IoT-Based Air Quality Monitoring and Surveillance System

Thitiporn tongchai[1*], Parichat Boontor[2], Siriwan Kalyanamitra[3], Prach Jaikwang[4], Kititsak Wadsuntud[5], Theeranon Chaiyakun[6] & Chaichayo Suetrong[7]
[1*,2,3,4,5,6,7]Valaya Alongkorn Rajabhat University under the Royal Patronage, Pathum Thani.
*Corresponding author: thitiporn.tong@vru.ac.th

Received	Reviewed	Revised	Accepted
01/03/2026	23/06/2026	18/08/2026	18/08/2026

Abstract

This study aimed to develop and evaluate an Internet of Things (IoT)-based system for monitoring indoor particulate matter with an aerodynamic diameter of less than 2.5 μm (PM2.5) and carbon dioxide (CO_2). The system integrated PMS3003 and MH-Z14A sensors with a Raspberry Pi for data acquisition and processing. Measurements were displayed locally on an LCD, transmitted via Wi-Fi to a database, and visualized through a Grafana Dashboard. Telegram was used to report events when the measurements exceeded the predefined operational thresholds. The evaluation included a comparison of the sensor readings with a commercial monitoring device using 10 paired observations and a functional verification of data transmission, visualization, and event reporting. Within the tested ranges, the PMS3003 achieved an R^2 of 0.974, a mean absolute error (MAE) of 0.58 μg/m³, and a root mean square error (RMSE) of 0.78 μg/m³. The MH-Z14A achieved an R^2 of 1.000, an MAE of 1.90 ppm, and an RMSE of 2.07 ppm. The values displayed on the LCD and Grafana Dashboard were consistent, and the system changed its status and sent Telegram messages when PM2.5 and CO_2 exceeded the operational thresholds of 50 μg/m³ and 1,200 ppm, respectively. These findings demonstrate the feasibility of the prototype for monitoring, visualizing, and reporting indoor air-quality events within the experimental setting. However, the comparison represents a preliminary assessment of agreement with a commercial device and should not be interpreted as calibration against a traceable reference instrument.

Keywords: Internet of Things; air quality; PM2.5; carbon dioxide; Raspberry Pi; Grafana

ระบบตรวจวัดและเฝ้าระวังคุณภาพอากาศผ่านเทคโนโลยีไอโอที

ฐิติพร ตองชาย[1*], ปาริชาต บุญต้อ[2], ศิริวรรณ กัลยาณมิตร[3], ปรัชญ์ ใจกว้าง[4],
กิตติศักดิ์ วาดสันทัด[5], ธีรนนท์ ไชยคุณ[6] และชัยชโย ซื่อตรง[7]
[1*,2,3,4,5,6,7] มหาวิทยาลัยราชภัฏวไลยอลงกรณ์ ในพระบรมราชูปถัมภ์, ปทุมธานี
*ผู้นิพนธ์หลัก: thitiporn.tong@vru.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาและประเมินการทำงานของระบบไอโอทีสำหรับตรวจวัดและเฝ้าระวังค่า PM2.5 และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ภายในอาคาร ระบบประกอบด้วยเซนเซอร์ PMS3003 และ MH-Z14A เชื่อมต่อกับ Raspberry Pi สำหรับรับและประมวลผลข้อมูล แสดงค่าบนจอแอลซีดี ส่งข้อมูลผ่านเครือข่าย Wi-Fi ไปจัดเก็บในฐานข้อมูล และแสดงผลผ่าน Grafana Dashboard พร้อมรายงานเหตุการณ์ผ่าน Telegram เมื่อค่าตรวจวัดสูงกว่าเกณฑ์ดำเนินการที่กำหนด การประเมินประกอบด้วยการเปรียบเทียบค่าจากเซนเซอร์กับอุปกรณ์ตรวจวัดเชิงพาณิชย์จำนวน 10 คู่ข้อมูล และการตรวจสอบเชิงหน้าที่ของการรับส่ง แสดงผล และรายงานเหตุการณ์ ผลการเปรียบเทียบพบว่า PMS3003 มีค่า R^2 เท่ากับ 0.974 ค่า MAE เท่ากับ 0.58 µg/m³ และค่า RMSE เท่ากับ 0.78 µg/m³ ขณะที่ MH-Z14A มีค่า R^2 เท่ากับ 1.000 ค่า MAE เท่ากับ 1.90 ppm และค่า RMSE เท่ากับ 2.07 ppm ภายในช่วงค่าที่ทดสอบ นอกจากนี้ ค่าที่แสดงบนจอแอลซีดี และ Grafana Dashboard มีความสอดคล้องกัน และระบบสามารถเปลี่ยนสถานะพร้อมส่งข้อความผ่าน Telegram เมื่อ PM2.5 และ CO_2 สูงกว่าเกณฑ์ดำเนินการ 50 µg/m³ และ 1,200 ppm ตามลำดับ ผลการศึกษาแสดงให้เห็นถึงความเป็นไปได้ของระบบต้นแบบสำหรับตรวจวัด แสดงผล และรายงานเหตุการณ์ด้านคุณภาพอากาศภายในพื้นที่ทดลอง อย่างไรก็ตาม ผลการเปรียบเทียบเป็นการประเมินความสอดคล้องเบื้องต้นกับอุปกรณ์เชิงพาณิชย์ มิใช่การสอบเทียบด้วยเครื่องมืออ้างอิงที่สามารถสอบกลับได้

คำสำคัญ: อินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง; PM2.5; คาร์บอนไดออกไซด์; Grafana; Telegram

บทนำ

ในสภาพแวดล้อมปัจจุบันนี้ประเทศไทยพบวิกฤตการณ์มลพิษด้านสิ่งแวดล้อมที่มีความรุนแรงขึ้นอย่างต่อเนื่องในระดับประเทศโดยเฉพาะมหาวิทยาลัยวไลยอลงกรณ์ ในพระบรมราชูปถัมภ์ จังหวัดปทุมธานีซึ่งใกล้เคียงกับโรงงานอุตสาหกรรมพบฝุ่นละอองขนาดเล็กที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางไม่เกิน 2.5 ไมครอน (PM2.5) และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ซึ่งมลพิษเหล่านี้มีแหล่งกำเนิดมาจากกิจกรรมทางอุตสาหกรรม การคมนาคม และการเผาในที่โล่ง (World Health Organization (WHO), 2021; กรมควบคุมมลพิษ, 2565) ซึ่งสารพิษดังกล่าวส่งผลกระทบโดยตรงต่อสุขภาพอนามัยของประชาชนในวงกว้าง เนื่องจากฝุ่นละอองมีขนาดเล็กสามารถแพร่กระจายผ่านระบบทางเดินหายใจเข้าสู่กระแสเลือด ซึ่งอาจก่อให้เกิดโรคทางเดินหายใจเรื้อรัง ได้แก่ โรคหัวใจ โรคถุงลมโป่งพอง หรือโรคมะเร็ง (Pope & Dockery, 2006; Dockery et al., 1993; Brook et al., 2010)

การระบุและการประเมินความเสี่ยงด้านคุณภาพอากาศในระดับพื้นที่บางของมหาวิทยาลัยวไลยอลงกรณ์ ในพระบรมราชูปถัมภ์ จังหวัดปทุมธานี ยังต้องให้ความสำคัญเช่นกัน เนื่องจากสถานีการตรวจวัดคุณภาพอากาศตามมาตรฐานของภาครัฐมีต้นทุนสูงในการจัดสร้างและบำรุงรักษาสูงส่งผลให้มีจำนวนจำกัดและตั้งอยู่ห่างกัน ข้อมูลที่ได้จึงเป็นเพียงค่าเฉลี่ยในภาพรวมที่ไม่สามารถสะท้อนคุณภาพอากาศในพื้นที่บางส่วน หรือสภาพแวดล้อมภายในอาคารที่มีความเสี่ยงสูงได้อย่างแม่นยำและทันท่วงที

(Kumar et al., 2015; Snyder et al., 2013) พื้นที่บางส่วนดังกล่าวนั้นส่งผลให้การเฝ้าระวังและการป้องกันตนเองของประชาชนขาดประสิทธิภาพ

งานวิจัยในบริบทประเทศไทยโดย (Hatsuwan & Wichienhotu, 2025) ศึกษาการประยุกต์ใช้เซ็นเซอร์ ไอโอที ตรวจวัด PM2.5 ในพื้นที่ภาคเหนือของประเทศไทยในช่วงวิกฤตหมอกควัน พบว่าเครือข่ายเซ็นเซอร์สามารถตรวจจับการเพิ่มขึ้นของ PM2.5 ได้ก่อนที่ค่าจะเกินมาตรฐานเฉลี่ย 2–4 ชั่วโมง เมื่อเทียบกับสถานีตรวจวัดมาตรฐานที่ตั้งอยู่ในรัศมี 5 กิโลเมตรและ (Pollution Control Department, 2022) รายงานว่าประเทศไทยมีสถานีตรวจวัดคุณภาพอากาศมาตรฐานเพียง 76 สถานีทั่วประเทศ ซึ่งไม่เพียงพอต่อการครอบคลุมพื้นที่เสี่ยงในระดับชุมชน อันเป็นที่มาของความจำเป็นในการพัฒนาระบบเสริม

งานวิจัยในบริบทประเทศไทยโดย Hatsuwan & Wichienhotu (2025) ได้พัฒนาระบบไอโอทีสำหรับตรวจวัด แสดงผล แจ้งเตือนผ่านแอปพลิเคชันไลน์เพื่อควบคุมปริมาณฝุ่น PM2.5 โดยทดสอบภายในมหาวิทยาลัยราชภัฏธนบุรี จังหวัดกรุงเทพมหานคร และเปรียบเทียบแนวโน้มกับข้อมูลจากสถานีตรวจวัดคุณภาพอากาศของ(Pollution Control Department, 2022) จากผลการทดสอบพบว่าระบบสามารถติดตามการเปลี่ยนแปลงระดับ PM2.5 และแจ้งเตือนได้ ส่งผลให้การฉีดละอองหมอกด้วยน้ำแรงดันสูงเป็นเวลา 20 นาทีสามารถลดระดับฝุ่นในพื้นที่เปิดได้ แต่ยังไม่มีประสิทธิภาพเพียงพอสำหรับพื้นที่ปิด แสดงให้เห็นว่าประสิทธิผลของการควบคุมฝุ่นขึ้นอยู่กับลักษณะพื้นที่และสภาพแวดล้อมในการใช้งานเป็นสิ่งสำคัญ

จากการศึกษาปัญหาดังกล่าวคณะผู้วิจัยจึงมีแนวคิดนำเทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง (Internet of Things: ไอโอที) ซึ่งเป็นเทคโนโลยีได้รับความสนใจในปัจจุบันจึงมีแนวคิดจะนำเทคโนโลยีนี้มาช่วยประเมินผลค่าฝุ่นตามสถานการณ์ส่วนบริเวณพื้นที่คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม ของมหาวิทยาลัยวไลยอลงกรณ์ ในพระบรมราชูปถัมภ์ จังหวัดปทุมธานีซึ่งเป็นบริเวณซึ่งมีประชากรที่เป็นบุคลากรการศึกษา นักศึกษา และประชาชนทั่วไป ด้วยความสามารถในการเชื่อมต่อเซนเซอร์ มีระบบประมวลผลที่มีต้นทุนต่ำ และเพื่อรวบรวมและส่งข้อมูลการตรวจวัดสภาพอากาศแบบเรียลไทม์

การทบทวนวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1. เทคโนโลยีไอโอทีสำหรับการติดตามคุณภาพอากาศ

เทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่งมีบทบาทสำคัญต่อการติดตามคุณภาพอากาศเพื่อความสะดวกสำหรับตรวจเช็คสภาพอากาศ เนื่องจากสามารถเชื่อมโยงเซนเซอร์ หน่วยประมวลผล เครือข่ายสื่อสาร ฐานข้อมูล และส่วนแสดงผลให้ทำงานร่วมกัน เพื่อรวบรวม ส่ง และนำเสนอข้อมูลสิ่งแวดล้อมได้อย่างต่อเนื่องซึ่ง Atzori et al. (2010) อธิบายว่า ไอโอที เกิดจากการบูรณาการอุปกรณ์ตรวจวัดกับระบบสื่อสารและการประมวลผลข้อมูล ขณะที่ Zanella et al. (2014) ชี้ให้เห็นว่าโครงสร้างดังกล่าวสามารถประยุกต์ใช้กับการเฝ้าระวังคุณภาพอากาศในพื้นที่เมืองและสนับสนุนการให้บริการข้อมูลแก่ผู้ใช้งานได้ ดังนั้นไอโอทีจึงเป็นพื้นฐานสำคัญของระบบติดตามคุณภาพอากาศที่ต้องการตรวจวัดแบบต่อเนื่อง แสดงผลจากระยะไกล และแจ้งเตือนเมื่อค่ามลพิษสูงกว่าเกณฑ์ที่กำหนด เพื่อนำไปสู่การเฝ้าระวังของประชาชนในพื้นที่นั้น

2. ระบบตรวจวัดคุณภาพอากาศด้วยเซนเซอร์ต้นทุนต่ำ

งานวิจัยของ Bogdanffy et al. (2025) พัฒนาระบบตรวจวัดต้นทุนต่ำโดยใช้เซนเซอร์ฝุ่นแบบกระเจิงแสง SN-GCJA5 และเซนเซอร์ CCS811 สำหรับประมาณค่า eCO_2 ซึ่งทดสอบความสอดคล้องระหว่างอุปกรณ์ชนิดเดียวกันเป็นเวลาหลายวัน แต่ไม่ได้รายงานสถิติความคลาดเคลื่อนเทียบเครื่องมือมาตรฐาน ขณะที่ Wang et al. (2025) วางเซนเซอร์ก๊าซร่วมกับเครื่องวิเคราะห์มาตรฐานของ Thermo Scientific ระหว่างเดือนกันยายน–ธันวาคม 2023 และเปรียบเทียบการสอบเทียบด้วย MLR, LSTM และ Random Forest โดยใช้ Pearson's R และ CvMAE พบว่า Random Forest ให้ผลดีที่สุด และเสนอให้เก็บข้อมูลร่วมกับเครื่องอ้างอิงอย่างน้อย 4 สัปดาห์ ส่วน Tasmurzayev et al. (2025) ใช้เซนเซอร์ CO_2 แบบ NDIR รุ่น MH-Z19C ช่วง 0–5,000 ppm ความคลาดเคลื่อนตามข้อกำหนด ±50 ppm ร่วมกับเซนเซอร์ฝุ่นแบบเลเซอร์ ZH06 โดยสอบเทียบเบื้องต้นกับเครื่องเชิงพาณิชย์เป็นเวลา 1 ชั่วโมงและบันทึกข้อมูลทุก 60 วินาที ผลการทบทวนชี้ให้เห็นว่าเซนเซอร์ต้นทุนต่ำสามารถใช้ติดตามแนวโน้มคุณภาพอากาศได้ แต่ความน่าเชื่อถือขึ้นอยู่กับการวัดร่วมตำแหน่ง ระยะเวลาสอบเทียบ ช่วงค่าที่ครอบคลุม และการรายงานสถิติมาตรฐาน เช่น R^2, MAE และ RMSE (Bogdanffy et al., 2025; Wang et al., 2025; Tasmurzayev et al., 2025).

3. ระบบแสดงผลและแจ้งเตือนคุณภาพอากาศ

งานวิจัยของ Mudaliar and Sivakumar (2020) ได้พัฒนาระบบติดตามพลังงานแบบเวลาจริงโดยใช้ Raspberry Pi ร่วมกับ Node.js และ InfluxDB พร้อมแสดงข้อมูลผ่าน Grafana ซึ่งผู้ใช้สามารถเข้าถึงได้จากคอมพิวเตอร์และโทรศัพท์มือถือ จากนั้น Cayo Cabrera et al. (2025) ประยุกต์โมดูล ESP32 และ MQTT เพื่อส่งข้อมูลไปยังระบบคลาวด์และแสดงผลผ่าน Grafana โดยปรับปรุงข้อมูลทุก 5 วินาที พร้อมกำหนดเงื่อนไขแจ้งเตือนจากระดับและระยะเวลาของเหตุการณ์ ขณะที่ Tamilias et al. (2025) สรุปว่าระบบติดตามคุณภาพอากาศสมัยใหม่ใช้เว็บแดชบอร์ด แอปพลิเคชัน และอุปกรณ์แสดงผลร่วมกับการแจ้งเตือนผ่านอีเมล ข้อความ และแอปพลิเคชัน โดยอาศัยแพลตฟอร์ม เช่น MQTT, Node-RED, InfluxDB และ Grafana อย่างไรก็ตาม งานที่ผ่านมาให้รายละเอียดเกี่ยวกับความถี่การบันทึกข้อมูล ที่มาของเกณฑ์แจ้งเตือน และเวลาตอบสนองตั้งแต่ตรวจพบเหตุการณ์จนถึงการแจ้งเตือนแตกต่างกัน จึงยังมีความจำเป็นต้องประเมินองค์ประกอบเหล่านี้อย่างเป็นระบบภายใต้สภาพแวดล้อมใช้งานจริง (Mudaliar & Sivakumar, 2020; Cayo Cabrera et al., 2025; Tamilias et al., 2025).

4. การสังเคราะห์งานวิจัยที่เกี่ยวข้องและช่องว่างการวิจัย

เพื่อให้เห็นพัฒนาการของระบบตรวจวัดและเฝ้าระวังคุณภาพอากาศด้วยเทคโนโลยีไอโอที ผู้วิจัยได้สังเคราะห์และเปรียบเทียบงานวิจัยที่เกี่ยวข้องในด้านเซนเซอร์ หน่วยประมวลผล การแสดงผล การแจ้งเตือน และวิธีประเมินประสิทธิภาพ ดังแสดงในตารางที่ 1 โดยผลการเปรียบเทียบดังกล่าวนำไปสู่การระบุข้อจำกัดของงานเดิมและช่องว่างที่งานวิจัยนี้มุ่งแก้ไข

จากการสังเคราะห์พบว่า งานเดิมครอบคลุมสถาปัตยกรรมไอโอทีด้วยเซนเซอร์ต้นทุนต่ำ ระบบคลาวด์ แดชบอร์ด และการแจ้งเตือนแล้ว แต่ส่วนใหญ่มุ่งเน้นการแสดงผลลัพธ์ทางฮาร์ดแวร์ ขณะที่งานตรวจวัดคุณภาพอากาศบางส่วนยังไม่รายงานความถี่การบันทึก ที่มาของเกณฑ์แจ้งเตือน และเวลาตอบสนองอื่นๆ งานวิจัยนี้จึงบูรณาการการตรวจวัด PM2.5 และ CO_2 การบันทึกข้อมูลทุก 5 นาที การแสดงผลผ่าน Grafana และการแจ้งเตือนผ่าน LINE เข้าด้วยกัน พร้อมทดสอบการทำงานภายใต้สภาพแวดล้อมจริง อย่างไรก็ตาม ผลการเปรียบเทียบเซนเซอร์จะตีความในระดับความสอดคล้องเชิงการทดลองภาคปฏิบัติ เนื่องจากยังไม่มีเครื่องมืออ้างอิงที่มีการสอบกลับทางมาตรวิทยา

Table 1 การเปรียบเทียบระบบไอโอทีและระบบตรวจวัดต้นทุนต่ำจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัย	อุปกรณ์ตรวจวัด	หน่วยประมวลผล	การแสดงผล	การแจ้งเตือน	วิธีประเมิน	ข้อจำกัดที่เกี่ยวข้อง
Atzori et al. (2010)	เซนเซอร์ไอโอทีทั่วไป	สถาปัตยกรรม IoT	-	-	การทบทวนวรรณกรรม	ไม่มีการทดลองระบบคุณภาพอากาศ
Zanella et al. (2014)	เซนเซอร์สิ่งแวดล้อม	Urban IoT	บริการระดับเมือง	ไม่เน้น	กรณีศึกษาเมืองอัจฉริยะ	ไม่ประเมินเซนเซอร์ต้นทุนต่ำ
Bogdanffy et al. (2025)	SN-GCJA5 และ CCS811	Raspberry Pi 4	เว็บแอปพลิเคชัน	-	ทดสอบภาคสนาม	ไม่เทียบ PM กับเครื่องมือมาตรฐาน
Wang et al. (2026)	เซนเซอร์ก๊าซไฟฟ้าเคมี	Raspberry Pi	-	ไม่เน้น	เทียบเครื่องมาตรฐานด้วย (R) และ CvMAE	ต้องใช้ข้อมูลสอบเทียบอย่างน้อย 4 สัปดาห์
Mudaliar and Sivakumar (2020)	มิเตอร์พลังงานไฟฟ้า	Raspberry Pi	Grafana	-	ทดสอบการทำงานจริง	ไม่ใช่ระบบคุณภาพอากาศ
Cayo Cabrera et al. (2025)	เซนเซอร์อัตราการไหล YF-S201	ESP32	Grafana	แจ้งเตือนตามเกณฑ์	สอบเทียบและทดสอบภาคสนาม	ไม่ใช่ระบบคุณภาพอากาศ
Tamilias et al. (2025)	เซนเซอร์คุณภาพอากาศหลายชนิด	Raspberry Pi และ Arduino	Grafana	อีเมลและข้อความ	การทบทวนและเสนอระบบต้นแบบ	ยังไม่ประเมินระบบภาคสนามครบถ้วน
งานวิจัยนี้	*PMS3003 และ MH-Z14A*	*Raspberry Pi*	*Grafana*	*รายงานสถานะผ่าน Telegram เมื่อค่าเกินเกณฑ์*	*เปรียบเทียบค่าและทดสอบภาคสนาม*	*ไม่มีเครื่องมืออ้างอิงที่มี traceability*

วัตถุประสงค์การวิจัย

1. เพื่อพัฒนาระบบไอโอทีสำหรับตรวจวัด บันทึก แสดงผล และรายงานค่า PM2.5 และ CO_2 แบบเรียลไทม์

2. เพื่อประเมินความสอดคล้องของค่าที่ตรวจวัด และทดสอบการทำงานของระบบด้านการรับส่ง บันทึก และแสดงผลข้อมูลภายใต้สภาพแวดล้อมจริง

วิธีการวิจัย

การวิจัยนี้เป็นการพัฒนาเชิงวิศวกรรมระบบ (System development) โดยมีเป้าหมายเพื่อออกแบบระบบตรวจวัดและเฝ้าระวังคุณภาพอากาศแบบเรียลไทม์ผ่านไอโอที โดยครอบคลุมตั้งแต่การอ่านค่าจากเซนเซอร์ การประมวลผลเบื้องต้น การจัดเก็บข้อมูล การแสดงผลเชิงภาพ และการแจ้งเตือนเมื่อพบความผิดปกติ ขั้นตอนการดำเนินการแบ่งเป็น 5 ระยะดังนี้

1. ศึกษาและวิเคราะห์ข้อมูล

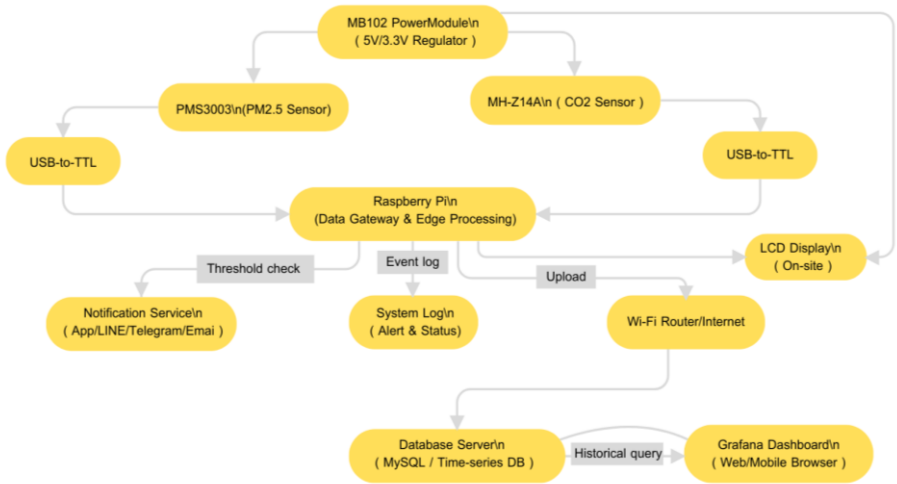
1.1 วิเคราะห์หลักการตรวจวัดของเซนเซอร์ PMS3003 แบบการกระเจิงแสงเชิงแสง (optical light scattering) และ MH-Z14A แบบ NDIR รวมถึงอิทธิพลของความชื้นสัมพัทธ์ ระยะเวลาคงตัวของเซนเซอร์ และการชดเชยค่าฐานอัตโนมัติ (ABC)

1.2 กำหนดสถาปัตยกรรมการรับข้อมูลผ่านการสื่อสารแบบอนุกรม UART โครงสร้างเฟรมข้อมูล กระบวนการบันทึกข้อมูล และตรรกะการตรวจจับค่าเกินเกณฑ์

1.3 ออกแบบการสื่อสารข้อมูลผ่านเครือข่าย Wi-Fi สำหรับจัดเก็บข้อมูลอนุกรมเวลา แสดงผลผ่าน Grafana Dashboard และส่งข้อความรายงานสถานะผ่าน Telegram แบบเรียลไทม์

2. การออกแบบระบบระบบตรวจวัดคุณภาพอากาศแบบไอโอที

นำเสนอการออกแบบระบบตรวจวัดคุณภาพอากาศแบบไอโอที ดังรูปภาพที่ 1 เพื่อแสดงถึงสถาปัตยกรรมของระบบ

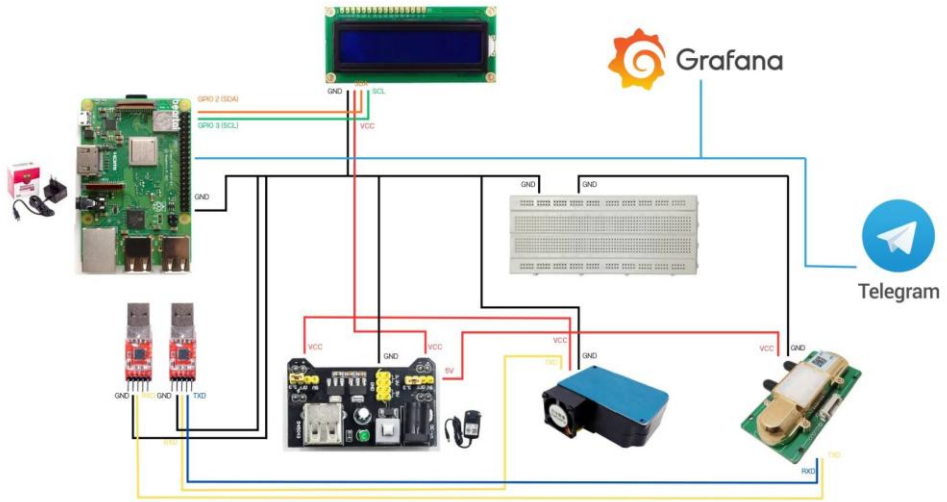


รูปภาพที่ 1 แสดงสถาปัตยกรรมของระบบตรวจวัดคุณภาพอากาศแบบไอโอที

จากรูปภาพที่ 1 แสดงสถาปัตยกรรมของระบบตรวจวัดและเฝ้าระวังคุณภาพอากาศแบบไอโอที โดยออกแบบให้ทำงานเป็นลำดับตั้งแต่การตรวจวัด ณ จุดติดตั้งไปจนถึงการแสดงผลบนเครือข่าย โดยส่วนหน้างาน (Sensing Node) ประกอบด้วยเซนเซอร์ PMS3003 สำหรับวัดความเข้มข้นฝุ่นละอองPM2.5 และเซนเซอร์ MH-Z14A สำหรับวัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ซึ่งทั้งสองส่งข้อมูลแบบอนุกรมเข้าสู่ Raspberry Pi ผ่านตัวแปลงสัญญาณ USB-to-TTL แยกคนละชุด เพื่อให้การอ่านข้อมูลมีความเสถียรและลดการรบกวนระหว่างพอร์ตสื่อสาร Raspberry Pi ทำหน้าที่เป็นเกตเวย์และหน่วยประมวลผลบนเครือข่าย (edge processing) โดยดำเนินการตรวจสอบความสมบูรณ์ของข้อมูล กรองสัญญาณรบกวนเบื้องต้น และจัดรูปแบบข้อมูลก่อนส่งต่อ ทั้งนี้โมดูลจ่ายไฟเข้า MB102 (5V Regulator) ทำหน้าที่ควบคุมและกระจายแรงดันให้กับวงจรและอุปกรณ์สำคัญ เพื่อเพิ่มความต่อเนื่องของการทำงานในระยะยาว ขณะเดียวกันระบบมีจอแอลซีดีสำหรับแสดงค่าที่ตรวจวัดได้และสถานะการทำงานแบบทันที ณ จุดติดตั้ง เมื่อข้อมูลผ่านการประมวลผลแล้ว Raspberry Pi จะอัปโหลดข้อมูลผ่านเครือข่าย Wi-Fi ไปยังฐานข้อมูลบน Grafana Dashboard เพื่อจัดเก็บทั้งแบบเรียลไทม์และย้อนหลัง จากนั้น Grafana Dashboard จะดึงข้อมูลจากฐานข้อมูลเพื่อแสดงผลบนเว็บไซต์หรืออุปกรณ์พกพา ทำให้ผู้ใช้สามารถติดตามแนวโน้มและตรวจสอบเหตุการณ์ผิดปกติได้สะดวก นอกจากนี้ระบบยังมีการตรวจสอบค่าเทียบกับเกณฑ์ที่กำหนด (threshold check) เพื่อสร้างการแจ้งเตือนผ่านบริการ Notification (Telegram) พร้อมบันทึกเหตุการณ์และสถานะการทำงานในระบบ log ซึ่งช่วยสนับสนุนการตรวจสอบย้อนหลังและการประเมินความเสถียรของระบบซึ่งการจัดวางอุปกรณ์ดังรูปภาพที่ 2

3. การพัฒนาระบบตรวจวัดและเฝ้าระวังคุณภาพอากาศแบบไอโอที

การพัฒนาระบบประกอบโดยมีหัวใจหลักคือ Raspberry Pi ทำหน้าที่เป็นหน่วยประมวลผลควบคุมเซนเซอร์โดยแสดงผลดังรูปภาพที่ 2



รูปภาพที่ 2 การจัดวางอุปกรณ์ฮาร์ดแวร์และเส้นทางการรับส่งข้อมูลของระบบตรวจวัดคุณภาพอากาศแบบไอโอที

การศึกษาครั้งนี้ได้กำหนดกรอบการออกแบบระบบเชิงระบบ ประยุกต์ใช้สมการพื้นฐานจำนวน 5 สมการ ได้แก่ กระแสรวมของระบบ กำลังไฟฟ้าขณะทำงาน แรงดันตกคร่อมในสายไฟ ระยะเวลาการส่งข้อมูลผ่าน UART และอัตราการส่งข้อมูลไปยังฐานข้อมูล สมการดังกล่าวใช้เป็นแนวทางเชิงทฤษฎีสำหรับเลือกแหล่งจ่ายไฟ ออกแบบการเชื่อมต่อ และประเมินความสามารถในการรับส่งข้อมูลของระบบ โดยค่าพารามิเตอร์อ้างอิงจากข้อกำหนดของอุปกรณ์และสภาวะการทำงานที่กำหนด มิได้ใช้แทนผลการตรวจวัดเชิงทดลอง ทั้งนี้ สมการที่ใช้ในการออกแบบระบบแสดงดังสมการที่ (1)–(5) ต่อไปนี้

(1) การประเมินกระแสรวมของระบบ (Power budget)

การกำหนดพิกัดแหล่งจ่ายไฟของระบบพิจารณาจากกระแสสูงสุดที่หน่วยประมวลผลและเมื่อทำงานกับอุปกรณ์ต่อพ่วงพร้อมกัน แนวทางดังกล่าวสอดคล้องกับ Galván et al. (2026) ซึ่งประเมินกระแสรวมของโหนดไอโอทีจากผลรวมกระแสขององค์ประกอบที่อยู่ในสถานะทำงาน สำหรับระบบที่พัฒนาขึ้น อุปกรณ์หลักประกอบด้วย Raspberry Pi จอแสดงผลแอลซีดี เซนเซอร์ PMS3003 เซนเซอร์ MH-Z14A และโมดูล USB-to-TTL จำนวนสองชุด ดังนั้น กระแสรวมสูงสุดของระบบคำนวณได้จากสมการที่ (1)

$$I_{total,max} = I_{RPi,max} + I_{LCD,max} + I_{PMS,max} + I_{CO2,max} + I_{TTL1,max} + I_{TTL2,max} \quad (1)$$

โดย คือกระแสรวมที่แหล่งจ่ายไฟ I คือกระแสของอุปกรณ์ตามลำดับ

(2) สมการกำลังไฟฟ้าขณะทำงาน (Operating power)

$$P_{total,max} = V_{supply} I_{total,max} \quad (2)$$

เมื่อ $P_{total,max}$ คือกำลังฟ้าสูงสุดของระบบ มีหน่วยเป็นวัตต์ $(W), V_{supply}$ คือแรงดันของแหล่งจ่ายไฟหลัก มีหน่วยเป็นโวลต์(V) และ $I_{total,max}$ คือกระแสรวมสูงสุด

(3) สมการแรงดันตกคล่อม (Voltage drop on wiring)

$$V_{load} = V_{supply} - I_{branch} R_{wire} \quad (3)$$

เมื่อ V_{load} คือแรงดันถึงปลายทางอุปกรณ์ I_{branch} คือกระแสในสายนั้นๆ และ R_{wire} คือความต้านทานรวมของสายไฟ

(4) สมการเวลาส่งข้อมูล UART ต่อหนึ่งเฟรม (UART transmission time) โดยหนึ่งเฟรมประกอบด้วย บิตเริ่มต้น บิตข้อมูล บิตพาริตี (Parity bit) ในกรณีนี้กำหนดใช้งานและบิตหยุด ซึ่งจะเรียงตามลำดับด้วยอัตราบอดที่กำหนด (Wang, 2023) สำหรับการส่งสัญญาณ UART แบบไบนารี เวลาของบิตเท่ากับ $1/B$ ดังนั้นเวลาขั้นต่ำเชิงทฤษฎีที่ใช้ส่งข้อมูลหนึ่งเฟรมคำนวณได้ดังสมการที่ (4)

$$t_{UART} = \frac{N_{bit}}{B} \tag{4}$$

เมื่อ N_{bit} คือจำนวนบิตต่อเฟรม และ B คือ baud rate สมการนี้ใช้ประเมินความหน่วงขั้นต่ำในการรับข้อมูลจากเซนเซอร์ผ่าน USB-to-TTL

(5) สมการอัตราการส่งข้อมูลออกจากโหนดไปยังฐานข้อมูล (Upload data rate)

$$R_{up} = \frac{S_{payload}}{\Delta t} \tag{5}$$

เมื่อ $S_{payload}$ คือขนาดข้อมูลที่ส่งต่อหนึ่งครั้ง (ข้อมูล PM2.5, CO_2, timestamp, device_id, status) และ Δt คือคาบเวลาการส่งข้อมูล

4. การพัฒนาซอฟต์แวร์บน Raspberry Pi

ซอฟต์แวร์บน Raspberry Pi ทำหน้าที่รับข้อมูลจากเซนเซอร์ PMS3003 และ MH-Z14A ผ่านโมดูล USB-to-TTL แยกช่องสื่อสาร โดยกำหนดคาบการอ่านค่า Δt_{read} เท่ากับ 1 วินาที และปรับปรุงค่าบนจอแอลซีดีหลังจากได้รับข้อมูลแต่ละรอบ ส่วนการบันทึกข้อมูลลงฐานข้อมูลกำหนดคาบ Δt_{store} เท่ากับ 300 วินาที ความแตกต่างระหว่างค่าบนจอแอลซีดี กับ Grafana จึงอาจเกิดจากเวลาที่ข้อมูลได้รับการปรับปรุงไม่พร้อมกันประมาณ 1–2 วินาที มิได้หมายถึงความคลาดเคลื่อนของเซนเซอร์ ในแต่ละรอบ ซอฟต์แวร์ตรวจสอบความสมบูรณ์ของเฟรมข้อมูลและช่วงค่าที่เซนเซอร์รองรับก่อนจัดรูปแบบเป็นชุดข้อมูลที่ประกอบด้วยเวลา รหัสอุปกรณ์ ค่า PM2.5 ค่า CO_2 และสถานะของระบบ จากนั้นส่งผ่านเครือข่าย Wi-Fi ไปจัดเก็บในฐานข้อมูลและแสดงผลผ่าน Grafana Dashboard สำหรับการรายงานค่าที่สูงกว่าเกณฑ์ ระบบเปรียบเทียบค่าที่ตรวจวัดกับเกณฑ์ θ_{PM} = 50µg/m³ และ θ_{CO2} = 1200 ppm หากค่าใดสูงกว่าเกณฑ์ ซอฟต์แวร์จะบันทึกสถานะเหตุการณ์และส่งข้อความผ่าน Telegram ทั้งนี้ การศึกษานี้ประเมินเฉพาะการทำงานของระบบตรวจวัดและรายงานข้อมูล ไม่ครอบคลุมการประเมินอัตราการแจ้งเตือนผิดพลาดหรือระยะเวลาหน่วงของ Telegram ดังนั้น การติดตั้งระบบภายใต้สภาพแวดล้อมจริงแสดงในรูปภาพที่ 3 และลักษณะกล่องควบคุมแสดงผลในรูปภาพที่ 4



รูปภาพที่ 3 การติดตั้งระบบภายใต้สภาพแวดล้อมจริง



รูปภาพที่ 4 ลักษณะกล่องควบคุมแสดงผล

5. การพัฒนาแดชบอร์ด Grafana (Visualization & Monitoring)

การพัฒนาแดชบอร์ด Grafana เริ่มจากการเชื่อมต่อแหล่งข้อมูล (data source) กับฐานข้อมูลที่จัดเก็บค่าจาก Raspberry Pi และกำหนดช่วงเวลารีเฟรชให้สอดคล้องกับคาบการส่งข้อมูล Δt เพื่อให้แสดงผลได้แบบใกล้เรียลไทม์ จากนั้นออกแบบแผงแสดงผลหลัก 2 รูปแบบ ได้แก่ กราฟอนุกรมเวลา (time-series) สำหรับติดตามแนวโน้ม PM2.5 และ CO_2 และหน้าปัด Gauge สำหรับแสดงค่าปัจจุบัน เพื่อให้ตีความได้รวดเร็ว มีการกำหนดหน่วยและสเกลการแสดงผลให้เหมาะสม พร้อมตั้งค่า threshold เพื่อสะท้อนระดับความเสี่ยงและช่วยสังเกตความผิดปกติได้ชัดเจน นอกจากนี้ได้กำหนดการแสดงสถานะระบบ คือ เวลาอัปเดตล่าสุดและสถานะการเชื่อมต่อ เพื่อประเมินความต่อเนื่องของข้อมูล ในส่วนการเฝ้าระวัง ได้ตั้งค่าเงื่อนไขการแจ้งเตือน (alert rules) เมื่อค่าตรวจวัดเกินเกณฑ์ที่กำหนด และบันทึกเหตุการณ์เพื่อใช้ตรวจสอบย้อนหลัง ทำให้แดชบอร์ดสามารถใช้ทั้งเพื่อการติดตามแบบปัจจุบันและการวิเคราะห์ข้อมูลย้อนหลังได้อย่างเป็นระบบ แสดงดังรูปภาพที่ 5



รูปภาพที่ 5 ภาพ Dashboard บน Grafana

6. การประเมินความสอดคล้องของค่าที่ตรวจวัด

ระบบได้รับการทดสอบร่วมตำแหน่งกับอุปกรณ์ตรวจวัดเชิงพาณิชย์โดยบันทึกค่า PM2.5 และ CO_2 จำนวน 10 คู่ พร้อมอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ และประเมินด้วย R^2 , MAE และ RMSE ทั้งนี้อุปกรณ์เปรียบเทียบไม่มีหลักฐานการสอบเทียบที่สอบกลับได้ทางมาตรวิทยา ผลการทดสอบจึงใช้แสดงความสอดคล้องภายใต้เงื่อนไขที่ศึกษาเท่านั้น มิใช่การยืนยันความถูกต้องสัมบูรณ์ของเซนเซอร์ นอกจากอุปกรณ์ตรวจวัดเชิงพาณิชย์ผู้วิจัยยังอ้างอิงข้อมูลกับเว็บไซต์รายงานสภาพอากาศตามภูมิภาค Air4Thai ออนไลน์ (Pollution Control Department, 2026)

ผลการวิจัยและอภิปรายผลการวิจัย

ผลการดำเนินงานและวิเคราะห์ข้อมูล ในการทดสอบประสิทธิภาพของระบบตรวจวัดคุณภาพอากาศ

Table 2 การประเมินความสอดคล้องของค่า PM2.5 และ CO_2 ระหว่างเซนเซอร์ของระบบกับอุปกรณ์ตรวจวัดเชิงพาณิชย์

ครั้งที่	PM2.5	PMS3003	CO_2	MH-Z14A	อุณหภูมิ	RH
1	14.0µg/m³	14.1µg/m³	1,359 ppm	1,362 ppm	31	71
2	17.4µg/m³	17.9µg/m³	1,091 ppm	1,092 ppm	31	70
3	11.9µg/m³	13.9µg/m³	1,153 ppm	1,155 ppm	31	69
4	12.9µg/m³	13.0µg/m³	1,152 ppm	1,153 ppm	32	68
5	19.0µg/m³	19.9µg/m³	1,012 ppm	1,015 ppm	32	67
6	15.3µg/m³	15.7µg/m³	1,021 ppm	1,022 ppm	32	66
7	16.2µg/m³	16.7µg/m³	919 ppm	921 ppm	31	67
8	23.9µg/m³	23.2µg/m³	841 ppm	843 ppm	31	67
9	20.0µg/m³	20.5µg/m³	875 ppm	876 ppm	31	66
10	16.2µg/m³	16.8µg/m³	776 ppm	779 ppm	32	66

หมายเหตุ: อุปกรณ์ Lepmerk ใช้เป็นอุปกรณ์ตรวจวัดเชิงพาณิชย์สำหรับการเปรียบเทียบค่า โดยไม่มีหลักฐานการสอบเทียบที่สามารถสอบกลับได้ทางมาตรวิทยา ดังนั้น ผลการประเมินจึงแสดงความสอดคล้องระหว่างอุปกรณ์ภายใต้เงื่อนไขการทดลองเท่านั้น และไม่ใช้ยืนยันความถูกต้องสัมบูรณ์ของเซนเซอร์

Table 3 ผลการทดสอบการตอบสนองระบบต่อสถานการณ์จำลอง

เหตุการณ์ทดสอบ	ตัวแปรเป้าหมาย	ค่าเริ่มต้น ⟶ ค่าหลังเหตุการณ์	t_{90} (วินาที)	ข้อสังเกตเชิงระบบ
เปิดหน้าต่างเพื่อระบายอากาศ	PM2.5	42 ⟶ 18 µg/m³	65	ระบบตรวจพบการลดลงของ PM2.5 หลังเพิ่มการระบายอากาศ
เปิดหน้าต่างเพื่อระบายอากาศ	CO_2	980 ⟶ 1050 ppm	ไม่สามารถคำนวณได้จากข้อมูลที่บันทึก	CO_2 ลดลงหลังเปิดหน้าต่าง แต่ไม่มีข้อมูลอนุกรมเวลาครบสำหรับคำนวณ (t_{90})
จุดธูปเพื่อสร้างควันระยะสั้น	PM2.5	12 ⟶ 165 µg/m³	18	PMS3003 ตรวจพบการเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วของอนุภาคควัน
เพิ่มจำนวนคนในห้อง 5 คน เป็นเวลา 15 นาที	CO_2	420 ⟶ 980 ppm	155	MH-Z14A ตรวจพบการสะสมของ CO_2 จากกิจกรรมของผู้ใช้งาน
ทำความสะอาดพื้นเพื่อสร้างฝุ่นฟุ้ง	PM2.5	22 ⟶ 78 µg/m³	35	ระบบตรวจพบการเพิ่มขึ้นของ PM2.5 จากการฟุ้งกระจายของฝุ่น

หมายเหตุ: t_{90} หมายถึง ระยะเวลาตั้งแต่เริ่มเหตุการณ์จนสัญญาณผ่านร้อยละ 90 ของการเปลี่ยนแปลงทั้งหมด โดยคำนวณจากข้อมูลที่ผ่านค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่ด้วยหน้าต่างเวลา 30 วินาที การทดสอบแต่ละเหตุการณ์ดำเนินการหนึ่งครั้ง (n=1) จึงใช้เพื่อแสดงการตอบสนองเชิงหน้าที่ของระบบเบื้องต้นเท่านั้น ไม่ใช้ประเมินความสามารถในการทำซ้ำหรือคุณลักษณะการตอบสนองมาตรฐานของเซนเซอร์

Table 4 ผลการตรวจสอบความสอดคล้องของการแสดงผลระหว่างจอแอลซีดีและ Grafana Dashboard

กรณีทดสอบ	พารามิเตอร์	ค่าบนแอลซีดี	ค่าบน Grafana	ผลการตรวจสอบ
สภาวะปกติ	PM2.5	26 µg/m³	26 µg/m³	ตรงกัน
จำลองฝุ่นเข้าสู่บริเวณตรวจวัด	PM2.5	75 µg/m³	75 µg/m³	ตรงกัน
สภาวะ CO_2 สูงในห้องปิด	CO_2	1,050 ppm	1,050 ppm	ตรงกัน

หมายเหตุ: ยืนยันว่าข้อมูลที่ผู้ใช้เห็นในพื้นที่ติดตั้ง (Local) และผ่านออนไลน์ (Remote) ตรงกัน

Table 5 ผลการตรวจสอบเชิงหน้าที่ของกลไกแสดงสถานะและรายงานเหตุการณ์

ครั้งที่	กรณีทดสอบ	ค่าที่ตรวจวัด	เกณฑ์ดำเนินการ	สถานะบน Grafana	ผลผ่าน Telegram	ผลตรวจสอบ
1	PM2.5 ไม่เกินเกณฑ์	25 μg/m³	PM2.5 > 50 μg/m³	สถานะปกติ	ไม่ส่งข้อความ	ถูกต้อง
2	PM2.5 เกินเกณฑ์	75 μg/m³	PM2.5 > 50 μg/m³	แสดงสถานะเกินเกณฑ์	ส่งข้อความรายงานเหตุการณ์	ถูกต้อง
3	CO_2 ไม่เกินเกณฑ์	1,100 ppm	CO_2> 1,200 ppm	สถานะปกติ	ไม่ส่งข้อความ	ถูกต้อง
4	CO_2 เกินเกณฑ์	1,359 ppm	CO_2 > 1,200 ppm	แสดงสถานะเกินเกณฑ์	ส่งข้อความรายงานเหตุการณ์	ถูกต้อง
5	เริ่มต้นระบบใหม่	–	–	แสดงสถานะเริ่มต้น	ไม่ส่งข้อความ	ระบบกลับมาทำงานได้ตามปกติ

หมายเหตุ: เกณฑ์ PM2.5 ที่ 50 μg/m³ และ CO_2 ที่ 1,200 ppm เป็นเกณฑ์ดำเนินการที่กำหนดสำหรับระบบต้นแบบเพื่อใช้ตรวจสอบตรรกะการแสดงสถานะและรายงานเหตุการณ์แบบทันที มิใช่ค่าที่ใช้วินิจฉัยการปฏิบัติตามมาตรฐานคุณภาพอากาศเฉลี่ย 24 ชั่วโมง

สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้พัฒนาระบบไอโอทีสำหรับตรวจวัด PM2.5 และ CO_2 โดยใช้เซนเซอร์ PMS3003 และ MH-Z14A ร่วมกับ Raspberry Pi ระบบอ่านและแสดงค่าบนจอแอลซีดี ส่งข้อมูลผ่านเครือข่าย Wi-Fi ไปจัดเก็บในฐานข้อมูล และแสดงผลผ่าน Grafana Dashboard พร้อมรายงานเหตุการณ์ผ่าน Telegram เมื่อ PM2.5 และ CO_2 สูงกว่าเกณฑ์ดำเนินการที่กำหนดไว้ที่ 50 μg/m³ และ 1,200 ppm ตามลำดับ ผลการเปรียบเทียบข้อมูลจำนวน 10 คู่แสดงให้เห็นว่าค่าจากเซนเซอร์ของระบบมีแนวโน้มสอดคล้องกับอุปกรณ์ตรวจวัดเชิงพาณิชย์ภายใต้ช่วงความเข้มข้นและสภาพแวดล้อมที่ทดสอบ อย่างไรก็ตาม ผลดังกล่าวเป็นการประเมินความสอดคล้องเบื้องต้น มิใช่การสอบเทียบหรือการยืนยันความแม่นยำเชิงมาตรวิทยา การทดสอบเชิงหน้าที่ยังพบว่าระบบสามารถแสดงข้อมูลบนจอแอลซีดี และ Grafana ได้สอดคล้องกัน รวมทั้งเปลี่ยนสถานะและส่งข้อความผ่าน Telegram ตามตรรกะที่กำหนด ผลการศึกษาจึงยืนยันได้เฉพาะความเป็นไปได้ในการทำงานของระบบต้นแบบสำหรับการตรวจวัด แสดงผล และรายงานเหตุการณ์ในพื้นที่ทดลองเท่านั้น

ข้อจำกัดของงานวิจัยและข้อเสนอแนะ

การศึกษานี้มีข้อจำกัดจากการติดตั้งระบบเพียงจุดเดียว ระยะเวลาทดสอบค่อนข้างสั้น และใช้อุปกรณ์ตรวจวัดเชิงพาณิชย์ที่ไม่มีหลักฐานการสอบเทียบแบบสอบกลับได้เป็นอุปกรณ์เปรียบเทียบ ช่วงค่า PM2.5 ที่ใช้ประเมินยังไม่ครอบคลุมระดับเกณฑ์ดำเนินการของระบบ และยังไม่ได้ตรวจสอบผลกระทบของความชื้นต่อ PMS3003 การเปลี่ยนแปลงระยะยาวของ MH-Z14A ความทนทานต่อสภาพแวดล้อม ตลอดจนความปลอดภัยของข้อมูล นอกจากนี้ การทดสอบการรายงานเหตุการณ์ยังไม่ได้ประเมินอัตราการแจ้งเตือนถูกต้อง อัตราการแจ้งเตือนผิดพลาด และความหน่วงของ Telegram ในเชิงสถิติ งานวิจัยในอนาคตจึงควรเพิ่มจำนวนจุดและระยะเวลาทดสอบ เปรียบเทียบกับเครื่องมืออ้างอิงที่มีการสอบเทียบและสามารถสอบกลับได้ ทดสอบให้ครอบคลุมช่วงความเข้มข้นที่ใช้กำหนดเกณฑ์ ประเมินเสถียรภาพระยะยาวและผลของตัวแปรแวดล้อม รวมถึงทดสอบประสิทธิภาพและความปลอดภัยของระบบสื่อสารอย่างเป็นระบบ

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณสาขาวิชาวิศวกรรมเมคคาทรอนิกส์และหุ่นยนต์ คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏวไลยอลงกรณ์ ในพระบรมราชูปถัมภ์ ตำบลคลองหนึ่ง อำเภอคลองหลวง จังหวัดปทุมธานี ที่ได้ให้การสนับสนุนอุปกรณ์และทรัพยากรที่จำเป็นต่อการพัฒนาและทดสอบระบบตรวจวัดและเฝ้าระวังคุณภาพอากาศผ่านเทคโนโลยีไอโอที จนทำให้งานวิจัยนี้สามารถดำเนินการได้อย่างครบถ้วนตามวัตถุประสงค์ นอกจากนี้ ผู้วิจัยขอขอบคุณคณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏวไลยอลงกรณ์ ในพระบรมราชูปถัมภ์ ที่ได้เอื้อเฟื้อสถานที่และสภาพแวดล้อมสำหรับการพัฒนาระบบและการทดลองภาคปฏิบัติ ตลอดจนสนับสนุนการเรียนรู้เชิงปฏิบัติการของนักศึกษา อันเป็นส่วนสำคัญที่ช่วยให้การพัฒนาระบบในครั้งนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี

References

Atzori, L., Iera, A., & Morabito, G. (2010). The Internet of Things: A survey. *Computer Networks*, 54(15), 2787–2805. https://doi.org/10.1016/j.comnet.2010.05.01

Babuska, R., Oosterhoff, J., Oudshoorn, A., & Bruijn, P. M. (2002). Fuzzy self-tuning PI control of pH in fermentation. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 15(1), 3–15.

Bai, Z., Ma, W., Ma, L., Velthof, G. L., Wei, Z., Havlík, P., ... & Zhang, F. (2018). China's livestock transition: Driving forces, impacts, and consequences. *Science Advances*, 4(7), eaar8534.

Bogdanffy, L., Lorinț, C. R., & Nicola, A. (2025). Development of a low-cost traffic and air quality monitoring Internet of Things (IoT) system for sustainable urban and environmental management. *Sustainability*, 17(11), Article 5003. https://doi.org/10.3390/su17115003

Brook, R. D., Rajagopalan, S., Pope, C. A., III, Brook, J. R., Bhatnagar, A., Diez-Roux, A. V., Holguin, F., Hong, Y., Luepker, R. V., Mittleman, M. A., Peters, A., Siscovick, D., Smith, S. C., Jr., Whitsel, L., & Kaufman, J. D. (2010). Particulate matter air pollution and cardiovascular disease: An update to the scientific statement from the American Heart Association. *Circulation*, 121(21), 2331–2378. https://doi.org/10.1161/CIR.0b013e3181dbece1

Caplan, G. (1976). *Support systems and community mental health*. Behavioral Publications.

Cayo Cabrera, G. H., Flores Chipana, G. J., Basurco Chambilla, T. R., Martinez Cahua, A. D., Coral De La Cruz, S. E., & Vidangos Ponce, G. R. (2025). IoT-smart water monitoring module for home connection for pattern identification based on ESP32-Grafana. In *2025 IEEE Colombian Caribbean Conference (C3)*. IEEE. https://doi.org/10.1109/C366505.2025.11340073

Chanchay, N., & Poosaran, N. (2009). The reduction of mimosine and tannin contents in leaves of *Leucaena leucocephala*. *Asian Journal of Food and Agro-Industry*, 2, 137–144.

Chusak, T. (2011). *Causal relationship model of factors influencing the performance of village health volunteers (VHVs) in Public Health Inspection Region 18* [Master's thesis, Christian University]. [in Thai]

Department of Agriculture. (2005). *Notification of the Department of Agriculture: Re: Organic fertilizer standards B.E. 2548 (2005) and its amendment B.E. 2565 (2022)*. Ministry of Agriculture and Cooperatives. [in Thai]

Department of Agriculture. (2008). *Organic fertilizer analysis manual*. Ministry of Agriculture and Cooperatives. [in Thai]

Department of Health Service Support. (2022). *Guidelines for promoting volunteer work in the health service system*. Ministry of Public Health. [in Thai]

Doan, T. T., Henry-des-Tureaux, T., Rumpel, C., Janeau, J. L., & Jouquet, P. (2015). Impact of compost, vermicompost and biochar on soil fertility, maize yield and soil erosion in Northern Vietnam: A three year mesocosm experiment. *Science of the Total Environment*, 514, 147–154.

Dockery, D. W., Pope, C. A., III, Xu, X., Spengler, J. D., Ware, J. H., Fay, M. E., Ferris, B. G., Jr., & Speizer, F. E. (1993). An association between air pollution and mortality in six U.S. cities. *The New England Journal of Medicine*, 329(24), 1753–1759. https://doi.org/10.1056/NEJM199312093292401

Donnelly, J. H., Jr., Gibson, J. L., & Ivancevich, J. M. (2012). *Human resource development and knowledge management*. Houghton Mifflin.

Fahad, S., Hussain, S., Bano, A., Saud, S., Hassan, S., Shan, D., ... & Huang, J. (2015). Potential role of phytohormones and plant growth-promoting rhizobacteria in abiotic stresses: consequences for changing environment. *Environmental Science and Pollution Research*, 22(7), 4907–4921.

Galván, J. A., Mandujano, D., Canchos, L., Lujerio, W., & Chauca, M. (2026). *A simulated IoT embedded system for classroom indoor air quality, noise, and lighting monitoring: Architecture and firmware performance analysis* [Preprint]. Preprints.org. https://doi.org/10.20944/preprints202606.1250.v1

González-García, S., Bacenetti, J., Negri, M., Fiala, M., & Arroja, L. (2013). Comparative environmental performance of three different annual energy crops for biogas production in Northern Italy. *Journal of Cleaner Production*, 43, 71–83.

Hatsuwan, S., & Wichienhotu, D. (2025). Development of small particulate matter (PM2.5) monitoring, display, alert, and control system using IoT. *Dhonburi Rajabhat University Journal of Research for Society*, 11(1), 1–16. [in Thai]

Higa, T., & Parr, J. F. (1994). *Beneficial and effective microorganisms for a sustainable agriculture and environment* (Vol. 1). International Nature Farming Research Center.

Hodgetts, R. M. (1990). *Management: Theory, process, and practice* (5th ed.). Harcourt Brace Jovanovich.

Khaopathumthip, K. (2013). *Participation of health volunteers in health promotion at Tambon Health Promoting Hospital, Phutthamonthon District, Nakhon Pathom Province* [Master's thesis, Srinakharinwirot University]. [in Thai]

Kumar, P., Morawska, L., Martani, C., Biskos, G., Neophytou, M., Di Sabatino, S., Bell, M., Norford, L., & Britter, R. (2015). The rise of low-cost sensing for managing air pollution in cities. *Environment International*, 75, 199–205. https://doi.org/10.1016/j.envint.2014.11.019

Kumawat, K. C., Nagpal, S., & Sharma, P. (2021). Present scenario of bio-fertilizer production and marketing around the globe. In *Biofertilizers* (pp. 389–413). Woodhead Publishing.

Maha Sarakham Provincial Statistical Office. (2019). *Articles on the elderly*. http://mahasarakham.nso.go.th/images/documents/others/mkm-geninfowithgis.pdf [in Thai]

Martínez-Blanco, J., Lazcano, C., Christensen, T. H., Muñoz, P., Rieradevall, J., Møller, J., ... & Boldrin, A. (2013). Compost benefits for agriculture evaluated by life cycle assessment. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 33(4), 721–732.

Mudaliar, M. D., & Sivakumar, N. (2020). IoT based real time energy monitoring system using Raspberry Pi. *Internet of Things*, 12, Article 100292. https://doi.org/10.1016/j.iot.2020.100292

Olle, M., & Williams, I. H. (2013). Effective microorganisms and their influence on vegetable production–a review. *The Journal of Horticultural Science and Biotechnology*, 88(4), 380–386.

Phibunwatthanawong, T., & Riddech, N. (2019). Liquid organic fertilizer production for growing vegetables under hydroponic condition. *International Journal of Recycling of Organic Waste in Agriculture*, 8(4), 369–380.

Phu-yothin, V., et al. (2017). *Civics, culture, and living in society M.4 - M.6*. Aksorn Charoen Tat. [in Thai]

Poldech, C. (2008). *Human resource development*. http://www.lopburi.go.th/governor/book_january_51/human.doc [in Thai]

Pollution Control Department. (n.d.). *Air4Thai: Air quality index report of Thailand*. Retrieved August 12, 2026, from https://air4thai.pcd.go.th/webV3/#/Home [in Thai]

Pollution Control Department. (2022). *Thailand pollution status report 2022*. Ministry of Natural Resources and Environment. https://www.pcd.go.th/publication/30311 [in Thai]

Pope, C. A., III, & Dockery, D. W. (2006). Health effects of fine particulate air pollution: Lines that connect. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 56(6), 709–742. https://doi.org/10.1080/10473289.2006.10464485

Primary Health Care Division. (2020). *Standard training curriculum for village health volunteers (VHVs)*. Department of Health Service Support, Ministry of Public Health. Radiation. [in Thai]

Savci, S. (2012). An agricultural pollutant: chemical fertilizer. *International Journal of Environmental Science and Development*, 3(1), 73.

Snyder, E. G., Watkins, T. H., Solomon, P. A., Thoma, E. D., Williams, R. W., Hagler, G. S. W., Shelow, D., Hindin, D. A., Kilaru, V. J., & Preuss, P. W. (2013). The changing paradigm of air pollution monitoring. *Environmental Science & Technology*, 47(20), 11369–11377. https://doi.org/10.1021/es4022602

Srisa-ard, B. (2010). *Basic research* (8th ed.). Suweeriyasarn. [in Thai]

Tamilias, A., Karvounidis, T., & Douligeris, C. (2025). Air quality monitoring systems: A survey. In *2025 10th South-East Europe Design Automation, Computer Engineering, Computer Networks and Social Media Conference (SEEDA-CECNSM)*. IEEE. https://doi.org/10.1109/SEEDA-CECNSM68644.2025.11330007

Tasmurzayev, N., Amangeldy, B., Smagulova, G., Baigarayeva, Z., & Imash, A. (2025). A low-cost IoT sensor and preliminary machine-learning feasibility study for monitoring in-cabin air quality: A pilot case from Almaty. *Sensors*, 25(14), Article 4521. https://doi.org/10.3390/s25144521

Van Rijn, F., Bulte, E., & Adekunle, A. (2012). Social capital and agricultural innovation in Sub-Saharan Africa. *Agricultural Systems*, 108, 112–122.

Wang, W. (2023). Optimization of UART communication protocol based on frequency multiplier sampling technology and asynchronous FIFO. In *2023 IEEE 2nd International Conference on Electrical Engineering, Big Data and Algorithms (EEBDA)* (pp. 280–285). IEEE. https://doi.org/10.1109/EEBDA56825.2023.10090630

Wang, Z., Ma, L., Yang, R., & Ye, J. (2026). Development of a portable and low-cost sensor system for air pollution measurement. *Aerosol Science and Engineering*, 10, 90–101. https://doi.org/10.1007/s41810-025-00284-6

World Health Organization. (2021). *WHO global air quality guidelines: Particulate matter (PM2.5 and PM10), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide*. https://www.who.int/publications/i/item/9789240034228

Zanella, A., Bui, N., Castellani, A., Vangelista, L., & Zorzi, M. (2014). Internet of Things for smart cities. *IEEE Internet of Things Journal*, 1(1), 22–32. https://doi.org/10.1109/JIOT.2014.2306328