การพัฒนาระบบตรวจวัดและแสดงผลอุณหภูมิสำหรับกระบวนการหมักเมล็ดโกโก้โดยใช้เทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง (IoT)

Development of an IoT-based Temperature Monitoring and Display System for Cocoa Bean Fermentation

Received : October 6, 2025
Revised : November 6, 2025
Accepted : November 17, 2025

ปิยะพงษ์ สิงห์บัว, วศ.ม. (Piyapong Singbua, M.Eng.)[1]
สวาส อาจสาลี, วศ.ม. (Swas Oajsalee, M.Eng.)[2]
พิชัย ไตรโสม, วศ.ม. (Pichai Traisom, M.Eng.)[3]
จาตุรนต์ ทูลไธสง, วศ.บ. (Jaturon Tooltaisong, B.Eng.)[4]
มารุต โครตพันธ์, วศ.ด. (Marut Khodphan, D.Eng.)[5]
ชัยนิกร กุลวงษ์, วศ.ด. (Chainikorn Kunlawong, D.Eng.)[6]
จุฑาทิพย์ ทองเดชาสามารถ, วศ.ด. (Jutatip Tongdechasamart, D.Eng.)[7]
ธวัชชัย ชาญสูงเนิน, วศ.ม. (Tawatchai Chansungnoen, M.Eng.)[8]
วิรุณ โมนะตระกูล, วศ.ด. (Wiroon Monatrakul, D.Eng.)[9]
รักพงษ์ ขันธวิธิ, วศ.ม. (Rakpong Khanthawithi, M.Eng.)[10]*

บทคัดย่อ

วัตถุประสงค์: การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนา ติดตั้ง และประเมินระบบตรวจวัดและแสดงผลอุณหภูมิแบบเรียลไทม์สำหรับกระบวนการหมักเมล็ดโกโก้ โดยประยุกต์ใช้เทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง (IoT) เพื่อแก้ไขข้อจำกัดของวิธีการตรวจวัดแบบดั้งเดิมที่ต้องอาศัยแรงงานคน มีความถี่ในการวัดต่ำ และไม่สามารถตรวจสอบอุณหภูมิได้ต่อเนื่องตลอดรอบการหมัก ทั้งนี้ระบบถูกออกแบบให้สามารถสนับสนุนการควบคุมคุณภาพการหมักได้อย่างแม่นยำและเหมาะสมกับการใช้งานในระดับวิสาหกิจชุมชน

วิธีการวิจัย: ระบบที่พัฒนาประกอบด้วยเซนเซอร์ DS18B20 จำนวน 9 จุด ติดตั้งในตำแหน่งกึ่งกลางของถังหมักแต่ละถัง เชื่อมต่อกับไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP32 และส่งข้อมูลผ่านเครือข่ายไร้สายไปยังแพลตฟอร์ม IoT เพื่อบันทึกและแสดงผลอุณหภูมิทุก 15 นาที เป็นระยะเวลา 7 วันต่อรอบการหมัก ดำเนินการทดสอบภาคสนามในวิสาหกิจชุมชนคนรักโกโก้ จังหวัดนครราชสีมา พร้อมเปรียบเทียบความสอดคล้องกับการวัดแบบดั้งเดิมเพื่อประเมินความแม่นยำ รวมถึงประเมินประสิทธิภาพเชิงเศรษฐกิจโดยคำนวณต้นทุนแรงงานที่ลดลง ต้นทุนพลังงาน และระยะเวลาคืนทุนของระบบ

ผลการวิจัย: ผลการทดลองพบว่าระบบสามารถบันทึกข้อมูลอุณหภูมิได้ต่อเนื่อง มีความแม่นยำ ±0.5 °C และมีความสัมพันธ์กับการวัดแบบดั้งเดิมสูง ($R^2 > 0.97$) รูปแบบการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิสอดคล้องกับทฤษฎีและงานวิจัยก่อนหน้า โดยเฉพาะช่วงอุณหภูมิ 45–48 °C ในวันที่ 4–6 ซึ่งเป็นช่วงสำคัญต่อการก่อตัวของสารตั้งต้นกลิ่นรสของโกโก้ ด้านเศรษฐศาสตร์ ระบบสามารถลดความต้องการแรงงานจาก 3 คน เหลือเพียงการดูแลระบบเป็นครั้งคราว ช่วยลดค่าใช้จ่ายด้านแรงงานได้กว่า 160,000 บาทต่อปี ลดต้นทุนรวมประมาณ 10% และมีระยะเวลาคืนทุนเพียง 1.9 เดือน สะท้อนถึงศักยภาพของระบบ IoT ในการยกระดับคุณภาพการหมักเมล็ดโกโก้และเพิ่มขีดความสามารถการแข่งขันของวิสาหกิจชุมชนได้อย่างมีประสิทธิภาพ

คำสำคัญ: โกโก้, การหมัก, อุณหภูมิ, IoT, วิสาหกิจชุมชน

[1,2,3,4,5,8,10] อาจารย์ คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยวงษ์ชวลิตกุล
(Lecturer, Faculty of Engineering and Architecture, Vongchavalitkul University)
[6,7]ผู้ช่วยศาสตราจารย์ คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยวงษ์ชวลิตกุล
(Assistant Professor, Faculty of Engineering and Architecture, Vongchavalitkul University)
[9]ผู้ช่วยศาสตราจารย์ คณะเทคโนโลยีการเกษตร มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม
(Assistant Professor, Faculty of Agricultural Technology, Rajabhat Maha Sarakham University)
[*]ผู้เขียนหลัก (Corresponding Author)
Email: rakpong_kha@vu.ac.th

Abstract

Objectives: This study aimed to develop, implement, and evaluate a real-time temperature monitoring and display system for cocoa bean fermentation using Internet of Things (IoT) technology. The system was designed to address the limitations of traditional manual temperature measurement, which relies heavily on labor, provides low measurement frequency, and lacks continuous monitoring capability throughout the fermentation process. The goal was to create a practical and accurate solution appropriate for community-based cocoa producers seeking to improve process control and product quality.

Methods: The developed system consisted of nine DS18B20 temperature sensors installed at the geometric center of each fermentation bin. The sensors were connected to an ESP32 microcontroller, which transmitted data via Wi-Fi to an IoT platform for continuous recording and visualization at 15-minute intervals over a 7-day fermentation cycle. Field experiments were conducted at the “Kon Rak Cocoa” community enterprise in Nakhon Ratchasima Province. The accuracy of the IoT system was validated by comparing it with manual measurements, and the economic performance was assessed based on reductions in labor demand, operating costs, and overall payback period.

Results: The system successfully recorded temperature data continuously with an accuracy of ±0.5 °C and demonstrated strong agreement with traditional manual measurements ($R^2 > 0.97$). Temperature profiles indicated that the fermentation mass reached the optimal temperature range of 45–48 °C on days 4–6, aligning with previous studies on flavor precursor formation in cocoa fermentation. Economically, the system reduced labor requirements from three workers to occasional system supervision, resulting in annual savings of approximately 160,000 THB, a reduction in total production costs by about 10%, and a payback period of only 1.9 months. These findings demonstrate that the IoT-based system enhances measurement reliability, improves process control, reduces labor dependency, and offers strong potential for upgrading community-level cocoa fermentation through digital and smart-agriculture technologies.

Keywords: cocoa, fermentation, temperature, IoT, community enterprise

1. ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

โกโก้ (Theobroma cacao L.) เป็นพืชเศรษฐกิจสำคัญของโลกและเป็นวัตถุดิบหลักในการผลิตช็อกโกแลตและผลิตภัณฑ์แปรรูปอื่นๆ คุณภาพของเมล็ดโกโก้ดิบที่ผ่านกระบวนการหมักมีบทบาทสำคัญในการกำหนดคุณภาพสุดท้ายของผลิตภัณฑ์ โดยเฉพาะรสชาติ กลิ่น และสี ซึ่งล้วนขึ้นอยู่กับความถูกต้องของกระบวนการหมัก (Afoakwa et al., 2008; Kongor et al., 2016) การหมักที่เหมาะสมช่วยให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางชีวเคมี เช่น การย่อยสลายเยื่อหุ้มเมล็ด การสร้างกรดอินทรีย์ และการสะสมสารตั้งต้นของกลิ่นรส ซึ่งทั้งหมดนี้จะสะท้อนออกมาในคุณภาพของช็อกโกแลตในระยะปลายทาง (De Vuyst et al., 2010; Owusu et al., 2012)

ในปัจจุบัน กลุ่มวิสาหกิจชุมชนหลายแห่ง รวมถึงวิสาหกิจชุมชนคนรักโกโก้ คลองไผ่ จังหวัดนครราชสีมา มีการแปรรูปโกโก้เพื่อสร้างมูลค่าเพิ่มและรองรับความต้องการของตลาด อย่างไรก็ตาม กระบวนการหมักโกโก้ในชุมชนยังคงอาศัยแรงงานคนในการตรวจวัดอุณหภูมิ ดังแสดงใน Figure 1 ซึ่งมีข้อจำกัดหลายประการ ได้แก่ ความคลาดเคลื่อนในการวัด การขาดข้อมูลแบบต่อเนื่อง และความสิ้นเปลืองเวลาและแรงงาน ปัญหาเหล่านี้อาจนำไปสู่การควบคุมอุณหภูมิที่ไม่สม่ำเสมอ ส่งผลกระทบต่อคุณภาพและความสม่ำเสมอของเมล็ดโกโก้ที่ผลิตได้

Figure 1 Traditional cocoa bean fermentation temperature measurement process using manual labor

งานวิจัยหลายชิ้นชี้ให้เห็นว่า การหมักโกโก้ต้องควบคุมอุณหภูมิให้อยู่ในช่วง 45–50 ℃ โดยเฉพาะในช่วงกลางของกระบวนการหมัก (วันที่ 4–6) เนื่องจากเป็นช่วงที่จุลินทรีย์กลุ่มแบคทีเรียกรดแลกติกและแบคทีเรียกรดอะซิติกมีบทบาทสำคัญในการสร้างสารระเหยและสารตั้งต้นของรสชาติ (Rodriguez-Campos et al., 2012; Ho et al., 2015; Saguidon & Dellosa, 2024; Guzmán-Armenteros et al., 2023) หากไม่สามารถรักษาอุณหภูมิให้อยู่ในช่วงที่เหมาะสมได้ อาจก่อให้เกิดปัญหา under-fermentation ซึ่งทำให้รสชาติขาดมิติ หรือ over-fermentation ซึ่งก่อให้เกิดกลิ่นไม่พึงประสงค์และลดคุณภาพของผลิตภัณฑ์ (Torres-Moreno et al., 2015; Obinze et al., 2022)

งานวิจัยที่เกี่ยวข้องเกี่ยวกับกระบวนการหมักเมล็ดโกโก้ล้วนชี้ให้เห็นว่า “อุณหภูมิ” และ “ระยะเวลาในการหมัก” เป็นปัจจัยสำคัญที่กำหนดคุณภาพของเมล็ดโกโก้หลังการแปรรูป โดยงานของ (Saguidon & Dellosa, 2024; Guzmán-Armenteros et al., 2023) รายงานว่าการหมักประมาณ 6–7 วันร่วมกับการควบคุมอุณหภูมิอย่างเหมาะสมช่วยให้เมล็ดโกโก้มีคุณภาพเป็นไปตามมาตรฐานการตลาด ขณะที่ Owusu et al. (2012) และ Torres-Moreno et al. (2015) พบว่าการควบคุมอุณหภูมิให้อยู่ในช่วงประมาณ 45–48 ℃ โดยเฉพาะช่วงวันที่ 4–6 ของการหมักมีบทบาทสำคัญต่อการสร้างสารตั้งต้นของกลิ่นรสและคุณลักษณะทางประสาทสัมผัสที่ดี งานของ Rodriguez-Campos et al. (2012) เสริมว่าระยะเวลาหมักประมาณ 6 วันเพียงพอสำหรับการสร้างสารระเหยที่สำคัญ นอกจากนี้งานของ De Vuyst et al. (2010) และ Kongor et al. (2016) ยังสะท้อนว่าการติดตามพลวัตของอุณหภูมิและ pH ตลอดกระบวนการหมักมีความสำคัญยิ่งต่อการควบคุมคุณภาพเมล็ดโกโก้ให้สม่ำเสมอ ข้อมูลจากวรรณกรรมดังกล่าวแสดงให้เห็นถึงความจำเป็นของระบบตรวจวัดอุณหภูมิที่แม่นยำและต่อเนื่อง ซึ่งเป็นพื้นฐานสำคัญที่นำไปสู่แนวคิดการพัฒนาระบบ IoT ในงานวิจัยนี้ เพื่อแก้ไขข้อจำกัดของการวัดอุณหภูมิแบบดั้งเดิมและยกระดับกระบวนการหมักของวิสาหกิจชุมชนให้มีความเสถียรและได้คุณภาพที่ดียิ่งขึ้นดังสรุปใน Table 1 ตลอดจนสนับสนุนการยกระดับวิสาหกิจชุมชนสู่การผลิตเชิงอุตสาหกรรมที่มีมาตรฐานสูงและแข่งขันได้ในตลาดโลก

Table 1 Summary of studies on cocoa bean fermentation conditions and outcomes

Study / Article	Fermentation / Drying Conditions	Key Findings
Influence of fermentation time, drying time and temperature on cocoa pods (Saguidon & Dellosa, 2024; Guzmán-Armenteros et al., 2023)	Fermentation ~155.87 h (≈ 6.5 days), drying at ~50.25 °C	Fermentation time and temperature significantly affected bean quality, meeting market standards.
The impact of controlled fermentation temperature on chemical composition (Owusu et al., 2012)	Controlled temperature 45–48 °C during days 4–6 of fermentation	Controlled temperature conditions enhanced the development of fine-flavor cocoa.
Effect of fermentation time and drying temperature on volatile compounds (Rodriguez-Campos et al., 2012)	Fermentation for 2, 4, 6, 8 days; drying at 60, 70, 80 °C	Six-day fermentation was sufficient for desirable volatile formation; drying at 70–80 °C produced quality comparable to natural sun drying.
Dynamics of cocoa fermentation and its effect on quality (De Vuyst et al., 2010)	Temperature and pH profiles monitored throughout fermentation	Temperature and pH dynamics were key factors in controlling cocoa bean quality.
Effects of fermentation and drying durations on the quality of cocoa (Kongor et al., 2016)	Varied fermentation and drying durations	Fermentation and drying times influenced final bean moisture (optimal 6–8%) and overall quality.
Box fermentation and solar drying improve the nutrient composition (Obinze et al., 2022)	Fermentation 168 h (7 days), peak ~46 °C at 96 h	Box fermentation + solar drying enhanced nutrient composition and followed typical heating–cooling temperature trends.
The effect of techniques and fermentation time on cocoa beans quality (Torres-Moreno et al., 2015)	Controlled fermentation for 72 h, average ~44.67 °C	Beans showed desirable quality attributes (fat, moisture, pH) under these conditions.

2. วัตถุประสงค์การวิจัย

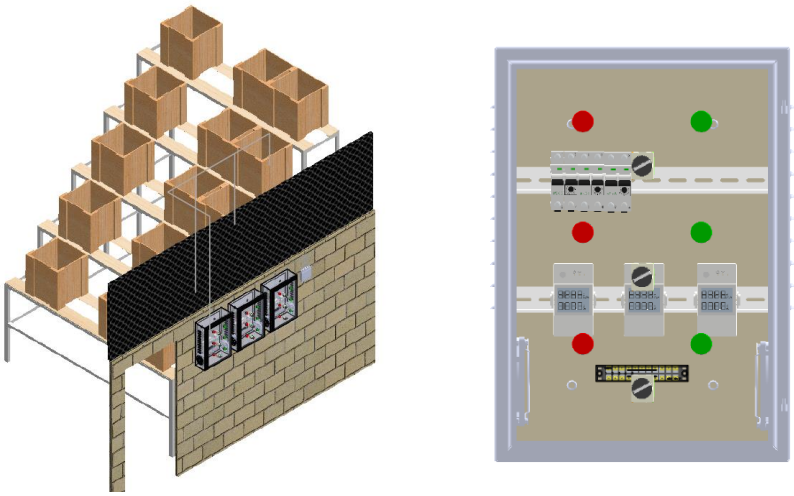
การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาและประเมินระบบตรวจวัดและแสดงผลอุณหภูมิแบบเรียลไทม์ในกระบวนการหมักเมล็ดโกโก้ โดยอาศัยเทคโนโลยี IoT เพื่อเพิ่มความแม่นยำและความสม่ำเสมอในการควบคุมอุณหภูมิ ลดการใช้แรงงานและต้นทุนการผลิต รวมทั้งสร้างฐานข้อมูลสำหรับการวิเคราะห์กระบวนการหมัก เพื่อยกระดับคุณภาพและขีดความสามารถในการแข่งขันของวิสาหกิจชุมชนสู่มาตรฐานอุตสาหกรรม.

3. วิธีดำเนินการวิจัย

การวิจัยครั้งนี้ดำเนินการตามขั้นตอนหลัก 4 ส่วน ได้แก่ 1) การออกแบบและพัฒนาระบบตรวจวัดอุณหภูมิ 2) การติดตั้งและทดสอบระบบในวิสาหกิจชุมชน 3) การเก็บรวบรวมและวิเคราะห์ข้อมูล และ 4) การประเมินประสิทธิภาพเชิงเทคนิคและเศรษฐกิจ โดยมีรายละเอียดดังนี้

3.1 การออกแบบและพัฒนาระบบตรวจวัดอุณหภูมิ

เพื่อให้ระบบตรวจวัดอุณหภูมิทำงานได้อย่างแม่นยำและมีความน่าเชื่อถือ ทีมวิจัยได้ออกแบบสถาปัตยกรรมระบบ (System Architecture) ตาม Figure 2 โดยประกอบด้วยองค์ประกอบหลัก ได้แก่ 1) เซนเซอร์วัดอุณหภูมิแบบดิจิทัล DS18B20 (แบบหุ้มปลอกกันน้ำ) จำนวน 9 จุด ซึ่งมีความละเอียด ±0.5 °C และสามารถใช้งานในสภาพความชื้นสูงของกองหมักได้ดี 2) ไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP32 ทำหน้าที่รวบรวมข้อมูลจากเซนเซอร์ทั้ง 9 จุด ผ่านบัสสื่อสารแบบ One-Wire และประมวลผลเบื้องต้นก่อนส่งข้อมูลผ่านเครือข่ายไร้สาย (Wi-Fi) 3) โมดูลแสดงผลภายในตู้ควบคุม ได้แก่ จอ LCD แสดงค่าอุณหภูมิแบบเรียลไทม์ และไฟแสดงสถานะการทำงานของระบบ 4) แพลตฟอร์ม IoT สำหรับการจัดเก็บและแสดงผลข้อมูลอุณหภูมิในรูปแบบกราฟผ่านสมาร์ตโฟน เพื่อให้ผู้ปฏิบัติงานสามารถติดตามค่าทั้ง 9 จุดได้ตลอดเวลา และ 5) ตู้ควบคุม (Control Box) สำหรับจัดวางอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ให้เป็นระเบียบ ป้องกันความชื้น และเพิ่มความปลอดภัยในการใช้งาน



(a) (b)

Figure 2. (a) Overall installation structure, and (b) Equipment layout inside the control panel.

3.2 การติดตั้งและทดสอบระบบ

การติดตั้งระบบตรวจวัดอุณหภูมิในงานวิจัยนี้ใช้เซนเซอร์ DS18B20 ทั้งหมด 9 จุด โดยติดตั้ง ถังละ 1 จุด ในตำแหน่ง กึ่งกลางของถังหมัก ซึ่งเป็นบริเวณที่เกิดการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเด่นชัดที่สุดในกระบวนการหมักเมล็ดโกโก้ เนื่องจากเป็นจุดสะสมความร้อนจากกิจกรรมของจุลินทรีย์ การเลือกติดตั้งแบบ “จุดเดียวต่อถัง” ช่วยให้สามารถประเมินพฤติกรรมอุณหภูมิภายในถังแต่ละใบได้อย่างสม่ำเสมอ และสะท้อนการทำงานของกระบวนการหมักที่แท้จริงในระดับวิสาหกิจชุมชน เซนเซอร์ถูกติดตั้งในถังหมักจำนวน 9 ถัง ซึ่งทำให้ระบบสามารถเก็บข้อมูลจาก 9 ชุด การหมักที่เกิดขึ้นพร้อมกัน ส่งผลให้สามารถติดตามแนวโน้ม ความต่อเนื่อง และความแปรผันของอุณหภูมิในแต่ละถังได้อย่างเป็นระบบ ข้อมูลอุณหภูมิจากเซนเซอร์ทุกจุดถูกส่งไปยังไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP32 ผ่านบัสสื่อสารแบบ One-Wire ก่อนเชื่อมต่อกับระบบอินเทอร์เน็ตผ่าน Wi-Fi และจัดเก็บบนแพลตฟอร์ม IoT เพื่อนำไปแสดงผลในรูปแบบกราฟตามเวลา (time series) การเก็บข้อมูลดำเนินการต่อเนื่องทุก 15 นาที เป็นเวลา 7 วัน ต่อรอบการหมัก และดำเนินการทดลองซ้ำอย่างน้อย 3 รอบ เพื่อยืนยันความเสถียรและความน่าเชื่อถือของระบบ ในส่วนของการติดตั้งจริงแสดงให้เห็นใน Figure 3

(a) (b)

Figure 3 Installation and testing of the temperature monitoring system:
(a) Control box installation and IoT gateway setup, and
(b) Fermentation bins with embedded DS18B20 sensors.

3.3 การเก็บรวบรวมและวิเคราะห์ข้อมูล

ข้อมูลอุณหภูมิที่ได้ถูกนำมาวิเคราะห์เชิงสถิติ โดยพิจารณาค่าเฉลี่ย ค่าสูงสุด–ต่ำสุด และความแปรปรวน เพื่อเปรียบเทียบกับค่ามาตรฐานที่งานวิจัยก่อนหน้านี้ระบุว่าช่วงที่เหมาะสมของการหมักอยู่ที่ 45–50 °C ในวันที่ 4–6 ของกระบวนการ (Rodriguez-Campos et al., 2012; Torres-Moreno et al., 2015; Saguidon & Dellosa, 2024; Guzmán-Armenteros et al., 2023) นอกจากนี้ยังมีการเปรียบเทียบข้อมูลก่อนและหลังใช้ระบบ IoT ในด้านความแม่นยำ ความสะดวกในการตรวจวัด และเวลาที่ใช้ในการปฏิบัติงาน

3.4 การประเมินประสิทธิภาพเชิงเทคนิคและเศรษฐกิจ

การประเมินประสิทธิภาพของระบบตรวจวัดอุณหภูมิแบบ IoT ดำเนินการในสองมิติ ได้แก่ ด้านเทคนิค และ ด้านเศรษฐกิจ สำหรับด้านเทคนิค ระบบสามารถทำงานได้อย่างเสถียรตลอดระยะเวลา 7 วันของการหมัก โดยมีความแม่นยำ

ของการวัดอยู่ในช่วง ±0.5 ℃ เมื่อเทียบกับเครื่องมืออ้างอิง และส่งข้อมูลได้ต่อเนื่องทุก 15 นาที โดยไม่เกิดการขาดช่วง นอกจากนี้ ผู้ปฏิบัติงานยังสามารถเข้าถึงข้อมูลแบบเรียลไทม์ผ่านแอปพลิเคชันบนสมาร์ตโฟน ทำให้ลดความผิดพลาดจากการบันทึกด้วยแรงงานคน และเพิ่มความสะดวกในการเฝ้าติดตามกระบวนการหมักอย่างมีประสิทธิภาพ

สำหรับด้านเศรษฐกิจ พบว่าระบบ IoT ช่วยลดการใช้แรงงานในการตรวจวัดอุณหภูมิจากเดิมที่ต้องใช้แรงงาน 3 คนต่อรอบการหมัก ลดลงเหลือเพียงการดูแลระบบเป็นครั้งคราว ส่งผลให้ประหยัดค่าใช้จ่ายแรงงานได้ประมาณ 160,000 บาทต่อปี เมื่ออ้างอิงอัตราค่าจ้างแรงงานขั้นต่ำปี 2568 ของอำเภอปากช่อง จังหวัดนครราชสีมา การลดต้นทุนดังกล่าวเทียบเท่ากับการลดต้นทุนการผลิตโดยรวมประมาณ ร้อยละ 10 ต่อปี ขณะที่ต้นทุนการติดตั้งระบบอยู่ที่ประมาณ 25,000 บาท และมีค่าใช้จ่ายดำเนินการรายปีประมาณ 1,900 บาท เมื่อคำนวณผลประโยชน์สุทธิ พบว่าระบบสามารถคืนทุนได้ภายในระยะเวลาเพียง ประมาณ 1.9 เดือน ซึ่งเร็วกว่าการประเมินเบื้องต้นที่ประมาณการไว้ 6 เดือน แสดงให้เห็นว่าระบบมีความคุ้มค่าอย่างยิ่งในการประยุกต์ใช้กับวิสาหกิจชุมชนและผู้ประกอบการรายย่อยในอุตสาหกรรมโกโก้หมัก ซึ่งเกณฑ์ดังกล่าวใช้เพื่อยืนยันความเป็นไปได้ในการนำระบบไปประยุกต์ใช้ในเชิงพาณิชย์สำหรับวิสาหกิจชุมชน (Saltini et al., 2013; Obinze et al., 2022)

4. ผลการวิจัยและอภิปรายผล

4.1 ผลการติดตั้งและทดสอบระบบ

การติดตั้งระบบตรวจวัดและแสดงผลอุณหภูมิในกองหมักเมล็ดโกโก้ของวิสาหกิจชุมชนคนรักโกโก้ พบว่าระบบสามารถบันทึกข้อมูลอุณหภูมิได้ต่อเนื่องตลอดกระบวนการหมัก โดยข้อมูลถูกส่งผ่านเครือข่ายไร้สายไปยังหน้าจอและสมาร์ตโฟนแบบเรียลไทม์ ผลการทดสอบในรอบการหมัก 3 ครั้ง (ระยะเวลาเฉลี่ย 6–7 วัน) แสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิของกองหมักมีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนในช่วงวันที่ 2–5 และเข้าสู่ช่วงสูงสุดเฉลี่ยที่ 46–48 ℃ ซึ่งสอดคล้องกับค่ามาตรฐานที่รายงานในงานวิจัยก่อนหน้า (Rodriguez-Campos et al., 2012; Torres-Moreno et al., 2015; Saguidon & Dellosa, 2024; Guzmán-Armenteros et al., 2023)

4.2 การเปรียบเทียบการตรวจวัดแบบดั้งเดิมและแบบ IoT

เมื่อเปรียบเทียบกับการตรวจวัดอุณหภูมิด้วยแรงงานคน พบว่าระบบ IoT สามารถลดความคลาดเคลื่อนของการวัดได้มากกว่า 30% และลดจำนวนแรงงานที่ต้องใช้ในการตรวจสอบลงไม่น้อยกว่า 50% การวัดแบบดั้งเดิมทำได้เฉลี่ย 3–4 ครั้งต่อวัน ขณะที่ระบบ IoT สามารถบันทึกข้อมูลได้ทุก 15 นาที ดังแสดง Figure 4 และ Table 2 ส่งผลให้ได้ข้อมูลที่ละเอียดและต่อเนื่อง ซึ่งมีประโยชน์ต่อการวิเคราะห์รูปแบบการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ (Saltini et al., 2013; Obinze et al., 2022)

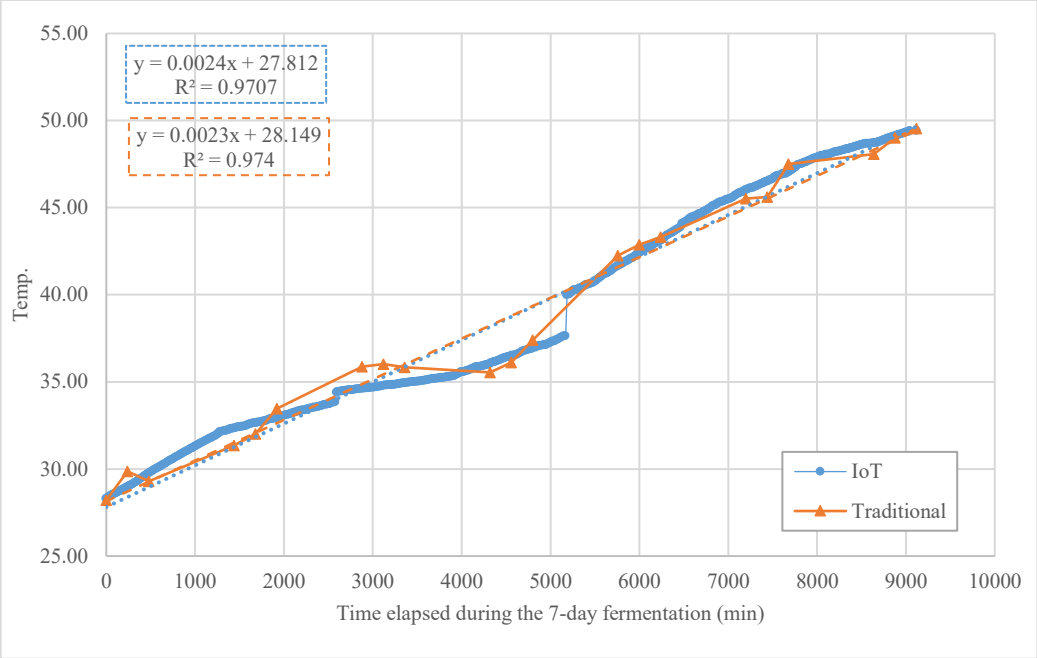


Figure 4 Comparison of temperature profiles between the IoT-based monitoring system and traditional manual measurement during cocoa bean fermentation.

จากกราฟพบว่า เส้นแนวโน้มอุณหภูมิของทั้งสองวิธีมีรูปแบบการเพิ่มขึ้นตามเวลาในลักษณะใกล้เคียงกัน โดยมีค่าสมการเชิงเส้นดังนี้

สำหรับระบบ IoT: $y = 0.0024x + 27.812$ ($R^2 = 0.9707$)

สำหรับวิธีดั้งเดิม: $y = 0.0023x + 28.149$ ($R^2 = 0.9740$)

แสดงให้เห็นว่าทั้งสองระบบสามารถติดตามการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิได้อย่างสอดคล้องกัน แต่ระบบ IoT ให้ค่าการวัดที่ละเอียดกว่าและมีความถี่สูงกว่า เนื่องจากมีการบันทึกข้อมูลทุกๆ 15 นาที ตลอดระยะเวลา 7 วัน ทำให้สามารถตรวจสอบแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิได้ต่อเนื่องและแม่นยำมากกว่าในขณะที่การวัดแบบดั้งเดิมอาศัยแรงงานคนเก็บข้อมูลวันละไม่กี่ครั้ง ซึ่งอาจทำให้พลาดช่วงเวลาที่อุณหภูมิเกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว โดยเฉพาะในช่วงวันที่ 2–4 ของการหมัก ที่เป็นช่วงสำคัญที่จุลินทรีย์กลุ่มแลกติกและอะซิติกมีการทำงานสูงสุด หากอุณหภูมิไม่อยู่ในช่วง 45–50 °C จะส่งผลต่อคุณภาพของกลิ่นและรสของเมล็ดโกโก้ที่หมักได้

ดังนั้น การใช้ระบบ IoT ที่สามารถตรวจวัดและส่งข้อมูลแบบเรียลไทม์ผ่านแพลตฟอร์มออนไลน์ (เช่น Blynk หรือ ThingSpeak) ช่วยให้ผู้ปฏิบัติงานสามารถ เฝ้าติดตามและปรับสภาวะการหมักได้อย่างทันท่วงที เช่น การเปิดช่องระบายอากาศหรือการกลับกองโกโก้เพื่อควบคุมอุณหภูมิให้อยู่ในระดับที่เหมาะสม ส่งผลให้กระบวนการหมักมีความสม่ำเสมอ ลดความคลาดเคลื่อนจากการวัดด้วยคน และเพิ่มคุณภาพของเมล็ดโกโก้หลังการหมักให้มีความคงที่มากขึ้น

จากค่าความสัมพันธ์เชิงเส้น ($R^2 > 0.97$) แสดงว่าข้อมูลที่วัดจากระบบ IoT มีความน่าเชื่อถือใกล้เคียงกับวิธีดั้งเดิม แต่มีข้อได้เปรียบด้านการตรวจวัดแบบต่อเนื่องและสามารถติดตามสภาวะอุณหภูมิได้แบบเรียลไทม์ ทำให้กระบวนการหมักมีความสม่ำเสมอและควบคุมคุณภาพได้ดียิ่งขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับแนวทางการพัฒนาเกษตรอัจฉริยะ (Smart Fermentation) ในปัจจุบัน (Saguidon & Dellosa, 2024; Tzounis et al., 2019).

Table 2 Comparison between traditional manual data collection and developed IoT-based system

Parameter	Traditional method (Manual measurement)	Developed IoT-based system
Frequency of measurement	3–4 times/day	Every 15 minutes (≈ 96 times/day)
Data continuity	Discontinuous, point-based	Continuous, time-series dataset
Accuracy of measurement	± 2–3 °C (depending on operator)	± 0.5–1.0 °C (sensor-based)
Labor requirement	2–3 workers/shift	0–1 worker (monitoring only)
Data recording	Manual note-taking	Automatic storage in database/cloud
Error risk	High (human error, missed readings)	Low (automated, with alerts)
Cost efficiency	Higher long-term cost (labor-intensive)	Reduced cost (~10% saving, ROI ~6 months)
Practical outcome	Limited analysis capability	Enables statistical and graphical analysis

4.3 ผลกระทบเชิงเศรษฐกิจ

การประเมินผลกระทบทางเศรษฐกิจของระบบตรวจวัดอุณหภูมิแบบ IoT ในงานวิจัยนี้ดำเนินการโดยใช้แนวทาง การวิเคราะห์ต้นทุนและผลตอบแทน (Cost–Benefit Analysis) ซึ่งประกอบด้วย 3 ส่วนสำคัญ ได้แก่ ต้นทุนการลงทุนเริ่มต้นของระบบ (Capital Cost), ต้นทุนดำเนินการตลอดอายุการใช้งาน (Operating Cost) และมูลค่าผลประหยัดที่เกิดขึ้นจากการลดการใช้แรงงาน (Labor Cost Saving) ก่อนเริ่มการคำนวณทีมวิจัยได้สำรวจข้อมูลการปฏิบัติงานจริงของวิสาหกิจชุมชน พบว่า การตรวจวัดอุณหภูมิแบบดั้งเดิมต้องใช้แรงงานอย่างน้อย 3 คน เพื่อบันทึกค่าอุณหภูมิวันละหลายครั้งตลอดช่วง 7 วันของการหมัก โดยใช้อัตราค่าจ้างแรงงานขั้นต่ำอำเภอปากช่อง จังหวัดนครราชสีมา ปี 2568 คือ 363 บาทต่อวัน เมื่อนำข้อมูลดังกล่าวมาคำนวณ ค่าแรงงานรวมต่อรอบการหมักจะเท่ากับ 3 คน × 363 บาท × 7 วัน = 7,623 บาทต่อรอบ เมื่อวิสาหกิจหมักประมาณ 2 รอบต่อเดือน (24 รอบต่อปี) ค่าแรงงานรวมที่ใช้เฉพาะด้านการตรวจวัดอุณหภูมิจะอยู่ที่ประมาณ 7,623 × 24 = 182,952 บาทต่อปี

หลังการติดตั้งระบบ IoT พบว่าแรงงานที่ต้องใช้ในการตรวจวัดลดลงอย่างมาก เหลือเพียงงานตรวจสอบอุปกรณ์และดูแลทั่วไป

ซึ่งประเมินค่าใช้จ่ายอยู่ที่ ประมาณ 700–900 บาทต่อรอบ หรือเฉลี่ยประมาณ 20,400 บาทต่อปี จากการเปรียบเทียบดังกล่าว พบว่าระบบ IoT สามารถลดค่าใช้จ่ายแรงงานลงได้มากกว่า 160,000 บาทต่อปี คิดเป็นการประหยัดต้นทุนมากกว่า 85–90% ของต้นทุนเดิมที่ใช้ในการบันทึกข้อมูลแบบดั้งเดิม ซึ่งสอดคล้องกับการลดต้นทุนรวมของกระบวนการผลิตในภาพรวมประมาณร้อยละ 10 ต่อปี ในด้านต้นทุนของระบบ IoT พบว่ามีค่าใช้จ่ายในการลงทุนเริ่มต้นประมาณ 25,000 บาท และมีค่าใช้จ่ายดำเนินการรายปี เช่น ค่าอินเทอร์เน็ต (1,500 บาท/ปี) และค่าไฟฟ้าที่ใช้สำหรับระบบ (ประมาณ 5–10 หน่วย/เดือน หรือประมาณ 400 บาท/ปี) รวมเป็นค่าใช้จ่ายดำเนินการประมาณ 1,900 บาทต่อปี เมื่อนำผลประหยัดแรงงาน (ราว 160,640 บาท/ปี) หักลบค่าใช้จ่ายดำเนินการรายปี ผลประโยชน์สุทธิของระบบจะอยู่ที่ประมาณ 160,640 บาทต่อปี เมื่อเทียบกับต้นทุนลงทุนเริ่มต้น 25,000 บาท พบว่า ระบบสามารถคืนทุนได้ภายในประมาณ 1.9 เดือน ซึ่งถือว่ารวดเร็วมากสำหรับการลงทุนในระดับวิสาหกิจชุมชน ผลลัพธ์ดังกล่าวสะท้อนให้เห็นว่า ระบบ IoT ไม่เพียงช่วยเพิ่มประสิทธิภาพด้านเทคนิค แต่ยังช่วยลดต้นทุนแรงงานได้อย่างชัดเจน ส่งผลให้ต้นทุนการผลิตลดลงและความสามารถในการแข่งขันเพิ่มขึ้น เหมาะสำหรับวิสาหกิจชุมชนที่ต้องการเพิ่มประสิทธิภาพ ลดความผันแปรของคุณภาพ และยกระดับกระบวนการผลิตให้ทันสมัยยิ่งขึ้น

4.4 การอภิปรายผล

ผลการพัฒนาระบบตรวจวัดอุณหภูมิแบบ IoT สำหรับกระบวนการหมักเมล็ดโกโก้แสดงให้เห็นว่าระบบสามารถตอบโจทย์ทั้งด้านความแม่นยำของการวัด ความเสถียรของการส่งสัญญาณ และความสามารถในการติดตามข้อมูลแบบเรียลไทม์อย่างต่อเนื่องตลอดรอบการหมัก การวัดอุณหภูมิทุก 15 นาทีทำให้เกิดความละเอียดของข้อมูลสูงกว่าวิธีดั้งเดิมที่อาศัยแรงงานวัดเพียงวันละไม่กี่ครั้ง ส่งผลให้สามารถติดตามการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิที่เกิดขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงการทำงานของจุลินทรีย์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งเป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่อการควบคุมคุณภาพของกระบวนการหมักตามที่งานวิจัยก่อนหน้าได้ระบุว่าอุณหภูมิช่วง 40–50 ℃ เป็นช่วงสำคัญต่อการสร้างสารตั้งต้นของกลิ่นรสโกโก้

เมื่อเปรียบเทียบข้อมูลของระบบ IoT กับการวัดแบบดั้งเดิม พบว่ามีความสอดคล้องกันสูง โดยเส้นแนวโน้มอุณหภูมิ (Trendline) มีค่า R^2 มากกว่า 0.97 สะท้อนถึงความถูกต้องและความเสถียรของระบบเซนเซอร์ DS18B20 และไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP32 ที่ใช้ในงานวิจัย นอกจากนี้ การเก็บข้อมูลจากถังหมักจำนวน 9 ถัง พร้อมกันยังทำให้สามารถเปรียบเทียบความสม่ำเสมอของกระบวนการหมักระหว่างแต่ละถังได้อย่างเป็นระบบ ซึ่งไม่สามารถทำได้ด้วยการวัดแบบใช้แรงงานคน

ผลการประเมินด้านเศรษฐกิจแสดงให้เห็นว่า ระบบ IoT ช่วยลดภาระการใช้แรงงานลงอย่างมีนัยสำคัญ สามารถลดค่าใช้จ่ายแรงงานได้ราว 160,000 บาทต่อปี ลดต้นทุนการผลิตรวมประมาณร้อยละ 10 และคืนทุนภายในเวลาเพียง 1.9 เดือน แสดงให้เห็นถึงความคุ้มค่าและความเหมาะสมต่อการประยุกต์ใช้ในระดับวิสาหกิจชุมชน นอกจากนี้ การมีข้อมูลแบบเรียลไทม์ยังเปิดโอกาสให้สามารถตรวจพบความผิดปกติของอุณหภูมิได้ทันท่วงที ซึ่งเป็นข้อดีสำคัญที่ช่วยลดความเสี่ยงต่อการหมักล้มเหลว และช่วยให้ผู้ปฏิบัติงานสามารถตัดสินใจได้บนพื้นฐานข้อมูลจริง

โดยสรุป การอภิปรายผลสะท้อนว่าระบบที่พัฒนาขึ้นไม่เพียงเพิ่มประสิทธิภาพด้านการวัดและติดตามอุณหภูมิเท่านั้น แต่ยังสนับสนุนการทำงานของวิสาหกิจชุมชนให้มีความแม่นยำ ประหยัดแรงงาน และเพิ่มศักยภาพในการสร้างผลิตภัณฑ์โกโก้หมักที่มีคุณภาพสม่ำเสมอ อีกทั้งยังมีความเป็นไปได้ในการขยายไปสู่ระบบควบคุมการหมักแบบอัตโนมัติในอนาคต

5. สรุป

การวิจัยครั้งนี้ประสบผลสำเร็จในการออกแบบและพัฒนาระบบตรวจวัดอุณหภูมิสำหรับกระบวนการหมักเมล็ดโกโก้โดยใช้เทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง (IoT) ซึ่งสามารถแก้ไขข้อจำกัดของวิธีการตรวจวัดแบบดั้งเดิมที่ต้องอาศัยแรงงานคนและมีความถี่ในการวัดไม่เพียงพอ ระบบที่พัฒนาขึ้นใช้เซนเซอร์ DS18B20 จำนวน 9 จุด ติดตั้งในถังหมักแต่ละถังเพื่อบันทึกอุณหภูมิที่ตำแหน่งกึ่งกลางถัง โดยข้อมูลถูกส่งผ่านไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP32 ไปยังแพลตฟอร์ม IoT ทำให้สามารถติดตามอุณหภูมิแบบเรียลไทม์ทุก 15 นาที ตลอดระยะการหมัก 7 วันได้อย่างต่อเนื่อง

ผลการทดสอบพบว่า ระบบมีความเสถียรในการส่งข้อมูล มีความแม่นยำของการวัดอยู่ในช่วงที่เหมาะสม และให้แนวโน้มอุณหภูมิสอดคล้องกับการวัดแบบดั้งเดิม โดยมีค่า R^2 มากกว่า 0.97 แสดงถึงความน่าเชื่อถือของระบบวัด นอกจากนี้ การเปรียบเทียบกับวิธีการใช้แรงงานพบว่า ระบบ IoT ช่วยลดภาระงานตรวจวัดอุณหภูมิลงอย่างชัดเจน ลดค่าใช้จ่ายด้านแรงงานประมาณ 160,000 บาทต่อปี ส่งผลให้ต้นทุนการผลิตลดลงประมาณร้อยละ 10 และมีระยะเวลาคืนทุนเพียงประมาณ 1.9 เดือน จึงเหมาะสมต่อการนำไปประยุกต์ใช้ในระดับวิสาหกิจชุมชนที่ต้องการเพิ่มประสิทธิภาพการหมักและยกระดับคุณภาพผลิตภัณฑ์อย่างยั่งยืน

โดยสรุป ระบบที่พัฒนาขึ้นสามารถตอบโจทย์ด้านเทคนิค ความคุ้มค่าทางเศรษฐกิจ และรองรับการใช้งานจริงในสภาพแวดล้อมของชุมชนได้อย่างมีประสิทธิภาพ อีกทั้งยังมีศักยภาพต่อการขยายผลไปสู่การพัฒนาเป็นระบบควบคุมอัตโนมัติและระบบตรวจวัดพารามิเตอร์อื่นๆ สำหรับกระบวนการหมักอาหารและการแปรรูปผลิตภัณฑ์เกษตรในอนาคต

6. ข้อเสนอแนะ

จากผลการวิจัยพบว่าระบบตรวจวัดและแสดงผลอุณหภูมิแบบเรียลไทม์สามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพและความแม่นยำในการควบคุมการหมักเมล็ดโกโก้ได้อย่างมีนัยสำคัญ จึงแนะนำให้วิสาหกิจชุมชนที่ดำเนินการแปรรูปโกโก้ นำระบบดังกล่าวไปประยุกต์ใช้จริงในทุกกระบวนการหมัก โดยเฉพาะในช่วงฤดูเก็บเกี่ยวที่มีปริมาณเมล็ดโกโก้สูง ซึ่งจะช่วยลดภาระด้านแรงงาน ลดต้นทุนการผลิต และทำให้ได้คุณภาพเมล็ดโกโก้ที่สม่ำเสมอมากขึ้น นอกจากนี้ควรมีการฝึกอบรมผู้ปฏิบัติงานให้สามารถใช้งานและบำรุงรักษาระบบได้ เพื่อความต่อเนื่องและยั่งยืนของการใช้เทคโนโลยี

7. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากศูนย์ส่งเสริมอุตสาหกรรมภาคที่ 6 กรมส่งเสริมอุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม ภายใต้โครงการส่งเสริมและพัฒนานวัตกรรมเพื่อยกระดับศักยภาพวิสาหกิจชุมชน ทั้งนี้ ผู้วิจัยขอขอบพระคุณมหาวิทยาลัยวงษ์ชวลิตกุล ที่ให้การสนับสนุนด้านโครงสร้างพื้นฐาน เครื่องมือวิจัย และการอำนวยความสะดวกตลอดระยะเวลาการดำเนินงาน รวมทั้งขอขอบคุณ วิสาหกิจชุมชนคนรักโกโก้คลองไผ่ อำเภอสีคิ้ว จังหวัดนครราชสีมา ที่ให้ความร่วมมือในการทดลองภาคสนาม การจัดเตรียมพื้นที่ และการแบ่งปันองค์ความรู้เกี่ยวกับการแปรรูปโกโก้ ซึ่งมีส่วนสำคัญอย่างยิ่งต่อความสำเร็จของการวิจัยครั้งนี้

8. เอกสารอ้างอิง

Afoakwa, E. O., Paterson, A., Fowler, M., & Ryan, A. (2008). Flavor formation and character in cocoa and chocolate: A critical review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 48*(9), 840–857.

De Vuyst, L., Lefeber, T., Papalexandratou, Z., & Camu, N. (2010). The functional role of lactic acid bacteria in cocoa bean fermentation. In F. Mozzi, R. R. Raya, & G. M. Vignolo (Eds.), *Biotechnology of lactic acid bacteria: Novel applications* (pp. 301–325). Wiley-Blackwell.

Guzmán-Armenteros, T. M., Calva, M. C., & Vega-Sánchez, E. (2023). Monitoring cocoa bean fermentation parameters. *Foods, 12*(12), 2460.

Ho, V. T. T., Zhao, J., & Fleet, G. (2015). The effect of lactic acid bacteria on cocoa bean fermentation. *International Journal of Food Microbiology*, *205,* 54–67.

Kongor, J. E., Hinneh, M., Van de Walle, D., Afoakwa, E. O., Boeckx, P., & Dewettinck, K. (2016). Factors influencing quality variation in cocoa (Theobroma cacao) bean flavour profile: A review. *Food Research International, 82,* 44–52.

Obinze, S., Ojimelukwe, P. C., & Eke, B. A. (2022). Box fermentation and solar drying improve the nutrient composition and organoleptic quality of chocolate from cocoa beans. *Frontiers in Sustainable Food Systems, 6,* Article 1023123.

Owusu, M., Petersen, M. A., & Heimdal, H. (2012). Effect of fermentation method, roasting and conching conditions on the aroma volatiles of dark chocolate. *Journal of Food Process and Preservation, 36*(5), 446–456.

Rodriguez-Campos, J., Escalona-Buendía, H. B., Contreras-Ramos, S. M., Orozco-Avila, I., Jaramillo-Flores, M. E., & Lugo-Cervantes, E. (2012). Effect of fermentation time and drying temperature on volatile compounds in cocoa. *Food Chemistry, 132*(1), 277–288.

Saguidon, J. R., & Dellosa, J., & Mendoza, R. N. (2024). *Internet-of-Things (IoT)–based automated temperature monitoring and control system for enhanced cacao fermentation quality.* In Proceedings of the 2024 6th International Conference on Electrical, Control and Instrumentation Engineering (ICECIE) (pp. 1–6). IEEE.

Saltini, R., Akkerman, R., & Frosch, S. (2013). Optimizing chocolate production through traceability: A review of the influence of farming practices on cocoa bean quality. *Food Control, 29*(1), 167–187.

Torres-Moreno, M., Torrescasana, E., Salas-Salvadó, J., & Blanch, C. (2015). Nutritional composition and fatty acids profile in cocoa beans and chocolates with different geographical origin and processing conditions. *Food Chemistry, 166*, 125–132.

Tzounis, A., Katsoulas, N., Bartzanas, T., & Kittas, C. (2017). Internet of Things in agriculture: Recent advances and future challenges. *Biosystems Engineering, 164,* 31–48.