

การประเมินสมรรถนะของเซ็นเซอร์วัดฝุ่นละอองราคาประหยัด สำหรับวัดปริมาณ PM2.5 และ PM10

Performance Evaluation of Low-Cost Particulate Matter Sensors for PM2.5 and PM10 Measurement

วิศววิท ราชณรงค์¹

¹สาขาวิชาเทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์, คณะวิทยาศาสตร์, มหาวิทยาลัยรามคำแหง หัวหมาก บางกะปิ

กรุงเทพมหานคร 10240

Vissavavit Rachnarong¹

¹Department of Electronics Technology, Faculty of Science, Ramkhamhaeng University,

Huamark, Bangkok, Bangkok, 10240, Thailand

Corresponding Author. E-mail: vissavavit@gmail.com

Received: Dec 13, 2022; Revised: Apr 04, 2023; Accepted: May 15, 2023

บทคัดย่อ

บทความนี้ได้นำเสนอการประเมินสมรรถนะการตรวจวัดคุณภาพอากาศของเซ็นเซอร์วัดฝุ่นละอองราคาประหยัด (LCPMS) ที่ใช้เทคนิคการกระเจิงของแสง โดยประดิษฐ์อุปกรณ์ควบคุมเซ็นเซอร์และทดสอบวัดฝุ่นละอองขนาดเล็กไม่เกิน 2.5 ไมครอน (PM2.5) และ 10 ไมครอน (PM10) ในสภาพอากาศที่มีมลภาวะทางอากาศที่แย่และดีในห้องทดสอบและในสภาพอากาศจริงเปรียบเทียบกับเครื่องวัดมาตรฐาน (รุ่น BAM1020) ของกรมควบคุมมลพิษ ที่ค่าเฉลี่ย 1 ชั่วโมงต่อเนื่อง และ 24 ชั่วโมงต่อเนื่อง ในช่วงเดือนกุมภาพันธ์ถึงมิถุนายน 2565 ผลลัพธ์ของการตรวจวัดปริมาณ PM2.5 และ PM10 ของ LCPMS พบว่ามีความสัมพันธ์สูงมากกับ BAM1020 ในเชิงบวก และเมื่อช่วงเวลากำหนดการสุ่มตัวอย่างลดลง สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ พหุคูณยกกำลังสอง (R^2) และความคลาดเคลื่อนจากการวัด (E_M) ของ LCPMS ส่วนมากจะลดลงตามมา ในการวัดค่าเฉลี่ย 24 ชั่วโมงต่อเนื่อง ปริมาณ PM2.5 ของ LCPMS_5 มีความสัมพันธ์สูงมากกับ BAM1020 โดยมีค่า $R^2 = 0.7786$ และ $E_M = 20.35$ และ PM10 ของ LCPMS_1 มีความสัมพันธ์สูงมากกับ BAM1020 โดยมีค่า $R^2 = 0.8662$ และ $E_M = 13.53$

คำสำคัญ: เซ็นเซอร์วัดฝุ่นละอองราคาประหยัด, ฝุ่นละอองขนาดเล็ก, การกระเจิงแสง

Abstract

This paper presents the performance evaluation of low-cost particulate matter sensors (LCPMS) using light scattering technique. By creating a device for controlling sensors and measuring particulate matter with diameter of less than 2.5 microns (PM2.5) and 10 microns (PM10) for high- and low-concentration environments in a test chamber and for comparing with the average PM2.5 and PM10 of 1-hour and 24-hour continuous of Pollution Control Department (BAM1020) in February to June 2022. From the PM2.5 and PM10 results, it was found that LCPMS and BAM1020 are very strong correlation in the perfect positive. Correlation coefficient square (R^2) and measurement error (E_M) are decreased by decreasing sampler time of LCPMS detection. The average PM2.5 of 24-hour continuous of LCPMS_5 is

very strong correlation with BAM1020 by $R^2 = 0.7786$ and $E_M = 20.35$. The average PM10 of 24-hour continuous of LCPMS_1 is very strong correlation with BAM1020 by $R^2 = 0.8662$ and $E_M = 13.53$.

Keywords: Low-cost particulate matter sensors, Particulate matter, Light scattering

1. บทนำ

PM2.5 และ PM10 (Particulate matter with diameter of less than 2.5 and 10 microns) เกิดจากอนุภาคของแข็งและสารเคมีที่เป็นของเหลวที่ทำปฏิกิริยาต่อกันในอากาศ เกิดขึ้นเป็นฝุ่นละอองขนาดเล็กไม่เกิน 2.5 ไมครอน ซึ่งฝุ่นละอองที่มีขนาดเล็กนี้มีสารพิษจากสารเคมีที่ปนเปื้อนจำนวนมากที่ก่อให้เกิดอันตรายต่อสุขภาพและฝุ่นละออง PM2.5 สามารถอยู่ในบรรยากาศได้นานและสามารถเดินทางได้ไกลจากแหล่งกำเนิด [1],[2] ทำให้สภาพแวดล้อมในอากาศบริเวณนั้นเกิดผลกระทบต่อสุขภาพ

ปัจจุบันการวัดฝุ่นละอองขนาดเล็กกว่ามีปริมาณที่มากน้อยเพียงใด มีอยู่หลากหลายวิธีการ เช่น การใช้แสงอินฟราเรดวัดความขุ่นในอากาศ (Infrared method) [3],[4] วิธีการดูดอากาศเข้าผ่านแผ่นกรอง (Filter membrane) เพื่อแยกขนาดของฝุ่นละอองนำไปวัดน้ำหนัก (Gravimetric method) [5],[6] วิธีการติดตั้งแผ่นกรองไว้ในมาตรมวลวัดอากาศ (Mass air flow sensor) โดยอาศัยการสั่นของท่อรูปทรงกรวยภายในมาตรวัด (TEOM: Tapered Element Oscil-

ating Microbalance) [7],[8] วิธีการใช้เครื่องมือวัดที่อาศัยหลักการการดูดกลืนของรังสีเบต้า (Beta ray absorption method) [9],[10] ที่ฉายผ่านแผ่นกรอง วิธีการดูดอากาศผ่านหัวคัดฝุ่นละอองขนาดเล็กไม่เกิน 10 ไมครอน ให้มาตกกระทบกับแผ่นกรองเพื่อเก็บตัวอย่าง (Dichotomous air sampler)[11],[12]และวิธีการวัดโดยใช้เลเซอร์เป็นแหล่งกำเนิดแสง เพื่อวัดมุมที่เกิดจากการกระเจิงของแสง (Laser scattering measurement method)[13],[14] วัดความเข้มและความถี่ที่เลื่อนไป

ในบทความนี้ได้นำเสนอเซ็นเซอร์วัดฝุ่นละอองราคาประหยัด (LCPMS) ที่ใช้หลักการกระเจิงของแสงที่มีเลเซอร์เป็นแหล่งกำเนิด ซึ่งเซ็นเซอร์ประเภทนี้มีอยู่หลากหลายบริษัทที่ผลิตเซ็นเซอร์ประเภทนี้ออกมาเป็นที่นิยม สามารถหาซื้อได้ไม่ยากในท้องตลาด และราคาของเซ็นเซอร์สามารถจับต้องได้ (ราคาของเซ็นเซอร์ประเภทนี้มีราคาอยู่ที่ประมาณ 500–1,000 บาท)และในบทความนี้ได้นำเสนอเซ็นเซอร์มาทดสอบสมรรถนะจำนวน 5 รุ่น ซึ่งรายละเอียดข้อมูลจำเพาะของเซ็นเซอร์ ถูกแสดงดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ข้อมูลจำเพาะของเซ็นเซอร์วัดฝุ่นละอองราคาประหยัดที่ถูกนำมาทดสอบ [15]

| เซ็นเซอร์ (นามสมมุติ) | LCPMS_1 | LCPMS_2 | LCPMS_3 | LCPMS_4 | LCPMS_5 |
|-------------------------|----------------|----------------|----------------|--------------|--------------------|
| ขนาด L×W×H (mm.) | 50 × 43 × 21 | 43 × 36 × 23.7 | 50 × 32.4 × 21 | 71 × 70 × 23 | 41 × 41 × 12 |
| น้ำหนักโดยประมาณ (g.) | 35 | 34 | 34 | 49 | 27 |
| แรงดัน (V) | 4.5–5.5 | 4.8–5.2 | 4.9–5.1 | 5 | 4.5–5.5 |
| กระแส (mA) | <100 | <80 | <120 | <80 | <80 |
| ขนาดการตรวจจับ (PMx) | PM1 PM2.5 PM10 | PM2.5 PM10 | PM1 PM2.5 PM10 | PM2.5 PM10 | PM1 PM2.5 PM4 PM10 |
| ความเร็วการตอบสนอง (s) | ≤10 | <6 | ≤45 | ≤10 | <8 |
| ความผิดพลาด (%) | ±10 | ±15 | – | ±15 | ±10 |
| อุณหภูมิดำเนินการ (C°) | -10–+60 | -10–+50 | -10–+50 | -10–+50 | -10–+60 |
| ความชื้นดำเนินการ (%RH) | 0–99 | 0–95 | 0–85 | 0–70 | 0–95 |
| ทำงานต่อเนื่อง (ชม.) | 720 | 20000 | – | 8000 | – |
| อายุการใช้งาน (ปี) | ≥3 | 7 | 3 | – | >8 |
| การเชื่อมต่อ | UART | UART | UART/PWM | UART/PWM | UART/I2C |

โดยวัตถุประสงค์ของการวิจัยคือ ทดสอบสมรรถนะการวัด PM2.5 และ PM10 ของเซ็นเซอร์จำนวน 5 รุ่น (ในบทความที่นำมาศึกษาต่อยอด [16–18] มีจำนวนของรุ่นที่น้อยกว่าและบางเซ็นเซอร์ไม่ได้ระบุรายละเอียดของการุ่มตัวอย่างของผลลัพธ์ที่ได้มาชัดเจนและเป็นบทความจากต่างประเทศ ซึ่งสภาพอากาศ อุณหภูมิ ความชื้น ที่ต่างจากประเทศไทย) ในสภาวะทางอากาศที่แย่และดี ในห้องทดสอบและในสภาพอากาศจริง ของ LCPMS เปรียบเทียบกับเครื่องวัดมาตรฐาน รุ่น BAM1020 ของกรมควบคุมมลพิษ โดยการออกแบบและประดิษฐ์อุปกรณ์ให้สามารถควบคุมและทำงานร่วมกับ LCPMS ได้ เพื่อบันทึกผลของปริมาณฝุ่นละอองที่วัดได้และนำข้อมูลมาประเมินสมรรถนะของเซ็นเซอร์แต่ละรุ่น ซึ่งข้อมูลที่ได้จากงานวิจัยนี้ผู้เขียนหวังอย่างยิ่งว่าจะเป็นประโยชน์ในการพิจารณาหรือเลือกเซ็นเซอร์วัดฝุ่นละอองราคาประหยัดที่เหมาะสมกับการใช้งานต่อไป

2. แนวคิดและทฤษฎี

2.1. หลักการทำงานพื้นฐานของ LCPMS

LCPMS ในบทความนี้ใช้วิธีการวัดปริมาณฝุ่นละอองขนาดเล็ก จากหลักการกระเจิงของแสงที่มีเลเซอร์เป็นแหล่งกำเนิด แสงดังรูปที่ 1 ที่ส่งแสงเข้ามาในช่องวัดปริมาณแสง โดยมีพัดลมดูดอากาศจากภายนอกเข้าไปในช่อง ๆ นี้ประกอบด้วย ชุดรับแสง (Light Collector) ที่ทำหน้าที่รวมแสงที่กระทบกับฝุ่นละอองแล้วเกิดการกระเจิงหรือกระเจิงของแสง ส่งไปยังตัวตรวจจับความเข้มแสง (Photo Detector) เพื่อเปลี่ยนพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้า ส่งไปยังวงจรกรอง ขยายสัญญาณ และหน่วยประมวลผล ตามลำดับ สัญญาณดิจิทัลที่ได้ออกมานั้น อยู่ในรูปแบบสัญญาณ UART [19] และ PWM [20] แสดงดังรูปที่ 2(ก)–(ข) ตามลำดับ จำนวนไบต์ข้อมูลของ UART และความกว้างของ PWM ในช่วงเวลา 1 คาบนั้น จะถูกนำไปคำนวณปริมาณฝุ่นละออง ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) เบื้องต้น ดังสมการที่ (1) [19] และ (2) [20] ตามลำดับ

$$PM = ((PM \text{ High byte} \times 256) + PM \text{ Low byte})/10 \quad (1)$$

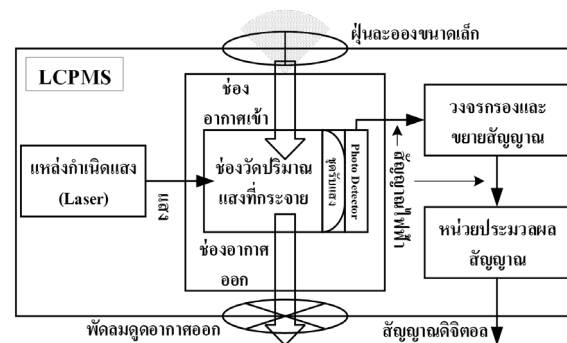
$$PM = 1,000(TH)/(TH + TL) \quad (2)$$

เมื่อ

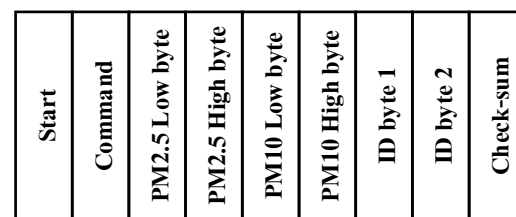
PM คือ ปริมาณ PM2.5 หรือ PM10 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

TH คือ ช่วงเวลาขาขึ้น (ms) ใน 1 คาบเวลา

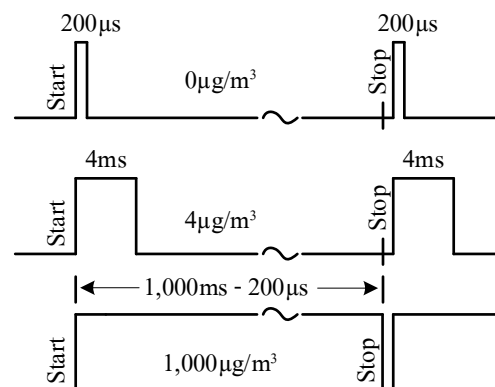
TL คือ ช่วงเวลาขาลง (ms) ใน 1 คาบเวลา



รูปที่ 1 บล็อกไดอะแกรมการทำงานของ LCPMS



(ก)



(ข)

รูปที่ 2 (ก) ข้อมูล UART และ (ข) สัญญาณ PWM

2.2. การประเมินสมรรถนะของเซ็นเซอร์

ในการประเมินสมรรถนะของเซ็นเซอร์วัดฝุ่นละอองราคาประหยัคนั้น จะใช้สมการทางสถิติมาช่วยบ่งชี้ถึงความสัมพันธ์ระหว่างเซ็นเซอร์วัดฝุ่นละอองราคาประหยั

แต่ละรุ่นที่นำมาทดสอบและเครื่องวัดมาตรฐานของกรมควบคุมมลพิษ ด้วยการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้น (Linear Regression Analysis) [21] ที่ใช้หาความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่างตัวแปรอิสระ (x) และตัวแปรตาม (y) หาค่าได้ดังสมการที่ (3)–(5)

$$y = \beta_0 + \beta_1 x + \varepsilon \quad (3)$$

$$\beta_0 = \bar{y} - \beta_1 \bar{x} \quad (4)$$

$$\beta_1 = \frac{n \sum x_i y_i - \sum x_i \sum y_i}{n \sum (x_i)^2 - (\sum x_i)^2} \quad (5)$$

เมื่อ

x คือ ปริมาณฝุ่นจากเซ็นเซอร์ราคาประหยัดที่พิจารณา

y คือ ปริมาณฝุ่นละอองจากเครื่องวัดมาตรฐาน

β_0 คือ จุดตัดแกน y

β_1 คือ อัตราการเปลี่ยนแปลงของ y เมื่อ x เปลี่ยนไป 1 หน่วย เรียกว่า สัมประสิทธิ์การถดถอย

ε คือ ค่าคลาดเคลื่อน (Error)

\bar{x}, \bar{y} คือ ค่าเฉลี่ยของตัวแปร x และ y

x_i, y_i คือ ค่าตัวแปร x และ y ลำดับตัวอย่างที่ i

n คือ จำนวนตัวอย่างที่พิจารณา

ตารางที่ 2 การแปลความหมายของค่า R [22]

| ช่วงของ R | ระดับความสัมพันธ์ |
|---------------------|--------------------------|
| $0 \leq R < 0.2$ | มีความสัมพันธ์กันน้อยมาก |
| $0.2 \leq R < 0.4$ | มีความสัมพันธ์กันน้อย |
| $0.4 \leq R < 0.6$ | มีความสัมพันธ์กันปานกลาง |
| $0.6 \leq R < 0.8$ | มีความสัมพันธ์กันสูง |
| $0.8 \leq R \leq 1$ | มีความสัมพันธ์กันสูงมาก |

สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Correlation Coefficient: R) [21], [22] แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่าง 2 ตัวแปร (x, y) ที่พิจารณา ที่เป็นตัวแปรแบบต่อเนื่อง หาได้ดังสมการที่ (6)–(9)

$$R = \frac{S_{xy}}{S_x S_y} \quad (6)$$

$$S_{xy} = \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y}) \quad (7)$$

$$S_x = \sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (8)$$

$$S_y = \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (9)$$

เมื่อ

S_{xy} คือ ความแปรปรวนร่วมของตัวแปร x และ y

S_x, S_y คือ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของตัวแปร x และ y

ความคลาดเคลื่อน [23] จากการวัดปริมาณฝุ่นละอองที่ค่าเฉลี่ย 1 ชั่วโมงต่อเนื่อง และ 24 ชั่วโมงต่อเนื่อง ของเซ็นเซอร์ราคาประหยัดเมื่อเปรียบเทียบกับเครื่องวัดมาตรฐานสามารถหาค่าได้ดังสมการที่ (10)

$$\% E_M = \left| \frac{\hat{b}_1 - b_1}{b_1} \right| \times 100 \quad (10)$$

เมื่อ

E_M คือ ความคลาดเคลื่อนจากการวัด (Measurement error)

b_1 คือ ปริมาณฝุ่นละอองจาก BAM1020

\hat{b}_1 คือ ปริมาณฝุ่นละอองจาก LCPMS ที่พิจารณา

ตารางที่ 3 ดัชนีคุณภาพอากาศของ PM2.5 และ PM10

| คุณภาพอากาศ | PM2.5 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) | PM10 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) |
|-----------------------|---------------------------------------|--------------------------------------|
| ดีมาก (Excellent) | 0–25 | 0–50 |
| ดี (Good) | 26–37 | 51–80 |
| ปานกลาง (Moderate) | 38–50 | 81–120 |
| เริ่มมีผลกระทบ (Poor) | 51–90 | 121–180 |
| มีผลกระทบ (Unhealthy) | ≥ 91 | ≥ 181 |

2.3. ดัชนีคุณภาพอากาศ

ระดับของดัชนีคุณภาพอากาศถูกแบ่งออกเป็น 5 ระดับตามผลกระทบต่อสุขภาพอนามัย จากสภาวะอากาศที่ดีมากไปจนถึงสภาวะที่มีผลกระทบ จะถูกแบ่งออกเป็นค่าสีตามระดับคุณภาพอากาศแสดงดังตารางที่ 3 โดยปริมาณ PM2.5 และ PM10 ถูกคิดเป็นค่าเฉลี่ย 24 ชั่วโมงต่อเนื่อง [24]

3. ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

3.1. หลักการทำงานของเครื่องวัดฝุ่นละอองราคาประหยัด

รายละเอียดของอุปกรณ์ที่ใช้ในเครื่องวัดคุณภาพอากาศของเซ็นเซอร์วัดฝุ่นละอองราคาประหยัดมีดังนี้

1. Arduino Mega 2560 ทำหน้าที่ควบคุมการทำงานรับ-ส่งข้อมูลจากเซ็นเซอร์ วัดฝุ่นละออง อุณหภูมิ ความชื้น โมดูลนับวันเวลาและ Micro SD Adapter และแสดงสถานะผ่าน LED สาเหตุที่ใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์รุ่นนี้ เพราะมีพอร์ตการสื่อสารแบบอนุกรม (Serial Port) มากพอที่จะต่อพ่วงกับเซ็นเซอร์วัดฝุ่นละออง

2. เซ็นเซอร์วัดฝุ่นละอองที่ใช้หลักการตรวจวัดโดยการกระเจิงของแสง ที่มีเลเซอร์เป็นแหล่งกำเนิด เป็นที่นิยมสามารถหาซื้อได้ในท้องตลาด และราคาสามารถจับต้องได้ (LCPMS) โดยหน่วยการวัดของปริมาณ PM2.5 และ PM10 ออกมาเป็น $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (ในบทความนี้หาค่าเฉลี่ยที่ 1 ชั่วโมง ต่อเนื่อง และ 24 ชั่วโมงต่อเนื่อง)

3. AM2302 หรือ DHT22 [25] เป็นโมดูลเซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิและความชื้น มีหน่วยเป็น $^{\circ}\text{C}$ และ RH ตามลำดับ

4. RTC (DS3231) โมดูลนาฬิกา นับวัน-เวลา ปัจจุบัน

5. Micro SD Card Adapter เป็นโมดูลการรีดเดอร์ทำหน้าที่บันทึกข้อมูล วันเวลา อุณหภูมิ ความชื้น และ ปริมาณ PM2.5 และ PM10 ของเซ็นเซอร์วัดฝุ่นละอองที่นำมาต่อพ่วง ลงใน Micro SD Card

6. Logic Level Converter (LLC) เป็นโมดูลทำหน้าที่ปรับระดับแรงดัน 3.3V เป็น 5V และในทางกลับกัน เพื่อรับส่งข้อมูลระหว่างไมโครคอนโทรลเลอร์และเซ็นเซอร์วัดฝุ่นละออง ผ่านการสื่อสารแบบอนุกรม (Tx, Rx)

7. XL6009 เป็นโมดูลทำหน้าที่เปลี่ยนแปลงระดับแรงดัน ขึ้นหรือลง จาก 5–32V เป็น 1.2–35V

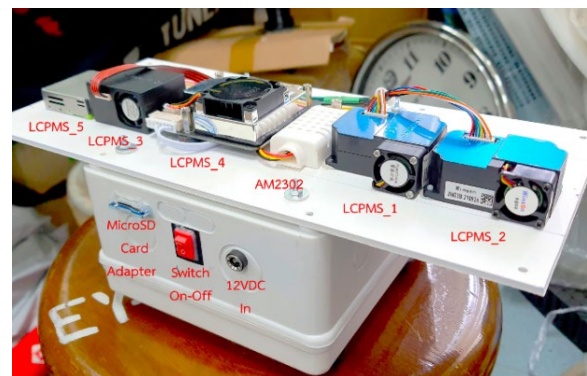
8. YX-X804 เป็นโมดูลทำหน้าที่ตรวจจับแรงดันจากอะแดปเตอร์ สลับเป็น แบตเตอรี่ เพื่อสำรองไฟให้วงจรสามารถทำงานได้ต่อเนื่อง ในกรณีที่ไฟดับ

9. LED จำนวน 6 ดวง ทำหน้าที่แสดงสถานะการทำงานของเครื่องวัด และเซ็นเซอร์วัดฝุ่นละอองราคาประหยัด

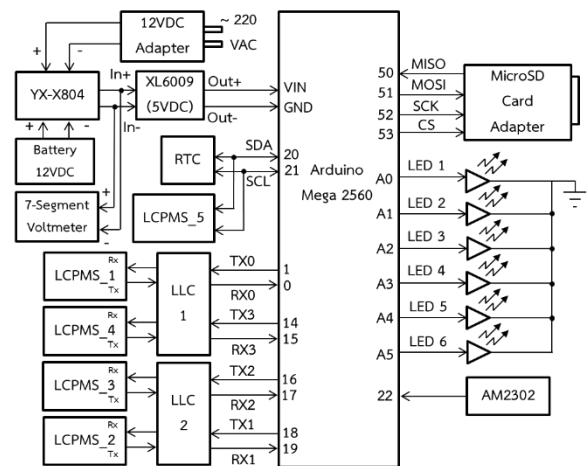
10. 7-Segment Voltmeter ทำหน้าที่แสดงระดับแรงดันของอะแดปเตอร์หรือแบตเตอรี่ ที่เข้ามาในระบบ

การทำงานของเครื่องวัดฝุ่นละอองราคาประหยัดจะมีไมโครคอนโทรลเลอร์ (Arduino Mega 2560) เป็นตัวควบคุมการทำงานของอุปกรณ์ทั้งหมดในวงจร โดยรับข้อมูลจากอุปกรณ์ต่อพ่วง LCPMS_1 ถึง LCPMS_5 AM2302 และ

RTC เพื่อเก็บข้อมูล PM2.5 PM10 ความชื้นและอุณหภูมิ และ วัน-เวลา ตามลำดับ อุปกรณ์ต่อพ่วงต่าง ๆ เหล่านี้สามารถหาซื้อได้ตามท้องตลาดและเว็บไซต์ขายของออนไลน์ ราคาประหยัด สามารถทำงานร่วมกับไมโครคอนโทรลเลอร์ได้ดี สามารถปรับแต่งการรับค่าต่าง ๆ ได้ โดยผู้เขียนโปรแกรม และเหมาะกับการศึกษาเพื่อพัฒนาต่อยอด โดยรูปเครื่องวัดจริง บล็อกไดอะแกรมการทำงาน และ ลายวงจร ของเครื่องวัดฝุ่นละอองราคาประหยัด แสดงดังรูปที่ 3-5 ตามลำดับ



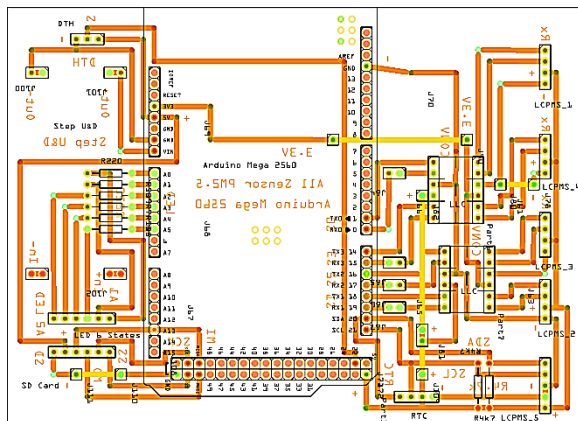
รูปที่ 3 เครื่องวัดฝุ่นละอองราคาประหยัด



รูปที่ 4 บล็อกไดอะแกรมการทำงานของเครื่องวัดฝุ่นละอองราคาประหยัด

เซ็นเซอร์วัดฝุ่นละอองราคาประหยัด LCPMS_1 เชื่อมต่อกับไมโครคอนโทรลเลอร์ ผ่านพอร์ตการสื่อสารแบบอนุกรมขา Pin 0 (Rx0) และ Pin 1 (Tx0) LCPMS_4 เชื่อมต่อผ่านขา Pin 15 (Rx3) และ Pin 14 (Tx3) LCPMS_3 เชื่อมต่อผ่านขา Pin 17 (Rx2) และ Pin 16 (Tx2) และ LCPMS_2

เชื่อมต่อผ่านขา Pin 19 (Rx1) และ Pin 18 (Tx1) โดยมี LLC จำนวน 2 ตัว เป็นตัวปรับระดับแรงดัน ให้สามารถสื่อสารกับไมโครคอนโทรลเลอร์ได้ เซ็นเซอร์รุ่น LCPMS_5 และโมดูล RTC เชื่อมต่อกับไมโครคอนโทรลเลอร์ผ่านการเชื่อมต่อแบบ I²C ผ่านขา Pin 20 (SDA) และ Pin 21 (SCL) เซ็นเซอร์ AM2302 เชื่อมต่อกับไมโครคอนโทรลเลอร์ผ่านขา Pin 22 โดยไมโครคอนโทรลเลอร์จะนำข้อมูลที่ได้จากอุปกรณ์ต่อพ่วงทั้งหมดไปเก็บไว้ใน Micro SD Card ที่ถูกเชื่อมต่อผ่าน Micro SD Card Adapter ผ่านการเชื่อมต่อแบบ SPI ที่ขา Pin 50 (MISO) Pin 51 (MOSI) Pin 52 (SCK) และ Pin 53 (CS)



รูปที่ 5 ลายวงจรของเครื่องวัดฝุ่นละออง ขนาด 1:16

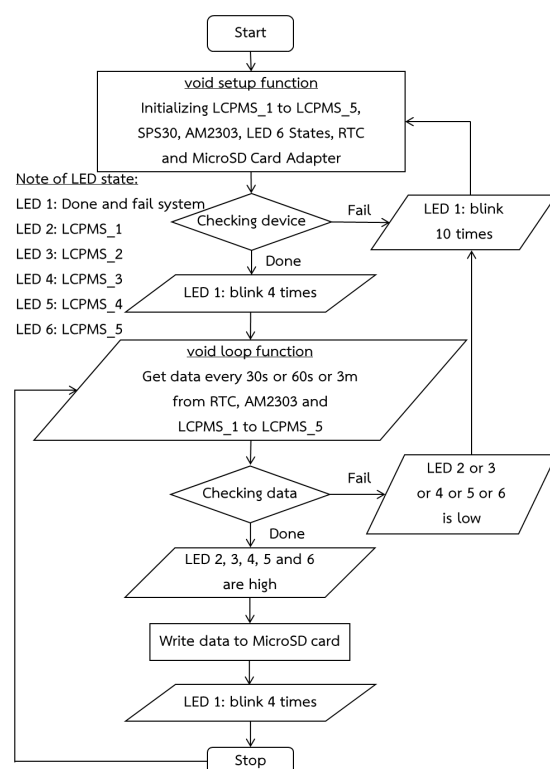
ไฟ LED จำนวน 6 ดวง LED 1 ถูกเชื่อมต่อที่ขา Pin A0 (สีเขียว) LED 2 ขา Pin A1 (สีแดง) LED 3 ขา Pin A2 (สีส้ม) LED 4 ขา Pin A3 (สีเขียว) LED 5 ขา Pin A4 (เหลือง) และ LED 6 ขา Pin A5 (สีน้ำเงิน) โดย LED 1 แสดงสถานะของการติดตั้งหรือการทำงานของอุปกรณ์ต่อพ่วงทำสำเร็จหรือผิดพลาด และ LED 2-LED 6 แสดงสถานะของ LCPMS_1-LCPMS_5 ตามลำดับ

แรงดันของวงจรถูกป้อนเข้าที่ขา VIN และ GND โดยใช้โมดูล XL6009 ปรับลดระดับแรงดันให้อยู่ที่ 5VDC จากแหล่งจ่ายไฟ โดยแหล่งจ่ายไฟมี 2 รูปแบบ คือ ไฟหลัก 12VDC จาก Adapter (AC/DC) และไฟสำรอง 12VDC จากแบตเตอรี่ โดยโมดูล YX-X804 ทำหน้าที่เป็นตัวสวิตช์ระหว่างไฟหลักและไฟสำรอง เพื่อเก็บข้อมูลได้อย่างต่อเนื่อง และแจ้งเตือนเมื่อไฟต่ำผ่าน 7-Segment วัดแรงดัน

ตัวเครื่องวัดฝุ่นละอองราคาประหยัดถูกออกแบบวงจรให้มีเสถียรภาพการทำงานที่ดี เช่น การเชื่อมต่อ หรือยึดติดอุปกรณ์ที่หนาแน่น ทำให้ทนต่อการสั่นสะเทือนหรือเคลื่อนย้าย สามารถปรับแต่งโปรแกรมเพิ่มเติม อุปกรณ์เพิ่มเติม บำรุงรักษาได้ง่าย บันทึกข้อมูลได้อย่างต่อเนื่อง และเหมาะต่อการพัฒนาต่อยอด เป็นต้น

ผังงานการทำงานของไมโครคอนโทรลเลอร์เพื่อควบคุมการทำงานของอุปกรณ์ต่อพ่วง แสดงดังรูปที่ 6 โดยผังงานถูกแบ่งออกเป็น 2 ส่วนหลัก ๆ คือ

ส่วนที่ 1 ฟังก์ชัน void setup การทำงานเริ่มต้นที่ไมโครคอนโทรลเลอร์จะทำการติดตั้งอุปกรณ์ต่อพ่วง AM2303, LCPMS_1 ถึง LCPMS_5, LED 6 States, RTC และ Micro SD Card Adapter ตามขาที่ถูกเชื่อมต่อ แสดงดังรูปที่ 4 และตรวจสอบสถานะการเชื่อมต่อของอุปกรณ์ต่อพ่วงต่างๆ ว่าถูกเชื่อมต่อกับไมโครคอนโทรลเลอร์สมบูรณ์หรือไม่ ถ้าไม่สมบูรณ์โปรแกรมจะแสดงสถานะทาง LED 1 กระพริบ 10 ครั้งและกลับไปตรวจสอบสถานะการเชื่อมต่อใหม่อีกครั้ง ถ้าเชื่อมต่อสมบูรณ์ LED 1 จะกระพริบ 4 ครั้ง



รูปที่ 6 ผังงานการทำงานของไมโครคอนโทรลเลอร์

ส่วนที่ 2 ฟังก์ชัน void loop ไมโครคอนโทรลเลอร์จะรับข้อมูลจากอุปกรณ์ต่อพ่วง LCPMS_1 ถึง LCPMS_5, AM2303 และ RTC ถ้าข้อมูลที่รับมาหรืออุปกรณ์ต่อพ่วงผิดพลาด โปรแกรมจะแสดงสถานะทาง LED2 (LCPMS_1) LED3 (LCPMS_2) LED4 (LCPMS_3) LED5 (LCPMS_4) หรือ LED 6 (LCPMS_5) เป็น LOW ตามอุปกรณ์ต่อพ่วงที่เกิดการผิดพลาด และกลับไปตรวจสอบสถานะการเชื่อมต่อใหม่อีกครั้ง ถ้ารับข้อมูลถูกต้อง LED 2 ถึง 6 จะแสดงสถานะเป็น HIGH ทั้งหมด จากนั้นไมโครคอนโทรลเลอร์จะบันทึกค่าข้อมูลที่ได้จากอุปกรณ์ต่อพ่วงลงใน MicroSD Card และแสดงสถานะทาง LED 1 กระพริบ 4 ครั้ง ในการบันทึกค่าข้อมูลจากอุปกรณ์ต่อพ่วง AM2303 LCPMS_1 ถึง LCPMS_5 และ RTC จะถูกบันทึกทุกๆ 30 วินาที หรือ 60 วินาที หรือ 180 วินาที (ช่วงเวลาการสุ่มตัวอย่าง) ตลอดระยะเวลาของการเก็บข้อมูล

3.2.วิธีการดำเนินงาน

ในการทดสอบสมรรถนะของการตรวจวัดคุณภาพอากาศของเซ็นเซอร์วัดฝุ่นละอองราคาประหยัด จะทำการวัดค่าปริมาณ PM2.5 และ PM10 ในสภาพอากาศที่มีมลภาวะทางอากาศที่แย่มากๆ ใน 2 รูปแบบ ดังนี้

1. ในสภาพอากาศจริงเปรียบเทียบกับเครื่องวัดมาตรฐานของกรมควบคุมมลพิษ (สถานีใกล้เคียง) ในช่วงเดือนกุมภาพันธ์ ถึง มิถุนายน 2565 โดยมีขั้นตอนทดสอบดังนี้

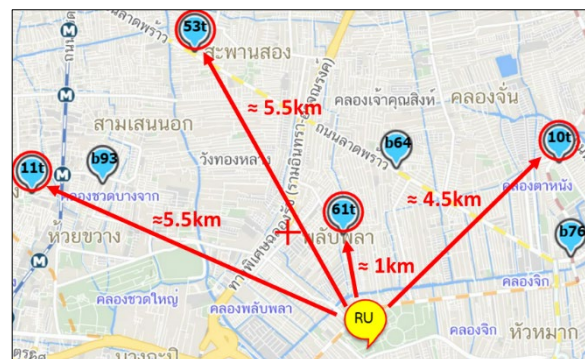
-นำเครื่องวัดฝุ่นละอองราคาประหยัดติดตั้งไว้ที่ อาคารสิริมาศ มหาวิทยาลัยรามคำแหง (RU) ที่ความสูง 5 ม.

-เก็บข้อมูลปริมาณฝุ่นละอองจากเซ็นเซอร์วัดฝุ่นละอองราคาประหยัด ด้วยการสุ่มตัวอย่างทุกๆ 30 หรือ 60 หรือ 180 วินาที เป็นระยะเวลา 31 วัน ของแต่ละช่วงเวลา (ทุกๆ การสุ่มตัวอย่าง เซ็นเซอร์วัดฝุ่นละอองราคาประหยัดจะถูกถอดออกมาทำความสะอาดทุกครั้ง) และนำมาหาค่าเฉลี่ยจากการวัดค่า 1 ชั่วโมงต่อเนื่อง และ 24 ชั่วโมงต่อเนื่อง ของแต่ละการสุ่มตัวอย่าง

-เก็บข้อมูลปริมาณฝุ่นละอองจาก สถานี 10T (เคหะคลองจั่น) 11T (เคหะชุมชนห้วยขวาง) 53T (สถานีตำรวจนครบาลโชคชัย ริมถนนลาดพร้าว) และ 61T (โรงเรียนบดินทรเดชา สิงห์เสนี) ของกรมควบคุมมลพิษ ที่ระยะห่าง

จาก LCPMS 1 กม., 4.5 กม., 5.5 กม. และ 5.5 กม. ตามลำดับตำแหน่งของแต่ละสถานีถูกแสดงดังรูปที่ 7 ข้อมูลจาก [24] เว็บไซต์ <http://air4thai.pcd.go.th> ปริมาณฝุ่นละอองจะถูกแสดงเป็นค่า 1 ชั่วโมงต่อเนื่อง

-หาค่าเฉลี่ยของปริมาณฝุ่นละอองจากกรมควบคุมมลพิษทั้ง 4 สถานี เพื่อนำมาเปรียบเทียบกับและประเมินสมรรถนะของเซ็นเซอร์วัดฝุ่นละอองราคาประหยัดแต่ละรุ่นกับเครื่องวัดมาตรฐาน ในช่วงเวลาเดียวกัน



รูปที่ 7 ตำแหน่งของเครื่องวัดฝุ่นละอองราคาประหยัด และสถานีวัดฝุ่นละอองของกรมควบคุมมลพิษ [24]

2. ในห้องทดสอบขนาด 126 ลูกบาศก์เมตร แสดงดังรูปที่ 8 โดยมีขั้นตอนทดสอบดังนี้

-นำเครื่องวัดฝุ่นละอองราคาประหยัดวางไว้บริเวณกลางห้อง ที่ความสูง 1.5 ม.

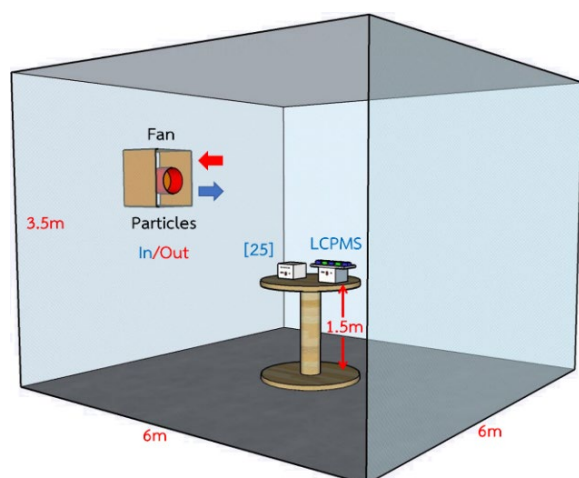
-จัดเตรียมวัตถุที่ก่อให้เกิดฝุ่นละอองขนาดเล็ก เช่น กระดาษ ใบไม้ ผ้า ยาง หรือ ฝุ่น เป็นต้น และนำมาเผาไหม้ให้เกิดควัน โดยในบทความนี้ใช้ ฝุ่น จำนวน 100 ดอก

-เปิดพัดลมดูดอากาศเข้า เพื่อดูดฝุ่นละอองผ่านช่องลมเข้าไปในห้องทดสอบจนปริมาณ PM2.5 และ PM10 อยู่ในระดับที่แย่มาก โดยสังเกตจากวิสัยทัศน์ภายในห้อง และเครื่องวัดระดับ PM [26] (แสดงระดับฝุ่นละอองผ่าน LED) และปิดพัดลมดูดอากาศไว้

-ระบายอากาศออกผ่านช่องลม จากพัดลมดูดอากาศออก จนสภาพอากาศภายในห้องทดสอบอยู่ในสภาพที่ดี

-เก็บผลปริมาณ PM2.5 และ PM10 จากการทดสอบด้วยเวลาการสุ่มตัวอย่างทุกๆ 30 วินาที ในช่วงระดับฝุ่นละอองที่ดีไปจนถึงระดับที่แย่มากๆ และในทางตรงกันข้าม

-เปรียบเทียบและประเมินสมรรถนะของเซ็นเซอร์วัดฝุ่นละอองราคาประหยัดแต่ละรุ่น



รูปที่ 8 แบบจำลองห้องทดสอบและห้องทดสอบจริงสำหรับการประเมินสมรรถนะของ LCPMS

4. ผลการทดลอง

การประเมินสมรรถนะของ LCPMS สำหรับการวัดปริมาณ PM2.5 และ PM10 ในสภาพอากาศที่มีมลภาวะทางอากาศที่แย่มากและดีในสภาพอากาศจริงเปรียบเทียบกับเครื่องวัดมาตรฐานของกรมควบคุมมลพิษ (BAM1020) ในช่วงเดือน กุมภาพันธ์ ถึง มิถุนายน 2565 และในห้องทดสอบ ได้ผลลัพธ์ดังต่อไปนี้

4.1. ฝุ่นละอองขนาดเล็กไม่เกิน 2.5 ไมครอน (PM2.5)

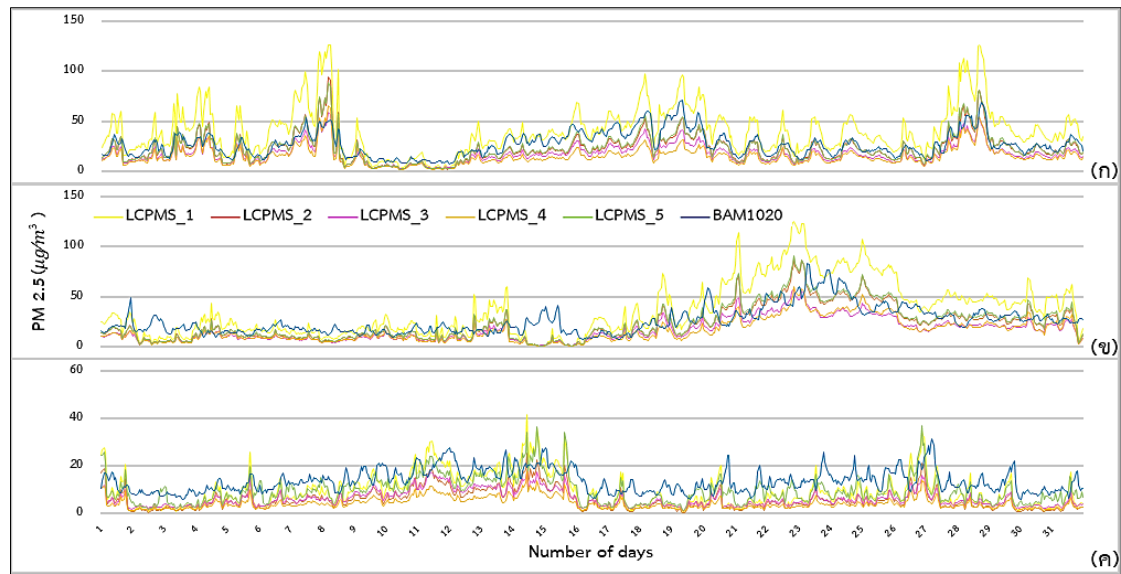
ผลลัพธ์ของการวัดปริมาณฝุ่นละออง PM2.5 ระยะเวลา 31 วัน (จากวันที่ 10 กุมภาพันธ์ ถึง 12 มีนาคม 2565) ที่ค่าเฉลี่ย 1 ชั่วโมงต่อเนื่อง ในช่วงเวลาการสุ่มตัวอย่าง 30 วินาที (จำนวน 89,280 ตัวอย่าง) ที่อุณหภูมิและความชื้นเฉลี่ย 33.53 °C และ 51.69%RH ตามลำดับ ถูกแสดงดังรูปที่ 9(ก) และความสัมพันธ์ระหว่าง LCPMS และ BAM1020

แสดงดังรูปที่ 10 พบว่า LCPMS_1 LCPMS_2 LCPMS_3 และ LCPMS_5 มีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R) มากกว่า 0.80 ซึ่งมีความสัมพันธ์กันในระดับสูงมากกับเครื่องวัดมาตรฐาน และ LCPMS_4 มีค่า R เท่ากับ 0.77 ที่มีความสัมพันธ์กันในระดับสูง (จากจำนวน 744 ตัวอย่าง) และความคลาดเคลื่อนจากการวัด (E_M) ของ LCPMS_5 เท่ากับ 26.16 ที่มีค่าน้อยสุด และ LCPMS_2 เท่ากับ 26.38 ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกัน แสดงดังตารางที่ 4

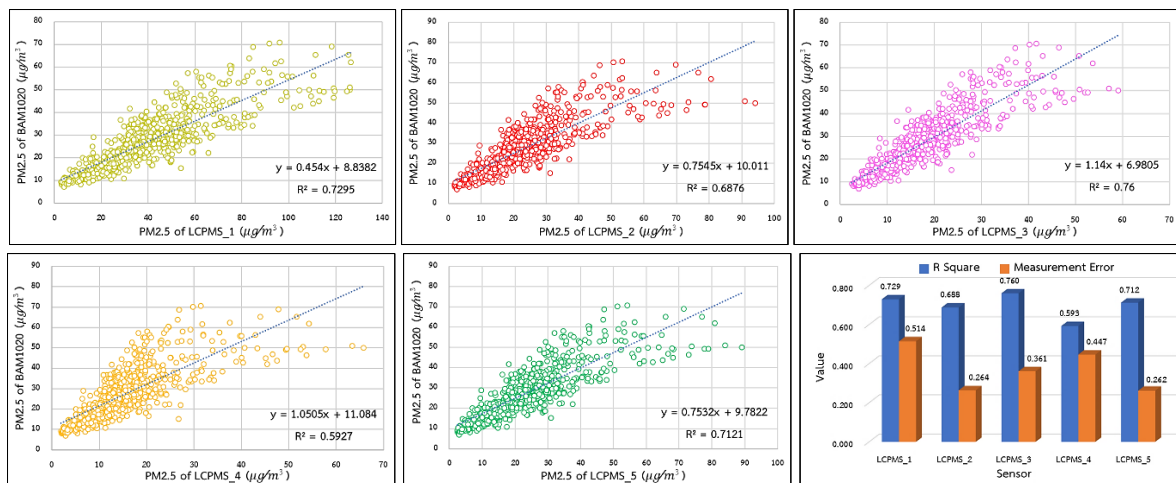
ปริมาณฝุ่นละออง PM2.5 ระยะเวลา 31 วัน ที่ค่าเฉลี่ย 24 ชั่วโมงต่อเนื่อง ในช่วงเวลาการสุ่มตัวอย่าง 30 วินาที ที่อุณหภูมิและความชื้นเฉลี่ย 33.03 °C และ 50.30%RH ตามลำดับ ถูกแสดงดังรูปที่ 11(ก) และความสัมพันธ์ระหว่าง LCPMS และ BAM1020 แสดงดังรูปที่ 12 เซ็นเซอร์ LCPMS_1 LCPMS_2 LCPMS_3 และ LCPMS_5 มีค่า R มากกว่า 0.8 ซึ่งมีความสัมพันธ์กันในระดับสูงมากกับเครื่องวัดมาตรฐาน และ LCPMS_4 มีค่า R เท่ากับ 0.79 ที่มีความสัมพันธ์กันในระดับสูง (จากจำนวน 31 ตัวอย่าง) และ E_M ของเซ็นเซอร์ LCPMS_5 เท่ากับ 20.35% ที่มีค่าน้อยสุด และ LCPMS_2 เท่ากับ 20.86% ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกัน แสดงดังตารางที่ 4

สำหรับปริมาณ PM2.5 ระยะเวลา 31 วัน ในช่วงเวลาการสุ่มตัวอย่าง 60 วินาที (วันที่ 18 มีนาคม ถึง 17 เมษายน 2565) และ 180 วินาที (วันที่ 18 พฤษภาคม ถึง 17 มิถุนายน 2565) ที่ค่าเฉลี่ย 1 ชั่วโมงต่อเนื่อง แสดงดังรูปที่ 9(ข) และ 9 (ค) ตามลำดับ และที่ค่าเฉลี่ย 24 ชั่วโมงต่อเนื่อง แสดงดังรูปที่ 11(ข) และ 11(ค) ตามลำดับ ในช่วงเวลาการสุ่มตัวอย่าง 60 และ 180 วินาที ที่ค่าเฉลี่ย 1 ชั่วโมงต่อเนื่อง LCPMS ส่วนมาก จะมีค่า R ที่น้อยกว่า และ E_M มากกว่า ช่วงเวลาการสุ่มตัวอย่างที่ 30 วินาที แสดงดังตารางที่ 4 ดังนั้นจากผลลัพธ์ของปริมาณ PM2.5 ที่วัดได้จาก LCPMS สามารถบ่งบอกได้ว่า เมื่อช่วงระยะเวลาการสุ่มตัวอย่างลดลง R จะมีค่ามากขึ้น และ E_M จะมีค่าลดลง

สาเหตุที่ R และ E_M ของค่าเฉลี่ย 24 ชั่วโมงต่อเนื่องมีค่าน้อยกว่าค่าเฉลี่ย 1 ชั่วโมงต่อเนื่อง เนื่องจากจำนวนตัวอย่างของค่าเฉลี่ย 24 ชั่วโมงต่อเนื่องมีจำนวนที่น้อยกว่า แต่ที่ค่าเฉลี่ย 24 ชั่วโมงต่อเนื่อง จะบ่งบอกถึงระดับคุณภาพอากาศในแต่ละวัน ที่ถูกกำหนดโดยกรมควบคุมมลพิษ



รูปที่ 9 ปริมาณ PM2.5 ที่ค่าเฉลี่ย 1 ชั่วโมงต่อเนื่อง ระยะเวลา 31 วัน ของ LCPMS และ BAM1020 ที่ช่วงเวลาการสุ่มตัวอย่าง (ก) 30 วินาที (ข) 60 วินาที และ (ค) 180 วินาที



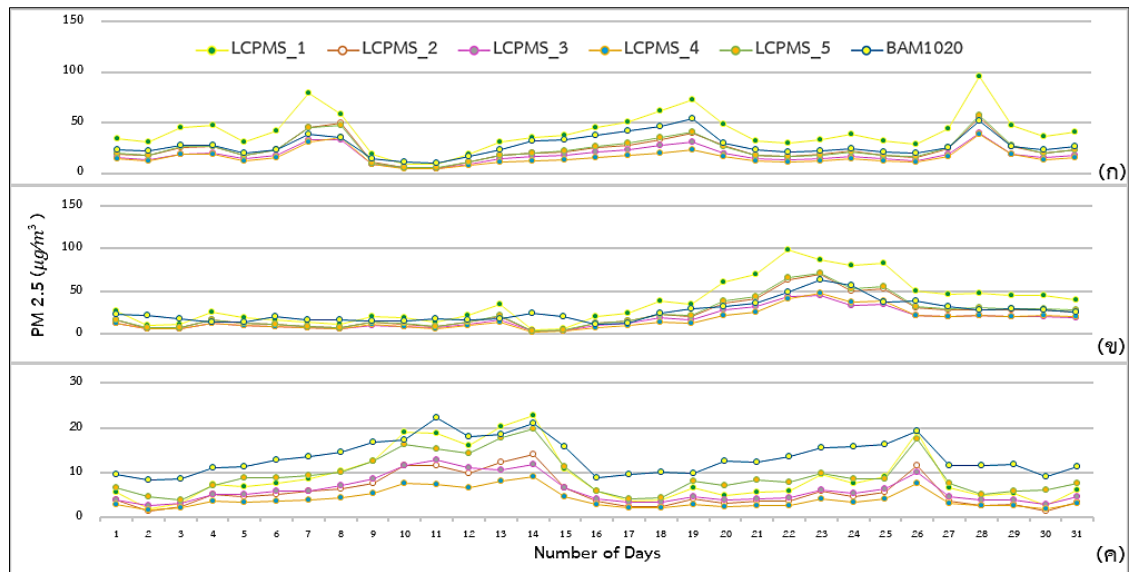
รูปที่ 10 ความสัมพันธ์ของปริมาณ PM2.5 ที่ช่วงเวลาการสุ่มตัวอย่าง 30 วินาที ระยะเวลา 31 วัน ระหว่าง LCPMS และ BAM1020 ที่ค่าเฉลี่ย 1 ชั่วโมงต่อเนื่อง

ตารางที่ 4 ความสัมพันธ์ R และ E_M ของปริมาณ PM2.5 ของ LCPMS และ BAM1020 ระยะเวลา 31 วัน

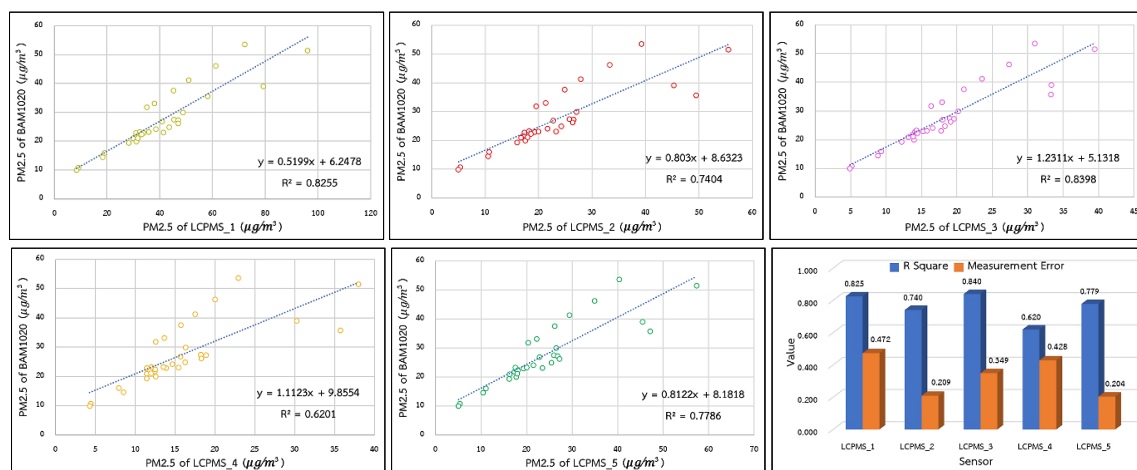
| Sensor | Average (Continuous) | Sampling Time | R | R^2 | Coefficients | | β_0 | | β_1 | | % E_M |
|---------|-------------------------|------------------|------|-------|--------------|-----------|-----------|-------|-----------|-------|---------|
| | | | | | β_0 | β_1 | Lower | Upper | Lower | Upper | |
| LCPMS_1 | 1 hr. | 30s | 0.85 | 0.73 | 8.84 | 0.45 | 7.90 | 9.77 | 0.43 | 0.47 | 51.43 |
| | | 60s | 0.72 | 0.52 | 12.59 | 0.37 | 11.45 | 13.74 | 0.34 | 0.39 | 64.87 |
| | | 180s | 0.60 | 0.35 | 9.77 | 0.41 | 9.32 | 10.23 | 0.37 | 0.44 | 48.27 |
| | 24 hrs. | 30s | 0.91 | 0.83 | 6.25 | 0.52 | 2.20 | 10.30 | 0.43 | 0.61 | 47.25 |
| | | 60s | 0.87 | 0.76 | 10.22 | 0.43 | 6.09 | 14.35 | 0.34 | 0.53 | 55.38 |
| | | 180s | 0.92 | 0.84 | 7.96 | 0.61 | 6.89 | 9.03 | 0.51 | 0.71 | 40.00 |

ตารางที่ 4 ความสัมพันธ์ R และ E_M ของปริมาณ PM2.5 ของ LCPMS และ BAM1020 ระยะเวลา 31 วัน (ต่อ)

| Sensor | Average (Continuous) | Sampling Time | R | R^2 | Coefficients | | β_0 | | β_1 | | % E_M |
|---------|-------------------------|------------------|------|-------|--------------|-----------|-----------|-------|-----------|-------|---------|
| | | | | | β_0 | β_1 | Lower | Upper | Lower | Upper | |
| LCPMS_2 | 1 hr. | 30s | 0.83 | 0.69 | 10.01 | 0.75 | 9.03 | 10.99 | 0.72 | 0.79 | 26.38 |
| | | 60s | 0.72 | 0.52 | 12.76 | 0.59 | 11.63 | 13.90 | 0.55 | 0.63 | 38.92 |
| | | 180s | 0.59 | 0.35 | 9.70 | 0.67 | 9.24 | 10.17 | 0.60 | 0.73 | 60.67 |
| | 24 hrs. | 30s | 0.86 | 0.74 | 8.63 | 0.80 | 3.95 | 13.31 | 0.62 | 0.98 | 20.86 |
| | | 60s | 0.90 | 0.80 | 10.72 | 0.66 | 7.17 | 14.28 | 0.54 | 0.79 | 27.51 |
| | | 180s | 0.91 | 0.82 | 7.88 | 1.00 | 6.73 | 9.03 | 0.83 | 1.18 | 61.55 |
| LCPMS_3 | 1 hr. | 30s | 0.87 | 0.76 | 6.98 | 1.14 | 6.05 | 7.91 | 1.09 | 1.19 | 36.09 |
| | | 60s | 0.71 | 0.50 | 11.46 | 0.86 | 10.22 | 12.71 | 0.80 | 0.92 | 41.11 |
| | | 180s | 0.63 | 0.40 | 8.05 | 0.89 | 7.50 | 8.59 | 0.81 | 0.97 | 55.19 |
| | 24 hrs. | 30s | 0.92 | 0.84 | 5.13 | 1.23 | 1.11 | 9.15 | 1.03 | 1.44 | 34.88 |
| | | 60s | 0.88 | 0.78 | 9.03 | 0.99 | 4.90 | 13.16 | 0.79 | 1.20 | 36.04 |
| | | 180s | 0.92 | 0.85 | 6.23 | 1.20 | 4.97 | 7.50 | 1.01 | 1.39 | 56.92 |
| LCPMS_4 | 1 hr. | 30s | 0.77 | 0.59 | 0.02 | 0.56 | -1.00 | 1.03 | 0.53 | 0.60 | 44.69 |
| | | 60s | 0.72 | 0.51 | 12.27 | 0.85 | 11.09 | 13.44 | 0.79 | 0.91 | 42.14 |
| | | 180s | 0.59 | 0.35 | 8.90 | 1.13 | 8.37 | 9.43 | 1.01 | 1.24 | 70.06 |
| | 24 hrs. | 30s | 0.79 | 0.62 | 9.86 | 1.11 | 4.09 | 15.62 | 0.78 | 1.44 | 42.85 |
| | | 60s | 0.90 | 0.80 | 9.96 | 0.98 | 6.27 | 13.65 | 0.79 | 1.16 | 39.78 |
| | | 180s | 0.91 | 0.82 | 6.66 | 1.70 | 5.31 | 8.00 | 1.40 | 1.99 | 71.44 |
| LCPMS_5 | 1 hr. | 30s | 0.84 | 0.71 | 9.78 | 0.75 | 8.85 | 10.72 | 0.72 | 0.79 | 26.16 |
| | | 60s | 0.72 | 0.52 | 12.67 | 0.56 | 11.54 | 13.80 | 0.52 | 0.60 | 39.36 |
| | | 180s | 0.59 | 0.34 | 8.76 | 0.50 | 8.21 | 9.31 | 0.45 | 0.55 | 39.67 |
| | 24 hrs. | 30s | 0.88 | 0.78 | 8.18 | 0.81 | 3.86 | 12.50 | 0.65 | 0.98 | 20.35 |
| | | 60s | 0.90 | 0.80 | 10.64 | 0.64 | 7.04 | 14.23 | 0.52 | 0.76 | 27.62 |
| | | 180s | 0.91 | 0.82 | 6.00 | 0.80 | 4.55 | 7.45 | 0.66 | 0.94 | 33.21 |



รูปที่ 11 ปริมาณ PM2.5 ที่ค่าเฉลี่ย 24 ชั่วโมงต่อเนื่อง ระยะเวลา 31 วัน ของ LCPMS และ BAM1020 ที่ช่วงเวลากการสุ่มตัวอย่าง (ก) 30 วินาที (ข) 60 วินาที และ (ค) 180 วินาที



รูปที่ 12 ความสัมพันธ์ของปริมาณ PM2.5 ที่ช่วงเวลากการสุ่มตัวอย่าง 30 วินาที ระยะเวลา 31 วัน ระหว่าง LCPMS และ BAM1020 ที่ค่าเฉลี่ย 24 ชั่วโมงต่อเนื่อง

4.2.ฝุ่นละอองขนาดไม่เกิน 10 ไมครอน (PM10)

ผลลัพธ์ของการวัดปริมาณฝุ่นละออง PM10 ระยะเวลา 31 วัน (จากวันที่ 10 กุมภาพันธ์ ถึง 12 มีนาคม 2565) ที่ค่าเฉลี่ย 1 ชั่วโมงต่อเนื่อง ในช่วงเวลากการสุ่มตัวอย่าง 30 วินาที (จำนวน 89,280 ตัวอย่าง) ที่อุณหภูมิและความชื้นเฉลี่ย 33.53°C และ 51.69RH ตามลำดับ ถูกแสดงดังรูปที่ 13(ก) และความสัมพันธ์ระหว่าง LCPMS และ BAM1020 แสดงดังรูปที่ 14 เซ็นเซอร์ LCPMS ทุกอันมีค่า R มากกว่า 0.80 ซึ่งมีความสัมพันธ์กันในระดับสูงมากกับเครื่องวัดมาตรฐาน (จากจำนวน 744 ตัวอย่าง) และ ความคลาดเคลื่อนจากการวัด (E_M) ของเซ็นเซอร์

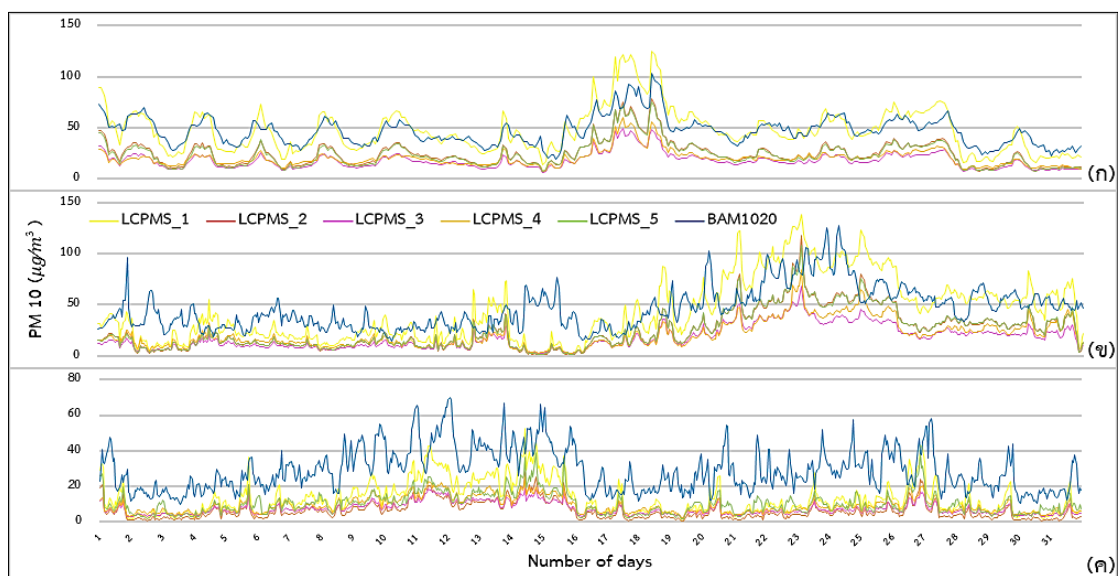
LCPMS_1 เท่ากับ 17.16 ที่มีค่าน้อยสุด ซึ่งต่างจากเซ็นเซอร์รุ่นอื่นๆที่มี E_M ก่อนข้างมาก แสดงดังตารางที่ 5 แต่เซ็นเซอร์ LCPMS_1 จะมีความผิดพลาดจากการรับข้อมูลประมาณ 2.8% (จากตลอดระยะเวลาการเก็บข้อมูล)

ปริมาณฝุ่นละออง PM10 ระยะเวลา 31 วัน ที่ค่าเฉลี่ย 24 ชั่วโมงต่อเนื่อง ในช่วงเวลากการสุ่มตัวอย่าง 30 วินาที ที่อุณหภูมิและความชื้นเฉลี่ย 33.03°C และ 50.30%RH ตามลำดับ ถูกแสดงดังรูปที่ 15(ก) และความสัมพันธ์ระหว่าง LCPMS และ BAM1020 แสดงดังรูปที่ 16 เซ็นเซอร์ LCPMS ทุกอันมีค่า R มากกว่า 0.80 ซึ่งมีความสัมพันธ์กันในระดับสูง

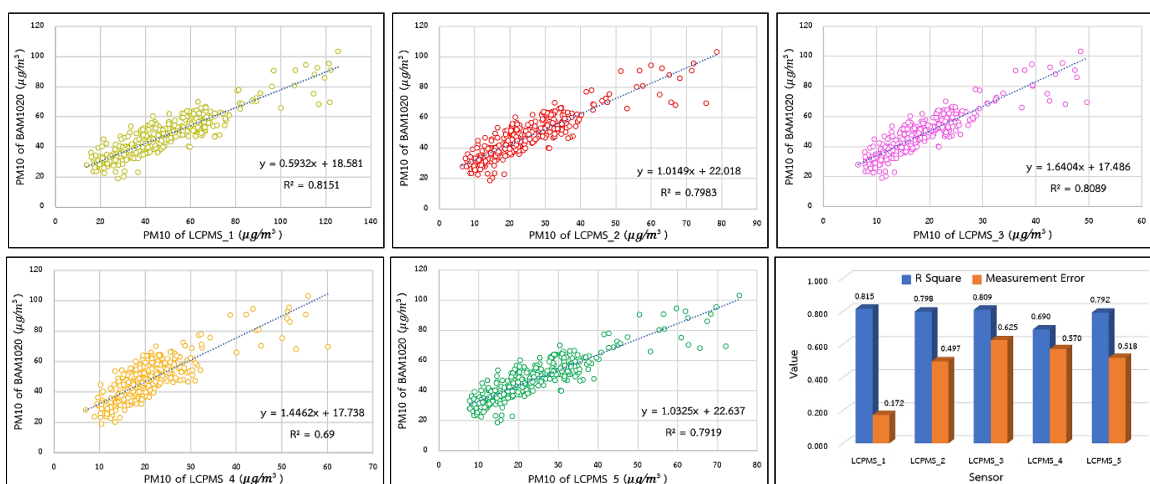
มากกับเครื่องวัดมาตรฐาน (จากจำนวน 31 ตัวอย่าง) และ E_M ของ LCPMS_1 เท่ากับ 13.53 ที่มีค่าน้อยสุด แสดงดังตารางที่ 5 สาเหตุที่ค่า R และ E_M ของค่าเฉลี่ย 24 ชั่วโมงต่อเนื่องมีค่าน้อยกว่าค่าเฉลี่ย 1 ชั่วโมงต่อเนื่อง เนื่องจากจำนวนตัวอย่างของค่าเฉลี่ย 24 ชั่วโมงต่อเนื่องมีจำนวนที่น้อยกว่า และที่ค่าเฉลี่ย 24 ชั่วโมงต่อเนื่อง จะถูกนำมาวัดระดับคุณภาพอากาศโดยรวมในพื้นที่ที่ส่งผลกระทบต่อสุขภาพในแต่ละวัน

สำหรับปริมาณ PM10 ระยะเวลา 31 วัน ในช่วงเวลาการสุ่มตัวอย่าง 60 วินาที (วันที่ 18 มีนาคม ถึง 17 เมษายน 2565) และ 180 วินาที (วันที่ 18 พฤษภาคม ถึง 17 มิถุนายน 2565) ที่

ค่าเฉลี่ย 1 ชั่วโมงต่อเนื่อง แสดงดังรูปที่ 13(ข) และ 13(ค) ตามลำดับ และที่ค่าเฉลี่ย 24 ชั่วโมงต่อเนื่อง แสดงดังรูปที่ 15 (ข) และ 15 (ค) ตามลำดับ ในช่วงเวลาการสุ่มตัวอย่าง 60 และ 180 วินาที ค่าเฉลี่ย 1 ชั่วโมงต่อเนื่อง LCPMS จะมีค่า R ที่น้อยกว่าช่วงเวลาการสุ่มตัวอย่างที่ 30 วินาที และ LCPMS_2 ถึง LCPMS_5 มีค่า E_M ต่ำสุดในช่วงเวลาการสุ่มตัวอย่างที่ 60 วินาที แสดงดังตารางที่ 5 ดังนั้นจากผลลัพธ์ของปริมาณ PM10 ที่วัดได้จาก LCPMS สามารถบ่งบอกได้ว่า เมื่อช่วงเวลาการสุ่มตัวอย่างลดลง R จะมีค่ามากขึ้น



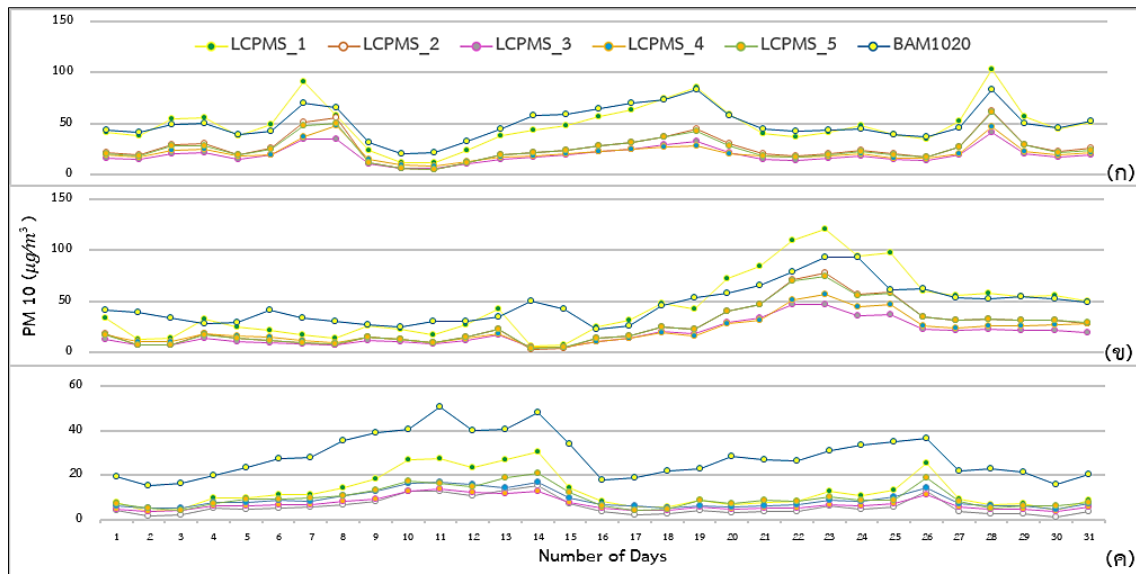
รูปที่ 13 ปริมาณ PM10 ที่ค่าเฉลี่ย 1 ชั่วโมงต่อเนื่อง ระยะเวลา 31 วัน ของ LCPMS และ BAM1020 ที่ช่วงเวลาการสุ่มตัวอย่าง (ก) 30 วินาที (ข) 60 วินาที และ (ค) 180 วินาที



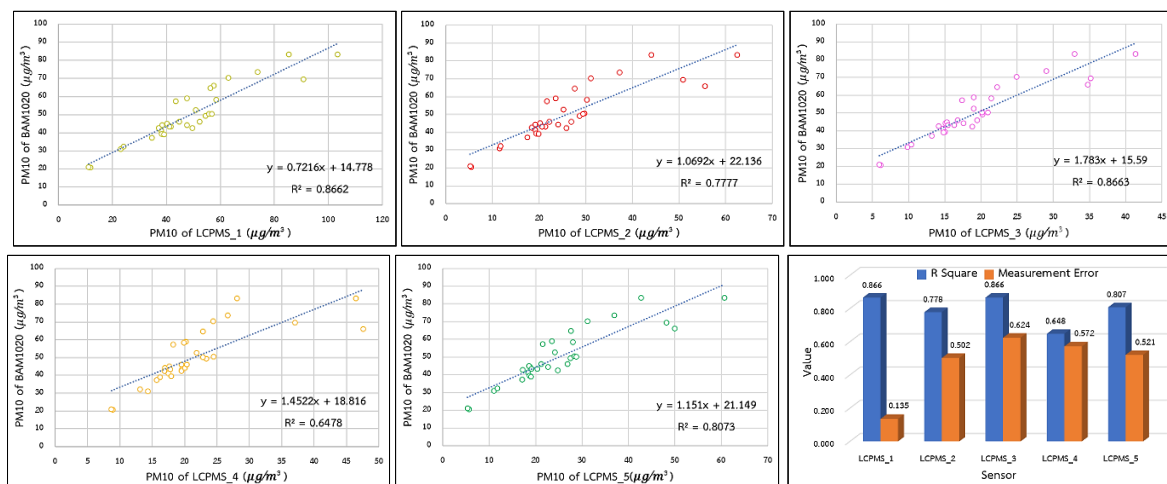
รูปที่ 14 ความสัมพันธ์ของปริมาณ PM10 ที่ช่วงเวลาการสุ่มตัวอย่าง 30 วินาที ระยะเวลา 31 วัน ระหว่าง LCPMS และ BAM1020 ที่ค่าเฉลี่ย 1 ชั่วโมงต่อเนื่อง

ตารางที่ 5 ความสัมพันธ์ R และ E_M ของปริมาณ PM10 ของ LCPMS และ BAM1020 ระยะเวลา 31 วัน

| Sensor | Average (Continuous) | Sampling Time | R | R^2 | Coefficients | | β_0 | | β_1 | | Sensor |
|---------|-------------------------|------------------|------|-------|--------------|-----------|-----------|-------|-----------|-------|--------|
| | | | | | β_0 | β_1 | Lower | Upper | Lower | Upper | |
| LCPMS_1 | 1 hr. | 30s | 0.90 | 0.82 | 18.58 | 0.59 | 17.06 | 20.10 | 0.56 | 0.62 | 17.16 |
| | | 60s | 0.68 | 0.47 | 26.04 | 0.46 | 24.14 | 27.94 | 0.43 | 0.50 | 40.37 |
| | | 180s | 0.59 | 0.35 | 18.96 | 0.77 | 17.77 | 20.15 | 0.69 | 0.84 | 57.94 |
| | 24 hrs. | 30s | 0.93 | 0.87 | 14.78 | 0.72 | 9.11 | 20.45 | 0.61 | 0.83 | 13.53 |
| | | 60s | 0.86 | 0.75 | 23.22 | 0.52 | 17.01 | 29.42 | 0.40 | 0.63 | 27.51 |
| | | 180s | 0.91 | 0.84 | 14.30 | 1.12 | 11.53 | 17.07 | 0.93 | 1.31 | 58.66 |
| LCPMS_2 | 1 hr. | 30s | 0.89 | 0.80 | 22.02 | 1.01 | 20.58 | 23.46 | 0.96 | 1.07 | 49.68 |
| | | 60s | 0.68 | 0.47 | 27.56 | 0.75 | 25.75 | 29.37 | 0.69 | 0.81 | 49.63 |
| | | 180s | 0.57 | 0.32 | 20.13 | 1.43 | 18.97 | 21.29 | 1.28 | 1.58 | 79.52 |
| | 24 hrs. | 30s | 0.88 | 0.78 | 22.14 | 1.07 | 15.85 | 28.42 | 0.85 | 1.29 | 50.21 |
| | | 60s | 0.87 | 0.75 | 25.19 | 0.82 | 19.46 | 30.91 | 0.65 | 1.00 | 48.73 |
| | | 180s | 0.90 | 0.81 | 15.40 | 2.21 | 12.52 | 18.29 | 1.80 | 2.62 | 80.85 |
| LCPMS_3 | 1 hr. | 30s | 0.90 | 0.81 | 17.49 | 1.64 | 15.89 | 19.08 | 1.56 | 1.72 | 62.48 |
| | | 60s | 0.68 | 0.46 | 24.19 | 1.23 | 22.16 | 26.23 | 1.13 | 1.33 | 60.96 |
| | | 180s | 0.62 | 0.38 | 13.16 | 2.20 | 11.59 | 14.74 | 2.00 | 2.40 | 74.00 |
| | 24 hrs. | 30s | 0.93 | 0.87 | 15.59 | 1.78 | 10.03 | 21.15 | 1.52 | 2.05 | 62.43 |
| | | 60s | 0.86 | 0.74 | 21.22 | 1.37 | 1.06 | 27.85 | 1.06 | 1.68 | 61.97 |
| | | 180s | 0.93 | 0.86 | 7.31 | 3.00 | 3.82 | 10.80 | 2.54 | 3.46 | 75.48 |
| LCPMS_4 | 1 hr. | 30s | 0.83 | 0.69 | 17.74 | 1.45 | 15.58 | 19.90 | 1.35 | 1.55 | 57.04 |
| | | 60s | 0.65 | 0.42 | 24.77 | 1.02 | 22.63 | 26.92 | 0.94 | 1.11 | 54.08 |
| | | 180s | 0.62 | 0.38 | 13.45 | 1.70 | 11.89 | 15.01 | 1.54 | 1.86 | 67.08 |
| | 24 hrs. | 30s | 0.80 | 0.65 | 18.82 | 1.45 | 9.43 | 28.20 | 1.05 | 1.86 | 57.20 |
| | | 60s | 0.85 | 0.73 | 20.61 | 1.19 | 13.62 | 27.60 | 0.92 | 1.47 | 54.77 |
| | | 180s | 0.92 | 0.85 | 7.79 | 2.30 | 4.21 | 11.37 | 1.93 | 2.67 | 68.83 |
| LCPMS_5 | 1 hr. | 30s | 0.89 | 0.79 | 22.64 | 1.03 | 21.20 | 24.07 | 0.98 | 1.09 | 51.81 |
| | | 60s | 0.69 | 0.47 | 26.97 | 0.78 | 25.15 | 28.79 | 0.72 | 0.84 | 49.23 |
| | | 180s | 0.58 | 0.33 | 17.03 | 1.17 | 15.64 | 18.42 | 1.05 | 1.29 | 64.48 |
| | 24 hrs. | 30s | 0.90 | 0.81 | 21.15 | 1.15 | 15.22 | 27.08 | 0.94 | 1.36 | 52.07 |
| | | 60s | 0.87 | 0.76 | 24.63 | 0.85 | 18.84 | 30.42 | 0.67 | 1.03 | 48.80 |
| | | 180s | 0.89 | 0.80 | 10.11 | 1.86 | 6.23 | 13.98 | 1.50 | 2.22 | 66.13 |



รูปที่ 15 ปริมาณ PM10 ที่ค่าเฉลี่ย 24 ชั่วโมงต่อเนื่อง ระยะเวลา 31 วัน ของ LCPMS และ BAM1020 ที่ช่วงเวลาการสุ่มตัวอย่าง (ก) 30 วินาที (ข) 60 วินาที และ (ค) 180 วินาที



รูปที่ 16 ความสัมพันธ์ของปริมาณ PM10 ที่ช่วงเวลาการสุ่มตัวอย่าง 30 วินาที ระยะเวลา 31 วัน ระหว่าง LCPMS และ BAM1020 ที่ค่าเฉลี่ย 24 ชั่วโมงต่อเนื่อง

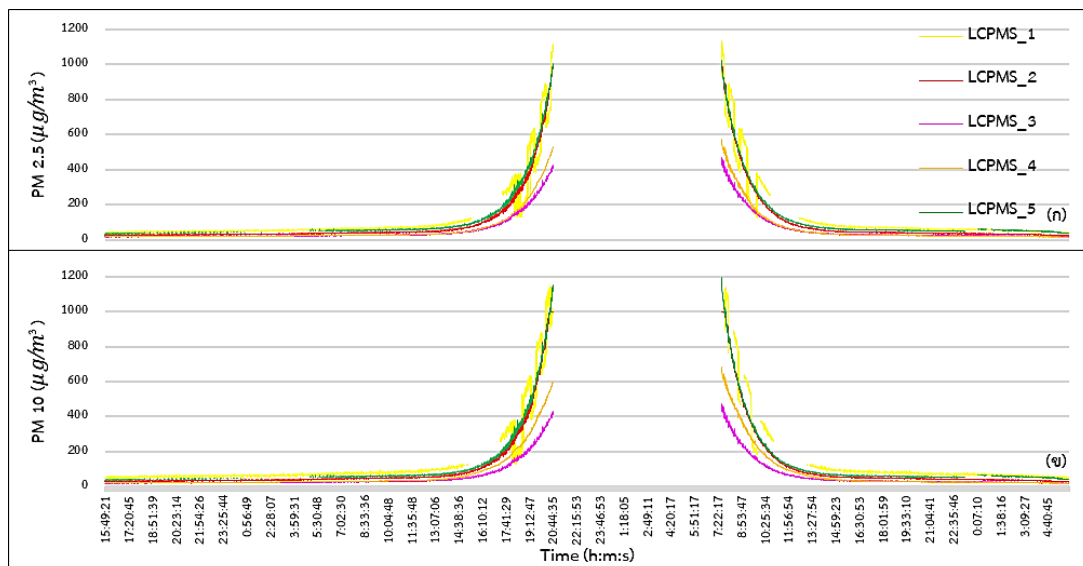
4.3. ปริมาณ PM2.5 และ PM10 ในห้องทดสอบ

ผลลัพธ์ของการวัดปริมาณฝุ่นละออง PM2.5 และ PM10 ของ LCPMS ในห้องทดสอบ แสดงดังรูปที่ 17(ก) และ 17(ข) ตามลำดับ ในสภาพอากาศที่มีมลภาวะทางอากาศที่แย่และดี ที่อุณหภูมิและความชื้นเฉลี่ย 31.64°C และ 67.87RH ตามลำดับ ในช่วงเวลาการสุ่มตัวอย่าง 30 วินาที (ที่ช่วงเวลาการสุ่มตัวอย่าง 30 วินาที LCPMS ส่วนมาก จะมีค่าความสัมพันธ์ R มากกว่าและค่าความคลาดเคลื่อน E_M น้อยกว่าช่วงเวลาการสุ่มตัวอย่างที่ 60 วินาที และ 180 วินาที) โดยช่วงปริมาณ

PM2.5 และ PM10 ที่พิจารณาตามข้อมูลจำเพาะอยู่ในช่วง 0 ถึง 1,000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ [15] (ตามมาตรฐาน) จากรูปที่ 17 จะพบว่า ปริมาณ PM2.5 และ PM10 ของ LCPMS แต่ละรุ่นนั้นแตกต่างกัน (บทความนี้ตัดช่วงปริมาณ PM2.5 และ PM10 ที่มากกว่า 1,000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ออก) โดย LCPMS_5 มีค่า PM2.5 และ PM10 ที่ได้จากการวัดสูงสุด และ LCPMS_1 LCPMS_3 LCPMS_4 และ LCPMS_2 มีค่าน้อยลงตามลำดับ ระดับปริมาณ PM2.5 และ PM10 ของ LCPMS_1 LCPMS_2 และ LCPMS_5 มีค่าที่ใกล้เคียงกัน แต่ LCPMS_1 มีค่าแปรปรวนจากการวัดในช่วง

การประมาณที่มากกว่า $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ จากข้อมูลปริมาณ PM2.5 และ PM10 ที่ได้จากการวัดในห้องทดสอบ แสดงดังตารางที่ 6 จะพบว่าค่าปริมาณ PM2.5 และ PM10 ที่ได้จาก LCPMS แต่ละรุ่นนั้นมีค่าที่สูงสุดของปริมาณฝุ่นระออง PM2.5 และ PM10 ที่แตกต่างกัน โดย LCPMS_5 มีค่าปริมาณที่สูงที่สุด และ LCPMS_2 มีค่าที่มากที่สุดจำกัดอยู่ที่ $1,000 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ซึ่งอยู่ในช่วงตามข้อมูลจำเพาะ (ในสถานที่เปิดของสภาพแวดล้อมจริงยากมากที่จะเกิดฝุ่นละอองที่มากกว่า $1,000 \mu\text{g}/\text{m}^3$) และรุ่น LCPMS_4 มีค่า PM2.5 ที่มากที่สุดจำกัดอยู่ที่ $999.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ แต่ค่า PM10 มีค่าสูงสุดที่ไม่ถูกจำกัดสาเหตุที่ทำให้ LCPMS นั้นมีข้อมูลที่แตกต่างกัน เพราะ LCPMS แต่ละรุ่นมีจำนวนบิตข้อมูลของ UART คาบเวลาของ PWM ที่ส่งให้ MCU และ การสื่อสารกับ MCU ที่แตกต่างกัน จึงทำให้

LCPMS บางรุ่นมีค่าปริมาณที่มากกว่า $1,000 \mu\text{g}/\text{m}^3$ และสิ่งที่น่าสนใจอีกอย่างหนึ่งคือค่าความผิดพลาดจากการวัดข้อมูลในตารางที่ 6 พบว่าเซ็นเซอร์ LCPMS_2 LCPMS_4 และ LCPMS_5 ไม่เกิดความผิดพลาดของการรับข้อมูล แต่เซ็นเซอร์ LCPMS_3 และ LCPMS_1 เกิดความผิดพลาดของการรับข้อมูลประมาณ 0.53 และ 2.8 ตามลำดับ จากตลอดระยะเวลาการเก็บข้อมูลทั้งในห้องทดสอบและในสภาพอากาศจริง ทั้งในการสู่มตัวอย่าง 30 60 และ 180 วินาที โดยข้อมูลที่ถูกรวบรวมในบทความนี้ ผู้เขียนใช้โปรแกรมต้นฉบับที่มาพร้อมกับเซ็นเซอร์และ ไม่มีการแก้ไขพารามิเตอร์การรับค่าข้อมูลใด ๆ นอกจากช่วงเวลาการสู่มตัวอย่างข้อมูลของเซ็นเซอร์



รูปที่ 17 (ก) ปริมาณ PM2.5 และ (ข) PM10 ของเซ็นเซอร์ LCPMS ในห้องทดสอบ ที่อุณหภูมิและความชื้นเฉลี่ย 31.64°C และ 67.87RH ตามลำดับ ในช่วงเวลาการสู่มตัวอย่าง 30 วินาที

ตารางที่ 6 รายละเอียดปริมาณ PM2.5 และ PM10 ของ LCPMS ในห้องทดสอบ ที่ช่วงเวลาการสู่มตัวอย่าง 30 วินาที

| Sensor | PM 2.5 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) | | PM 10 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) | | Concentration range [15] of PM2.5 and PM10 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) | | % Error (All time measuring) |
|---------|--|-----|---------------------------------------|-----|---|-----|---------------------------------|
| | Max | Min | Max | Min | Max | Min | |
| LCPMS_1 | 4413 | 25 | 13792 | 29 | 1000 | 0 | 2.8 |
| LCPMS_2 | 1000 | 15 | 1000 | 17 | 1000 | 0 | 0 |
| LCPMS_3 | 2994 | 11 | 3031 | 12 | 1000 | 0 | 0.53 |

ตารางที่ 6 รายละเอียดปริมาณ PM2.5 และ PM10 ของ LCPMS ในห้องทดสอบ ที่ช่วงเวลากการสุ่มตัวอย่าง 30 วินาที (ต่อ)

| Sensor | PM 2.5 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) | | PM 10 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) | | Concentration range [15] of PM2.5 and PM10 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) | | % Error (All time measuring) |
|---------|--|-------|---------------------------------------|-------|---|-----|------------------------------------|
| | Max | Min | Max | Min | Max | Min | |
| LCPMS_4 | 999.9 | 9.5 | 1946.2 | 12.2 | 999.9 | 0 | 0 |
| LCPMS_5 | 18819.64 | 25.56 | 46690.79 | 27.03 | 1000 | 0 | 0 |

5. สรุป

ผลลัพธ์จากการประเมินสมรรถนะของ LCPMS แต่ละรุ่น ที่ได้จากการวัดปริมาณ PM2.5 ในสภาพอากาศจริง พบว่าสมรรถนะของ LCPMS_1, LCPMS_2, LCPMS_3 และ LCPMS_5 มีความสัมพันธ์ R ในระดับสูงมาก และ LCPMS_4 มีความสัมพันธ์ในระดับสูง กับ BAM1020 และปริมาณ PM10 ที่ได้จาก LCPMS ทุกรุ่นที่ใช้ในการทดสอบ มีความสัมพันธ์ R ในระดับสูงมากกับ BAM1020 และค่า PM2.5 ของเซ็นเซอร์ LCPMS_3 มีค่า R สูงที่สุดแต่ค่า E_M น้อยกว่า LCPMS_5 ที่มี E_M ต่ำสุด และ LCPMS_2 มี E_M ที่ต่ำใกล้เคียงกัน โดย LCPMS_2 นั้นมีราคาต่ำกว่า LCPMS_5 แต่ LCPMS_5 มีขนาดเล็กกว่าและเชื่อมต่อได้หลากหลายมากกว่า (UART/I2C) และปริมาณ PM10 ของรุ่น LCPMS_1 มีค่า R สูงที่สุด และ E_M ต่ำที่สุด (ค่า E_M จะมีความเที่ยงตรงกว่านี้ ถ้านำ LCPMS และเครื่องวัดมาตรฐาน วางอยู่ที่เดียวกัน)

การประเมินสมรรถนะของ LCPMS ในห้องทดสอบ ในการวัดปริมาณ PM2.5 และ PM10 ในสภาพแวดล้อมเดียวกัน จะมีค่าปริมาณฝุ่นละอองสูงสุดของแต่ละรุ่นที่แตกต่างกัน โดย LCPMS_5 จะมีค่าสูงสุด และ LCPMS_1, LCPMS_3, LCPMS_4 และ LCPMS_2 มีค่าน้อยลงมาตามลำดับ และ LCPMS_2 มีค่าสูงสุดจำกัดอยู่ที่ $1,000 \mu\text{g}/\text{m}^3$ เนื่องจาก LCPMS แต่ละรุ่นมีจำนวนบิตข้อมูลของ UART คาบเวลาของ PWM ที่ส่งให้ MCU และ การสื่อสารกับ MCU ที่แตกต่างกัน และเซ็นเซอร์ LCPMS_1 มีความผิดพลาดจากการเก็บข้อมูลและมีความแปรปรวนค่อนข้างมาก ตลอดการทดสอบวัดฝุ่นละออง LCPMS_2 LCPMS_4 และ LCPMS_5 ไม่เกิดความผิดพลาดของการรับข้อมูล

และ LCPMS_1 และ LCPMS_3 เกิดความผิดพลาดคิดเป็น 2.8 และ 0.53 ตามลำดับ

จากการทดสอบ LCPMS ส่วนมาก เมื่อช่วงเวลากการสุ่มตัวอย่างลดลง R จะมีค่ามากขึ้น และ E_M จะมีค่าลดลง แต่ในการลดช่วงเวลากการสุ่มตัวอย่างลงนั้น ต้องคำนึงถึงความเร็วการตอบสนองของเซ็นเซอร์นั้น ๆ ด้วยเช่นกัน และ LCPMS มีความอ่อนไหวต่ออากาศชื้นค่อนข้างมาก ในการติดตั้ง LCPMS ควรมีอุปกรณ์ป้องกันน้ำหรือละอองน้ำไม่ให้เข้ามาถึงเซ็นเซอร์ และควรทำความสะอาดเซ็นเซอร์อยู่เสมอ เพราะมีฝุ่นละอองตกค้างอยู่ภายในเซ็นเซอร์ และเพื่อให้ค่าที่วัดได้มีความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุด

ผู้เขียนหวังอย่างยิ่งว่าข้อมูลในบทความนี้ จะเป็นประโยชน์ในการพิจารณาในการเลือกเซ็นเซอร์ที่เหมาะสมกับการใช้งานของนักพัฒนาหรือผู้ที่กำลังเลือกซื้อเซ็นเซอร์วัดฝุ่นละอองราคาประหยัดนำไปใช้งาน

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] J. Wang, M. Zhang, X. Bai, H. Tan, S. Li, J. Liu, R. Zhang, M. A. Wolters, X. Qin, M. Zhang, H. Lin et al., "Large-scale transport of PM2.5 in the lower troposphere during winter cold surges in China," *Scientific Reports*, vol. 7, Oct. 2017, Art. no. 13238, doi: 10.1038/s41598-017-13217-2.
- [2] G. Kallos, M. Astitha, P. Katsafados, and C. Spyrou, "Long-Range Transport of Anthropogenically and Naturally Produced Particulate Matter in the Mediterranean and North Atlantic: Current State of Knowledge," *Journal of Applied Meteorology and*

- Climatology*, vol. 46, no. 8, pp. 1230–1251, 2007, doi: 10.1175/JAM2530.1.
- [3] C. -W. Chen, Y. -S. Tseng, A. Mukundan and H. -C. Wang, “Air Pollution: Sensitive Detection of PM_{2.5} and PM₁₀ Concentration Using Hyperspectral Imaging,” *Applied Sciences*, vol. 11, no. 10, 2021, Art. No. 4543, doi: 10.3390/app11104543.
- [4] J. Núñez, Y. Wang, S. Bäumer and A. Boersma, “Inline Infrared Chemical Identification of Particulate Matter,” *Sensors*, vol. 20, no. 15, 2020, Art. no. 4193, doi: 10.3390/s20154193.
- [5] Air Quality and Noise Management Division, “Standard of general particulate matter in air of Thailand,” in *Manual of Measuring Particulate Matter in Air*, Bangkok, Thailand: PCD. MNRE, 2003, ch. 2, sec. 2.2, pp. 4–6. [Online]. Available: <https://www.pcd.go.th/publication/4702>. (in Thai)
- [6] Y. Wang, W. Yang, B. Han, W. Zhang, M. Chen and Z. Bai, “Gravimetric analysis for PM_{2.5} mass concentration based on year-round monitoring at an urban site in Beijing,” *Journal of Environmental Sciences*, vol. 40, pp. 154–160, 2016, doi: 10.1016/j.jes.2015.09.015.
- [7] Q.-F. Li, L. Wang-Li, Z. Liu and A. J. Heber, “Field evaluation of particulate matter measurements using tapered element oscillating microbalance in a layer house,” *Journal of the Air & Waste Management Association*, vol. 62, no. 3, pp. 322–335, 2012, doi: 10.1080/10473289.2011.650316.
- [8] J. D. Wanjura, B. W. Shaw, C. B. Parnell, R. E. Lacey, S. C. Capareda, “Comparison of Continuous Monitor (TEOM) and Gravimetric Sampler Particulate Matter Concentrations,” *American Society of Agricultural and Biological Engineers (ASABE)*, vol. 51, no. 1, pp. 251–257, 2008, doi: 10.13031/2013.24218.
- [9] P. L. Rocca and F. Riggi, “Absorption of beta particles in different materials: an undergraduate experiment,” *European Journal of Physics*, vol. 30, no. 6, pp. 1417–1425, 2009, doi: 10.1088/0143-0807/30/6/019.
- [10] Ambient air – Measurement of the mass of particulate matter on a filter medium – Beta-ray absorption method, ISO 10473, 2000.
- [11] S. A. Pozza, E. P. Lima, T. T. Comin, M. L. Gimenes and J. R. Coury, “Time series analysis of PM_{2.5} and PM_{10-2.5} mass concentration in the city of Sao Carlos, Brazil,” *International Journal of Environment and Pollution*, vol. 41, no. 1–2, pp. 90–108, 2010.
- [12] N. Poor, T. Clark, L. Nye, T. Tamanini, K. Tate, R. Stevens and T. Atkeson, “Field performance of dichotomous sequential PM air samplers,” *Atmospheric Environment*, vol. 36, no. 20, pp. 3289–3298, 2002, doi: 10.1016/S1352-2310(02)00304-7.
- [13] C. Giglioni and A. Natali, “Laser scattering methodology for measuring particulates in the air,” *Conservation Science in Cultural Heritage*, vol. 9, no. 1, pp. 157–169, 2009, 10.6092/issn.1973-9494/1748.
- [14] R. T. H. Collis and E. E. Uthe, “Mie scattering techniques for air pollution measurement with lasers,” *Optical and Quantum Electronics*, vol. 4, pp. 87–99, 1972, doi: 10.1007/BF01421174.
- [15] B. Alfano, L. Barretta, A. D. Giudice, S. De Vito, Girolamo D. Francia, E. Esposito, F. Formisano, E. Massera, M. L. Miglietta and T. Polichetti, “A Review of Low-Cost Particulate Matter Sensors from the Developers’ Perspectives,” *Sensors*, vol. 20, no. 23, 2020, Art. No. 6819, doi: 10.3390/s20236819.
- [16] M. Tagle, F. Rojas, F. Reyes, Y. Vásquez, F. Hallgren, J. Lindén, D. Kolev, Å. K. Watne and P. Oyola, “Field performance of a low-cost sensor in the monitoring of particulate matter in Santiago, Chile,” *Environmental*

- Monitoring and Assessment*, vol. 192, no. 171, 2020, doi: 10.1007/s10661-020-8118-4.
- [17] T. Zheng, M. H. Bergin, K. K. Johnson, S. N. Tripathi, S. Shirodkar, M. S. Landis, R. Sutaria and D. E. Carlson, “Field evaluation of low-cost particulate matter sensors in high- and low-concentration environments,” *Atmospheric Measurement Techniques*, vol. 11, no. 8, pp. 4823–4846, 2018, doi: 10.5194/amt-11-4823-2018.
- [18] M. Badura, P. Batog, A. Drzeniecka-Osiadacz and P. Modzel, “Evaluation of Low-Cost Sensors for Ambient PM_{2.5} Monitoring,” *Journal of Sensors*, vol. 2018, Article no. 5096540, doi: 10.1155/2018/5096540.x
- [19] SDS011 sensor, Nova Fitness Co., Ltd., Oct. 9, 2015. [Online]. Available: <https://cdn-reichelt.de/documents/datenblatt/X200/SDS011-DATASHEET.pdf>.
- [20] ZH03B Particles Sensor PM_{2.5} Dust Sensor, Zhengzhou Winsen Electronics Technology Co., Ltd., 2019. [Online]. Available: <https://www.winsen-sensor.com/sensors/dust-sensor/zh3b.html>.
- [21] T. Chalida (2015) Correlation and Regression Analysis [Online]. Available: <http://pws.npru.ac.th/chalida/data/files/บทที่%20สหสัมพันธ์และการถดถอย.pdf>.
- [22] S. Wijitwanna, “Correlation in Statistics: How to Use,” *Journal of Humanities and Social Sciences*, vol. 8, no. 2, pp. 1–15, 2022.
- [23] Y. Wei, X. Qiu, M. D. Yazdi, A. Shtein, L. Shi, J. Yang, A. A. Peralta, B. A. Coull and J. D. Schwartz, “The Impact of Exposure Measurement Error on the Estimated Concentration Response Relationship between Long-Term Exposure to PM_{2.5} and Mortality,” *Environmental Health Perspectives*, vol. 130, no. 7, Art. no. 077006, July 2022, doi: 10.1289/EHP10389.
- [24] *Thailand's air quality Information*, Pollution Control Department, Bangkok, Thailand, Nov. 30, 2022. [Online]. Available: <http://air4thai.pcd.go.th/webV2/history/>.
- [25] M. Zead, P. Biswas, S. Ghosh, Md. T. H. Maruf, Md. Shehzad, Md. I. Hasan and S. R. Shoshi, “Design and Implementation of Temperature & Relative Humidity Control System for Poultry Farm,” in *2020 International Conference on Computational Performance Evaluation (ComPE)*, Shillong, India, Jul. 2–4, 2020, pp. 90–108, doi: 10.1109/ComPE49325.2020.9200032.
- [26] Vissavavit Rachnarong, “A Study of Air Quality Effect by Creating a Device Detect PM_{2.5}, TVOC and CO₂-eq,” *Journal of Engineering and Digital Technology (JEDT)*, vol. 9, no. 2, pp. 37–48, 2021. (in Thai)