



การสอบเทียบและทดสอบภาคสนามของสถานีตรวจวัดฝุ่นละออง PM2.5 โดยใช้เซ็นเซอร์หลักการไฟฟ้าสถิตพร้อมการรายงานออนไลน์แบบเรียลไทม์  
 Calibration and Field Testing of a PM2.5 Monitoring Station Utilizing an Electrostatic Sensor with Real-time, Continuous Online Reporting

วิสาชนภัสต์ รัตนจันทร์<sup>1</sup>, อภิรักษ์ ทูลธรรม<sup>2</sup>, ยุทธภูมิ ธรรมยาฤทธิ์<sup>2</sup>, อุดุลย์ เครือแก้ว<sup>2</sup>, เสรี ขุนไชย<sup>2</sup>, เสฏฐวุฒิ นรสาร<sup>2</sup>, เอนก นรสาร<sup>3</sup>, พานิช อินต๊ะ<sup>3\*</sup>

<sup>1</sup>หน่วยวิจัยสนามไฟฟ้าประยุกต์ในงานวิศวกรรม วิทยาลัยเทคโนโลยีและสหวิทยาการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา เชียงใหม่ 50220

<sup>2</sup>วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรมศรีสงคราม มหาวิทยาลัยนครพนม นครพนม 48150

<sup>3</sup>วิทยาลัยนาหว้า มหาวิทยาลัยนครพนม นครพนม 48180

Wisapat Rattanachan<sup>1</sup>, Apirak Tooltham<sup>2</sup>, Yutthapoom Thammayarit<sup>2</sup>, Adool Kruekaew<sup>2</sup>, Seree Khunchai<sup>2</sup>, Settawut Norasan<sup>2</sup>, Anek Norasan<sup>3</sup>, Panich Intra<sup>3\*</sup>

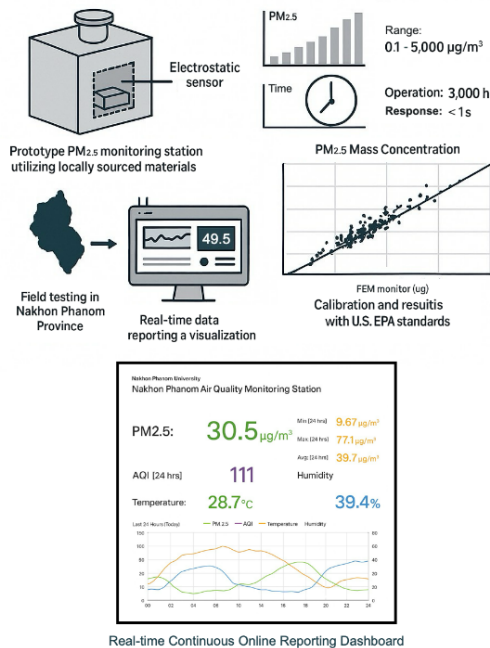
<sup>1</sup>Research Unit of Applied Electric Field in Engineering, College of Integrated Science and Technology, Rajamangala University of Technology Lanna, Chiang Mai 50220

<sup>2</sup>Sisongkhram Industrial Technology College, Nakhon Phanom University, Nakhon Phanom 48150

<sup>3</sup>Na Wa College, Nakhon Phanom University, Nakhon Phanom 48180

Received 22 March 2025; Received in revised 21 October 2025; Accepted 31 October 2025

GRAPHICAL ABSTRACT



ABSTRACT

This research aims to calibrate and field-test a PM2.5 dust measurement station that operates using an electrostatic sensor. The system is capable of measuring, recording, and displaying data online through a web browser. The developed prototype utilizes locally sourced materials and equipment, replacing imported components. The system can measure and collect dust samples within a range of 0.1 to 5,000 µg/m³, with a processing time of less than 1 second. It is capable of continuous operation for up to 3,000 hours without maintenance or component replacement. The study focused on calibrating dust mass concentration measurements. The measurements were validated against a standard PM2.5 monitor using the Federal Equivalent Method (FEM) Group 3, as specified by the United States Environmental Protection Agency in 40 CFR Part 50, under laboratory conditions. Field tests were also performed under real-world conditions in Nakhon Phanom Province. The results from both laboratory and field tests showed that the measured dust concentration trends were consistent and comparable to those obtained using the standard method (40 CFR Part 50, U.S. EPA). Additionally, the system is capable of continuously reporting real-time data via the MQTT protocol, with data accurately stored in a time-series database (TSDB) without loss. The system enables rapid querying and retrieval of historical data, and the dashboard loads data from the TSDB in less than 1 second, demonstrating its efficiency in data processing and visualization.

คำสำคัญ	บทคัดย่อ
<p>ละอองลอย; ฝุ่นละออง; พีเอ็ม2.5; หมอกควัน; อินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง</p> <p><b>Keywords</b></p> <p>Aerosol; Particulate matter; PM2.5; Smog; Internet of thing</p>	<p>งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อสอบเทียบและทดสอบภาคสนามสถานีตรวจวัดฝุ่นละออง PM2.5 ที่ใช้เซ็นเซอร์หลักการไฟฟ้าสถิต สามารถวัด บันทึกค่า และแสดงผลออนไลน์ในเว็บเบราว์เซอร์ สถานีต้นแบบที่พัฒนาขึ้นใช้วัสดุอุปกรณ์จากภายในประเทศ ทดแทนการนำเข้า สามารถวัดและเก็บตัวอย่างฝุ่นละอองได้ในช่วง 0.1 ถึง 5,000 <math>\mu\text{g}/\text{m}^3</math> โดยใช้การประมวลผลน้อยกว่า 1 วินาที ทำงานต่อเนื่อง 3,000 ชั่วโมง โดยไม่ต้องบำรุงรักษาหรือเปลี่ยนอุปกรณ์ ในการวิจัยได้ทำการสอบเทียบความเข้มข้นเชิงมวลของฝุ่นละออง และทดสอบการวัดฝุ่นละอองเทียบกับเครื่องวัดฝุ่นละออง PM2.5 วิธีเทียบเคียง หรือ FEM กลุ่มที่ 3 Federal register, Part II environmental protection agency, 40 CFR Part 50 ในระดับห้องปฏิบัติการ พร้อมทดสอบภาคสนามในสภาวะการใช้งานจริงที่จังหวัดนครพนม ซึ่งผลการทดสอบสถานีต้นแบบทั้งในระดับห้องปฏิบัติการและระดับภาคสนามแสดงให้เห็นว่า แนวโน้มของค่าความเข้มข้นเชิงมวลที่วัดได้มีทิศทางเดียวกัน เทียบเคียงได้กับวิธีการมาตรฐาน 40 CFR Part 50, U.S. EPA นอกจากนี้ยังสามารถรายงานค่าแบบเรียลไทม์อย่างต่อเนื่องด้วย MQTT Protocol มีการจัดเก็บข้อมูลลงใน TSDB อย่างถูกต้องและไม่มีการสูญหายของข้อมูล สามารถ Query เพื่อดึงข้อมูลย้อนหลังได้รวดเร็ว ในขณะที่ Dashboard ใช้เวลาน้อยกว่า 1 วินาทีในการโหลดข้อมูลจาก TSDB ซึ่งแสดงถึงประสิทธิภาพของระบบในการประมวลผลและแสดงผลข้อมูล</p>

\*ผู้รับผิดชอบบทความ: panich.intra@rmutl.ac.th

DOI:

## 1. บทนำ

ปัญหาฝุ่นละอองและหมอกควัน เป็นปัญหามลพิษทางอากาศที่ส่งผลกระทบต่อสุขภาพของประชาชนกว่า 30 ล้านคนทั่วประเทศ โดยเฉพาะกลุ่มเสี่ยง เช่น เด็กเล็ก ผู้สูงอายุ ผู้ที่มีโรคประจำตัวเกี่ยวกับระบบทางเดินหายใจและโรคหัวใจ อนุภาคฝุ่นขนาดเล็กเหล่านี้สามารถเข้าสู่ปอดและกระแสเลือดได้ง่าย โดยมีสารอันตราย เช่น สารอินทรีย์ โลหะหนัก และสารก่อมะเร็งปะปนอยู่ ซึ่งอาจก่อให้เกิดโรคทางเดินหายใจเรื้อรัง โรคหัวใจ และโรคมะเร็งในระยะยาว จากรายงานวิจัยทางการแพทย์ระบุว่า ความเข้มข้นของ PM2.5 มีความสัมพันธ์โดยตรงกับอัตราการเจ็บป่วยและการเสียชีวิตของประชากร ดังนั้นการตรวจวัดและติดตามปริมาณ PM2.5 อย่างแม่นยำและต่อเนื่องจึงมีความสำคัญ เพื่อช่วยระบุแหล่งกำเนิด วิเคราะห์แนวโน้มของปริมาณฝุ่น และใช้เป็นข้อมูลสำหรับกำหนดมาตรการควบคุม ป้องกัน แจ้างเตือน และปรับปรุงคุณภาพอากาศให้ดีขึ้น [1]

การวัดค่าฝุ่นละออง PM2.5 นั้น จะอาศัยค่าของความเข้มข้นเชิงมวล ในประเทศไทยกำหนดระดับความอันตรายไว้ที่  $37.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$  โดยมาตรฐานอ้างอิงของ US EPA ซึ่งใช้วิธีการวิเมตริก (Gravimetric method) และวิธีเทียบเคียง (Federal equivalent method – FEM) ตามข้อกำหนด 40 CFR Part 50 [2, 3] เครื่องมือ FEM แบ่งเป็น Class I, II และ III เช่น เครื่องวัดระบบเบต้าเรย์ (Beta ray) และ Tapered element oscillating microbalance (TEOM) ที่สามารถวัดและรายงานผลได้แบบเรียลไทม์ อย่างไรก็ตาม เครื่องมือวัดที่ใช้ในไทยส่วนใหญ่ต้องนำเข้าจากต่างประเทศ ทำให้เกิดค่าใช้จ่ายสูง ทั้งค่าจัดซื้อ ค่าบำรุงรักษา และค่าวัสดุสิ้นเปลือง รวมถึงข้อจำกัดของจำนวนสถานีตรวจวัด ที่หน่วยงานภาครัฐไม่สามารถจัดสรรได้ครอบคลุมพื้นที่ของประเทศ เนื่องจากต้นทุนสูง ส่งผลกระทบให้การเฝ้าระวังและเตือนภัยมลพิษทางอากาศทำได้ไม่ทั่วถึง นอกจากนี้ เครื่องวัดฝุ่นต้นแบบที่ถูกวิจัยและพัฒนาขึ้นมาแล้วนั้น ยังมีข้อจำกัดอยู่ เช่น เวลาตอบสนองช้า ไม่สามารถวัดค่าฝุ่นแบบ

เรียลไทม์ ไม่สามารถวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีและพิษ มีขนาดใหญ่ ใช้พลังงานสูง และมีต้นทุนสูง จึงไม่เหมาะสำหรับการติดตั้งภาคสนามที่ต้องการความคล่องตัวและการทำงานต่อเนื่องในระยะยาว

การพัฒนาเครื่องตรวจวัด PM2.5 ด้วยหลักการไฟฟ้าสถิตในประเทศไทย เริ่มมีการศึกษาขึ้นในปี พ.ศ. 2552 โดยใช้หลักการวัดละอองลอยทางไฟฟ้า (Electrical aerosol measurement) [4] ซึ่งอาศัยคุณสมบัติทางไฟฟ้าของอนุภาคในการตรวจวัดฝุ่นขนาดเล็กกว่า  $2.5 \mu\text{m}$  ต่อมาได้มีการพัฒนาหลักการตรวจวัดละอองลอยด้วยวิธีการทางไฟฟ้าเพื่อตรวจหาความเข้มข้นจำนวนอนุภาค (Particle number concentration) [5] ซึ่งได้ทำการปรับปรุงเครื่องอัดประจุอนุภาค ตัวดักจับไอออน ลูกถ้วยฟาราเดย์ และเครื่องตรวจหากระแสระดับต่ำให้มีประสิทธิภาพสำหรับอนุภาคไม่เกิน  $1 \mu\text{m}$  สามารถวิเคราะห์ปริมาณความเข้มข้นได้  $10 \text{ nm}$  ถึง  $1 \mu\text{m}$  และวัดค่ากระแสไฟฟ้าของอนุภาคช่วง  $1 \text{ pA}$  ถึง  $250 \text{ pA}$  ได้ สอดคล้องกับอนุภาคที่อยู่ในช่วง  $1 \times 10^{10}$  ถึง  $1 \times 10^{12}$  particles/ $\text{m}^3$  โดยใช้เวลาวัด 1 วินาที

จากนั้นมีการพัฒนาเครื่องต้นแบบในการวัดอนุภาคหลากหลายชนิด [6] เพื่อปรับปรุงสมรรถนะและทดสอบในประเด็นการศึกษาผลของรูปร่างอนุภาคที่มีต่อสมรรถนะการวิเคราะห์ ผลของการแพร่กระจาย (Diffusion effect) ของไอออนและอนุภาคนาโน ผลของประจุค้างในอนุภาคความเข้มข้นสูงกว่า  $10^6$  ions/ $\text{cm}^3$  และการปรับปรุงประสิทธิภาพการตกตะกอนของอนุภาคขนาดเล็กกว่า  $300 \text{ nm}$  ในถ้วยฟาราเดย์ เพื่อให้ได้ผลการวัดแบบเรียลไทม์

หลังจากนั้น เครื่องต้นแบบการตรวจวัด PM2.5 [7] ถูกปรับปรุงให้อัดประจุอนุภาคแบบสนามและแพร่สำหรับอนุภาคขนาด  $0.01\text{-}10 \mu\text{m}$  ปรับปรุงตัวจำแนกสิ่งปนเปื้อนให้สามารถแยกอนุภาคขนาดใหญ่กว่า  $2.5 \mu\text{m}$  และ  $10 \mu\text{m}$  ได้ ปรับปรุงวงจรขยายสัญญาณกระแสไฟฟ้าระดับต่ำให้สามารถวัดทั้งในรูปแบบจำนวน (Number concentration) และมวล (Mass

concentration) ของละอองลอย แสดงผลในหน่วย Particles/m<sup>3</sup> และ µg/m<sup>3</sup>

ในปีต่อมามีการพัฒนาเครื่องต้นแบบให้สามารถตรวจวัด PM1.0, PM2.5 และ PM10 ในเวลาเดียวกัน [8] และรายงานผลการวัดได้ทันที ซึ่งมีการทดสอบภาคสนามเพิ่มเติมในการวัดเทียบกับเครื่องวัด PM1.0, PM2.5 และ PM10 หลายเทคนิคการวัด [9] เพื่อเปรียบเทียบผลของความชื้นต่อการวัด PM1.0, PM2.5 และ PM10 ในอากาศ

ในปี พ.ศ. 2559 มีการปรับปรุงต้นแบบเครื่องตรวจวัด PM1.0, PM2.5 และ PM10 [10] ให้สามารถแสดงผลแบบออนไลน์ในเวลาจริง และพัฒนาระบบปรับสภาพอากาศขาเข้า (Air conditioning inlet system) เพื่อควบคุมอุณหภูมิความชื้น เพิ่มการวัดความเร็วและทิศทางลมเพื่อศึกษาการเคลื่อนที่และแพร่กระจายของฝุ่น มีการศึกษาการเคลื่อนที่ของอนุภาคฝุ่นละอองผ่านวัสดุกำจัดความชื้นแบบมีรูพรุน (Porous) และการเคลื่อนที่แบบแพร่กระจายด้วยผลของความร้อนในอากาศ (Thermal diffusion) มีการทดสอบประสิทธิภาพการผ่านทะลุ (Penetration) และการสูญเสีย (Loss) ของอนุภาคฝุ่นภายในระบบกำจัดความชื้น และประเมินสมรรถนะการกำจัดความชื้นอากาศขาเข้าและอัตราการไหลที่แตกต่างกัน

ในปีถัดมามีการพัฒนา ระบบตรวจวัดฝุ่นละอองในบ่อเหมืองลึกด้วยหลักการวัดประจุไฟฟ้าอนุภาค [11] สามารถวัดอนุภาคที่มีขนาดใหญ่กว่า 10 µm ถึง 100 µm สามารถควบคุมจากระยะไกลและรายงานผลแบบออนไลน์ เพื่อใช้ศึกษาผลกระทบต่อผู้ปฏิบัติงานในบ่อเหมืองลึกและเก็บข้อมูลมาใช้วิเคราะห์เพื่อจัดการปัญหาสิ่งแวดล้อมจากฝุ่น ต่อมามีการพัฒนาเครื่องต้นแบบระบบตรวจวัด PM1.0, PM2.5 และ PM10 เพื่อตรวจวัดความเข้มข้นและสัดส่วนฝุ่นละอองสำหรับใช้ในการปรับปรุงประสิทธิภาพและอายุการใช้งานของแผ่นกรองอากาศขาเข้าของเครื่องกังหันก๊าซของโรงไฟฟ้าพลังงานความร้อนร่วมพระนครใต้ [12] และใช้เป็นข้อมูลใน

จัดการด้านสุขภาพอนามัยของผู้ปฏิบัติงานในโรงไฟฟ้าและชุมชนรอบโรงไฟฟ้า

ในปี พ.ศ. 2565 มีการทดสอบมาตรฐานเครื่องวัดฝุ่นละอองลอยในอากาศที่ใช้หลักการไฟฟ้าสถิตให้เป็นไปตามมาตรฐาน US EPA [13] สำหรับงานในภาคสนามและพื้นที่ห่างไกล โดยการสอบเทียบและทดสอบภาคสนามเปรียบเทียบกับเครื่องวัด PM2.5 มาตรฐาน US EPA Class I, II และ III (40 CFR Part 50) ซึ่งวัดค่าในช่วง 0.1–1,000 µg/m<sup>3</sup> สามารถเก็บตัวอย่างไปวิเคราะห์ทางเคมีและพิษวิทยาได้ ต่อมาได้ร่วมกับบริษัท พิโกอินโนเวชั่น จำกัด พัฒนาให้วัดค่าที่ความเข้มข้นสูงสุดถึง 5,000 µg/m<sup>3</sup> รองรับทั้งแบบช่องวัดเดี่ยวและหลายช่องวัด ตามมาตรฐาน มอก. 3030-2563 ใช้งานต่อเนื่องได้ถึง 1,500 ชั่วโมง มีหน่วยความจำภายในเพื่อบันทึกข้อมูลสามารถส่งข้อมูลแบบเรียลไทม์และแสดงผลเป็นกราฟิกผ่านแอปพลิเคชันบนสมาร์ตโฟนได้

มีงานวิจัยระดับนานาชาติที่ให้ความสำคัญกับการ สอบเทียบเซนเซอร์ตรวจวัดฝุ่นละอองต้นทุนต่ำ (Low-cost PM sensors) ทั้งในสภาพห้องปฏิบัติการและภาคสนาม เพื่อยกระดับความแม่นยำให้เทียบเท่าเครื่องมาตรฐานอ้างอิง (FEM/TEOM). การประเมินเซนเซอร์ตรวจวัดฝุ่นราคาถูกรุ่น ภายใต้อุณหภูมิควบคุมในห้องปฏิบัติการ [14] พบว่าค่าฝุ่นที่เซนเซอร์วัดได้มีความไวต่อขนาดอนุภาค ความชื้นสัมพัทธ์ และองค์ประกอบของฝุ่น ซึ่งชี้ให้เห็นถึงความจำเป็นของการสอบเทียบโดยคำนึงถึงปัจจัยทางกายภาพเหล่านี้ ขณะที่การสอบเทียบภาคสนามของเซนเซอร์ PM2.5 แบบออปติคัลภายใต้สภาพแวดล้อมที่มีความเข้มข้นของฝุ่นทั้งสูงและต่ำ [15,16] ผลการศึกษาชี้ว่า เมื่อมีการนำค่าความชื้นสัมพัทธ์ (RH) และอุณหภูมิ (Temperature) เข้ามาใช้ในแบบจำลองเชิงเส้น (Linear regression) ค่าความสัมพันธ์กับเครื่องมาตรฐานเพิ่มขึ้นจากระดับ  $R^2 \approx 0.6$  เป็น  $> 0.8$ . การใช้แบบจำลองเชิงเส้นแบบ Gain–offset ร่วมกับ RH และอุณหภูมิ เพื่อสอบเทียบเครื่องถ่ายเซ็นเซอร์ 30 จุดในเมือง เทียบกับเครื่อง

มาตรฐาน FEM BAM [17] ทำให้ค่าความคลาดเคลื่อน (RMSE) รายชั่วโมงลดจาก 11.9 เหลือ 3.7  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  และเฉลี่ย 24 ชม. เหลือ  $\sim 2 \mu\text{g}/\text{m}^3$  แสดงให้เห็นว่าการใช้แบบจำลองเชิงสถิติร่วมกับปัจจัยสิ่งแวดล้อมสามารถยกระดับความแม่นยำของเซนเซอร์ต้นทุนต่ำได้ใกล้เคียงเครื่องมาตรฐาน. การศึกษาการสอบเทียบเซนเซอร์ PurpleAir PA-II (Plantower PMS5003) ในประเทศกรีซ [18] โดยเพิ่มตัวแปรสัดส่วน PM1/PM2.5 และความชื้นสัมพัทธ์ในแบบจำลองหลายตัวแปร (Multivariable regression) ทำให้ค่าความสัมพันธ์กับเครื่องอ้างอิง GRIMM และ BAM เพิ่มขึ้นจนถึง  $R^2 = 0.99$  แสดงให้เห็นว่าการรวมปัจจัยทางสิ่งแวดล้อมและคุณสมบัติของอนุภาคช่วยเพิ่มความถูกต้องของการวัดได้อย่างมีนัยสำคัญ นอกจากนี้ การพัฒนาเครื่องต้นแบบตรวจวัดฝุ่น PM2.5 โดยใช้หลักการ ไฟฟ้าสถิต (Electrostatic particle concentrator, EPC) ร่วมกับ Quartz crystal microbalance (QCM) [19,20] พบว่ามีความไวเชิงมวลสูง (57 Hz/ $\mu\text{g}$ ) และมีความสัมพันธ์กับมวลฝุ่นจริงในระดับ  $R^2 \approx 0.99$  พร้อมกลไกท่าความสะอาดอัตโนมัติด้วย  $\text{CO}_2$  Snow jet ซึ่งสามารถทำงานต่อเนื่องได้ยาวนานโดยไม่ต้องถอดบำรุงรักษา ผลงานดังกล่าวยืนยันว่าเทคนิคการวัดฝุ่นด้วยหลักการไฟฟ้าสถิตมีความเป็นไปได้สูงและให้ความแม่นยำเทียบเท่าเครื่องอ้างอิงระดับ FEM ซึ่งสอดคล้องโดยตรงกับแนวคิดของงานวิจัยนี้ที่พัฒนา เซนเซอร์ตรวจวัด PM2.5 แบบไฟฟ้าสถิต และสอบเทียบกับเครื่อง TEOM เพื่อยกระดับความเที่ยงตรงในภาคสนาม โดยสรุป งานวิจัยที่กล่าวมาข้างต้นล้วนสนับสนุนแนวทางการสอบเทียบและหลักการทางเทคนิคของเครื่องต้นแบบที่พัฒนาในงานนี้ ซึ่งเป็นการผสมผสานระหว่าง การเก็บตัวอย่างแบบไฟฟ้าสถิต และการสอบเทียบเชิงสถิติเทียบกับเครื่องมาตรฐาน TEOM เพื่อให้ได้เครื่องมือวัดฝุ่น PM2.5 ที่มีความแม่นยำสูง ต้นทุนต่ำ และสามารถใช้งานภาคสนามได้จริงอย่างยั่งยืน

ในการวิจัยนี้ได้นำเสนอการพัฒนาสถานีตรวจวัดฝุ่นละออง PM2.5 ที่วัดค่าโดยใช้เทคโนโลยีและวัสดุที่เหมาะสม สามารถทำงานได้จริง มีการเก็บบันทึกผลและสามารถแสดงข้อมูลการวัดออนไลน์ในเว็บเบราว์เซอร์แบบเรียลไทม์ ราคาถูกกว่าเครื่องมือวัดจากต่างประเทศ แต่สามารถทำงานได้เทียบเคียงกับเครื่องมือที่มีใช้ในปัจจุบัน โดยใช้หลักการวัดกระแสไฟฟ้าสถิต (Electrostatic current) ของอนุภาคผ่านที่ตัวกรองฝุ่นละอองประสิทธิภาพสูง (High efficiency particulate air filter: HEPA) สามารถตรวจจับและเก็บตัวอย่างฝุ่นละอองที่มีขนาดเล็กกว่า  $2.5 \mu\text{m}$  ได้อย่างรวดเร็ว โดยใช้เวลาในการประมวลผลเพียง 0.1 วินาที สามารถเก็บตัวอย่างฝุ่นละอองเพื่อไปวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีและพิษได้ โดยการวิจัยนี้มีการสอบเทียบความเข้มข้นเชิงมวลของฝุ่นละอองและทดสอบการวัดฝุ่นละอองในบรรยากาศเทียบกับเครื่องวัดฝุ่นละออง PM2.5 วิธีเทียบเคียงหรือ FEM กลุ่มที่ 3 ที่ได้การรับรอง Federal register, Part II environmental protection agency, 40 CFR Part 50 ทั้งในระดับห้องปฏิบัติการและทำการทดสอบภาคสนามในสภาวะการใช้งานจริง

## 2. ต้นแบบสถานีตรวจวัดฝุ่นละออง PM2.5 โดยใช้เซ็นเซอร์หลักการไฟฟ้าสถิต

ต้นแบบสถานีตรวจวัดฝุ่นละออง PM2.5 (Figure 1, Table 1) ใช้เซ็นเซอร์ไฟฟ้าสถิตที่วัดกระแสไฟฟ้าของอนุภาคฝุ่นผ่านตัวกรอง HEPA ประกอบด้วย: ชุดรับฝุ่นเข้า, ชุดควบคุมสภาพแวดล้อมฝุ่น, ชุดอัดประจุอนุภาค, ชุดกำจัดไอออน, ชุดคัดแยกฝุ่น PM2.5, ชุดตรวจวัดสัญญาณด้วยลูกถ้วยฟาราเดย์และวงจรรีเลย์ไมโคร, ชุดควบคุมและประมวลผล, บีมสุญญากาศ และแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูง โดยอากาศจะถูกดูดเข้าด้วยบีมที่อัตรา 7 ลิตร/นาที ผ่านชุดรับฝุ่น ซึ่งติดตั้งนอกอาคารที่มีความสูง 1.5-6 เมตร ตามมาตรฐานคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ อากาศจะถูกอัดประจุแบบโคโรนา

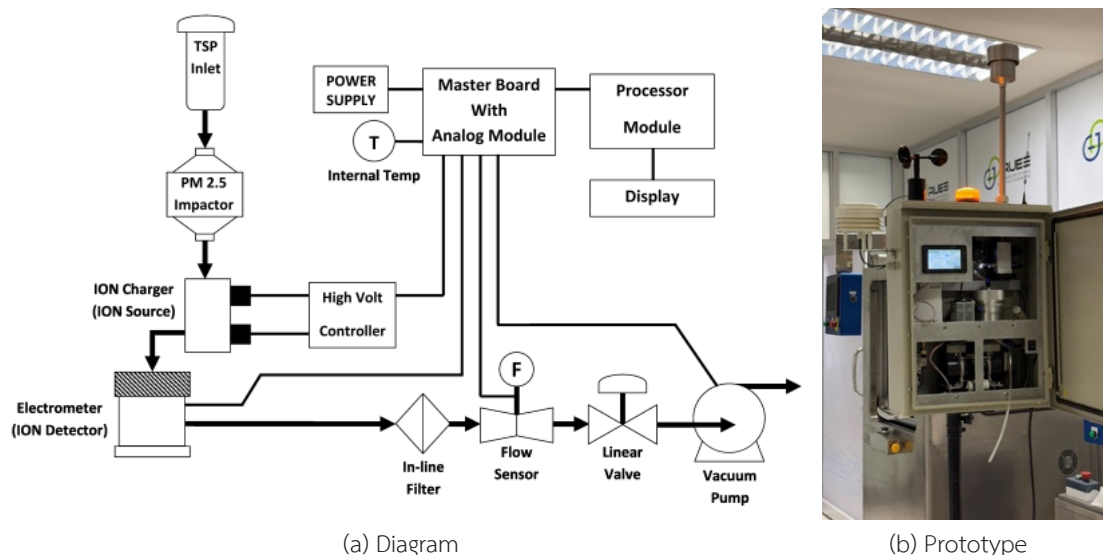


Figure 1 Prototype of a PM2.5 monitoring station employing electrostatic principles

ผ่านชุดกำจัดไอออนและคัดแยกฝุ่น PM2.5 ก่อนวัด กระแสไฟฟ้าด้วยลูกถ้วยฟาราเดย์และวงจรรีเล็กโทรมิเตอร์ (Figure 2)

กระแสไฟฟ้าที่วัดได้จะสัมพันธ์กับความเข้มข้นเชิงมวลของฝุ่น PM2.5 โดย  $I_p$  จะเป็นฟังก์ชันของความหนาแน่นของประจุสูญญากาศ (Space-charge density)  $\rho$  อัตราการไหลของอนุภาค (Aerosol flow rate)  $Q_a$  ผ่านตัวกรองอนุภาคดังสมการ [21] คือ

$$I_p = \rho Q_a \tag{1}$$

เมื่อ

$$\rho = n_p e N_p \tag{2}$$

$n_p$  คือจำนวนประจุของอนุภาค  $e$  คือประจุของอิเล็กตรอนมีค่า  $1.61 \times 10^{-19}$  C และ  $N_p$  คือค่าความเข้มข้นจำนวนของอนุภาค โดยกระแสไฟฟ้าที่วัดได้จะถูกแปลงผันไปเป็นความเข้มข้นจำนวนของอนุภาค  $N_p$  สำหรับอนุภาคละอองลอยแบบขนาดเดียว (Monodisperse) ดังสมการ [22] ต่อไปนี้

$$N_p = \frac{I_p}{g(n_p, d_p) n_p e Q_a} \tag{3}$$

เมื่อ  $g(n, d_p)$  คือความเป็นไปได้ (Probability) ของอนุภาคที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง  $d_p$  ที่ได้รับประจุ  $n_p$  และสำหรับในกรณีของอนุภาคละอองลอยแบบหลายขนาด (Polydisperse) สมการความเข้มข้นจำนวนของอนุภาคในสมการที่ 3 สามารถเขียนใหม่ได้ดังนี้

$$N_p(d_p) = \sum_{i=1}^M \frac{I_p}{g(n_{pi}(d_{pi}), d_{pi}) n_{pi}(d_{pi}) e Q_a} \Delta d_{pi} \tag{4}$$

เมื่อ  $M$  คือจำนวนของ bin ขนาดอนุภาค  $d_{pi}$  คือขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคเฉลี่ยใน  $i$  ของ Bin และ  $\Delta d_{pi}$  คือความกว้างของ Bin ขนาดอนุภาค  $i$  ดังสมการที่ 3 และ 4 และสามารถคำนวณหาความเข้มข้นเชิงมวลของอนุภาคได้จาก

$$m_p = \frac{\pi}{6} \frac{I_p}{e Q_p} \int \frac{\rho_p(d_p) d_p^3}{n_p(d_p)} dd_p \tag{5}$$

เมื่อ  $\rho_p$  คือความหนาแน่นของอนุภาค

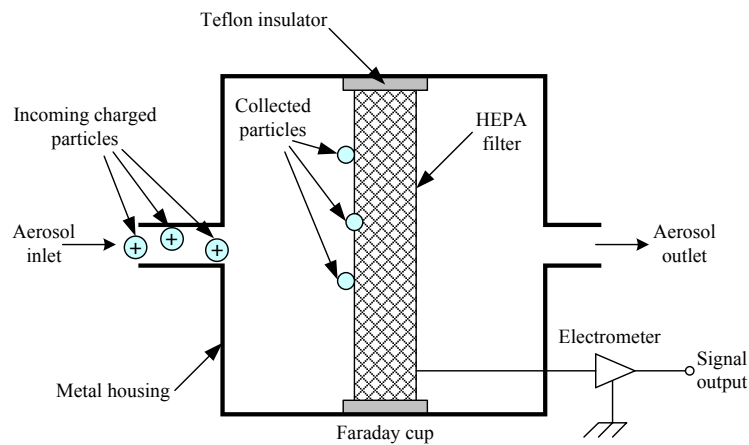


Figure 2 Structural features of a Faraday cup

Table 1 Characteristics of the PM2.5 monitoring station utilizing the developed electrostatic sensor

Features	Details
Measurement technique	Particle size classification using the inertial impact method and dust volume measurement through electrostatic charge
Particle size	PM2.5
Number of channels	1 measurement channel
Mass concentration range	0.1 to 5,000 micrograms per cubic meter
Resolution	0.1 micrograms per cubic meter
Total flow rate	7 liters per minute
Processing speed	Less than 1 second
Average dust reporting	30 minutes / 1 / 8 / 24 hours
Particle type and composition	Able to measure both solid and liquid particles
Communication	Message queuing telemetry transport protocol via 4G network
Data storage	Internal memory and time-series Database (TSDB)
Display	HMI display and online dashboard
Power supply	220 VAC 50 Hz
Operational duration	Working hours of at least 1,000 hours after cleaning
Size and characteristics	Width 45 cm x height 60 cm x depth 20 cm Easy to move, suitable for fieldwork, and durable, it can be installed and started immediately (plug and play) and can operate in areas with vibration or movement

สัญญาณไฟฟ้าที่ได้จากประจุไฟฟ้าจะถูกประมวลผลโดยชุดควบคุมและประมวลผลข้อมูล เพื่อแสดงค่าการวัดฝุ่นละออง PM2.5 ในหน่วยปริมาณ  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  และบันทึกข้อมูลลงในหน่วยความจำภายในของสถานีตรวจวัด พร้อมทั้งแสดงข้อมูลบนจอแสดงผลการตรวจวัด (Figure 3)

การวิจัยนี้ได้นำเทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง (IoT) มาประยุกต์ใช้ในระบบตรวจวัดฝุ่นละออง PM2.5 แบบเรียลไทม์ โดยพัฒนาระบบให้สามารถบันทึกข้อมูลภายในสถานีและส่งข้อมูลไปยัง MQTT broker ผ่านเครือข่าย 4G [23] โดยใช้ MQTT protocol ที่มีประสิทธิภาพในการรับส่งข้อมูลขนาดเล็กแบบเรียลไทม์ ซึ่งเลือกใช้ EMQX [24] เป็น MQTT broker เพื่อรองรับการสื่อสารที่เสถียรและปริมาณการเชื่อมต่อสูง ข้อมูลที่ได้จะถูกส่งไปยัง Node-RED [25] ซึ่งทำหน้าที่เป็น Data bridge และนำข้อมูลไปยัง InfluxDB [26] ซึ่งเป็นฐานข้อมูล Time series เพื่อให้สามารถจัดเก็บและวิเคราะห์

ข้อมูลได้อย่างมีประสิทธิภาพ ระบบยังสามารถขยายขีดความสามารถในอนาคตได้ เพื่อรองรับการประมวลผลข้อมูลเชิงลึกและการใช้งานอื่นๆ ที่เกี่ยวข้องกับคุณภาพอากาศ ข้อมูลจะถูกแสดงผลผ่าน Dashboard โดยใช้ Grafana [27] ซึ่งสามารถแสดงผลข้อมูลแบบเรียลไทม์และย้อนหลังในรูปแบบที่เข้าใจง่าย เช่น กราฟเส้นและตารางข้อมูล โดยผู้ใช้งานสามารถปรับแต่งช่วงเวลาในการดูข้อมูลย้อนหลังได้ตามต้องการ ซึ่งจะช่วยให้การวิเคราะห์แนวโน้มฝุ่นละอองในช่วงเวลาต่างๆ มีประสิทธิภาพสูงขึ้น

โครงสร้างการทำงานของระบบสำหรับการแสดงผลข้อมูลแบบเรียลไทม์ (Figure 4) สามารถปรับขยายเพื่อรองรับการแสดงผลข้อมูลจากหลายสถานีตรวจวัดในอนาคต ซึ่งจะช่วยเพิ่มขีดความสามารถในการเฝ้าระวังและประเมินคุณภาพอากาศในพื้นที่เป้าหมายได้อย่างครอบคลุมและมีประสิทธิภาพ



Figure 3 Screenshot displaying measurement results

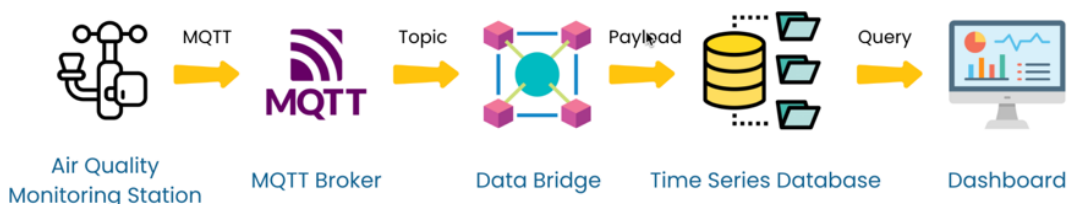


Figure 4 The operational structure of the online real-time PM2.5 measurement reporting system

### 3. อุปกรณ์และวิธีการ

#### 3.1 การทดสอบเทียบความเข้มข้นเชิงมวลอนุภาคกับเครื่องวัด PM2.5 วิธีเทียบเคียง

กระบวนการสร้างละอองลอย (Figure 5) สามารถผลิตฝุ่นแห้งหรือของเหลวได้ทั้งแบบ Monodisperse และ Polydisperse ในการวิจัยนี้ใช้เครื่องวัด PM2.5 แบบ Tapered element oscillating microbalance (TEOM) [28] ซึ่งเป็นอุปกรณ์เทียบเคียง FEM กลุ่มที่ 3 สำหรับสอบเทียบ

โดยใช้อนุภาค Polystyrene microspheres (PSL) ขนาดมาตรฐาน จ่ายให้กับเครื่องวัดฝุ่นอ้างอิงและเครื่องวัดฝุ่นต้นแบบพร้อมกัน (Figure 6) ทำการวัดทุก 1 นาที ต่อเนื่อง 1 ชั่วโมง แล้วคำนวณค่าเฉลี่ยรายชั่วโมง กระบวนการนี้ทำซ้ำสำหรับขนาดอนุภาค 0.5, 1.0, 2.5 และ 10  $\mu\text{m}$  และความเข้มข้น 0.1, 5, 10, 50, 100, 500 และ 1,000  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  จากนั้นวิเคราะห์ค่าสหสัมพันธ์เพียร์สัน [29]

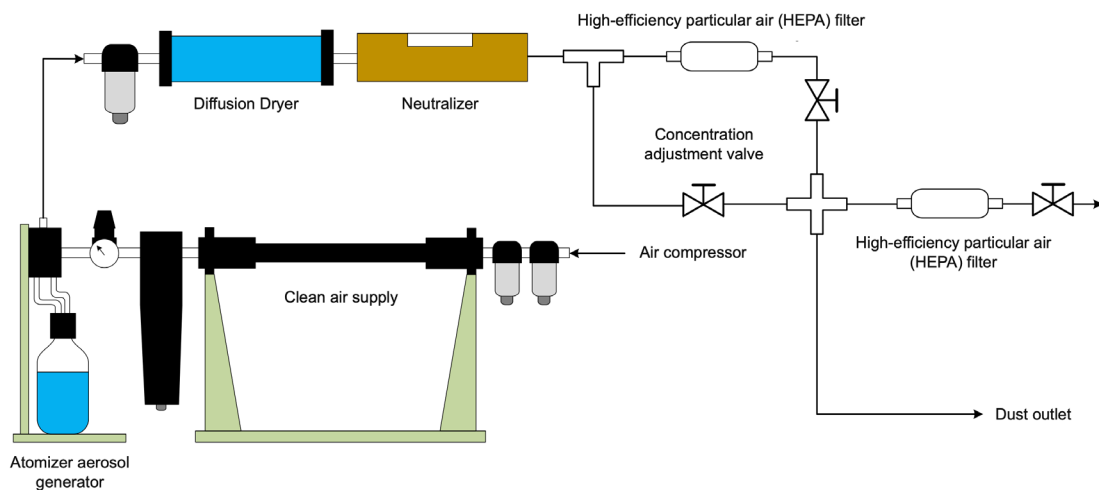


Figure 5 Schematic diagram for testing aerosol generation

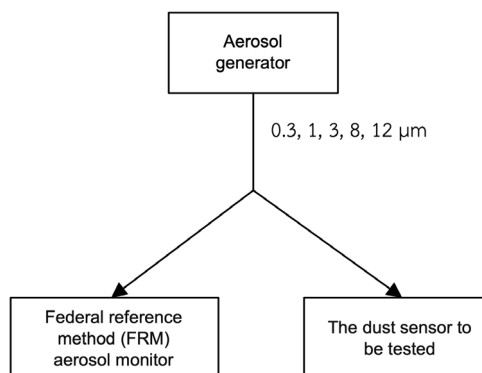


Figure 6 Diagram illustrating the measurement test for PM2.5 particle mass concentration using the comparative method

### 3.2 การทดสอบการวัดฝุ่นละออง PM2.5 ในบรรยากาศ เทียบกับเครื่องวัด PM2.5 วิธีเทียบเคียง

การเปรียบเทียบเครื่องวัดฝุ่นต้นแบบกับเครื่องวัดอ้างอิง PM2.5 แบบ TEOM ดำเนินการที่ไซต์ทดสอบอย่างน้อย 1 แห่ง โดยเก็บตัวอย่างพร้อมกันและวิเคราะห์ความสัมพันธ์ผ่านพารามิเตอร์ถดถอยเชิงเส้น (Slope, Intercept, Correlation coefficient) ห้ามปรับความเข้มข้นฝุ่น เช่น การเผา ตามข้อกำหนด 40 CFR Part 53 ตาราง C-4 หัวตรวจวัดต้องอยู่ห่างกันไม่เกิน 2 เมตร บันทึกค่าทุก 6 นาที คำนวณค่าเฉลี่ยรายชั่วโมงต่อเนื่อง 24 ชั่วโมง แล้ววิเคราะห์สหสัมพันธ์แบบเพียร์สัน [2]

### 3.3 การทดสอบภาคสนาม

การทดสอบภาคสนามติดตั้งสถานีวัดฝุ่นละออง PM2.5 ที่ลานพญาศรีสัตตนาคราช อำเภอเมือง จังหวัดนครพนม เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ของค่าความเข้มข้นของ PM2.5 ในเขตเทศบาลและฝุ่นข้ามแดนในช่วงฤดูกลางเผา พื้นที่นี้ใกล้แหล่งการเกษตร ชุมชน ย่านการค้า และแหล่งท่องเที่ยวที่มีการจราจรหนาแน่น พิกัดทางภูมิศาสตร์ของสถานีตรวจวัด 17.39876 และ 104.79097 ใกล้กับสถานีอุตุนิยมวิทยานครพนม ที่ตำแหน่ง 17.412282 และ 104.77857 ซึ่งใช้เป็นสถานีเทียบเคียงค่า การทดสอบภาคสนามมีอุณหภูมิ 20 ถึง 42 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ 40-85% RH และความเร็วลม 1-30 m/s

### 3.4 การทดสอบระบบจัดเก็บข้อมูลและรายงานผลการตรวจวัด

การทดสอบความสมบูรณ์ของข้อมูล (Data integrity) ใน Time series database (TSDB) ด้วยข้อมูล PM2.5 จากสถานีตรวจวัดและบันทึกใน InfluxDB ผ่านการ Subscribe มี 3 ขั้นตอน: (1) เก็บข้อมูล-สถานีตรวจวัดส่งค่า PM2.5 ไปยัง EMQX ผ่าน MQTT โดย Node-RED ทำหน้าที่เป็น Data bridge บันทึกลง InfluxDB (2) ตรวจสอบความถูกต้อง-ดึงข้อมูลจาก InfluxDB มาเปรียบเทียบกับค่าที่ได้รับโดยตรง (3) วิเคราะห์ความสอดคล้อง-ตรวจสอบความแตกต่างระหว่างค่าที่บันทึกกับค่าจริงจากสถานีตรวจวัด

การทดสอบความเสถียร (System stability) และความน่าเชื่อถือ (Reliability) ของระบบรับส่งข้อมูลจากสถานีตรวจวัดฝุ่นผ่าน MQTT (EMQX) ภายใต้สภาวะใช้งานจริง โดยให้สถานีส่งข้อมูล PM2.5 ไปยัง EMQX ทุก 6 นาที เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ประเมินอัตราการรับส่งข้อมูล เปรียบเทียบแพ็กเก็ตที่ส่งและรับ ตรวจสอบอัตราการสูญหายของแพ็กเก็ต และความต่อเนื่องของการเชื่อมต่อผ่าน Log ของ EMQX

การทดสอบประสิทธิภาพในการแสดงผล (Visualization performance) โดยวิเคราะห์เวลาในการดึงข้อมูลจากฐานข้อมูล InfluxDB เพื่อแสดงผลบน Grafana ในช่วงเวลาที่แตกต่างกัน เช่น 1, 3, 6, 12 และ 24 ชั่วโมง โดยใช้ InfluxDB เก็บข้อมูล PM2.5 และ



(a) Measurement point location



(b) Image at the measurement location

Figure 7 Field testing location: Phraya Sri Satta Nakarath square, Mueang district, Nakhon Phanom province

Grafana แสดงผล ทำการ Query ข้อมูลย้อนหลัง และบันทึกเวลาในการดึงข้อมูลแต่ละช่วง เพื่อวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ Query และเวลาในการประมวลผล

#### 4. ผลการวิจัยและวิจารณ์

##### 4.1 การวัดความเข้มข้นเชิงมวลอนุภาคกับเครื่องวัดวิธีเทียบเคียง

การเปรียบเทียบแรงดันอิเล็กโทรมิเตอร์ ( $V/m^3$ ) กับความเข้มข้นเชิงมวล ( $\mu g/m^3$ ) ของอนุภาคโพลิสไตรีนลาเท็กซ์ขนาด 0.5, 1.0, 2.5 และ 10  $\mu m$  (Figure 8) แสดงความสัมพันธ์เชิงเส้นที่ชัดเจน โดยแรงดันอิเล็กโทรมิเตอร์เพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นเชิงมวล แต่ลดลงเมื่อขนาดอนุภาคเพิ่มขึ้น เนื่องจากความแตกต่างของจำนวนประจุต่ออนุภาคและการสูญเสียภายในเครื่องวัดอนุภาคแบบไฟฟ้าสถิต

การเปรียบเทียบระหว่างแรงดันอิเล็กโทรมิเตอร์ กับความเข้มข้นเชิงมวลของอนุภาคโพลิสไตรีนลาเท็กซ์ที่ขนาดต่างๆ แสดงความสัมพันธ์เชิงเส้น (Table 2, Figure 9) ซึ่งผลการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่าขนาดอนุภาคมีผลต่อค่าความชันและอัตราส่วนระหว่างหน่วยวัด โดยอนุภาคขนาดเล็กมีค่า Slope และอัตราส่วนที่สูงกว่าอนุภาคขนาดใหญ่ ทั้งนี้ทุกขนาดอนุภาคแสดงความสัมพันธ์เชิงเส้นที่แข็งแกร่งด้วยค่า  $R^2$  สูงกว่า 0.997

ผลการเปรียบเทียบเครื่องต้นแบบกับเครื่องวัด PM2.5 วิธีเทียบเคียง แสดงสหสัมพันธ์ที่ดีมาก (Figure 10) โดยใช้อนุภาคเกลือ NaCl ขนาด 0.1-20  $\mu m$  ที่ความเข้มข้น 0.1-1,000  $\mu g/m^3$  วัดทุกนาทีและเฉลี่ยทุกชั่วโมง พบค่า  $R^2 = 0.9937$  โดยมี Slope = 0.921 และ Intercept = 13.675

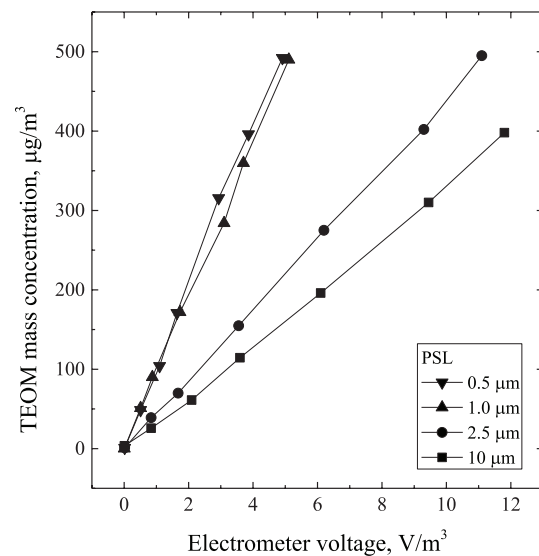


Figure 8 Comparison of the electrometer's voltage ( $V/m^3$ ) and mass concentration ( $\mu g/m^3$ ) using the federal equivalent method.

Table 2 Experimental results comparing the electrometer's voltage and mass concentration

Particle size ( $\mu m$ )	Intercept	Slope	$R^2$	Ratio $\mu g/m^3$ to $V/m^3$
0.5	- 0.514	102.32	0.9974	86.20
1.0	2.485	95.057	0.9984	83.32
2.5	- 0.961	44.153	0.9993	45.54
10.0	-3.872	33.527	0.9986	34.87

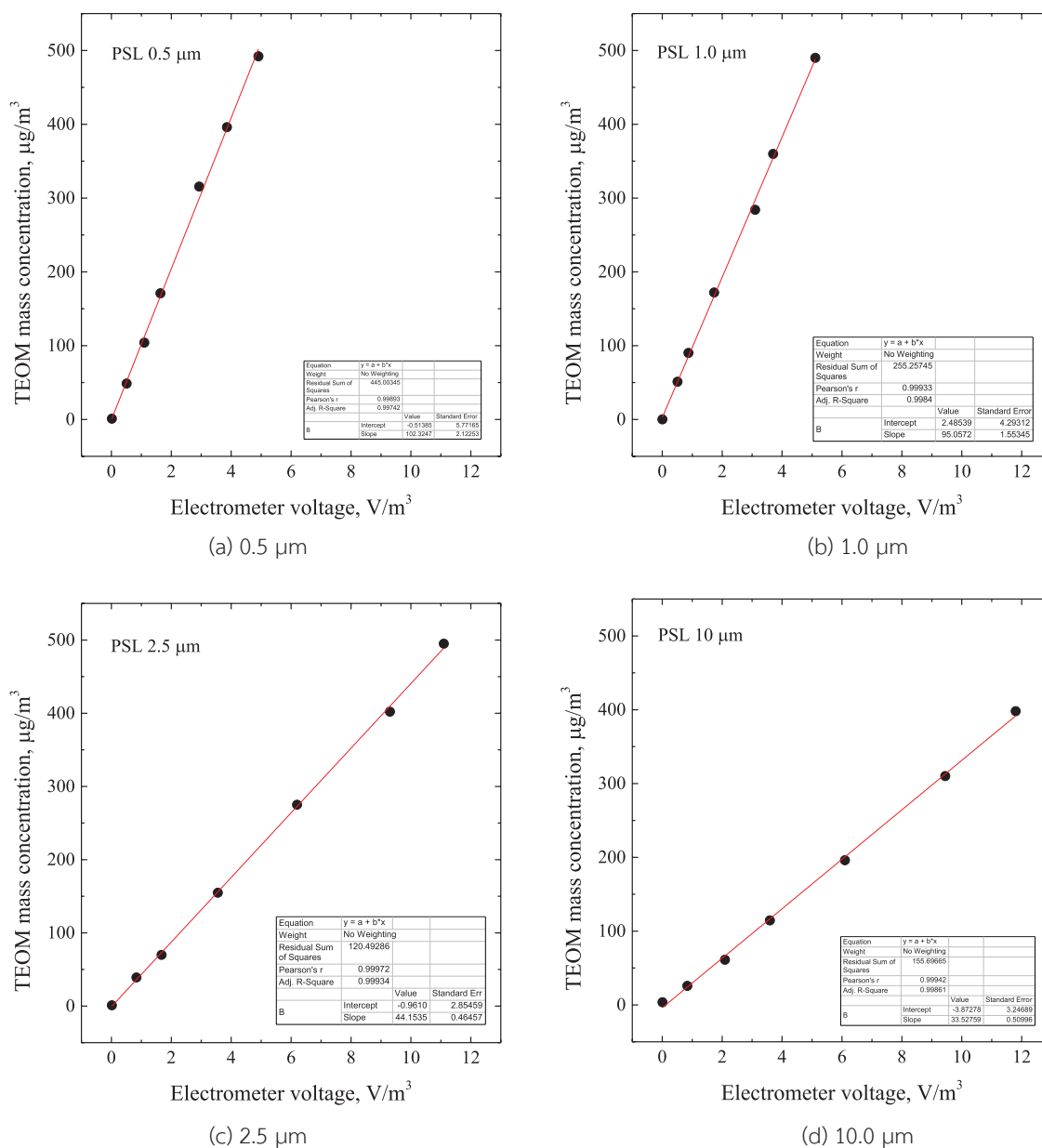
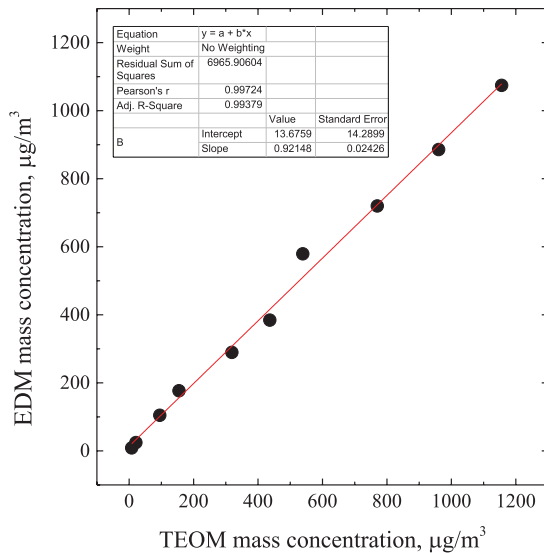


Figure 9 Comparative analysis of electrometer voltage ( $V/m^3$ ) and mass concentration ( $\mu g/m^3$ ) across various particle sizes



**Figure 10** A comparative analysis of particle mass concentration measurements with PM2.5 measurements utilizing the federal equivalent method

จากผลการวิเคราะห์เชิงสถิติ (Figure 10) พบว่าค่าความเข้มข้นเชิงมวลของฝุ่นละออง PM2.5 ที่วัดได้จากเครื่องต้นแบบ (EDM) มีความสัมพันธ์เชิงเส้นกับเครื่องมาตรฐาน TEOM อย่างชัดเจน โดยมีค่า  $R^2 = 0.99379$  และค่า Pearson's  $r = 0.99724$  ซึ่งจัดอยู่ในระดับความสัมพันธ์เชิงบวกที่สูงมาก แสดงให้เห็นว่าเครื่องต้นแบบสามารถติดตามแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของค่าความเข้มข้นฝุ่นละอองได้อย่างแม่นยำเทียบเคียงกับเครื่องมาตรฐาน ค่าความชันของสมการถดถอย (Slope = 0.92148) หมายความว่าค่าที่เครื่องต้นแบบวัดได้มีแนวโน้มต่ำกว่าเครื่องมาตรฐานประมาณ 7.9% อันเป็นผลมาจากความแตกต่างของหลักการตรวจวัดระหว่างเครื่องมือทั้งสอง โดยเครื่อง TEOM ใช้วิธีการวัดมวลจริงของฝุ่นละอองผ่านการสั่นของไมโครบาลานซ์ (Microbalance) ขณะที่เครื่องต้นแบบใช้การวัดกระแสไฟฟ้าที่เกิดจากประจุของอนุภาคฝุ่นในสนามไฟฟ้า ความแตกต่างนี้อาจทำให้ค่าที่วัดได้จากเครื่องต้นแบบได้รับอิทธิพลจากปัจจัยทางกายภาพของอนุภาค เช่น ความชื้น ขนาด

อัตราการใช้ และความหนาแน่นของประจุไฟฟ้า ค่าคงที่ตัดแกน (Intercept = 13.6759  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) แสดงถึงค่าฝุ่นพื้นฐาน (Background offset) ซึ่งอาจเกิดจากสัญญาณรบกวนภายในวงจรอิเล็กทรอนิกส์ของเครื่อง หรือจากสภาพอากาศที่มีฝุ่นพื้นสะสมอยู่ โดยสามารถลดความคลาดเคลื่อนนี้ได้ด้วยการปรับจุดศูนย์ (Baseline calibration) ในการสอบเทียบครั้งถัดไป ผลลัพธ์ดังกล่าวชี้ให้เห็นว่าความสัมพันธ์ระหว่างเครื่องต้นแบบและเครื่องมาตรฐานอยู่ในเกณฑ์ดีมาก โดยค่า  $R^2$  ที่สูงกว่า 0.99 สะท้อนถึงความเสถียรของการตอบสนองเชิงเส้นในช่วงความเข้มข้น 0-1,000  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  และยืนยันว่าเครื่องต้นแบบมีศักยภาพในการใช้งานเทียบเคียงเครื่องมือมาตรฐาน FEM ได้จริงในระดับภาคสนาม

#### 4.2 การทดสอบการวัดฝุ่นละออง PM2.5 ในบรรยากาศเทียบกับเครื่องวัด PM2.5 วิธีเทียบเคียง

ผลการเปรียบเทียบการวัด PM2.5 ระหว่างเครื่องต้นแบบที่พัฒนาขึ้นกับเครื่องวัดมาตรฐาน TEOM Model 1405 (Figure 11) ที่หน่วยวิจัยสนามไฟฟ้าประยุกต์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี (13-17 พฤศจิกายน 2567) แสดงให้เห็นว่าค่าที่วัดได้จากทั้งสองเครื่องมีแนวโน้มการเพิ่มขึ้นและลดลงของความเข้มข้นเชิงมวล PM2.5 ไปในทิศทางเดียวกัน แม้จะมีความแตกต่างกันบ้าง ความแตกต่างนี้เกิดจากเครื่อง TEOM มีเวลาตอบสนองที่ช้ากว่า (วัดสลับระหว่าง Base และ Reference อย่างละ 6 นาที) ทำให้ไม่เหมาะกับการวัดฝุ่นละอองที่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วหรือในสภาวะชั่วขณะ เครื่อง TEOM จึงเหมาะสมกับการวัดฝุ่นละอองที่มีการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นต่ำและยาวนาน ผลเป็นค่าเฉลี่ยรายชั่วโมงหรือราย 24 ชั่วโมงมากกว่า โดยข้อมูลค่าเฉลี่ยราย 1 ชั่วโมงจำนวน 24 ข้อมูลได้ถูกนำมาวิเคราะห์ทางสถิติด้วยสมการถดถอยเชิงเส้นและสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์แบบเพียร์สัน

ผลการทดลองแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า PM2.5 รายชั่วโมงจากเครื่องต้นแบบกับเครื่องวัด PM2.5 วิธีเทียบเคียง (Figure 12) พบสมการถดถอยเชิงเส้นที่มี

ค่า Intercept 7.638, Slope 0.480 และค่า R<sup>2</sup> 0.8658 ถึงแม้ว่าค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์นี้จะต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐานตาม 40 CFR Part 53 ที่กำหนดไว้สำหรับ Class I ( $\geq 0.97$ ), Class II และ Class III ( $\geq 0.93$  สำหรับ  $CCV \leq 0.4$ ) แต่มีค่าใกล้เคียงกับผลงานวิจัยอื่นที่เกี่ยวข้องในการทดสอบเปรียบเทียบระหว่างวิธีอ้างอิงและวิธีเทียบเคียงในการวัด PM<sub>2.5</sub> โดยความแม่นยำของการวัดที่กำหนดสำหรับวิธีการอ้างอิงซ้ำคือ 5%, 10% และ 10%

สำหรับ Class I, II และ III ตามลำดับ ส่วนความแม่นยำของวิธีแคนดิเดตกำหนดไว้ที่ 15% สำหรับทุก Class จากผลการเปรียบเทียบพบว่าค่าที่วัดได้จากเครื่องต้นแบบและเครื่องมาตรฐานมีแนวโน้มสอดคล้องกัน แต่มีความแตกต่างบางช่วง ซึ่งสามารถอธิบายได้จากหลายปัจจัย ทั้งด้านลักษณะการทำงานของเครื่องมือและสภาวะแวดล้อมขณะทดสอบ โดยเครื่อง TEOM ใช้หลักการวัดแบบ Tapered element oscillating

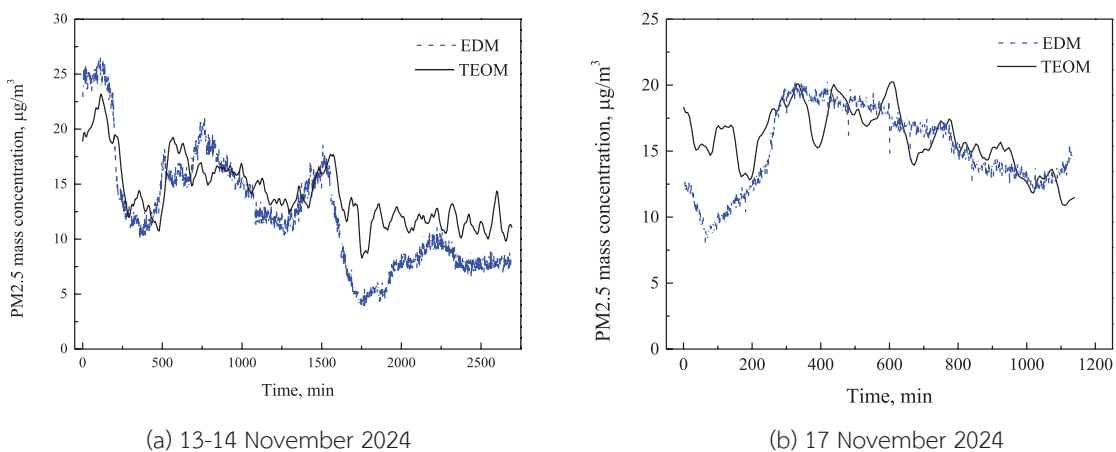


Figure 11 Measurements comparison using the federal equivalent method with atmospheric PM<sub>2.5</sub>

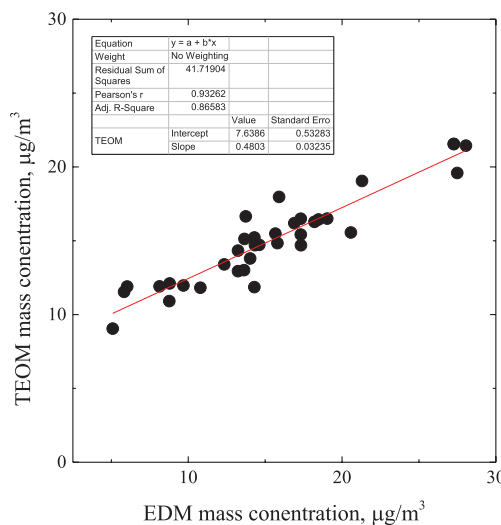


Figure 12 Correlation of hourly PM<sub>2.5</sub> values between the developed prototype and the federal equivalent method

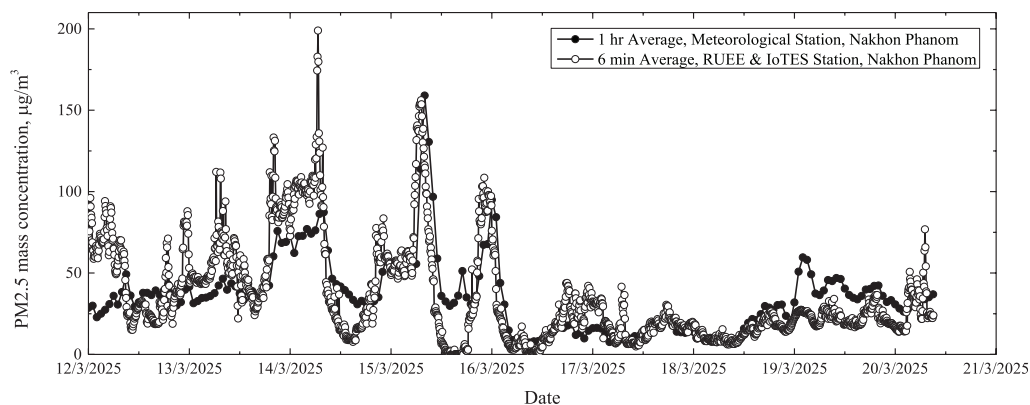
microbalance ที่มีการทำความร้อนบริเวณทางเข้าตัวอย่างอากาศเพื่อกำจัดองค์ประกอบระเหยง่าย ทำให้ค่าที่ได้มีค่าต่ำกว่าความเข้มข้นจริงในสถานะที่มีไอระเหยสูง ขณะที่เครื่องต้นแบบของงานวิจัยนี้ใช้หลักการไฟฟ้าสถิต ซึ่งตอบสนองได้รวดเร็วต่อการเปลี่ยนแปลงของอนุภาคในอากาศ จึงอาจรายงานค่าที่แตกต่างในบางช่วงเวลา นอกจากนี้ ปัจจัยภายนอก เช่น ความสูงของหัวตรวจวัด ระยะห่างระหว่างเครื่องต้นแบบและเครื่องอ้างอิง ทิศทางลม ความชื้นสัมพัทธ์ และการกระจายขนาดของอนุภาค (Particle size distribution) ก็มีผลต่อค่าที่วัดได้ เนื่องจากมีผลต่ออัตราการไหลและประจุไฟฟ้าของอนุภาคในกระแสอากาศ ทั้งนี้ความแตกต่างที่พบอยู่ในระดับที่สามารถยอมรับได้และไม่ส่งผลกระทบต่อแนวโน้มหลักของข้อมูล เพื่อเพิ่มความเที่ยงตรงและลดผลกระทบจากปัจจัยแวดล้อม ผู้วิจัยได้เสนอแนวทางปรับปรุงในระยะต่อไป ได้แก่ การเพิ่มระบบปรับสภาพอากาศขาเข้า (Air-conditioning inlet) เพื่อลดอิทธิพลของความชื้น การปรับสมการสอบเทียบใหม่โดยใช้ข้อมูลจากหลายสถานะอากาศ การตรวจสอบการสูญเสียของอนุภาคในท่อดูด และการเพิ่มเซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิและความชื้นเพื่อใช้ในการปรับค่าการวัดแบบเรียลไทม์ นอกเหนือจากการใช้สหสัมพันธ์เพียร์สันและสมการถดถอยเชิงเส้นแล้ว ควรมีการวิเคราะห์ทางสถิติอื่นเพื่อยืนยันความสอดคล้องและความน่าเชื่อถือของเครื่องต้นแบบ เช่น การใช้ Bland-Altman plot เพื่อประเมินความเห็นพ้อง (Agreement) ระหว่างเครื่องมือ การคำนวณค่าความคลาดเคลื่อนเชิงปริมาณ ได้แก่ Mean error (ME), Root mean square error (RMSE) และ Mean absolute error (MAE) เพื่อประเมินความแม่นยำเชิงปริมาณ รวมถึงการใช้สถิติ Deming regression หรือ Passing-Bablok regression เพื่อวิเคราะห์ความสัมพันธ์โดยคำนึงถึงความคลาดเคลื่อนของทั้งสองเครื่องมือ และการหาค่า Lin's concordance correlation coefficient (CCC) เพื่อยืนยันความเที่ยงตรงและความสอดคล้องของผลการวัด ผลการวิเคราะห์

เชิงสถิติเพิ่มเติมดังกล่าวจะช่วยสนับสนุนความเชื่อมั่นของเครื่องต้นแบบ และยืนยันว่าค่าที่ได้จากสถานีตรวจวัดฝุ่นละออง PM2.5 ที่พัฒนาขึ้นสามารถใช้ประเมินแนวโน้มและคุณภาพอากาศได้อย่างถูกต้องและเชื่อถือได้ในระดับปฏิบัติการจริง

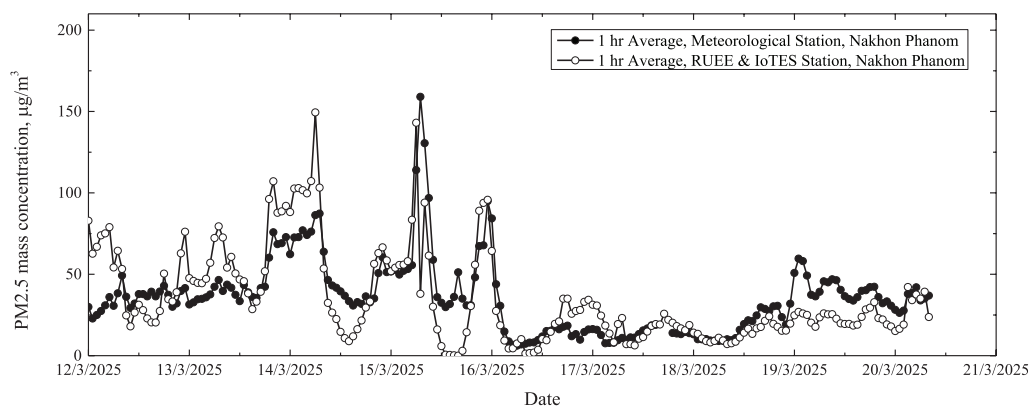
#### 4.3 การทดสอบภาคสนาม

การวิเคราะห์ค่าความเข้มข้นเชิงมวลของฝุ่น PM2.5 (Figure 13) เปรียบเทียบข้อมูลระหว่างสถานีตรวจวัดฝุ่นต้นแบบและสถานีอุตุนิยามวิทยานครพนม ในช่วงวันที่ 11-19 มีนาคม 2568 ตลอด 24 ชั่วโมง (00:00-23:59 น.) โดยนำเสนอในรูปแบบค่าเฉลี่ยหลายระดับ ได้แก่ ราย 6 นาที, รายชั่วโมง และราย 24 ชั่วโมง ซึ่งช่วยให้เห็นแนวโน้มและความผันแปรของค่าฝุ่นในแต่ละช่วงเวลาได้อย่างชัดเจน

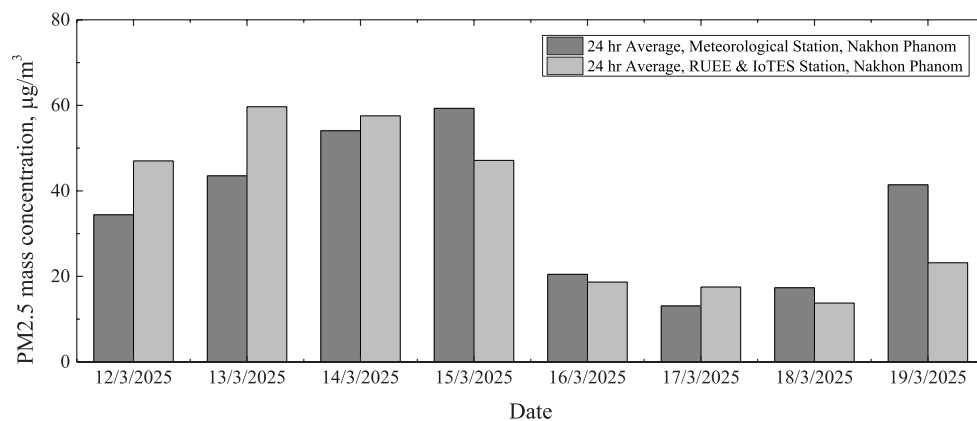
การวิเคราะห์ข้อมูลเฉลี่ยทุก 6 นาที (Figure 13a) แสดงให้เห็นถึงความละเอียดเชิงเวลา (Temporal resolution) ที่สูง เครื่องต้นแบบสามารถตรวจจับการเปลี่ยนแปลงของค่าฝุ่น PM2.5 แบบฉับพลัน เช่น การเพิ่มขึ้นของความเข้มข้นในช่วงเช้าและค่าพุ่งสูงในช่วงค่ำ ซึ่งสอดคล้องกับกิจกรรมของมนุษย์ หรือการเผาในที่โล่ง ได้อย่างชัดเจน แนวโน้มของกราฟจากทั้งสองสถานีไปในทิศทางเดียวกันตลอดช่วงเวลาทดสอบ สะท้อนให้เห็นว่าเครื่องต้นแบบตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงระยะสั้นได้อย่างมีประสิทธิภาพ สำหรับข้อมูลเฉลี่ยรายชั่วโมง (Figure 13b) ซึ่งเป็นช่วงเวลามาตรฐานที่ใช้รายงานโดยหน่วยงานด้านสิ่งแวดล้อม พบว่าแนวโน้มของข้อมูลระหว่างเครื่องต้นแบบและเครื่องมาตรฐานมีความใกล้เคียงกัน โดยจุดสูงสุดและต่ำสุดในแต่ละวันเกิดขึ้นในเวลาใกล้เคียงกัน แสดงถึงความถูกต้องและความเสถียรของเครื่องต้นแบบในการรายงานค่าฝุ่นเฉลี่ยรายชั่วโมง พร้อมทั้งยืนยันว่าเครื่องสามารถทำงานได้สม่ำเสมอในสภาพแวดล้อมจริง ในส่วนของข้อมูลเฉลี่ยราย 24 ชั่วโมง (Figure 13c) พบว่าแนวโน้มของค่าฝุ่นรายวันจากเครื่องต้นแบบและเครื่องมาตรฐานมีความสอดคล้องกันอย่างต่อเนื่อง



(a) 6 - minute average



(b) 1 - hour average



(c) 24 - hour average

**Figure 13** Comparison of prototype station measurements and Nakhon Phanom meteorological station data from March 11 to 19, 2025, from 00:00 to 23:59 hours

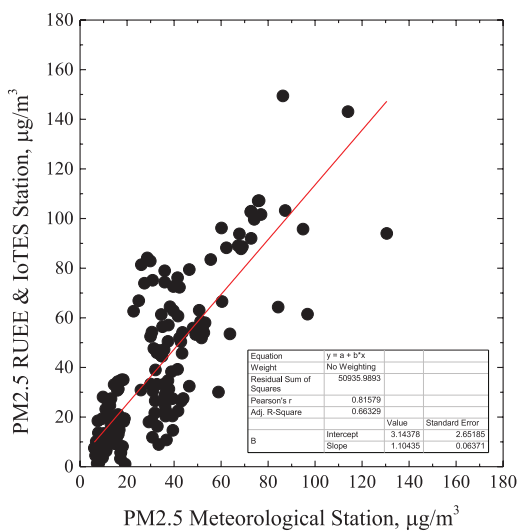
โดยค่าที่ได้จากเครื่องต้นแบบอยู่ในช่วงเดียวกันกับเครื่องมาตรฐานตลอดระยะเวลาการทดสอบ ซึ่งสะท้อนถึงความเสถียรของการทำงานในระยะยาว และศักยภาพในการนำไปใช้รายงานค่าฝุ่นละอองเฉลี่ยรายวันได้อย่างเหมาะสม การทดสอบภาคสนามในทั้งสามระดับเวลาแสดงให้เห็นว่าเครื่องต้นแบบสามารถตรวจวัดและรายงานค่าฝุ่นละออง PM2.5 ได้อย่างสอดคล้องกับเครื่องมาตรฐาน ทั้งในช่วงเวลาสั้นและระยะยาว แนวโน้มข้อมูลที่ได้มีความต่อเนื่องและมีรูปแบบการเปลี่ยนแปลงใกล้เคียงกัน บ่งชี้ถึงความเที่ยงตรง ความเสถียร และความพร้อมของเครื่องต้นแบบสำหรับการใช้งานภาคสนามจริง

การวิเคราะห์สหสัมพันธ์ (Figure 14) แสดงความสัมพันธ์ของค่าฝุ่น PM2.5 เฉลี่ยรายชั่วโมงและราย 24 ชั่วโมงจากทั้งสองสถานี โดยค่า Pearson's correlation coefficient (r) ที่คำนวณได้คือ 0.81579 ซึ่งบ่งชี้ถึงความสัมพันธ์เชิงบวกที่ค่อนข้างสูง (Strong positive correlation) หมายความว่าเมื่อค่าฝุ่นจากสถานีหนึ่งเพิ่มขึ้นหรือลดลง อีกสถานีหนึ่งจะมีแนวโน้มเปลี่ยนแปลงไปในทิศทางเดียวกัน ข้อมูลนี้ช่วยยืนยัน

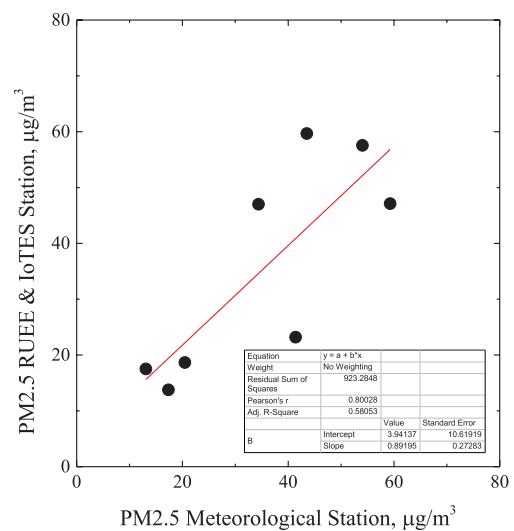
ความสอดคล้องของการตรวจวัดระหว่างสถานีทั้งสอง และสามารถใช้เป็นพื้นฐานในการประเมินคุณภาพอากาศในพื้นที่ได้อย่างน่าเชื่อถือ

แม้ว่าค่าสหสัมพันธ์จะสูง ( $r = 0.81579$ ) แต่ยังไม่ถึงระดับสมบูรณ์ ( $r = 1.0$ ) ซึ่งบ่งชี้ว่ามีความแตกต่างบางประการระหว่างค่าฝุ่นจากทั้งสองสถานี โดยอาจมีปัจจัยภายนอกที่ส่งผลกระทบ เช่น ตำแหน่งของสถานีตรวจวัด ความสูงในการเก็บตัวอย่าง ลักษณะของพื้นที่ทิศทางลม อุณหภูมิและความชื้น และกิจกรรมในพื้นที่หรือแหล่งกำเนิดมลพิษใกล้เคียง

ปัจจัยเหล่านี้อาจทำให้ค่าฝุ่นของทั้งสองสถานีไม่ตรงกัน 100% อย่างไรก็ตาม จากค่าสหสัมพันธ์ที่ 0.81 สามารถสรุปได้ว่าข้อมูลจากทั้งสองสถานีมีแนวโน้มที่คล้ายคลึงกันอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งสะท้อนถึงความน่าเชื่อถือของสถานีตรวจวัดต้นแบบในการตรวจวัด PM2.5 และสามารถใช้อ้างอิงข้อมูลจากสถานีนี้ในการติดตามคุณภาพอากาศในพื้นที่ได้อย่างมีประสิทธิภาพ แม้จะมีความแตกต่างเล็กน้อยจากสถานีอุตุวิทยานครพนมก็ตาม



(a) 1 - hour average



(b) 24 - hour average

**Figure 14** Correlation of hourly PM2.5 values between the prototype station and the Nakhon Phanom meteorological station

#### 4.4 การทดสอบระบบจัดเก็บข้อมูลและรายงานผลการตรวจวัด

ผลการทดลองแสดงว่าระบบ IoT ที่พัฒนาขึ้นสำหรับการตรวจวัดฝุ่น PM2.5 มีประสิทธิภาพสูงในการรักษาความสมบูรณ์ของข้อมูล โดยการทดสอบความถูกต้องของข้อมูลที่จัดเก็บใน InfluxDB เมื่อเปรียบเทียบกับค่าที่ได้รับโดยตรงจากสถานีตรวจวัดในช่วงเวลาเดียวกัน พบว่าค่ามีความตรงกันสมบูรณ์ (Table 3) ซึ่งยืนยันว่ากระบวนการรับ-ส่งข้อมูลผ่าน EMQX และการบันทึกใน Time series database สามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ ระบบยังมีการตรวจสอบความผิดปกติของข้อมูล เช่น ค่า Null หรือค่าที่อยู่นอกช่วงที่กำหนด รวมถึง Timestamp ที่ไม่สอดคล้องกัน โดยหากพบความผิดพลาด ระบบจะแจ้งเตือนและไม่บันทึกค่าดังกล่าว ส่งผลให้ระบบมีความน่าเชื่อถือสูงสำหรับการจัดเก็บและวิเคราะห์ข้อมูลคุณภาพอากาศในระยะยาว

ผลการทดสอบความเสถียรและความน่าเชื่อถือของระบบในงานวิจัยนี้แสดงให้เห็นว่า EMQX มีประสิทธิภาพสูงในการรองรับโหลดข้อมูล โดยทดสอบด้วยการส่งข้อมูลจากสถานีตรวจวัดทุก 6 นาที ตลอด 24 ชั่วโมง ซึ่งไม่พบการสูญหายของแพ็กเก็ตข้อมูลหรือการตัดการเชื่อมต่อ (Downtime) แต่อย่างใด การรับ-ส่งข้อมูลดำเนินไปอย่างต่อเนื่องและมีความคงที่ในทุกรอบการส่งข้อมูล ยืนยันว่าระบบมีความเสถียรสูง สามารถทำงานได้อย่างน่าเชื่อถือในสภาพแวดล้อมจริงโดยไม่เกิดปัญหาทางเทคนิคที่ส่งผลกระทบต่อการทำงานในระยะยาว

ผลการทดสอบประสิทธิภาพในการแสดงผลพบว่าเวลาที่ใช้ในการดึงข้อมูลจาก InfluxDB เพื่อแสดงผลบน Grafana (Figure 15) มีความสัมพันธ์โดยตรงกับช่วงเวลาของการ Query ข้อมูลย้อนหลัง จากการทดสอบในช่วงเวลา 1, 3, 6, 12 และ 24 ชั่วโมง (Table 4) แสดงให้เห็นว่าเวลาในการประมวลผลเพิ่มขึ้นตามระยะเวลา

**Table 3** Comparison of PM2.5 dust values between InfluxDB and measurement station data

Timestamp	Measurement station (µg/m³)	InfluxDB (µg/m³)	% diff
2025-03-19 06:29:55	28.06	28.06	0
2025-03-19 06:35:58	29.79	29.79	0
2025-03-19 06:41:59	32.93	32.93	0
2025-03-19 06:48:01	31.77	31.77	0
2025-03-19 06:54:03	35.11	35.11	0
2025-03-19 07:00:05	32.23	32.23	0
2025-03-19 07:06:07	34.63	34.63	0
2025-03-19 07:12:09	35.12	35.12	0
2025-03-19 07:18:11	36.40	36.40	0
2025-03-19 07:24:13	35.34	35.34	0
2025-03-19 07:30:15	34.05	34.05	0

ของข้อมูลที่ถูกดึง เนื่องจากปริมาณข้อมูลและความซับซ้อนในการประมวลผลที่เพิ่มขึ้น ซึ่งการ Query ข้อมูล 24 ชั่วโมงใช้เวลานานกว่าช่วงเวลาสั้นอย่างมีนัยสำคัญ ผลลัพธ์นี้ชี้ให้เห็นถึงข้อควรพิจารณาสำหรับการออกแบบระบบที่ต้องรองรับข้อมูลขนาดใหญ่ในอนาคต

## 5. สรุปผลการวิจัย

การวิจัยนี้นำเสนอการสอบเทียบและการทดสอบภาคสนามของสถานีตรวจวัดฝุ่นละออง PM<sub>2.5</sub> ที่ใช้เซ็นเซอร์หลักการไฟฟ้าสถิต ซึ่งสามารถบันทึกและ

แสดงผลแบบเรียลไทม์ผ่านเว็บเบราว์เซอร์ได้อย่างต่อเนื่อง ต้นแบบดังกล่าวใช้วัสดุและอุปกรณ์ที่ผลิตภายในประเทศเพื่อลดการพึ่งพาการนำเข้า สามารถวัดค่าความเข้มข้นของฝุ่นละอองได้ในช่วง 0.1-5,000  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  ใช้เวลาประมวลผลน้อยกว่า 1 วินาที และทำงานต่อเนื่องได้ยาวนานกว่า 3,000 ชั่วโมงโดยไม่ต้องบำรุงรักษา ผลการสอบเทียบในห้องปฏิบัติการและภาคสนามแสดงให้เห็นความสัมพันธ์เชิงเส้นที่ดีระหว่างค่ากระแสไฟฟ้าและค่าความเข้มข้นของฝุ่น โดยมีค่า  $R^2$  มากกว่า 0.99 และค่าสหสัมพันธ์กับเครื่องวัดมาตรฐาน FEM ที่

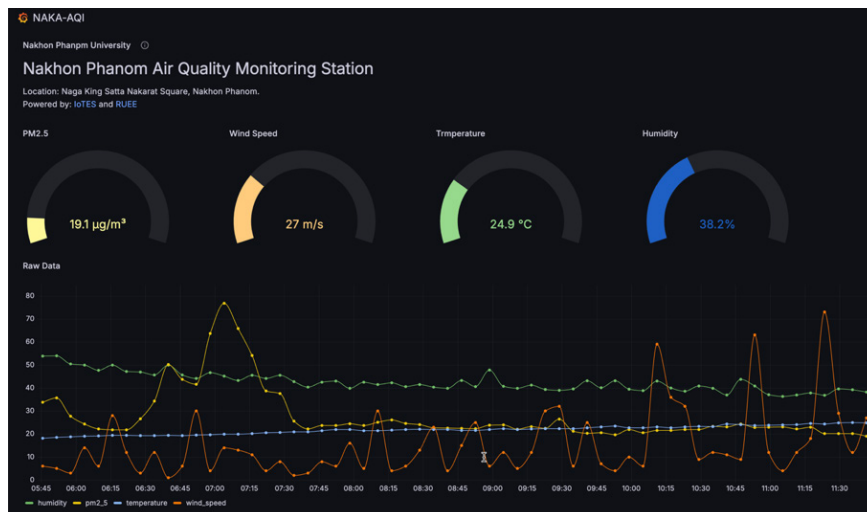


Figure 15 Displaying real-time online PM<sub>2.5</sub> measurement results on the dashboard  
(Link: <https://kku.world/971bf0>)

Table 4 Retrieval time of data from InfluxDB for Grafana visualization

Query time range	Query execution time (ms)
1 hour	87
3 hours	170
6 hours	210
12 hours	348
24 hours	419

ระดับ  $R^2 = 0.8658$  และ  $r = 0.81579$  ยืนยันถึงความถูกต้อง ความเที่ยงตรง และความน่าเชื่อถือของระบบ นอกจากนี้ ระบบรายงานผลออนไลน์ที่ใช้สถาปัตยกรรม MQTT – InfluxDB – Grafana มีความเสถียรสูง ไม่พบการสูญหายของข้อมูล และสามารถแสดงผลย้อนหลังได้ภายในเวลาไม่ถึง 1 วินาที สะท้อนถึงประสิทธิภาพของระบบ IoT ที่พัฒนาให้เหมาะสมกับการใช้งานจริงในภาคสนาม ในด้านความแม่นยำ เครื่องต้นแบบที่พัฒนาขึ้นสามารถเปรียบเทียบผลการวัดกับเครื่องมาตรฐาน TEOM Model 1405 (FEM) ได้อย่างสอดคล้อง โดยมีระดับความสัมพันธ์เชิงบวกสูง และเมื่อทำการทดสอบเชิงเวลาทั้งรายชั่วโมงและรายวัน พบว่าผลการวัดมีความสม่ำเสมอและเทียบเคียงกับเครื่องมือมาตรฐานสากล ยืนยันประสิทธิภาพของเครื่องต้นแบบในการตรวจวัดฝุ่นละออง PM2.5 ในสภาวะแวดล้อมจริง ในด้านเสถียรภาพ เครื่องต้นแบบสามารถทำงานต่อเนื่องได้มากกว่า 3,000 ชั่วโมง โดยไม่ต้องบำรุงรักษาหรือถอดล้างอุปกรณ์ และสามารถรายงานผลแบบเรียลไทม์ได้ภายในเวลาไม่เกิน 1 วินาทีต่อการประมวลผล ซึ่งเหมาะสำหรับการตรวจวัดในระบบเครือข่ายหลายจุดพร้อมกัน ในด้านต้นทุนการผลิต เครื่องต้นแบบมีต้นทุนรวม (วัสดุ อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ และระบบ IoT) เฉลี่ยเพียง 120,000-150,000 บาทต่อชุด ในขณะที่เครื่องวัดฝุ่นละอองมาตรฐานต่างประเทศ (เช่น TEOM หรือ BAM) มีราคาประมาณ 1,200,000-1,500,000 บาทต่อชุด ทำให้ต้นแบบที่พัฒนาขึ้นมีต้นทุนต่ำกว่าเครื่องนำเข้าประมาณ 10 เท่า แต่ยังคงให้ผลการวัดที่มีความแม่นยำและความเสถียรใกล้เคียงกัน ซึ่งเป็นข้อได้เปรียบสำคัญในการผลิตใช้ภายในประเทศ ลดการพึ่งพาการนำเข้า และสามารถขยายการติดตั้งในระดับชุมชนได้อย่างคุ้มค่า อย่างไรก็ตาม การทดสอบภาคสนามในครั้งนี้นี้ยังจำกัดอยู่ในพื้นที่จังหวัดนครพนมและช่วงฤดูแล้ง ซึ่งอาจไม่ครอบคลุมสภาพอากาศที่หลากหลาย จึงควรมีการขยายพื้นที่ทดสอบในภูมิภาคและฤดูกาลที่แตกต่างกัน รวมถึง

การพัฒนาแบบจำลองทางสถิติและโมดูล Auto-Calibration เพื่อเพิ่มความเที่ยงตรง ลดการบำรุงรักษา และยืดอายุการใช้งานของระบบ โดยสรุป สถานีตรวจวัดฝุ่นละออง PM2.5 ที่ใช้หลักการไฟฟ้าสถิตและระบบ IoT ที่พัฒนาขึ้นนี้ มีความแม่นยำสูง ( $R^2 > 0.99$  เมื่อเปรียบเทียบกับเครื่องมาตรฐาน) ทำงานได้อย่างเสถียรต่อเนื่อง มีต้นทุนต่ำกว่าเครื่องนำเข้ากว่า 10 เท่า และเหมาะสมสำหรับการใช้งานในระดับชุมชนหรือหน่วยงานท้องถิ่น ถือเป็นแนวทางสำคัญในการพัฒนาเทคโนโลยีตรวจวัดฝุ่นภายในประเทศที่มีทั้งประสิทธิภาพ ความคุ้มค่าทางเศรษฐกิจ และศักยภาพในการขยายผลสู่เครือข่ายตรวจวัดคุณภาพอากาศที่ยั่งยืน สนับสนุนนโยบายการจัดการมลพิษทางอากาศของประเทศไทยในอนาคต

## 6. กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยและนวัตกรรมจากโครงการวิจัยทุนงานมูลฐาน (Fundamental fund; FF) ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2567 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี พร้อมทั้งได้รับการสนับสนุนพื้นที่ในการติดตั้งสถานีตรวจวัดฝุ่นบริเวณลานพญาศรีสัตตนาคราช (ริมแม่น้ำโขง) จากสำนักงานเทศบาลเมืองนครพนม จังหวัดนครพนม และผู้วิจัยขออุทิศส่วนบุญส่วนกุศลจากผลงานวิจัยนี้ให้กับนางเอ๊ย กันต๊ะ และอ้ายเล็กผู้ล่วงลับ

## 7. References

- [1] Winijkhetkhamnuen, U., Chiwonarin, T., Taneyhill, K. and Chunram, N., 2007, Oxidation-Induced DNA Damage of Alveolar Cells by PM2.5 and PM10 Dust Extracts in Chiang Mai and Lamphun Air, Research Report, Thailand Research Fund, 270 p. (in Thai)

- [2] USEPA, 1998, PM 2.5 General Information, Office of Air Quality Planning and Standards, United States Environmental Protection Agency.
- [3] Pollution Control Department, 2010, Pollution Control Department Announcement on Measuring the Average Value of Dust Particles Not Exceeding 2.5 Microns, Gov. Gaz., 98(127), Special Issue 84. (July 9, 2010) (in Thai)
- [4] Intha, P., Yaowutthi, A., Winijkhetkhamnuen, U. and Thipyawong, N., 2010, Development of an Analyzer and Sampler for Air and Small Floating Dust PM 2.5, Research Report, National Science and Technology Development Agency, Northern Network, 360 p. (in Thai)
- [5] Intha, P., 2010, Development of a Quantitative Concentration Analyzer for Nanoparticles Using Electrostatic Charge Measurement Principle, Research Report, Office of the Higher Education Commission and the Thailand Research Fund, 419 p. (in Thai)
- [6] Intha, P., 2013, Development and Improvement of Electromagnetic Nanoparticle Quantitative Concentration Detector, Research Report, Office of the Higher Education Commission, Thailand Research Fund, and Rajamangala University of Technology Lanna, 267 p. (in Thai)
- [7] Intha, P. and Yaowutthi, A., 2012, Air Dust Measurement and Analysis Device, Research Report, Investment Center, National Science and Technology Development Agency, 310 p. (in Thai)
- [8] Intha, P., Yaowutthi, A. and Thippayawong, N., 2013, Improvement, Calibration, and Field Testing of the Commercialization of an Electromagnetic Atmospheric Particulate Matter Analyzer (Phase 1), Research Report, Cluster and Research Program Management, Research Management Division, National Science and Technology Development Agency, 391 p. (in Thai)
- [9] Intha, P. and Yaowutthi, A., 2013, Field Test of Dust Detec (DustDETEC), Research Report, Technology Rights Management Office, National Science and Technology Development Agency, 370 p. (in Thai)
- [10] Intha, P., Yaowutthi, A., Lacharoen, K., Petchkong, P. and Wongchankaew, N., 2016, Improvement, Calibration, and Field Testing of the Commercialization of Electrically Based Atmospheric Particulate Matter Analyzer (Phase 2), Research Report, National Science and Technology Development Agency, 382 p. (in Thai)
- [11] Intha, P., 2018, Development of an Online Dust Measurement System Prototype for Different Sizes in Deep Mine Pits, Research Report, Electricity Generating Authority of Thailand, 270 p. (in Thai)
- [12] Intha, P., 2020, Study and Development of a System for Measuring Small Dust Parameters (PM10, PM2.5, and PM1.0) That Affect the Efficiency of the Filter and

- the Air Quality of the Phra Nakhon South Power Plant, Research Report, Phra Nakhon South Power Plant, Electricity Generating Authority of Thailand, 391 p. (in Thai)
- [13] Intha, P., 2020, Development, Improvement, Calibration and Testing of Prototype Standards of Airborne Dust Measuring Devices Using Electrostatic Principles to Meet the International Measuring Instrument Standards of US EPA, Research Report, Research Project Type 4, Fiscal Year 2017, Rajamangala University of Technology Lanna, 320 p. (in Thai)
- [14] Wang, Y., Li, J., Jing, H., Zhang, Q., Jiang, J. and Biswas, P., 2015, Laboratory evaluation and calibration of three low-cost particle sensors for particulate matter measurement, *Aerosol Sci. Technol.* 49(11):1063-1077.
- [15] Zheng, T., Bergin, M., Johnson, K., Tripathi, S. N., Shirodkar, S., Landis, M. S., Carlson, D.E. and Russell, A. G., 2018, Field evaluation of low-cost particulate matter sensors in high- and low-concentration environments, *Atmos Meas Tech.* 11(8):4823-4846
- [16] Johnson, K. K., Bergin, M. H., Russell, A. G. and Hagler, G. S. W. 2018, Field test of several low-cost particulate matter sensors in high and low concentration urban environments, *Aerosol Air Qual. Res.* 18(3):565-578.
- [17] Datta, A., Saha, A., Zamora, M. Levy., Buehler, C., Hao, L., Xiong, F., Gentner, D.R. and Koehler, K., 2020, Statistical field calibration of a low-cost PM<sub>2.5</sub> monitoring network in Baltimore, *Atmos. Environ.* 242(12):117761
- [18] Stavroulas, I., Grivas, G., Liakakou, E., Bougiatioti, A., Michalopoulos, P., Kalkavouras, P., Fameli, K.M., Hatzianastassiou, N., Mihalopoulos, N. and Gerasopoulos, E., 2020, Field evaluation of low-cost PM sensors (PurpleAir PA-II) under variable urban air quality conditions in Greece, *Atmosphere.* 11(9): 926.
- [19] Ngo, N.D., Lee, J., Kim, W.K. and Jang, J., 2019, Measurement of PM 2.5 mass concentration using an electrostatic particle concentrator-based quartz crystal microbalance, *IEEE Access.* 7:170640-170647
- [20] Ngo, N. and Jang, J., 2021, Long-Term measurement of PM<sub>2.5</sub> mass concentration using an electrostatic particle concentrator-based quartz crystal microbalance integrated with carbon dioxide aerosol jets for PM sensing in remote areas, *IEEE Access.* 9:90715-90726
- [21] Chang, J., Kelly, A.J. and Crowley, J.M., 1995, *Handbook of Electrostatic Processes*, Marcel Dekker, Inc., New York, 780 p.
- [22] Willeke, K., and Baron, P.A., 1993, *Aerosol Measurement: Principles, Techniques,*

- and Applications, John Wiley and Sons, New York, 896 p.
- [23] Tooltham, A., Khummanee, S., Jareanpon, C. and Nonphayom, M., 2024, Ladybug: an automated cultivation robot for addressing the manpower shortage in the agricultural industry, *ECTI Trans. Comput. Inf. Technol.* 18(2): 119-135.
- [24] EMQ Technologies, 2024, *Mastering MQTT: Your Ultimate Tutorial for MQTT*, 144 p.
- [25] Ronquillo Japón, B., 2022, *Learn IoT Programming Using Node-RED*, BPB Publications, 335 p.
- [26] Influx Data 2025, *Influx DB OSS v2*, Available Source: <https://docs.influxdata.com/influxdb/v2/>, March 20, 2025.
- [27] Chapman, R. and Holmes, P., 2023, *Observability with Grafana*, Packt Publishing, Birmingham, 333 p.
- [28] Thermo Fisher Scientific 2025, *TEOM1405 Model 1405 TEOM Ambient Air Monitor*, Available Source: <https://www.thermofisher.com/order/catalog/product/TEOM1405F>, March 20, 2025.
- [29] Thai Industrial Standards Institute (TISI), 2022, *TIS 3030-2020: Electrostatic Precipitator, Industrial Product Standard*, Thai Industrial Standards Institute. (in Thai)



พิมพ์ที่: สำนักงานบริหารการพิมพ์ธรรมศาสตร์, พ.ศ. 2569  
<http://www.thammasatprintinghouse.com>