



ระบบอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง (IoT) สำหรับติดตามและตรวจวัดการคายก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) ของเมล็ดกาแฟคั่ว

Internet of Things (IoT) System for Monitoring Carbon Dioxide Degassing Characteristics of Roasted Coffee Beans

ธราธิป นวมายากุล¹, กรณิศ ยิ้มยั้ง¹, จิดาภา เกียต๊ะ¹, ชมพูนุช ป้องกัน¹, ศศิมาภรณ์ สาสีศรี¹, เจษฎา สายใจ¹, จิราพร อ่อนมั่นคง^{1*}

Tharathip Nawayakul¹, Koranich Yimying¹, Jidapa Kiateh¹, Chompunuth Pongkan¹, Sasimaporn Saleesri¹, Jedsada Saijai¹, Jiraporn Onmankhong^{1*}

¹ภาควิชาวิศวกรรมระบบชีวภาพและเกษตร คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง จังหวัดกรุงเทพฯ 10520

¹Department of Biosystems and Agricultural Engineering, School of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok 10520, Thailand

*Corresponding author: Tel: 02-3298301 ต่อ 223, E-mail: jiraporn.on@kmitl.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้พัฒนาระบบอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง (IoT) เพื่อติดตามและตรวจวัดการคายก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) ของเมล็ดกาแฟอาราบิกาคั่ว จากแหล่งปลูก Cerrado Minas Gerais ประเทศบราซิล โดยติดตั้งเซนเซอร์ SCD41 สำหรับการวัดค่าก๊าซ CO₂ ในภาชนะปิดสนิทพร้อมกับไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP32 จากนั้นทำการสกัดน้ำกาแฟตามมาตรฐานของสมาคมกาแฟพิเศษ (Specialty Coffee Association, SCA) ในวันที่ 1, 5, 9, 13, 17, 21 และ 25 และนำไปวัดค่าของแข็งที่ละลายน้ำ (TSS), ปริมาณกรด (TA), ค่าการนำไฟฟ้า (EC) และค่า pH รวมทั้งประเมินคุณภาพทางประสาทสัมผัส จากผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียว (One-way ANOVA) พบว่าระยะเวลาการจัดเก็บส่งผลต่อปริมาณก๊าซ CO₂ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$) โดยเมล็ดกาแฟคั่วมีการคายก๊าซ CO₂ ออกมามากที่สุดในช่วง 2-3 วันแรก ซึ่งก๊าซเหล่านี้เข้าไปขัดขวางการซึมผ่านของน้ำ ทำให้การสกัดกาแฟได้ผลไม่ดี เมื่อเวลาผ่านไปจนถึงวันที่ 17-25 ปริมาณก๊าซเริ่มลดลงและเข้าสู่ภาวะสมดุล ทำให้สกัดกาแฟได้ดีขึ้นและมีค่าทางเคมีสูงขึ้น ได้แก่ ค่า TSS, TA, EC และ pH ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดสอบทางประสาทสัมผัส พบว่ากาแฟในช่วงเวลาดังกล่าวมีคะแนนรวมสูง สรุปได้ว่าระบบ IoT ที่พัฒนาขึ้นสามารถใช้ติดตามการคายก๊าซ และระบุได้ว่าช่วงเวลาที่เหมาะสมที่สุดเพื่อให้ได้กาแฟคุณภาพดีคือช่วง 17-25 วันหลังคั่ว เทคโนโลยี IoT ที่พัฒนาขึ้นสามารถประยุกต์ใช้ในโรงคั่วและร้านกาแฟ เพื่อใช้ติดตามการคายก๊าซของเมล็ดกาแฟและช่วยประเมินช่วงเวลาที่เหมาะสมต่อการสกัดกาแฟ ซึ่งเป็นประโยชน์ต่อการควบคุมคุณภาพ ทั้งนี้งานวิจัยนี้เป็นเพียงต้นแบบเบื้องต้นที่ยังสามารถพัฒนาต่อยอดได้ในอนาคต

คำสำคัญ: อินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง, การคายก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์, เมล็ดกาแฟคั่ว

Abstract

This research developed an Internet of Things (IoT) system to monitor and measure the carbon dioxide (CO₂) degassing characteristics of roasted Arabica coffee beans sourced from Cerrado Minas Gerais, Brazil. The system integrated an SCD41 sensor to detect CO₂ concentration within a sealed container, coupled with an ESP32 microcontroller for real-time monitoring. Coffee extraction was performed on days 1, 5, 9, 13, 17, 21, and 25 post-roasting, in accordance with the Specialty Coffee Association (SCA) standards. The extracted coffee was evaluated for total soluble solids (TSS), titratable acidity (TA), electrical conductivity (EC), pH, and sensory quality. Based on the one-way analysis of variance (One-way ANOVA), the storage period significantly affected the CO₂ concentration ($P < 0.05$). The results indicated that the roasted coffee beans exhibited the highest CO₂ degassing rate during the first 2 to 3 days. This high gas release restricted water penetration into the coffee grounds, leading to inefficient extraction. However, from days 17 to 25, the CO₂ concentration decreased and reached an equilibrium state, which enhanced extraction efficiency and increased TSS, TA, EC, and pH values. These

physicochemical improvements were consistent with the preliminary sensory evaluation results, which yielded high overall scores during this period. In conclusion, the developed IoT system successfully monitored the degassing behavior and identified that the optimal resting period to achieve high-quality coffee extraction was between 17 and 25 days post-roasting. This IoT technology serves as a practical tool for roasteries and coffee shops to track gas release, determine optimal extraction timing, and ensure precise quality control. Furthermore, this system stands as a preliminary prototype that offers strong potential for future scalability and advancement.

Keywords: Internet of things, Carbon dioxide degassing, Roasted coffee beans

Received: April 05, 2026

Revised: May 22, 2026

Accepted: June 04, 2026

Available online: June 05, 2026

1 บทนำ

ปัจจุบันคนไทยดื่มกาแฟเพิ่มขึ้นเฉลี่ย 15% ต่อปี หรือดื่ม 300 แก้วต่อคนต่อปี ขณะที่คนต่างชาติ เช่น ญี่ปุ่นดื่ม 400 แก้วต่อคนต่อปี และยุโรปดื่ม 500 แก้วต่อคนต่อปี แสดงให้เห็นว่าความต้องการบริโภคกาแฟมีแนวโน้มเติบโตมากขึ้น (ธนาคารแห่งประเทศไทย, 2563) กาแฟเป็นเครื่องดื่มที่มีความซับซ้อนทั้งในด้านเคมีและประสาทสัมผัส อย่างไรก็ตาม การอธิบายคุณลักษณะทางประสาทสัมผัสในมิติอื่นนอกเหนือจากรสชาติหลัก เช่น ความเป็นกรด ความรู้สึกในปาก และรสชาติที่หลงเหลืออยู่ ยังคงมีข้อจำกัดเนื่องจากขาดชุดคำศัพท์ที่เป็นมาตรฐานเดียวกัน ด้วยเหตุนี้ Williams et al. (2023) รวบรวมข้อมูล นำไปสู่การสร้างวงล้อประสาทสัมผัสลักษณะเฉพาะของกาแฟขึ้น โดยวงล้อดังกล่าวได้รับการออกแบบมาเพื่อใช้งานควบคู่ไปกับวงล้อรสชาติของสมาคมกาแฟพิเศษ (SCA Coffee Taster's Flavor Wheel) ซึ่งสะท้อนถึงคำศัพท์ทางประสาทสัมผัสที่นักวิจัยและผู้เชี่ยวชาญด้านกาแฟใช้ในปัจจุบัน และสอดคล้องกับโปรโตคอลการประเมินคุณภาพตามมาตรฐานสากลของอุตสาหกรรมกาแฟในปัจจุบัน (Williams et al., 2023)

ทั้งนี้ การจะได้มาซึ่งกาแฟที่มีคุณลักษณะทางประสาทสัมผัสที่สมบูรณ์ตามมาตรฐานดังกล่าวนั้น กระบวนการคั่วและพฤติกรรมของเมล็ดกาแฟหลังการคั่วถือเป็นปัจจัยสำคัญ โดยเฉพาะอย่างยิ่งกระบวนการคายก๊าซ CO_2 ซึ่งสถานะที่ใช้ในการคั่วยังส่งผลโดยตรงต่อพฤติกรรมการคายก๊าซดังกล่าว ดังที่ Wang and Lim (2014) ได้ชี้ให้เห็นว่า ภายใต้ระดับการคั่วที่เท่ากัน การคั่วด้วยอุณหภูมิสูงในระยะเวลาสั้น จะทำให้อัตราการคายก๊าซสูงกว่าการคั่วด้วยอุณหภูมิต่ำในเวลานาน ยิ่งไปกว่านั้น อัตราการคายก๊าซในกาแฟบดยังขึ้นอยู่กับขนาดของการบดและอุณหภูมิที่ใช้ในการคั่วเป็นหลัก (Wang and Lim, 2014) นอกจากนี้ หลังจากกระบวนการคั่ว เมล็ดกาแฟจะค่อยๆ เกิดการคายก๊าซ CO_2 มาระหว่างการเก็บรักษา หรือปล่อยออกมาอย่างฉับพลันในระหว่างการบดและการสกัด ซึ่งส่งผลกระทบต่อคุณภาพการชง (Smrke et al., 2018) ทำให้คุณภาพของกาแฟลดลง ซึ่งสะท้อนผ่านค่า EC ซึ่งมีความสัมพันธ์กับ

คุณภาพของเมล็ดกาแฟ ค่า EC ที่สูงขึ้นอาจบ่งชี้ว่าเยื่อหุ้มเซลล์มีความผิดปกติและซึมผ่านได้ง่ายขึ้น ซึ่งกระบวนการนี้เป็นหนึ่งในกระบวนการแรกๆ ที่เกิดขึ้นในการเสื่อมสภาพของเมล็ดกาแฟ ทำให้คุณภาพลดลง (Da et al., 2020) นอกจากนั้นยังมีรายงานว่า Rao and Fuller (2018) รายงานว่า กาแฟสกัดเย็นและกาแฟสกัดร้อนมีค่าความเป็น pH ใกล้เคียงกัน โดยอยู่ในช่วง 4.85–5.13 อย่างไรก็ตาม กาแฟสกัดร้อนมีค่ากรดที่สามารถไทเทรตได้ทั้งหมดสูงกว่า ซึ่งสะท้อนถึงปริมาณกรดที่ถูกสกัดออกมาได้มากกว่า ส่งผลให้กาแฟสกัดร้อนมีรสเปรี้ยวและความเข้มของกรดเด่นชัดกว่า อันเป็นปัจจัยหนึ่งที่ส่งผลต่อคุณภาพทางประสาทสัมผัสของกาแฟ

จากการศึกษาของ Vega และคณะ (2025) พบว่าพารามิเตอร์ทางเคมีมีความสัมพันธ์อย่างมีนัยสำคัญต่อคุณภาพทางประสาทสัมผัสของกาแฟ โดยผลการวิเคราะห์สหสัมพันธ์ระบุว่าค่า TA และ TSS มีความสัมพันธ์เชิงบวกกับคะแนนทางประสาทสัมผัส ในขณะที่ค่า pH แสดงความสัมพันธ์เชิงลบ ซึ่งข้อบ่งชี้ดังกล่าวสะท้อนให้เห็นว่าองค์ประกอบทางเคมีสามารถใช้เป็นดัชนีชี้วัดในการทำนายคุณภาพเชิงคุณภาพของกาแฟได้

นอกจากนั้น Tolessa และคณะ (2016) ได้ศึกษาการใช้ฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์ม (Fourier Transform-NIR spectrometer) สแกนเมล็ดกาแฟเขียวเพื่อบันทึกข้อมูลสเปกตรัมแล้วนำข้อมูลมาวิเคราะห์ความสัมพันธ์เชิงสถิติด้วยวิธี PLS regression ร่วมกับคะแนนจากการชิม พบว่ามีความแม่นยำสูงในการทำนายคุณภาพกาแฟในภาพรวม รวมถึงคุณลักษณะ ได้แก่ ค่า TA, เนื้อสัมผัส (Body) และรสสัมผัสหลังดื่ม (Aftertaste) โดยมีค่าสหสัมพันธ์เท่ากับ 0.90 ในคะแนนรวม ผลการศึกษานี้ยืนยันว่าสเปกตรัมจาก NIR เป็นเครื่องมือที่รวดเร็วและแม่นยำในการทำนายคุณภาพได้ (Tolessa et al., 2016) อย่างไรก็ตาม เครื่องมือดังกล่าวยังคงมีราคาค่อนข้างแพง จึงมีความจำเป็นต้องพัฒนาแนวทางประเมินคุณภาพที่มีต้นทุนถูกกว่าและเข้าถึงได้ง่ายขึ้นเพื่อให้ภาคธุรกิจและบาร์ิสตาสามารถนำไปใช้งานได้จริง

ปัจจุบันเทคโนโลยี IoT ได้ถูกนำมาประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมอาหารและการเกษตรอย่างแพร่หลาย เพื่อการติดตามและควบคุมคุณภาพผลผลิตแบบเรียลไทม์ โดยอาศัยการ

ทำงานร่วมกันของเซนเซอร์และระบบสื่อสารข้อมูล Prasad et al. (2023) รายงานว่า ระบบ IoT สามารถใช้ติดตามข้อมูลด้านสภาพแวดล้อมและคุณภาพของผลผลิตทางการเกษตรได้อย่างต่อเนื่องและมีประสิทธิภาพ ขณะที่ Costa et al. (2023) พบว่าการประยุกต์ใช้ IoT ร่วมกับระบบเซนเซอร์สามารถช่วยลดความสูญเสียและเพิ่มประสิทธิภาพในการควบคุมคุณภาพอาหารระหว่างการเก็บรักษาได้ นอกจากนี้ Zhang et al. (2023) ยังรายงานว่า ระบบตรวจติดตามอัจฉริยะและเซนเซอร์แบบเรียลไทม์สามารถประเมินการเปลี่ยนแปลงคุณภาพของอาหารและผลผลิตทางการเกษตรได้อย่างแม่นยำ ซึ่งแสดงให้เห็นถึงศักยภาพของเทคโนโลยี IoT สำหรับการประเมินคุณภาพอาหารแบบไม่ทำลายตัวอย่าง งานวิจัยนี้ตั้งสมมติฐานว่า การประยุกต์ใช้ระบบ IoT ร่วมกับเซนเซอร์สามารถติดตามการเปลี่ยนแปลงการคายก๊าซของเมล็ดกาแฟอาราบิก้าได้อย่างมีประสิทธิภาพ และข้อมูลการคายก๊าซที่ตรวจวัดได้มีความสัมพันธ์กับคุณสมบัติทางเคมี ได้แก่ TSS, pH และ EC รวมถึงคุณภาพทางประสาทสัมผัสของกาแฟ

ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อประยุกต์ใช้ระบบ IoT ร่วมกับเซนเซอร์ในการติดตามการคายก๊าซของเมล็ดกาแฟอาราบิก้า และศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลการคายก๊าซกับคุณสมบัติทางเคมีและคุณภาพทางประสาทสัมผัสเบื้องต้นของกาแฟ โดยขอบเขตการศึกษาคือครอบคลุมกาแฟสายพันธุ์อาราบิก้า (Coffea arabica) พันธุ์ Catuai, Acaia และ Mundo Novo จากแหล่งปลูก Cerrado Minas Gerais ประเทศบราซิล ที่ระดับความสูง 900–1,000 เมตรเหนือระดับน้ำทะเล และดำเนินการศึกษาตลอดระยะเวลา 25 วัน

2 อุปกรณ์และวิธีการ

2.1 การเตรียมตัวอย่างเมล็ดกาแฟคั่ว

วัสดุที่ใช้เป็นเมล็ดกาแฟดิบ สายพันธุ์อาราบิก้า (Coffea arabica) พันธุ์ปลูก Catuai, Acaia และ Mundo Novo จากแหล่งปลูก Cerrado Minas Gerais ประเทศบราซิล ที่ระดับความสูง 900–1,000 เมตร โดยคัดเลือกเมล็ดที่มีคุณภาพตามมาตรฐาน NY 2 (New York 2) และมีขนาดเมล็ดตามมาตรฐานตะแกรงร่อน (Screen size) 17/18 ซึ่งเป็นผลผลิตในรอบปีการเก็บเกี่ยว 2023/2024 ที่ผ่านกระบวนการแปรรูปแบบแห้ง Natural Process

จากนั้นนำเมล็ดกาแฟดิบมาคั่วด้วยเครื่องคั่วกาแฟที่อุณหภูมิ 230 °C เป็นระยะเวลาประมาณ 10 นาที ซึ่งเป็นระดับการคั่วแบบ Medium Roast โดยใช้ความเร็วรอบการหมุนของถังคั่วที่ 55 rpm จากนั้นบรรจุเมล็ดกาแฟคั่วปริมาณ 250 g ใส่ภาชนะจัดเก็บแบบปิดสนิทขนาด 18.5×10.0×13.2 cm

2.2 การพัฒนาระบบติดตามและตรวจวัดพฤติกรรมการณ์การคายก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) ของเมล็ดกาแฟคั่ว

ประกอบด้วย 4 ส่วนหลัก ได้แก่ ส่วนการตรวจวัดค่าด้วยเซนเซอร์ ส่วนประมวลผล/ควบคุมการทำงาน ส่วนเชื่อมโยงโครงข่ายอินเทอร์เน็ต/ฐานข้อมูล และส่วนแสดงผล โดยมีแผนผังการเชื่อมโยงของส่วนประกอบต่าง ๆ แสดงใน Figure 1

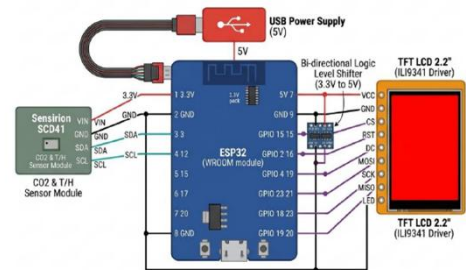


Figure 1 Overall system architecture and data flow diagram.

ส่วนตรวจวัดค่าด้วยเซนเซอร์ใช้เซนเซอร์ Sensirion SCD41 (Sensirion AG, Stäfa, Switzerland) เพื่อใช้วัดค่าก๊าซ CO₂ อุณหภูมิ และความชื้นสัมพัทธ์ โดยทำการสอบเทียบค่ากับเครื่องวัดมาตรฐาน และมีความแม่นยำที่ค่า R² เท่ากับ 0.99 0.97 และ 0.99 ตามลำดับ

ส่วนประมวลผล/ควบคุมการทำงาน ใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์รุ่น ESP32 (Espressif Systems, Shanghai, China) ในการประมวลผลและควบคุมการทำงานของระบบ โดยทำหน้าที่สั่งการให้เซนเซอร์อ่านข้อมูล ควบคุมการแสดงผลทางหน้าจอและการทำงานของโมดูลสื่อสารไร้สายเพื่อเชื่อมต่อกับโครงข่ายอินเทอร์เน็ต

ส่วนเชื่อมโยงโครงข่ายอินเทอร์เน็ต/ฐานข้อมูล ใช้การสื่อสารแบบไร้สายด้วยโปรโตคอล Wi-Fi ในการเชื่อมต่อกับโครงข่ายอินเทอร์เน็ต โดยข้อมูลที่วัดได้จะถูกบันทึกและจัดเก็บในระบบฐานข้อมูล InfluxDB Cloud (InfluxData, San Francisco, USA)

ส่วนแสดงผล ใช้หน้าจอแสดงผล TFT LCD ขนาด 2.4 นิ้ว (Adafruit Industries, New York, USA) และยังสามารถแสดงผลข้อมูลตัวแปรต่าง ๆ ผ่านเว็บเบราว์เซอร์บนอุปกรณ์เคลื่อนที่ที่ได้รับการพัฒนาและออกแบบส่วนแสดงผล (Dashboard) โดยใช้แพลตฟอร์ม Grafana (Grafana Labs, New York, USA)

ระบบติดตามและตรวจวัดพฤติกรรมการณ์การคายก๊าซ CO₂ ของเมล็ดกาแฟคั่วที่พัฒนาขึ้น ถูกติดตั้งเข้ากับภาชนะจัดเก็บแบบปิดสนิทดังแสดงใน Figure 2

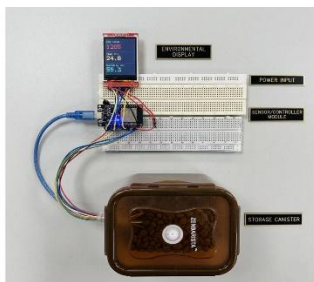


Figure 2 Physical prototype and experimental setup of the monitoring system.

จากนั้นนำไปบันทึกข้อมูลอย่างต่อเนื่องเป็นระยะเวลา 25 วัน โดยข้อมูลที่ตรวจวัดได้จะถูกส่งไปแสดงผลผ่านเว็บเบราว์เซอร์ ดังแสดงใน Figure 3 ซึ่งแสดงค่าปริมาณของก๊าซ CO₂ อุณหภูมิ และความชื้นแบบเรียลไทม์ เพื่อวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลง ดังแสดงใน Figure 3

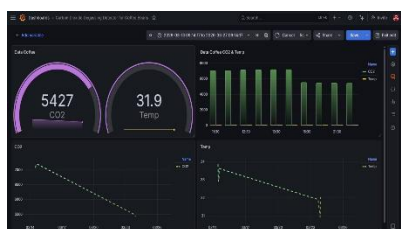


Figure 3 Web-based monitoring interface and data visualization.

2.3 การวิเคราะห์คุณภาพทางเคมีและประสาทสัมผัส การวิเคราะห์คุณภาพทางเคมีของน้ำกาแฟ

2.3.1 การวัดค่า TSS ในหน่วย °Brix และค่า TA ด้วยเครื่องดิจิทัลรีแฟรกโตมิเตอร์ รุ่น PAL-BX|ACID1 (Atago Co., Ltd., Tokyo, Japan) โดยรายงานค่า TA ในรูปสมมูลกรดคลอโรจีนิก (chlorogenic acid equivalent) ทั้งนี้ ในการวัดค่า TA เตรียมตัวอย่างโดยการเจือจางน้ำกาแฟในน้ำกลั่นที่อัตราส่วน 1:50 (น้ำกาแฟ 1 g ต่อน้ำกลั่น 49 g) ตามข้อกำหนดของเครื่องมือวัด

2.3.2 การวัดค่า pH และค่า EC ในหน่วย mS/cm ทำโดยชงกาแฟให้เป็นเนื้อเดียวกันและปรับให้อยู่ที่อุณหภูมิห้องประมาณ 25 ± 2 °C ก่อนทำการตรวจวัด ด้วยรุ่น HI9814 (Hanna Instruments Inc., Rhode Island, USA)

การคั่วปิ้งกาแฟดำเนินการตามแนวทางมาตรฐานของ Specialty Coffee Association (SCA) เพื่อประเมินคุณภาพกาแฟ โดยชั่งเมล็ดกาแฟคั่วปริมาณ 11 กรัมด้วยเครื่องชั่งดิจิทัล จากนั้นบดด้วยเครื่องบดมือหมุนที่ระดับความหยาบเบอร์ 3 แล้วเติมน้ำร้อนอุณหภูมิ 92.2 °C ปริมาณ 200 มิลลิลิตรลงในผงกาแฟ หลังเริ่มจับเวลา ปั่นให้กาแฟสกัดเป็นเวลา 4 นาที ก่อนทำการทำลายชั้นผิวกาแฟโดยปาดผิวหน้ากาแฟและตักฟอง

รวมถึงกากกาแฟที่ลอยอยู่ ออก จากนั้นประเมินคุณภาพด้านกลิ่น รสชาติ และลักษณะโดยรวม พร้อมบันทึกคะแนนตามเกณฑ์มาตรฐาน SCA โดยทำการทดลองทั้งหมด 3 ซ้ำ

สำหรับการประเมินทางประสาทสัมผัสในงานวิจัยนี้ เป็นการทดสอบเบื้องต้น โดยกลุ่มผู้ทดสอบจำนวน 10 ท่าน ประกอบด้วยผู้ประกอบการร้านกาแฟจำนวน 4 ท่าน บาร์ิสตาจำนวน 3 ท่าน และผู้ช่วยบาร์ิสตาจำนวน 3 ท่าน ซึ่งล้วนมีประสบการณ์ด้านการชิมกาแฟ การทดสอบดำเนินการภายใต้สภาพแวดล้อมภายในห้องที่มีการควบคุมอุณหภูมิและปราศจากกลิ่นรบกวน โดยทำการประเมินตัวอย่างกาแฟหลังจากลดอุณหภูมิลงจนเหมาะสมเป็นเวลา 3 นาที ประเมินตามเกณฑ์มาตรฐาน SCA โดยประเมินคุณลักษณะเด่น 5 ประการ ได้แก่ กลิ่น (Aroma) รสชาติ (Flavor) ความเปรี้ยว (Acidity) รสสัมผัสหลังดื่ม (Aftertaste) และเนื้อสัมผัส (Body) โดยมีคะแนน 1-5 ต่อคุณลักษณะ ผลคะแนนที่ได้จะถูกนำไปวิเคราะห์หาความสัมพันธ์กับระดับความเข้มข้นของก๊าซ CO₂ ในภาชนะจัดเก็บแบบปิดสนิท เพื่อศึกษาผลกระทบและการเปลี่ยนแปลงของคุณภาพทางรสชาติของกาแฟในแต่ละช่วงเวลา

ทั้งนี้ การวิเคราะห์คุณภาพทางเคมีและการประเมินทางประสาทสัมผัสได้กำหนดช่วงเวลาในการเก็บข้อมูลจำนวน 7 วัน ตลอดกระบวนการจัดเก็บ ได้แก่ วันที่ 1, 5, 9, 13, 17, 21 และ 25

2.4 การวิเคราะห์ทางสถิติ (Statistical Analysis)

ข้อมูลพารามิเตอร์คุณภาพทางเคมี ได้แก่ ค่า TSS, TA, EC, pH และคะแนนการประเมินคุณภาพทางประสาทสัมผัส ซึ่งดำเนินการทดลองจำนวน 3 ซ้ำ ถูกนำมาวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียว (One-way Analysis of Variance: One-way ANOVA) เพื่อทดสอบอิทธิพลของระยะเวลาการจัดเก็บ (วันที่ 1, 5, 9, 13, 17, 21 และ 25 หลังการคั่ว) ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 (ระดับนัยสำคัญทางสถิติ $P < 0.05$) นอกจากนี้ ดำเนินการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความเข้มข้นของก๊าซ CO₂ และพารามิเตอร์คุณภาพน้ำกาแฟต่าง ๆ โดยการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของเพียร์สัน (Pearson's Correlation Coefficient)

3 ผลและวิจารณ์

3.1 สภาวะแวดล้อมภายในภาชนะจัดเก็บแบบปิดสนิท

Figure 4 แสดงค่าเฉลี่ยรายวันของอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของพื้นที่ว่างระหว่างเมล็ดกาแฟคั่วและภาชนะจัดเก็บแบบปิดสนิท ตลอดระยะเวลาการจัดเก็บ 25 วัน ซึ่งข้อมูลดังกล่าวได้จากการบันทึกด้วยระบบ IoT ภายในภาชนะจัดเก็บแบบปิดสนิท พบว่า อุณหภูมิค่อนข้างคงที่ 27.09 - 30.98 °C ไม่มีการเปลี่ยนแปลงแบบฉับพลัน ซึ่งมีค่าสูงกว่าช่วงอุณหภูมิที่แนะนำสำหรับการเก็บรักษากาแฟคั่วที่ประมาณ 15-25 °C แต่

ไม่พบการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิแบบฉับพลันตลอดระยะเวลาการทดลอง แสดงถึงเสถียรภาพของสภาวะภายในภาชนะจัดเก็บ ทั้งนี้ อุณหภูมิที่สูงอาจส่งผลต่อการเสื่อมคุณภาพของสารให้กลิ่นรสในกาแฟได้ อย่างไรก็ตาม ค่าความชื้นสัมพัทธ์ภายในภาชนะอยู่ในระดับต่ำ จึงช่วยลดการดูดซับความชื้นและชะลอการเปลี่ยนแปลงคุณภาพของเมล็ดกาแฟระหว่างการจัดเก็บ (Wang and Lim, 2014) สำหรับค่าความชื้นสัมพัทธ์ลดลงจาก 18.09 % ในวันที่ 1 เหลือ 13.06 % ในวันที่ 2 อาจเนื่องจากน้ำอิสระ (Free water) ระเหยออกไปเกือบทั้งหมดระหว่างกระบวนการคั่วด้วยอุณหภูมิที่สูง ส่งผลให้เมล็ดกาแฟคั่วใหม่นั้น มีความชื้นต่ำอยู่ที่ 0.9 - 2.1 % (Illy and Viani, 2005; Błaszkiwicz et al, 2023) และโครงสร้างเซลล์ของเมล็ดกาแฟคั่วนั้นมีความพรุนสูง (Wang and Lim, 2014) ทำให้มีสมบัติดูดความชื้น (Hygroscopic) สูง โดยเกิดการดูดซับไอน้ำจากช่องว่างอากาศภายในภาชนะจัดเก็บแบบปิดสนิทได้อย่างรวดเร็ว ทำให้วันที่ 2 มีค่าความชื้นสัมพัทธ์ต่ำลง อย่างไรก็ตาม ในช่วงวันที่ 3-25 ความชื้นสัมพัทธ์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นและทรงตัวเข้าสู่สภาวะสมดุลระหว่างความชื้นในเมล็ดกาแฟและอากาศภายในภาชนะ (Equilibrium Moisture Content) โดยอ้างอิงจาก Cardelli and Labuza, 2001; Ríos et al., 2023) นอกจากนี้ การคายก๊าซ CO_2 จากโครงสร้างรูพรุนส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงความดันในพื้นที่ว่าง ซึ่งมีส่วนช่วยให้ความชื้นสัมพัทธ์ค่อย ๆ ปรับตัวและคงที่เมื่อเข้าสู่สมดุล ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาที่พบว่าหลังจากวันที่ 2 ความชื้นสัมพัทธ์ในภาชนะไม่ได้ลดลงตามพฤติกรรมการดูดความชื้นเพียงอย่างเดียว แต่เริ่มเสถียรขึ้นเนื่องจากมีแรงดันจากการคายก๊าซช่วยปรับสมดุลภายใน (Wang and Lim, 2014; Smrke et al., 2018) อย่างไรก็ตาม การเพิ่มขึ้นของค่าความชื้นสัมพัทธ์ภายในภาชนะอาจได้รับอิทธิพลจากการเข้าสู่สมดุลความชื้นระหว่างเมล็ดกาแฟคั่วและอากาศภายในภาชนะ รวมถึงอาจเกิดจากการรั่วซึมของกล่องพลาสติกทำให้ส่งผลต่อสภาพแวดล้อมและความไวของเซนเซอร์ที่ใช้ในการตรวจวัด

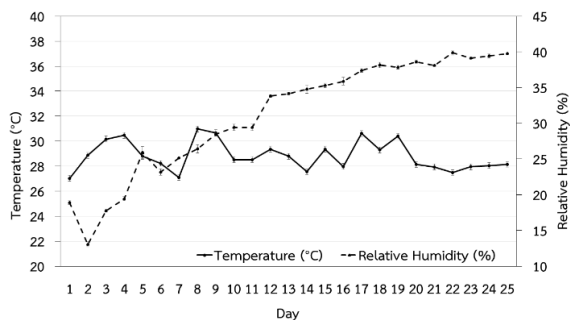


Figure 4 Changes in temperature and relative humidity of the storage environment over the 25-day degassing period.

3.2 พฤติกรรมการคายก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ผ่านระบบ IoT

Figure 5 แสดงการติดตามพฤติกรรมการคายก๊าซ CO_2 ด้วยระบบเซนเซอร์ พบว่า วันที่ 1 ก๊าซ CO_2 มีค่าต่ำ อาจเนื่องมาจากปริมาณก๊าซส่วนใหญ่ยังคงถูกกักเก็บอยู่ภายใต้ความดันสูงภายในโครงสร้างรูพรุนและช่องว่างเซลล์ที่อยู่ลึกเข้าไปในเมล็ดกาแฟ ซึ่งต้องใช้เวลาในการแพร่ผ่านทางเดินที่ซับซ้อนออกมาสู่ผิวเมล็ดตามกฎการแพร่ (Wang and Lim, 2014) ทำให้อัตราการปล่อยก๊าซในช่วงเริ่มต้นเกิดขึ้นอย่างค่อยเป็นค่อยไป และตรวจพบในปริมาณน้อยในระยะแรก สำหรับการเก็บรักษาวันที่ 2-3 เมล็ดกาแฟมีการคายก๊าซ CO_2 สูงที่สุด โดยสะสมสูงสุดเท่ากับ 26,130 ppm หลังจากนั้น ก๊าซ CO_2 มีค่าลดลงอย่างต่อเนื่อง อาจเนื่องจากก๊าซ CO_2 ที่มีปริมาณมากถูกกักเก็บไว้ในโครงสร้างรูพรุนหลังการคั่วค่อย ๆ เกิดการแพร่ (Diffuse) ออกมาสู่ภายนอก (Wang and Lim, 2014) จนกระทั่งปริมาณก๊าซ CO_2 เริ่มชะลอตัวลงและคงที่ในเวลาต่อมา แสดงให้เห็นว่าก๊าซ CO_2 ภายในโครงสร้างเมล็ดได้ปรับตัวจนเข้าสู่สภาวะสมดุลกับส่วนประกอบอื่น ๆ เช่น น้ำมันและองค์ประกอบโครงสร้างของเมล็ดกาแฟแล้ว (Wang and Lim, 2014)

เมื่อนำระบบที่ถูกพัฒนาขึ้นนี้เปรียบเทียบกับวิธีการตรวจวัดก๊าซ CO_2 แบบดั้งเดิม เช่น การวิเคราะห์ด้วยเทคนิค Gas Chromatography (GC) ซึ่งมีความแม่นยำสูงแต่ต้องใช้เครื่องมือเฉพาะทางและไม่สามารถติดตามข้อมูลแบบต่อเนื่องได้ ระบบ IoT ที่พัฒนาขึ้นในงานวิจัยนี้สามารถตรวจวัดและส่งข้อมูลแบบเรียลไทม์ได้อย่างต่อเนื่อง มีต้นทุนต่ำ และเหมาะสำหรับการประยุกต์ใช้ในการติดตามคุณภาพกาแฟระหว่างการจัดเก็บ อย่างไรก็ตาม ระบบดังกล่าวอาจมีข้อจำกัดด้านความแม่นยำเมื่อเทียบกับเครื่องมือระดับห้องปฏิบัติการ และอาจได้รับผลกระทบจากสภาพแวดล้อม เช่น อุณหภูมิและความชื้น จึงควรมีการสอบเทียบเซนเซอร์อย่างสม่ำเสมอเพื่อเพิ่มความน่าเชื่อถือของข้อมูล

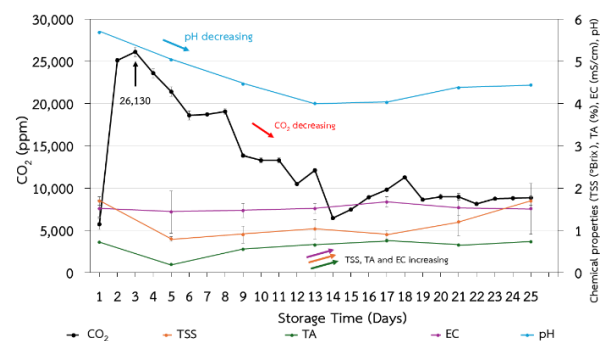


Figure 5 Correlation between carbon dioxide (CO_2) degassing behavior and chemical properties of roasted coffee beans over a 25-day storage period.

3.3 ความสัมพันธ์ของการคายก๊าซต่อคุณสมบัติทางเคมีและประสิทธิภาพการสกัด

จากผลการวิเคราะห์ One-way ANOVA พบว่า ระยะเวลาการจับเก็บที่แตกต่างกันส่งผลต่อปริมาณ CO_2 ที่คายออกมาจากเมล็ดกาแฟคั่วอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$) บ่งชี้ว่าปริมาณก๊าซภายในภาชนะมีการเปลี่ยนแปลงอย่างเด่นชัดตลอดช่วงเวลาการทดลอง ซึ่งพฤติกรรมของการเปลี่ยนแปลงของก๊าซดังกล่าวส่งผลโดยตรงต่อคุณสมบัติทางเคมีและประสิทธิภาพการสกัดน้ำกาแฟ

Figure 5 แสดงผลการวัดค่าคุณสมบัติทางเคมีของ น้ำกาแฟที่สกัดจากเมล็ดกาแฟคั่วจำนวน 7 วัน ตลอดระยะเวลาการจับเก็บ 25 วัน พบว่า ค่า TSS อยู่ในช่วง 0.7 - 1.3% ในขณะที่ TA มีค่าอยู่ในช่วง 0.19 - 0.75 เห็นได้ ว่าค่าทั้งสองมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นดัง Figure 5 เนื่องด้วยช่วงแรกของการจับเก็บ ก๊าซ CO_2 ที่ติดอยู่ในรูพรุนอย่างหนาแน่นจะสร้างช่องว่างอากาศและทำหน้าที่ต้านทานการซึมผ่านของน้ำร้อน (Water resistance) ส่งผลให้เกิดสภาวะการสกัดที่ไม่สมบูรณ์ (Under-extraction) ทำให้การดึงสารประกอบเคมีออกมาทำได้ไม่เต็มที่ (Smrke et al., 2018) ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์สหสัมพันธ์ของเพียร์สัน พบว่า ปริมาณก๊าซ CO_2 มีความสัมพันธ์เชิงลบกับค่า TA และค่า TSS ซึ่งมีค่า R เท่ากับ -0.94 และ -0.73 ตามลำดับ

เมื่อระยะเวลาผ่านไปและเมล็ดกาแฟคายก๊าซจนเข้าสู่สภาวะสมดุล น้ำจะสามารถแทรกซึมเข้าสู่โครงสร้างเนื้อกาแฟได้อย่างสมบูรณ์และสม่ำเสมอ ส่งผลให้ความสามารถในการละลายกรดอินทรีย์ (Organic acids) และสารประกอบต่าง ๆ เพิ่มขึ้นสอดคล้องค่า EC ที่กระดืบสูงอยู่ในช่วง 1.4 - 1.7 mS/cm ในวันที่ 13 ดัง Figure 5 โดยค่า EC แสดงความสัมพันธ์เชิงลบกับ CO_2 มีค่า R เท่ากับ -0.53 แสดงให้เห็นว่าการให้ระยะเวลาพักเมล็ด (Resting period) ที่เหมาะสมจะช่วยให้การสกัดสามารถดึงเอาแร่ธาตุ ไอออนออกมาได้มากขึ้น (Asiah et al., 2019)

สำหรับค่า pH พบว่ามีแนวโน้มลดลงอย่างต่อเนื่องตลอดระยะเวลาการจับเก็บ 25 วัน โดยเริ่มต้นที่ 5.7 ในวันที่ 1 และลดลงมาอยู่ที่ 4.5 ในช่วงวันที่ 13 ก่อนจะทรงตัวอยู่ในช่วง 4.0-4.5 จนถึงวันที่ 25 การลดลงของค่า pH ดังกล่าวสอดคล้องกับแนวโน้มการเพิ่มขึ้นของค่า TA เนื่องจากเมื่อกระบวนการสกัดมีประสิทธิภาพสูงขึ้นตามระยะเวลาพักเมล็ด กรดอินทรีย์ ได้แก่ กรดคลอโรเจนิก กรดซิตริก และกรดอะซิติก จะถูกละลายออกมาในปริมาณที่สูงขึ้น ส่งผลให้ความเป็นกรดของน้ำกาแฟเพิ่มขึ้นและค่า pH ลดลงตามลำดับ (Rao and Fuller, 2018) ซึ่งปรากฏการณ์นี้เป็นลักษณะเฉพาะของกาแฟที่ผ่านการคายก๊าซอย่างเพียงพอ ที่ช่วยให้สารประกอบที่ให้ความเปรี้ยวและกลิ่นหอมถูกสกัดออกมาได้ครบถ้วนยิ่งขึ้น (Smrke et al., 2018) อย่างไรก็ตาม เมื่อวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ทางสถิติกับพบว่า ค่า pH มีความสัมพันธ์ต่ำ ($R = -0.04$) กับปริมาณก๊าซ CO_2 ทั้งนี้

เนื่องจากน้ำกาแฟมีระบบสารละลายบัฟเฟอร์ (Buffer system) จากแร่ธาตุและกรดอ่อนคอยควบคุมประจุไฮโดรเจนไอออนไว้ ส่งผลให้แม้ปริมาณ TA จะถูกสกัดออกมาเพิ่มขึ้นอย่างเด่นชัดจนทำให้ค่า pH ลดลงในช่วงแรก แต่แนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของ pH จะค่อนข้างแคบและไม่ได้ผันแปรตรงข้ามเป็นเส้นตรงกับปริมาณก๊าซ CO_2 โดยตรงตลอดช่วงการทดลอง

3.4 การประเมินช่วงเวลาที่เหมาะสม

จากการลดลงของก๊าซ CO_2 และเริ่มคงที่ที่ระยะเวลาการเก็บรักษา 19-25 วันหลังการคั่ว ทำให้คุณสมบัติทางเคมีของเมล็ดกาแฟที่ถูกสกัดออกมาเพิ่มขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับคะแนนการประเมินทางประสาทสัมผัสรวม Figure 6 พบว่าวันที่ 1-17 คะแนนรวมของ กลิ่น รสชาติ ความเปรี้ยว เนื้อสัมผัส รสสัมผัสหลังดื่ม มีคะแนนการประเมินทางประสาทสัมผัส แต่ละคุณลักษณะอยู่ในช่วง 1.0 - 1.5 คะแนน อาจเนื่องจากสภาวะการสกัดที่ไม่สมบูรณ์จากก๊าซ CO_2 ที่ยังหนาแน่น (Smrke et al., 2018) เป็นช่วงที่แรงดันภายในรูพรุนลดต่ำลงจนไม่เป็นอุปสรรคต่อน้ำ (Smrke et al., 2018; Wang & Lim, 2014) และมากกว่านั้นอาจเนื่องมาจากคุณภาพทางประสาทสัมผัสไม่ได้ขึ้นอยู่กับปริมาณก๊าซเพียงอย่างเดียว แต่ยังสัมพันธ์กับกลิ่นและการเปลี่ยนแปลงทางเคมีภายในอื่นๆ ในเมล็ดกาแฟ

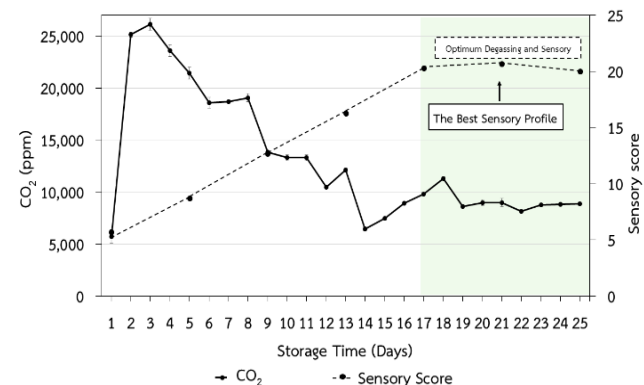


Figure 6 Correlation between Carbon dioxide (CO_2) degassing and Sensory Evaluation over Storage Time, highlighting the Optimal Degassing and Sensory Score.

เมื่อเข้าสู่วันที่ 17 มีคะแนนการประเมินทางประสาทสัมผัส แต่ละคุณลักษณะอยู่ในช่วง 3.5 - 4.5 คะแนน ทำให้มีคะแนนรวม 20.3 คะแนน ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการที่ปริมาณก๊าซ CO_2 ลดลงจนถึงจุดสมดุล ทำให้มีความสามารถในการสกัดคุณภาพของเมล็ดกาแฟคั่วได้ (Smrke et al., 2018) นอกจากนี้ยังส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพการสกัด (Smrke et al., 2018) และคุณภาพทางประสาทสัมผัส Asiah et al. (2019)

เนื่องจากในช่วงแรกของการจัดเก็บที่มีปริมาณก๊าซ CO₂ สูง ก๊าซเหล่านี้จะสร้างแรงดันด้าน และทำหน้าที่เป็นฉนวนขัดขวางการแทรกซึมของน้ำร้อนเข้าสู่เนื้อเยื่อกาแฟ ส่งผลให้การละลายสารประกอบให้กลิ่นรสทำได้ไม่สมบูรณ์ (Wang and Lim, 2014; Smrke et al., 2018) อย่างไรก็ตาม เมื่อปริมาณก๊าซ CO₂ ลดลงและเข้าสู่ระดับสมดุลในช่วงวันที่ 17-25 แรงดันภายในรูพรุนจะลดต่ำลงจนไม่เป็นอุปสรรคต่อกระบวนการชงทำให้น้ำสามารถทะลุทะลวงและสกัดสารสำคัญ รวมถึงองค์ประกอบทางเคมีที่ให้รสชาติออกมาได้อย่างเต็มที่ สอดคล้องกับรายงานของ Smrke et al. (2018) ระบุว่าระยะเวลาการพักเมล็ดกาแฟ ที่เพียงพอในการระบายก๊าซ จะช่วยเพิ่มความสมดุลและคุณภาพของน้ำกาแฟสกัดได้อย่างมีนัยสำคัญ นอกจากนี้ยังสอดคล้องกับงานวิจัยของ Asiah et al. (2019) ระบุว่าหากการชงกาแฟด้วยวิธีที่ไม่ผ่านการพักเมล็ด จะทำให้การประเมินทางประสาทสัมผัสมีค่าคะแนนต่ำ เนื่องจากก๊าซรบกวนการละลาย

Figure 7 แสดงผลการประเมินทางประสาทสัมผัส วันที่ 1, 17, 21 และ 25 ซึ่งมีสัมพันธ์กับการลดลงของก๊าซ CO₂ วันที่ 17 พื้นที่แผนภูมิขยายออกอย่างชัดเจน เนื่องจากก๊าซ CO₂ ส่วนใหญ่แพร่ออกไปจนเริ่มเข้าสู่ระดับสมดุล (Wang and Lim, 2014) ทำให้น้ำเข้าทำละลายได้สม่ำเสมอ โดยเฉพาะคะแนนความเปรี้ยวและกลิ่น สำหรับวันที่ 21-25 แผนภูมิแผ่ขยายครอบคลุมพื้นที่กว้างที่สุดมีคะแนนเท่ากับ 4.0-4.5 แสดงให้เห็นว่าโครงสร้างเมล็ดปราศจากแรงดันก๊าซขัดขวาง ทำให้น้ำสามารถสกัดสารประกอบทางเคมีออกมาได้อย่างเต็มที่ การลดลงของก๊าซ CO₂ จึงแปรผันตรงระหว่างคุณภาพการสกัด และการประเมินทางประสาทสัมผัสที่เพิ่มขึ้น (Wang and Lim, 2014; Smrke et al., 2018; Asiah et al., 2019) ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงแสดงให้เห็นว่าระยะเวลาการเก็บรักษาวันที่ 17-25 เหมาะสมที่สุดสำหรับการบริโภค อย่างไรก็ตามระยะเวลาการ

เก็บรักษาวันที่ 21 นั้นเหมาะสมที่สุด เนื่องจากมีคะแนนรวมสูงถึง 20.7 คะแนน

จากการวิเคราะห์ต้นทุนเบื้องต้น พบว่าระบบ IoT ที่พัฒนาขึ้นมีต้นทุนอุปกรณ์ประมาณ 3,000 บาทต่อชุด ซึ่งประกอบด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ เซนเซอร์ตรวจจับก๊าซ CO₂ เซนเซอร์อุณหภูมิและความชื้น รวมถึงระบบส่งข้อมูลผ่านเครือข่ายอินเทอร์เน็ต โดยมีต้นทุนต่ำกว่าเครื่องมือวิเคราะห์ก๊าซในระดับห้องปฏิบัติการ เช่น Gas Chromatography (GC) อย่างมาก ทั้งนี้ ระบบสามารถตรวจจับก๊าซ CO₂ อุณหภูมิ และความชื้นสัมพัทธ์แบบเรียลไทม์ได้อย่างต่อเนื่อง ช่วยลดขั้นตอนการเก็บตัวอย่างและลดต้นทุนด้านแรงงานในการติดตามคุณภาพกาแฟระหว่างการจัดเก็บ อย่างไรก็ตาม ระบบดังกล่าวยังมีข้อจำกัดด้านความแม่นยำเมื่อเปรียบเทียบกับเครื่องมือวิเคราะห์มาตรฐานในห้องปฏิบัติการ และอาจได้รับผลกระทบจากสภาพแวดล้อม เช่น อุณหภูมิและความชื้น จึงจำเป็นต้องมีการสอบเทียบเซนเซอร์อย่างสม่ำเสมอ

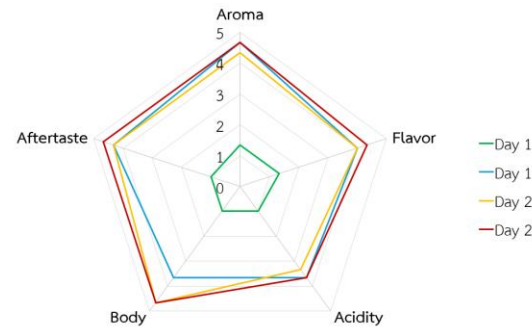


Figure 7 Sensory profile radar chart illustrating the development of coffee attributes (Aroma, Flavor, Acidity, Body, and Aftertaste) over a 25-day storage period.

4 สรุป

งานวิจัยนี้ได้พัฒนาระบบ (IoT โดยใช้เซนเซอร์ SCD41 ร่วมกับบอร์ด ESP32 เพื่อติดตามพฤติกรรมของการคายก๊าซ CO₂ ของเมล็ดกาแฟอาราบิก้าแบบเรียลไทม์ตลอดระยะเวลา 25 วัน และพบว่าช่วงเวลาการเก็บรักษาที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการนำไปชงดื่มคือวันที่ 17-25 หลังการคั่ว ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าในช่วง 1-3 วันแรกหลังคั่ว กาแฟจะคายก๊าซ CO₂ ในปริมาณสูงซึ่งเป็นตัวการต้านน้ำ ทำให้การสกัดกาแฟออกมาไม่สมบูรณ์ อย่างไรก็ตาม ช่วงวันที่ 17-25 มีพักเมล็ดกาแฟ ส่งผลให้การสกัดสารประกอบต่างๆ ได้เต็มที่ โดยปริมาณก๊าซ CO₂ ที่คายลดลงมีความสัมพันธ์เชิงลบกับค่า TA TSS และ EC ซึ่งบ่งชี้ว่าการลดลงของก๊าซช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการสกัดเนื้อสารเคมีและองค์ประกอบรสชาติในน้ำกาแฟ ยิ่งไปกว่านั้น สภาวะการคายก๊าซที่ลดลงจนเริ่มเสถียรนี้ยังเชื่อมโยงและส่งผลโดยตรงต่อ

การเพิ่มขึ้นของคะแนนการประเมินทางประสาทสัมผัสเบื้องต้น โดยเฉพาะในวันที่ 21 มีคะแนนสูงที่สุด ทำให้อยืนยันได้ว่าการพักกาแฟมีสำคัญต่อรสชาติของน้ำกาแฟ

อย่างไรก็ตาม งานวิจัยนี้มีข้อจำกัดบางประการที่ควรพิจารณา กล่าวคือ การทดลองดำเนินการกับเมล็ดกาแฟอาราบิก้าเพียงสายพันธุ์เดียว (Catuai, Acaia และ Mundo Novo) จากแหล่งปลูกเดียวคือ Cerrado Minas Gerais ประเทศบราซิล ทำให้ผลที่ได้ อาจไม่สามารถนำไปอ้างอิงได้ครอบคลุมกับกาแฟสายพันธุ์อื่นหรือแหล่งปลูกที่แตกต่างกัน นอกจากนี้ การประเมินคุณภาพทางประสาทสัมผัสในงานวิจัยนี้เป็นเพียงการทดสอบเบื้องต้นโดยผู้ทดสอบจำนวน 10 ท่าน ซึ่งอาจมีความแปรปรวนในการประเมินสูงกว่าการทดสอบโดยผู้เชี่ยวชาญที่ผ่านการฝึกอบรม

จากผลลัพธ์ที่ได้แนวทางการพัฒนางานวิจัยนี้ในอนาคตสามารถนำไปต่อยอดเพื่อสร้างฐานข้อมูลความสัมพันธ์ระหว่างระดับก๊าซ

CO₂ กับคุณภาพกาแฟให้ครอบคลุมยิ่งขึ้น เช่น การนำระบบนี้ไปทดสอบกับเมล็ดกาแฟสายพันธุ์อื่น ๆ แหล่งปลูกที่ต่างกัน นอกจากนี้ การใช้งานจริงในอุตสาหกรรมกาแฟ บาริสต้ามักเจอปัญหาว่าไม่มีเครื่องมือวัดก๊าซแบบเรียลไทม์ ทำให้การควบคุมรสชาติกาแฟทำได้ยาก ดังนั้นการพัฒนาระบบ IoT นี้จึงเป็นต้นแบบนี้ เพื่อช่วยให้ร้านกาแฟหรือโรงคั่วมีเครื่องมืออัตโนมัติปริมาณก๊าซได้แบบเรียลไทม์ ซึ่งจะช่วยควบคุมคุณภาพกาแฟได้

5 เอกสารอ้างอิง

- Asiah, N., Aqil, M., Dwiranti, N. S., David, W., & Ardiansyah, A. (2019). Sensory and chemical changes of cold and hot brew Arabica coffee at various resting time. *Asia Pacific Journal of Sustainable Agriculture Food and Energy (APJSAFE)*, 7(2), 23-26.
- ธนาคารแห่งประเทศไทย. (2563). กาแฟคุณภาพ...ทางออกของเกษตรกรไทย. <https://www.bot.or.th/th/research-and-publications/articles-and-publications/articles/regional-articles/reg-article-2020jun02.html>
- Błaszkiwicz, J., Nowakowska-Bogdan, E., Barabosz, K., Kulesza, R., Dresler, E., Woszczyński, P., ... & Szkutnik, K. (2023). Effect of green and roasted coffee storage conditions on selected characteristic quality parameters. *Scientific reports*, 13(1), 6447.
- Cardelli, C., Labuza, T.P., 2001. Application of Weibull Hazard Analysis to the Determination of the Shelf Life of Roasted and Ground Coffee. *LWT* 34 (5), 273–278. <https://doi.org/10.1006/fstl.2000.0732>
- Costa, D. T. P., Gillespie, J., Cama-Moncunill, X., Ward, S., Condell, J., Ramanathan, R., & Murphy, F. (2022). A systematic review of real-time monitoring technologies and its potential application to reduce food loss and waste: Key elements of food supply chains and IoT technologies. *Sustainability*, 15(1), 614.
- Da, C., Araújo, S., Vimercati, W.C., Macedo, L.L., Ferreira, A., Luiz, & Prezotti, C., José, L., Teixeira, Q., Sérgio, & Saraiva, H., 2020. Predicting the Electric Conductivity and Potassium Leaching of Coffee by NIR Spectroscopy Technique. <https://doi.org/10.1007/s12161-020-01843-y/Published>
- Huang, W., Wang, X., Xia, J., Li, Y., Zhang, L., Feng, H., & Zhang, X. (2023). Flexible sensing enabled agri-food cold chain quality control: A review of mechanism analysis, emerging applications, and system integration. *Trends in Food Science & Technology*, 133, 189-204.
- Prasad, D.S.G., Vanathi, A., & Kiruthika Devi, B. S. (2023). A review on IoT applications in smart agriculture. In *Recent Developments in Electronics and Communication Systems: Proceedings of the First International Conference on Recent Developments in Electronics and Communication Systems (RDECS-2022)* (pp. 683-688). 1 Oliver's Yard, 55 City Road, London, EC1Y 1SP: SAGE Publications.
- Illy, A., Viani, R., 2005. Espresso Coffee: The Science of Quality , 2nd ed. ed. Elsevier Academic Press, USA.
- Rao, N.Z., Fuller, M., 2018. Acidity and Antioxidant Activity of Cold Brew Coffee. *Sci. Rep.* 8. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-34392-w>
- Rios, M. A.C., Fernández Rosillo, F., Quiñones Huatangari, L., & Milagros Cabrejos Barrios, E. (2023). Estimation of coffee shelf life under accelerated storage conditions using mathematical models–Systematic review. *Czech Journal of Food Sciences*, 41(2), 92-102.
- Smrke, S., Wellinger, M., Suzuki, T., Balsiger, F., Opitz, S.E.W., Yeretzian, C., 2018. Time-Resolved Gravimetric Method to Assess Degassing of Roasted Coffee. *J. Agric. Food Chem.* 66, 5293–5300. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.7b03310>
- Tolessa, K., Rademaker, M., De Baets, B., Boeckx, P., 2016. Prediction of specialty coffee cup quality based on near infrared spectra of green coffee beans. *Talanta* 150, 367–374. <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2015.12.039>
- Vega, A., Reyes, S.M., Troestch, J., 2025. Physicochemical Parameters and Multivariate Analysis to Predict the Sensory Quality in Specialty Coffee from Panama. *ACS Omega* 10, 13251–13259. <https://doi.org/10.1021/acsomega.4c10914>
- Wang, X., Lim, L.T., 2014. Effect of roasting conditions on carbon dioxide degassing behavior in coffee.

Food Research International 61, 144–151.

<https://doi.org/10.1016/j.foodres.2014.01.027>

Williams, S.D., de Andrade, D., Liu, L., 2023. Coffee is more than flavor, the creation of a coffee character wheel. J. Sens. Stud. 38.

<https://doi.org/10.1111/joss.12886>