร้อน ซึ่งประกอบด้วยถังเก็บน้ำร้อน และอุปกรณ์ควบคุมระบบการทำงานต่าง ๆ โดยมีมูลค่าการลงทุนรวมทั้งหมด 206,880 บาท ผลการคำนวณพบว่า ระบบดังกล่าวสามารถช่วยประหยัดค่าใช้จ่ายด้านพลังงานได้ประมาณ 37,626.1 บาทต่อปี มีระยะเวลาคืนทุนเท่ากับ 5.50 ปี

## สรุปผลการศึกษา

ระบบควบคุมและมอเตอร์อุณหภูมิในบ่อเลี้ยงจิ้งหรีดที่พัฒนาขึ้น ใช้พลังงานจากระบบผลิตไฟฟ้าและความร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ขนาด 550 W จำนวน 8 panel มีพื้นที่รับแสง 2.57 m<sup>2</sup>/panel ร่วมกับถังเก็บน้ำร้อนขนาด 1,000 L และปั๊มความร้อนขนาด 10.8 kW<sub>th</sub> ซึ่งเชื่อมต่อกับถังเก็บน้ำร้อนขนาด 2,500 L เพื่อจ่ายน้ำร้อนไปยังเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่ติดตั้งในบ่อเลี้ยงจิ้งหรีดจำนวน 20 บ่อ โดยมีเป้าหมายเพื่อควบคุมอุณหภูมิให้อยู่ในช่วง 28 - 30 °C พบว่าระบบพลังงานแสงอาทิตย์สามารถผลิตพลังงานความร้อน 48.6 MJ/day และผลิตพลังงานไฟฟ้า 19.5 kWh/day ซึ่งช่วยลดการใช้พลังงานรวมลงได้ 41.5 % ขณะที่ปั๊มความร้อนสามารถผลิตความร้อนสูงสุด 187.2 MJ/day ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่ใช้พลังงานมากที่สุดในระบบ

ระบบควบคุมอุปกรณ์ทั้งหมดทำงานผ่านโมดูล Tuya ที่เชื่อมต่อกับแพลตฟอร์ม Home Assistant เพื่อรวบรวมและแสดงผลข้อมูลแบบเรียลไทม์ในแดชบอร์ดเดียว สามารถตรวจสอบสถานะอุปกรณ์และพลังงานได้อย่างต่อเนื่อง ผลการสอบเทียบเซนเซอร์ Tuya แสดงความแม่นยำสูงเมื่อเทียบกับเครื่องมือมาตรฐาน ( $R^2 > 0.99$ ) โดยมีค่า RMSE 0.496 °C และ MAPE 1.67 % สำหรับอุณหภูมิ และ RMSE 0.0295 kW และ MAPE 1.45 % สำหรับพลังงานไฟฟ้า สะท้อนถึงความน่าเชื่อถือของระบบที่พัฒนาและสอดคล้องกับสมมติฐานการวิจัย

เมื่อเปรียบเทียบแพลตฟอร์มควบคุมพบว่า Tuya ร่วมกับ Home Assistant เหมาะสมที่สุดสำหรับฟาร์มชุมชน เนื่องจากมีต้นทุนต่ำ ใช้งานง่าย และเกษตรกรสามารถบำรุงรักษาได้เอง ผลการวิเคราะห์ศักยภาพการผลิตไฟฟ้าในพื้นที่เชียงใหม่พบว่าระบบสามารถผลิตไฟฟ้าได้ 7,570.63 kWh/ปี ลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกได้ 3,784.56 kgCO<sub>2</sub>e และ มีระยะเวลาคืนทุน 5.5 ปี สะท้อนถึงความเป็นไปได้ทั้งด้านเทคนิค เศรษฐศาสตร์ และสิ่งแวดล้อม

นอกจากนี้ งานวิจัยนี้ยังสามารถต่อยอดได้ในอนาคต โดยเฉพาะการขยายระบบไปยังฟาร์มขนาดใหญ่ที่มีจำนวนบ่อมากกว่า 20 บ่อ ซึ่งเป็นโอกาสในการพัฒนาให้ระบบควบคุมทำงานแบบสมาร์ตฟาร์มเต็มรูปแบบ เช่น การแบ่งโซนควบคุมหรือการใช้การพยากรณ์อากาศร่วมกับการควบคุมอุณหภูมิ เพื่อเพิ่มความแม่นยำ ประสิทธิภาพการใช้พลังงาน และความสะดวกต่อการใช้งานของเกษตรกรในระดับเชิงพาณิชย์

## กิตติกรรมประกาศ

คณะวิจัยขอขอบคุณ ทูสนับสนุนการศึกษาระดับบัณฑิตศึกษา ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2566 วิทยาลัยพลังงานทดแทนมหาวิทยาลัยแม่โจ้ ขอขอบคุณ สำนักงานพัฒนาการวิจัยการเกษตร (องค์การมหาชน) ที่สนับสนุนทุนวิจัย ปีงบประมาณ พ.ศ. 2567 ภายใต้โครงการระบบควบคุมอุณหภูมิและสภาพอากาศเพื่อเพิ่มผลผลิตในโรงเรือนเลี้ยงจิ้งหรีดด้วยเทคโนโลยีผลิตน้ำร้อนและไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับปั๊มความร้อน ขอขอบคุณ ฟาร์มจิ้งหรีดกวินิดา อำเภอสันกำแพง จังหวัดเชียงใหม่ ที่เอื้อเฟื้อสถานที่ในการศึกษา ขอขอบคุณหน่วยวิจัยด้านพลังงานและสิ่งแวดล้อมอัจฉริยะ วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้ ที่สนับสนุนอุปกรณ์ที่ใช้การทำวิจัยในครั้งนี้

## References

- Aavild, A.P., Rosenkrantz de Lasson, A., Moesgaard Andersen, C., Christensen, E., Moreschini, S., Hästbacka, D., Taibi, D. and Albano, M. (2024). *Distributed Home Automation with Home Assistant*. In Peltonen, E., Hyrynsalmi, S., Wagner, I., Rellermeyer, J. and Mohan, N. (Eds.), *IoT '24: Proceedings of the 14<sup>th</sup> International Conference on the Internet of Things* (pp. 206-212). <https://doi.org/10.1145/3703790.3703828>
- Anal, S. and Kaur, S. (2024). Live Data Monitoring in Industry. *International Journal for Research in Applied Science and Engineering Technology (IJRASET)*, 12(VI), 304-313. <https://doi.org/10.22214/ijraset.2024.63080>

- Araújo, T., Silva, L. and Moreira, A. (2020). Evaluation of Low-Cost Sensors for Weather and Carbon Dioxide Monitoring in Internet of Things Context. *IoT*, 1(2), 286-308. <https://doi.org/10.3390/iot1020017>
- Bar-Gill, S., Brynjolfsson, E. and Hak, N. (2024). Helping Small Businesses Become More Data-Driven: A FieldExperiment on eBay. *Management Science*, 70(11), 7345-7372. <http://doi.org/10.2139/ssrn.4400425>
- G, K., Ediga, P., S, A., P, A., T, S., Mittal, A., Rajvanshi, S. and Habelalmateen, M.I. (2024). Smart Energy Management: Real-Time Prediction and Optimization for IoT-Enabled Smart Homes. *Cogent Engineering*, 11(1). <https://doi.org/10.1080/23311916.2024.2390674>
- Hassan, S.I., Alam, M.M., Illahi, U., Al Ghamdi, M.A., Almotiri, S.H., and Su'ud, M.M. (2021). A Systematic Review on Monitoring and Advanced Control Strategies in Smart Agriculture. *IEEE Access*, 9, 32517-32548. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3057865>
- Huang, H., Yi, J., Gao, J., Liu, P., Meng, L., and Zou, H. (2023). Design of Smart Laboratory System Based on Home Assistant. *14<sup>th</sup> International Conference on Mechanical and Aerospace Engineering (ICMAE)*, 575-580. <https://doi.org/10.1109/ICMAE59650.2023.10424532>.
- Islam, M.T., Azad, M.S., Ahammed, M.S., Rahman, M.W., Azad, M.M., Nasir, M.K. (2022). *IoT Enabled Virtual Home Assistant Using Raspberry Pi*. In Majhi, S., Prado, R.P.d., Dasanapura Nanjundaiah, C. (Eds.), *Distributed Computing and Optimization Techniques. Lecture Notes in Electrical Engineering*, Vol. 903. Springer, Singapore. [https://doi.org/10.1007/978-981-19-2281-7\\_52](https://doi.org/10.1007/978-981-19-2281-7_52)
- Koponen, P., Ikäheimo, J., Koskela, J., Brester, C. and Niska, H. (2020). Assessing and Comparing Short Term Load Forecasting Performance. *Energies*, 13(8), <https://doi.org/10.3390/en13082054>
- Maity, A.K., Darshan, D. and Chauhan, K. (2024, November). IoT-Based Industrial Equipment Monitoring System: Revolutionizing Maintenance through Smart Data Analytics. *3<sup>rd</sup> International Conference on Optimization Techniques in the Field of Engineering (ICOFE-2024)*. <https://doi.org/10.2139/ssrn.5065523>
- Mansattha, M., Dao, H. and Jikaraji, A. (2023). Smart Meter Design for Energy Consumption Monitoring of Residential Premises. *Journal of Applied Research on Science and Technology (JARST)*, 22(2), 250745-250745. <https://ph01.tci-thaijo.org/index.php/rmutt-journal/article/view/250745/170681>
- Moon, K.A., Kim, S.B., Choi, H.U. and Choi, K.H. (2024). Experimental Study on the Heat Pump Performance Combined with Dual-Purpose Solar Collector. *Energies*, 17(12). <https://doi.org/10.3390/en17123038>
- Naidu, G.G.S., Patnaik, R.K., Kumar, R.Y. and Viswas, N. (2024). An Analysis of Energy Monitoring Solutions for Smart Home Applications. *International Research Journal of Modernization in Engineering Technology and Science*, 6(11), 5581-5588. [https://www.irjmets.com/uploadedfiles/paper/issue\\_11\\_november\\_2024/64692/final/fin\\_irjmets1732986336.pdf](https://www.irjmets.com/uploadedfiles/paper/issue_11_november_2024/64692/final/fin_irjmets1732986336.pdf)
- Natale, C., Dongellini, M., Naldi, C. and Morini, G.L. (2025). Evaluation of the Seasonal Energy Performance of a Dual-Source Heat Pump Through Dynamic Experimental Tests. *Energies*, 18(10). <https://doi.org/10.3390/en18102532>
- Omia, E., Bae, H., Park, E., Kim, M.S., Baek, I., Kabenge, I. and Cho, B.K. (2023). Remote Sensing in Field Crop Monitoring: A Comprehensive Review of Sensor Systems, Data Analyses and Recent Advances. *Remote Sensing*, 15(2). <https://doi.org/10.3390/rs15020354>

- Phaphan, W. and Phutthamat, W. (2023). The Comparison of Forecasting Models for Total Premiums of Life Insurance Companies in Thailand. *Huachiew Chalermprakiet Science and Technology Journal*, 9(2), 64-74. <https://ph02.tci-thaijo.org/index.php/scihcu/article/view/249738/169825>
- Salee, S., Wannaphrom, W., Ngandee, A., Krudngern, S., Thongpron, J. and Maungjai, W. (2020). The Monitoring for Control and Analysis of Electrical Energy used in Agricultural Production. Case Study of Product Building, Thung Luang Royal Project Foundation. *Journal of Agricultural Technology Research*, 3(1), 77-90. <https://so04.tci-thaijo.org/index.php/JIT/article/view/242010>
- Siswoyo, A. (2025). Optimization of Temperature Sensor Selection for Incubators: Real-Time Accuracy Analysis of DHT22, LM35, and DS18B20 in Controlled Environment Simulations. *Internet of Things and Artificial Intelligence Journal*, 5(1). <https://doi.org/10.31763/iota.v5i1.877>
- Suwannapong, C. and Chaiyong, W. (2015). The Application of Wireless Sensor Network to Monitor and Identify the Position of Beef Cattle in the Livestock Production. *Farm Engineering and Automation Technology Journal*, 1(1), 15-21. <https://ph02.tci-thaijo.org/index.php/featkku/article/view/175993>
- Suwannahong, P. (2018). *Dashboard Design for Data Analysis of Sale Promotion: A Case Study of a Commercial Bank* [Doctoral dissertation, Thammasat University]. Thammasat University Library. [https://ethesisarchive.library.tu.ac.th/thesis/2018/TU\\_2018\\_6023036137\\_9545\\_10069.pdf](https://ethesisarchive.library.tu.ac.th/thesis/2018/TU_2018_6023036137_9545_10069.pdf)
- Thaipreecha, W. and Puntusavase, K. (2023). Applying Dashboards for Manufacturing by Comparing Programs Used Between Google Data Studio and Microsoft Power BI. *Journal of Management Science Research, Surindra Rajabhat University*, 7(3), 39-53. <https://so02.tci-thaijo.org/index.php/jmsr/article/view/258426>
- Verma, Y., Verma, A., Chatterjee, S. and Sagar, P. (2024). *Remote Sensing Applications in Agriculture*. In Doggalli, G., Modi, R., Mistry, D.Y., Rathwa, M.K., and Mali, P.D. (Eds.), *Recent Trends in Agriculture* Vol. 13. (pp. 159-180). Integrated Publications.
- Wanchupela, N. and Polvongsri, S. (2021). Size and Type Optimization of Solar Photovoltaic Thermal Hybrid Assisted Heat Pump in Slaughterhouse. *Engineering Journal of Chiang Mai University*, 28(1), 127-140. <https://ph01.tci-thaijo.org/index.php/EngJCMU/article/view/244072/166124>
- Zhang, X., Zhang, T., Young, A.A. and Li, X. (2014). Applications and Comparisons of Four Time Series Models in Epidemiological Surveillance Data. *Plos one*, 9(2). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0088075>