

การพัฒนาชุดเฝ้าระวัง แสดงผล แจ้งเตือน และควบคุมปริมาณ ฝุ่นละอองขนาดเล็ก (PM2.5) ด้วยระบบ IoT

สุชาติ หัตถ์สุวรรณ¹ ดวงดี วิเชียรโหด²

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ เพื่อพัฒนาชุดการเฝ้าระวัง แสดงผล แจ้งเตือน และควบคุมปริมาณฝุ่นละอองขนาดเล็ก (Particulate matter with a diameter of less than 2.5 microns; PM2.5) ด้วยระบบ IoT และประเมินประสิทธิภาพชุดการเฝ้าระวัง แสดงผล แจ้งเตือน และควบคุมปริมาณฝุ่นละอองขนาดเล็กด้วยระบบ IoT หลักการทำงานของเครื่องจะใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ NodeMCU/ESP8266 เป็นตัวควบคุมการอ่านค่าจากเซนเซอร์ตรวจวัดปริมาณฝุ่น PM2.5 รุ่น SPS30 และแจ้งเตือนผ่านแอปพลิเคชันไลน์ ผู้วิจัยติดตั้งและทดสอบในอาคาร 1 มหาวิทยาลัยราชภัฏธนบุรี กรุงเทพมหานคร และนำข้อมูลมาเปรียบเทียบกับปริมาณฝุ่นละอองขนาดเล็ก จากข้อมูลมาตรฐานของสถานีวัดคุณภาพอากาศ PM2.5 รหัส 02t กรุงเทพมหานคร ของกรมควบคุมมลพิษ ผลการประเมินประสิทธิภาพชุดเฝ้าระวัง แสดงผล แจ้งเตือน และควบคุมปริมาณฝุ่นละอองขนาดเล็กด้วยระบบ IoT ของผู้วิจัย พบว่าสามารถวัดปริมาณฝุ่นละอองขนาดเล็กได้ ค่าที่วัดได้ใกล้เคียงกันไปในทิศทางเดียวกันกับอุปกรณ์มาตรฐานของกรมควบคุมมลพิษ (ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ = 0.9445) และสามารถแจ้งเตือนทางแอปพลิเคชันไลน์ได้ ส่วนการควบคุมระดับฝุ่นละอองขนาดเล็กแบบพื้นที่ปิด พบว่าการฉีดละอองหมอกด้วยน้ำแรงดันสูง เป็นเวลา 20 นาที ไม่สามารถลดปริมาณฝุ่นละอองขนาดเล็กให้เป็นไปตามเกณฑ์ที่กำหนดได้ ส่วนการควบคุมระดับฝุ่นละอองขนาดเล็ก แบบพื้นที่เปิด พบว่า ถ้าค่าปริมาณฝุ่นละอองขนาดเล็กไม่เกิน 140 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร การฉีดละอองหมอกด้วยน้ำแรงดันสูงนั้นจะลดปริมาณฝุ่นละอองขนาดเล็กให้เป็นไปตามเกณฑ์ที่กำหนดภายในเวลา 20 นาที

คำสำคัญ : ฝุ่นละอองขนาดเล็ก ระบบ IoT ค่าดัชนีคุณภาพอากาศ

¹ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สาขาเทคโนโลยีการจัดการอุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏธนบุรี
อีเมล: suchart.h@dru.ac.th

² ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สาขาอุตสาหกรรมอาหาร คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏธนบุรี
อีเมล: duangdee.v@dru.ac.th

Development of a Surveillance, Display, Alert, and Control Kit for Small Particulate Matter (PM2.5) Using an IoT System

Suchart Hutsuwan¹ Duangdee Vichienhotu²

Abstract

The objectives of this research were to develop a surveillance kit for detecting, displaying, alerting, and controlling small particulate matter (particulate matter with a diameter of less than 2.5 microns; PM2.5) using an Internet of Things (IoT) system, and to evaluate its performance. The device operates using a NodeMCU/ESP8266 microcontroller, which controls the reading of data from the PM2.5 dust sensor model SPS30 and sends notifications via the LINE application. The kit was installed and tested in Building 1 of Dhonburi Rajabhat University, Bangkok, and the results were compared with standard PM2.5 data from the air quality monitoring station code 02T, located in Hiran Ruchi Subdistrict, Thonburi District, Bangkok, under the Pollution Control Department. The evaluation showed that the kit could effectively measure small particulate matter, providing values that closely correlated with those from the Pollution Control Department's dust meter (Coefficient of determination = 0.9445), and could send alerts to users via the LINE application. In terms of small particulate matter control, spraying high-pressure water mist for 20 minutes in a closed area was insufficient to reduce small particulate matter levels to the specified threshold. However, in an open area, if small particulate matter levels were below 140 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, spraying high-pressure water mist was effective in reducing the particulate matter to acceptable levels within 20 minutes.

Keywords: small particulate matter, IoT system, Air Quality Index.

¹ Assistant professor Dr., Industrial Management Technology Program, Faculty of Science and Technology, Dhonburi Rajabhat University, e-mail: suchart.h@dru.ac.th

² Assistant professor, Food Industry Program, Faculty of Science and Technology, Dhonburi Rajabhat University, e-mail: duangdee.v@dru.ac.th

บทนำ

ปัจจุบันประเทศไทยประสบปัญหาหมอกพิษทางอากาศจากฝุ่นละอองขนาดไม่เกิน 2.5 ไมครอน (PM 2.5) สูงเกินค่ามาตรฐานในช่วงระยะเวลาหนึ่งของทุกปี ส่งผลกระทบต่อสุขภาพและการดำเนินชีวิตของประชาชน ซึ่งตามประกาศคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมกำหนดให้ค่าเฉลี่ย 24 ชั่วโมงของฝุ่นละอองขนาดไม่เกิน 2.5 ไมครอน ในบรรยากาศโดยทั่วไป จะต้องไม่เกิน 37.5 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร (กรมควบคุมมลพิษ, 2565) การลดผลกระทบที่เกิดขึ้นนั้นจำเป็นต้องทราบถึงปริมาณของฝุ่นละอองในแต่ละพื้นที่ก่อน ซึ่งการดำเนินการดังกล่าวจำเป็นต้องอาศัยเครื่องมือตรวจวัดปริมาณฝุ่น PM2.5 เพื่อเฝ้าระวังและระบบการแจ้งเตือนผู้ที่อยู่ในพื้นที่เสี่ยง นำไปสู่นโยบายการป้องกันสุขภาพของประชาชนในภาวะมลพิษทางอากาศที่มีประสิทธิภาพในอนาคต

ความก้าวหน้าทางเทคโนโลยีในปัจจุบัน ทำให้เกิดการพัฒนาศูนย์วัดความเข้มข้นฝุ่นละอองขนาดเล็กที่มีต้นทุนต่ำ (low-cost sensors) มีการออกแบบให้มีชิ้นส่วนการทำงานน้อยลง ทำงานไม่ซับซ้อนและยังรักษาความแม่นยำในการวัดให้อยู่ในระดับที่ยอมรับได้ มีงานวิจัยจำนวนไม่น้อยได้ทำการทดสอบเซ็นเซอร์ต้นทุนต่ำกับเครื่องมือวัดที่ได้รับการรับรองโดย United States Environmental Protection Agency (US EPA) หรือ European Environment Agency (EEA) พบว่า ความแม่นยำของเซ็นเซอร์เหล่านี้ไม่สูงเกินกว่าเครื่องมือวัดที่ผ่านการรับรอง แต่ค่าที่วัดได้มีความสัมพันธ์กันในระดับสูง เช่น เซ็นเซอร์ SPS30 แบรนต์ Sensirion เป็นต้น (Wang et al., 2015; Nguyen, Nguyen, Le, & Vu, 2021; Suriano & Prato, 2023) นอกจากนี้ มีการประยุกต์ใช้เทคโนโลยี IoT (Internet of Things) เพื่อช่วยในการเข้าถึงและรับรู้ปริมาณฝุ่น PM2.5 จากการตรวจวัดแล้วส่งผ่านข้อมูลบนอินเทอร์เน็ต เพื่อให้ได้ข้อมูลแบบตามเวลาจริง และมีระบบเตือนภัยผ่านระบบแจ้งเตือนบนสมาร์ตโฟน (ศิลปินรงค์ ฉวีพัฒน์ และพรนรินทร์ สายกลิ่น, 2562; อติศักดิ์ ประพันธ์กุล และอภินิติ โชติสังกาศ, 2563; อมรรัตน์ คำบุญ และคณะ, 2565) ทำให้ผู้วิจัยเลือกใช้เซ็นเซอร์วัดความเข้มข้นฝุ่นละอองขนาดเล็ก ต้นทุนต่ำ และอุปกรณ์เซนเซอร์ในรูปแบบ IoT เพื่อสร้างเครื่องตรวจวัดที่สามารถตรวจวัดฝุ่น PM2.5 และมีระบบแจ้งเตือนผ่านโปรแกรมไลน์ (Line Notify) เพื่อแจ้งเตือนให้ผู้ที่อยู่ในพื้นที่ติดตั้งทราบถึงปริมาณฝุ่นที่สูงขึ้น นอกจากนี้ เพื่อที่จะลดผลกระทบต่อสุขภาพ เมื่อค่าฝุ่น PM2.5 มีค่าเกินมาตรฐาน ผู้วิจัยจึงสนใจที่จะพัฒนาอุปกรณ์ที่สามารถตรวจวัด แสดงผล แจ้งเตือน และควบคุมปริมาณฝุ่น PM2.5 ให้อยู่ในอุปกรณ์ชุดเดียวกัน มีขนาดเล็ก มีประสิทธิภาพในการตรวจวัดค่าฝุ่น PM2.5 ใกล้เคียงกับเครื่องมือมาตรฐาน ต้นทุนต่ำ และนำไปติดตั้งตามสถานที่ที่ต้องการเฝ้าระวังได้ง่าย

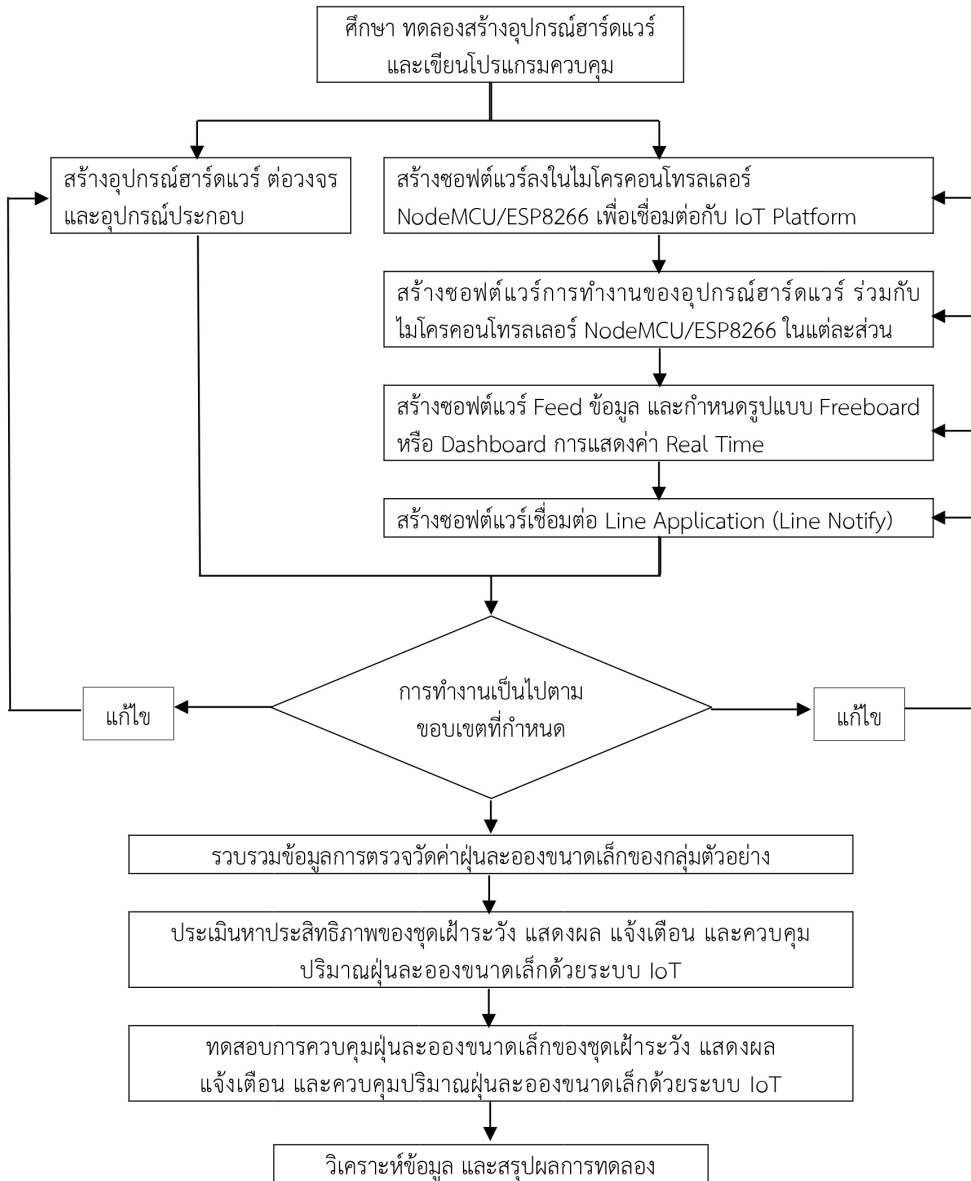
วัตถุประสงค์การวิจัย

1. เพื่อพัฒนาชุดเฝ้าระวัง แสดงผล แจ้งเตือน และควบคุมปริมาณฝุ่นละอองขนาดเล็กด้วยระบบ IoT

2. เพื่อประเมินประสิทธิภาพชุดเฝ้าระวัง แสดงผล แจ้งเตือน และควบคุมปริมาณฝุ่นละอองขนาดเล็กด้วยระบบ IoT

วิธีดำเนินการวิจัย

การวิจัยนี้เป็นการวิจัยเชิงทดลอง ผู้วิจัยได้ดำเนินการตามขั้นตอน ดังภาพที่ 1



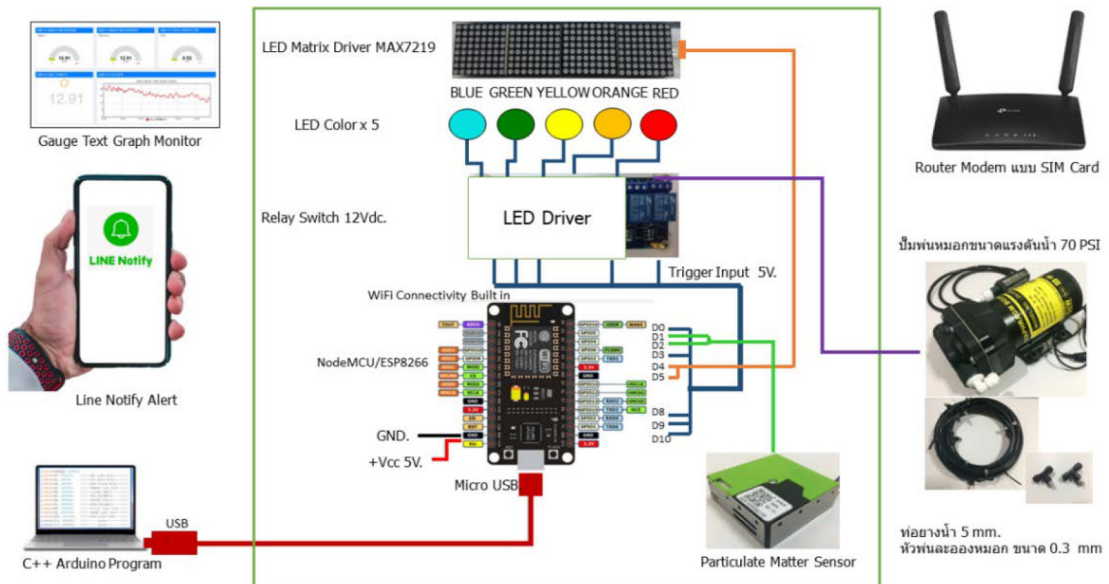
ภาพที่ 1 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย

1. การพัฒนาชุดเฝ้าระวัง แสดงผล แจ้งเตือน และควบคุมปริมาณฝุ่นละอองขนาดเล็กด้วยระบบ IoT

งานวิจัยนี้ได้พัฒนาชุดเฝ้าระวัง แสดงผล แจ้งเตือน และควบคุมปริมาณฝุ่นละอองขนาดเล็กด้วยระบบ IoT โดยการทำงานแบ่งเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนฮาร์ดแวร์ และส่วนซอฟต์แวร์ ดังนี้

1.1 ส่วนฮาร์ดแวร์

ในการวิจัยครั้งนี้ได้เลือกใช้เซ็นเซอร์ต้นทุนต่ำวัดค่าฝุ่น PM2.5 ที่ใช้เทคนิคการกระเจิงแสง ได้แก่ เซ็นเซอร์ SPS30 แปรนต์ Sensirion เนื่องจากมีราคาประมาณ 1,200 บาท และมีงานวิจัยหลายงานที่นำเซ็นเซอร์ดังกล่าวมาทดสอบ พบว่า ความแม่นยำของเซ็นเซอร์เหล่านี้ไม่สูงเกินกว่าเครื่องมือวัดที่ผ่านการรับรอง แต่ค่าที่วัดได้มีความสัมพันธ์กันในระดับสูง (ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ มากกว่า 0.95 ขึ้นไป) และใช้ NodeMCU/ESP8266 เป็นบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ที่ใช้เฟิร์มแวร์ Lua โอเพนซอร์ส ซึ่งเฟิร์มแวร์ดังกล่าวถูกออกแบบมาให้ใช้กับโมดูล ESP8266 และมี WiFi ทำให้ตัวบอร์ดเหมาะที่จะนำไปพัฒนาและใช้งานในลักษณะของ IoT Applications อีกทั้งมีราคาถูก และผู้พัฒนายังสามารถเขียนโปรแกรมควบคุมผ่านโปรแกรมภาษา C++ สำหรับ Arduino ซึ่งง่ายต่อการพัฒนาโปรแกรมในการใช้งานร่วมกับเซ็นเซอร์ต่าง ๆ และโมเด็มเราเตอร์ (modem router) แบบใส่ซิมการ์ดเพื่อต่อเชื่อมไปยัง IoT Platform (NETPIE-2015) ผ่านเครือข่ายอินเทอร์เน็ต โครงสร้างระบบการทำงานฮาร์ดแวร์ ดังภาพที่ 2



ภาพที่ 2 โครงสร้างระบบการทำงานฮาร์ดแวร์

ผู้วิจัยทำการพัฒนาฮาร์ดแวร์เพื่อใช้ในการตรวจวัดค่าฝุ่น PM2.5 ประกอบด้วยการเชื่อมต่อวงจรไมโครคอนโทรลเลอร์ NodeMCU/ESP8266 กับอุปกรณ์ประกอบที่ติดตั้งภายในกล่องพลาสติกขนาด 200 X 150 มิลลิเมตร ได้แก่ เซนเซอร์สำหรับตรวจวัดฝุ่นละอองขนาดเล็ก (SPS30-Particulate Matter Sensor) จอแสดงผลเป็นตัวเลขและตัวอักษร หลอดไฟแอลอีดี 5 สี แสดงระดับ AQI และรีเลย์สวิตช์ (relay switch) ควบคุมการเปิด-ปิด บีมน้ำแรงดันสูง

ในส่วนของอุปกรณ์ควบคุมปริมาณฝุ่นละอองขนาดเล็กใช้ระบบพ่นหมอกแรงดันสูง ประกอบด้วย 3 ส่วน ได้แก่ บีมน้ำแรงดันสูงขนาด 70 พีเอสไอ หัวพ่นหมอกขนาด 0.3 มิลลิเมตร จำนวน 10 หัว และท่อแรงดันขนาด 5 มิลลิเมตร ยาว 30 เมตร โดยระบบพ่นหมอกแรงดันสูงนี้จะพ่นน้ำให้ออกมาเป็นละอองหมอกขนาดเล็กมาก ๆ ใต้น้ำละอองฝอยที่พ่นจากบีมพ่นหมอกสามารถดักจับฝุ่นในอากาศให้ตกลงมาสู่พื้น โดยเฉพาะการดักจับฝุ่น PM2.5

1.2 ส่วนซอฟต์แวร์

ในการพัฒนาระบบด้านซอฟต์แวร์ ผู้วิจัยเขียนโปรแกรมภาษา C++ สำหรับ Arduino ใช้สำหรับควบคุมระบบไมโครคอนโทรลเลอร์ NodeMCU/ESP8266 เพื่อเชื่อมต่อกับ IoT Platform (NETPIE-2015) มีขั้นตอนดังนี้

1) สร้างซอฟต์แวร์ลงในชุดไมโครคอนโทรลเลอร์ NodeMCU/ESP8266 เชื่อมต่อกับ IoT Platform (NETPIE - 2015) เป็นการกำหนดค่าในโปรแกรมให้อุปกรณ์ NodeMCU/ESP8266 ได้รู้จักการใช้งาน ร่วมกับโมดูล WiFi, Microgear, Wire, บอร์ด Arduino และอุปกรณ์ Hardware ต่าง ๆ

2) สร้างซอฟต์แวร์การทำงานของอุปกรณ์ฮาร์ดแวร์ร่วมกับไมโครคอนโทรลเลอร์ NodeMCU/ESP8266 การกำหนด Input/Output Port โดยกำหนดค่าต่าง ๆ ให้สอดคล้องกับการต่อวงจรฮาร์ดแวร์

3) สร้างซอฟต์แวร์ควบคุมอุปกรณ์ตรวจวัดค่าฝุ่น PM 2.5 (SPS30-Particulate Matter Sensor) กำหนดค่าตัวแปรเป็นรูปแบบตัวอักษรเพื่อให้การวัดค่าฝุ่น PM2.5 นำไปแสดงค่าหรือเปรียบเทียบเป็นค่าเงื่อนไขต่าง ๆ ได้ทันที หน่วยเป็นไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร

4) สร้างซอฟต์แวร์ควบคุม LED Dot Matrix MAX7219 เพื่อกำหนดค่าของตำแหน่งการเชื่อมต่อวงจรและ Library ของอุปกรณ์ LED Dot Matrix MAX7219 ให้ไมโครคอนโทรลเลอร์รู้จัก และสามารถแสดงค่าตัวแปรและอักษรที่กำหนดตามเงื่อนไขต่าง ๆ แสดงที่ LED Dot Matrix โมดูลแบบต่อเนื่อง

5) สร้างซอฟต์แวร์ควบคุมชุดขับหลอด LED สีขนาด 10 มิลลิเมตร แสดงค่าฝุ่น PM2.5 เป็นสีด้วยหลอด LED และสีตามระดับของค่าดัชนีคุณภาพอากาศที่กรมควบคุมมลพิษกำหนด ดังนี้ สีฟ้า หมายถึง คุณภาพอากาศดีมาก สีเขียว หมายถึง คุณภาพอากาศดี สีเหลือง หมายถึง คุณภาพอากาศปานกลาง สีส้ม หมายถึง เริ่มมีผลกระทบต่อสุขภาพ และสีแดง หมายถึง มีผลกระทบต่อสุขภาพ

6) สร้างซอฟต์แวร์ Feed ข้อมูล และกำหนดรูปแบบการแสดงค่า Real Time เป็นการนำค่าตัวแปรที่อ่านได้จากอุปกรณ์เซนเซอร์ทั้งหมดนำขึ้นไปเก็บยัง IoT Platform

7) สร้างซอฟต์แวร์การเชื่อมต่อ Line Application (Line Notify) เป็นการเชื่อมโยงระหว่าง NodeMCU/ESP8266 NETPIE และ Line Application ให้สามารถแสดงผลแจ้งเตือนค่าฝุ่นละอองตามช่วงเวลาที่กำหนดด้วย Line Notify ไปยังกลุ่ม Line ที่กำหนดขึ้นเพื่อให้สมาชิกในกลุ่มสามารถทราบข้อมูลดัชนีคุณภาพอากาศ และค่าฝุ่น PM2.5 ในช่วงเวลาที่กำหนดขึ้นแต่ละวัน

2. การประเมินประสิทธิภาพของชุดเฝ้าระวัง แสดงผล แจ้งเตือน และควบคุมปริมาณฝุ่นละอองขนาดเล็กด้วยระบบ IoT

ชุดเฝ้าระวัง แสดงผล แจ้งเตือน และควบคุมปริมาณฝุ่นละอองขนาดเล็กด้วยระบบ IoT ที่พัฒนาขึ้นมา และติดตั้งในที่โล่งใต้ชายคาที่มีการบังแสงแดดและฝน ณ อาคาร 1 ชั้น 9 มหาวิทยาลัยราชภัฏธนบุรี ผู้วิจัยได้ทำการรวบรวมข้อมูล ดังนี้

2.1 ข้อมูลค่าปริมาณฝุ่นละอองขนาดเล็กที่ได้จากชุดการเฝ้าระวัง แสดงผล แจ้งเตือน และควบคุมปริมาณฝุ่นละอองขนาดเล็กด้วยระบบ IoT ของผู้วิจัยที่ติดตั้ง ณ บริเวณลาน อาคาร 1 ชั้น 9 มหาวิทยาลัยราชภัฏธนบุรี จะถูกส่งไปเก็บไว้ที่ IoT Platform จากนั้นจะดึงข้อมูลแบบต่อทุก 15 นาทีแบบต่อเนื่อง นำมาเฉลี่ยเป็นรายชั่วโมง ตลอดทั้งวัน ระหว่างวันที่ 24 มกราคม พ.ศ. 2565 ถึง 25 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2565 เป็นระยะเวลา 33 วัน

2.2 ข้อมูลค่าปริมาณฝุ่นละอองขนาดเล็กของสถานีมาตรฐานวัดคุณภาพอากาศ PM2.5 รหัส 02t แขวงหิรัญบุรี เขตธนบุรี กรุงเทพมหานคร ของกรมควบคุมมลพิษ เป็นรายชั่วโมง จากเว็บไซต์ Air4Thai (pcd.go.th)

2.3 เปรียบเทียบค่าปริมาณฝุ่นละอองขนาดเล็กที่ได้จากชุดการเฝ้าระวัง แสดงผล แจ้งเตือน และควบคุมปริมาณฝุ่นละอองขนาดเล็กด้วยระบบ IoT ของผู้วิจัย กับค่าปริมาณฝุ่นละอองขนาดเล็กของสถานีมาตรฐานวัดคุณภาพอากาศ PM2.5 เพื่อประเมินประสิทธิภาพ ใช้การวิเคราะห์หาค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (coefficient of determination; r^2) ด้วยการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้น (linear regression analysis) และการทดสอบค่าซี (Z-test) ที่ระดับนัยสำคัญทางสถิติ 0.05

3. การควบคุมปริมาณฝุ่นละอองขนาดเล็กในพื้นที่เปิดและปิดที่มีระดับค่าฝุ่นละอองขนาดเล็กสูงเกินค่ามาตรฐาน ของชุดเฝ้าระวัง แสดงผล แจ้งเตือน และควบคุมปริมาณฝุ่นละอองขนาดเล็กด้วยระบบ IoT

การทดสอบการควบคุมปริมาณฝุ่นละอองขนาดเล็กในพื้นที่เปิดและปิดที่มีระดับค่าฝุ่นละอองขนาดเล็กสูงเกินค่ามาตรฐาน ของชุดเฝ้าระวัง แสดงผล แจ้งเตือน และควบคุมปริมาณฝุ่นละอองขนาดเล็กด้วยระบบ IoT เนื่องจากมีข้อจำกัดในการเลือกพื้นที่ทดลองที่สามารถควบคุมสภาวะการทดลองได้ทั้งระบบปิดระบบเปิด และเหมาะกับการจำลองสถานการณ์ให้มีระดับค่าฝุ่นละอองขนาดเล็กสูงเกินค่ามาตรฐาน

ผู้วิจัยจึงเลือกทำการจำลองสถานการณ์ฝุ่นละอองขนาดเล็กด้วยการใช้คอมพิวเตอร์อย่างต่อเนื่องให้มีการแสดงค่าฝุ่นละอองมากกว่า 90 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร (ค่าเกินมาตรฐานที่กรมควบคุมมลพิษกำหนด) ณ ห้อง 193 อาคาร 1 ชั้น 9 มหาวิทยาลัยราชภัฏธนบุรี ซึ่งมีขนาด 8 x 8 x 2.5 เมตร โดยพื้นที่ทดลองแบบปิด หมายถึง ปิดประตู หน้าต่างเพื่อป้องกันอากาศเคลื่อนที่ และพื้นที่ทดลองแบบเปิด หมายถึง เปิดประตู หน้าต่างให้อากาศสามารถเคลื่อนที่ได้

จากนั้น ผู้วิจัยได้ทำการติดตั้งเครื่องวัดไวด์ตรงจุดกึ่งกลางห้อง ติดตั้งชุดพ่นละอองหมอกน้ำประกอบด้วยปั้มน้ำแรงดันสูงขนาด 70 พีเอสไอ ท่อแรงดันขนาด 5 มิลลิเมตร ยาว 30 เมตร และหัวพ่นหมอกขนาด 0.3 มิลลิเมตร จำนวน 10 หัว เมื่อค่าฝุ่น PM2.5 มีค่าเกินมาตรฐาน ชุดควบคุมจะสั่งให้ปั้มน้ำแรงดันสูงทำงาน พ่นละอองหมอกกระจายทั่วห้องทดลอง ครั้งละ 20 นาที และตรวจวัดปริมาณฝุ่นละอองขนาดเล็กทุก ๆ 2 นาที ทำการทดลองอย่างน้อย 3 ชั่วโมง

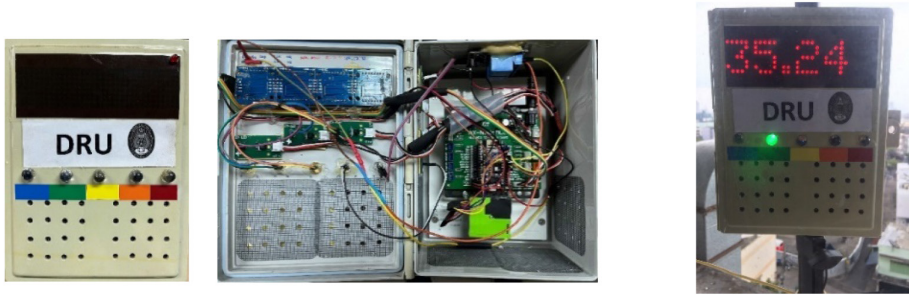
ผลการวิจัยและอภิปรายผล

การวิจัยนี้มุ่งพัฒนาและประเมินประสิทธิภาพของชุดเฝ้าระวัง แสดงผล แจ้งเตือน และควบคุมปริมาณฝุ่นละอองขนาดเล็กด้วยระบบ IoT สำหรับผลการวิจัย มีดังนี้

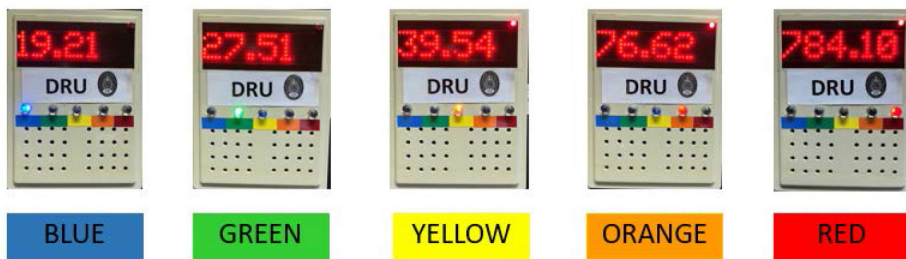
1. ผลการพัฒนาชุดเฝ้าระวัง แสดงผล แจ้งเตือน และควบคุมปริมาณฝุ่นละอองขนาดเล็กด้วยระบบ IoT

ชุดเฝ้าระวัง แสดงผล แจ้งเตือน และควบคุมปริมาณฝุ่นละอองขนาดเล็กด้วยระบบ IoT ที่พัฒนาขึ้นมา และติดตั้งในที่โล่งใต้ชายคาที่มีการบังแสงแดดและฝน ณ อาคาร 1 ชั้น 9 มหาวิทยาลัยราชภัฏธนบุรี ดังภาพที่ 3 สามารถตรวจวัดค่าฝุ่นละอองขนาดเล็กแสดงค่าปัจจุบันแบบเรียลไทม์ทุก 15 วินาที และการติดสว่างของหลอดแอลอีดีแสดงผลด้วยสี ตามระดับค่าดัชนีคุณภาพอากาศที่กรมมลพิษกำหนดได้อย่างสมบูรณ์ ดังภาพที่ 4

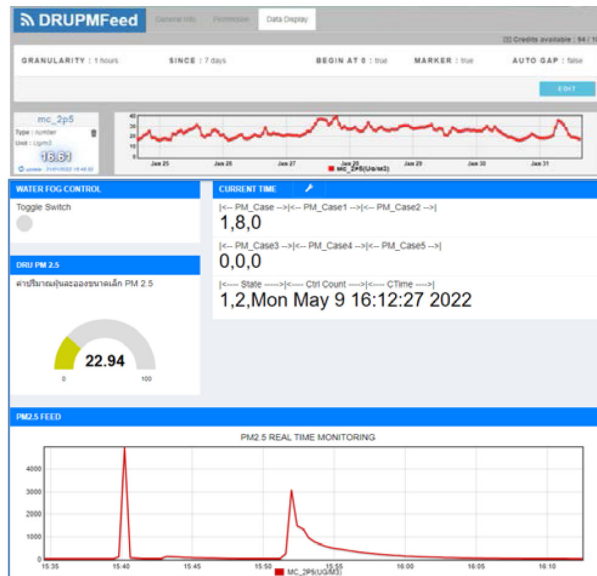
การรายงานค่าปริมาณฝุ่นละอองขนาดเล็ก (หน่วย ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร) ตามเวลาจริง และข้อมูลย้อนหลังที่เก็บไว้ที่ IoT Platform (NETPIE-2015) ดังภาพที่ 5 และแจ้งเตือนด้วย Line Notify ไปยังกลุ่มไลน์ที่กำหนดขึ้นเพื่อให้สมาชิกในกลุ่มสามารถทราบข้อมูลค่าปริมาณฝุ่นละอองขนาดเล็ก และค่าดัชนีคุณภาพอากาศในช่วงเวลาที่กำหนดในแต่ละวัน ดังภาพที่ 6



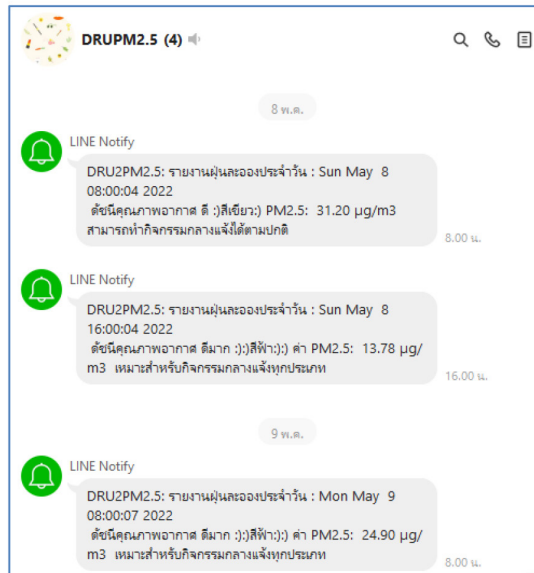
ภาพที่ 3 ชุดแผ่กระจาย แสดงผล แจ้งเตือน และควบคุมปริมาณฝุ่นละอองขนาดเล็กด้วยระบบ IoT และติดตั้ง ณ อาคาร 1 ชั้น 9 มหาวิทยาลัยราชภัฏธนบุรี



ภาพที่ 4 การแสดงค่าฝุ่นละอองขนาดเล็กและการติดสว่างของหลอดแอลอีดีแสดงผลด้วยสีตามระดับค่าดัชนีคุณภาพอากาศที่กรมมลพิษกำหนด



ภาพที่ 5 ค่าปริมาณฝุ่นละอองขนาดเล็กตามเวลาจริง และข้อมูลย้อนหลังที่เก็บไว้ที่ IoT Platform (NETPIE-2015)

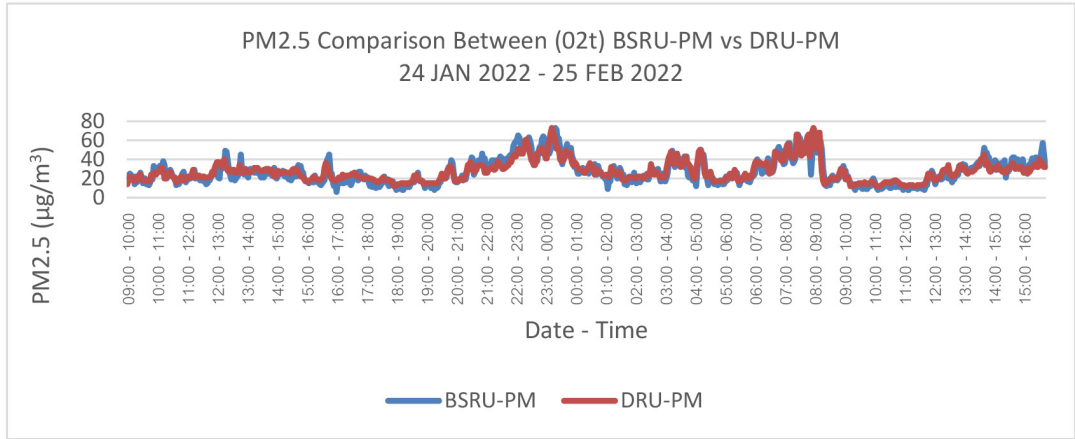


ภาพที่ 6 ข้อความแจ้งเตือนไปยังกลุ่มไลน์ช่วงเวลา 8.00 น. และ 16.00 น.

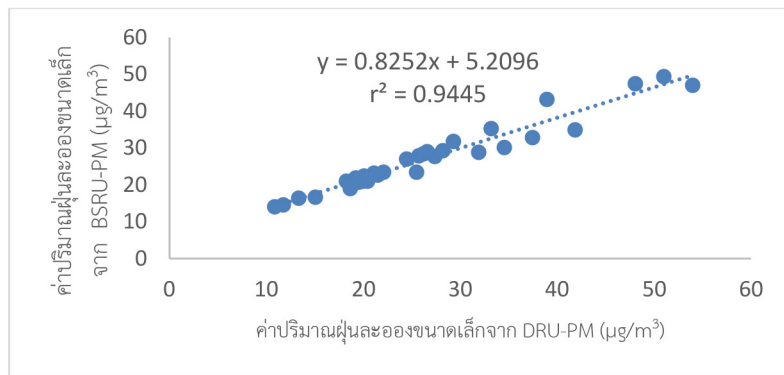
2. ผลการประเมินประสิทธิภาพชุดเฝ้าระวัง แสดงผล แจ้งเตือน และควบคุมปริมาณฝุ่นละอองขนาดเล็กด้วยระบบ IoT

ผลการประเมินประสิทธิภาพชุดเฝ้าระวัง แสดงผล แจ้งเตือน และควบคุมปริมาณฝุ่นละอองขนาดเล็กด้วยระบบ IoT ของผู้วิจัย โดยการเปรียบเทียบข้อมูลที่ได้จากชุดเฝ้าระวัง แสดงผล แจ้งเตือน และควบคุมปริมาณฝุ่นละอองขนาดเล็กด้วยระบบ IoT ของผู้วิจัย กับอุปกรณ์มาตรฐานจากสถานี O2t แขวงทิวรุจิ เขตธนบุรี กรุงเทพมหานคร ของกรมควบคุมมลพิษ พบว่า ค่าปริมาณฝุ่นละอองขนาดเล็กที่วัดได้จากเครื่องวัดฝุ่นละอองขนาดเล็กที่ผู้วิจัยพัฒนาขึ้น (DRU-PM) กับค่าปริมาณฝุ่นละอองขนาดเล็กที่วัดได้จากสถานีมาตรฐาน O2t (BSRU-PM) แสดงเป็นค่าเฉลี่ยรายชั่วโมง ระหว่างวันที่ 24 มกราคม พ.ศ. 2565 ถึง 25 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2565 ดังภาพที่ 7 พบว่า กราฟทั้งสองมีแนวโน้มของกราฟเป็นไปในทิศทางเดียวกัน เมื่อนำค่าเฉลี่ยปริมาณฝุ่นละอองขนาดเล็กที่วัดได้จากเครื่องวัดที่ผู้วิจัยพัฒนากับเครื่องวัดจากสถานีมาตรฐาน O2t มาเปรียบเทียบกันโดยใช้การทดสอบค่าซี พบว่า แตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \geq 0.05$) นอกจากนี้ เมื่อนำข้อมูลค่าเฉลี่ยรายชั่วโมงมาทำเป็นค่าเฉลี่ยราย 24 ชั่วโมง และเปรียบเทียบระหว่างเครื่องวัดที่ผู้วิจัยพัฒนากับเครื่องวัดจากสถานีมาตรฐาน O2t ดังภาพที่ 8 พบว่า ค่าปริมาณฝุ่นละอองขนาดเล็กเฉลี่ยราย 24 ชั่วโมง มีความสัมพันธ์เชิงเส้นตามสมการ $y = 0.8252x + 5.2096$ และมีความสัมพันธ์สหสัมพันธ์ (r^2) ในระดับสูงถึง 0.9445 แสดงให้เห็นว่า ผลการวัดค่าปริมาณฝุ่นละอองขนาดเล็กจากเครื่องวัดที่ผู้วิจัยพัฒนาสอดคล้องกับเครื่องวัดจากสถานีมาตรฐาน O2t และสอดคล้องกับงานวิจัยของ (อาทิตย์ ยาวุฑฒิ, สมศักดิ์ วรรณชัย, พิสิษฐ์ วิมลธนสิทธิ์, จักรินทร์ ถิ่นนคร, และเศรษฐ์ สัมภัตตะกุล, 2562) ที่พัฒนาเครื่องวัดฝุ่นละอองขนาดเล็กซึ่งมีผลการวัดที่สอดคล้องกับเครื่องวัดฝุ่น

มาตรฐาน PCD68T ณ สถานีอุตุนิยมวิทยา ลำพูน และมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (0.9693) ในระดับสูงเช่นกัน



ภาพที่ 7 กราฟแสดงค่าปริมาณฝุ่นละอองขนาดเล็กเฉลี่ยรายชั่วโมงระหว่างเครื่องวัดจากสถานีมาตรฐาน 02t (BSRU-PM) กับ เครื่องวัดที่พัฒนาขึ้น (DRU-PM)



ภาพที่ 8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ค่าปริมาณฝุ่นละอองขนาดเล็กเฉลี่ยราย 24 ชั่วโมง ของเครื่องวัดสถานีมาตรฐาน 02t (BSRU-PM) กับ เครื่องวัดที่พัฒนาขึ้น (DRU-PM)

3. ผลการควบคุมฝุ่นละอองขนาดเล็กในพื้นที่เปิดและปิดที่มีระดับค่าฝุ่นละอองขนาดเล็กสูงเกินค่ามาตรฐาน ของชุดฝ้าระวาง แสดงผล แจ็งเตือน และควบคุมปริมาณฝุ่นละอองขนาดเล็กด้วยระบบ IoT

การติดตั้งชุดการฝ้าระวาง แสดงผลแจ็งเตือน และควบคุมปริมาณฝุ่นละอองขนาดเล็กด้วยระบบ IoT และอุปกรณ์ควบคุมปริมาณฝุ่นละอองขนาดเล็กใช้ระบบพ่นหมอกแรงดันสูง ในห้องทดลองขนาด 8 x 8 x 2.5 เมตร ดังภาพที่ 9



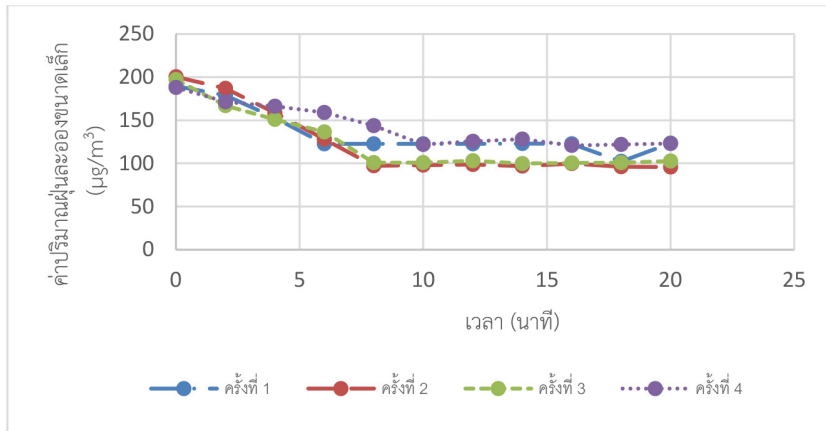
หัวพ่นหมอกขนาด 0.3 มิลลิเมตร



ปั้มน้ำขนาดแรงดัน 70 พีเอสไอ

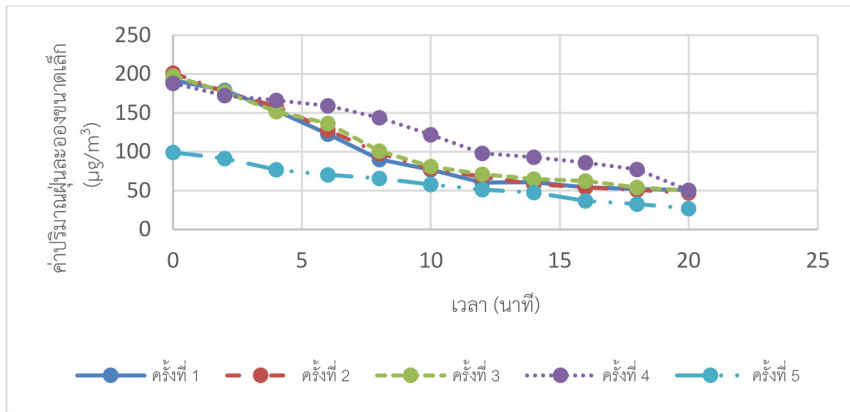
ภาพที่ 9 การติดตั้งชุดการ फैาระวัง แสดงผลแจ้งเตือน และควบคุมปริมาณฝุ่่นละอองขนาดเล็กด้วยระบบ IoT และอุปกรณ์ควบคุมปริมาณฝุ่่นละอองขนาดเล็กใช้ระบบพ่นหมอกแรงดันสูงในห้องทดลองขนาด $8 \times 8 \times 2.5$ เมตร

ผลการทดลองการควบคุมฝุ่่นละอองขนาดเล็กในพื้นที่ปิดโดยการฉีดละอองหมอกด้วยน้ำแรงดันสูงให้กระจายทั่วห้อง จำนวน 4 ครั้ง ครั้งละ 20 นาที ตรวจวัดปริมาณฝุ่่นละอองขนาดเล็กทุก ๆ 2 นาที ดังภาพที่ 10 พบว่า ค่าปริมาณฝุ่่นละอองขนาดเล็กมีแนวโน้มลดลงตามเวลา เมื่อระยะเวลาผ่านไป 20 นาที ประสิทธิภาพในการลดปริมาณฝุ่่นละอองขนาดเล็กเฉลี่ยอยู่ที่ร้อยละ 42.39 สอดคล้องกับงานวิจัย (Kim, Kim, & Lee, 2020) ที่รายงานว่า ค่าปริมาณฝุ่่นละอองขนาดเล็กภายในห้องทดลองแบบปิดจะลดลง หลังจากเปิดอุปกรณ์สร้างละอองหมอกน้ำอย่างต่อเนื่องเป็นเวลา 5 นาที และละอองน้ำขนาดเล็กมีประสิทธิภาพในการลดปริมาณฝุ่่นละอองขนาดเล็กอยู่ที่ร้อยละ 24.4 นอกจากนี้ จากภาพที่ 10 แสดงให้เห็นว่า เมื่อเวลาผ่านไป 20 นาที หลังจากเปิดอุปกรณ์สร้างละอองหมอกน้ำ ค่าปริมาณฝุ่่นละอองขนาดเล็กยังคงมีค่าเกินมาตรฐานที่กรมมลพิษกำหนด ทั้งนี้เป็นเพราะว่าสถานที่ปิดนั้นเป็นสถานที่อากาศไม่สามารถหมุนเวียนถ่ายเทได้ ดังนั้น การลดปริมาณฝุ่่นละอองขนาดเล็กจะขึ้นอยู่กับประสิทธิภาพของชุดพ่นละอองหมอกน้ำเพียงอย่างเดียว ซึ่งการเพิ่มประสิทธิภาพของการจับตัวกันของฝุ่่นละอองกับน้ำที่เกิดขึ้นได้จากปัจจัยต่าง ๆ เช่น เพิ่มระยะเวลาในการพ่นละอองน้ำ ปรับระดับความดันน้ำของอุปกรณ์ฉีดพ่นละอองน้ำให้สูงขึ้น (Wang, Wang, Song, & Wen, 2019) ผสมสารลดแรงตึงผิวเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการลดปริมาณฝุ่่นละอองขนาดเล็ก (Wang, Tan, Zhang, Li, & Liu, 2019) เป็นต้น



ภาพที่ 10 ผลการทดสอบการควบคุมฝุ่นละอองขนาดเล็กในพื้นที่ปิด

ผลการทดลองการควบคุมฝุ่นละอองขนาดเล็กในพื้นที่เปิด โดยเปิดประตูและหน้าต่างให้มีการไหลเวียนจากอากาศภายนอกเข้ามายังพื้นที่ทดลอง ผู้วิจัยได้ทำการติดตั้งเครื่องวัดไวด์ตรงจุดกึ่งกลางห้อง และติดตั้งชุดพ่นละอองหมอกน้ำเหมือนการทดลองในพื้นที่ปิดทุกประการ ผลการทดลอง ดังภาพที่ 11 พบว่า การทดลองครั้งที่ 1, 2, 3 และ 4 เริ่มต้นมีค่าปริมาณฝุ่นละอองขนาดเล็ก อยู่ระหว่าง 188.12-201.19 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร เมื่อเวลาผ่านไปปริมาณฝุ่นละอองขนาดเล็กมีแนวโน้มลดลง ส่งผลให้ระดับสีของค่าดัชนีคุณภาพอากาศเปลี่ยนจากสีแดง (ค่าเกินมาตรฐาน) เป็นสีเขียว (47.19-50.00 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร) ใช้เวลา 20 นาที ส่วนการทดลองครั้งที่ 5 เริ่มต้นมีค่าปริมาณฝุ่นละอองขนาดเล็ก 99.04 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร เมื่อเวลาผ่านไปปริมาณฝุ่นละอองขนาดเล็กมีแนวโน้มลดลง ส่งผลให้ระดับสีของค่าดัชนีคุณภาพอากาศเปลี่ยนจากสีแดง (ค่าเกินมาตรฐาน) เป็นสีเขียว (36.79 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร) ใช้เวลา 16 นาที และประสิทธิภาพในการลดปริมาณฝุ่นละอองขนาดเล็กในพื้นที่เปิดเฉลี่ยอยู่ที่ร้อยละ 74.20 ซึ่งแสดงให้เห็นว่า ถ้าค่าปริมาณฝุ่นละอองขนาดเล็กไม่เกิน 140 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ภายในเวลา 20 นาที จะลดค่าปริมาณฝุ่นละอองขนาดเล็กลงให้เป็นไปตามเกณฑ์ที่กำหนด (37.5 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)ได้และเมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของชุดพ่นละอองหมอกน้ำเพื่อลดปริมาณฝุ่นละอองขนาดเล็กในพื้นที่เปิดกับพื้นที่ปิด พบว่า การลดปริมาณฝุ่นละอองขนาดเล็กในพื้นที่เปิดมีประสิทธิภาพมากกว่าการลดปริมาณฝุ่นละอองขนาดเล็กในพื้นที่ปิด ทั้งนี้เป็นเพราะว่าฝุ่นละอองขนาดเล็กที่ลอยอยู่ในอากาศลดลงได้นั้น เกิดจากการเคลื่อนที่หรือเกิดการไหลเวียนของอากาศในบริเวณนั้นนั่นเอง โดยละอองหมอกที่พ่นออกมาด้วยปั้มน้ำแรงดันสูงจะเป็นตัวช่วยไม่ทำให้ปริมาณฝุ่นละอองขนาดเล็กมีปริมาณเพิ่มขึ้น ทั้งนี้ปริมาณฝุ่นละอองขนาดเล็กที่ลอยอยู่ในอากาศจะแปรผันตรงกับอัตราการไหลเวียนและถ่ายเทของอากาศ สอดคล้องกับงานวิจัยของ (จินตนา ปีสิงห์, 2557) พบว่า ฝุ่นละอองขนาดเล็ก 2.5 ไมครอน ในห้องพักสูบบุหรี่และบริเวณหน้าประตูมีการกระจายตัวของควันบุหรี่หรือออกสู่ภายนอกห้องอย่างชัดเจน โดยเฉพาะในขณะเปิด-ปิดประตูซึ่งเป็นการเพิ่มให้ควันบุหรี่วไหลดกระจายตัวออกภายนอกห้องได้ตลอดเวลา



ภาพที่ 11 ผลการทดสอบการควบคุมฝุ่นละอองขนาดเล็กในพื้นที่เปิด

บทสรุป

การพัฒนาชุดการเฝ้าระวัง แสดงผล แจ้งเตือน และควบคุมปริมาณฝุ่นละอองขนาดเล็กด้วยระบบ IoT สามารถแสดงผลแบบเรียลไทม์ การติดตั้งของหลอดแอลอีดีแสดงผลด้วยสี ตามระดับค่าดัชนีคุณภาพอากาศที่กรมมลพิษกำหนดได้อย่างสมบูรณ์ และแจ้งเตือนด้วย Line Notify ไปยังกลุ่มไลน์ที่กำหนดขึ้นเพื่อให้สมาชิกในกลุ่มสามารถทราบข้อมูลค่าปริมาณฝุ่นละอองขนาดเล็ก และค่าดัชนีคุณภาพอากาศในช่วงเวลาที่กำหนดในแต่ละวันได้ ส่วนการประเมินประสิทธิภาพประเมินได้จากการวัดปริมาณฝุ่นละอองขนาดเล็กในอากาศต่อเนื่อง เปรียบเทียบกับเครื่องมือวัดมาตรฐานของกรมควบคุมมลพิษ ณ สถานีมาตรฐานวัดคุณภาพอากาศ O2t เขตธนบุรี กรุงเทพมหานคร พบว่า มีผลการวัดที่สอดคล้องกันและมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ที่สูงมาก นอกจากนี้ การควบคุมฝุ่นละอองขนาดเล็กในพื้นที่ปิดและเปิดที่มีระดับค่าฝุ่นละอองขนาดเล็กสูงเกินค่ามาตรฐานของชุดพ่นละอองหมอกน้ำ ภายในระยะเวลา 20 นาที พบว่า ประสิทธิภาพในการลดปริมาณฝุ่นละอองขนาดเล็กเฉลี่ยอยู่ที่ร้อยละ 42.39 และร้อยละ 74.20 ตามลำดับ

องค์ความรู้ที่ได้จากการวิจัยครั้งนี้ นำไปสู่การพัฒนาเครื่องตรวจวัดฝุ่น PM2.5 ที่มีประสิทธิภาพใกล้เคียงกับเครื่องตรวจวัดมาตรฐาน มีขนาดเล็ก ต้นทุนต่ำ สามารถเคลื่อนย้ายและติดตั้งได้ง่าย หากนำไปติดตั้งเพิ่มจำนวนจุดวัดให้ครอบคลุมพื้นที่ชุมชนในการเฝ้าระวังวิกฤตของฝุ่น PM2.5 ข้อมูลที่ได้จะนำไปใช้เพิ่มความถูกต้องของข้อมูลเชิงพื้นที่เพื่อใช้โมเดลการคาดคะเนข้อมูลค่าฝุ่น PM2.5 ที่ต้องการผลการวิเคราะห์ที่ใกล้เคียงกับสภาพจริงในพื้นที่นำไปสู่นโยบายการป้องกันสุขภาพของประชาชนในภาวะมลพิษทางอากาศที่มีประสิทธิภาพในอนาคต

ข้อเสนอแนะ

1. ระบบในการพ่นละอองหมอกด้วยน้ำแรงดันสูงสามารถนำไปประยุกต์ใช้ร่วมกับการจัดภูมิสถาปัตยกรรม (Landscape) ในพื้นที่ต่าง ๆ ให้มีความลงตัวและสวยงาม

2. สามารถนำชุดเผื่อารวัง แสดงผล แจ้งเตือน และควบคุมปริมาณฝุ่นละอองขนาดเล็กไปขยายผลเพิ่มเติม เช่น ใช้อุปกรณ์ไมโครคอนโทรลเลอร์ NodeMCU/ESP8266 ขยายพอร์ตเพื่อเพิ่มอุปกรณ์เซ็นเซอร์ในการวัดค่าอื่น ๆ และระบบการควบคุมในรูปแบบต่าง ๆ เพิ่มเติม เช่น การแจ้งเตือนด้วยเสียงหรือการควบคุมระบบการดูดปริมาณฝุ่นละอองขนาดเล็กขณะที่มีค่าเกินมาตรฐาน เป็นต้น

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณสถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยราชภัฏธนบุรี ที่ให้ทุนสนับสนุนการวิจัยครั้งนี้

บรรณานุกรม

- กรมควบคุมมลพิษ. (2565). ประกาศคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ เรื่อง กำหนดมาตรฐานฝุ่นละอองขนาดเล็กไม่เกิน 2.5 ไมครอน ในบรรยากาศโดยทั่วไป ค่าเฉลี่ยในเวลา 24 ชั่วโมง. ค้นเมื่อ 14 ธันวาคม 2565, จาก <https://www.pcd.go.th/laws/26439>.
- จินตนา ปีสิงห์. (2557). ระดับฝุ่นละอองขนาดเล็กกว่า 2.5 ไมครอน (PM2.5) จากควันบุหรี่มือสองในบริเวณใกล้เคียงและภายในห้องพักสูบบุหรี่ของสนามบินนานาชาติสุวรรณภูมิ. ค้นเมื่อ 20 กันยายน 2564, จาก <https://www.trc.or.th/th/attachments/article/144/009FS.pdf>.
- ศิลป์ณรงค์ ฉวีพัฒน์ และพรนรินทร์ สายกลิ่น. (2562). การประยุกต์ใช้เทคโนโลยี Narrow Band Internet of Thing ในการสร้างต้นแบบสถานีตรวจวัดคุณภาพอากาศ ภายในมหาวิทยาลัยราชภัฏกำแพงเพชร. การประชุมวิชาการระดับชาติ ครั้งที่ 5 สถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยราชภัฏกำแพงเพชร. (น. 259-270). กำแพงเพชร : มหาวิทยาลัยราชภัฏกำแพงเพชร.
- อมรรัตน์ คำบุญ, ณัฐดนัย สิงห์ศิวัตร, กัลยา ธนาสินธ์, ธีรวิทย์ อัสวศิลป์กุล, วรินทร์ นวลทิม, และสายัณ พุชลา. (2565). การพัฒนาแอปพลิเคชันเพื่อแสดงค่าฝุ่น PM2.5 และค่าดัชนีคุณภาพอากาศ. วารสารก้าวทันโลกวิทยาศาสตร์. 22(1), น. 173-189.
- อดิศักดิ์ ประพันธ์กุล และอภินิติ โชติสังกาศ. (2563). การประยุกต์ใช้ระบบตรวจวัดเพื่อควบคุมฝุ่นในพื้นที่ก่อสร้างโดยใช้เทคโนโลยีไอโอที อินเทอร์เน็ตในทุกสิ่ง. การประชุมทางวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 58: สาขาวิทยาศาสตร์, สาขาวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์, สาขาอุตสาหกรรมเกษตร, สาขาทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม. (น. 352-361). กรุงเทพมหานคร: มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

อาทิตย์ ยาวุฒิ, สมศักดิ์ วรรณชัย, พิสิษฐ์ วิมลธนสิทธิ์, จักรินทร์ ถิ่นนคร, และเศรษฐ์ สัมภัตตะกุล.
(2562). การพัฒนาเครื่องวัดฝุ่นหลักการทางแสงและเปรียบเทียบผลการวัดกับเครื่องมือวัดมาตรฐาน.
การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 42. นครปฐม : มหาวิทยาลัยมหิดล.

Kim, J., Kim, J. J., & Lee, S. J. (2020). Efficient removal of indoor particulate matter Using water microdroplets generated by a MHz-frequency ultrasonic atomizer. **Building and Environment**, 175, pp. 1-7. Retrieved May 7, 2023, from <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.106797>.

Nguyen, N. H., Nguyen, H. X., Le, T. B., & Vu, C. D. (2021). Evaluating low-cost commercially available sensors for air quality monitoring and application of sensor calibration methods for improving accuracy. **Open Journal of Air Pollution**, 10(1), pp. 1-17. Retrieved May 9, 2023, from <https://doi.org/10.4236/ojap.2021.101001>.

Suriano, D., & Prato, M. (2023). An investigation on the possible application areas of low-cost PM sensors for air quality monitoring. **Sensors**, 23(8), pp. 1-18. Retrieved May 9, 2023, from <https://doi.org/10.3390/s23083976>.

Wang, P., Tan, X., Zhang, L., Li, Y., & Liu, R. (2019). Influence of particle diameter on the wettability of coal dust and the dust suppression efficiency via spraying. **Process Safety and Environmental Protection**, 132(2), pp. 189-199. Retrieved May 7, 2023, from <https://doi.org/10.1016/j.psep.2019.09.031>.

Wang, S., Wang, J., Song, C., & Wen, J. (2019). Numerical investigation on urea particle removal in a spray scrubber using particle capture theory. **Chemical Engineering Research and Design**, 145(May 2019), pp. 150-158. Retrieved May 7, 2023, from <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2019.03.011>.

Wang, Y., Li, J., Jing, H., Zhang, Q., Jiang, J., & Biswas, P. (2015). Laboratory evaluation and calibration of three Low-Cost Particle Sensors for particulate matter measurement. **Aerosol Science and Technology**, 49(11), p. 1063-1077.