

หอฟอกอากาศเทคนิคสครับเบอร์ ชนิดสเปรย์น้ำผสมผสานระบบน้ำปั่นป่วน และควบคุมการทำงาน ด้วยเทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง

HYBRID WET SCRUBBER TOWER WITH
IOT-BASED OPERATION CONTROL

ณัฐกิตติ จิตรเอื้อตระกูล¹

เอกสิทธิ์ วันสม²

ธราพงษ์ วิจิตตสาบต³

จิรายุ เสมกันทา⁴

Nattagit Jiteurtragool¹

Akasit Wansom²

Tharapong Vitidsant³

Jirayu Samkunta⁴

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ กรุงเทพฯ 10800¹

บริษัท ไทยโซลาร์เวย์ จำกัด นนทบุรี 11120²

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย กรุงเทพฯ 10330³

มหาวิทยาลัยกุนมะ กุนมะ 376-8515 ญี่ปุ่น⁴

King Mongkut's University of Technology North Bangkok, Bangkok 10800 Thailand¹

Thai Solar Way Co., Ltd., Nonthaburi 11120 Thailand²

Chulalongkorn University, Bangkok 10330 Thailand³

Gunma University, Gunma, 376-8515 Japan⁴

Corresponding E-mail : nattagit.j@sci.kmutnb.ac.th

Received Date April 29, 2024
Revised Date August 07, 2025
Accepted Date August 14, 2025

บทคัดย่อ

การศึกษานี้เป็นการพัฒนาการใช้หอพอกอากาศดักจับฝุ่นละอองขนาดเล็ก $PM_{2.5}$ ด้วยน้ำและใช้เทคนิคผสมผสาน ศึกษาโดยใช้วิธีวิจัยเชิงทดลอง 3 ขั้นตอน โดยขั้นตอนแรก ออกแบบและพัฒนาหอพอกอากาศโดยใช้เทคนิคสครับเบอร์ชนิดสเปรย์น้ำผสมผสานระบบน้ำปั่นป่วน ขั้นตอนที่สอง พัฒนาและประยุกต์ใช้เทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง จัดเก็บข้อมูลและควบคุมติดตามการทำงานของหอพอกอากาศดักจับฝุ่นละอองด้วยน้ำ เช่น เซนเซอร์ควบคุมความเร็วลม เซนเซอร์ควบคุมระดับการไหลของน้ำ เซนเซอร์ควบคุมค่าความเป็นกรดต่าง เซนเซอร์ควบคุมค่าอุณหภูมิความชื้น รวมถึงเซนเซอร์ควบคุมระดับค่าความเข้มข้นของฝุ่นละออง $PM_{2.5}$ ในอากาศ และขั้นตอนสุดท้าย ทดสอบประสิทธิภาพการทำงานของหอพอกอากาศภายใต้สภาวะควบคุมในห้องทดสอบ ผลการศึกษาพบว่า หอพอกอากาศดักจับฝุ่นละอองด้วยน้ำ สามารถดักจับฝุ่นละออง $PM_{2.5}$ ในอากาศ ในพื้นที่กึ่งปิดได้ถึงร้อยละ 80 อีกทั้งสามารถควบคุมและติดตามประสิทธิภาพการทำงานได้ในระยะไกล โดยใช้เทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง หอพอกอากาศด้วยน้ำจึงเหมาะสมที่จะนำไปใช้งานในพื้นที่สาธารณะกึ่งปิด เช่น สถานีขนส่งมวลชน จุดรอรถบริการสาธารณะ อาคารจอดรถ

คำสำคัญ: ฝุ่นละอองขนาดเล็กกว่า 2.5 ไมครอน เครื่องดักจับฝุ่นแบบเปียกด้วยเทคนิคผสมผสาน อินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง (ไอโอที) การเฝ้าระวัง ระบบควบคุม

Abstract

This research studied the development of a $PM_{2.5}$ air filtration tower using a hybrid technique (hybrid wet scrubber tower) along with an IoT-based monitoring and control system. The experimental research methodology involved three main steps: firstly, designing and developing a hybrid wet scrubber tower that combines spray scrubber and turbulent water scrubber techniques; secondly, developing an IoT-based monitoring and control system that includes sensors to measure various parameters such as air flow rate, water flow rate, pH level, $PM_{2.5}$ concentration, and temperature-humidity; and lastly, testing the performance of the hybrid wet scrubber tower under controlled conditions in a test chamber. The study found that the developed hybrid wet scrubber tower could capture more than 80 percent of $PM_{2.5}$ particles, and the tower's operation could be monitored and controlled using integrated IoT system. It was noticeable that the proposed hybrid wet scrubber tower was suitable for installation in semi-enclosed areas such as public transportation stations, bus stops, and parking buildings.

Keywords: $PM_{2.5}$, hybrid wet scrubber, Internet of Things (IoT), monitoring, controlling system

1. บทนำ

สำนักงานปกป้องสิ่งแวดล้อมสหรัฐอเมริกา (U.S. Environmental Protection Agency: US EPA) ได้กำหนดค่ามาตรฐานของฝุ่นละอองขนาดเล็กในอากาศที่เป็นอันตรายต่อสุขภาพมนุษย์โดยใช้ค่า Particulate Matters (PM) เป็นเกณฑ์ในการตรวจวัดคุณภาพอากาศ ดังนี้ ฝุ่น PM_{10} หรือที่โดยทั่วไปเรียกว่า “ฝุ่นหยาบ” (coarse particles) คือ อนุภาคฝุ่นละอองในอากาศที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 2.5-10 ไมครอน ฝุ่นประเภทนี้เมื่อรวมกันเป็นจำนวนมากแล้วมักจะสังเกตเห็นได้ง่าย เช่น ฝุ่นที่เกาะอยู่ตามข้าวของเครื่องใช้ เกสรดอกไม้ หรือฝุ่นละอองจากงานก่อสร้าง ส่วนฝุ่น $PM_{2.5}$ หรือที่เรียกว่า “ฝุ่นละเอียด” (fine particles) คือ อนุภาคฝุ่นละอองในอากาศที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กกว่าหรือเท่ากับ 2.5 ไมครอน

ปัจจัยสำคัญที่ทำให้เกิดฝุ่น $PM_{2.5}$ เกิดขึ้นจากธรรมชาติและกิจกรรมในชีวิตประจำวันของมนุษย์ เช่น โรงไฟฟ้าถ่านหิน (Ehrlich et al., 2007) โรงงานอุตสาหกรรมไอเสียจากยานพาหนะ (Querol et al., 2001) และการเผาชีวมวลทางการเกษตรในที่โล่งแจ้ง (Tao et al., 2014) เตาเผาขยะ การก่อสร้าง (Zhang et al., 2013) การปิ้งย่าง รวมทั้งการปล่อยสารเคมีบางชนิด เช่น ไอโซพรีนจากป่า ก็เป็นสาเหตุของการสร้างฝุ่น $PM_{2.5}$ ได้เช่นเดียวกัน

จากงานวิจัยในประเทศไทยพบว่า ประชากรไทยได้รับผลกระทบด้านชีวิตและสุขภาพจากฝุ่นมลพิษแทบทุกภาคและมีความรุนแรงในช่วงฤดูแล้ง โดยแหล่งกำเนิดมลพิษที่เป็นปัญหาและมีผลกระทบต่อชีวิตและสุขภาพของประชาชนมากที่สุดในช่วงฤดูแล้ง คือ การเผาในที่เกษตรจากการส่งเสริมอุตสาหกรรมเกษตรอ้อย ข้าวโพด และข้าว ในทุกภาคยกเว้นภาคใต้ และยังมีส่วนหนึ่งของไฟป่าภาคเหนือตอนบนจากการทำเกษตรพืชเชิงเดี่ยวในพื้นที่ภูเขา ตลอดจนการเผาพื้นที่เกษตรในประเทศเพื่อนบ้านด้วย (Chulalongkorn University, 2020)

จากปัญหาดังกล่าวนำไปสู่การพัฒนาหอฟอกอากาศอัจฉริยะเพื่อการลดฝุ่นละอองขนาดเล็ก ($PM_{2.5}$) นับเป็นความก้าวหน้าที่สำคัญในด้านการจัดการคุณภาพอากาศเพื่อลดผลกระทบจากการใช้เชื้อเพลิงฟอสซิล และกิจกรรมของมนุษย์ที่ส่งผลต่อสิ่งแวดล้อม การศึกษานี้เลือกใช้เครื่องดักจับฝุ่นแบบเปียกด้วยเทคนิคผสมผสาน (hybrid wet scrubbing) เนื่องจากมีประสิทธิภาพสูงในการกำจัดฝุ่นละอองขนาดเล็ก โดยการผสมผสานระหว่างระบบฟอกอากาศแบบเปียก (wet scrubbing) และระบบกรองฝุ่นที่สามารถจับ $PM_{2.5}$ ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ทำให้เหมาะสมกับสภาวะแวดล้อมในเขตเมืองที่มีปริมาณมลพิษทางอากาศสูง รวมทั้งยังมีการใช้งานเทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง (Internet of Things: IoT) หรือ ไอโอที เพิ่มเติมในหอฟอกอากาศนี้ เพื่อเสริมสร้างประสิทธิภาพในการควบคุมและตรวจสอบการทำงานแบบตามเวลาจริง (real time) ทำให้สามารถปรับการทำงานของระบบได้อย่างแม่นยำและเหมาะสมกับสภาพแวดล้อมที่เปลี่ยนแปลงตลอดเวลา นอกจากนี้ ระบบอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่งยังช่วยให้สามารถติดตามผลและเก็บข้อมูลจากหอฟอกอากาศได้อย่างต่อเนื่อง ซึ่งสอดคล้องกับการพัฒนาเทคโนโลยีที่เหมาะสมกับประเทศไทยและตอบสนองต่อแผนการพัฒนาเมืองอัจฉริยะ (smart city)

ผู้วิจัยมีเป้าหมายในการพัฒนาหอฟอกอากาศโดยประยุกต์ใช้เทคนิคที่พบในการศึกษาก่อนหน้า เช่น การใช้สแคร็บเบอร์ชนิดสเปรย์น้ำและระบบน้ำปั่นป่วน (Wansom et al., 2023) รวมถึงการใช้งานเทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่งเพิ่มความสามารถในการควบคุมและเก็บข้อมูลประสิทธิภาพการกรองฝุ่น $PM_{2.5}$ นำมาวิเคราะห์ข้อมูลเพื่อการประเมินผลในเชิงลึก เพื่อวัดประสิทธิภาพการฟอกอากาศที่มีความเข้มข้นของฝุ่นละอองในระดับที่แตกต่างกันในช่วงตั้งแต่ $50 \mu g/m^3$ จนถึง $900 \mu g/m^3$

2. วัตถุประสงค์

2.1 เพื่อออกแบบและพัฒนาหอฟอกอากาศดักจับฝุ่นละอองขนาดเล็กด้วยน้ำ โดยใช้เทคนิคสแคร็บเบอร์ชนิดสเปรย์น้ำผสมผสานระบบน้ำปั่นป่วน ลดปริมาณฝุ่นละออง $PM_{2.5}$ ในพื้นที่กึ่งปิด เช่น สถานีขนส่งมวลชน จุฬารอรถบริการสาธารณะ อาคารจอดรถ และลดความเสี่ยงด้านสุขภาพของประชาชน

2.2 เพื่อพัฒนาและประยุกต์ใช้เทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง จัดเก็บข้อมูลและควบคุมติดตามการทำงานของหอฟอกอากาศดักจับฝุ่นละอองด้วยน้ำ เช่น เซนเซอร์ควบคุมความเร็วลม เซนเซอร์ควบคุมระดับการไหลของน้ำ เซนเซอร์ควบคุมค่าความเป็นกรดต่าง เซนเซอร์ควบคุมค่าอุณหภูมิความชื้น รวมถึงเซนเซอร์ควบคุมระดับค่าความเข้มข้นของฝุ่นละออง $PM_{2.5}$ ในอากาศ

3. วิธีการศึกษา

การศึกษานี้ใช้วิธีวิจัยเชิงทดลอง (experimental research) โดยแบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอนหลัก ดังนี้

3.1 ออกแบบและพัฒนาหอฟอกอากาศ

ขั้นตอนแรก เริ่มจากการออกแบบและพัฒนาหอฟอกอากาศโดยใช้เทคนิคสครับเบอร์ชนิดสเปรย์น้ำผสมผสานระบบน้ำปั่นป่วน (hybrid wet scrubber tower) ซึ่งประกอบด้วยการสร้างโครงสร้างหอสูง 4 เมตร และภายในหอดัดตั้งหัวฉีดน้ำจำนวน 12 หัว ที่ฉีดน้ำเป็นละอองเพื่อดักจับฝุ่น $PM_{2.5}$ ในอากาศ นอกจากนี้ยังมีการใช้ระบบน้ำปั่นป่วนที่ช่วยให้ฝุ่นถูกจับภายในน้ำและถูกกำจัดออกไป

3.2 พัฒนาและประยุกต์ใช้เทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง

ขั้นตอนที่สอง เป็นการพัฒนาและประยุกต์ใช้เทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่งเพื่อติดตามและควบคุมประสิทธิภาพการทำงานของหอฟอกอากาศ ระบบประกอบด้วยเซนเซอร์วัดค่าต่าง ๆ เช่น เซนเซอร์วัดความเร็วลม เซนเซอร์วัดการไหลของน้ำ เซนเซอร์วัดค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) และเซนเซอร์วัดความเข้มข้นของฝุ่น $PM_{2.5}$ ทั้งบริเวณหออากาศขาเข้าและขาออก ข้อมูลจากเซนเซอร์ทั้งหมดจะถูกส่งไปยังระบบประมวลผลกลางที่เชื่อมต่อกับอินเทอร์เน็ตเพื่อให้สามารถควบคุมและตรวจสอบการทำงานได้จากระยะไกล

3.3 ทดสอบและประเมินผลการดำเนินงานของหอฟอกอากาศ

ขั้นตอนสุดท้าย เป็นการทดสอบประสิทธิภาพการทำงานของหอฟอกอากาศภายใต้สภาวะควบคุม โดยทดสอบในห้องทดสอบที่มีการปล่อยฝุ่น $PM_{2.5}$ ในอากาศโดยใช้รถยนต์ดีเซลเป็นแหล่งกำเนิดฝุ่น จากนั้นนำผลการทดสอบมาเปรียบเทียบค่าความเข้มข้นของฝุ่น $PM_{2.5}$ ในอากาศก่อนและหลังการฟอกอากาศ เพื่อนำมาคำนวณหาประสิทธิภาพของหอฟอกอากาศในการกำจัดฝุ่นในอากาศ

4. การทบทวนวรรณกรรม

4.1 หอฟอกอากาศด้วยน้ำแบบสครับเบอร์ (wet scrubbers)

ระบบหอฟอกอากาศด้วยน้ำแบบสครับเบอร์เป็นอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับกำจัดแก๊สและไอระเหย รวมทั้งอนุภาคที่มีขนาดเล็ก โดยใช้ของเหลว (Mussatti & Hemmer, 2002) เช่น น้ำ เป็นตัวดักจับอนุภาคที่ปนอยู่ในอากาศ ทำให้อนุภาคนั้นไม่สามารถหลุดไปสู่บรรยากาศได้ โดยหอฟอกอากาศด้วยน้ำแบบสครับเบอร์ที่ใช้เทคนิคประเภทที่พลังงานต่ำ และดูแลรักษาไม่ยาก ได้แก่

4.1.1 เทคนิคสครับเบอร์ชนิดสเปรย์น้ำ (spray wet scrubbers) เป็นเทคนิคการใช้หัวฉีดสเปรย์ (nozzle) ที่ติดตั้งอยู่ในภายในหอฟอกอากาศเพื่อพ่นฉีดของเหลวให้เป็นละอองฝอยขนาดเล็ก ซึ่งจะกระจายไปปะทะกับมวลอากาศและทำให้อนุภาคนขนาดเล็กที่ปะปนอยู่ในอากาศเปียกชื้นและแยกตัวตกลงมาจากอากาศ

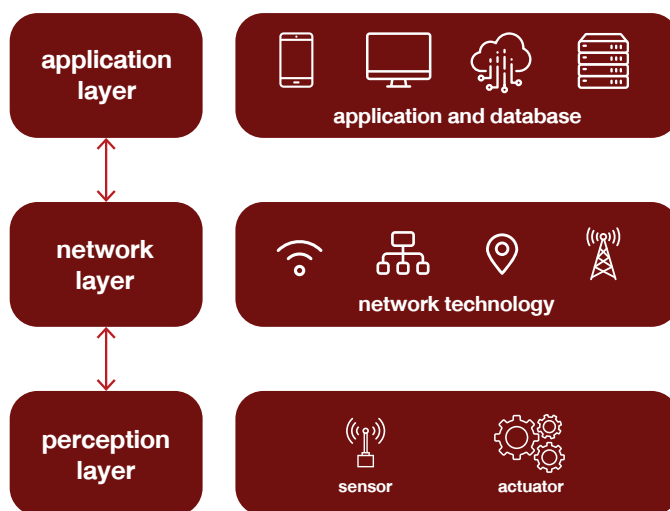
4.1.2 เทคนิคสครับเบอร์ชนิดระบบน้ำปั่นป่วน (turbulence wet scrubbers) เป็นเทคนิคการนำหัวฉีดพ่นอากาศลงได้นำเพื่อสร้างมวลอากาศที่ถูกบีบอัดสร้างแรงดัน โดยเมื่อมวลอากาศที่มีแรงดันสูงอัดกระแทกผ่านน้ำและสร้างความปั่นป่วน มวลน้ำที่ปั่นป่วนจะจับอนุภาคฝุ่นที่ปนอยู่ในอากาศได้อย่างมีประสิทธิภาพ

4.2 เทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง

อินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง หมายถึง การเชื่อมโยงวัตถุต่าง ๆ ไม่ว่าจะเป็นอุปกรณ์ พาหนะ เครื่องใช้ไฟฟ้า หรือสิ่งอำนวยความสะดวกอื่น ๆ ที่มนุษย์สร้างขึ้น เข้ากับระบบเครือข่ายอินเทอร์เน็ต โดยมีการฝังวงจรอิเล็กทรอนิกส์ ซอฟต์แวร์ เซนเซอร์ และการเชื่อมต่อแบบไร้สายเข้าไปในวัตถุเหล่านั้น เพื่อให้สามารถรับรู้สภาพแวดล้อม เก็บรวบรวมและส่งผ่านข้อมูล รวมถึงควบคุมการทำงานจากระยะไกลได้อย่างมีประสิทธิภาพ (Minerva et al., 2015)

เทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่งยังสามารถประยุกต์ใช้กับอุปกรณ์หรือระบบใด ๆ ที่ออกแบบมาให้สามารถเชื่อมต่อและสื่อสารกันผ่านเครือข่ายอินเทอร์เน็ต ซึ่งช่วยเพิ่มความสามารถในการทำงานอัตโนมัติ การติดตาม การวิเคราะห์ และการตัดสินใจแบบตามเวลาจริงได้ดียิ่งขึ้น

สถาปัตยกรรมอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง (Internet of Things architecture: IoT architecture) ในปัจจุบันนักวิจัย ผู้เชี่ยวชาญ รวมถึงบริษัทหรือหน่วยงานหลายแห่งได้นำเสนอสถาปัตยกรรมของอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่งออกมาหลายรูปแบบ แต่หากอ้างอิงจากมาตรฐาน IEEE P2413 (IEEE, 2020) จะสามารถแบ่งองค์ประกอบของเทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่งได้ 3 ชั้น ดังภาพที่ 1



ภาพที่ 1 สถาปัตยกรรมอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง

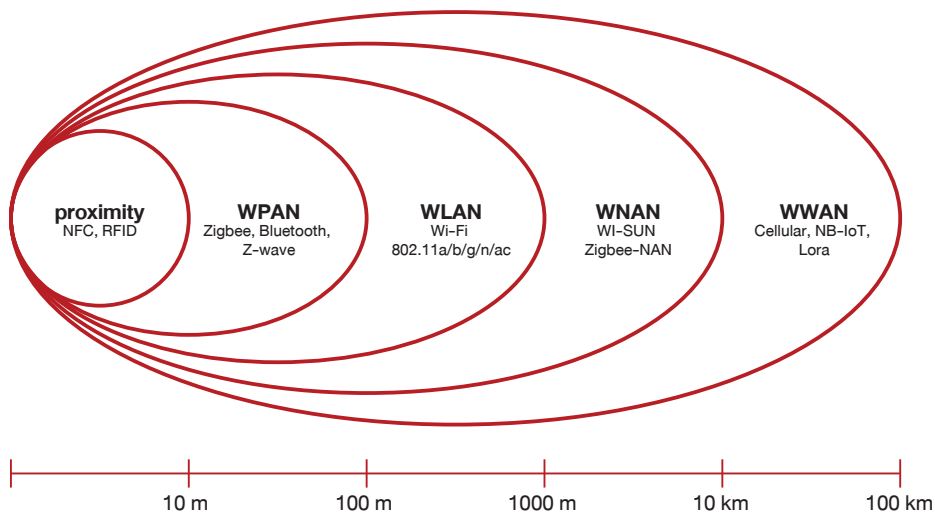
4.2.1 application layer เป็นชั้นของการประมวลผลและจัดเก็บข้อมูล ไปจนถึงส่วนติดต่อผู้ใช้งาน เช่น เว็บไซต์หรือแอปพลิเคชันสำหรับการแสดงผลหรือควบคุมอุปกรณ์ โดยชั้นนี้จะรวมถึงอุปกรณ์เครื่องแม่ข่ายหรือเซิร์ฟเวอร์ (server)

4.2.2 network layer เป็นชั้นของการเชื่อมต่อผ่านระบบเครือข่าย โดยส่วนใหญ่อินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่งมักใช้งานระบบเครือข่ายแบบไร้สาย ซึ่งชั้นนี้จะทำหน้าที่เชื่อมต่อส่งข้อมูลระหว่างชั้นของอุปกรณ์และเครื่องแม่ข่ายที่อยู่ในชั้น application layer เช่น ข้อมูลที่อ่านจากเซนเซอร์จาก device layer ส่งไปยัง application layer หรือข้อมูลที่ผ่านการประมวลผลแล้วและส่งไปควบคุมอุปกรณ์ที่ device layer

4.2.3 perception layer เป็นชั้นของอุปกรณ์ต่าง ๆ ที่มีวิธีการในการเชื่อมต่อทั้งแบบใช้สายหรือไร้สาย เช่น บอร์ดควบคุม เซนเซอร์ ตัวกระทำ (actuators)

4.3 เทคโนโลยีการสื่อสารไร้สาย (wireless technology)

ความหลากหลายของเทคโนโลยีการสื่อสารไร้สายในปัจจุบัน เมื่อพิจารณาการสื่อสารที่เกิดขึ้นกับระยะทางเพื่อรองรับการทำงานของเทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง สามารถแบ่งออกเป็น 5 กลุ่ม ดังภาพที่ 2



ภาพที่ 2 เทคโนโลยีการสื่อสารไร้สายโดยจัดกลุ่มตามระยะทาง

4.3.1 proximity เป็นการสื่อสารระยะใกล้ในระยะไม่เกิน 10 เมตร ซึ่งเทคโนโลยีหลักในกลุ่มนี้ได้แก่ Near-Field Communication (NFC) ตามมาตรฐาน PAS ISO 14443 ที่ความถี่ 13.56 MHz ตัวอย่างการใช้งานที่นิยม เช่น การติดตามสินค้า การเข้าออกอาคาร อีกหนึ่งเทคโนโลยีหลัก ได้แก่ Radio Frequency Identification (RFID) เพื่อใช้ระบุข้อมูลสินค้าโดยใช้คลื่นความถี่วิทยุในระบบขนส่ง (logistics) และการนำ RFID ไปใช้งานแทนบาร์โค้ด (barcode)

4.3.2 Wireless Personal Area Network: WPAN เทคโนโลยีหลักในกลุ่มนี้ ได้แก่ บลูทูธ (bluetooth) และซิกบี (Zigbee) ทั้งนี้ บลูทูธเป็นเทคโนโลยีที่ได้รับความนิยมอย่างมากสำหรับการสื่อสารระยะใกล้ เช่น การสื่อสารระหว่างสมาร์ทโฟนกับอุปกรณ์ภายนอก

4.3.3 Wireless Local Area Network: WLAN หรือ ไวไฟ (Wi-Fi) คือ การสื่อสารไร้สายที่ได้รับความนิยมอย่างมาก มาตรฐานที่แพร่หลาย คือ IEEE 802.11 a/b/g/n ที่ความถี่ 2.4 GHz นอกจากนี้ยังได้มีการกำหนดมาตรฐานเพิ่มเติมอย่างต่อเนื่อง เช่น IEEE 802.11ac ที่ความถี่ 2.4 และ 5 GHz เพื่อรองรับความต้องการของแอปพลิเคชันใหม่ ๆ

4.3.4 Wireless Neighborhood Area Network (WNAN) เป็นเทคโนโลยีที่ทำหน้าที่เชื่อมโยงระหว่างการเชื่อมต่อของอุปกรณ์ที่มีการสื่อสารระยะสั้นกับระยะไกล ตัวอย่างโปรโตคอล (protocol) ที่สำคัญในกลุ่มนี้ได้แก่ Wi-Smart Utility Network: Wi-SUN และ Zigbee-NAN บนมาตรฐาน IEEE 802.15.4g การใช้งานของ Wi-SUN เพื่อรองรับการสื่อสารไร้สายความเร็วต่ำในพื้นที่กว้างในบริเวณที่ไม่มีโครงข่ายพื้นฐานรองรับเพื่อเชื่อมต่ออุปกรณ์สมาร์ทมิเตอร์ เช่น มิเตอร์น้ำ มิเตอร์ไฟฟ้า

4.3.5 Wireless Wide Area Network (WWAN) เป็นเทคโนโลยีการสื่อสารระยะไกลที่มีระยะการสื่อสารมากกว่า 1,000 เมตรขึ้นไป ครอบคลุมตั้งแต่เทคโนโลยีการสื่อสารในระบบเซลลูลาร์ (cellular) แบบดั้งเดิม และเทคโนโลยีการสื่อสารยุคใหม่ที่เรียกว่า Low Power Wide Area Network (LPWAN) (Chaudhari et al., 2020) เพื่อรองรับการสื่อสารความเร็วต่ำ มีอายุการใช้งานของแบตเตอรี่ที่ยาวและสามารถเชื่อมต่ออุปกรณ์ในระยะที่ไกล เทคโนโลยีการสื่อสารระยะไกลนี้สามารถแบ่งออกได้เป็นสองกลุ่มย่อย ได้แก่

- 1) กลุ่มคลื่นความถี่แบบได้รับใบอนุญาต (licensed spectrum หรือ cellular)

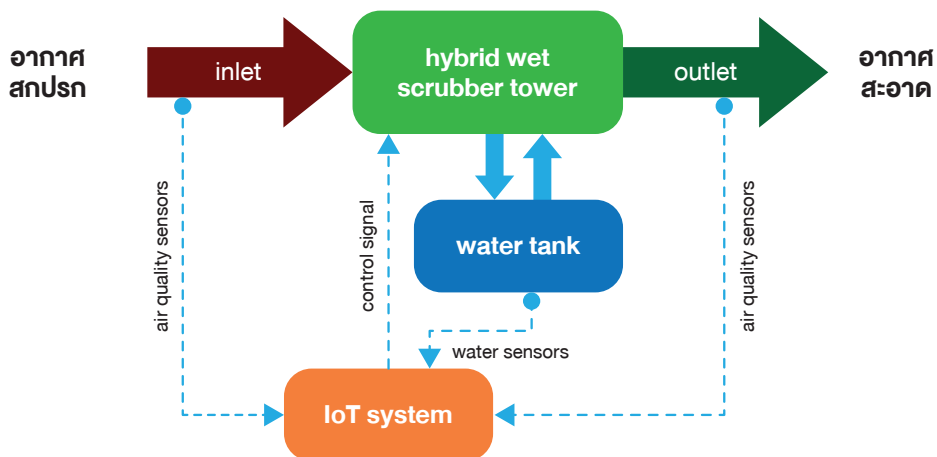
ประกอบด้วยเทคโนโลยีสื่อสารในระบบ GSM, WCDMA, LTE และ 5G ซึ่งเรียกรวมว่า เทคโนโลยี 3GPP (Third Generation Partnership Project) เป็นการสื่อสารบนคลื่นความถี่แบบได้รับใบอนุญาต (licensed spectrum) เดิมพัฒนาขึ้นเพื่อรองรับการสื่อสารด้านเสียงและการสื่อสารข้อมูลความเร็วสูง แต่ปัจจุบันได้มีการนำเทคโนโลยี Narrow Band Internet of Things (NB-IoT) ที่ออกแบบให้สามารถรับส่งข้อมูลได้ถึง 100 kbps ในช่วงสัญญาณแคบขนาดแบนด์วิดท์ (bandwidth) 200 kHz มาใช้เพื่อรองรับการสื่อสารความเร็วต่ำ มีอายุการใช้งานแบตเตอรี่ที่นานขึ้นตั้งแต่ 6 เดือนถึง 10 ปี ขึ้นอยู่กับการใช้งานและคุณลักษณะของอุปกรณ์ ซึ่งเหมาะแก่การนำไปใช้ร่วมกับอุปกรณ์ทั้งแบบเคลื่อนที่ (mobility sensor) และไม่มีการเคลื่อนที่ (stationary sensor)

2) กลุ่มคลื่นความถี่แบบยกเว้นใบอนุญาต (un-licensed spectrum)

ตัวอย่างในกลุ่มนี้ ได้แก่ LoRa และ SIGFOX ได้รับการพัฒนาขึ้นเพื่อรองรับการทำงานบนแอปพลิเคชันการสื่อสารระหว่างเครื่องจักรกับเครื่องจักร Machine-to-Machine (M2M) ซึ่งเน้นการสื่อสารที่ใช้พลังงานต่ำและระยะทางการสื่อสารที่ไกล

5. กรอบแนวคิด

กรอบแนวคิดของโครงการแบ่งการดำเนินงานเป็น 2 ส่วนหลัก ได้แก่ ส่วนแรก คือ การพัฒนาหอฟอกอากาศโดยใช้เทคนิคสครับเบอร์ชนิดสเปรย์น้ำผสมผสานระบบน้ำปั๊มนวน เพื่อให้สามารถดักจับฝุ่นละออง PM_{2.5} ส่วนที่สอง ได้แก่ การพัฒนาเทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง เพื่อติดตามค่าและควบคุมการทำงานของหอฟอกอากาศแบบอัตโนมัติ (IoT based monitoring and control) ดังภาพที่ 3



ภาพที่ 3 สถาปัตยกรรมของหอฟอกอากาศดักจับฝุ่นละอองพร้อมระบบอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง

5.1 หอฟอกอากาศโดยใช้เทคนิคสครับเบอร์ชนิดสเปรย์น้ำผสมผสานระบบน้ำปั๊มนวน

หอฟอกอากาศที่พัฒนาขึ้นทำงานโดยการดูดอากาศที่มีฝุ่นละออง PM_{2.5} เข้ามาในตัวหอฟอกอากาศ และทำการแยกฝุ่น PM_{2.5} ออกจากอากาศ ด้วยเทคนิคสครับเบอร์ชนิดสเปรย์น้ำผสมผสานกับระบบน้ำปั๊มนวน โครงสร้างของหอฟอกอากาศที่ออกแบบเป็นดังภาพที่ 4 และมีรายละเอียดดังตารางที่ 1 ซึ่งมีส่วนประกอบหลักได้แก่

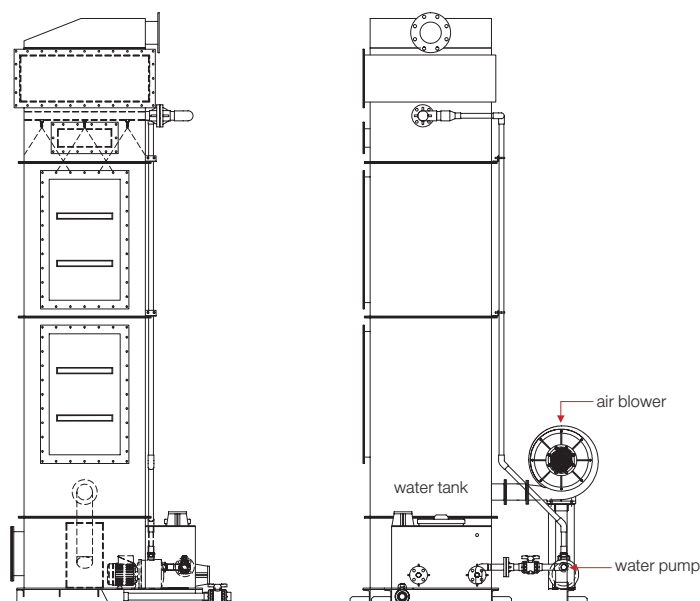
5.1.1 พัดลมดูดอากาศ (air blowers) ทำหน้าที่สร้างแรงดูดอากาศเสียภายนอกให้ไหลเข้าสู่พื้นที่ภายในหอฟอกอากาศ (chamber) ผ่านกระบวนการฟอกอากาศ และปล่อยเป็นอากาศสะอาดกลับออกไปภายนอก

5.1.2 เครื่องสูบน้ำหมุนเวียน (water pump) ทำหน้าที่สูบน้ำจากถังหมุนเวียนน้ำไปฉีดเป็นละอองฝอยให้กระจายทั่วทั้งสกรับเบอร์

5.1.3 หัวฉีดสเปรย์ ทำหน้าที่ฉีดน้ำให้กระจายทั่วถึงอย่างสม่ำเสมอภายในหอพอกอากาศ

5.1.4 ถังหมุนเวียนน้ำ (water tank) ทำหน้าที่เก็บกักน้ำไว้สำหรับหมุนเวียนใช้ในระบบ

5.1.5 พื้นที่ภายในหอพอกอากาศ เป็นพื้นที่พอกอากาศเสียที่ผ่านเข้ามาด้วยเทคนิคสกรับเบอร์ และปล่อยอากาศสะอาดกลับออกไป



ภาพที่ 4 โครงสร้างหอพอกอากาศด้วยน้ำแบบสกรับเบอร์โดยใช้เทคโนโลยีผสมผสานระหว่างเทคนิคสเปรย์น้ำและเทคนิคระบบน้ำปั่นป่วน

ตารางที่ 1 ค่าตัวแปรส่วนประกอบหลักของหอพอกอากาศ

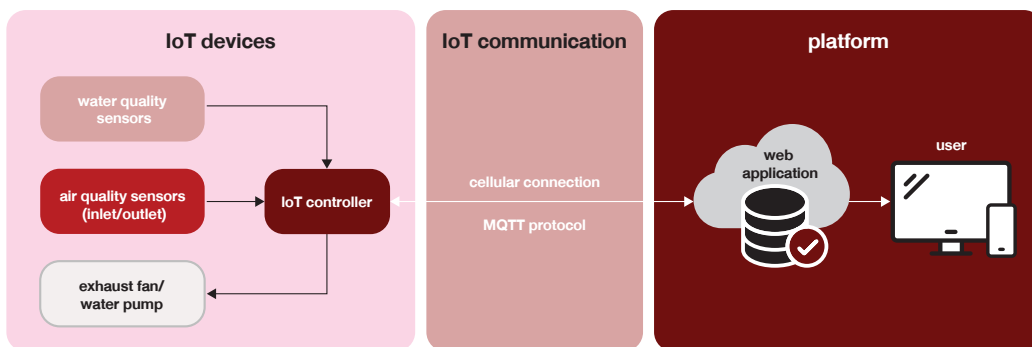
ตัวแปรการออกแบบ	ค่าของตัวแปร
ความสูงของหอพอกอากาศ	4 เมตร
ความกว้างของหอพอกอากาศ ทรงสี่เหลี่ยมจัตุรัส	0.85 เมตร
ความสูงของพื้นที่ภายในหอพอกอากาศ	2 เมตร
จำนวนหัวฉีดละอองน้ำ	12 หัว
ขนาดของพัดลมดูดอากาศ	1 hp
ขนาดของปั๊มน้ำ	1 hp
ปริมาตรน้ำในถังหมุนเวียน	390 ลิตร

ภาพที่ 4 แสดงโครงสร้างหอฟอกอากาศที่ประยุกต์ใช้เทคนิคฟอกอากาศสครับเบอร์ระบบน้ำปั่นป่วน ซึ่งออกแบบให้หัวพ่นอากาศที่ติดตั้งอยู่ใต้ผิวน้ำดูดอากาศสกปรกเข้ามาในหอฟอกอากาศ และเมื่ออากาศถูกพ่นออกมาได้น้ำ มวลอากาศจะถูกบีบอัดและมีระดับแรงดันสูงมากขึ้น โดยเมื่อมวลอากาศที่มีแรงดันสูงอัดกระแทกผ่านน้ำ จะสร้างความปั่นป่วนให้กับน้ำ ทำให้อนุภาคฝุ่นที่ปนอยู่ในอากาศถูกมวลน้ำปั่นป่วนดักจับไว้ นอกจากการใช้เทคนิคฟอกอากาศชนิดระบบน้ำปั่นป่วนแล้ว งานวิจัยนี้ยังได้ผสมผสานเทคนิคสครับเบอร์ชนิดสเปรย์น้ำที่เป็นการประยุกต์ใช้หัวฉีดสร้างละอองน้ำขนาด 270 ไมครอน เพื่อให้มีอัตราส่วนของน้ำต่ออากาศภายในหอฟอก อยู่ที่น้ำ 9 ลิตรต่ออากาศ 1 ลูกบาศก์เมตร ซึ่งจะช่วยให้หอฟอกมีประสิทธิภาพในการดักจับอนุภาคฝุ่นออกจากอากาศได้มากกว่าร้อยละ 90

ในขั้นตอนสุดท้ายหอฟอกอากาศจะปล่อยอากาศสะอาดออกมาแทนที่อากาศเสียบริเวณรอบจตุรอรณบริการสาธารณะ (ป้ายรถเมล์) ทำให้บริเวณจตุรอรณบริการสาธารณะมีอากาศสะอาดที่มีลักษณะเป็น air shield ป้องกันฝุ่นละอองได้อีกด้วย โดยควบคุมอัตราแลกเปลี่ยนปริมาตรอากาศโดยรอบ (air change rate) ให้มีค่าเท่ากับ 4 ครั้ง/ชั่วโมง ตามมาตรฐาน ASHRAE 62.1 (ANSI/ASHRAE, 2020) และหอฟอกอากาศมีประสิทธิภาพในการดักจับฝุ่นละออง $PM_{2.5}$ มากกว่าร้อยละ 90 ซึ่งมีเป้าหมายที่จะทำให้ค่าฝุ่นละออง $PM_{2.5}$ ลดลงเป็นไปตามมาตรฐานองค์การอนามัยโลก (World Health Organization: WHO) ค.ศ. 2021 (พ.ศ. 2564) ซึ่งแนะนำค่าฝุ่นละออง $PM_{2.5}$ เฉลี่ยราย 24 ชั่วโมงที่เหมาะสมไม่ควรเกิน 15 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร (WHO, 2024)

5.2 เทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่งเพื่อการติดตามค่าและควบคุมการทำงานของหอฟอกอากาศ

การพัฒนาระบบอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่งสำหรับหอฟอกอากาศมีวัตถุประสงค์เพื่อตรวจวัดประสิทธิภาพการทำงานของหอฟอกอากาศ โดยการติดตั้งเซนเซอร์ในจุดต่าง ๆ ได้แก่ การใช้เซนเซอร์วัดการไหลของลมในท่อเพื่อติดตามประสิทธิภาพการทำงานของพัดลมดูดอากาศ การใช้เซนเซอร์วัดระดับน้ำ วัดค่าความเป็นกรดต่าง และระดับความสกปรกของน้ำเพื่อประเมินคุณภาพน้ำในถังหมุนเวียนน้ำ (water tank) การใช้เซนเซอร์วัดอัตราการไหลของน้ำจากถังเก็บน้ำเข้าไปยังหอฟอกอากาศเพื่อติดตามการทำงานของเครื่องสูบน้ำหมุนเวียน และ การใช้เซนเซอร์วัดระดับ $PM_{2.5}$ ในอากาศทั้งที่บริเวณท่ออากาศขาเข้า (inlet) และขาออก (outlet) เพื่อประเมินประสิทธิภาพโดยรวมในการฟอกอากาศของหอฟอกอากาศ ข้อมูลจากเซนเซอร์ทั้งหมดจะถูกส่งไปยังส่วนประมวลผลกลาง (IoT controller) ซึ่งจะส่งข้อมูลผ่านเครือข่ายอินเทอร์เน็ตด้วยการสื่อสารแบบเซลลูลาร์โดยใช้มาตรฐานโพรโทคอลรับส่งข้อมูลชนิด MQTT (Hunkeler et al., 2008) ส่งไปยังแพลตฟอร์มในรูปแบบเว็บไซต์เพื่อจัดเก็บข้อมูลการทำงานของระบบหอฟอกอากาศ รวมไปถึงการสั่งการทำงานส่วนประกอบต่าง ๆ ของหอฟอกอากาศ



ภาพที่ 5 สถาปัตยกรรมของเทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง
เพื่อการติดตามค่าและควบคุมการทำงานของหอฟอกอากาศ

6. ผลการศึกษา

6.1 ผลการพัฒนาหอฟอกอากาศดักจับฝุ่นละอองด้วยน้ำโดยใช้เทคนิคผสมผสาน เพื่อลดปริมาณฝุ่นละออง $PM_{2.5}$ ในพื้นที่กึ่งปิด

การศึกษาพบว่า หอฟอกอากาศที่พัฒนาขึ้นสามารถดักจับฝุ่นละออง $PM_{2.5}$ ได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยผลการทดสอบประสิทธิภาพการทำงานของหอฟอกอากาศในสถานะที่ควบคุม พบว่า ในช่วงความเข้มข้น $PM_{2.5}$ ขาเข้าอยู่ระหว่าง $50 \mu g/m^3$ ถึง $900 \mu g/m^3$ ประสิทธิภาพการกรองสามารถคงค่าอยู่ในช่วงร้อยละ 85.80 ถึงร้อยละ 91.20 ประสิทธิภาพการกรองฝุ่นมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ร้อยละ 87.46 ซึ่งจากผลการทดลองโดยใช้ค่าความเข้มข้นของ $PM_{2.5}$ เป็นตัวแปรในการวัดผลจะเห็นได้ว่า การศึกษาและออกแบบหอฟอกอากาศสามารถกรองฝุ่น $PM_{2.5}$ ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

6.2 ผลการพัฒนาและประยุกต์ใช้เทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่งในการจัดเก็บข้อมูล และควบคุมติดตามการทำงานของหอฟอกอากาศดักจับฝุ่นละอองด้วยน้ำ

การนำเทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่งมาใช้ในหอฟอกอากาศช่วยให้สามารถติดตามและควบคุมการทำงานของระบบฟอกอากาศได้อย่างมีประสิทธิภาพ ข้อมูลจากเซนเซอร์ต่าง ๆ ถูกส่งไปยังระบบควบคุมกลาง และสามารถตรวจสอบค่าต่าง ๆ ได้แบบตามเวลาจริง เช่น ความเร็วลม อัตราการไหลของน้ำ ค่า pH และความเข้มข้นของฝุ่น $PM_{2.5}$ ทั้งขาเข้าและขาออก ส่งผลให้สามารถปรับปรุงการทำงานของหอฟอกอากาศได้ตามสภาพแวดล้อมที่เปลี่ยนแปลง

6.2.1 การใช้เซนเซอร์จัดเก็บข้อมูลและควบคุมความเร็วลม

ช่วยให้สามารถตรวจสอบและควบคุมการไหลของอากาศที่เข้าสู่หอพอกอากาศได้อย่างเหมาะสม ทำให้ระบบการกรองมีประสิทธิภาพมากขึ้น

6.2.2 การใช้เซนเซอร์จัดเก็บข้อมูลและควบคุมอัตราการไหลของน้ำ

ช่วยให้ระบบการฟ้นละอองน้ำมีความเสถียรและทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพในการดักจับฝุ่น

6.2.3 การใช้เซนเซอร์จัดเก็บข้อมูลและควบคุมค่าความเป็นกรดต่าง

ทำให้สามารถควบคุมคุณภาพของน้ำที่ใช้ในการดักจับฝุ่นได้อย่างแม่นยำ

6.2.4 การใช้เซนเซอร์จัดเก็บข้อมูลและควบคุมค่าอุณหภูมิความชื้น

ช่วยให้สามารถตรวจสอบสภาพแวดล้อมภายนอกและปรับการทำงานของหอพอกอากาศให้เหมาะสมตามสภาพอากาศ

6.2.5 การใช้เซนเซอร์จัดเก็บข้อมูลและควบคุมค่าความเข้มข้นของฝุ่นละออง PM_{2.5}

ทำให้สามารถวัดประสิทธิภาพของการกรองได้โดยตรงและปรับปรุงการทำงานตามสภาพอากาศที่เปลี่ยนแปลง

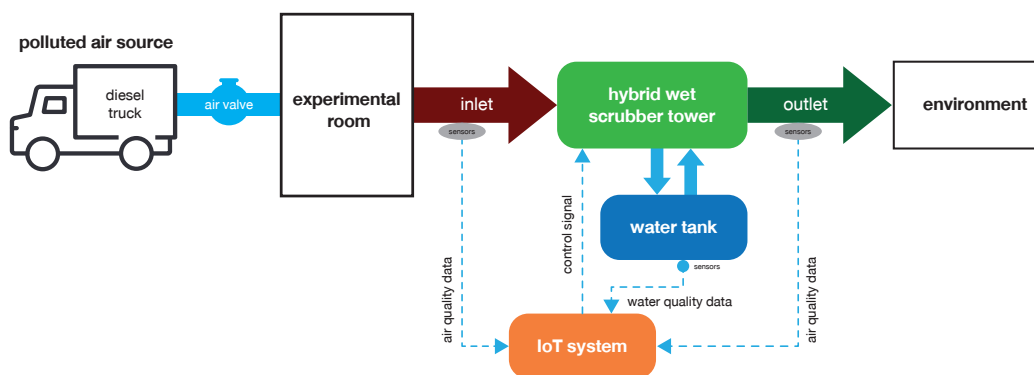
6.2.6 การใช้คลาวด์ (cloud) เป็นระบบจัดการข้อมูลและประมวลผล

ทำให้สามารถติดตามและวิเคราะห์ผลการดำเนินงานได้จากระยะไกล ซึ่งช่วยให้การควบคุมและดูแลระบบเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพและรวดเร็ว

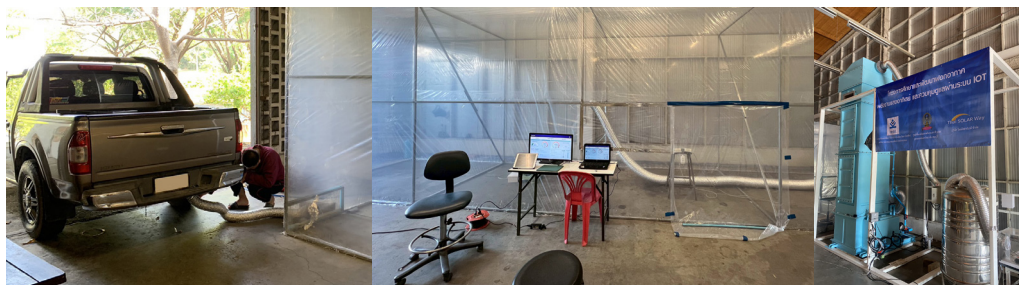
จากรายละเอียดของเซนเซอร์ที่ใช้วัดผล ระบบการจัดเก็บและประมวลผลทั้งหมด สามารถใช้งานและนำข้อมูลไปวิเคราะห์ผลการดำเนินงานและความเสถียรของระบบที่กล่าวมา ซึ่งเป็นตัวแปรสำคัญในการนำมาใช้ประเมินประสิทธิภาพและความเหมาะสมของการนำระบบมาใช้ร่วมกับหอพอกอากาศ ทำให้สามารถวิเคราะห์ข้อมูลทั้งหมดได้อย่างถูกต้องและแม่นยำ ซึ่งการทดสอบประสิทธิภาพการทำงานของหอพอกอากาศ ผู้วิจัยได้ออกแบบการทดลองประสิทธิภาพการทำงานของหอพอกอากาศภายใต้สภาวะควบคุมในห้องทดสอบโดยใช้รถยนต์ดีเซลเป็นแหล่งกำเนิดฝุ่น PM_{2.5} ในการทดลองร่วมกับระบบอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่งเพื่อวัดผลและปรับปรุงประสิทธิภาพของระบบในแต่ละส่วน ทั้งระบบหอพอกอากาศและระบบเทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่งให้สามารถทำงานร่วมกันได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด

6.3 ผลทดสอบและประเมินผลการทำงานของหอฟอกอากาศ ร่วมกับการทำงานของเทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง โดยใช้ข้อมูลจากระบบการจัดเก็บข้อมูลและประมวลผล เพื่อนำมาวิเคราะห์ประสิทธิภาพการทำงานของหอฟอกอากาศ

ผู้วิจัยออกแบบการทดลองประสิทธิภาพการทำงานของหอฟอกอากาศภายใต้สภาวะควบคุมในห้องทดสอบ โดยใช้รถยนต์ดีเซลเป็นแหล่งกำเนิดฝุ่น $PM_{2.5}$ ในการทดลองร่วมกับระบบเทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง เพื่อประเมิน วัดผล และปรับปรุงประสิทธิภาพของระบบ ดังแสดงในภาพที่ 6(a)



(a)



(b)

ภาพที่ 6 (a) แผนภาพแสดงการออกแบบการทดสอบประสิทธิภาพการทำงานของหอฟอกอากาศภายใต้สภาวะควบคุมในห้องทดสอบ
(b) โครงสร้างหอฟอกอากาศที่ได้พัฒนาขึ้นเพื่อนำมาทดสอบประสิทธิภาพจริง

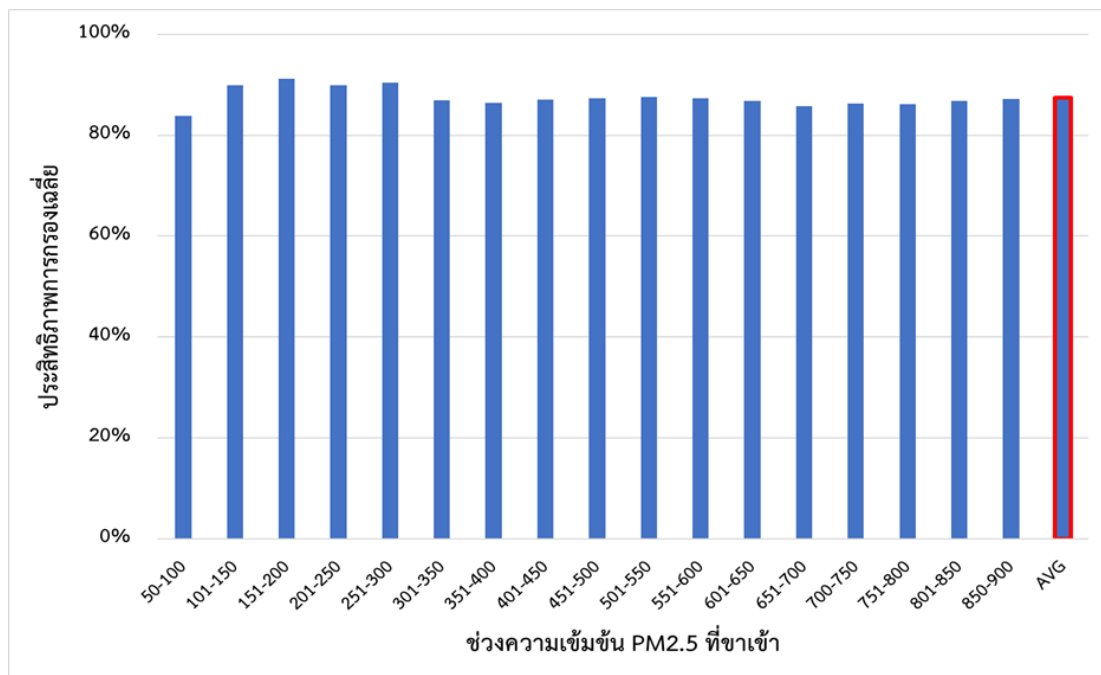
6.3.1 การประเมินประสิทธิภาพการทำงานของหอฟอกอากาศ

ผู้วิจัยทำการวัดผลการทำงานของหอฟอกอากาศคำนวณประสิทธิภาพดังที่แสดงในตารางที่ 2 โดยผลการทดลองแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพการทำงานของหอฟอกอากาศโดยวิเคราะห์การทำงานแบ่งตามช่วงความเข้มข้นของฝุ่น $PM_{2.5}$ ขาเข้า ในช่วงตั้งแต่ $50 \mu g/m^3$ จนถึง $900 \mu g/m^3$ โดยประสิทธิภาพของหอฟอกอากาศจะถูกคำนวณจากการวัดค่าระดับความเข้มข้นของฝุ่น $PM_{2.5}$ ที่บริเวณขาเข้าเพื่อเปรียบเทียบกับบริเวณขาออกจากหอฟอกอากาศ

ตารางที่ 2 ผลการทดลองประสิทธิภาพการทำงานของหอฟอกอากาศในสภาวะควบคุม

ช่วงความเข้มข้น PM _{2.5} ที่เข้า (µg/m ³)	ค่าเฉลี่ยขาออก (µg/m ³)	ประสิทธิภาพการกรองเฉลี่ย (ร้อยละ)
50-100	11.88	83.81
101-150	12.57	89.87
151-200	14.78	91.20
201-250	22.62	89.97
251-300	25.78	90.39
301-350	42.81	87.00
351-400	51.83	86.40
401-450	55.14	87.07
451-500	60.86	87.27
501-550	65.35	87.57
551-600	73.04	87.31
601-650	82.57	86.77
651-700	96.11	85.80
700-750	99.32	86.28
751-800	107.06	86.19
801-850	108.41	86.78
850-900	111.93	87.21
ค่าเฉลี่ย 50-900	61.36	87.46

เมื่อวัดความเข้มข้นเปรียบเทียบกับคุณภาพอากาศบริเวณขาเข้าของหอฟอกอากาศเทียบกับบริเวณขาออกจากหอฟอกอากาศ ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่า อากาศที่มีฝุ่นละออง PM_{2.5} เจือปนที่ความเข้มข้นในระดับไม่เกิน 200 µg/m³ ซึ่งเป็นระดับฝุ่นละอองที่อาจเกิดขึ้นได้จริงในพื้นที่สาธารณะโดยทั่วไปรวมถึงบริเวณริมถนน เมื่อผ่านกระบวนการกรองอากาศโดยหอฟอกอากาศที่ผู้วิจัยได้พัฒนาขึ้น จะสามารถลดระดับความเข้มข้นของฝุ่นละออง PM_{2.5} ในอากาศให้เหลือต่ำกว่าเกณฑ์ขององค์การอนามัยโลกที่ระบุว่า ประชาชนทั่วไปควรสัมผัสกับระดับค่า PM_{2.5} เฉลี่ยทั้งวันที่ความเข้มข้นสูงไม่เกิน 15 µg/m³ และจากการวิเคราะห์ประสิทธิภาพดังตารางที่ 2 และภาพที่ 7 ซึ่งแสดงกราฟประสิทธิภาพในการฟอกอากาศ (efficiency) แสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพในการฟอกอากาศที่ระดับเฉลี่ยตั้งแต่ร้อยละ 75 ถึงร้อยละ 87



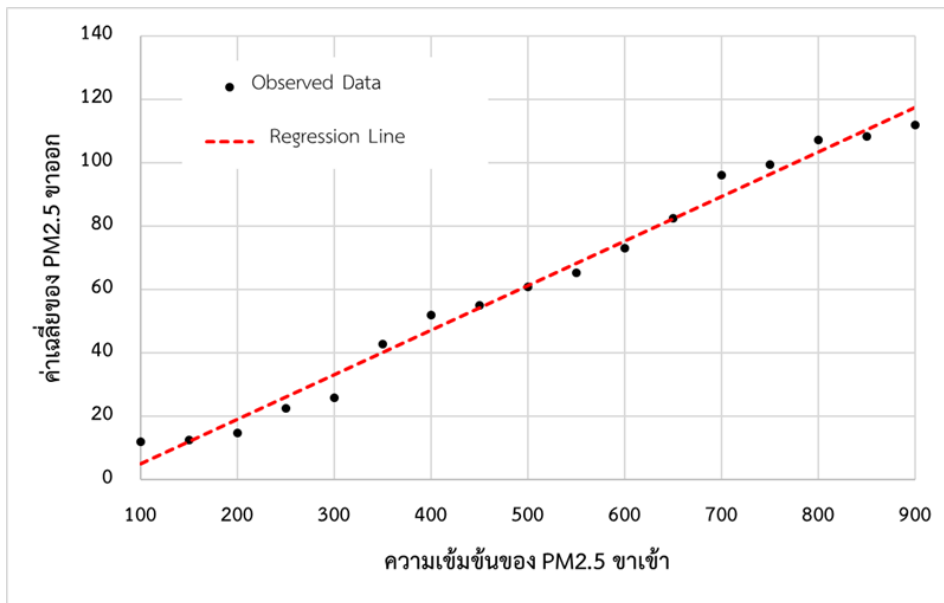
ภาพที่ 7 กราฟแสดงประสิทธิภาพการทำงานของหอฟอกอากาศ

6.3.2 การวิเคราะห์การถดถอยเพื่อประเมินผลการทำงานของหอฟอกอากาศ

จากผลการทดลองในหัวข้อก่อนหน้านี้ เพื่อเพิ่มความชัดเจนและความเข้าใจแนวโน้มของการทำงานของหอฟอกอากาศ ผู้วิจัยจึงได้ทำการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของ $PM_{2.5}$ ขาเข้า (ตัวแปรอิสระ) และค่าเฉลี่ยของ $PM_{2.5}$ ขาออก (ตัวแปรตาม) เพื่อศึกษาลักษณะการทำงานของหอฟอกอากาศในเชิงลึก และประเมินความสามารถของระบบในระดับค่าความเข้มข้นที่แตกต่างกัน การวิเคราะห์นี้ใช้แบบจำลองการถดถอยเชิงเส้น (linear regression) โดยผลการวิเคราะห์ที่ได้สมการที่ได้จากแบบจำลองการถดถอยเชิงเส้น คือ

$$PM_{2.5} \text{ Output} = -9.84 + (0.14 \times PM_{2.5} \text{ Input}) \quad (1)$$

โดยค่าสัมประสิทธิ์ (coefficient) ที่ได้แสดงให้เห็นว่า ค่า $PM_{2.5}$ ขาออกจะเพิ่มขึ้นเฉลี่ย $0.140 \mu\text{g}/\text{m}^3$ เมื่อค่า $PM_{2.5}$ ขาเข้าเพิ่มขึ้น $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ และสามารถแสดงผลออกมาดังภาพที่ 8



ภาพที่ 8 กราฟสมการการถดถอยเชิงเส้นเกี่ยวกับความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของ PM_{2.5} ขาเข้า และค่าเฉลี่ยของ PM_{2.5} ขาออก

จากแบบจำลองการถดถอยสามารถวิเคราะห์หาค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) ซึ่งแสดงถึงอิทธิพลของตัวแปรอิสระ (PM_{2.5} ขาเข้า) ที่มีต่อตัวแปรตาม (PM_{2.5} ขาออก) ที่คำนวณออกมาได้เป็น 0.98 ซึ่งค่าดังกล่าวแสดงให้เห็นว่า แบบจำลองมีความแปรปรวนต่ำ ซึ่งบ่งชี้ถึงความแม่นยำและความเหมาะสมของแบบจำลองที่ใช้ประเมิน

7. การอภิปรายผล

จากผลการทดลองพบว่า หอฟอกอากาศที่ใช้เทคนิคสครับเบอร์ผสมผสานกับระบบน้ำป่นปูนมีประสิทธิภาพในการดักจับฝุ่นละออง PM_{2.5} ได้อย่างมีนัยสำคัญ โดยเฉลี่ยสามารถดักจับฝุ่นได้ถึงร้อยละ 87.46 ซึ่งสอดคล้องกับวัตถุประสงค์หลักของการพัฒนาหอฟอกอากาศในพื้นที่กึ่งปิด เช่น สถานีขนส่งมวลชนและจุดรอรถโดยสาร การทดสอบพบว่า ประสิทธิภาพของหอฟอกอากาศสามารถรักษาค่าการกรองได้ในช่วงระหว่างร้อยละ 85.80 ถึงร้อยละ 91.20 ขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของฝุ่นละออง PM_{2.5} ที่เข้าสู่ระบบ และผลจากแบบจำลองการถดถอยนี้ช่วยสนับสนุนข้อสังเกตที่ว่า ค่า PM_{2.5} ขาออกมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามค่า PM_{2.5} ขาเข้า และสะท้อนถึงข้อจำกัดของประสิทธิภาพหอฟอกอากาศเมื่อเผชิญกับค่าความเข้มข้นที่สูงขึ้น โดยข้อมูลนี้สามารถนำไปใช้ปรับปรุงการออกแบบหอฟอกอากาศในอนาคตเพื่อให้รองรับสภาพแวดล้อมที่มีความเข้มข้น PM_{2.5} สูงได้ดียิ่งขึ้น

เมื่อพิจารณาผลการใช้งานในสถานการณ์ที่มีความเข้มข้นของ $PM_{2.5}$ ไม่เกิน $200 \mu g/m^3$ ซึ่งเป็นระดับที่อาจพบได้ในพื้นที่สาธารณะทั่วไป หอฟอกอากาศสามารถลดระดับความเข้มข้นของฝุ่น $PM_{2.5}$ ให้ต่ำกว่าเกณฑ์ที่องค์การอนามัยโลกกำหนดไว้คือ $15 \mu g/m^3$ สำหรับค่าเฉลี่ยราย 24 ชั่วโมง นอกจากนี้ การใช้งานเทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่งในการติดตามและควบคุมระบบช่วยเพิ่มความแม่นยำในการประเมินผลและควบคุมการทำงานของหอฟอกอากาศได้จากระยะไกล ทำให้การปรับปรุงและเพิ่มประสิทธิภาพของการกรองอากาศสามารถทำได้ทันทีเมื่อสภาพแวดล้อมมีการเปลี่ยนแปลง

อย่างไรก็ตาม ควรพิจารณาถึงการประยุกต์ใช้หอฟอกอากาศในพื้นที่ที่มีการไหลของอากาศสูง เช่น พื้นที่เปิดโล่ง ซึ่งอาจทำให้ประสิทธิภาพของการกรองอากาศลดลงกว่าที่วัดได้ในสภาวะควบคุม นอกจากนี้ ค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาระบบน้ำและอุปกรณ์เทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง อาจต้องได้รับการวางแผนอย่างเหมาะสมเพื่อให้ระบบสามารถทำงานได้อย่างต่อเนื่องในระยะยาว ในอนาคตการพัฒนาหอฟอกอากาศอาจพิจารณาควบรวมกับการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ เพื่อตอบสนองเป้าหมายความเป็นกลางทางคาร์บอน (carbon neutrality) ซึ่งสามารถต่อยอดและพัฒนาจากการวิจัยและปรับปรุงหอฟอกให้สามารถแก้ปัญหามลพิษทางอากาศได้อีกด้วย

8. ข้อสรุป

การศึกษานี้จัดทำขึ้นเพื่อเป็นต้นแบบและแนวทางการใช้เทคโนโลยีรูปแบบหนึ่งในการแก้ปัญหาฝุ่นละอองขนาดเล็กในเขตเมืองโดยเฉพาะบริเวณที่ประชาชนใช้ในชีวิตประจำวัน เช่น จัตุรัสบริการสาธารณะ ชุมชน หรือบริเวณสถานที่ก่อสร้าง โดยผู้วิจัยได้ออกแบบและพัฒนาหอฟอกอากาศโดยใช้เทคนิคสครับเบอร์ชนิดสเปรย์น้ำผสมผสานเทคนิคสเปรย์น้ำและเทคนิคระบบน้ำปั่นป่วน เพื่อให้หอฟอกอากาศสามารถลดฝุ่น $PM_{2.5}$ ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ร่วมกับการพัฒนาระบบเทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่งเพื่อการติดตามค่าและควบคุมการทำงานของหอฟอกอากาศ

การทดสอบประสิทธิภาพการทำงานของหอฟอกอากาศภายใต้สภาวะควบคุมในห้องทดสอบที่ความเข้มข้นของฝุ่นละออง $PM_{2.5}$ ตั้งแต่ระดับ $50-900 \mu g/m^3$ ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่า หอฟอกอากาศมีประสิทธิภาพในการลดฝุ่น $PM_{2.5}$ มากกว่าร้อยละ 80 และในช่วงความเข้มข้น $PM_{2.5}$ ต่ำกว่า $200 \mu g/m^3$ ซึ่งเป็นระดับความเข้มข้นสูงสุดที่อาจเกิดขึ้นได้จริงในพื้นที่สาธารณะทั่วไป หอฟอกอากาศสามารถควบคุมคุณภาพอากาศที่ผ่านการกรองให้มีระดับค่า $PM_{2.5}$ ต่ำกว่า $15 \mu g/m^3$ ซึ่งเป็นไปตามเกณฑ์แนะนำขององค์การอนามัยโลก สำหรับค่าเฉลี่ยราย 24 ชั่วโมง

9. ข้อเสนอแนะ

9.1 ข้อเสนอแนะสำหรับการศึกษาในอนาคต

ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่า หอฟอกอากาศดักจับฝุ่นละออง $PM_{2.5}$ โดยใช้เทคนิคผสมผสานระหว่าง สกรับเบอร์ชนิดสเปรย์น้ำและระบบน้ำปั๊มนสามารถลดปริมาณฝุ่น $PM_{2.5}$ ได้อย่างมีประสิทธิภาพในพื้นที่ กึ่งปิด ควรมีการศึกษาต่อยอดเพื่อพิจารณาถึงการออกแบบและทดสอบประสิทธิภาพของหอฟอกอากาศ ในสภาพแวดล้อมที่มีการเคลื่อนไหวของอากาศที่ไม่คงที่ เช่น พื้นที่กลางแจ้งที่มีการไหลของลมตลอดเวลา เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการกรองฝุ่นละอองในสภาวะแวดล้อมที่หลากหลาย

9.2 ข้อเสนอแนะเชิงนโยบายสำหรับกิจการสื่อสารดิจิทัล

การใช้เทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่งในการควบคุมและติดตามการทำงานของหอฟอกอากาศ มีศักยภาพสูงในการใช้งาน ในอนาคตควรมีนโยบายที่เกี่ยวข้องกับการพัฒนาเทคโนโลยีที่จะช่วยส่งเสริม การใช้เทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่งในอุตสาหกรรมด้านสิ่งแวดล้อมอย่างกว้างขวาง เช่น การควบคุมมลพิษ ในเมืองใหญ่ โดยการพัฒนาระบบเทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง และการขยายเครือข่ายสื่อสารดิจิทัล ควรกำหนดมาตรฐานเพื่อให้การใช้งานในหลากหลายภาคส่วนเป็นไปได้อย่างมีประสิทธิภาพและสอดคล้องกับ การพัฒนาทางเทคโนโลยี นอกจากนี้ ภาครัฐควรสนับสนุนการติดตั้งระบบฟอกอากาศในพื้นที่สาธารณะ เช่น สถานีขนส่ง อาคารจอดรถ และพื้นที่ที่ประชาชนใช้งานเป็นประจำ เพื่อลดผลกระทบของมลพิษต่อสุขภาพ ประชาชนในระยะยาว

รายการเอกสารอ้างอิง

- American National Standards Institute & American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers (ANSI/ASHRAE). (2020). *Standards 62.1 & 62.2*. ASHRAE. <https://www.ashrae.org/technical-resources/bookstore/standards-62-1-62-2>
- Chaudhari, B. S., Zennaro, M., & Borkar, S. (2020). LPWAN Technologies: Emerging application characteristics, requirements, and design considerations. *Future Internet*, 12(3), 46. <https://doi.org/10.3390/fi12030046>
- Chulalongkorn University. (2020). *Stay Safe in the PM_{2.5} Dust*. <https://www.chula.ac.th/en/news/26593>
- Ehrlich, C., Noll, G., Kalkoff, W. -D., Baumbach, G., & Dreiseidler, A. (2007). PM₁₀, PM_{2.5}, and PM_{1.0} emissions from industrial plants: Results from measurement programs in Germany. *Atmospheric Environment*, 41(29), 6236-6254. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2007.03.059>
- Hunkeler, U., Truong, H. L., & Stanford-Clark, A. (2008). MQTT-S—A publish/subscribe protocol for wireless sensor networks. *2008 3rd International Conference on Communication Systems Software and Middleware and Workshops. COMSWARE'08* (pp. 791-798). IEEE. <https://doi.org/10.1109/COMSWA.2008.4554519>
- Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). (2020). IEEE standard for an architectural framework for the Internet of Things (IoT). *IEEE Std 2413-2019*, 1-269. <https://doi.org/10.1109/IEEESTD.2020.9032420>
- Minerva, R., Biru, A., & Rotondi, D. (2015). Towards a definition of the Internet of Things (IoT). *IEEE Internet Initiative*, 1, 1-86. https://iot.ieee.org/images/files/pdf/IEEE_IoT_Towards_Definition_Internet_of_Things_Revision1_27MAY15.pdf
- Mussatti, D., & Hemmer, P. (2002). *Section 6 particulate matter, EPA/452/B-02-001, chapter 2 wet scrubbers for particulate matter*. U.S. Environmental Protection Agency. <https://www.epa.gov/sites/default/files/2020-07/documents/cs6ch2.pdf>
- Querol, X., Alastuey, A., Rodriguez, S., Plana, F., Ruiz, C. R., Cots, N., Massagué, G., & Puig, O. (2001). PM₁₀ and PM_{2.5} source apportionment in the Barcelona Metropolitan Area, Catalonia, Spain. *Atmospheric Environment*, 35(36), 6407-6419. [https://doi.org/10.1016/S1352-2310\(01\)00361-2](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(01)00361-2)

- Tao, J., Zhang, L., Ho, K., Zhang, R., Lin, Z., Zhang, Z., Lin, M., Cao, J., Liu, S., & Wang, G. (2014). Impact of PM2.5 chemical compositions on aerosol light scattering in Guangzhou — The largest megacity in South China. *Atmospheric Research*, 135-136, 48-58. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2013.08.015>
- Wansom, A., Maneechot, P., Jiteurtragool, N., & Vitidsant, T. (2023). PM2.5 collection enhancement in a smart hybrid wet scrubber tower. *Processes*, 11(12), 3306. <https://doi.org/10.3390/pr11123306>
- World Health Organization (WHO). (2024). *Ambient (outdoor) air pollution*. [https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/ambient-\(outdoor\)-air-quality-and-health](https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/ambient-(outdoor)-air-quality-and-health)
- Zhang, R., Jing, J., Tao, J., Hsu, S. -C., Wang, G., Cao, J., Lee, C. S. L., Zhu, L., Chen, Z., Zhao, Y., & Shen, Z. (2013). Chemical characterization and source apportionment of PM2.5 in Beijing: Seasonal perspective. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 13(14), 7053–7074. <https://doi.org/10.5194/acp-13-7053-2013>