AIR POLLUTION DETECTION SYSTEM USING CLOUD COMPUTING TECHNOLOGY

Thanaphat CHAROENSUK[1], Pawat CHIMLEK[1], Suphachai KONTHAING[1], Paitoon NGIEWTUNG[1], Phongphit LERTCHAREANWUTHA[1] and Thongrob AUXSORN[1*]

1 Faculty of Science and Technology, Pibulsongkram Rajabhat University, Thailand; auxsorn@psru.ac.th (Corresponding Author)

ABSTRACT

This research presents the development of a real-time air quality monitoring and PM2.5 notification system aimed at enhancing health surveillance efficiency and providing users with timely air quality updates. The system was developed using an ESP32 microcontroller interfaced with a PMS7003 sensor to measure fine particulate matter. The collected data is transmitted for processing and updated to the Firebase Realtime Database for live display on a Web Dashboard, alongside recording hourly historical data. Additionally, the system integrates the LINE Messaging API to deliver notifications directly to users' smartphones. Alert thresholds are set according to air quality standards across two levels: Warning and Danger. An Anti-Spam messaging status control mechanism was implemented to prevent unnecessary duplicate alerts. Test results demonstrate that the system reliably transmits real-time data to Firebase for Web Dashboard display and accurately sends urgent LINE notifications every time dust concentrations cross risk thresholds. This effectively resolves the issue of notification fatigue caused by excessive alerts while optimizing system resource utilization.

Keywords: PM2.5, ESP32, PMS7003 Sensor, Firebase Realtime Database, LINE Messaging API, Internet of Things (IoT)

CITATION INFORMATION: Charoensuk, T., Chimlek, P., Konthaing, S., Ngiewtung, P., Lertchareanwutha, P., & Auxsorn, T. (2026). Air Pollution Detection System Using Cloud Computing Technology. *Procedia of Multidisciplinary Research, 4*(10), 11

ระบบตรวจจับมลพิษทางอากาศด้วยเทคโนโลยีการประมวลผลแบบกลุ่มเมฆ

ธนภัทร เจริญสุข[1], ภวัต ฉิมเล็ก[1], ศุภชัย คนเที่ยง[1], ไพฑูรย์ งิ้วทั่ง[1], พงษ์พิชญ์ เลิศเจริญวุฒา[1] และ ธงรบ อักษร[1*]

1 คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม; auxsorn@psru.ac.th (ผู้ประพันธ์บรรณกิจ)

บทคัดย่อ

งานวิจัยฉบับนี้นำเสนอการพัฒนาระบบตรวจวัดคุณภาพอากาศและแจ้งเตือนปริมาณฝุ่น PM 2.5 แบบเรียลไทม์ โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการเฝ้าระวังสุขภาพและส่งต่อข้อมูลคุณภาพอากาศให้แก่ผู้ใช้งานได้อย่างทันท่วงที ระบบพัฒนาขึ้นโดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP32 เชื่อมต่อกับเซนเซอร์ PMS7003 เพื่อวัดค่าฝุ่นละอองขนาดเล็ก ข้อมูลที่วัดได้จะถูกส่งไปประมวลผลและอัปเดตขึ้น Firebase Realtime Database เพื่อนำไปแสดงผลบน Web Dashboard แบบเรียลไทม์ พร้อมทั้งบันทึกข้อมูลประวัติตามช่วงเวลารายชั่วโมง นอกจากนี้ระบบได้ประยุกต์ใช้ LINE Messaging API ในการแจ้งเตือน เข้าสู่สมาร์ทโฟนของผู้ใช้งาน โดยกำหนดเกณฑ์การแจ้งเตือนตามมาตรฐานคุณภาพอากาศออกเป็น 2 ระดับ ได้แก่ ระดับเฝ้าระวัง และระดับอันตราย พร้อมระบบควบคุมสถานะการส่งข้อความ (Anti-Spam) เพื่อป้องกันการส่งข้อความซ้ำซ้อนโดยไม่จำเป็น จากผลการทดสอบพบว่าระบบสามารถส่งข้อมูลเรียลไทม์ไปยัง Firebase และแสดงผลบน Web Dashboard และสามารถส่งข้อความแจ้งเตือนด่วนผ่าน LINE ได้อย่างถูกต้องแม่นยำทุกครั้งเมื่อค่าฝุ่นเปลี่ยนผ่านระดับความเสี่ยง ซึ่งช่วยแก้ปัญหาความรำคาญจากปริมาณข้อความแจ้งเตือนที่มากเกินไป (Notification Fatigue) และช่วยประหยัดการใช้ทรัพยากรระบบได้อย่างมีประสิทธิภาพ

คำสำคัญ: PM 2.5, ESP32, เซนเซอร์ PMS7003, Firebase Realtime Database, LINE Messaging API, อินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง

ข้อมูลการอ้างอิง: ธนภัทร เจริญสุข, ภวัต ฉิมเล็ก, ศุภชัย คนเที่ยง, ไพฑูรย์ งิ้วทั่ง, พงษ์พิชญ์ เลิศเจริญวุฒา และ ธงรบ อักษร. (2569). ระบบตรวจจับมลพิษทางอากาศด้วยเทคโนโลยีการประมวลผลแบบกลุ่มเมฆ. *Procedia of Multidisciplinary Research, 4*(10), 11

บทนำ

ปัจจุบันปัญหามลพิษทางอากาศ โดยเฉพาะฝุ่นละอองขนาดเล็กไม่เกิน 2.5 ไมครอน (PM2.5) นับเป็นปัญหาสาธารณสุขที่ได้รับความสนใจอย่างมากในระดับสากล องค์การอนามัยโลก (World Health Organization [WHO], 2021) ระบุว่าการสัมผัสฝุ่นละอองขนาดเล็กสามารถส่งผลกระทบต่อสุขภาพทั้งในระยะสั้นและระยะยาว ขณะที่กรมควบคุมมลพิษ (2566) รายงานว่า สภาวะทางอุตุนิยมวิทยาและการเผาในที่โล่งเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของความเข้มข้นของฝุ่น PM2.5 ในหลายพื้นที่ของประเทศไทย และในบางช่วงเวลามีระดับสูงเกินค่ามาตรฐานที่กำหนด

สำหรับการเข้าถึงข้อมูลคุณภาพอากาศในประเทศไทย ประชาชนยังคงพึ่งพาข้อมูลจากสถานีตรวจวัดคุณภาพอากาศของภาครัฐเป็นแหล่งข้อมูลสำคัญ แม้ว่าสถานีตรวจวัดดังกล่าวจะมีมาตรฐานในการตรวจวัด แต่การตรวจวัดด้วยสถานีแบบดั้งเดิมยังมีข้อจำกัดด้านจำนวนและความครอบคลุมเชิงพื้นที่ ซึ่งอาจทำให้ข้อมูลที่ได้ไม่สามารถสะท้อนความแตกต่างของคุณภาพอากาศในระดับพื้นที่ย่อยได้อย่างครอบคลุม (Snyder et al., 2013) สถานการณ์ดังกล่าวสะท้อนให้เห็นถึงความจำเป็นในการพัฒนาเครื่องมือสำหรับเฝ้าระวังคุณภาพอากาศในระดับพื้นที่เฉพาะ เช่น บริเวณบ้านพักอาศัย อาคารสำนักงาน หรือโรงเรียน เพื่อให้สามารถติดตามสถานการณ์คุณภาพอากาศในพื้นที่ที่มีความแตกต่างกันได้อย่างละเอียดและเหมาะสมกับบริบทของแต่ละพื้นที่มากยิ่งขึ้น

นอกจากนี้ การตรวจจับมลพิษทางอากาศในพื้นที่จำกัดยังมีข้อจำกัดเนื่องจากค่าฝุ่นมีการเปลี่ยนแปลงตามสภาวะแวดล้อมอย่างรวดเร็ว งานวิจัยที่ผ่านมาแสดงให้เห็นว่า การใช้เซนเซอร์วัดค่าฝุ่นเชิงแสงเลเซอร์ เช่น PMS7003 สามารถตอบสนองต่อการตรวจวัดและให้ค่าความเข้มข้นของฝุ่น PM2.5 ได้อย่างรวดเร็วและเที่ยงตรง (Badura et al., 2018) อย่างไรก็ตาม การเฝ้าระวังที่มีประสิทธิภาพจำเป็นต้องมีระบบแจ้งเตือนเชิงรุก เพื่อให้ผู้ใช้งานสามารถรับรู้สถานการณ์และป้องกันตนเองได้ทันท่วงที

ในปัจจุบัน เทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง (Internet of Things: IoT) ได้เข้ามามีบทบาทสำคัญในการเชื่อมต่อเซนเซอร์ อุปกรณ์ประมวลผล และระบบเครือข่ายเข้าด้วยกัน ทำให้สามารถตรวจวัดและส่งต่อข้อมูลได้แบบเรียลไทม์ ซึ่งมีการศึกษาวิจัยยืนยันถึงความคุ้มค่าและความแม่นยำของการประยุกต์ใช้ระบบ IoT และไมโครคอนโทรลเลอร์ร่วมกับการแจ้งเตือนผ่านแอปพลิเคชัน LINE (ดอนสัน ปงผาบ และ ปกรณ์ สันตกิจ, 2564) งานวิจัยนี้จึงเลือกใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP32 และเซนเซอร์ PMS7003 ร่วมกับ LINE Messaging API ในการส่งข้อความรายงานค่าฝุ่นในรูปแบบ JSON Payload ผ่านโปรโตคอล HTTPS เข้าสู่แอปพลิเคชัน LINE ของผู้ใช้โดยตรง ซึ่งเป็นการแก้ปัญหาและทดแทนระบบ LINE Notify เดิมที่ยุติการให้บริการ (LY Corporation, 2024)

การทบทวนวรรณกรรม

ฝุ่นละอองขนาดเล็กไม่เกิน 2.5 ไมครอน (PM2.5) จัดเป็นมลพิษทางอากาศประเภทอนุภาคที่มีขนาดเล็กมาก สามารถแขวนลอยในอากาศได้เป็นเวลานาน และเล็ดลอดผ่านระบบกรองของร่างกายเข้าสู่ถุงลมปอดและกระแสเลือด ส่งผลกระทบต่อระบบหัวใจและหลอดเลือด รวมถึงระบบทางเดินหายใจทั้งในระยะสั้นและระยะยาว (World Health Organization [WHO], 2021) ในการตรวจวัดปริมาณฝุ่นละอองปัจจุบัน เทคโนโลยีที่ได้รับความนิยมอย่างแพร่หลาย คือ หลักการกระจัดกระจายของแสงเลเซอร์ (Laser Scattering Principle) โดยอาศัยการยิงแสงเลเซอร์ผ่านช่องวัดอากาศ เมื่ออนุภาคฝุ่นเคลื่อนที่ผ่านจะเกิดการกระจัดกระจายของแสง ตัวรับสัญญาณแสงจะแปลงความเข้มของแสงเป็นสัญญาณไฟฟ้าเพื่อคำนวณเป็นค่าความเข้มข้นในหน่วยไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ได้อย่างแม่นยำและรวดเร็ว (Badura et al., 2018) การประยุกต์ใช้เซนเซอร์เชิงแสงราคาประหยัด เช่น PMS7003 ช่วยให้เกิดการติดตามคุณภาพอากาศในระดับพื้นที่เฉพาะ (Local Level) ซึ่งเข้ามาเติมเต็มข้อจำกัดด้านพื้นที่ของสถานีตรวจวัดหลักจากภาครัฐได้เป็นอย่าง

เทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง (IoT) คือ แนวคิดการเชื่อมต่ออุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์และเซนเซอร์ต่างๆ เข้ากับเครือข่ายอินเทอร์เน็ต เพื่อให้สามารถแลกเปลี่ยนและประมวลผลข้อมูลร่วมกันได้แบบเรียลไทม์ (Al-Fuqaha et al.,

2015) ในโครงสร้างระบบ IoT ประสิทธิภาพของการประมวลผลที่ฐาน (Edge Processing) ขึ้นอยู่กับไมโครคอนโทรลเลอร์ที่เลือกใช้ บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP32 ได้รับความนิยมสูงเนื่องจากใช้สถาปัตยกรรม 32-bit Dual-Core มีความเร็วประมวลผลสูง ต้นทุนต่ำ และรองรับการเชื่อมต่อไร้สายผ่าน Wi-Fi และ Bluetooth ในตัว Espressif Systems (2023) นอกจากนี้ ESP32 ยังมีพอร์ตการสื่อสารอนุกรม (UART) ที่สามารถรับสตรีมข้อมูลสถิติฝุ่นจากเซนเซอร์ PMS7003 (Plantower, 2016) และส่งต่อข้อมูลไปยังเซิร์ฟเวอร์ด้วยโปรโตคอลความปลอดภัย HTTPS/TLS ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

การประมวลผลแบบกลุ่มเมฆ (Cloud Computing) ช่วยขจัดข้อจำกัดเรื่องการบริหารจัดการโครงสร้างพื้นฐานเซิร์ฟเวอร์ โดยมอบบริการจัดเก็บข้อมูล ประมวลผล และวิเคราะห์ข้อมูลผ่านเครือข่ายอินเทอร์เน็ต (Mell & Grance, 2011) สำหรับงานวิจัยที่ต้องการแสดงผลข้อมูลแบบเรียลไทม์ Firebase Realtime Database ซึ่งเป็นฐานข้อมูลประเภท NoSQL บนระบบคลาวด์ ได้เข้ามามีบทบาทสำคัญด้วยโครงสร้างข้อมูลรูปแบบ JSON Tree ที่ใช้โปรโตคอล WebSocket ในการเชื่อมต่อแบบสองทาง (Two-Way Data Binding) ทำให้เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงข้อมูลที่เซนเซอร์ ระบบจะสามารถดันข้อมูล (Data Push) ไปยังเว็บแดชบอร์ดหรือแอปพลิเคชันฝั่งผู้ใช้งานได้ทันที โดยไม่จำเป็นต้องใช้การดึงข้อมูลแบบสอบถามเป็นระยะ ส่งผลให้การใช้ทรัพยากรเครือข่ายและระบบประมวลผลเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด (Google, n.d.)

การแจ้งเตือนผู้ใช้งานด้วยระบบส่งข้อความเชิงรุก (Push Notification) ช่วยให้การสื่อสารข้อมูลภัยสุขภาพเป็นไปอย่างทันท่วงที การประยุกต์ใช้ LINE Messaging API โดยการส่งข้อมูลโครงสร้าง JSON Payload ผ่านโปรโตคอล HTTPS เข้าสู่แอปพลิเคชัน LINE ของผู้ใช้โดยตรง ช่วยทดแทนการใช้งานระบบ LINE Notify ที่ยุติการให้บริการลง และส่งผลให้ผู้ใช้งานสามารถรับทราบรายงานสถานการณ์ฝุ่นละออง PM2.5 เกินมาตรฐานบนสมาร์ตโฟนได้ทุกที่ทุกเวลาโดยไม่เสียค่าใช้จ่ายเพิ่มเติม (LY Corporation, 2024)

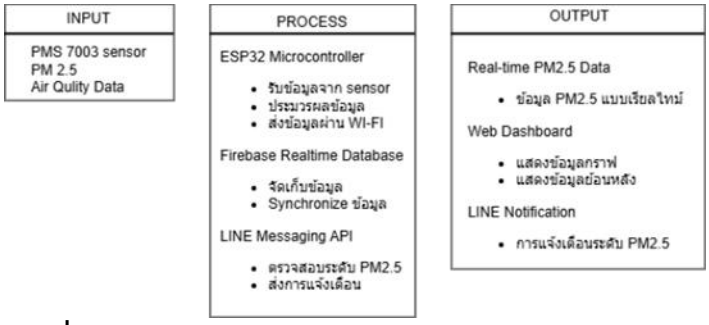
สมมติฐานการวิจัย

1) ระบบต้นแบบที่พัฒนาด้วย ESP32 และเซนเซอร์ PMS7003 สามารถตรวจวัด ประมวลผล และส่งข้อมูลค่าฝุ่น PM2.5 ขึ้นสู่ Firebase Realtime Database ได้อย่างเสถียรและต่อเนื่อง

2) การเก็บบันทึกข้อมูลประวัติย้อนหลังในรูปแบบจัดหมวดหมู่ตามวันที่ (/history/YYYY-MM-DD) บนคลาวด์ สามารถนำมาประมวลผลแสดงค่าสูงสุด ต่ำสุด และค่าเฉลี่ยบน Web Dashboard ได้อย่างถูกต้อง

3) ระบบสามารถส่งข้อความแจ้งเตือนค่าฝุ่นละอองผ่าน LINE Messaging API ได้ตรงตามเงื่อนไขรอบเวลาที่กำหนด

กรอบแนวคิดการวิจัย



ภาพที่ 1 กรอบแนวคิด

วิธีดำเนินการวิจัย

การวิจัยนี้เป็นการวิจัยและพัฒนา (Research and Development: R&D) โดยมุ่งสร้างระบบต้นแบบตรวจจับมลพิษทางอากาศต้นทุนต่ำที่สามารถตรวจวัดค่าฝุ่นละออง ประมวลผลสถานะ เก็บบันทึกประวัติบนคลาวด์ และแจ้งเตือนผู้ใช้โดยอัตโนมัติ

การออกแบบและพัฒนาระบบ

โครงสร้างสถาปัตยกรรมของระบบแบ่งออกเป็น 3 ส่วนหลัก ได้แก่

1) ส่วนตรวจวัดและประมวลผล ใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP32 รับสตรีมข้อมูลค่าฝุ่น PM2.5 จากเซนเซอร์ PMS7003 และเชื่อมต่อเครือข่ายไร้สาย Wi-Fi 2.4 GHz

2) ส่วนบริการคลาวด์ (Cloud Service Layer) ใช้ Firebase Realtime Database จัดเก็บข้อมูล และ ซิงค์เวลามาตรฐานโลก (GMT+7) เพื่อใช้อ้างอิงเวลาในการบันทึกประวัติ

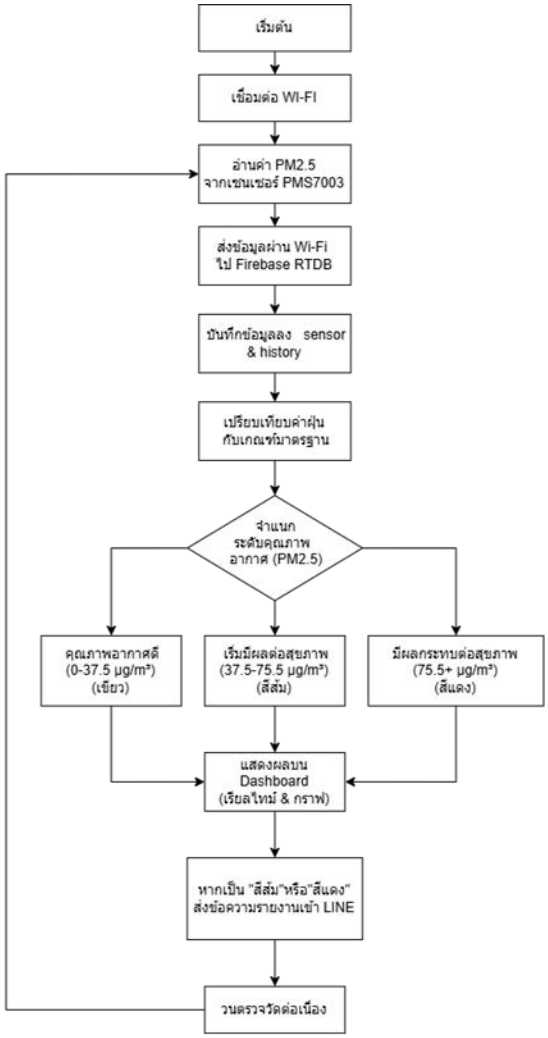
3) ส่วนแสดงผลและแจ้งเตือน พัฒนา Web Dashboard ด้วย HTML/JS ร่วมกับ Chart.js เพื่อแสดงผลกราฟและสถิติ และใช้ LINE Messaging API ส่งข้อความแจ้งเตือนเชิงรุก (Push Message) เข้าสู่แอปพลิเคชัน LINE ตามที่กำหนด

ตารางที่ 1 รายละเอียดฮาร์แวร์และซอฟต์แวร์

องค์ประกอบ	**รายละเอียด**	**หมายเหตุ**
ไมโครคอนโทรลเลอร์	ESP32	รับข้อมูลจากเซนเซอร์และส่งข้อมูลผ่าน Wi-Fi
เซ็นเซอร์ฝุ่น	PMS7003(PM2.5)	ตรวจวัดค่าฝุ่นละอองขนาดเล็กในอากาศ
ภาษาโปรแกรม	C/C++ (Arduino)	พัฒนาโปรแกรมประมวลผลและควบคุมการทำงานบน ESP32
ฐานข้อมูลคลาวด์	Firebase Realtime Database	จัดเก็บข้อมูล Real-time และประวัติย้อนหลังแบบ NoSQL
การแสดงผล	WebDashboard (HTML/CSS/JS)	แสดงผลค่าปัจจุบันกราฟเส้นและสถิติประจำวัน
ระบบแจ้งเตือน	LINE Messaging API	ส่งข้อความรายงานค่าฝุ่นเข้าแอปพลิเคชัน LINE
โปรโตคอลความปลอดภัย	HTTPS / TLS	เข้ารหัสการส่งข้อมูล JSON Payload ไปยัง LINE API



ภาพที่ 2 ภาพรวมของชุดอุปกรณ์ต้นแบบ



ภาพที่ 3 แผนภาพแนวทางการประมวลผลและการจัดเก็บข้อมูลในระบบตรวจจับคุณภาพอากาศ

โครงสร้างฐานข้อมูลและการจัดเก็บข้อมูล

ฐานข้อมูล Firebase Realtime Database ถูกออกแบบให้รองรับการจัดเก็บค่าฝุ่น PM2.5 แบบเรียลไทม์ และประวัติย้อนหลังจัดหมวดหมู่ตามวันที่ โดยข้อมูลดังกล่าวสามารถนำไปใช้แสดงผลบน Web Dashboard เพื่อดูค่าปัจจุบัน ประมวลผลสถิติประจำวัน (ค่าสูงสุด ต่ำสุด และค่าเฉลี่ย) และวาดกราฟย้อนหลัง นอกจากนี้ระบบยังนำค่าฝุ่นไปเปรียบเทียบกับเกณฑ์มาตรฐานดัชนีคุณภาพอากาศเพื่อประเมินสถานะ และส่งข้อความคำรายงานสถานการณ์เชิงรุกเข้าสู่แอปพลิเคชัน LINE ของผู้ใช้โดยอัตโนมัติ

ตารางที่ 2 โครงสร้างข้อมูลหลักที่ใช้ในระบบ (Firebase Realtime Database)

องค์ประกอบ	ฟิลด์ข้อมูล	**ตัวอย่างข้อมูล**	รายระเอียด
sensor	PM2.5	ตัวเลขของค่าฝุ่นปัจจุบัน	เก็บค่าฝุ่น PM2.5 แบบเรียลไทม์ใช้แสดงผลปัจจุบันบนหน้าเว็บ
history / YYYY-MM-DD	time	“14:00”	เก็บบันทึกประวัติค่าฝุ่นแยกรายวันและเวลา
	value	10	เพื่อนำไปสร้างกราฟเส้นและดูย้อนหลัง

เกณฑ์การจำแนกอากาศ

ระบบกำหนดเกณฑ์จำแนกสถานะจากค่าฝุ่น PM2.5 ออกเป็น 3 ระดับ ประกอบด้วย ปกติ เฝ้าระวัง และเริ่มมีผลกระทบต่อสุขภาพ โดยเกณฑ์ดังกล่าวมีวัตถุประสงค์เพื่อใช้วัดประสิทธิภาพการตอบสนองและการส่งสัญญาณเตือนของระบบต้นแบบเป็นหลัก ไม่ได้ใช้เป็นค่ามาตรฐานอ้างอิงทางกฎหมายหรือการดรรชนีวัดสุขภาพโดยตรง เนื่องจากค่าฝุ่นในระบบเป็นการตรวจวัดสภาวะชั่วขณะแบบเรียลไทม์

ตารางที่3 เกณฑ์การจำแนกสถานะอากาศ

ระดับสถานะ	ช่วงค่าฝุ่น PM2.5	สัญลักษณ์ / สีแสดงผล	การตอบสนองและการแจ้งเตือน
ปกติ	0-37.5	สีเขียว	แสดงผลค่าฝุ่นเรียลไทม์บน Dashboard ตามรอบปกติ
เฝ้าระวัง	37.5-75.5	สีส้ม	ส่งข้อความเตือนภัยระดับเฝ้าระวังผ่าน LINE
อันตราย	>75.5	สีแดง	ส่งข้อความเตือนภัยระดับอันตรายผ่าน LINE

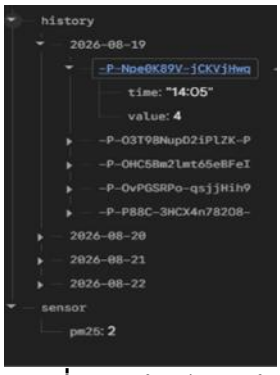
ขั้นตอนการทำงานขอระบบ

1) เชื่อมต่อระบบกับฐานข้อมูล Firebase Realtime Database ผ่านเครือข่ายอินเทอร์เน็ตไร้สาย (Wi-Fi)
2) ESP32 อ่านค่าฝุ่นละออง PM2.5 จากเซนเซอร์ PMS7003
3) ส่งข้อมูลค่าฝุ่นละอองไปยัง Firebase Realtime Database เพื่อบันทึกข้อมูลเรียลไทม์และข้อมูลประวัติ
4) ระบบประมวลผลค่าที่ได้รับและจำแนกสถานะคุณภาพอากาศตามเกณฑ์มาตรฐาน
5) หน้า Web Dashboard แสดงค่าปัจจุบัน สถานะล่าสุด และกราฟแนวโน้มย้อนหลังแบบ Real-time Sync
6) เมื่อค่าฝุ่นอยู่ในระดับเกินเกณฑ์มาตรฐาน ระบบจะส่งข้อความแจ้งเตือนผ่าน LINE ไปยังผู้ใช้งาน
7) ผู้ใช้สามารถตรวจสอบประวัติย้อนหลังและดูสถานะคุณภาพอากาศได้ตลอดเวลา

ผลการวิจัย

ผลการทดสอบการรับส่งข้อมูลและการแสดงผล

จากการทดสอบบอร์ด ESP32 อ่านค่า PM2.5 จากเซนเซอร์ PMS7003 และส่งไปยัง Firebase Realtime Database พบว่าระบบอัปเดตข้อมูลได้ถูกต้องและมีเสถียรภาพ หน้า Web Dashboard สามารถซิงค์ข้อมูล แสดงผลตัวเลข กราฟย้อนหลัง และเปลี่ยนสีสถานะตามเกณฑ์ได้ทันทีแบบเรียลไทม์



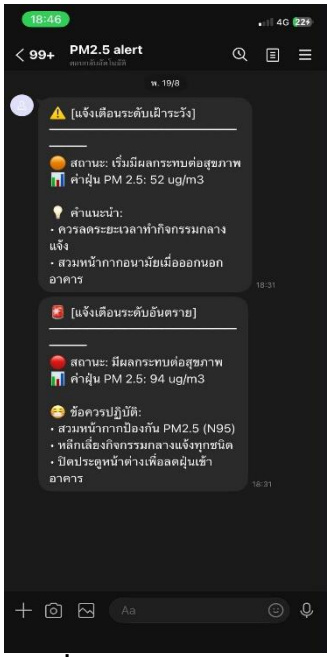
ภาพที่ 4 การจัดเก็บและอัปเดตข้อมูลบน Firebase Realtime Database



ภาพที่ 5 การแสดงผลข้อมูลและการเปลี่ยนสีสถานะบน Web Dashboard และกราฟแสดงตัวเลขฝุ่นทุก 1 ชั่วโมง

ผลการทดสอบการแจ้งเตือนผ่าน LINE Messaging API

เมื่อค่าฝุ่นที่ตรวจวัดได้อยู่ในระดับเฝ้าระวังหรือระดับอันตราย ระบบจะเรียกใช้ LINE Messaging API เพื่อส่งข้อความแจ้งเตือนด่วนไปยังแอปพลิเคชัน LINE ของผู้ใช้ โดยข้อความแจ้งเตือนประกอบด้วยค่าฝุ่น PM2.5,สถานะความเสี่ยง, คำแนะนำการปฏิบัติตน พร้อมระบบควบคุมสถานการณ์แจ้งเตือน



ภาพที่ 6 ตัวอย่างผลการทดสอบข้อความแจ้งเตือนภัยผ่าน LINE Messaging

ตารางที่ 4 ผลการทดสอบการแจ้งเตือนความเสี่ยงผ่าน LINE

ครั้งที่	ค่าฝุ่น PM2.5	สถานะอากาศ	การตอบสนองการแจ้งเตือน
1	31	ปกติ	ไม่ส่งข้อความแจ้งเตือน
2	52	เฝ้าระวัง	ส่งข้อความแจ้งเตือนเฝ้าระวัง
3	41	เฝ้าระวัง	ส่งข้อความแจ้งเตือนเฝ้าระวัง
4	94	อันตราย	ส่งข้อความแจ้งเตือนอันตราย
5	25	ปกติ	ไม่ส่งข้อความแจ้งเตือน

สรุปและอภิปรายผลการวิจัย

ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าระบบต้นแบบสามารถตรวจวัดค่าฝุ่นละออง PM2.5 ส่งข้อมูลผ่าน ESP32 ไปยังฐานข้อมูล Firebase Realtime Database แสดงผลผ่านเว็บแอปพลิเคชัน และส่งข้อความแจ้งเตือนผ่าน LINE Messaging API เมื่อค่าฝุ่นอยู่ในระดับเฝ้าระวังหรือเกินเกณฑ์มาตรฐาน (> 37.5\ \mu g/m^3) ได้ตามเงื่อนไขที่กำหนด แสดงให้เห็นว่าฮาร์ดแวร์ ระบบเครือข่าย ฐานข้อมูล เว็บแอปพลิเคชัน และระบบแจ้งเตือนสามารถทำงานร่วมกันได้ภายใต้สภาวะการทดลอง

จุดเด่นของระบบที่พัฒนาขึ้นคือ การรวมการตรวจวัด การบันทึกข้อมูล การแสดงผลแบบเรียลไทม์ การตรวจสอบข้อมูลย้อนหลัง และการแจ้งเตือนผู้ใช้ไว้ภายในระบบเดียว ทำให้ผู้ใช้สามารถติดตามการเปลี่ยนแปลงของค่าฝุ่นภายในพื้นที่ได้อย่างสะดวก นอกจากนี้ ระบบยังใช้ส่วนประกอบที่มีต้นทุนไม่สูง สามารถซิงค์ข้อมูลผ่านคลาวด์ได้อย่างรวดเร็ว และสามารถปรับค่าเกณฑ์การแจ้งเตือนให้เหมาะสมกับสภาพแวดล้อมของพื้นที่ติดตั้งได้

อย่างไรก็ตาม ระบบต้นแบบใช้ค่า PM2.5 เป็นตัวบ่งชี้หลักของดัชนีคุณภาพอากาศ จึงยังไม่สามารถระบุแหล่งกำเนิดของฝุ่นละอองได้โดยตรง เนื่องจากค่าฝุ่นที่เพิ่มขึ้นอาจได้รับผลกระทบจากหลายปัจจัย เช่น ฝุ่นจากภายนอกอาคาร การควันจากการประกอบอาหาร การทำความสะอาด หรือสภาพอากาศในพื้นที่ ซึ่งอาจทำให้เกิดการแจ้งเตือนในสถานการณ์ที่ไม่ได้คาดการณ์ไว้

นอกจากนี้ ประสิทธิภาพของระบบยังขึ้นอยู่กับตำแหน่งติดตั้งเซนเซอร์ สภาพการเชื่อมต่อเครือข่ายไร้สาย (Wi-Fi) และลักษณะการไหลเวียนของอากาศ หากติดตั้งอุปกรณ์ในตำแหน่งที่มีการถ่ายเทอากาศสูงเกินไป หรืออยู่ในจุดอับสัญญาณอินเทอร์เน็ต ค่าที่ตรวจวัดได้อาจคลาดเคลื่อนจากความเป็นจริง หรือส่งผลให้การจัดเก็บข้อมูลย้อนหลังเกิดช่องว่างได้

การพัฒนาระบบในอนาคตควรเพิ่มเซนเซอร์ตรวจวัดอุณหภูมิและความชื้น (เช่น DHT22) เพื่อนำข้อมูลมาวิเคราะห์ร่วมและชดเชยค่าความคลาดเคลื่อนของเซนเซอร์ตรวจวัดฝุ่น รวมถึงการเพิ่มระบบจัดเก็บข้อมูลชั่วคราว (Local Buffering) บนหน่วยความจำภายในบอร์ด ESP32 เพื่อป้องกันข้อมูลสูญหายกรณีสัญญาณอินเทอร์เน็ตขัดข้อง

การวิจัยครั้งนี้ประสบความสำเร็จในการพัฒนาและทดสอบระบบตรวจวัดและแจ้งเตือนคุณภาพอากาศ PM2.5 แบบเรียลไทม์ โดยอาศัยเทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง (IoT) ร่วมกับฐานข้อมูลคลาวด์ บนอุปกรณ์ประมวลผลไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP32 จากผลการศึกษาและทดสอบระบบ สามารถสรุปประเด็นสำคัญได้ดังนี้

- ด้านการตรวจวัดและการจัดเก็บข้อมูล: ระบบสามารถอ่านค่าความเข้มข้นของฝุ่นละออง PM2.5 จากเซนเซอร์ PMS7003 และจัดส่งข้อมูลไปยัง Firebase Realtime Database ได้อย่างมีเสถียรภาพ โดยมีความหน่วงเวลาเฉลี่ย 1 วินาที สำหรับค่าปัจจุบัน และ 1 วินาที สำหรับการบันทึกประวัติย้อนหลังพร้อมการประทับเวลา
- ด้านการแสดงผลและการแจ้งเตือน: ระบบส่วนต่อประสานผู้ใช้ Web Dashboard สามารถซิงค์ข้อมูลเพื่อแสดงผลตัวเลข กราฟแนวโน้ม และเปลี่ยนสีสถานะตามเกณฑ์มาตรฐาน นอกจากนี้ ระบบสามารถส่งข้อความเตือนภัยเชิงรุกผ่าน LINE Messagingเข้าสู่สมาร์ตโฟนของผู้ใช้ได้ภายในเวลาเฉลี่ย 2 วินาที เมื่อพบค่าฝุ่น PM2.5 สูงเกินเกณฑ์มาตรฐาน (> 37.0\ \mu g/m^3)

- ด้านประโยชน์และการประยุกต์ใช้งาน: ระบบต้นแบบมีโครงสร้างแบบไร้เซิร์ฟเวอร์ ที่มีต้นทุนต่ำ ตอบสนองได้รวดเร็ว และช่วยให้ผู้ใช้งานสามารถติดตามสถานะมลพิษทางอากาศเชิงรุกเพื่อเฝ้าระวังสุขภาพได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ข้อเสนอแนะที่ได้รับจากการวิจัย

1) ควรทดสอบระบบในพื้นที่ปิดที่มีลักษณะแตกต่างกัน เช่น ห้องเรียน ห้องทำงาน และพื้นที่กึ่งเปิดโล่ง โดยกำหนดขนาดห้อง ตำแหน่งติดตั้งเซนเซอร์ ระยะห่างจากจุดไหลเวียนอากาศ ระยะเวลาการทดลอง และจำนวนครั้งที่ทดลองให้ชัดเจน เพื่อให้สามารถเปรียบเทียบผลและทดลองซ้ำได้

2) ควรเก็บค่าพื้นฐาน (Baseline Value) ของ PM2.5 ในแต่ละพื้นที่ก่อนเริ่มใช้งานจริง แล้วนำค่าดังกล่าวมาประกอบการกำหนดเกณฑ์เฝ้าระวังและเกณฑ์การแจ้งเตือน เนื่องจากแต่ละพื้นที่มีสภาพแวดล้อมและระดับฝุ่นพื้นฐานแตกต่างกัน

3) ควรเพิ่มเซนเซอร์ตรวจวัดอุณหภูมิและความชื้น (เช่น DHT22) เพื่อนำข้อมูลมาวิเคราะห์และชดเชยค่าความคลาดเคลื่อนของเซนเซอร์ PMS7003 ในสภาวะความชื้นสูง ซึ่งช่วยลดโอกาสการแจ้งเตือนผิดพลาด (False Alarm) จากไอน้ำในอากาศ

4) ควรพัฒนาระบบจัดเก็บข้อมูลชั่วคราว (Local Buffering) บนหน่วยความจำภายในของบอร์ด ESP32 เพื่อให้ระบบสามารถบันทึกข้อมูลและประทับเวลา (Timestamp) ไว้ได้เมื่อสัญญาณ Wi-Fi ขัดข้อง และทำการส่งข้อมูลย้อนหลังกลับขึ้นฐานข้อมูลอัตโนมัติเมื่อเชื่อมต่ออินเทอร์เน็ตได้อีกครั้ง

5) ควรเปรียบเทียบค่า PM2.5 ที่ตรวจวัดได้กับเครื่องมือวัดมาตรฐานระดับสถานีตรวจวัดคุณภาพอากาศ หรือเครื่องมือที่ผ่านการสอบเทียบมาตรฐาน (Calibration) เพื่อประเมินความคลาดเคลื่อนเชิงสถิติและเพิ่มความน่าเชื่อถือของเซนเซอร์ที่ใช้ในระบบต้นแบบ

ข้อเสนอแนะในการวิจัยครั้งต่อไป

1) การกำหนดค่ามาตรฐานและการทดสอบในสภาพแวดล้อมที่หลากหลาย: ควรเก็บค่าฝุ่นพื้นฐาน (Baseline Value) ก่อนใช้งานจริง และเพิ่มการทดสอบในพื้นที่ปิด/กึ่งเปิดโล่งหลากหลายรูปแบบ (เช่น ห้องเรียน, ห้องทำงาน) โดยระบุขนาดห้อง ตำแหน่งติดตั้ง และระยะห่างจากจุดถ่ายเทอากาศให้ชัดเจน เพื่อเปรียบเทียบผลและทดลองซ้ำได้

2) การเพิ่มเซนเซอร์วัดสภาพอากาศและการเทียบมาตรฐาน: ควรติดตั้งเซนเซอร์วัดอุณหภูมิและความชื้น (เช่น DHT22) เพื่อชดเชยค่าความคลาดเคลื่อนของเซนเซอร์ PMS7003 ในสภาวะความชื้นสูง ลดโอกาสเกิด False Alarm พร้อมทั้งนำค่าที่วัดได้ไปเปรียบเทียบกับสถานีตรวจวัดมาตรฐาน (Calibration) เพื่อประเมินความคลาดเคลื่อนเชิงสถิติ

3) การพัฒนาระบบจัดเก็บข้อมูลสำรอง (Local Buffering): ควรพัฒนาระบบบันทึกข้อมูลและประทับเวลา ลงหน่วยความจำภายในของ ESP32 เมื่อสัญญาณ Wi-Fi ขัดข้อง และส่งข้อมูลย้อนหลังขึ้นฐานข้อมูลอัตโนมัติเมื่อกลับมาเชื่อมต่ออินเทอร์เน็ตได้

เอกสารอ้างอิง

กรมควบคุมมลพิษ. (2566). *รายงานสถานการณ์มลพิษของประเทศไทย ปี 2566*. กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม.

ดอนสัน ปงผาบ และ ปกรณ์ สันตกิจ. (2564). เครื่องวัดฝุ่น PM2.5 แจ้งเตือนทางแอพพลิเคชันไลน์. *วารสารวิจัย มทร. กรุงเทพ, 15*(1), 32-42.

Al-Fuqaha, A., Guizani, M., Mohammadi, M., Aledhari, M., & Ayyash, M. (2015). Internet of Things: A survey on enabling technologies, protocols, and applications. *IEEE Communications Surveys & Tutorials, 17*(4), 2347-2376.

Badura, M., Batog, P., Drzeniecka-Osiadacz, A., & Modzel, P. (2018). Evaluation of low-cost sensors for ambient PM2.5 monitoring. *Journal of Sensors, 2018*, Article 5096540.

Espressif Systems. (2023). *ESP32 series datasheet (Version 4.1)*. Retrieved from https://www.espressif.com/en/products/socs/esp32.

Google. (n.d.). *Firebase Realtime Database documentation*. Retrieved from https://firebase.google.com/docs/database.

LY Corporation. (n.d.). *Messaging API documentation*. Retrieved from https://developers.line.biz/en/docs/messaging-api/.

Mell, P., & Grance, T. (2011). The NIST definition of cloud computing (Special Publication 800-145). *National Institute of Standards and Technology*, 0-145.

Plantower. (2016). *Digital universal particle concentration sensor: PMS7003 series data manual (Version 2.5)*. Beijing Plantower Co., Ltd.

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.

World Health Organization. (2021). *WHO global air quality guidelines: Particulate matter (PM2.5 and PM10), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide*. World Health Organization.

Data Availability Statement: The raw data supporting the conclusions of this article will be made available by the authors, without undue reservation.

Conflicts of Interest: The authors declare that the research was conducted in the absence of any commercial or financial relationships that could be construed as a potential conflict of interest.

Publisher's Note: All claims expressed in this article are solely those of the authors and do not necessarily represent those of their affiliated organizations, or those of the publisher, the editors and the reviewers. Any product that may be evaluated in this article, or claim that may be made by its manufacturer, is not guaranteed or endorsed by the publisher.



Copyright: © 2026 by the authors. This is a fully open-access article distributed under the terms of the Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International (CC BY-NC-ND 4.0).