



กทปส

## รายงานฉบับสมบูรณ์

โครงการขอรับการส่งเสริมและสนับสนุนจากเงินกองทุนวิจัยและพัฒนากิจการกระจายเสียง  
กิจการโทรทัศน์ และกิจการโทรคมนาคม เพื่อประโยชน์สาธารณะ

การศึกษาและพัฒนาหอฟอกอากาศอัจฉริยะที่ใช้พลังงานแสงอาทิตย์และ  
ระบบควบคุมดูแลผ่านเทคโนโลยีไอโอที เพื่อการลดฝุ่นละอองขนาดเล็ก  
(PM 2.5) ในพื้นที่สาธารณะ

The research and development of Smart Air Purification Tower  
with Solar Energy Powered and IoT based control and  
monitoring system for PM 2.5 reduction in public area

กองทุนวิจัยและพัฒนากิจการกระจายเสียง กิจการโทรทัศน์ และกิจการโทรคมนาคม เพื่อประโยชน์สาธารณะ  
(สำนักงาน กสทช.)

แบบ กทปส. ME-003



กทปส

## รายงานฉบับสมบูรณ์

โครงการขอรับการส่งเสริมและสนับสนุนจากเงินกองทุนวิจัยและพัฒนากิจการกระจายเสียง  
กิจการโทรทัศน์ และกิจการโทรคมนาคม เพื่อประโยชน์สาธารณะ

นาย เอกสิทธิ์ วันสม และคณะ

กรกฎาคม 2566

กองทุนวิจัยและพัฒนากิจการกระจายเสียง กิจการโทรทัศน์ และกิจการโทรคมนาคม เพื่อประโยชน์สาธารณะ  
(สำนักงาน กสทช.)

แบบ กทปส. ME-003

รายงานฉบับสมบูรณ์

ทุนส่งเสริมและสนับสนุนการวิจัยและพัฒนา  
สัญญารับทุนเลขที่ A64-1-(2)-005

The research and development of Smart Air Purification Tower with Solar Energy Powered  
and IoT based control and monitoring system for PM 2.5 reduction in public area

(คณะ) นักวิจัย

- |  |                        |
|--|------------------------|
| 1. นาย เอกสิทธิ์ วันสม                   | นักวิจัยหัวหน้าโครงการ |
| 2. ศาสตราจารย์ ดร.ธราพงษ์ วิทิตสานต์     | นักวิจัยร่วม           |
| 3. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พิสิษฐ์ มณีโชติ | นักวิจัยร่วม           |
| 4. ดร.ณัฐกิตติ์ จิตรเอื้อตระกูล          | นักวิจัยร่วม           |
| 5. ดร.ซัชไชย วรรณบูรณ์                   | นักวิจัยร่วม           |
| 6. นาย จิรายุ เสมกันทา                   | นักวิจัยร่วม           |
| 7. นาย พลภัทร พรคุณานภาพ                 | นักวิจัยร่วม           |

ได้รับทุนอุดหนุนจาก

กองทุนวิจัยและพัฒนากิจการกระจายเสียง กิจการโทรทัศน์ และกิจการโทรคมนาคม เพื่อประโยชน์สาธารณะ  
(สำนักงาน กสทช.)

กรกฎาคม 2566

แบบ กทปส. ME-003

## บทสรุปผู้บริหาร

การศึกษาและพัฒนาหอฟอกอากาศอัจฉริยะที่ใช้พลังงานแสงอาทิตย์และระบบควบคุมดูแลผ่านเทคโนโลยีไอโอที เพื่อการลดฝุ่นละอองขนาดเล็ก  
กรกฎาคม 2566

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาและพัฒนาเทคโนโลยีเพื่อแก้ไขปัญหาฝุ่นละอองขนาดเล็กในเมือง โดยเฉพาะในบริเวณที่ผู้คนเดินทางมาก เช่น ถนนตามป้ายรถเมล์ ชุมชน หรือบริเวณก่อสร้าง ซึ่งฝุ่น PM2.5 มีผลกระทบต่อสุขภาพของคนในเมือง โดยเฉพาะในฤดูแล้งที่มีการสูบบุหรี่มาก ๆ ในภาคเหนือและกรุงเทพฯ

การวิจัยนี้ทางทีมผู้พัฒนาได้ออกแบบและจัดสร้างหอฟอกอากาศโดยผสมผสานเทคนิคของหยดน้ำ ระบบน้ำปั่นป่วน และวัสดุกรอง เข้าด้วยกัน เพื่อให้หอฟอกสามารถลดฝุ่น PM2.5 ได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในบริเวณที่มีการจราจรหนาแน่นซึ่งเป็นปัญหาที่ส่งผลกระทบต่อคนเดินถนนโดยตรง

ผลการทดสอบในห้องวิจัยแสดงให้เห็นว่าหอฟอกอากาศนี้มีประสิทธิภาพในการลดฝุ่น PM2.5 มากกว่า 80% โดยใช้หยดน้ำขนาด 270 ไมครอน เพื่อให้ได้อัตราส่วนของน้ำต่ออากาศที่เหมาะสมในการดักจับฝุ่น นอกจากนี้ทางทีมผู้พัฒนาได้ทำการติดตั้งหอฟอกอากาศในพื้นที่ป้ายรถเมล์ภายในตัวเมืองพิษณุโลก ในจุดที่มีผู้โดยสารมาก ซึ่งผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่ามีประสิทธิภาพในการฟอกอากาศในพื้นที่จริงสามารถทำได้ใกล้เคียงกับผลการทดสอบในห้องวิจัย นั่นคือได้ค่าความสะอาดของอากาศที่ผ่านการกรองเป็นไปตามมาตรฐานขององค์การอนามัยโลกและกรมควบคุมมลพิษแห่งประเทศไทย

ข้อเสนอแนะเพิ่มเติมสำหรับโครงการ

1. นำไปใช้ลดฝุ่นในเมืองในจุดที่ผู้คนได้รับผลกระทบ เช่น จุดคอยรถ ถนนคนเดิน บริเวณที่พักในสวนสาธารณะ แหล่งชุมชน เช่นตลาด หรือสร้างเป็นเครือข่ายปอดของเมือง
2. นำไปใช้ลดมลพิษของแหล่งกำเนิด เช่น รอบไซต์งานก่อสร้าง โรงสีข้าว สถานีจอดรถ และโรงงานขนาดเล็ก SME
3. พัฒนารูปแบบหอฟอกให้มีความสวยงามเหมาะกับเมืองเช่นรูปแบบสวนแนวตั้ง เพื่อให้เหมาะกับการนำไปวางให้มีภูมิทัศน์สวยงาม
4. พัฒนาสู่หอฟอกอากาศที่เพิ่มการดักจับ CO<sub>2</sub> เพื่อรองรับอนาคต

การศึกษาและพัฒนาหอฟอกอากาศอัจฉริยะโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์และระบบควบคุมดูแล  
ผ่านเทคโนโลยีไอโอที เพื่อการลดฝุ่นละอองขนาดเล็ก  
(PM 2.5) ในพื้นที่สาธารณะ  
นาย เอกสิทธิ์ วันสม  
กรกฎาคม 2566

งานวิจัยนี้จัดทำขึ้นเพื่อเป็นต้นแบบและแนวทางการใช้เทคโนโลยีรูปแบบหนึ่งในการ  
แก้ปัญหาฝุ่นละอองขนาดเล็กในเมืองให้กับผู้คนที่เดินไปตามถนนตามป้ายรถเมล์ ชุมชน หรือบริเวณ  
สถานที่ก่อสร้าง เป็นต้น ปัญหาฝุ่นละอองขนาดเล็กเช่น พีเอ็ม 2.5 ส่งผลกระทบต่อผู้คนในเมืองเป็น  
อย่างมาก ในช่วงฤดูแล้งในภาคเหนือและกรุงเทพฯ และสาเหตุสำคัญประการหนึ่งของการเกิดฝุ่น พี  
เอ็ม 2.5 คือปัญหาการจราจรซึ่งส่งผลกระทบร้ายแรงต่อคนเดินถนนที่อยู่ริมถนนตามป้ายรถโดยสาร  
ประจำทาง งานวิจัยนี้จึงได้ศึกษา ออกแบบ และผลิตหอฟอกอากาศโดยศึกษาเทคนิค 3 ประการ  
ได้แก่ ขนาดหยดน้ำ ระบบน้ำแบบปั่นป่วน และวัสดุบรรจุกรอง จนนำไปสู่ระบบหอฟอกอากาศน้ำ  
แบบผสมผสานซึ่งหอฟอกอากาศนี้ได้มาจากการศึกษาตัวแปรต่างๆ จนมีการใช้ระบบสเปรย์น้ำร่วมกับ  
ระบบน้ำปั่นป่วนเพื่อกำจัดฝุ่น พีเอ็ม 2.5 ประสิทธิภาพของหอฟอกอากาศนี้มากกว่า 80% โดยใช้  
หยดน้ำขนาด 270ไมครอนและมีอัตราส่วนของเหลวคือน้ำต่ออากาศคือน้ำ9ลิตรต่ออากาศ1ลูกบาศก์  
เมตรในของสเปรย์น้ำและระดับน้ำ100-150 มม. เหนือหัวฉีดในส่วนของระบบน้ำแบบปั่นป่วนตาม  
เงื่อนไขที่ทดสอบในห้องปฏิบัติการโดยใช้เทคโนโลยีไอโอทีเพื่อช่วยวัดผลลัพธ์แบบเรียลไทม์และวัดหา  
ค่าประสิทธิภาพ หลังจากนั้นให้ลองใช้ปริมาตรอากาศสะอาดที่ได้จากเครื่องฟอกแบบไฮบริดเพื่อ  
ออกแบบระบบท่ออากาศด้วยซอฟต์แวร์จำลอง Computation Fluid Dynamics (CFD) เพื่อวัด  
ผลลัพธ์หากติดตั้งหออากาศสะอาดพร้อมกับระบบท่อลมออกที่รถป้ายรถประจำทาง

สุดท้ายได้ติดตั้งเครื่องฟอกเปียกแบบน้ำไฮบริดที่ที่พักผู้โดยสารบนถนนหน้าโรงพยาบาลใน  
ตัวเมืองพิษณุโลกในช่วงฤดูแล้งตั้งแต่เดือนมีนาคมถึงเมษายน เป็นเวลา 60 วัน มีการปรับป้ายรถเมล์  
ให้เป็นพื้นที่กึ่งปิดกึ่งเปิดผลปรากฏว่าหอฟอกอากาศมีประสิทธิภาพการฟอกอากาศใกล้เคียงกับผล  
การตรวจทางห้องปฏิบัติการ คือได้ค่าความสะอาดของท่อลมออกไปตามมาตรฐานของห้องปฏิบัติการ  
อนามัยโลก และกรมควบคุมมลพิษแห่งประเทศไทย อย่างไรก็ตามขนาดลมสะอาดที่ได้ 5 ถึง7  
ลูกบาศก์เมตรต่อนาที่ที่สามารถช่วยสร้างมานอากาศเจือจางฝุ่นพีเอ็ม 2.5ในอากาศในป้ายรถเมล์ได้  
25-50% เนื่องจากขึ้นอยู่กับการแพร่กระจายของอากาศด้วยความเร็วลมที่เข้ามาจากรถที่วิ่งผ่าน

The research and development of Smart Air Purification Tower with Solar Energy Powered and IoT based control and monitoring system for PM 2.5 reduction in public area

Akasit Wansom

July 2023

This research was done to be as a model and project guideline. One form of using technology is to solve the problem of small dust particles in cities for people walking along the road at bus stops, community areas, or around construction sites, etc. Fine particulate matter like PM 2.5 issues affect people in the town a lot during the dry season in North Thailand and Bangkok, and one of the leading causes of PM 2.5 generation is traffic problems, which seriously impact pedestrians on roadsides and at public bus stops. Therefore, this research studied, designed, and produced air purification towers by studying the three techniques: droplet sizes, turbulence water, and packed-bed material, until it led to a hybrid water purification tower system. This air purification tower was obtained by studying various variables until a water spray system combined with a turbulence water system was used to remove PM 2.5. It was more efficient than 80% at droplet size 270 microns with a liquid-to-air ratio of 9 in the spray section and water level 100-150mm above the nozzle in the turbulence part according to conditions tested in the laboratory using IOTs technology to help measure results in real-time and find efficiency. After that, try using the clean air volumes from the hybrid wet scrubber to design the air duct system with the Computation Fluid Dynamics (CFD) simulation software to measure the results if the clean air tower was installed with the airflow outlet duct system at the bus stop.

Finally, the hybrid water wet scrubber was installed at the bus shelter on the road size in front of the hospital in Phitsanulok City during the dry season from March to April for 60 days. The bus stop was modified to be a semi-enclosed area. The result shows that the air purification tower has purification efficiency similar to the laboratory results. The cleanliness value of the air exhaust pipe meets the standards of both WHO and the Pollution Control Department of Thailand. However, the wind size of five cubic meters per minute can dilute the air in the bus stop by 25-50% because it depends on the air diffusion with the wind speed that enters from the passing car.

โครงการการศึกษาและพัฒนาหอฟอกอากาศอัจฉริยะ โดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์และระบบควบคุมดูแลผ่านเทคโนโลยีไอโอที เพื่อการลดฝุ่นละอองขนาดเล็ก (PM 2.5) ในพื้นที่สาธารณะ

## สารบัญ

	หน้า
บทสรุปผู้บริหาร	4
บทคัดย่อภาษาไทย	5
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	6
สารบัญตาราง	9
สารบัญภาพ	11
<b>บทที่ 1. บทนำ</b>	<b>17</b>
ที่มา และความสำคัญของโครงการ	17
วัตถุประสงค์	17
<b>บทที่ 2. ทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง</b>	<b>20</b>
ทฤษฎี งานวิจัยและโครงการที่เกี่ยวข้อง	20
กรอบแนวคิด หรือรายละเอียดด้านเทคนิค	27
<b>บทที่ 3. ระเบียบวิธีวิจัย</b>	<b>40</b>
วิธีการ และขั้นตอนการดำเนินการโครงการ	40
การออกแบบโครงสร้างหอฟอกอากาศสำหรับการติดตั้งในพื้นที่สาธารณะ	45
การออกแบบระบบพลังงานแสงอาทิตย์	62
การออกแบบระบบไอโอที (IoT) สำหรับควบคุมหอฟอกอากาศอัจฉริยะ	64
การออกแบบและพัฒนาเครื่องวัดฝุ่นละอองขนาดเล็ก (PM 2.5)	68
การออกแบบและการใช้งาน Air Quality Monitoring Platform	92
<b>บทที่ 4. ผลการวิจัย และการวิจารณ์ผล</b>	<b>100</b>
การติดตั้งเครื่องวัดฝุ่นละอองขนาดเล็ก (PM2.5)	100
ผลการศึกษาและวิเคราะห์ระดับปัญหาฝุ่นละอองในพื้นที่ดำเนินโครงการ	105

โครงการการศึกษาและพัฒนาหอฟอกอากาศอัจฉริยะ โดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์และระบบ  
ควบคุมดูแลผ่านเทคโนโลยีไอโอที เพื่อการลดฝุ่นละอองขนาดเล็ก (PM 2.5) ในพื้นที่สาธารณะ  
สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
<b>บทที่ 5. สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ</b>	<b>114</b>
การดำเนินการทดสอบประสิทธิภาพของหอฟอกอากาศอัจฉริยะ	114
การทดสอบประสิทธิภาพการทำงานภายใต้สภาวะแวดล้อมจริงที่จุดตรวจ สาธารณะในจังหวัดพิษณุโลกและข้อเสนอแนะ	117
<b>บรรณานุกรม</b>	<b>124</b>
<b>ภาคผนวก</b>	<b>129</b>
ภาคผนวก ก	129
ภาคผนวก ข	134
ภาคผนวก ค	142

โครงการการศึกษาและพัฒนาหอฟอกอากาศอัจฉริยะ โดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์และระบบควบคุมดูแลผ่านเทคโนโลยีไอโอที เพื่อการลดฝุ่นละอองขนาดเล็ก (PM 2.5) ในพื้นที่สาธารณะ

### สารบัญตาราง

ลำดับ		หน้า
1	ตารางเปรียบเทียบเทคนิคการกรองฝุ่นละอองขนาดเล็กในอากาศ	35
2	ตารางแสดงความเร็วที่เหมาะสมของน้ำในท่อส่วนต่างๆ	48
3	ตารางค่า Packing Factors สำหรับตัวกลางแต่ละชนิด	56
4	ตารางแสดงความเร็วของของไหลในท่อที่แนะนำ	58
5	รายละเอียดของชุดเซ็นเซอร์วัดฝุ่นละอองขนาดเล็ก (PM 2.5)	74
6	ตารางแสดงรายละเอียดของเซ็นเซอร์วัดค่าฝุ่นละออง โดยเงื่อนไขพื้นฐานที่ทดสอบอุณหภูมิอยู่ที่ $25\pm 2^{\circ}\text{C}$ และความชื้นสัมพัทธ์ที่ $50\pm 10\%$ ที่ไฟเลี้ยง 5 V	75
7	ตารางแสดงรายละเอียดของเซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิและความชื้น	76
8	ตารางแสดงคำแนะนำและเงื่อนไขในการใช้งานชุดเซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิและความชื้น	77
9	ตารางรายละเอียดช่องสัญญาณของชุดเซ็นเซอร์วัดฝุ่นละอองขนาดเล็ก (PM 2.5)	78
10	ตารางแสดงรายละเอียดและส่วนประกอบเบื้องต้นของ Gas sensor (Multichannel)	79
11	แสดงรายละเอียดและคุณลักษณะเบื้องต้นของเซ็นเซอร์ไนโตรเจนไดออกไซด์ (NO <sub>2</sub> )	79
12	ตารางแสดงคำแนะนำและเงื่อนไขในการใช้งานเซ็นเซอร์ไนโตรเจนไดออกไซด์ (NO <sub>2</sub> )	80
13	ตารางรายละเอียดการให้ความร้อนเซ็นเซอร์คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ก่อนการใช้งาน	82
14	ตารางแสดงรายละเอียดและคุณลักษณะเบื้องต้นของเซ็นเซอร์คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO)	83
15	ตารางแสดงคำแนะนำและเงื่อนไขในการใช้งานเซ็นเซอร์คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO)	83
16	ตารางรายละเอียดการให้ความร้อนเซ็นเซอร์คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ก่อนการใช้งาน	85
17	ตารางรายละเอียดและคุณสมบัติของ บอร์ด DEVIO NB-DEVKIT	86
18	ตารางสรุปการวิเคราะห์ความปลอดภัยตามแบบจำลอง security threat แบบ STRIDE	91

โครงการการศึกษาและพัฒนาหอฟอกอากาศอัจฉริยะ โดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์และระบบ  
ควบคุมดูแลผ่านเทคโนโลยีไอโอที เพื่อการลดฝุ่นละอองขนาดเล็ก (PM 2.5) ในพื้นที่สาธารณะ  
สารบัญตาราง (ต่อ)

ลำดับ		หน้า
19	แสดงรายละเอียดตำแหน่งจุดการติดตั้งเครื่องวัดฝุ่นละอองขนาดเล็ก (PM2.5)	100
20	ผลการทดลองแสดงประสิทธิภาพการทำงานของหอฟอกอากาศที่ระดับความลึก ของน้ำในกล่อง Turbulence 50, 100 และ 150 mm	116

โครงการการศึกษาและพัฒนาหอฟอกอากาศอัจฉริยะ โดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์และระบบควบคุมดูแลผ่านเทคโนโลยีไอโอที เพื่อการลดฝุ่นละอองขนาดเล็ก (PM 2.5) ในพื้นที่สาธารณะ

## สารบัญญภาพ

ลำดับ		หน้า
1	ขอบเขตและกิจกรรมการดำเนินงาน	19
2	การใช้การผสมอากาศกับน้ำโดยการใช้คอคอดและแรงดันสูงแบบเวนจูรี	20
3	ระบบสกรับบิงแบบ Three Bed Cross Flow Packed Tower	21
4	ระบบสกรับบิงแบบ Countercurrent Packed Tower	21
5	ความสัมพันธ์ระหว่างการละลายในของเหลวของสารที่มีกลิ่น และความเข้มข้นของสารในอากาศ	23
6	ความสัมพันธ์ระหว่างabscissa และ Ordinate	24
7	ภาพแสดงค่า Packing Factors สำหรับตัวกลางแต่ละชนิด	26
8	กรอบแนวคิดงานวิจัยทางด้านเทคนิค	27
9	ภาพแบบจำลองของขอบเขตการไหลของอากาศภายในหอฟอกอากาศ	29
10	ภาพแบบจำลองการไหลของอากาศภายในหอฟอกอากาศแบบ Contour (ด้านข้าง)	29
11	ภาพแบบจำลองการไหลของอากาศภายในหอฟอกอากาศแบบ streamline (ด้านข้าง)	30
12	แบบจำลองเบื้องต้น แบบภาพสามมิติของจตุรอรธสาธารณะที่ประยุกต์ใช้ร่วมกับหอฟอกอากาศ (ใช้ในการอธิบายแนวทางการออกแบบ ทั้งนี้อาจมีการเปลี่ยนแปลง ณ สถานที่ดำเนินการจริง)	31
13	<b>ภาพจำลองขอบเขตการไหลของอากาศบริเวณจตุรอรธสาธารณะที่ประยุกต์ใช้ร่วมกับหอฟอกอากาศ</b>	32
14	ภาพจำลองการไหลของอากาศภายในบริเวณจตุรอรธสาธารณะที่ประยุกต์ใช้ร่วมกับหอฟอกอากาศ (ด้านบน)	32
15	ภาพจำลองการไหลของอากาศภายในบริเวณจตุรอรธสาธารณะที่ประยุกต์ใช้ร่วมกับหอฟอกอากาศ (ด้านข้าง)	33
16	ภาพจำลองการไหลของอากาศภายในบริเวณจตุรอรธสาธารณะที่ประยุกต์ใช้ร่วมกับหอฟอกอากาศแบบ streamline (ด้านซ้าย)	33
17	ภาพจำลองการไหลของอากาศภายในบริเวณจตุรอรธสาธารณะที่ประยุกต์ใช้ร่วมกับหอฟอกอากาศแบบ streamline	34

โครงการการศึกษาและพัฒนาหอฟอกอากาศอัจฉริยะ โดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์และระบบควบคุมดูแลผ่านเทคโนโลยีไอโอที เพื่อการลดฝุ่นละอองขนาดเล็ก (PM 2.5) ในพื้นที่สาธารณะ

### สารบัญญภาพ (ต่อ)

ลำดับ		หน้า
18	กรอบแนวคิดในการพัฒนาระบบไอโอที	37
19	บัญชีนวัตกรรม Hybrid Solar inverter โดยบริษัท ไทยโซลาร์เวย์ จำกัด	38
20	โปสเตอร์รายละเอียด Hybrid Solar inverter โดยบริษัท ไทยโซลาร์เวย์ จำกัด	39
21	ภาพแสดงความเร็วรวมที่เหมาะสมสำหรับการออกแบบท่อ	46
22	ภาพแสดงตาราง Circular Equivalents of Rectangular Ducts for Equal Friction and Capacity.	47
23	Friction Loss with Air Quantity	48
24	Water level and Flow speed with Flow Quantity	49
25	รูปแสดงหอกำจัดฝุ่นแบบ counter flow	51
26	รูปความสัมพันธ์ระหว่างการละลายในของเหลวของสารที่มีกลิ่น และความเข้มข้นของสารในอากาศ	53
27	ภาพแสดง Ordinate with Abscissa	54
28	WIRING DIAGRAM BOX สำหรับตู้ไฟฟ้า AC/DC	63
29	WIRING DIAGRAM สำหรับต่อระบบปั๊มลมและปั๊มน้ำ เข้ากับระบบจ่ายไฟฟ้าแบบไฮบริด Solar Hybrid System	64
30	แผนภาพแสดงสถาปัตยกรรมของระบบ IoT ของหอฟอกจะแสดงส่วนประกอบหลักของในการออกแบบทั้งหมด	65
31	การสื่อสารแบบอนุกรมด้วย RS – 485 สำหรับ Modbus RTU	67
32	รูปภาพการสื่อสารแบบอีเทอร์เน็ตสำหรับ Modbus TCP	68
33	เครื่องวัดฝุ่นละอองขนาดเล็ก (PM2.5)	69
34	แสดงสถาปัตยกรรมของเครื่องวัดฝุ่นละอองขนาดเล็ก (PM2.5)	70
35	แผงโซลาร์เซลล์ที่ใช้เป็นแบบ Mono Crystalline Solar PV Module แบบกรอบอลูมิเนียมและกระจกนิรภัย	71
36	วงจรชุดควบคุมการชาร์จและการจัดการพลังงาน	72
37	ชุดเซ็นเซอร์ที่ประกอบอยู่ใน Plates Radiation Shields ซึ่งทำจากวัสดุพลาสติก ABS	73

โครงการการศึกษาและพัฒนาหอฟอกอากาศอัจฉริยะ โดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์และระบบควบคุมดูแลผ่านเทคโนโลยีไอโอที เพื่อการลดฝุ่นละอองขนาดเล็ก (PM 2.5) ในพื้นที่สาธารณะ

### สารบัญภาพ (ต่อ)

ลำดับ		หน้า
38	แผนภาพแสดงการทำงานของชุดเซ็นเซอร์ SEN54 ประการด้วยเซ็นเซอร์ ความชื้น อุณหภูมิ VOC และ ชุดเลเซอร์สำหรับวัดค่าฝุ่นละออง	74
39	ชุดเซ็นเซอร์และช่องเชื่อมต่อสัญญาณสำหรับวัดฝุ่นละอองขนาดเล็ก (PM 2.5)	78
40	ขนาดของเซ็นเซอร์ไนโตรเจนไดออกไซด์ (NO <sub>2</sub> )	81
41	ภาพแสดงรายละเอียดตำแหน่งช่องเชื่อมต่อสัญญาณของเซ็นเซอร์ไนโตรเจนได ออกไซด์ (NO <sub>2</sub> )	81
42	ภาพขนาดของเซ็นเซอร์คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO)	85
43	ภาพรายละเอียดและตำแหน่งช่องเชื่อมต่อสัญญาณของเซ็นเซอร์คาร์บอนมอน ออกไซด์ (CO)	85
44	ภาพแบตเตอรี่แบบ 18650 แรงดันไฟที่ 3.7V	86
45	รูปภาพ Pull-up resistor diagram ภายใน IoT Control Unit	88
46	ภาพ IoT Control Unit เป็นชุดควบคุมที่เป็นบอร์ดที่ประกอบไปด้วยบอร์ด DEVIO NB-DEVKIT และเสาสัญญาณแบบสติกเกอร์ ชนิด IPEX MHF1 (u.FL)	89
47	รูปภาพแสดงกรอบแนวคิดของ platform	89
48	รูปภาพ QR Code สำหรับการเข้าใช้งาน Air Quality Monitoring Platform	92
49	รูปภาพหน้าแรกของ Air Quality Monitoring Platform	92
50	รูปภาพแสดงองค์ประกอบของ Platform	93
51	รูปภาพการกำหนดช่วงเวลาเพื่อแสดงผลข้อมูล	94
52	ภาพแสดงประเภทไฟล์ที่สามารถดาวน์โหลดได้นั้นมีทั้งหมด 4 ประเภท ได้แก่ PDF, PNG, JPEG, JSON	94
53	ภาพแสดงตำแหน่งใน platform การเข้าดูรายละเอียดของแต่ละอุปกรณ์	95
54	ภาพแสดงตำแหน่งการแสดงผลใน platform	96
55	ภาพการแจ้งเตือนระดับน้ำ ผ่าน Line Notify ในหอฟอกอากาศต่ำกว่าระดับที่ ทำให้หอฟอกอากาศมีประสิทธิภาพสูงสุด	98
56	ภาพการแจ้งเตือนระดับน้ำ ผ่าน Email ในหอฟอกอากาศต่ำกว่าระดับที่ทำให้หอ ฟอกอากาศมีประสิทธิภาพสูงสุด	98

โครงการการศึกษาและพัฒนาหอฟอกอากาศอัจฉริยะ โดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์และระบบควบคุมดูแลผ่านเทคโนโลยีไอโอที เพื่อการลดฝุ่นละอองขนาดเล็ก (PM 2.5) ในพื้นที่สาธารณะ

### สารบัญญภาพ (ต่อ)

ลำดับ		หน้า
57	การติดตั้งเครื่องวัดฝุ่นละอองขนาดเล็ก (PM2.5) บริเวณจุดรอรถขนส่งสาธารณะ หน้าโรงพยาบาลพุทธชินราช	101
58	แผนที่ตำแหน่งติดตั้งเครื่องวัดฝุ่นละอองขนาดเล็ก (PM2.5) บริเวณจุดรอรถขนส่งสาธารณะหน้าโรงพยาบาลพุทธชินราช	101
59	การติดตั้งเครื่องวัดฝุ่นละอองขนาดเล็ก (PM2.5) บริเวณวิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยนเรศวร	102
60	แผนที่ตำแหน่งติดตั้งเครื่องวัดฝุ่นละอองขนาดเล็ก (PM2.5) บริเวณวิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยนเรศวร	102
61	การติดตั้งเครื่องวัดฝุ่นละอองขนาดเล็ก (PM2.5) บริเวณหลังวัดพระศรีมหาธาตุ วรวิหาร จังหวัดพิษณุโลก	103
62	แผนที่ตำแหน่งติดตั้งเครื่องวัดฝุ่นละอองขนาดเล็ก (PM2.5) บริเวณหลังวัดพระศรีมหาธาตุวรวิหาร จังหวัดพิษณุโลก	103
63	การติดตั้งเครื่องวัดฝุ่นละอองขนาดเล็ก (PM2.5) บริเวณศูนย์วิจัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย จังหวัดสระบุรี	104
64	แผนที่ตำแหน่งติดตั้งเครื่องวัดฝุ่นละอองขนาดเล็ก (PM2.5) บริเวณศูนย์วิจัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย จังหวัดสระบุรี	104
65	แผนภาพแสดงข้อมูลสรุปของ ฝุ่นละอองขนาดเล็ก PM10 จากเครื่องวัดฝุ่นละอองขนาดเล็ก (PM2.5) หมายเลข AQ-2735 ตั้งแต่เดือน มกราคม ถึง กุมภาพันธ์ ปี 2566 เป็นรายสัปดาห์ บริเวณวิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยนเรศวร	105
66	แผนภาพแสดงข้อมูลสรุปของ ฝุ่นละอองขนาดเล็ก PM2.5 จากเครื่องวัดฝุ่นละอองขนาดเล็ก (PM2.5) หมายเลข AQ-2735 ตั้งแต่เดือน มกราคม ถึง กุมภาพันธ์ ปี 2566 เป็นรายสัปดาห์ บริเวณวิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยนเรศวร	106
67	แผนภาพแสดงข้อมูลสรุปของ ฝุ่นละอองขนาดเล็ก PM10 จากเครื่องวัดฝุ่นละอองขนาดเล็ก (PM2.5) หมายเลข AQ-7704 ตั้งแต่เดือน มกราคม ถึง กุมภาพันธ์ ปี 2566 เป็นรายสัปดาห์ บริเวณวิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยนเรศวร	107

โครงการการศึกษาและพัฒนาหอฟอกอากาศอัจฉริยะ โดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์และระบบควบคุมดูแลผ่านเทคโนโลยีไอโอที เพื่อการลดฝุ่นละอองขนาดเล็ก (PM 2.5) ในพื้นที่สาธารณะ

### สารบัญภาพ (ต่อ)

ลำดับ		หน้า
68	แผนภาพแสดงข้อมูลสรุปของ ฝุ่นละอองขนาดเล็ก PM2.5 จากเครื่องวัดฝุ่นละอองขนาดเล็ก (PM2.5) หมายเลข AQ-7704 ตั้งแต่เดือน มกราคม ถึง กุมภาพันธ์ ปี 2566 เป็นรายสัปดาห์ บริเวณวิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยนเรศวร	108
69	แผนภาพแสดงข้อมูลสรุปของ ฝุ่นละอองขนาดเล็ก PM10 จากเครื่องวัดฝุ่นละอองขนาดเล็ก (PM2.5) หมายเลข AQ-6656 ตั้งแต่เดือน มกราคม ถึง กุมภาพันธ์ ปี 2566 เป็นรายสัปดาห์ บริเวณจตุรอรกสาธารณะหน้าโรงพยาบาลพุทธชินราช	109
70	แผนภาพแสดงข้อมูลสรุปของ ฝุ่นละอองขนาดเล็ก PM2.5 จากเครื่องวัดฝุ่นละอองขนาดเล็ก (PM2.5) หมายเลข AQ-6656 ตั้งแต่เดือน มกราคม ถึง กุมภาพันธ์ ปี 2566 เป็นรายสัปดาห์ บริเวณจตุรอรกสาธารณะหน้าโรงพยาบาลพุทธชินราช	110
71	แผนภาพแสดงข้อมูลสรุปของ ฝุ่นละอองขนาดเล็ก PM10 จากเครื่องวัดฝุ่นละอองขนาดเล็ก (PM2.5) หมายเลข AQ-6758 ตั้งแต่เดือน มกราคม ถึง กุมภาพันธ์ ปี 2566 เป็นรายสัปดาห์ บริเวณจตุรอรกสาธารณะหลังวัดพระศรีมหาธาตุ วรมหาวิหาร	111
72	แผนภาพแสดงข้อมูลสรุปของ ฝุ่นละอองขนาดเล็ก PM2.5 จากเครื่องวัดฝุ่นละอองขนาดเล็ก (PM2.5) หมายเลข AQ-6758 ตั้งแต่เดือน มกราคม ถึง กุมภาพันธ์ ปี 2566 เป็นรายสัปดาห์ บริเวณจตุรอรกสาธารณะหลังวัดพระศรีมหาธาตุ วรมหาวิหาร	112
73	แผนภาพแสดงการทดสอบประสิทธิภาพการทำงานภายใต้สภาวะควบคุมในห้องทดสอบ	114
74	กราฟแสดงประสิทธิภาพในการฟอกอากาศของหอฟอกอากาศที่ระดับความลึกของน้ำในกล่อง Turbulence 50, 100 และ 150 mm	115
75	แผนภาพแสดงการออกแบบและติดตั้งหอฟอกอากาศอัจฉริยะเข้ากับจตุรอรกสาธารณะ	117
76	ภาพแสดงการออกแบบส่วนเชื่อมต่อจากหอฟอกอากาศมายังจตุรอรกสาธารณะซึ่งประกอบด้วย 2 ส่วน ได้แก่ท่อดูดอากาศสกปรกเข้าหอฟอก(Inlet) และท่อปล่อยอากาศที่ผ่านการฟอกเข้ามาในบริเวณ(Outlet)	118
77	ภาพแสดงผลการทำงานของเครื่องเคลื่อนที่ของอากาศในบริเวณจตุรอรกสาธารณะซึ่งมีลักษณะเป็นพื้นที่กึ่งปิด(Semi-enclose area)	119

โครงการการศึกษาและพัฒนาหอฟอกอากาศอัจฉริยะ โดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์และระบบควบคุมดูแลผ่านเทคโนโลยีไอโอที เพื่อการลดฝุ่นละอองขนาดเล็ก (PM 2.5) ในพื้นที่สาธารณะ

### สารบัญภาพ (ต่อ)

ลำดับ		หน้า
78	ภาพแสดงการติดตั้งหอฟอกอากาศที่(ก)บริเวณจุดรอรถสาธารณะบริเวณหลังวัดพระศรีมหาธาตุวรวิหารและ (ข)บริเวณจุดรอรถสาธารณะบริเวณหน้าโรงพยาบาลพุทธชินราช	120
79	ภาพแสดงการติดตั้ง (ก) การติดตั้งท่อดูดอากาศสกปรกและท่อปล่อยอากาศที่ผ่านการฟอกตามการออกแบบ และเซ็นเซอร์วัดคุณภาพอากาศในบริเวณ	121
80	กราฟแสดงถึงประสิทธิภาพการทำงานของหอฟอกอากาศในสภาวะแวดล้อมจริงในการติดตั้งที่จุดรอรถสาธารณะในจังหวัดพิษณุโลกเปรียบเทียบระหว่างอากาศที่ดูดมาจากท่อขาเข้า(Inlet)และอากาศที่ผ่านการกรองและปล่อยออกจากท่อขาออก(Outlet)	122

โครงการการศึกษาและพัฒนาหอฟอกอากาศอัจฉริยะ โดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์และระบบควบคุมดูแลผ่านเทคโนโลยีไอโอที เพื่อการลดฝุ่นละอองขนาดเล็ก (PM 2.5) ในพื้นที่สาธารณะ

## บทที่ 1

### บทนำ

#### ที่มา และความสำคัญของโครงการ

ในประเทศไทยจากการศึกษาวิจัยพบว่าประชากรไทยได้รับผลกระทบด้านชีวิตและสุขภาพจากฝุ่นมลพิษแทบทุกภาคและมีความรุนแรงในช่วงฤดูแล้ง (ช่วงเดือนธันวาคม-เมษายน) โดยแหล่งกำเนิดมลพิษที่เป็นปัญหาและมีผลกระทบต่อชีวิตและสุขภาพของประชาชนมากที่สุดในช่วงฤดูแล้งคือการเผาในพื้นที่เกษตรจากการส่งเสริมอุตสาหกรรมเกษตรอ้อย ข้าวโพด และข้าว ในทุกภาค ยกเว้นภาคใต้ และยังมีส่วนหนึ่งของไฟป่าภาคเหนือตอนบนจากการทำเกษตรพืชเชิงเดี่ยวในพื้นที่ภูเขา ตลอดจนการเผาพื้นที่เกษตรในประเทศเพื่อนบ้านด้วย ทำให้พื้นที่ทุกภาคยกเว้นภาคใต้ได้รับผลกระทบจากฝุ่นละออง PM 2.5 ในช่วงฤดูแล้งกัน รวมทั้งกรุงเทพฯและปริมณฑลที่ได้รับฝุ่นละออง PM 2.5 เพราะกระแสลมที่พัดมวลฝุ่นละออง PM 2.5 จากแหล่งกำเนิดเข้าสู่กรุงเทพฯ และปริมณฑล ร่วมกับสภาพความกดอากาศ การกักขังอากาศไม่มีการถ่ายเททำให้ฝุ่นละออง PM 2.5 ลอยแขวนในบรรยากาศอยู่นาน และสัดส่วนแหล่งกำเนิดฝุ่นละออง PM 2.5 มาจากการเผาอุตสาหกรรมเกษตรมีอิทธิพลมากกว่ามลพิษจากการจราจรหรือมลพิษจากปล่องโรงงานอุตสาหกรรม และจะพบว่าความเข้มข้นฝุ่นละออง PM 2.5 รายชั่วโมงของหลายวันในเดือนมกราคมถึงมีนาคมของเมืองต่าง ๆ มีค่าทะลุ 50 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตรมาก หลายเมืองติดอันดับ 1 ใน 5 เมืองที่มีมลพิษทางอากาศสูงสุดของโลก

สืบเนื่องจากผลกระทบต่อประชากรไทยได้รับผลกระทบจากฝุ่นละอองขนาดเล็ก PM 2.5 ทั้งในด้านเศรษฐกิจและสุขภาพ จึงควรมีการศึกษาและวิจัย แนวทางการแก้ปัญหาอันเนื่องมาจากฝุ่นละอองขนาดเล็ก PM 2.5 รวมทั้งแนวทางในการแจ้งเตือนหรือเฝ้าระวังค่าฝุ่นละออง PM 2.5 ด้วยการประยุกต์ใช้ เทคโนโลยีการสื่อสารและโทรคมนาคมในการติดตาม เฝ้าระวัง และนำข้อมูลมาเพื่อวิเคราะห์หาแนวทางแก้ไขปัญหานั้น จึงนำไปสู่การศึกษาและพัฒนาหอฟอกอากาศอัจฉริยะ สำหรับการแก้ไขปัญหาที่มีสาเหตุมาจากฝุ่นละอองขนาดเล็ก PM 2.5

#### วัตถุประสงค์

วัตถุประสงค์หลักของงานวิจัยนี้ คือ การวิจัยเพื่อออกแบบและพัฒนา“หอฟอกอากาศอัจฉริยะ (Smart Air Purification Tower)” เพื่อลดปริมาณฝุ่นละออง PM 2.5 ในพื้นที่กึ่งปิด และช่วยลดบรรเทาความเสี่ยงด้านสุขภาพของประชาชน โดยโครงการนี้ยังมีวัตถุประสงค์ย่อย ดังนี้

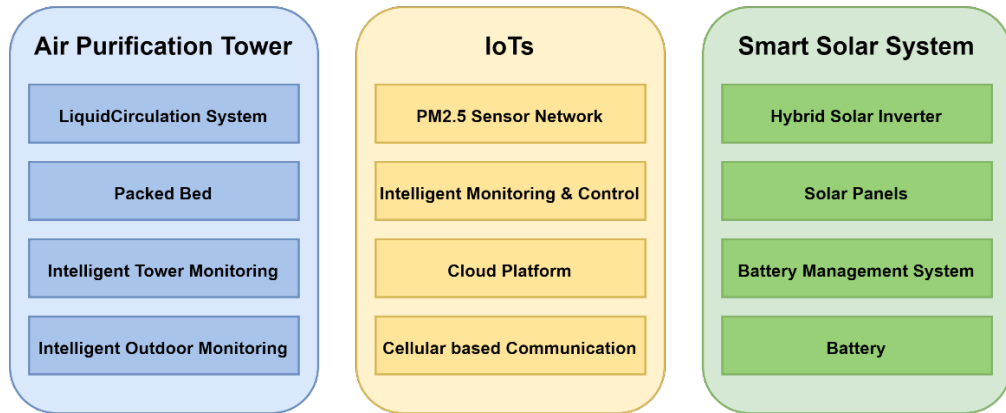
โครงการการศึกษาและพัฒนาหอฟอกอากาศอัจฉริยะ โดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์และระบบควบคุมดูแลผ่านเทคโนโลยีไอโอที เพื่อการลดฝุ่นละอองขนาดเล็ก (PM 2.5) ในพื้นที่สาธารณะ

- เพื่อวิจัยพัฒนาหอฟอกอากาศอัจฉริยะด้วยเทคนิคการดักจับฝุ่นละอองด้วยน้ำ สำหรับการนำไปใช้แก้ปัญหาฝุ่นละอองในพื้นที่สาธารณะกึ่งปิด (Semi-enclosed) ที่มีความเสี่ยงสูง ซึ่งได้แก่ สถานีขนส่งมวลชน, จุดจอดรถบริการสาธารณะ, อาคารจอดรถ
- เพื่อประยุกต์ใช้เทคโนโลยีดิจิทัลอัจฉริยะ (Smart Technology integration) ในการเพิ่มประสิทธิภาพการบริหารจัดการ ซึ่งประกอบไปด้วย การวิจัยและพัฒนาระบบไอโอที (Internet of Things: IoT) เพื่อเก็บข้อมูลจากเซ็นเซอร์สภาพแวดล้อม (Sensors) และควบคุม (control) การทำงานของหอฟอกอากาศ รวมถึงการพัฒนาระบบจัดการข้อมูลด้วยคลาวด์ที่ใช้เพื่อจัดเก็บข้อมูล และประมวลผล (Cloud Platform for Data Computing and Storage) และนำเสนอข้อมูลให้ผู้ใช้งานเพื่อการติดตามการทำงานของหอฟอกอากาศ
- เพื่อสร้างนวัตกรรมที่ขับเคลื่อนด้วยพลังงานสะอาด (Clean energy) ด้วยการใช้พลังงานจากแสงอาทิตย์มาเป็นแหล่งพลังงานให้กับ หอฟอกอากาศอัจฉริยะ (Smart Air Purification Tower) ซึ่งทำให้ไม่เกิดการปล่อยมลพิษทั้งในทางตรงและทางอ้อม
- เพื่อตอบสนองต่อแผนการพัฒนาเมืองอัจฉริยะ ด้านสิ่งแวดล้อมอัจฉริยะ (Smart Environment) ซึ่งเป็นการใช้เทคโนโลยีเพื่อเพิ่มคุณภาพชีวิตของประชาชนและช่วยดูแลสิ่งแวดล้อมไปพร้อม ๆ กัน ทั้งยังอำนวยความสะดวกในการดำเนินชีวิตของประชาชนให้สะดวกสบายมากยิ่งขึ้น ด้วยการใช้งานเทคโนโลยีเข้ามาประยุกต์ในการดำเนินชีวิต

การศึกษาและพัฒนาหอฟอกอากาศอัจฉริยะโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์และระบบควบคุมดูแลผ่านเทคโนโลยีไอโอที เพื่อการลดฝุ่นละอองขนาดเล็ก (PM 2.5) ในพื้นที่สาธารณะ แบ่งการดำเนินงานออกเป็น 3 ส่วน ได้แก่ ส่วนที่ 1 หอฟอกอากาศ (Air Purification Tower), ส่วนที่ 2 ระบบไอโอทีเพื่อการควบคุมและดูแลหอฟอกอากาศ (Internet of Things: IoTs) และส่วนที่ 3 คือนวัตกรรมพลังงานสะอาดด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ (Smart Solar Energy) ซึ่งแสดงขอบเขต และกิจกรรมการดำเนินงานดังภาพที่ 1

โครงการการศึกษาและพัฒนาหอฟอกอากาศอัจฉริยะ โดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์และระบบควบคุมดูแลผ่านเทคโนโลยีไอโอที เพื่อการลดฝุ่นละอองขนาดเล็ก (PM 2.5) ในพื้นที่สาธารณะ

### Smart Air Purification Tower



ภาพที่ 1 ขอบเขตและกิจกรรมการดำเนินงาน

จะเห็นได้ว่า ขอบเขตและกิจกรรมการดำเนินงานมุ่งเน้น การพัฒนา หอฟอกอากาศอัจฉริยะ (Smart Air Purification Tower) สำหรับการฟอกอากาศในพื้นที่กึ่งปิด ประกอบไปด้วย

- (1) นวัตกรรมหอฟอกอากาศด้วยเทคนิคการดักจับฝุ่นละอองด้วยน้ำแบบสครับบิง (Scrubbing)
- (2) การพัฒนาระบบควบคุม ประมวลผล ด้วยการบูรณาการระบบอินเทอร์เน็ตทุกสรรพสิ่ง (Internet of Things) ร่วมกันกับโครงข่ายเซ็นเซอร์สำหรับวัดค่า PM 2.5 อัจฉริยะ (Smart PM 2.5 Sensors Network)
- (3) การบูรณาการระบบพลังงานแสงอาทิตย์ (Clean Solar Energy) นอกจากนี้ ยังมีการพัฒนาส่วนการเชื่อมต่อกับผู้ใช้งานแบบฉลาด (Smart User Interface)

ทั้งนี้เพื่อสามารถใช้ควบคุมและสั่งการระบบของหอฟอกอากาศแบบทันทีและตลอดเวลา (Real-Time Monitor and Control) รวมถึงระบบระบุสถานะการทำงานและตำแหน่งของหอฟอกอากาศ (Maintenance Status and Localization) สำหรับการซ่อมบำรุงและการระบุตำแหน่งของหอฟอกอากาศ เพื่อให้สอดคล้องกับนโยบายของเมืองต้นแบบอัจฉริยะ (Smart City) โดยหอฟอกอากาศอัจฉริยะนี้สามารถนำไปใช้ในพื้นที่กึ่งปิด (Semi-enclosed) ซึ่งจะมีประโยชน์สูงสุดเมื่อนำไปใช้ในบริเวณที่มีประชากรหนาแน่น และมีมลพิษเกินกว่ามาตรฐาน โดยส่งผลกระทบต่อร่างกายมนุษย์ ได้แก่ บริเวณป้ายรถโดยสารสาธารณะ ลานจอดรถในอาคาร พื้นที่ก่อสร้างภายในเมือง สถานที่ขนส่ง เป็นต้น หอฟอกอากาศอัจฉริยะจึงมีความสำคัญในการช่วยลด PM2.5 ซึ่งมีผลต่อการเป็นอยู่ของประชาชนโดยตรง ทำให้ประชาชนมีการสุขภาพที่ดี ซึ่งเป็นส่วนสำคัญ และไม่ควรมองข้ามเป็นอย่างยิ่ง

โครงการการศึกษาและพัฒนาหอฟอกอากาศอัจฉริยะ โดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์และระบบควบคุมดูแลผ่านเทคโนโลยีไอโอที เพื่อการลดฝุ่นละอองขนาดเล็ก (PM 2.5) ในพื้นที่สาธารณะ

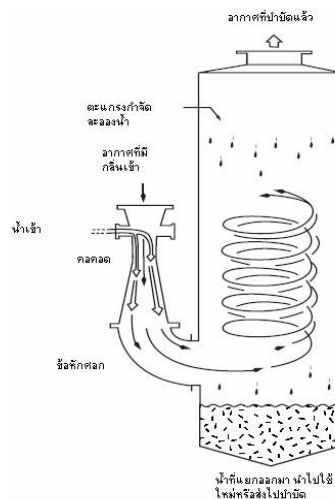
## บทที่ 2

### ทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### ทฤษฎี งานวิจัยและโครงการที่เกี่ยวข้อง

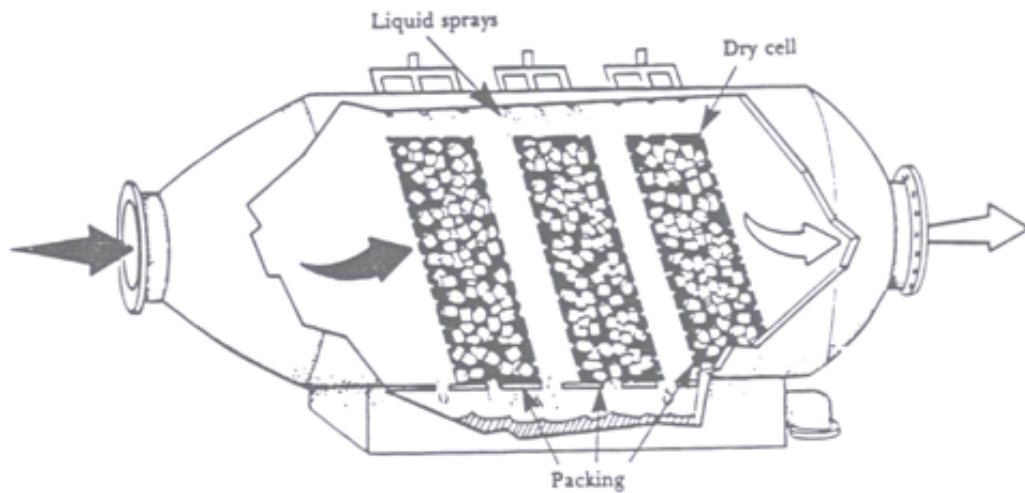
ในการออกแบบระบบหอฟอกอากาศ มีการใช้ความรู้จากหลากหลายด้านเข้ามาบูรณาการร่วมกันเพื่อให้เกิดนวัตกรรมหอฟอกอากาศ โดยแบ่งแยกออกเป็น ความรู้ด้านเทคโนโลยี หรือความรู้ด้านพลังงานทางเลือก แต่หลักการและทฤษฎีที่มีความสำคัญที่สุดนั้นคือ องค์ความรู้ด้านเคมีและสิ่งแวดล้อม

ความรู้ด้านเคมีและสิ่งแวดล้อมนั้นได้นำมาใช้เกี่ยวกับด้านการกรองฝุ่นละออง PM2.5 ได้แก่ ระบบสครับบิง โดยทั่วไปมีสองแบบ คือ ระบบในแนวตั้งใช้อากาศไหลเข้าด้านล่างและออกด้านบน ส่วนอีกแบบหนึ่งคือ อากาศไหลเข้าและออกในแนวนอน (Cross-Flow) โดยในปัจจุบันระบบแนวนอนได้รับความนิยมมากขึ้น เพราะมีปัญหาการอุดตันน้อยและความสูงไม่มากนัก สามารถวางไว้ในห้องที่มีเพดานต่ำ ๆ ได้ ระบบมีทั้งชนิดที่ใส่ตัวกลาง (Packings) ไว้ภายในเพื่อเพิ่มผิวของการสัมผัสระหว่างก๊าซและของเหลว บางระบบที่ไม่มีตัวกลางก็ใช้การสเปรย์น้ำเป็นฝอยเล็ก ๆ เป็นม่านน้ำ หรือใช้การอัดฉีดน้ำกับอากาศที่ความดันสูง (Venturi) ดังรูป สรุปลก็คือทำให้อากาศกับน้ำมีการสัมผัสและสารที่มีกลิ่นในอากาศเข้าไปละลายในน้ำ ข้อควรระวังในการใช้งานระบบคือ ต้องระวังไม่ให้อุณหภูมิของอากาศที่จะบำบัดก่อนเข้าระบบสูงเกินไปเพราะจะทำให้เกิดไอน้ำและลดประสิทธิภาพของการดูดซับลง ในกรณีที่เป็นอาจต้องมีอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนของอากาศก่อนเข้าระบบ และควรระวังเรื่องฝุ่นละอองเพราะอาจทำให้อุดตันได้

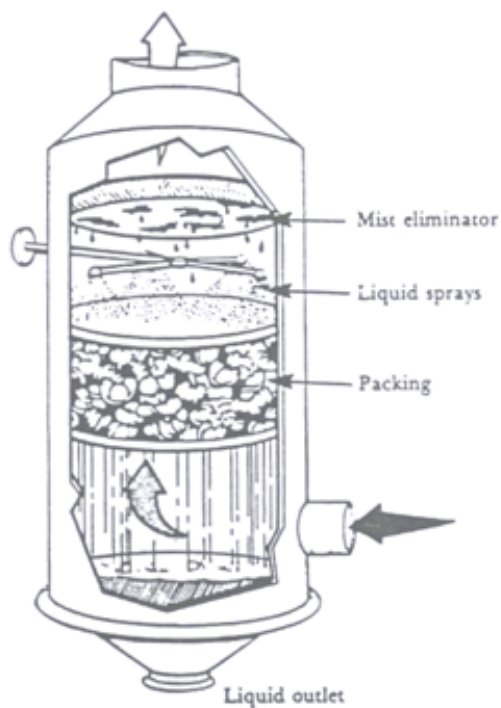


ภาพที่ 2 การใช้การผสมอากาศกับน้ำโดยการใส่คอคอดและแรงดันสูงแบบเวนจูรี (ที่มา US EPA, EPA Air Pollution Cost Control Manual, 6th Ed US EPA, Research Triangle Park, NC, USA, January 2002)

โครงการการศึกษาและพัฒนาหอฟอกอากาศอัจฉริยะ โดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์และระบบควบคุมผ่านเทคโนโลยีไอโอที เพื่อการลดฝุ่นละอองขนาดเล็ก (PM 2.5) ในพื้นที่สาธารณะ



ภาพที่ 3 ระบบสครับบิงแบบ Three Bed Cross Flow Packed Tower



ภาพที่ 4 ระบบสครับบิงแบบ Countercurrent Packed Tower

ตัวแปรสำคัญที่จำเป็นที่ต้องใช้ในการออกแบบระบบสำหรับหอฟอกอากาศระบบสครับบิงมีดังนี้

1. อัตราส่วนของของเหลวต่อก๊าซ
2. ปริมาณของเหลวก๊าซออก
3. เส้นผ่านศูนย์กลางของหอบรรจุตัวกลาง

โครงการการศึกษาและพัฒนาหอฟอกอากาศอัจฉริยะ โดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์และระบบควบคุมดูแลผ่านเทคโนโลยีไอโอที เพื่อการลดฝุ่นละอองขนาดเล็ก (PM 2.5) ในพื้นที่สาธารณะ

#### 4. ความสูงของหอบรรจุตัวกลาง

โดยตัวแปรข้างต้น สามารถทราบได้จากขั้นตอนการคำนวณดังต่อไปนี้

##### ขั้นตอนที่ 1 หาอัตราส่วนของของเหลวต่อก๊าซ

สูตรที่ใช้เป็นสูตรของการอนุรักษ์มวล คือ

$$G_m(Y_1 - Y_2) = L_m(X_2 - X_1)$$

เมื่อ  $G_m$  เป็นการไหลของก๊าซ (กรัม/โมล/ชั่วโมง)

$L_m$  เป็นการไหลของของเหลว เช่น น้ำที่ใช้ดูดซับมลพิษในอากาศ (กรัม/โมล/ชั่วโมง)

$Y_1$  ความเข้มข้นของสารที่มีกลิ่นในก๊าซ เช่น 1,000 ส่วนในล้านหรือ ppm ก็จะเป็นสัดส่วน 0.001

$Y_2$  ความเข้มข้นของสารที่มีกลิ่นในก๊าซขาออก เช่น 10 ppm ก็จะเป็นสัดส่วน 0.00001 จะเห็นว่าเรากำหนดตรงนี้ได้ว่าจะให้ระบบมีประสิทธิภาพเท่าใดในการกำจัดสารที่มีกลิ่น

$X_2$  สัดส่วนของสารที่มีกลิ่นในของเหลวขาออก คิดเป็นเศษส่วนของโมลของของเหลวทั้งหมด ต้องมีค่าไม่เกินความเป็นจริง เพราะของเหลวย่อมมีขีดจำกัดในการดูดซับสารเคมี ให้เปิดดู Solubility ของสารในของเหลวที่ใช้ โดยปกติเราจะให้ความเข้มข้นของสารในของเหลวที่ออกมาจากระบบบำบัดกลิ่นมีค่าต่ำ เพราะหากให้ค่าสูงมากเกินไป น้ำหรือของเหลวที่ใช้ก็จะน้อยไป และการสัมผัสระหว่างอากาศกับของเหลวจะไม่ได้ตามทฤษฎี

$X_1$  สัดส่วนของสารที่มีกลิ่นในของเหลวขาเข้า คิดเหมือน  $X_2$  ข้างบน แต่โดยปกติ น้ำที่เข้ามาจะมีแอมโมเนียน้อยมาก

ในตัวอย่างนี้จะให้ความเข้มข้นของแอมโมเนียในน้ำมีสัดส่วน  $X_1$  เป็น 0.0018

คือน้ำ 1 ลิตรมีน้ำอยู่ 1,000/น.น.โมลเลขุบน้ำ 18 = 1,000/18 = 55.5 โมล และในน้ำมีแอมโมเนีย 0.1 โมล (1.7 กรัม ละลายอยู่)

ดังนั้นสัดส่วน  $X_1 = 0.1/55.5 = 0.0018$

เช่น 0 กรัม ดังนั้น  $X_2$  มักเป็น 0 ยกเว้นกรณีที่มีการรีไซเคิลของเหลวหรือน้ำที่ใช้แล้ว

เพราะฉะนั้น ในตัวอย่างจะให้  $X_2$  มีสัดส่วนเทียบกับน้ำ = 0

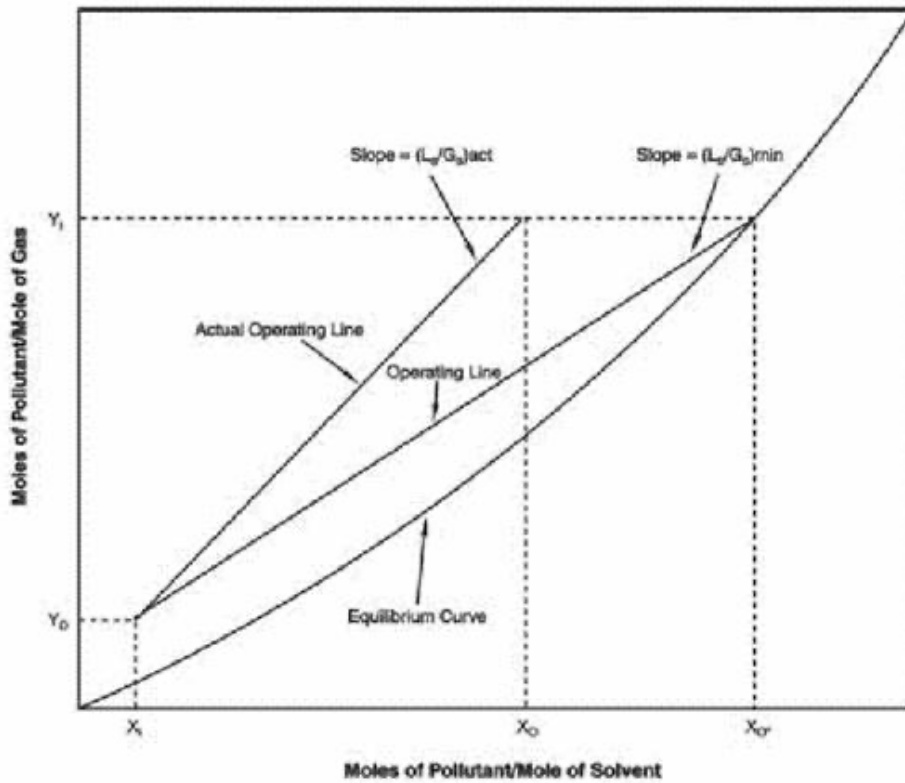
ตัวอย่างข้างบนนี้จะได้  $G_m(0.001 - 0.00001) = L_m(0 + 8 - 0)$

$G_m/L_m = 0.0018/0.000999 \sim$  ได้ประมาณ 1.8

กล่าวคือ อัตราส่วนของก๊าซจะมากกว่าน้ำ 1.8 เท่า (คิดเป็นโมล/โมล) แสดงให้เห็นความสัมพันธ์ระหว่างการละลายของสารที่มีกลิ่นในของเหลวกับความเข้มข้นในอากาศแสดงในรูป และในการ

โครงการการศึกษาและพัฒนาหอฟอกอากาศอัจฉริยะ โดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์และระบบควบคุมดูแลผ่านเทคโนโลยีไอโอที เพื่อการลดฝุ่นละอองขนาดเล็ก (PM 2.5) ในพื้นที่สาธารณะ

ทำงานจริงจะต้องเพิ่มปริมาณของเหลวให้มากกว่าที่คำนวณดังแสดงใน Actual Operating Line ดังรูป ความชันของกราฟนี้มีค่าวัดได้ เรียกว่า  $m$  จะนำไปใช้คำนวณความลึกของตัวกลางในภายหลัง



รูปแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการละลายในของเหลวของสารที่มีกลิ่น (มลพิษ) และความเข้มข้นของสารในอากาศ (แก๊ส)

ภาพที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างการละลายในของเหลวของสารที่มีกลิ่น และความเข้มข้นของสารในอากาศ

### ขั้นตอนที่ 2 การหาปริมาณของเหลวที่ต้องการ

ในการหาปริมาณของเหลวที่ต้องการนั้นจำเป็นต้องทราบข้อมูลปริมาณอากาศที่เข้าระบบ เช่น ตัวอย่างอากาศมีอัตราการไหล 10 ลูกบาศก์เมตรต่อนาทีซึ่งเป็นอากาศที่มีแอมโมเนียปนเปื้อนย่อมจะหาปริมาณของเหลวที่ต้องการวัด เพราะอากาศ 10 ลบ.เมตร/นาที มีน้ำหนักประมาณ 10 กก./นาที (อากาศมีน้ำหนักประมาณ 1 กก. ต่อ 1 ลบ.ม หรือ 2.2 ปอนด์ ต่อ 1 ลบ.ม) และอากาศ 1 โมล มีน้ำหนักโมเลกุลประมาณ 28 กรัม

อากาศ 10 กก./นาที =  $10,000/29 = 341$  โมล/นาที

สมมติให้แอมโมเนียเป็นสารที่ต้องการบำบัดกลิ่นและมีความเข้มข้น 1,000 ppm

แอมโมเนียที่มีในอากาศ =  $341 \times 1,000 \times 10^{-6} = 0.341$  โมล/นาที (5.8 กรัม/นาที)

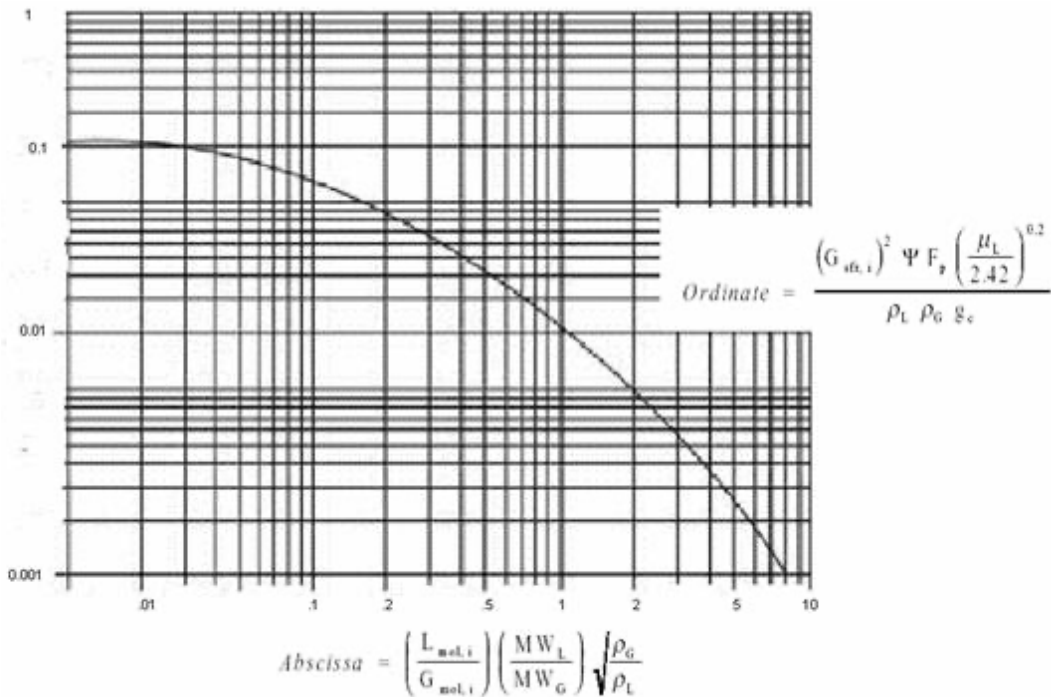
โครงการการศึกษาและพัฒนาหอฟอกอากาศอัจฉริยะ โดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์และระบบควบคุมดูแลผ่านเทคโนโลยีไอโอที เพื่อการลดฝุ่นละอองขนาดเล็ก (PM 2.5) ในพื้นที่สาธารณะ

จากการคำนวณในข้อ 1)  $L_m = G_m / 1.8$

น้ำที่ต้องการ =  $341 / 1.8$  ประมาณ 190 โมล/นาที่ =  $190 \times 18 = 3,420$  กรัม/นาที่ = 3.42 ลิตร/นาที่

### ขั้นตอนที่ 3 การหาเส้นผ่านศูนย์กลางของหอบรรจุตัวกลาง

หอบรรจุตัวกลางจะมีผลต่อความเร็วของอากาศที่ไหลผ่าน หากหอกว้างมากไปอากาศจะไหลผ่านที่ความเร็วต่ำแม้จะบำบัดได้ดีแต่บำบัดมวลของสารที่ทำให้เกิดกลิ่นได้น้อยไม่คุ้มกับค่าที่ก่อสร้าง หากหอแคบเกินไปความเร็วของอากาศจะสูงและจะดันน้ำที่ตกลงมาให้ย้อนขึ้นข้างบน ปกติแล้วค่าของเส้นผ่านศูนย์กลางหาได้จากกราฟข้างล่าง



### ภาพที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่าง abscissa และ Ordinate

เมื่อ  $F_p$  = Packing Factor ข้อมูลดูในตารางหรือได้ข้อมูลจากผู้ขายตัวกลาง

MW คือน้ำหนักโมเลกุลของของเหลว หรืออากาศ (ที่มีอักษร L) หรืออากาศ (G) เช่นน้ำ = 18  
อากาศ = 29

ค่า  $g$  เป็นค่าแรงโน้มถ่วงของโลก = 32.2 ฟุต/วินาที<sup>2</sup>

ค่า  $u$  เป็นความหนืดของของเหลว หน่วยเป็นปอนด์/ฟุต-ชั่วโมง

โดยปกติจะคำนวณค่าของแกนนอน (Abscissa) ดังสูตรในกราฟนี้ก่อน แล้วลากเส้นจากค่าที่ได้ขึ้นไปชนเส้นกราฟ และหาค่าของแนวตั้ง (Ordinate) จะเห็นได้ว่าเราจะสามารถแทนค่าหา  $G$  ซึ่ง

โครงการการศึกษาและพัฒนาหอฟอกอากาศอัจฉริยะ โดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์และระบบควบคุมดูแลผ่านเทคโนโลยีไอโอที เพื่อการลดฝุ่นละอองขนาดเล็ก (PM 2.5) ในพื้นที่สาธารณะ

เป็นอัตราการไหลของอากาศที่ผ่านสกรับเบอร์ (หน่วยเป็นปอนด์ของอากาศ/วินาที-ตารางฟุตของผิวหน้าตัดของตัวกลางที่ปูวางในนั้น) จากนั้นหาพื้นที่หน้าตัดของถัง (A) ได้จาก

$$A = \frac{G_{mol,i} MW_G}{3,600 G_{sfr,i} f}$$

เมื่อ  $G_{mol,i}$  เป็น Molecular Flow Rate หรืออัตราการไหลของอากาศที่เข้าระบบเป็นโมล/ชั่วโมง และ  $G_{sfr,i}$  คือค่า  $G$  ที่คำนวณได้ข้างบน  $f$  เป็น Flooding Factor มีค่า 0.60-0.75 ส่วน 3600 คือแปลงชั่วโมงกับวินาที

#### ขั้นตอนที่ 4. ความสูงของหอบรรจุตัวกลาง

เมื่อได้เส้นผ่านศูนย์กลางของหอบรรจุตัวกลางแล้วจะต้องคำนวณความสูงของตัวกลางที่เหมาะสม โดยต้องทราบข้อมูลว่าความสูงสำหรับตัวกลางประเภทต่าง ๆ ควรเป็นเท่าใด เพราะเป็นข้อมูลที่ได้จากการทดลอง ดังนี้

กลี้นและสารละลายที่ใช้ดูดซับ

HC<sub>1</sub> (ก๊าซ) H<sub>2</sub>O (น้ำ) ความสูง 0.18-0.34 เมตร

Cl<sub>2</sub> (ก๊าซ) NaOH (ในน้ำ) ความสูง 0.24-0.37 เมตร

NH<sub>3</sub> (ก๊าซ) H<sub>2</sub>O (น้ำ) ความสูง 0.09-0.21 เมตร

OH (ก๊าซ) H<sub>2</sub>O (น้ำ) ความสูง 0.24-0.39 เมตร

H<sub>2</sub>S (ก๊าซ) NaOH (ในน้ำ) ความสูง 0.24-0.39 เมตร

NH<sub>3</sub> (ก๊าซ) H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> (ในน้ำ) ความสูง 0.9-0.16 เมตร

ความสูงข้างบนนี้เป็นเพียงความสูง 1 หน่วยของที่เรียกกันว่า Transfer Unit เท่านั้น ระบบจะทำงานได้ดี ต้องมีหลาย Transfer Unit ซึ่งเรียกว่าจำนวน Transfer Unit นี้ว่า NTU ค่า NTU นี้หาจาก

$$NTU = \frac{\ln \left[ \left( \frac{y_1 - mx_1}{y_0 - mx_1} \right) \left( 1 - \frac{1}{AF} \right) + \frac{1}{AF} \right]}{1 - \frac{1}{AF}}$$

$y_1$  = ความเข้มข้นของสารที่มีกลี้นในก๊าซ เช่น 1,000 ส่วนในล้านหรือ ppm ก็จะเป็นสัดส่วน 0.001

$y_0$  = ความเข้มข้นของสารที่มีกลี้นในก๊าซขาออก เช่น 10 ppm ก็จะเป็นสัดส่วน 0.00001 จะเห็นว่าเรากำหนดตรงนี้ได้ว่าจะให้ระบบมีประสิทธิภาพเท่าใดในการกำจัดสารที่มีกลี้น

$$AF = \frac{L_{mol,i}}{mG_{mol,i}}$$

โครงการการศึกษาและพัฒนาหอฟอกอากาศอัจฉริยะ โดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์และระบบควบคุมดูแลผ่านเทคโนโลยีไอโอที เพื่อการลดฝุ่นละอองขนาดเล็ก (PM 2.5) ในพื้นที่สาธารณะ

เมื่อ  $L_{mol,i}$  และ  $G_{mol,i}$  เป็น Molecular Flow Rate หรืออัตราการไหลของของเหลวและอากาศที่เข้าระบบเป็นโมล/ชั่วโมง ตามลำดับ ซึ่งค่า  $m$  ที่ใกล้จุดสมดุลมีค่าใกล้ 0 ดังนั้น จะเห็นได้ว่า

ค่า NTU มีค่า  $\ln\left(\frac{y_1}{y_0}\right)$  โดยประมาณ

ค่าความสูงของหอบรรจุตัวกลาง = NTU x ความสูงของ 1 Transfer Unit

เมื่อคำนวณได้ค่าดังกล่าวแล้วก็จะได้ค่าในการออกแบบครบถ้วน ส่วนความดันลดในระบบนั้นควรได้จากผู้ขายตัวกลาง ปกติประมาณ 0.5-1 นิ้วน้ำต่อความหนาของตัวกลาง 1 ฟุตในการใช้งานทั่วไป

Packing Factors for Various Packings

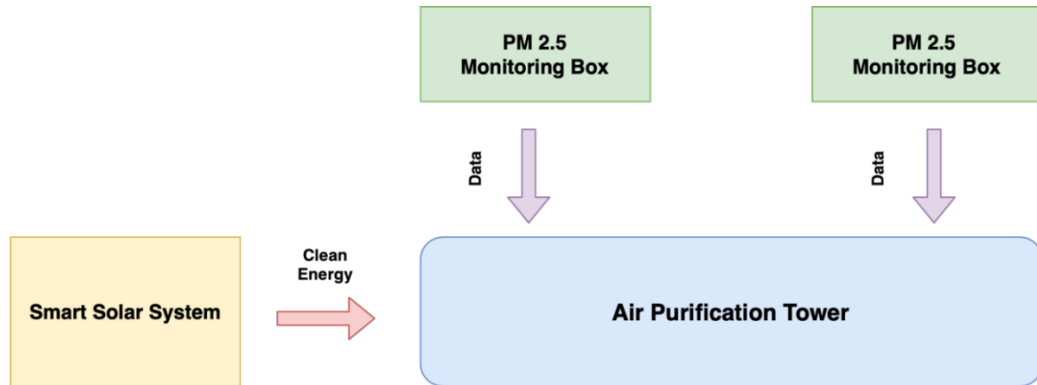
Packing Type	Construction Level	Nominal Diameter (inches)	Fp	a
Raschig rings	ceramic	1/2	640	111
		5/8	380	100
		3/4	255	80
		1	160	58
		1 1/2	95	38
		2	65	28
Raschig rings	metal	1/2	410	118
		5/8	290	72
		3/4	230	57
		1	137	41
		1 1/2	83	31
		2	57	21
Pall rings	metal	5/8	70	131
		1	48	66
		1 1/2	28	48
		2	20	36
		3 1/2	16	
Pall rings	polypropylene	5/8	97	110
		1	52	63
		1 1/2	32	39
		2	25	31
Berl saddles	ceramic	1/2	240	142
		3/4	170	82
		1	110	76
		1 1/2	65	44
		2	45	32
Intalox saddles	ceramic	1/2	200	190
		3/4	145	102
		1	98	78
		1 1/2	52	60
		2	40	36
		3	22	
Tri-Packs®	plastic	2	16	48
		3 1/2	12	38

ภาพที่ 7 ภาพแสดงค่า Packing Factors สำหรับตัวกลางแต่ละชนิด

โครงการการศึกษาและพัฒนาหอฟอกอากาศอัจฉริยะ โดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์และระบบควบคุมดูแลผ่านเทคโนโลยีไอโอที เพื่อการลดฝุ่นละอองขนาดเล็ก (PM 2.5) ในพื้นที่สาธารณะ

### กรอบแนวคิด หรือรายละเอียดด้านเทคนิค

ปัญหาภาวะในอากาศ (Air Pollution) เนื่องจากฝุ่นละอองของประเทศไทย รวมถึงความต้องการพัฒนาประเทศไปสู่ Smart City ในทุกมิติ ซึ่งรวมไปถึงมิติด้านสิ่งแวดล้อม smart environment สิ่งเหล่านี้เป็นที่มาของการนำเสนอโครงการพัฒนา หอฟอกอากาศอัจฉริยะ การดำเนินโครงการจะเป็นไปตามกรอบแนวคิดที่สามารถสรุปได้ดังตามภาพที่ 1



ภาพที่ 8 กรอบแนวคิดงานวิจัยทางด้านเทคนิค

กรอบแนวคิดของโครงการจะแบ่งได้ตามการดำเนินงานได้แก่ การศึกษาวิจัยและออกแบบเพื่อพัฒนาหอฟอกอากาศอัจฉริยะ ในพื้นที่กึ่งปิดโดยใช้น้ำเพื่อดักจับฝุ่นละอองร่วมกับระบบสครับบิงเพื่อเพื่อประสิทธิภาพในการดักจับฝุ่นละอองให้มากยิ่งขึ้น โดยมีเป้าหมายในการลดฝุ่นละอองในพื้นที่สาธารณะโดยเฉพาะอย่างยิ่งฝุ่นละอองที่มาจากคมนาคม ไม่ว่าจะเป็นรถสาธารณะ หรือ รถส่วนบุคคล อค์ศิภัยทางธรรมชาติ การเผาพืชแบบผิดกฎหมาย รวมไปถึงมลพิษทางด้านอุตสาหกรรม ลำดับถัดมาจะเป็นการพัฒนาเทคโนโลยีไอโอทีเพื่อการควบคุมและสั่งการทำงานของหอฟอกอากาศแบบอัตโนมัติ (Real-Time Monitor and Automatically Control) ซึ่งใช้ข้อมูลจากโครงข่ายเซ็นเซอร์วัดระดับฝุ่นละออง (PM 2.5) ในพื้นที่ทำการของที่หอฟอกอากาศอัจฉริยะ และส่วนสุดท้ายได้แก่ระบบผลิตพลังงานจากแสงอาทิตย์แบบอัจฉริยะ (Smart Solar System) เพื่อเป็นแหล่งพลังงานสะอาดให้กับหอฟอกอากาศอัจฉริยะ

### หอฟอกอากาศอัจฉริยะด้วยเทคโนโลยีดักจับฝุ่นละอองด้วยน้ำแบบสครับบิง

การออกแบบและพัฒนาระบบดักจับฝุ่นละออง PM2.5 ด้วยน้ำ ถูกออกแบบเบื้องต้นตามภาพที่ 12 ซึ่งแสดงให้เห็นถึงอุปกรณ์ ได้แก่ (1) หอดูดอากาศ, (2) มอเตอร์สำหรับดูดอากาศ, (3) หอกรองอากาศ โดยใช้น้ำในการดักจับฝุ่นละอองร่วมกับระบบสครับบิง (4) บั๊มน้ำสำหรับหมุนเวียนน้ำในหอกรองอากาศ

โครงการการศึกษาและพัฒนาหอฟอกอากาศอัจฉริยะ โดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์และระบบควบคุมดูแลผ่านเทคโนโลยีไอโอที เพื่อการลดฝุ่นละอองขนาดเล็ก (PM 2.5) ในพื้นที่สาธารณะ

โดยระบบดักจับฝุ่นละออง PM2.5 นั้นใช้หลักการแบบระบบสครับบิง (Chemical Scrubbing Process) ซึ่งเป็นกระบวนการบำบัดกลิ่นโดยใช้สารละลายช่วยในการดูดซับในกรณีกลิ่นที่มีคุณสมบัติเป็นด่าง เช่น แอมโมเนีย (Ammonia) ไตรเมทิลลามีน (Trimethylamine) จะนำมาทำปฏิกิริยากับสารละลายกรด (Acid Solution) เพื่อให้ได้สารประกอบที่ไม่มีกลิ่น ส่วนในกรณีที่สารที่ก่อให้เกิดกลิ่นมีคุณสมบัติเป็นกรด เช่น ไฮโดรเจนซัลไฟด์ (Hydrogen Sulfide) เมทิล เมอร์แคปแทน (Methyl Mercaptan) จะทำปฏิกิริยากับสารละลายด่าง (Alkaline Solution) ได้เป็นสารประกอบที่ไม่มีกลิ่นหรือมีกลิ่นน้อยลง

รายละเอียดในการออกแบบของระบบนี้ค่อนข้างละเอียดและจำเป็นต้องรู้คุณสมบัติของอากาศและสารที่มีกลิ่นโดยละเอียด และควรศึกษาเพิ่มเติมจากตำราระบบบำบัดมลพิษทางอากาศ ข้อมูลการออกแบบข้างล่างนี้เป็นส่วนหนึ่งจากตำราระบบบำบัดมลพิษทางอากาศสำหรับระบบแบบถังตั้งแนวตั้งชนิดมีตัวกลางบรรจุอยู่

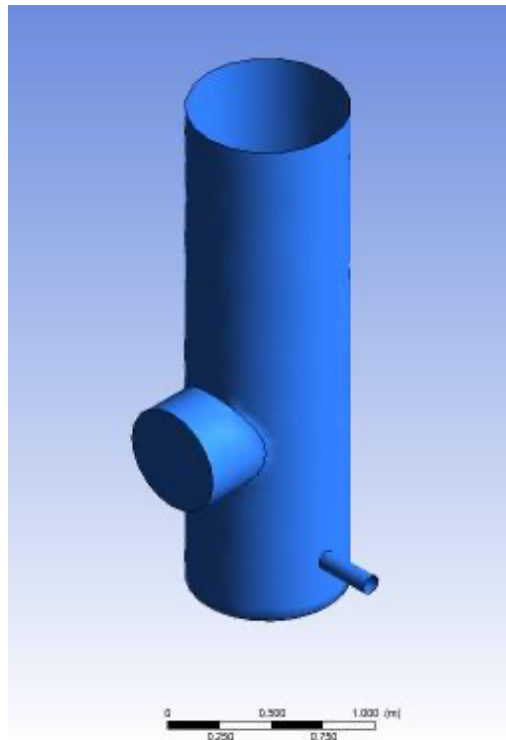
1. สารเคมีที่มีกลิ่นในอากาศต้องละลายน้ำได้ หรือทำปฏิกิริยากับสารที่เราเติมลงไปใต้น้ำ ตัวอย่างเช่น แอมโมเนียละลายในน้ำได้ดี หรือ Amine ละลายได้ไม่ดี แต่หากเติมไฮโปคลอไรต์ที่ความเข้มข้น 5% ก็จะทำให้ Amine ถูกออกซิไดซ์ในน้ำได้เป็นอย่างดี

2. ความเร็วของอากาศที่ผ่านตัวกลางประมาณ 0.9-1.22 เมตรต่อวินาที สำหรับตัวกลางเซรามิก ควรใช้ความเร็วต่ำ สำหรับตัวกลางที่เป็นพลาสติกควรใช้ความเร็วสูงกว่า ความดันลดประมาณ 0.2-0.25 นิ้วน้ำต่อความลึกของตัวกลาง เมตร

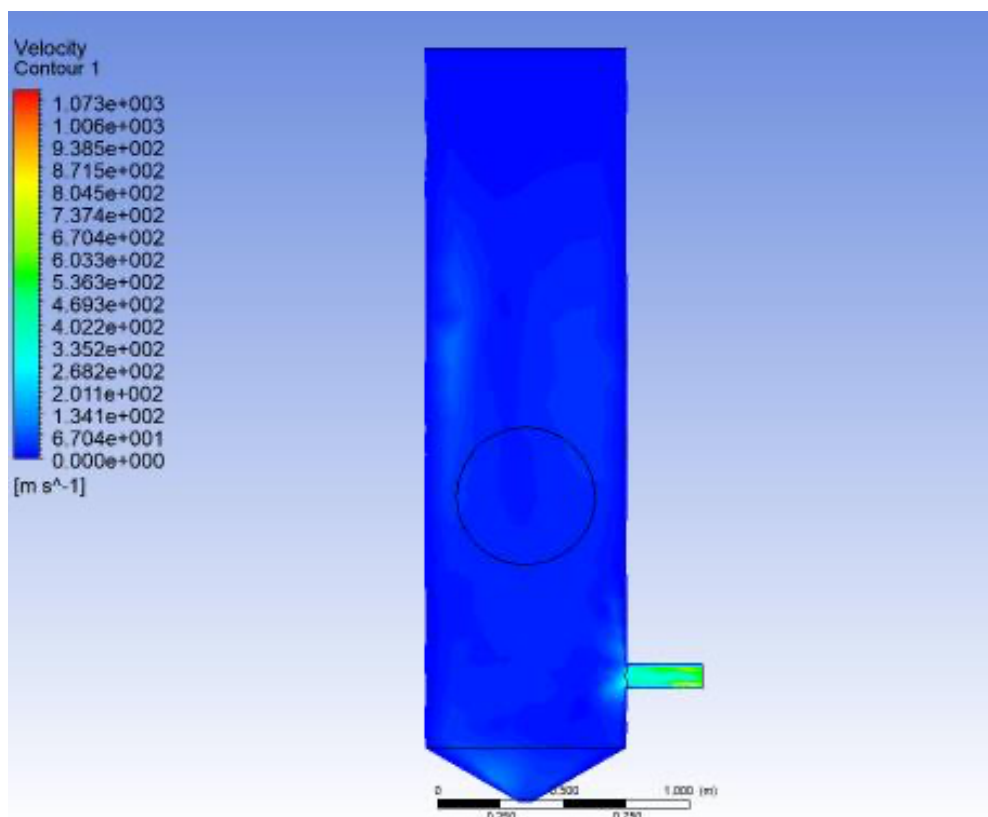
3. อัตราการไหลของของเหลวที่ผ่านตัวกลางเซรามิกประมาณ 21.1-42.2 กิโลกรัม/ชั่วโมงต่อตารางเมตร อัตราการไหลของของเหลวที่ผ่านตัวกลางพลาสติกประมาณ 63.34-84.46 กิโลกรัม/ชั่วโมงต่อตารางเมตร

โดยได้มีการนำแบบร่างดังกล่าวไปทำการจำลองการไหลของอากาศภายในหอกรองอากาศด้วยโปรแกรม Ansys ซึ่งได้ผลการจำลองดังต่อไปนี้

โครงการการศึกษาและพัฒนาหอฟอกอากาศอัจฉริยะ โดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์และระบบควบคุมดูแลผ่านเทคโนโลยีไอโอที เพื่อการลดฝุ่นละอองขนาดเล็ก (PM 2.5) ในพื้นที่สาธารณะ

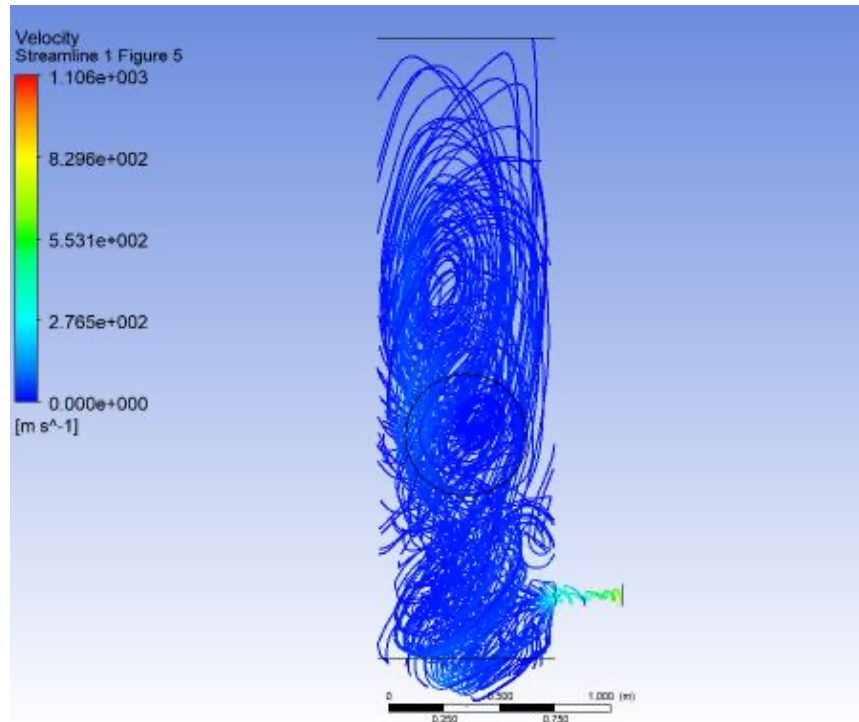


ภาพที่ 9 ภาพแบบจำลองของขอบเขตการไหลของอากาศภายในหอฟอกอากาศ



ภาพที่ 10 ภาพแบบจำลองการไหลของอากาศภายในหอฟอกอากาศแบบ Contour (ด้านข้าง)

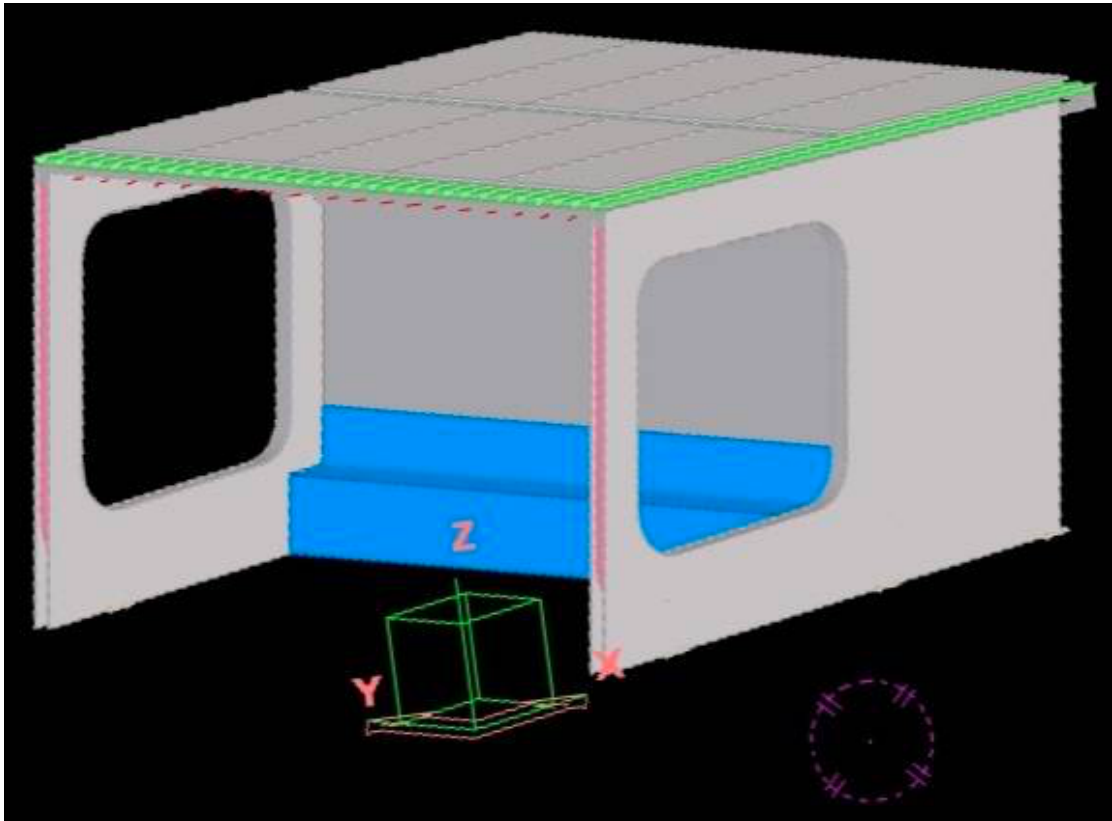
โครงการการศึกษาและพัฒนาหอฟอกอากาศอัจฉริยะ โดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์และระบบควบคุมดูแลผ่านเทคโนโลยีไอโอที เพื่อการลดฝุ่นละอองขนาดเล็ก (PM 2.5) ในพื้นที่สาธารณะ



ภาพที่ 11 ภาพแบบจำลองการไหลของอากาศภายในหอฟอกอากาศแบบ streamline (ด้านข้าง)

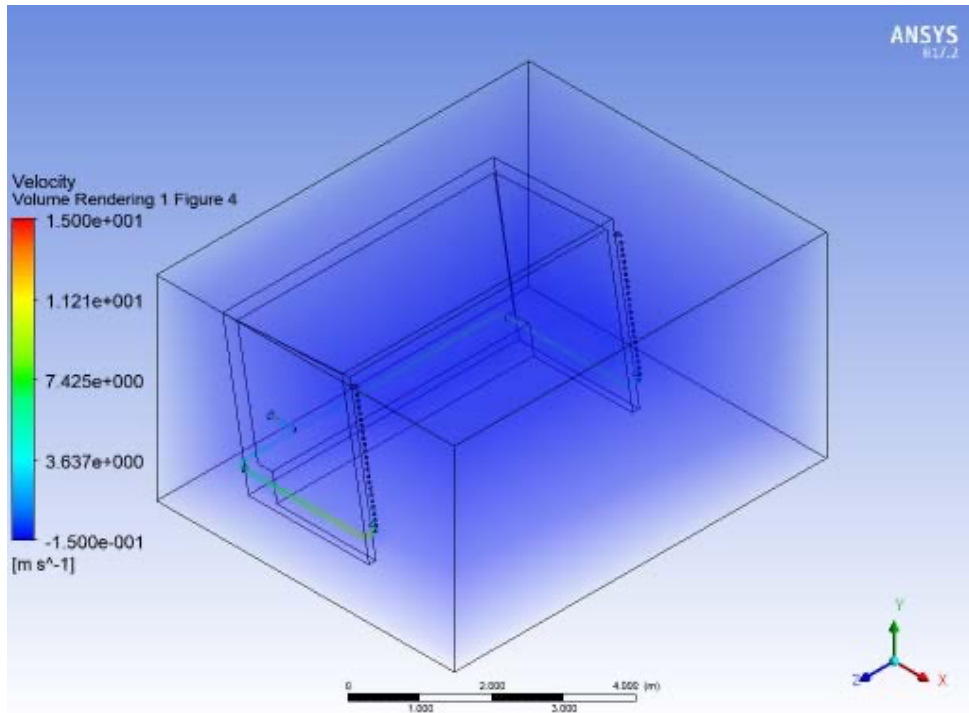
นอกจากนี้ หอฟอกอากาศได้ถูกนำไปประยุกต์ใช้งานร่วมกับจุดรถสาธารณะ (Bus station) ซึ่งเป็นบริเวณที่มีจำนวนประชาชนที่ใช้งานเป็นจำนวนมาก และได้รับผลกระทบโดยตรงจากฝุ่นละออง เนื่องจากการเผาไหม้ของพาหนะบนท้องถนน จึงได้ดำเนินการทำแบบจำลองของจุดรถสาธารณะที่นำไปประยุกต์ใช้ร่วมกับหอฟอกอากาศ ซึ่งเป็นแบบจำลองเบื้องต้นเท่านั้น เพื่อใช้ในการอธิบายแนวทางการออกแบบเบื้องต้น ดังภาพต่อไปนี้

โครงการการศึกษาและพัฒนาหอฟอกอากาศอัจฉริยะ โดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์และระบบควบคุมดูแลผ่านเทคโนโลยีไอโอที เพื่อการลดฝุ่นละอองขนาดเล็ก (PM 2.5) ในพื้นที่สาธารณะ

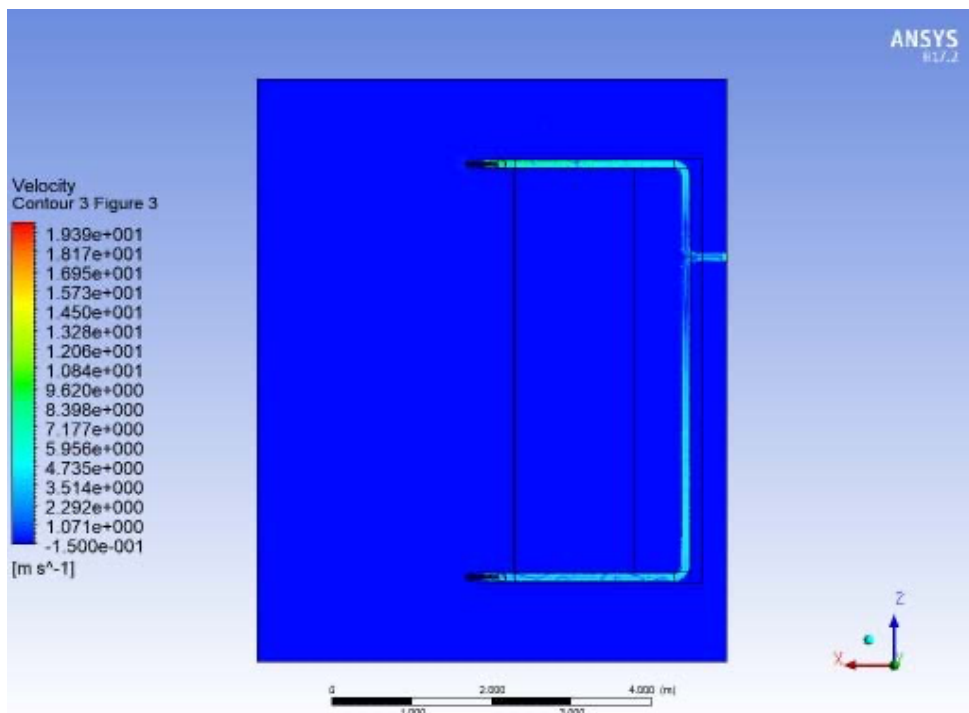


ภาพที่ 12 แบบจำลองเบื้องต้น แบบภาพสามมิติของจตุรอรธสาธารณะที่ประยุกต์ใช้ร่วมกับหอฟอกอากาศ (ใช้ในการอธิบายแนวทางการออกแบบ ทั้งนี้อาจมีการเปลี่ยนแปลง ณ สถานที่ดำเนินการจริง)

โครงการการศึกษาและพัฒนาหอฟอกอากาศอัจฉริยะ โดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์และระบบควบคุมดูแลผ่านเทคโนโลยีไอโอที เพื่อการลดฝุ่นละอองขนาดเล็ก (PM 2.5) ในพื้นที่สาธารณะ

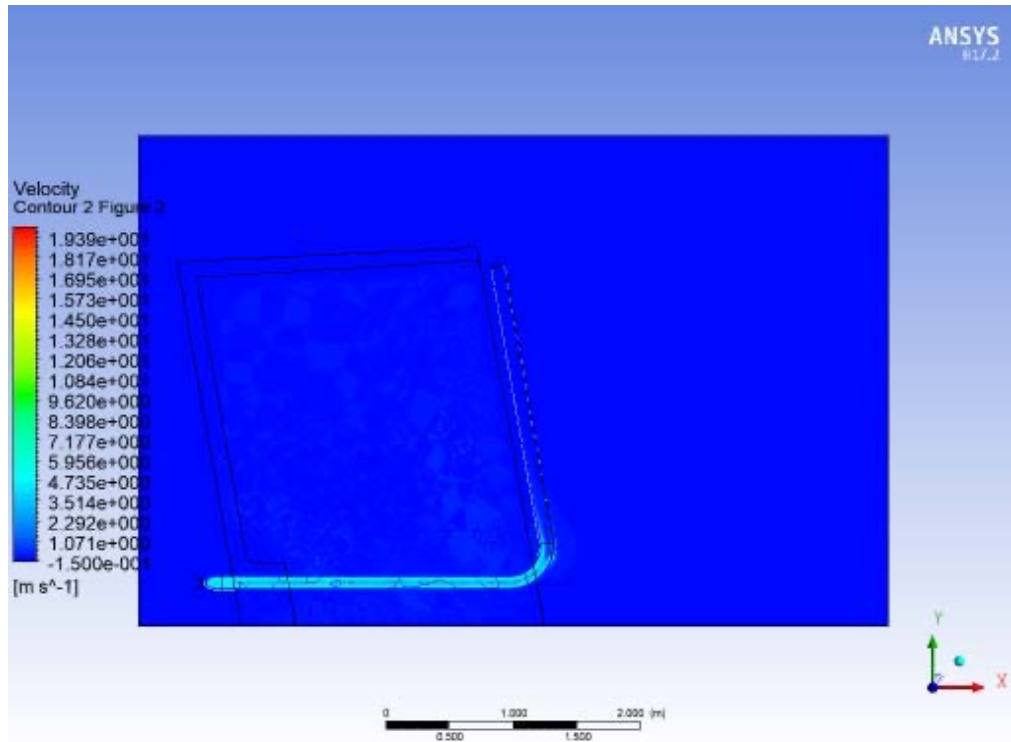


ภาพที่ 13 ภาพจำลองขอบเขตการไหลของอากาศบริเวณจุดจอดรถสาธารณะที่ประยุกต์ใช้ร่วมกับหอฟอกอากาศ

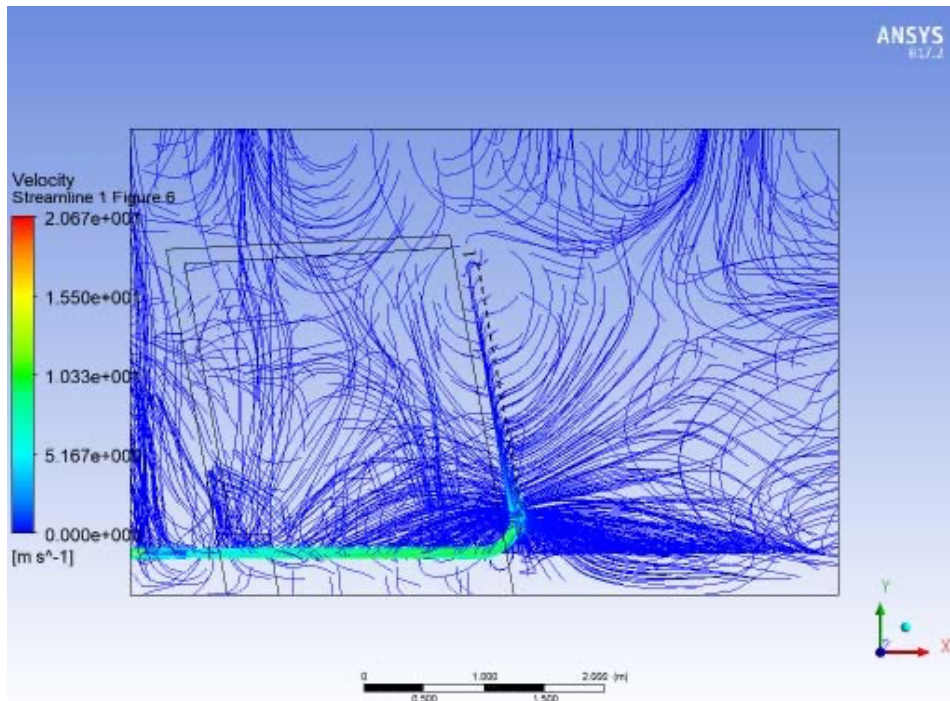


ภาพที่ 14 ภาพจำลองการไหลของอากาศภายในบริเวณจุดจอดรถสาธารณะที่ประยุกต์ใช้ร่วมกับหอฟอกอากาศ (ด้านบน)

โครงการการศึกษาและพัฒนาหอฟอกอากาศอัจฉริยะ โดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์และระบบควบคุมดูแลผ่านเทคโนโลยีไอโอที เพื่อการลดฝุ่นละอองขนาดเล็ก (PM 2.5) ในพื้นที่สาธารณะ

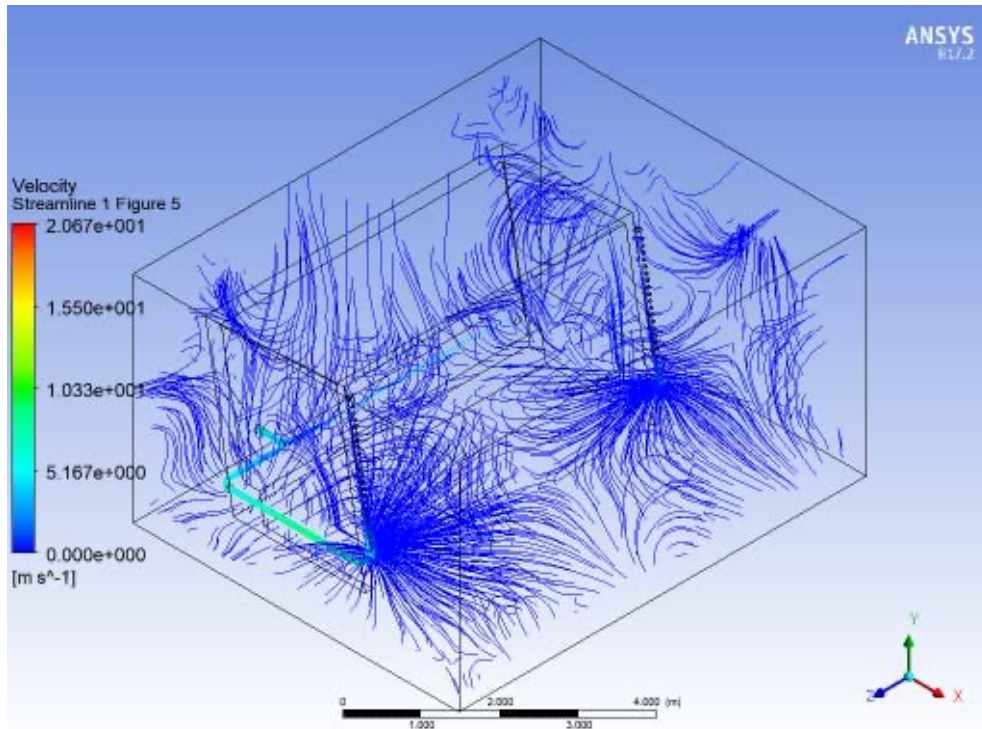


ภาพที่ 15 ภาพจำลองการไหลของอากาศภายในบริเวณจุดจอดรถสาธารณะที่ประยุกต์ใช้ร่วมกับหอฟอกอากาศ (ด้านข้าง)



ภาพที่ 16 ภาพจำลองการไหลของอากาศภายในบริเวณจุดจอดรถสาธารณะที่ประยุกต์ใช้ร่วมกับหอฟอกอากาศแบบ streamline (ด้านซ้าย)

โครงการการศึกษาและพัฒนาหอฟอกอากาศอัจฉริยะ โดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์และระบบควบคุมดูแลผ่านเทคโนโลยีไอโอที เพื่อการลดฝุ่นละอองขนาดเล็ก (PM 2.5) ในพื้นที่สาธารณะ



ภาพที่ 17 ภาพจำลองการไหลของอากาศภายในบริเวณจุดจอดรถสาธารณะที่ประยุกต์ใช้ร่วมกับหอฟอกอากาศแบบ streamline

การทำงานของหอฟอกอากาศในพื้นที่จุดจอดรถสาธารณะ (ป้ายรถเมล์) นั้นจะทำงานโดยการดูดอากาศที่มีฝุ่นละออง PM2.5 บริเวณป้ายรถเมล์ เข้ามาในตัวหอฟอกอากาศและจะทำการแยกฝุ่น PM2.5 แยกจากอากาศ โดยใช้เทคนิคมาน้ำร่วมกับการใช้ packed bed [2] เพื่อเป็นการเพิ่มพื้นที่สัมผัสระหว่างน้ำกับอากาศให้สามารถดักฝุ่นละอองได้มากขึ้น รวมทั้งใส่สาร Surfactant ซึ่งเป็นสารลดแรงตึงผิว ทำให้หยดน้ำจับฝุ่นละอองได้มากขึ้น ซึ่งจะทำให้หอฟอกมีประสิทธิภาพมากกว่า 90% ซึ่งในขั้นตอนสุดท้ายหอฟอกอากาศจะปล่อยอากาศสะอาดออกมาแทนที่อากาศเสียบริเวณรอบป้ายรถเมล์ ทำให้อากาศสะอาดบริเวณป้ายรถเมล์เป็นลักษณะ air shield ป้องกันฝุ่นละอองได้อีกด้วย โดยการแลกเปลี่ยนปริมาตรอากาศโดยรอบ (Air change rate) มีถูกควบคุมให้มีค่าเท่ากับ 4 อ้างอิงตามมาตรฐาน ASHRAE 62.1 [31] ซึ่งจะทำให้ค่าฝุ่นละอองบริเวณป้ายรถเมล์มีค่าเป็นไปตามมาตรฐาน WHO ของปี ค.ศ. 2021 [32] ซึ่งมีค่าเฉลี่ยรายปีอยู่ที่ ไม่เกิน 5 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และมีค่าเฉลี่ยรายละ 24 ชั่วโมงไม่เกิน 15 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร

โครงการการศึกษาและพัฒนาหอฟอกอากาศอัจฉริยะ โดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์และระบบควบคุมดูแลผ่านเทคโนโลยีไอโอที เพื่อการลดฝุ่นละอองขนาดเล็ก (PM 2.5) ในพื้นที่สาธารณะ

### การเปรียบเทียบเทคโนโลยีการฟอกอากาศในปัจจุบัน

ในปัจจุบันมีเทคนิคของเครื่องฟอกอากาศระดับอุตสาหกรรม เพื่อลดปริมาณสารเคมีและปริมาณฝุ่นละอองขนาดเล็กในอากาศ สามารถแบ่งออกได้เป็น 4 ประเภท ตามตารางเปรียบเทียบเทคนิคการกรองฝุ่นละอองขนาดเล็กในอากาศ

ตารางที่ 1 ตารางเปรียบเทียบเทคนิคการกรองฝุ่นละอองขนาดเล็กในอากาศ

ชื่อเทคนิค	รายละเอียด	ประสิทธิภาพ	ข้อด้อย
Cyclones	เป็นเทคนิคในหมุนวนอากาศที่มีฝุ่นละอองในเครื่องกรองด้วยความเร็วสูงมากเพื่อน	มีประสิทธิภาพในการกรองอากาศที่ระดับ 90% สามารถกรองฝุ่นละอองได้ถึงระดับ 20 $\mu\text{m}$	มีประสิทธิภาพในการกรองที่ต่ำกว่าเทคนิคแบบอื่นและไม่สามารถกรองฝุ่นละออง PM2.5
Wet scrubbers	เป็นเทคนิคในปล่อยอากาศที่มีฝุ่นละอองเข้ามาในเครื่อง และทำการฉีดพ่นละอองน้ำขนาดเล็กเพื่อดักจับฝุ่นละอองออกจากอากาศ	โดยทั่วไป จะมีประสิทธิภาพในการกรองอากาศที่ระดับ 90% โดยสามารถกรองฝุ่นละอองได้ถึงระดับ 2 $\mu\text{m}$ แต่ถ้าเป็นเครื่องกรองแบบ Venturi scrubbers จะสามารถให้ประสิทธิภาพถึง 98% และกรองกรองฝุ่นละอองได้ถึงระดับ 0.5 $\mu\text{m}$ มี	มีประสิทธิภาพในการกรองที่ต่ำกว่าเทคนิคแบบอื่น

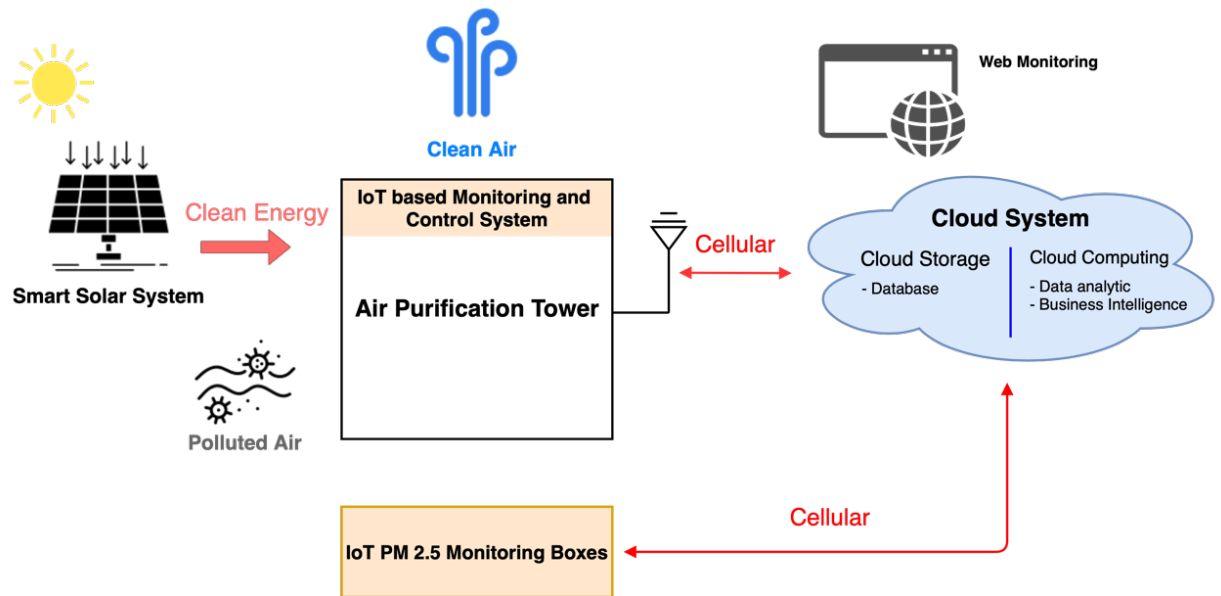
โครงการการศึกษาและพัฒนาหอฟอกอากาศอัจฉริยะ โดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์และระบบควบคุมดูแลผ่านเทคโนโลยีไอโอที เพื่อการลดฝุ่นละอองขนาดเล็ก (PM 2.5) ในพื้นที่สาธารณะ

<p><b>Electrostatic precipitators</b></p>	<p>เป็นเทคนิคที่ใช้ไฟฟ้ากระแสตรง(DC) ความต่างศักย์สูง (ตั้งแต่ 100,000V) จ่ายไปยังโครงสร้างแผ่นโลหะภายในเพื่อให้เกิดคุณสมบัติในการดักจับฝุ่นละอองในอากาศที่ไหลผ่าน</p>	<p>มีประสิทธิภาพในการกรองอากาศระดับ 99% โดยสามารถกรองฝุ่นละอองได้ถึงระดับ 1 <math>\mu\text{m}</math></p>	<p>ใช้พลังงานไฟฟ้าจำนวนมากในกระบวนการกรองอากาศ</p>
<p><b>Baghouse filters</b></p>	<p>เป็นเทคนิคในการกำจัดฝุ่นละอองในอากาศโดยการเป่าอากาศที่มีฝุ่นผ่านถุงผ้ากรองขนาดเล็กภายในเครื่อง</p>	<p>มีประสิทธิภาพในการกรองอากาศเกือบจะ 100% โดยสามารถกรองฝุ่นละอองได้ถึงระดับ 0.01 <math>\mu\text{m}</math></p>	<p>เนื่องจากถุงกรองมีคุณสมบัติที่ทำให้อากาศผ่านได้ยาก จำเป็นต้องให้ทำให้อากาศที่มีฝุ่นละอองมีแรงดันสูงเพื่อไหลผ่านได้ ทำให้เครื่องกรองต้องใช้พลังงานไฟฟ้าจำนวนมาก</p>

**ระบบไอโอที (Internet of Things: IoT)**

การพัฒนาเทคโนโลยีไอโอทีและเซ็นเซอร์เพื่อควบคุมและสั่งการทำงานของหอฟอกอากาศแบบอัตโนมัติ (Real-Time Monitor and Automatically Control) ซึ่งรวมถึง การพัฒนาระบบจัดการข้อมูลด้วยคลาวด์ เพื่อใช้เก็บข้อมูล และประมวลผล (Cloud System for Data Computing and Storage) ควบคู่กับการพัฒนาระบบแสดงผลแบบ Outdoor เพื่อแสดงให้ผู้ใช้งานได้ทราบข้อมูลที่จำเป็น ซึ่งติดตั้งไว้บริเวณหอฟอกอากาศ นอกจากนี้ยังมีการใช้งานโปรโตคอลการสื่อสารแบบเครือข่ายสื่อสารแบบเทคโนโลยี 4G สำหรับโครงข่ายเซ็นเซอร์สำหรับการวัดค่า PM 2.5

โครงการการศึกษาและพัฒนาหอฟอกอากาศอัจฉริยะ โดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์และระบบควบคุมผ่านเทคโนโลยีไอโอที เพื่อการลดฝุ่นละอองขนาดเล็ก (PM 2.5) ในพื้นที่สาธารณะ



ภาพที่ 18 กรอบแนวคิดในการพัฒนาระบบไอโอที

โดยระบบไอโอทีดังกล่าวจะเป็นตามกรอบแนวคิดดังที่แสดงในภาพที่ 23 ซึ่งสามารถแยกองค์ประกอบได้ดังนี้

1. เซ็นเซอร์ (Sensors) สำหรับการวัดค่าสภาพแวดล้อมและหอฟอกอากาศ อาทิเช่น ระดับค่า PM2.5 ในอากาศ, ความสะอาดของน้ำที่ใช้การดักจับฝุ่นละออง
2. ส่วนประมวลผล (Controller) เพื่อรับค่าจากเซ็นเซอร์ต่าง ๆ สำหรับประมวลผลและส่งค่าไปยังระบบจัดการข้อมูลบนคลาวด์ และทำหน้าที่ควบคุมการทำงานของหอฟอกอากาศ
3. ระบบสื่อสารไร้สาย (Wireless Communication Module) แบ่งออกเป็น 2 ระบบ ได้แก่
  - 1) ระบบสื่อสารไร้สายด้วยเทคโนโลยี 4G เพื่อการเชื่อมต่อและรับส่งข้อมูลระหว่างหอฟอกอากาศอัจฉริยะและระบบคลาวด์ (Cloud System for Data Computing and Storage)
  - 2) ระบบสื่อสารไร้สายสำหรับการสื่อสารอย่างทั่วถึงครอบคลุมทั่วประเทศด้วยเทคโนโลยี 4G สำหรับการส่งข้อมูลจากโครงข่ายเซ็นเซอร์สำหรับการวัดค่า PM2.5 (PM2.5 Monitoring box) สู่ Cloud System สำหรับการประมวลผลและแสดงบนหน้าจอแสดงผล Dashboard
4. ระบบคลาวด์เพื่อการจัดการข้อมูล (Cloud System for Data Computing and Storage) ออกแบบให้ทำหน้าที่จัดเก็บข้อมูลสภาพแวดล้อมและการทำงานของหอฟอกอากาศที่วัดค่ามาจากเซ็นเซอร์ชนิดต่าง ๆ และนำข้อมูลไปประมวลผล

โครงการการศึกษาและพัฒนาหอฟอกอากาศอัจฉริยะ โดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์และระบบควบคุมดูแลผ่านเทคโนโลยีไอโอที เพื่อการลดฝุ่นละอองขนาดเล็ก (PM 2.5) ในพื้นที่สาธารณะ

5. ส่วนติดต่อผู้ใช้ เพื่อแสดงประสิทธิภาพการทำงาน และ ช่วยควบคุมการทำงานของหอฟอกอากาศ (Real-Time Monitoring and Control) โดยพัฒนาออกมาในรูปแบบของหน้าจอแสดงผล (Dashboard)

### ระบบพลังงานจากแสงอาทิตย์แบบอัจฉริยะ (Smart Solar System)

Hybrid Solar inverter นำมาใช้เพื่อให้มอเตอร์ของปั๊มได้ใช้พลังงานสะอาดจากแสงอาทิตย์และเป็น การประหยัดค่าใช้จ่ายด้านพลังงานของหอฟอกอากาศ ซึ่ง inverter ตัวนี้ได้ขึ้นทะเบียนนวัตกรรมไทย จุดเด่นคือช่วยในการประหยัดพลังงานไฟฟ้าจากกริด เพราะมีการนำไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์โซ ล่าเซลล์มาเป็นแหล่งจ่ายพลังงานหลักของหอฟอกได้อีกด้วย โดยเป็นการทำงานแบบ Hybrid ในการ สลับแหล่งพลังงานหลัก ระหว่างพลังงานไฟฟ้าจากกริดและพลังงานไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ ซึ่งหากพลังงานจากโซล่าเซลล์ไม่เพียงพอระบบจะใช้ไฟฟ้าจากกริดเข้ามาช่วยเป็นพลังงานหลักของหอ ฟอกอากาศ ทำให้ระบบของหอฟอกอากาศสามารถทำงานได้เต็มประสิทธิภาพได้ตลอดเวลา



  
บัญชีนวัตกรรมไทย  
โดย  
สำนักงานงบประมาณ  
ฉบับเพิ่มเติม  
กุมภาพันธ์ 2562

ภาพที่ 19 บัญชีนวัตกรรม Hybrid Solar inverter โดยบริษัท ไทยโซลาร์เวย์ จำกัด

โครงการการศึกษาและพัฒนาหอฟอกอากาศอัจฉริยะ โดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์และระบบควบคุมดูแลผ่านเทคโนโลยีไอโอที เพื่อการลดฝุ่นละอองขนาดเล็ก (PM 2.5) ในพื้นที่สาธารณะ

DC Input Voltage (Vmin)	50Vdc
DC Input Voltage (Vmax)	440Vdc
DC Input Current (Imax)	18A
Solar Input Power (Pmax)	3000Wp
Frequency Range (Hz)	5-65 Hz
AC Input Voltage (Vmin)	90Vac
AC Input Voltage (Vmax)	260Vac
AC Input Current (Imax)	12A
Rate Power (W)	0.5HP-3HP (373W-2238W)
Control Mode	<ul style="list-style-type: none"> <li>Maximum Power Point Tracking (MPPT)</li> <li>Auto phase tuning for 220V 2 phase</li> <li>Power Factor Correction (PFC) 0.99</li> </ul>
7 Operating Mode	-
AC Output Voltage (Vac)	100-240Vac
AC Output Current (Imax)	12A
Output Frequency (Hz)	5-50 Hz
Type of Motor	<ul style="list-style-type: none"> <li>220V 1 phase Capacitor run</li> <li>220V 1 phase without capacitor run</li> <li>220V 3 phase</li> </ul>
Protection	<ul style="list-style-type: none"> <li>Electronic Surge protection</li> <li>Float Sensor Switch</li> <li>Dry run protection</li> <li>IP 65 protection</li> <li>Over load protection</li> </ul>
External Communication	UART (Serial Output Level 0V-3.3V), Bluetooth (Option)
Cooling	Conventional Cooling
Other Mode	Generator Mode, Battery
Recommended Solar Array Configuration	
	Motor Size (HP)
Solar Panel	0.5 HP (373W)    1 HP (746W)    2HP(1492W)    3HP (2238W)
300Wp [Open circuit voltage 45V +- 3V]	2*1    3*1    6*1    10*1
250Wp [Open circuit voltage 38V +- 3V]	3*1    4*1    8*1    12*1

ภาพที่ 20 โปสเตอร์รายละเอียด Hybrid Solar inverter โดยบริษัท ไทยโซลาร์เวย์ จำกัด

โครงการการศึกษาและพัฒนาหอฟอกอากาศอัจฉริยะ โดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์และระบบควบคุมดูแลผ่านเทคโนโลยีไอโอที เพื่อการลดฝุ่นละอองขนาดเล็ก (PM 2.5) ในพื้นที่สาธารณะ

### บทที่ 3 ระเบียบวิธีวิจัย

#### วิธีการ และขั้นตอนการดำเนินการโครงการ

การดำเนินงานของโครงการนี้ถูกแบ่งออกเป็น 6 ขั้นตอน

1. การศึกษาความต้องการของ หอฟอกอากาศอัจฉริยะ (Air Purification Tower) อันเนื่องมาจากฝุ่นละอองในพื้นที่สาธารณะ โดยวิเคราะห์ระดับของปัญหา พื้นที่เสี่ยงหรือวิกฤตทางด้านสุขภาพของประชาชนจากมลภาวะอากาศ และเทคนิคที่หรือแนวทางการแก้ปัญหาที่เหมาะสม
2. ดำเนินการศึกษาวิจัยออกแบบและพัฒนา ต้นแบบหอฟอกอากาศอัจฉริยะ โดยเทคนิคการดักจับฝุ่นละอองด้วยน้ำแบบระบบสครับบิง
3. ดำเนินการศึกษาวิจัยและพัฒนาระบบเซนเซอร์ไอโอทีสำหรับการวัดค่า PM 2.5 (PM2.5 Monitoring box) เพื่อทำหน้าที่เก็บข้อมูลปริมาณฝุ่นละอองในบริเวณที่ติดตั้งไปยังระบบคลาวด์ และนำมาวิเคราะห์ประสิทธิภาพการลดปริมาณฝุ่นละอองในพื้นที่สาธารณะที่มีความเสี่ยงสูงจากมลภาวะอากาศ ซึ่งได้แก่ สถานีขนส่งมวลชน, จุดจอดรถบริการสาธารณะ
4. ดำเนินการศึกษาวิจัยและพัฒนาระบบไอโอทีสำหรับการควบคุมและสั่งการทำงานของหอฟอกอากาศอัจฉริยะแบบทันทีและตลอดเวลา (Real-Time Monitor and Control) รวมไปถึงการพัฒนาการจัดการข้อมูลด้วยคลาวด์ เพื่อใช้เก็บข้อมูลคุณภาพอากาศ และการประมวลผลประสิทธิภาพการทำงานของหอฟอกอากาศอัจฉริยะ (Cloud Platform for Data Computing and Storage)
5. ติดตั้ง ต้นแบบหอฟอกอากาศอัจฉริยะ ในสถานที่ดำเนินโครงการ และดำเนินการวัดผลความพึงพอใจจากกลุ่มตัวอย่างของประชาชน จำนวน 100 คน ที่เข้ามาใช้งานหอฟอกอากาศอัจฉริยะ
6. สรุปผลการวิจัย และเผยแพร่ผลงานวิจัยแก่หน่วยงานภาครัฐและภาคเอกชน

จากการดำเนินงานของโครงการดังกล่าวนี้ ได้ดำเนินการตามรายละเอียดและขั้นตอนตามวัตถุประสงค์ของโครงการ ในระยะเวลาของการดำเนินโครงการ ซึ่งรายละเอียดประกอบด้วยกิจกรรมทั้งหมด 16 กิจกรรม โดยในส่วนของการทำงานประจำงวดที่ 1 นั้น ประกอบด้วยกิจกรรมหลัก จำนวน 2 กิจกรรม

โครงการการศึกษาและพัฒนาหอฟอกอากาศอัจฉริยะ โดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์และระบบควบคุมดูแลผ่านเทคโนโลยีไอโอที เพื่อการลดฝุ่นละอองขนาดเล็ก (PM 2.5) ในพื้นที่สาธารณะ

โดยกิจกรรมลำดับที่ 1 เป็นการดำเนินงานจัดทำแผนการดำเนินงานของโครงการให้เป็นไปตามกรอบระยะเวลาของโครงการ ซึ่งมีระยะเวลาในการดำเนินการทั้งสิ้น 1 ปี นับตั้งแต่วันที่ 4 เมษายน 2565 จนถึงวันที่ 4 เมษายน 2566 ทางคณะทำงานได้นำเนินการหารือเพราะสรุปกิจกรรมในการดำเนินงานโครงการ รวมทั้งยังดำเนินการวางแผนเพื่อกำหนดระยะเวลาในการดำเนินงาน เพื่อป้องกันการล่าช้าเนื่องจากปัญหาและอุปสรรคในการดำเนินงานที่เกิดขึ้นโดยไม่คาดคิด

ในส่วนของกิจกรรมในลำดับที่ 2 เป็นการดำเนินการประสานงานและการติดต่อหน่วยงานที่เกี่ยวข้องในการดำเนินโครงการ เพื่อเตรียมความพร้อมในการติดตั้งและทดสอบประสิทธิภาพหอฟอกอากาศอัจฉริยะ โดยทางคณะทำงาน นำโดยหัวหน้าโครงการ ในนามของบริษัทไทยโซลาร์เวย์ จำกัด ได้ดำเนินการหารือร่วมกับ เทศบาลนครพิษณุโลก จังหวัดพิษณุโลกและ วิทยาลัยพลังงานทดแทนและสมาร์ตกริดเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยนเรศวร ซึ่งได้ดำเนินการ ลงนามในบันทึกข้อตกลงความร่วมมือด้านการวิจัย เรื่อง ยืนยันการร่วมมือในการทำวิจัยและพัฒนาระบบตรวจวัดและปรับปรุงคุณภาพอากาศ (ภาคผนวก) ซึ่งเป็นการร่วมมือกัน 3 ฝ่ายระหว่าง ภาครัฐ ภาคการศึกษา และภาคเอกชน ได้แก่ เทศบาลนครพิษณุโลก จังหวัดพิษณุโลก (ภาครัฐ) วิทยาลัยพลังงานทดแทนและสมาร์ตกริดเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยนเรศวร (ภาคการศึกษา) และ บริษัทไทยโซลาร์เวย์ (ภาคเอกชน) โดยวัตถุประสงค์และขอบเขตความร่วมมือหลัก สอดคล้องต่อการดำเนินงานโครงการการศึกษาพัฒนาหอฟอกอากาศอัจฉริยะโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์และระบบควบคุมดูแลผ่านเทคโนโลยีไอโอที เพื่อการลดฝุ่นละอองขนาดเล็ก (PM 2.5) ในพื้นที่สาธารณะ อย่างเป็นรูปธรรม

การดำเนินงานประจำงวดที่ 2 นั้น ประกอบด้วยกิจกรรมหลัก จำนวน 5 กิจกรรม ประกอบด้วย

กิจกรรมที่ 3 ถึงกิจกรรมที่ 7 ตามแผนปฏิบัติการโครงการ

กิจกรรมลำดับที่ 3 เป็นการศึกษาวิจัยเพื่อการออกแบบโครงสร้างหอฟอกอากาศสำหรับการติดตั้งในพื้นที่สาธารณะ โดยมุ่งเน้นที่การศึกษาเทคโนโลยีการฟอกอากาศ เพื่อนำมาประยุกต์ใช้และออกแบบให้เหมาะสมกับ สภาพอากาศ การใช้งานและการติดตั้งในพื้นที่สาธารณะของประเทศไทย ซึ่งทางผู้วิจัยได้มองเห็นว่าบริเวณป้ายรถประจำทางสาธารณะนั้นเป็นพื้นที่สาธารณะที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการพัฒนาหอฟอกอากาศเพื่อนำไปติดตั้ง และทางผู้วิจัยได้เลือกใช้การออกแบบและพัฒนาระบบดักจับฝุ่นละอองโดยใช้เทคนิคมาน้ำร่วมกับการใช้ packed bed ซึ่งจะช่วยให้หอฟอกมีประสิทธิภาพมากกว่า 90% ในการดักจับฝุ่นละออง PM2.5 ได้สูง แต่มีค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาต่ำ

กิจกรรมลำดับที่ 4 มุ่งเน้นที่การศึกษาและวิจัยเพื่อออกแบบการพัฒนาระบบไอโอที (IoT) สำหรับการตรวจสอบควบคุมการทำงานและสถานะการทำงานของหอฟอกอากาศ ควบคู่กับการวัดประสิทธิภาพการทำงานของหอฟอกอากาศ ผ่านการวัดค่าจากเซนเซอร์ชนิดต่าง ๆ อาทิเช่น

โครงการการศึกษาและพัฒนาหอฟอกอากาศอัจฉริยะ โดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์และระบบควบคุมดูแลผ่านเทคโนโลยีไอโอที เพื่อการลดฝุ่นละอองขนาดเล็ก (PM 2.5) ในพื้นที่สาธารณะ

เซนเซอร์วัดค่าฝุ่นละอองขนาดเล็ก (PM 2.5) เซนเซอร์อุณหภูมิและความชื้น เซนเซอร์วัดคาร์บอนไดออกไซด์ (CO<sub>2</sub>) เซนเซอร์วัดความเร็วลมบริเวณหอฟอกอากาศ เซนเซอร์วัดความเร็วลมและความดันในระบบท่อลมของหอฟอกอากาศ เซนเซอร์วัดความดันน้ำ เซนเซอร์วัดค่าเป็นกรดต่าง (PH) เซนเซอร์วัดคุณภาพของน้ำในระบบหอฟอกอากาศ เพื่อนำมาใช้วิเคราะห์การทำงานของระบบหอฟอกอากาศ รวมทั้งควบคุมและเฝ้าระวังสำหรับการบำรุงรักษาระบบของหอฟอกอากาศ

กิจกรรมลำดับที่ 5 เป็นขั้นตอนในการออกแบบระบบพลังงานแสงอาทิตย์หรือระบบโซลาร์เซลล์ซึ่งเป็นพลังงานสะอาดและจะเป็นแหล่งพลังงานหลักสำหรับการทำงานของหอฟอกอากาศอัจฉริยะ และจะสามารถทำงานควบคู่กับแหล่งพลังงานอื่นๆ ได้ด้วย (Hybrid) ขึ้นอยู่กับการนำระบบไปติดตั้ง โดยขั้นตอนนี้จะเป็นการคำนวณแนวโน้มปริมาณการใช้พลังงานของหอฟอกและคำนวณขนาดของระบบโซลาร์เซลล์ที่เหมาะสม

กิจกรรมลำดับที่ 6 เป็นกิจกรรมศึกษาวิจัย เพื่อการออกแบบและพัฒนาเครื่องวัดฝุ่นละอองขนาดเล็ก (PM 2.5) ในพื้นที่สาธารณะ ด้วยเทคโนโลยีไอโอที โดยเครื่องวัดฝุ่นดังกล่าวถูกออกแบบให้มีการทำงานโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์ เป็นพลังงานหลักในการทำงาน โดยจะมีระบบการเก็บพลังงานจากแผงโซลาร์เซลล์ไปยังในแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนภายในเครื่องวัด ทำให้เครื่องวัดฝุ่นละอองขนาดเล็ก (PM2.5) ที่ออกแบบให้สามารถทำงานในกรณีที่ไม่มีแสงอาทิตย์ โดยการใช้พลังงานจากแบตเตอรี่ได้เป็นระยะเวลาอย่างน้อยมากกว่า 1 วันหรือ 24 ชั่วโมง ซึ่งความสามารถของเครื่องวัดฝุ่นละอองขนาดเล็ก (PM2.5) นอกจากจะสามารถวัดค่าฝุ่นละอองขนาดเล็ก PM 2.5 แล้ว ยังสามารถวัดค่าฝุ่นละอองขนาดเล็กระดับ PM 10 รวมถึงระดับสารเคมีหรืออื่น ๆ ที่แสดงถึงคุณภาพของอากาศในพื้นที่ทำการวัด ได้แก่ อุณหภูมิ ความชื้น คาร์บอนมอนนอกไซด์ (CO) และ ไนโตรเจนไดออกไซด์ (NO<sub>2</sub>) ซึ่งข้อมูลเหล่านี้จะถูกส่งไปยังระบบออนไลน์สำหรับการจัดการ แสดงผล และประมวลผล ด้วยการสื่อสารแบบ Narrow Band (NB-IoT) เพื่อให้สามารถนำข้อมูลของคุณภาพอากาศในพื้นที่ติดตั้งเครื่องวัดฝุ่นละอองขนาดเล็ก (PM2.5) มาทำการวิเคราะห์ประกอบการวัดประสิทธิภาพการทำงานของหอฟอกอากาศต่อไป

กิจกรรมลำดับที่ 7 เป็นการออกแบบและพัฒนาระบบออนไลน์สำหรับการจัดการ แสดงผล และการประมวลผลข้อมูล ที่ได้รับจากระบบไอโอทีที่ติดตั้งเพื่อตรวจสอบและควบคุมการทำงานของหอฟอกอากาศ รวมทั้งข้อมูลจากเซนเซอร์ต่าง ๆ ของเครื่องวัดฝุ่นละอองขนาดเล็ก (PM2.5) ซึ่งสามารถดำเนินการติดตามข้อมูลดังกล่าวได้ตลอดเวลา โดยระบบออนไลน์ดังกล่าวได้ถูกออกแบบและจะดำเนินการพัฒนาออกมาเป็นระบบเว็บแอปพลิเคชันเพื่อการควบคุมและแสดงผลข้อมูลจากระบบไอโอที ควบคู่กับฐานข้อมูลเพื่อการจัดเก็บข้อมูลข้างต้น นอกจากนี้ในส่วนของตัวเองระบบยังสามารถอัปเดตซอฟต์แวร์หรือเฟิร์มแวร์ของเครื่องวัดฝุ่นละอองขนาดเล็ก (PM2.5) ผ่าน wireless แบบ Over-

โครงการการศึกษาและพัฒนาหอฟอกอากาศอัจฉริยะ โดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์และระบบควบคุมดูแลผ่านเทคโนโลยีไอโอที เพื่อการลดฝุ่นละอองขนาดเล็ก (PM 2.5) ในพื้นที่สาธารณะ

The-Air Update (OTA) ซึ่งทำให้ลดระยะเวลาและงบประมาณในการดูแลบำรุงรักษาอุปกรณ์ รวมทั้งสะดวกและลดจำนวนคนไม่ต้องเข้าไปอัปเดตแบบ onsite

การดำเนินงานประจำงวดที่ 3 นั้น ประกอบด้วยกิจกรรมหลัก จำนวน 5 กิจกรรม ประกอบด้วย กิจกรรมที่ 8 ถึงกิจกรรมที่ 12 ตามแผนปฏิบัติการโครงการ โดยเร่งรัดกิจกรรมที่ 13 ขึ้นมาดำเนินการในงวดงานนี้อีกด้วย รวมทั้งสิ้นเป็น 6 กิจกรรม

กิจกรรมลำดับที่ 8 เป็นการติดตั้งเครื่องวัดฝุ่นขนาดเล็ก (PM2.5) เพื่อเก็บข้อมูลสำหรับ การศึกษาวิจัยขั้นต้น โดยได้ลงพื้นที่ ดำเนินการตรวจสอบพื้นที่ เพื่อตรวจสอบบริเวณที่จะดำเนินการติดตั้ง โดยพิจารณาบริเวณที่อุปกรณ์ได้รับแสงแดดในช่วงกลางวันมากกว่า 70% ขึ้นไป รวมทั้งได้รับความเข้มแสงเพียงพอและไม่ถูกสิ่งก่อสร้างบดบัง เพื่อให้สามารถเก็บพลังงานในแบตเตอรี่และนำพลังงานไปใช้ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งได้ดำเนินการติดตั้งเครื่องวัดฝุ่นขนาดเล็ก (PM2.5) ไว้ในส่วนของบริเวณภายในมหาวิทยาลัยนเรศวร และ บริเวณหน้าโรงพยาบาลพุทธชินราช พิษณุโลก นอกจากนี้ยังสำรวจพื้นที่สำหรับการติดตั้งหอฟอกอากาศ โดนบริเวณที่ติดตั้งป้ายรถเมล์ จะมีไฟกระแสสลับ ซึ่งสามารถเชื่อมต่อเข้ากับระบบของโซลาร์เซลล์ของหอฟอกอากาศได้ เนื่องจากระบบเป็นแบบ Hybrid ซึ่งสามารถพลังงานได้จากทั้งไฟฟ้าจากกริดบริเวณป้ายรถเมล์และไฟฟ้าจากโซลาร์เซลล์ได้ (อ้างอิงจากเทศบาลพิษณุโลก การใช้ไฟฟ้าเพื่อกิจการสาธารณะทำได้โดยไม่เสียค่าใช้จ่าย)

กิจกรรมลำดับที่ 9 ดำเนินการพัฒนาหอฟอกอากาศตามแบบร่าง ในกิจกรรมนี้ทางคณะทำงานได้ดำเนินการเริ่มขึ้นแบบหอฟอกตัวที่ 1 โดยมุ่งเน้นเพื่อใช้ในการทดสอบวิธีการฟอกอากาศ โดยหลังจากดำเนินการประกอบเสร็จแล้ว ได้ดำเนินการนำไปติดตั้งที่ศูนย์วิจัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อำเภอแก่งคอย จังหวัดสระบุรี เพื่อดำเนินการติดตั้งระบบไฟฟ้า ระบบไอโอที และระบบโซลาร์เซลล์ ในส่วนของแบบหอฟอกตัวที่ 2 นั้น มุ่งเน้นไปที่หอฟอกสำหรับติดตั้งบริเวณป้ายรถเมล์ ซึ่งกำลังดำเนินการประกอบตามแบบร่างอยู่ คาดว่าแล้วเสร็จภายใน กุมภาพันธ์ 2566

กิจกรรมลำดับที่ 10 เป็นการดำเนินการพัฒนาระบบไอโอทีสำหรับหอฟอกอากาศ โดยประกอบไปด้วยเซนเซอร์สำหรับการวัดค่าต่าง ๆ ในหอฟอกได้แก่

- เซนเซอร์วัดฝุ่นละอองขนาดเล็ก (PM 2.5)
- เซนเซอร์วัดค่าการนำไฟฟ้าของน้ำ (EC/TDS)
- เซนเซอร์วัดค่าความเป็นกรดต่างของน้ำ (pH)
- เซนเซอร์ วัดระดับน้ำ
- เซนเซอร์วัดอัตราการไหลของน้ำ
- เซนเซอร์วัดอัตราการไหลของลม

โครงการการศึกษาและพัฒนาหอฟอกอากาศอัจฉริยะ โดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์และระบบควบคุมดูแลผ่านเทคโนโลยีไอโอที เพื่อการลดฝุ่นละอองขนาดเล็ก (PM 2.5) ในพื้นที่สาธารณะ

- เซนเซอร์วัดความเร็วลมภายนอกหอฟอก
- เซนเซอร์วัดคาบอนไดออกไซด์
- เซนเซอร์วัดอุณหภูมิ
- เซนเซอร์วัดความชื้น

ซึ่งข้อมูลจากเซนเซอร์จะถูกดำเนินการส่งไปยังระบบออนไลน์สำหรับจัดการ แสดงผล และประมวลผล ผ่านการสื่อสารไร้สายรุ่นที่สี่ (Fourth-Generation Wireless, 4G Boardband) ซึ่งเป็นการสื่อสารที่สามารถส่งข้อมูลด้วยอัตราสูงและมีความเสถียรในการส่งสัญญาณสูง พร้อมทั้งมีเสถียรภาพที่ครอบคลุมพื้นที่มากที่สุดในประเทศไทย

กิจกรรมลำดับที่ 11 เป็นการดำเนินงานพัฒนาระบบพลังงานแสงอาทิตย์แบบอัจฉริยะ สำหรับเป็นระบบจัดการพลังงานของหอฟอกอากาศ โดยระบบเป็นแบบ Hybrid ซึ่งสามารถใช้พลังงานจากกริดและพลังงานจากแสงอาทิตย์ ซึ่งตัวระบบจะสามารถจัดการพลังงานทั้งสองระบบได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยหากพลังงานจากแสงอาทิตย์ไม่เพียงพอในการใช้งาน ระบบจะทำการนำพลังงานจากกริดเข้ามาช่วยทำให้สามารถรักษาความเสถียรในการจ่ายไฟได้

กิจกรรมลำดับที่ 12 เป็นการดำเนินการประกอบตัวโครงสร้างฟอกอากาศ เข้าร่วมกับ ระบบไอโอที และระบบพลังงานแสงอาทิตย์ โดยหอฟอกตัวที่หนึ่งได้ดำเนินการประกอบและติดตั้งอยู่ที่ห้องวิจัย เพื่อดำเนินการทดลองระบบการทำงานของตัวหอฟอกและระบบทั้งหมด นอกจากนี้ยังดำเนินการทดสอบประสิทธิภาพการทำงานของฟอกอากาศของตัวหอฟอกอีกด้วย ในส่วนของหอฟอกอากาศตัวที่สองนั้น กำลังอยู่ในการดำเนินการสร้างตามแบบ พร้อมทั้งประกอบเข้ากับระบบไอโอทีและระบบพลังงานแสงอาทิตย์ให้แล้วเสร็จภายในเดือนกุมภาพันธ์ 2566

กิจกรรมลำดับที่ 13 เป็นการทดสอบประสิทธิภาพของหอฟอกอากาศ ที่ศูนย์วิจัยจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อำเภอแก่งคอย จังหวัดสระบุรี โดยหอฟอกตัวที่หนึ่งได้ดำเนินการติดตั้งระบบทั้งหมดแล้ว ซึ่งเริ่มดำเนินการทดสอบการทำงาน โดยออกแบบการทำงานเพื่อทดสอบประสิทธิภาพของหอฟอก โดยแบ่งออกเป็น 2 ส่วนใหญ่ ได้แก่

1. ระบบการฟ่นละอองและการทำturbulence
2. การใช้ packbed เพื่อช่วยเพิ่มพื้นที่การสัมผัสระหว่างน้ำกับอากาศ

ซึ่งปัจจุบันยังคงดำเนินการทดสอบในรูปแบบต่าง ๆ คาดว่าจะสิ้นสุดช่วงกลางเดือนมีนาคม 2566

กิจกรรมลำดับที่ 14 เป็นการติดตั้งเพิ่มเติมในส่วนของหอฟอกอากาศในบริเวณพื้นที่การศึกษาบริเวณพื้นที่ซึ่งปัจจุบันได้ดำเนินการติดตั้งเสร็จเรียบร้อยแล้วภายในเดือนมีนาคม 2566 ส่วนแรกบริเวณตัวเมืองเทศบาลเมืองพิษณุโลก จังหวัดพิษณุโลก จำนวนสองที่ ได้แก่

1. จุดรอรถสาธารณะหน้าโรงพยาบาล

โครงการการศึกษาและพัฒนาหอฟอกอากาศอัจฉริยะ โดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์และระบบควบคุมดูแลผ่านเทคโนโลยีไอโอที เพื่อการลดฝุ่นละอองขนาดเล็ก (PM 2.5) ในพื้นที่สาธารณะ

## 2. จุฬารอดสาธารณะหลังวัด

นอกจากบริเวณจังหวัดพิษณุโลกแล้วหอฟอกอีก 1 เครื่องได้ดำเนินการติดตั้งอยู่ที่ศูนย์วิจัยจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย จังหวัดสระบุรี เพื่อทำการทดสอบและ เตรียมความพร้อมในการดำเนินการเพื่อทำการทดลองในการขอรับการสนับสนุนเงินจากกองทุนฯ เพื่อทำการวิจัยเพิ่มเติมต่อเนื่อง ในส่วนของการยื่นขอเสนอโครงการประเภทที่ 2 แบบการขอสนับสนุนเงินจากกองทุนต่อเนื่อง ซึ่งกำลังดำเนินการจัดทำเอกสารอยู่ในขณะนี้

กิจกรรมลำดับที่ 15 เป็นสรุปผลการศึกษาวิจัย และเผยแพร่ผลงานวิจัย โดยทางคณะผู้วิจัยได้ดำเนินการทดสอบการทำงานของหอฟอกอากาศ เพื่อดำเนินการจัดทำฉบับร่างวารสารวิชาการสำหรับการเพื่อเผยแพร่องค์ความรู้ที่ได้รับจากรโครงการ โดยได้ดำเนินการจัดฉบับร่างเพื่อส่งมอบในโครงการให้คณะกรรมการตรวจสอบและพิจารณา

กิจกรรมลำดับที่ 16 จัดทำงานฉบับสมบูรณ์ เป็นขั้นตอนการทำสรุปและจัดทำรายงานฉบับสมบูรณ์ รวมทั้งเอกสารประกอบอื่น ๆ เพื่อใช้งานการส่งมอบและปิดโครงการต่อไป

## การออกแบบโครงสร้างหอฟอกอากาศสำหรับการติดตั้งในพื้นที่สาธารณะ

### 1. การออกแบบระบบท่อลมโดยทั่วไป

ท่อลมส่งและท่อลมกลับจะแบ่งออกเป็นชนิดต่างๆ ตามความเร็วลม และความดันลมภายในท่อลม สำหรับท่อลมส่งนั้น การแบ่งชนิดตามความเร็วลมภายในท่อ จะแบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ

- ระบบความเร็วต่ำ
- ระบบความเร็วสูง

ในการปรับอากาศเพื่อการค้าหรือที่พักอาศัย ระบบความเร็วลมต่ำความเร็วลมจะไม่เกิน 2,500 ฟุตต่ออนาที ปกติจะอยู่ระหว่าง 1,200 – 2,200 ฟุตต่ออนาที ระบบความเร็วลมสูง ความเร็วลมจะเกิน 2,500 ฟุตต่ออนาทีขึ้นไป

ในการปรับอากาศในโรงงานอุตสาหกรรม ระบบความเร็วลมต่ำความเร็วลมจะไม่เกิน 2,500 ฟุตต่ออนาที ปกติจะอยู่ระหว่าง 2,200 – 2,500 ฟุตต่ออนาที ระบบความเร็วลมสูง ความเร็วลมจะเกิน 2,500 – 5,000 ฟุตต่ออนาที

โครงการการศึกษาและพัฒนาหอฟอกอากาศอัจฉริยะ โดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์และระบบควบคุมดูแลผ่านเทคโนโลยีไอโอที เพื่อการลดฝุ่นละอองขนาดเล็ก (PM 2.5) ในพื้นที่สาธารณะ

### Recommended air velocities (f/m)

	Recommended velocity		
	Residence	Schools, public areas	Industrial areas
Outside air inlet	500	500	500
Fan outlet	700	800	1000
Main ducts	700-900	1000-1300	1200-1800
Branch duct	500-600	500-600	800-1000

ภาพที่ 21 ภาพแสดงความเร็วรวมที่เหมาะสมสำหรับการออกแบบท่อ

หมายเหตุ ในการออกแบบงานนี้เลือกใช้ความเร็วลมแนะนำสำหรับพื้นที่สาธารณะคือ 1,300 เมตรต่อวินาที ซึ่งเป็นความเร็วแนะนำที่ใช้ในพื้นที่อุตสาหกรรมด้วย

### การคำนวณออกแบบท่อลม

การหาขนาดท่อลม ในเชิงวิศวกรรมที่ใช้อู่จะมีวิธีคำนวณท่อลม อยู่ 3 วิธีดังนี้

1) Velocity Reduction Method เป็นการออกแบบ โดยเลือกความเร็วเริ่มต้นก่อนที่ Fan Discharge แล้วจึงลดความเร็วลมลงไปขณะที่ท่อลมได้ส่งลมออกไปยังหัวจ่ายจุดต่างๆโดยกำหนดความเร็วลมที่จุดแรกตามค่าแนะนำ

2) Equal Friction Method วิธีนี้เป็นการกำหนดให้มีค่าfriction loss ต่อความยาวเท่ากันตลอดทั้งระบบ เป็นวิธีที่ได้รับความนิยมกว่าแบบแรก สามารถออกแบบได้ทั้งท่อลมส่ง ท่อลมกลับ ท่ออากาศเติม fresh air โดยเลือกความเร็วลมเริ่มต้นในท่อหลักซึ่งอยู่ใกล้พัดลมมากที่สุด โดยเปิดค่าที่เหมาะสมจากตารางแนะนำ นำค่าความเร็วลมเริ่มแรกและปริมาณลมไปคำนวณหาค่า Friction Rate แล้วนำค่านี้ไปใช้ทั้งระบบ

3) Static Regain Method เหมาะกับท่อลมความเร็วสูง (สูงกว่า 2000 fpm) หลักการง่ายๆ คือเลือกขนาดท่อลมให้ได้ Regain head อันเนื่องมาจากการลดความเร็วลมลง ณ แต่ละส่วนที่มีการแยกของท่อลม หักล้างพอดีกับ Friction Loss ที่จะเกิดในท่อลมส่วนถัดมา ดังนั้น Static Pressure จึงคงเท่าเดิมกับก่อนที่มีการแยกท่อ วิธีการทำจะทำได้โดยเลือกความเร็วเริ่มต้นแรกที่ พัดลม จากนั้นเลือกขนาดท่อลมแรก สำหรับขนาดท่อลมส่วนที่เหลือทำโดยใช้แผนภูมิ L/Q Ratio และแผนภูมิ Low Velocity Static regain

โครงการการศึกษาและพัฒนาหอฟอกอากาศอัจฉริยะ โดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์และระบบควบคุมดูแลผ่านเทคโนโลยีไอโอที เพื่อการลดฝุ่นละอองขนาดเล็ก (PM 2.5) ในพื้นที่สาธารณะ

### วิธีการออกแบบท่อลม

เลือกความเร็วลมเริ่มต้นของท่อหลักก่อน โดยอาศัยตารางแนะนำค่าความเร็วลมหน่วยเป็น ฟุตต่อ นาที fpm และหาขนาดของท่อลมที่ใช้จาก  $A=Q/v$

โดย A คือพื้นที่หน้าตัดท่อลม หน่วยเป็นตารางฟุต

Q คืออัตราการไหล หน่วยเป็นลูกบาศก์ฟุตต่อนาที

v คือ ความเร็วลม หน่วยเป็นฟุตต่อนาที

จะหาขนาดต้องแปลงเป็นท่อกลม Circular Equivalent Diameter ก่อนจากสูตร

$D = \sqrt{4A/\pi}$  แล้วจึงนำไปเทียบค่ากับตาราง จะได้ขนาดท่อสี่เหลี่ยมตามต้องการ จากนั้นจึง

หา friction

## Equivalent of a circular duct

Table 12-7 Circular Equivalents of Rectangular Ducts for Equal Friction and Capacity—Dimensions in Inches, Feet, or Meters

Side a of Rectangular Duct	Diameter $D_c$ of Circular Duct																	
	b = 6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	22	24	
6	6.6																	
7	7.1	7.7																
8	7.5	8.2	8.8															
9	8.0	8.6	9.3	9.9														
10	8.4	9.1	9.8	10.4	10.9													
11	8.8	9.5	10.2	10.8	11.4	12.0												
12	9.1	9.9	10.7	11.3	11.9	12.5	13.1											
13	9.5	10.3	11.1	11.8	12.4	13.0	13.6	14.2										
14	9.8	10.7	11.5	12.2	12.9	13.5	14.2	14.7	15.3									
15	10.1	11.0	11.8	12.6	13.3	14.0	14.6	15.3	15.8	16.4								
16	10.4	11.4	12.2	13.0	13.7	14.4	15.1	15.7	16.3	16.9	17.5							
17	10.7	11.7	12.5	13.4	14.1	14.9	15.5	16.1	16.8	17.4	18.0	18.6						
18	11.0	11.9	12.9	13.7	14.5	15.3	16.0	16.6	17.3	17.9	18.5	19.1	19.7					
19	11.2	12.2	13.2	14.1	14.9	15.6	16.4	17.1	17.8	18.4	19.0	19.6	20.2	20.8				
20	11.5	12.5	13.5	14.4	15.2	15.9	16.8	17.5	18.2	18.8	19.5	20.1	20.7	21.3	21.9			
22	12.0	13.1	14.1	15.0	15.9	16.7	17.6	18.3	19.1	19.7	20.4	21.0	21.7	22.3	22.9	24.1		
24	12.4	13.6	14.6	15.6	16.6	17.5	18.3	19.1	19.8	20.6	21.3	21.9	22.6	23.2	23.9	25.1	26.2	
26	12.8	14.1	15.2	16.2	17.2	18.1	19.0	19.8	20.6	21.4	22.1	22.8	23.5	24.1	24.8	26.1	27.2	
28	13.2	14.5	15.6	16.7	17.7	18.7	19.6	20.5	21.3	22.1	22.9	23.6	24.4	25.0	25.7	27.1	28.2	
30	13.6	14.9	16.1	17.2	18.3	19.3	20.2	21.1	22.0	22.9	23.7	24.4	25.2	25.9	26.7	28.0	29.3	
32	14.0	15.3	16.5	17.7	18.8	19.8	20.8	21.8	22.7	23.6	24.4	25.2	26.0	26.7	27.5	28.9	30.1	
34	14.4	15.7	17.0	18.2	19.3	20.4	21.4	22.4	23.3	24.2	25.1	25.9	26.7	27.5	28.3	29.7	31.0	
36	14.7	16.1	17.4	18.6	19.8	20.9	21.9	23.0	23.9	24.8	25.8	26.6	27.4	28.3	29.0	30.5	32.0	
38	15.0	16.4	17.8	19.0	20.3	21.4	22.5	23.5	24.5	25.4	26.4	27.3	28.1	29.0	29.8	31.4	32.8	
40	15.3	16.8	18.2	19.4	20.7	21.9	23.0	24.0	25.1	26.0	27.0	27.9	28.8	29.7	30.5	32.1	33.6	

Source: Reprinted by permission from ASHRAE Handbook, Fundamentals Volume, 1989.

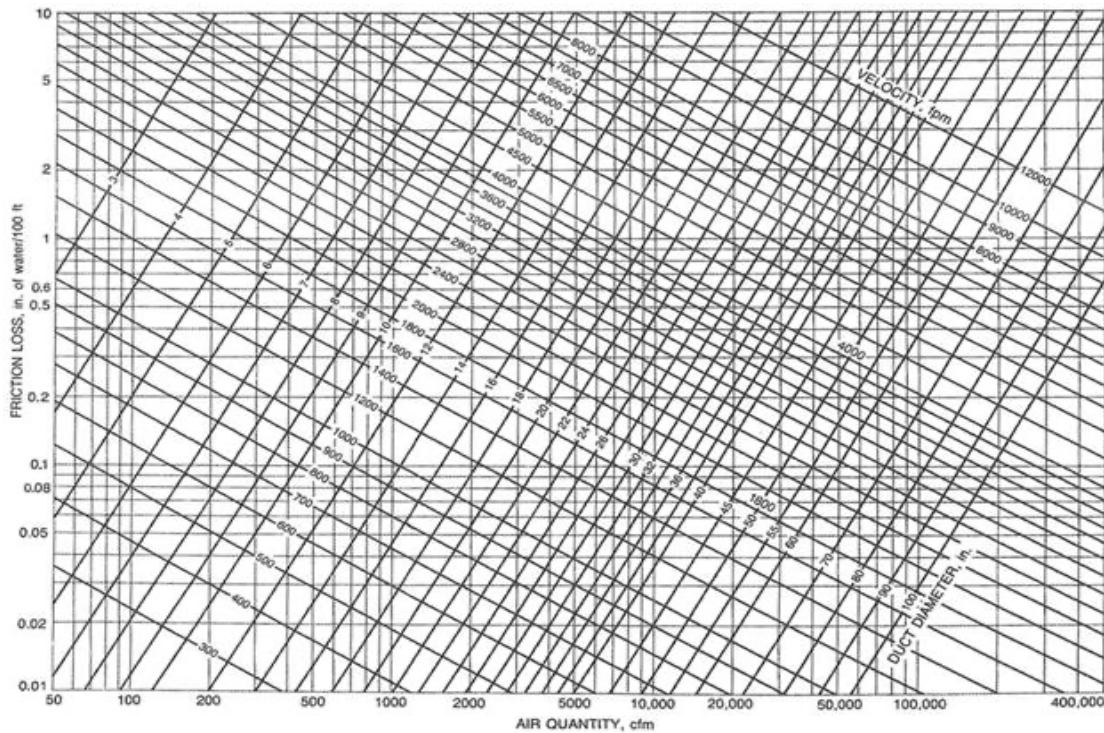
10/11/2018

Satwinder Singh

9

ภาพที่ 22 ภาพแสดงตาราง Circular Equivalents of Rectangular Ducts for Equal Friction and Capacity.

โครงการการศึกษาและพัฒนาหอฟอกอากาศอัจฉริยะ โดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์และระบบควบคุมดูแลผ่านเทคโนโลยีไอโอที เพื่อการลดฝุ่นละอองขนาดเล็ก (PM 2.5) ในพื้นที่สาธารณะ



ภาพที่ 23 Friction Loss with Air Quantity จาก [www.engineering1986.com](http://www.engineering1986.com)

การออกแบบท่อน้ำ

ตารางที่ 2 ตารางแสดงความเร็วที่เหมาะสมของน้ำในท่อส่วนต่างๆ (Carrier, 1965 ร่วมกับ Crane, 1985)

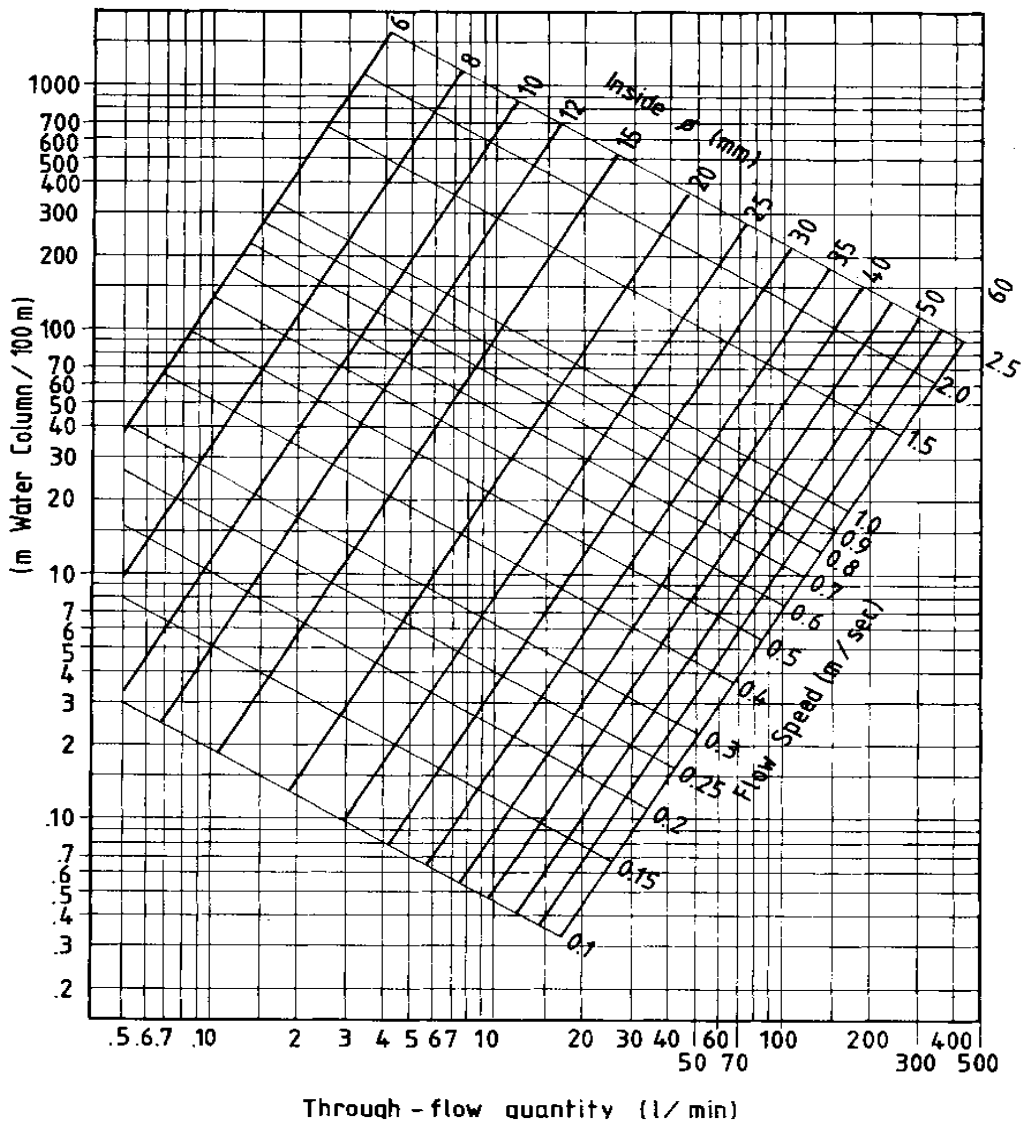
ประเภทของท่อและของไหล	ความเร็ว (m/s)
ท่อทางส่งของปั้มน้ำ	2.4 – 3.6
ท่อทางดูดของปั้มน้ำ	1.2 – 2.1
ท่อน้ำทิ้ง (Drain pipe)	1.2 – 2.1
ท่อร่วม (Header)	1.2 – 4.6
ท่อในเมนแนวดิ่ง (Riser)	0.9 – 3
ท่อน้ำทั่วไป	1.2 – 3
ท่อส่งน้ำประปา	0.9 – 2.1
ท่อเติมน้ำสำหรับหม้อไอน้ำ	2.5 – 4.6

โครงการการศึกษาและพัฒนาหอฟอกอากาศอัจฉริยะ โดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์และระบบควบคุมดูแลผ่านเทคโนโลยีไอโอที เพื่อการลดฝุ่นละอองขนาดเล็ก (PM 2.5) ในพื้นที่สาธารณะ

หากผู้ออกแบบไม่มีข้อกำหนดด้านความดันตก ให้ออกแบบโดยกำหนดความเร็วในท่อให้อยู่ในช่วงที่เหมาะสมตามตาราง แล้วจึงคำนวณความดันตกในท่อ กรณีนี้ใช้กับระบบท่อที่มีความยาวไม่มาก (เช่น ระยะทางรวมต่ำกว่า 50 เมตร)

ขั้นตอนการกำหนดขนาดท่อเป็นดังนี้

- หาอัตราการไหลในส่วนต่างๆของท่อ
- กำหนดขนาดท่อในส่วนต่าง ๆ ให้ความเร็วในการไหลอยู่ในช่วง 1.2 - 2.4 m/s
- คำนวณความดันตกจากความยาว ขนาดท่อ และอัตราการไหลในช่วงต่าง ๆ จากกราฟ



ภาพที่ 24 Water level and Flow speed with Flow Quantity

โครงการการศึกษาและพัฒนาหอฟอกอากาศอัจฉริยะ โดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์และระบบควบคุมดูแลผ่านเทคโนโลยีไอโอที เพื่อการลดฝุ่นละอองขนาดเล็ก (PM 2.5) ในพื้นที่สาธารณะ

### การออกแบบโครงสร้างหอฟอก

Wet Scrubber เป็นอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับกำจัดแก๊สและไอ รวมทั้งอนุภาคที่มีขนาดเล็ก โดยใช้ของเหลว เช่น น้ำ เป็นตัวดักจับ ด้วยการพ่นฉีดของเหลวให้เป็นละอองฝอยขนาดเล็ก ซึ่งจะกระจายไปปะทะกับกระแสแก๊ส ฝุ่นหรือไอ ทำให้มวลสารดังกล่าว ไม่สามารถหลุดไปสู่บรรยากาศได้

โดย Wet Scrubber มีด้วยกันหลายชนิดแต่ที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายคือ

สครับเบอร์แบบสเปรย์ (Spray Tower Scrubber) และ สครับเบอร์แบบมีเตียง (Packed Bed Scrubber)

โดยระบบ Wet Scrubber มีส่วนประกอบ หลักๆ ดังนี้

3.1 พัดลมดูดอากาศ (Exhaust Fan): ทำหน้าที่ดูดอากาศเสียเข้าสู่สครับเบอร์ (Scrubber)

3.2 เครื่องสูบน้ำหมุนเวียน (Circulation Pump): ทำหน้าที่ดูดน้ำจากถังหมุนเวียนน้ำไปฉีดเป็นละอองฝอยให้กระจายทั่วทั้งสครับเบอร์

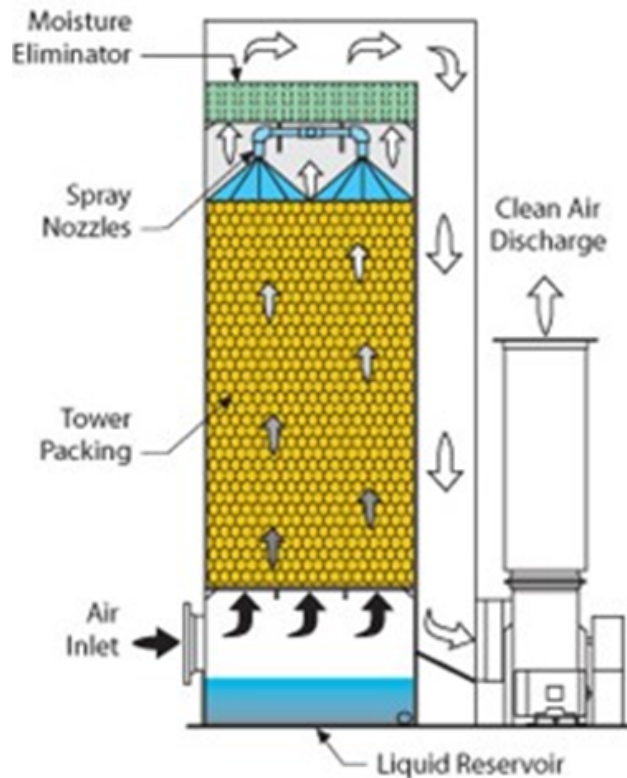
3.3 ตัวสครับเบอร์ (Scrubber Main Body) ประกอบไปด้วย

- ตัวเพิ่มพื้นที่ในการกระจายตัวของแก๊ส (Scrubber Tower Packing) ทำหน้าที่ในการช่วยเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างอนุภาคฝุ่นหรือก๊าซกับของเหลว
- หัวฉีดสเปรย์ (Spray nozzle) ทำหน้าที่ฉีดน้ำให้ทั่วถึงอย่างสม่ำเสมอภายในตัวสครับเบอร์ (Scrubber)
- ตัวดักจับละอองน้ำ (Mist Separator) ทำหน้าที่ดักจับละอองน้ำที่เกิดจากการฉีดสเปรย์ในสครับเบอร์ (Scrubber) ไม่ให้หลุดออกไปภายนอก

3.4 ถังหมุนเวียนน้ำ (Circulation Tank): ทำหน้าที่เก็บกักน้ำไว้สำหรับหมุนเวียนใช้ในระบบ

อ้างอิงจาก Life Safety & Environmental: ระบบบำบัดอากาศเสีย ด้วย Wet Scrubber ([safetyenvi.blogspot.com](http://safetyenvi.blogspot.com))

โครงการการศึกษาและพัฒนาหอฟอกอากาศอัจฉริยะ โดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์และระบบควบคุมดูแลผ่านเทคโนโลยีไอโอที เพื่อการลดฝุ่นละอองขนาดเล็ก (PM 2.5) ในพื้นที่สาธารณะ



ภาพที่ 25 รูปแสดงหอกำจัดฝุ่นแบบ counter flow

ในการออกแบบหอกำจัดฝุ่น ยังไม่มีทฤษฎีสำหรับการออกแบบโดยเฉพาะ จึงอาศัยการออกแบบของหอที่กำจัดไอ ก๊าซละลายน้ำ โดยค่าที่จำเป็นที่ต้องใช้ในการออกแบบมีดังนี้

1. อัตราส่วนของของเหลวต่อก๊าซ
2. ปริมาณของเหลวก๊าซออก
3. เส้นผ่านศูนย์กลางของหอบรรจุตัวกลาง
4. ความสูงของหอบรรจุตัวกลาง

ขั้นตอนการคำนวณ มีดังนี้

1. หาอัตราส่วนของของเหลวต่อก๊าซ โดยสูตรที่ใช้เป็นสูตรของการอนุรักษ์มวล คือ  
สูตรที่ใช้เป็นสูตรของการอนุรักษ์มวล คือ

$$G_m (Y_1 - Y_2) = L_m (X_2 - X_1)$$

เมื่อ  $G_m$  เป็นการไหลของก๊าซ (กรัมโมล/ชั่วโมง)

$L_m$  เป็นการไหลของของเหลว เช่น น้ำที่ใช้ดูดซับมลพิษในอากาศ (กรัมโมล/ชั่วโมง)

$Y_1$  = ความเข้มข้นของสารที่มีกลิ่นในก๊าซ เช่น 1,000 ส่วนในล้านหรือ ppm ก็จะเป็นสัดส่วน 0.001

โครงการการศึกษาและพัฒนาหอฟอกอากาศอัจฉริยะ โดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์และระบบควบคุมดูแลผ่านเทคโนโลยีไอโอที เพื่อการลดฝุ่นละอองขนาดเล็ก (PM 2.5) ในพื้นที่สาธารณะ

$Y_2$  = ความเข้มข้นของสารที่มีกลิ่นในก๊าซขาออก เช่น 10 ppm ก็จะเป็นสัดส่วน 0.00001 จะเห็นว่าเรากำหนดตรงนี้ได้ว่าจะให้ระบบมีประสิทธิภาพเท่าใดในการกำจัดสารที่มีกลิ่น

$X_2$  = สัดส่วนของสารที่มีกลิ่นในของเหลวขาออก คิดเป็นเศษส่วนของโมลของของเหลวทั้งหมด ต้องมีค่าไม่เกินความเป็นจริงเพราะของเหลวย่อมมีขีดจำกัดในการดูดซับสารเคมี ให้เปิดดู Solubility ของสารในของเหลวที่ใช้ โดยปกติเราจะให้ความเข้มข้นของสารในของเหลวที่ออกมาจากระบบบำบัดกลิ่นมีค่าต่ำ เพราะหากให้ค่าสูงมากเกินไป น้ำหรือของเหลวที่ใช้ก็จะน้อยไปและการสัมผัสระหว่างอากาศกับของเหลวจะไม่ได้ตามทฤษฎี

ในตัวอย่างนี้จะให้ความเข้มข้นของแอมโมเนียในน้ำมีสัดส่วน  $X_1$  เป็น 0.0018

คือน้ำ 1 ลิตรมีน้ำอยู่ 1,000/นน.โมลเลขคู่ น้ำ 18 = 1,000/18 = 55.5 โมล และในนี้มีแอมโมเนีย 0.1 โมล (1.7 กรัม ละลายอยู่) ดังนั้นสัดส่วน  $X_1 = 0.1/55.5 = 0.0018$

$X_1$  = สัดส่วนของสารที่มีกลิ่นในของเหลวขาเข้า คิดเหมือน  $X_1$  ข้างบน แต่โดยปกติ น้ำที่เข้ามาจะมีแอมโมเนียน้อยมาก

เช่น 0 กรัม ดังนั้น  $X_2$  มักเป็น 0 ยกเว้นกรณีที่มีการรีไซเคิลของเหลวหรือน้ำที่ใช้แล้วเพราะฉะนั้น ในตัวอย่างจะให้  $X_2$  มีสัดส่วนเทียบกับน้ำ = 0.000

ตัวอย่างข้างบนนี้จะได้  $G_m(0.001-0.00001) = L_m(0.0018 - 0)$

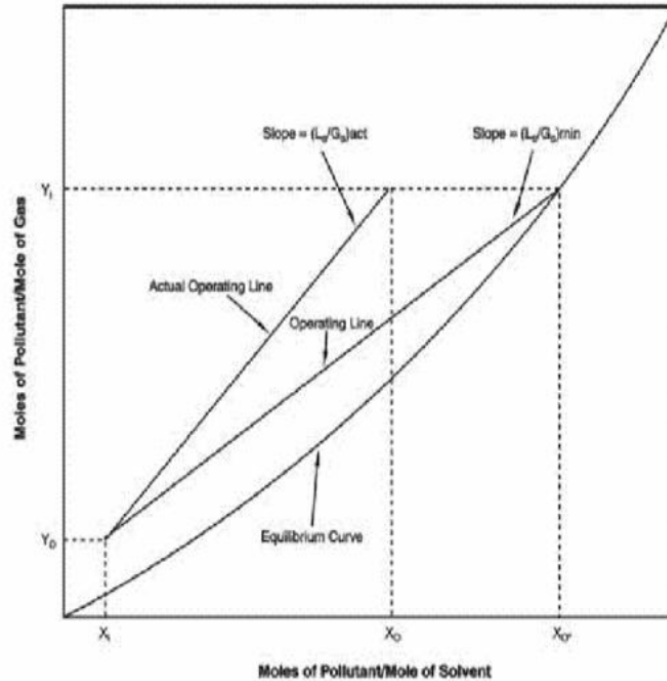
$G_m/L_m = 0.0018/0.00099 \sim$  ได้ประมาณ 1.8

กล่าวคือ อัตราส่วนของก๊าซจะมากกว่าน้ำ 1.8 เท่า (คิดเป็นโมล/โมล) แสดงให้เห็นความสัมพันธ์ระหว่างการละลายของสารที่มีกลิ่นใน

ของเหลวกับความเข้มข้นในอากาศแสดงในรูป และในการทำงานจริงจะต้องเพิ่มปริมาณของเหลวให้มากกว่าที่คำนวณดังแสดงใน Actual Operating Line ดังรูป

ความชันของกราฟนี้มีค่าวัดได้ เรียกว่า  $m$  จะนำไปใช้คำนวณความลึกของตัวกลางในภายหลัง

โครงการการศึกษาและพัฒนาหอฟอกอากาศอัจฉริยะ โดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์และระบบควบคุมดูแลผ่านเทคโนโลยีไอโอที เพื่อการลดฝุ่นละอองขนาดเล็ก (PM 2.5) ในพื้นที่สาธารณะ



รูปแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการละลายในของเหลวของสารที่มีกลิ่น (สกนหน) และความเข้มข้นของสารในอากาศ (สกนล)

ภาพที่ 26 รูปความสัมพันธ์ระหว่างการละลายในของเหลวของสารที่มีกลิ่น และความเข้มข้นของสารในอากาศ

## 2. การหาปริมาณของเหลวที่ต้องการ

ในการหาปริมาณของเหลวที่ต้องการนั้นจำเป็นต้องทราบข้อมูลปริมาณอากาศที่เข้าระบบ เช่น ตัวอย่างอากาศมีอัตราการไหล 10 ลูกบาศก์เมตรต่อนาทีซึ่งเป็นอากาศที่มีแอมโมเนียปนเปื้อนย่อมจะหาปริมาณของเหลวที่ต้องการวัด เพราะอากาศ 10 ลบ.เมตร/นาที มีน้ำหนักประมาณ 10 กก./นาที (อากาศมีน้ำหนักประมาณ 1 กก. ต่อ 1 ลบ.ม หรือ 2.2 ปอนด์ ต่อ 1 ลบ.ม) และอากาศ 1 โมล มีน้ำหนักโมเลกุลประมาณ 29 กรัม

อากาศ 10 กก./นาที =  $10,000/29 = 341$  โมล/นาที

สมมติให้แอมโมเนียเป็นสารที่ต้องการบำบัดกลิ่นและมีความเข้มข้น 1,000 ppm

แอมโมเนียที่มีในอากาศ =  $341 \times 1000 \times 10^{-6} = 0.341$  โมล/นาที (5.8 กรัม/นาที)

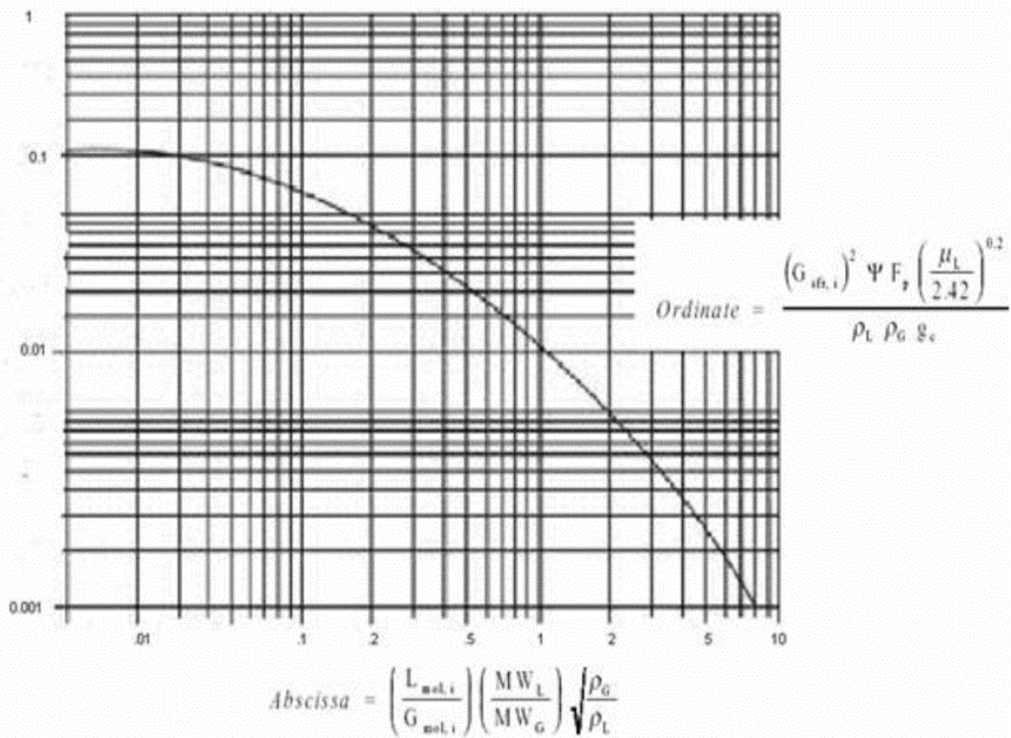
จากการคำนวณในข้อ 1)  $L_m = G_m / 1.8$

น้ำที่ต้องการ =  $341/1.8$  ประมาณ 190 โมล/นาที =  $190 \times 18 = 3,420$  กรัม/นาที = 3.42 ลิตร/นาที

## 3. เส้นผ่านศูนย์กลางของหอบรรจุตัวกลาง

โครงการการศึกษาและพัฒนาหอฟอกอากาศอัจฉริยะ โดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์และระบบควบคุมดูแลผ่านเทคโนโลยีไอโอที เพื่อการลดฝุ่นละอองขนาดเล็ก (PM 2.5) ในพื้นที่สาธารณะ

หอบรรจุตัวกลางจะมีผลต่อความเร็วของอากาศที่ไหลผ่าน หากหอกว้างมากไปอากาศจะไหลผ่านที่ความเร็วต่ำแม้จะบำบัดได้ดีแต่บำบัดมวลของสารที่ทำให้เกิดกลิ่นได้น้อยไม่คุ้มกับค่าที่ก่อสร้าง หากหอบแคบเกินไปความเร็วของอากาศจะสูงและจะดันน้ำที่ตกลงมาให้ย้อนขึ้นข้างบน ปกติแล้วค่าของเส้นผ่านศูนย์กลางหาได้จากกราฟข้างล่าง



ภาพที่ 27 ภาพแสดง Ordinate with Abscissa

เมื่อ  $F_p$  = Packing Factor ข้อมูลในตารางหรือได้ข้อมูลจากผู้ขายตัวกลาง

MW คือน้ำหนักโมเลกุลของของเหลว หรืออากาศ (ที่มีอักษร L) หรืออากาศ (G) เช่นน้ำ = 18  
อากาศ = 29

ค่า  $g$  เป็นค่าแรงโน้มถ่วงของโลก = 32.2 ฟุต/วินาที<sup>2</sup>

ค่า  $\mu$  เป็นความหนืดของของเหลว หน่วยเป็นปอนด์/ฟุต-ชั่วโมง

โดยปกติจะคำนวณค่าของแกนนอน (Abscissa) ดังสูตรในกราฟนี้ก่อน แล้วลากเส้นจากค่าที่ได้ขึ้นไปชนเส้นกราฟและหาค่าของแนวตั้ง (Ordinate) จะเห็นได้ว่าเราจะสามารถแทนค่าหา G ซึ่งเป็นอัตราการไหลของอากาศที่ผ่านสกรับเบอร์(หน่วยเป็นปอนด์ของอากาศ/วินาที-ตารางฟุตของผิวหน้าตัดของตัวกลางที่ปูวางในนั้น) จากนั้นหาพื้นที่หน้าตัดของถัง (A) ได้จาก

$$A = \frac{G_{mol,i} MW_G}{3,600 G_{sfr,i} f}$$

โครงการการศึกษาและพัฒนาหอฟอกอากาศอัจฉริยะ โดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์และระบบควบคุมดูแลผ่านเทคโนโลยีไอโอที เพื่อการลดฝุ่นละอองขนาดเล็ก (PM 2.5) ในพื้นที่สาธารณะ

เมื่อ  $G_{mol,i}$  เป็น Molecular Flow Rate หรืออัตราการไหลของอากาศที่เข้าระบบเป็นโมล/ชั่วโมง และ  $G_{sfr,i}$  คือค่า  $G$  ที่คำนวณได้ข้างบน

$f$  เป็น Flooding Factor มีค่า 0.60-0.75

ส่วน 3600 คือแปลงชั่วโมงกับวินาที

### ความสูงของหอบรรจุตัวกลาง

เมื่อได้เส้นผ่านศูนย์กลางของหอบรรจุตัวกลางแล้วจะต้องคำนวณความสูงของตัวกลางที่เหมาะสมโดยต้องทราบข้อมูลว่าความสูงสำหรับตัวกลางประเภทต่างๆควรเป็นเท่าใด เพราะเป็นข้อมูลที่ได้จากการทดลอง ดังนี้

กลี้นและสารละลายที่ใช้ดูดซับ

HCl (ก๊าซ) H<sub>2</sub>O (น้ำ) ความสูง 0.18-0.34 เมตร

Cl<sub>2</sub> (ก๊าซ) NaOH (ในน้ำ) ความสูง 0.24-0.37 เมตร

NH<sub>3</sub> (ก๊าซ) H<sub>2</sub>O (น้ำ) ความสูง 0.09-0.21 เมตร

OH (ก๊าซ) H<sub>2</sub>O (น้ำ) ความสูง 0.24-0.39 เมตร

H<sub>2</sub>S (ก๊าซ) NaOH (ในน้ำ) ความสูง 0.24-0.39 เมตร

NH<sub>3</sub> (ก๊าซ) H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> (ในน้ำ) ความสูง 0.09-0.16 เมตร

ความสูงข้างบนนี้เป็นเพียงความสูง 1 หน่วยของที่เรียกกันว่า Transfer Unit เท่านั้น ระบบจะทำงานได้ดี ต้องมีหลาย Transfer Unit ซึ่งเรียกว่าจำนวน Transfer Unit นี้ว่า NTU ค่า NTU นี้หาจาก

$$N_{TU} = \frac{\ln \left[ \left( \frac{y_i - mx_i}{y_0 - mx_0} \right) \left( 1 - \frac{1}{AF} \right) + \frac{1}{AF} \right]}{1 - \frac{1}{AF}}$$

$y_1$  = ความเข้มข้นของสารที่มีกลี้นในก๊าซขาเข้า เช่น 1,000 ส่วนในล้านหรือ ppm ก็จะเป็นสัดส่วน 0.001

$y_0$  = ความเข้มข้นของสารที่มีกลี้นในก๊าซขาออก เช่น 10 ppm ก็จะเป็นสัดส่วน 0.00001

จะเห็นว่าเรากำหนดตรงนี้ได้ว่าจะให้ระบบมีประสิทธิภาพเท่าใดในการกำจัดสารที่มีกลี้น

$$AF = \frac{L_{mol,i}}{mG_{mol,i}}$$

โครงการการศึกษาและพัฒนาหอฟอกอากาศอัจฉริยะ โดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์และระบบควบคุมดูแลผ่านเทคโนโลยีไอโอที เพื่อการลดฝุ่นละอองขนาดเล็ก (PM 2.5) ในพื้นที่สาธารณะ

เมื่อ  $L_{mol,i}$  และ  $G_{mol,i}$  เป็น Molecular Flow Rate หรืออัตราการไหลของของเหลวและอากาศที่เข้าระบบเป็นโมล/ชั่วโมง ตามลำดับ ซึ่งค่า  $m$  ที่ใกล้จุดสมดุลมีค่าใกล้ 0 ดังนั้น จะเห็นได้ว่า ค่า NTU มีค่า  $\ln y_1/y_0$  โดยประมาณ

ค่าความสูงของหอบรรจุตัวกลาง = NTU x ความสูงของ 1 Transfer Unit

เมื่อคำนวณได้ค่าดังกล่าวแล้วก็จะได้ค่าในการออกแบบครบถ้วน ส่วนความดันลดในระบบนั้นควรได้จากผู้ขายตัวกลางปกติประมาณ 0.5-1 นิ้วน้ำต่อความหนาของตัวกลาง 1 ฟุตในการใช้งานทั่วไป

ตารางที่ 3 ตารางค่า Packing Factors สำหรับตัวกลางแต่ละชนิด

Packing Type	Construction Level	Nominal Diameter (inches)	Fp	a
Raschig rings	Ceramic	1/2	640	111
		5/8	380	100
		3/4	255	80
		1	160	58
		1 1/2	95	38
		2	65	28
		3	37	
Raschig rings	Metal	1/2	410	118
		5/8	290	
		3/4	230	72
		1	137	57
		1 1/2	83	41
		2	57	31
		3	32	21
Pall rings	Metal	5/8	70	131
		1	48	66
		1 1/2	28	48
		2	20	36
		3 1/2	16	
Pall rings	polypropylene	5/8	97	110

โครงการการศึกษาและพัฒนาหอฟอกอากาศอัจฉริยะ โดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์และระบบควบคุมดูแลผ่านเทคโนโลยีไอโอที เพื่อการลดฝุ่นละอองขนาดเล็ก (PM 2.5) ในพื้นที่สาธารณะ

		1	52	63
		1 ½	32	39
		2	25	31
Bert saddles	ceramic	½	240	142
		¾	170	82
		1	110	76
		1 ½	65	44
		2	45	32
Intalox saddles	ceramic	½	200	190
		¾	145	102
		1	98	78
		1 ½	52	60
		2	40	36
		3	22	
Tri-packs	plastic	2	16	48
		3 ½	12	38

จาก <https://www.teeraindustry.com/scrubber>

#### การคำนวณและออกแบบตัวหอต้นแบบ

##### 1. การออกแบบท่อลม

ให้ขนาดของสถานีผู้โดยสารรถประจำทาง =  $6*2*2.5 \text{ m}^3$  และเป็นพื้นที่กึ่งปิด

จากตาราง พิจารณาเสมือนเป็นซูบเปอร์มาร์เก็ตดังนั้นใช้อัตราหมุนเวียนอากาศ = 2 รอบต่อชั่วโมง ตามกฎกระทรวง

ดังนั้นอัตราการไหลของอากาศ = อัตราการหมุนเวียนอากาศ x ปริมาตร =  $6*2*2.5*2 = 60$

ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง = 35.31 ลูกบาศก์ฟุตต่อนาที = 16.67 ลิตรต่อวินาที

มาจากเอกสาร HVAC - How to Size and Design Ducts

เลือกความเร็วตามที่แนะนำ = 1,300 ฟุตต่อนาที ระบบความเร็วต่ำ

พื้นที่หน้าตัดท่อลมที่ใช้ในกรณีนี้ =  $35.31 \text{ ลูกบาศก์ฟุตต่อนาที} \div \text{หาร } 1,300 \text{ ฟุตต่อนาที} = 0.027$

ตารางฟุต

จะได้เส้นผ่านศูนย์กลางของท่อลม =  $\sqrt{(0.027*4/\pi)} = 0.185 \text{ ฟุต} = 2.22 \text{ นิ้ว}$

โครงการการศึกษาและพัฒนาหอฟอกอากาศอัจฉริยะ โดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์และระบบควบคุมดูแลผ่านเทคโนโลยีไอโอที เพื่อการลดฝุ่นละอองขนาดเล็ก (PM 2.5) ในพื้นที่สาธารณะ

จากตารางที่ 3 ขนาดท่อลมสี่เหลี่ยมเทียบเท่ากับท่อกลม ดังนั้นเลือกขนาดท่อลมสี่เหลี่ยมขนาด = 6 นิ้ว x 6 นิ้ว และความสูญเสียเนื่องจากแรงเสียดทานในท่อลม 0.1 นิ้วน้ำต่อความยาวท่อลม 100 ฟุต จากการออกแบบมีอัตราการไหล 35.31 ลูกบาศก์ฟุตต่อนาที และพิจารณาปัจจัยความปลอดภัย(ค่าเผื่อ)ในการออกแบบ = 3 จะได้ อัตราการไหล = 35.31 x 3 = 105.91 ลูกบาศก์ฟุตต่อนาที ดังนั้นจึงเลือกพัดลมที่สร้างอัตราการไหล 110 ลูกบาศก์ฟุตต่อนาที ความดันสูญเสีย = 0.08 นิ้วน้ำ โดยความยาวท่อลม = 80 ฟุต ความดันสูญเสีย = 0.1 x 80/100 = 0.08 นิ้วน้ำ

กำลังไฟฟ้า 1 แรงม้าเพื่อให้สอดคล้องกับอัตราการไหลและความดันสูญเสีย

2. การออกแบบท่อน้ำและปริมาณน้ำที่ใช้

**ตารางที่ 4 ตารางแสดงความเร็วของของไหลในท่อที่แนะนำ**

ของไหล	ความเร็ว (เมตรต่อนาที)
น้ำ	0.9 - 2.4
คาร์บอนเตตระคลอไรด์	1.8
คลอรีน, ของเหลว	1.5
เอทาลีนไกลคอล	1.8
กรดไฮโดรคลอริก	1.5
น้ำมันหล่อลื่น	1.5
กรดซัลฟูริก	1.2

จาก <https://www.michael-smith-engineers.co.uk/resources/useful-info/pipe-velocity>

อ้างอิงจกตาราง ความเร็วน้ำตามที่แนะนำ = 1.2 เมตรต่อนาที

มวลโมเลกุลของอากาศ = 29 กรัม ความหนาแน่นของอากาศ = 1.2 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร

อัตราการไหลของอากาศ = 60 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง = 72 กิโลกรัมต่อชั่วโมง = 72,000 / (29\*60) = 41.379 โมลต่อนาที

อัตราการไหลของน้ำ = 41.379 โมลต่อนาที = 41.379 x 18 กรัม = 744.822 กรัมต่อนาที, มวล

โมเลกุลของน้ำ = 18 กรัม, ความหนาแน่นของน้ำ = 1 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร

อัตราการไหลของน้ำ = 744.822 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที = 0.74 ลิตรต่อนาที (1 ลิตร = 1000 ลูกบาศก์เซนติเมตร)

โครงการการศึกษาและพัฒนาหอฟอกอากาศอัจฉริยะ โดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์และระบบควบคุมดูแลผ่านเทคโนโลยีไอโอที เพื่อการลดฝุ่นละอองขนาดเล็ก (PM 2.5) ในพื้นที่สาธารณะ

เลือกท่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง = 3/4" ความดันสูญเสีย = 1 เมตรต่อ 100 เมตร หรือ 1 ฟุตต่อ 100 ฟุต ความยาวท่อ 10 เมตร

เลือกปั๊มที่สร้างอัตราการไหลอย่างน้อย = 1 แกลลอนต่อนาที ความดันสูญเสีย = 0.1 เมตร กำลังไฟฟ้า = 1 แรงม้า

จากการออกแบบให้ระบบทำงาน 12 ชั่วโมงต่อวัน โดย 1 ชั่วโมงใช้น้ำ =  $0.74 \times 60 = 44.4$  ลิตร

จะสามารถคำนวณถังเก็บน้ำ 12 ชั่วโมง =  $0.74$  ลิตรต่อนาที  $\times 60$  นาที  $\times 12$  ชั่วโมง = 532.8 ลิตร

ใช้ถัง = กว้าง  $\times$  ยาว  $\times$  สูง =  $0.75 \times 0.75 \times 1$  เมตร = 562.5 ลิตร

### 3. คำนวณขนาดของหอฟอก

#### 3.1 อัตราส่วนน้ำต่ออากาศ

จาก

$$Gm(Y_0 - Y_1) = Lm(X_1 - X_0)$$

$Y_0 = 200$  ส่วนในล้านส่วน

$Y_1 = 0$  ส่วนในล้านส่วน

$X_0 = 0$  ส่วนในล้านส่วน

$X_1 = 200$  ส่วนในล้านส่วน

ดังนั้น

$$Gm(200 - 0) = Lm(200 - 0)$$

$$\frac{Gm}{Lm} = 1$$

#### 3.2 เส้นผ่านศูนย์กลางของหอ

$$abscissa = \left( \frac{L_{mol,i}}{G_{mol,i}} \right) \left( \frac{MW_L}{MW_G} \right) \sqrt{\left( \frac{\rho_G}{\rho_L} \right)}$$

$$L_{mol,i} = G_{mol,i}$$

มวลโมเลกุลของอากาศ  $MW_G = 29$  กรัม

โมเลกุลของน้ำ  $MW_L = 18$  กรัม

ความหนาแน่นของอากาศ  $\rho_G = 1.2754$  กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร

ความหนาแน่นของน้ำ  $\rho_L = 1000$  กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร

โครงการการศึกษาและพัฒนาหอฟอกอากาศอัจฉริยะ โดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์และระบบควบคุมดูแลผ่านเทคโนโลยีไอโอที เพื่อการลดฝุ่นละอองขนาดเล็ก (PM 2.5) ในพื้นที่สาธารณะ

$$abscissa = (1) \left(\frac{18}{29}\right) \sqrt{\left(\frac{1.2754}{1000}\right)}$$

$$abscissa = 1 \times 0.621 \times 0.036$$

$$abscissa = 0.022$$

จากภาพแสดง Ordinate with Abscissa ที่ ordinate = 0.1

$$Ordinate = \frac{(G_{sfr,i})^2 \psi F_P \left(\frac{\mu_L}{2.42}\right)^{0.2}}{\rho_L \rho_G g_c}$$

$$G_{sfr,i} = \left[ \frac{\rho_L \rho_G g_c (ordinate)}{F_P \psi \left(\frac{\mu_L}{2.42}\right)^{0.2}} \right]^{0.5}$$

อัตราส่วนของความหนาแน่นของของเหลวที่ใช้กำจัดต่อน้ำ  $\Psi = 1$  เนื่องจากใช้น้ำกำจัด สนามโน้มถ่วงของโลก  $g_c = 32.2$  ฟุตต่อวินาทีกำลังสอง, ความหนาแน่นของน้ำ  $\rho_L = 62.42$  ปอนด์ต่อลูกบาศก์ฟุต, ความหนาแน่นของอากาศ  $\rho_G = 0.079$  ปอนด์ต่อลูกบาศก์ฟุต,  $F_P = 1$ , ความหนืดของน้ำ  $\mu_L = 2.153$  ปอนด์ต่อฟุต-ชั่วโมง

$$G_{sfr,i} = \left[ \frac{62.42 \times 0.079 \times 32.2 \times 0.1}{1 \times 1 \times \left(\frac{2.153}{2.42}\right)^{0.2}} \right]^{0.5}$$

$$G_{sfr,i} = 4.03$$

$$A = \frac{G_{mol,i} MW_G}{3,600 G_{sfr,i} f}$$

$G_{mol,i} = 72,000$  กรัมต่อชั่วโมง/29 กรัม = 2,482 โมลต่อชั่วโมง

มวลโมเลกุลของอากาศ  $MW_G = 29$  กรัม flooding factor  $f = 0.75$

$$A = \frac{2482 \times 29}{3,600 \times 4.03 \times 0.75}$$

พื้นที่  $A = 6.615$  ตารางฟุต =  $6.615 \times 0.0929 = 0.614$  ตารางเมตร

จะได้ความกว้างถึง  $L = 0.78$  เมตร แต่จะทำการเป็นถึงหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสจึงเลือกให้มีความกว้าง 0.8 เมตร

โครงการการศึกษาและพัฒนาหอฟอกอากาศอัจฉริยะ โดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์และระบบควบคุมดูแลผ่านเทคโนโลยีไอโอที เพื่อการลดฝุ่นละอองขนาดเล็ก (PM 2.5) ในพื้นที่สาธารณะ

จะได้พื้นที่หน้าตัด  $0.8 \times 0.8 = 0.64$  ตารางเมตร ซึ่งมากกว่าที่ได้จากการคำนวณ ดังนั้นถึงที่จะใช้จะมีขนาด ความกว้าง  $\times$  ความยาว =  $0.8 \times 0.8$  เมตร $\times$ เมตร

### 3.3 ความสูงของหอ

$$N_{TU} = \frac{\ln\left[\left(\frac{y_1 - mx_1}{y_0 - mx_0}\right)\left(1 - \frac{1}{AF}\right) + \frac{1}{AF}\right]}{1 - \frac{1}{AF}}$$

Absorption Factor  $AF = \frac{L_{mol,i}}{mG_{mol,i}}$

m คือ the slope of the equilibrium line ซึ่งน้อยมาก m เข้าใกล้ 0 และ AF จะเข้าใกล้  $\infty$

$$N_{TU} = \ln \frac{y_1}{y_0} = \frac{\log \frac{y_1}{y_0}}{\log e} = \frac{\log \frac{200}{1}}{0.4343}$$

$$N_{TU} = 5.298$$

จากข้อมูลความสูงของหอสำหรับตัวกลางต่าง ๆ มีค่าระหว่าง 0.09 – 0.39 เมตร

$$H = N_{TU} \times TU$$

เลือกใช้ TU = 0.4

$$H = 5.298 \times 0.4$$

$$H = 2.119$$

ดังนั้น จากคำนวณ H=2.119 ความสูงหอฟอกที่จะออกแบบคือ 2.5 เมตร

### 3.4 ขนาดของหยดน้ำ

ขนาดของหัวฉีดที่เล็กที่สุดที่ขาย คือ  $D = \frac{1}{8}$ " ซึ่งจะได้ขนาดละอองน้ำ 50 – 110 ไมครอน ซึ่งกรณี ใช้ packed bed เพิ่ม

$$abscissa = (1) \left(\frac{18}{29}\right) \sqrt{\left(\frac{1.2754}{1000}\right)}$$

$$abscissa = 1 \times 0.621 \times 0.036$$

$$abscissa = 0.022$$

จากภาพแสดง Ordinate with Abscissa ที่ ordinate = 0.1

โครงการการศึกษาและพัฒนาหอฟอกอากาศอัจฉริยะ โดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์และระบบควบคุมดูแลผ่านเทคโนโลยีไอโอที เพื่อการลดฝุ่นละอองขนาดเล็ก (PM 2.5) ในพื้นที่สาธารณะ

$$\text{Ordinate} = \frac{(G_{sfr,i})^2 \psi F_P \left(\frac{\mu_L}{2.42}\right)^{0.2}}{\rho_L \rho_G g_c}$$

$$G_{sfr,i} = \left[ \frac{\rho_L \rho_G g_c (\text{ordinate})}{F_P \psi \left(\frac{\mu_L}{2.42}\right)^{0.2}} \right]^{0.5}$$

อัตราส่วนของความหนาแน่นของของเหลวที่ใช้กำจัดต่อน้ำ  $\Psi = 1$  เนื่องจากใช้น้ำกำจัด สนามโน้มถ่วงของโลก  $g_c = 32.2$  ฟุตต่อวินาทีกำลังสอง, ความหนาแน่นของน้ำ  $\rho_L = 62.42$  ปอนด์ต่อลูกบาศก์ฟุต, ความหนาแน่นของอากาศ  $\rho_G = 0.079$  ปอนด์ต่อลูกบาศก์ฟุต,  $F_P = 25$ , ความหนืดของน้ำ  $\mu_L = 2.153$  ปอนด์ต่อฟุต-ชั่วโมง

$$G_{sfr,i} = \left[ \frac{62.42 \times 0.079 \times 32.2 \times 0.1}{25 \times 1 \times \left(\frac{2.153}{2.42}\right)^{0.2}} \right]^{0.5}$$

$$G_{sfr,i} = 0.806$$

$$A = \frac{G_{mol,i} MW_G}{3,600 G_{sfr,i} f}$$

$G_{mol,i} = 72,000$  กรัมต่อชั่วโมง/29 กรัม = 2,482 โมลต่อชั่วโมง มวลโมเลกุลของอากาศ

$MW_G = 29$  กรัม flooding factor  $f = 0.75$

$$A = \frac{2482 \times 29}{3,600 \times 0.806 \times 0.75}$$

พื้นที่  $A = 33.075$  ตารางฟุต  $= 33.075 \times 0.0929 = 3.072$  ตารางเมตร

ดังนั้นการใส่ packed bed จะทำให้มีพื้นที่ผิวสัมผัสเพิ่มขึ้นมากกว่าไม่ใส่ packed bed ประมาณ 4

เท่า  $\left( \frac{3.072}{0.64} \right)$

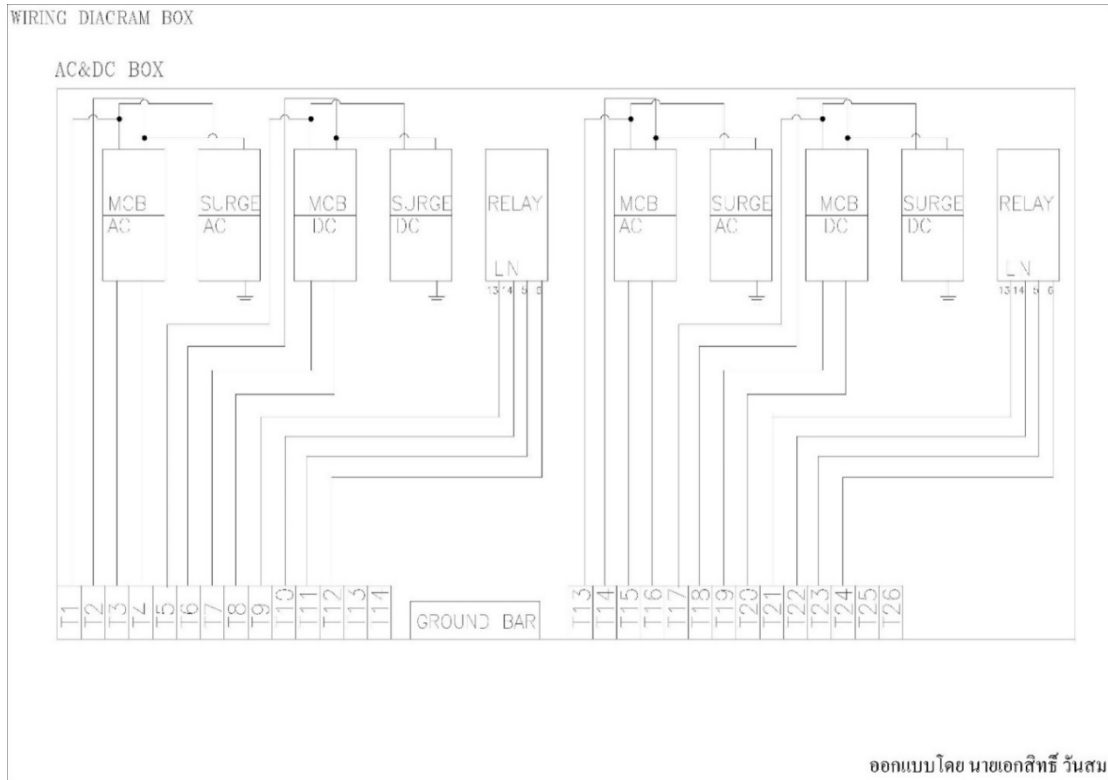
ซึ่งรายละเอียดและแบบร่างของหอฟอกสามารถดูได้ที่ภาคผนวก ก

### การออกแบบระบบพลังงานแสงอาทิตย์

การออกแบบระบบพลังงานแสงอาทิตย์หรือระบบโซลาร์เซลล์เพื่อใช้กับหอฟอกอากาศ ทางผู้วิจัยได้เลือกใช้อินเวอร์เตอร์ที่เป็นระบบนวัตกรรมไทยเพื่อให้รองรับการจ่ายไฟฟ้าทั้งจากใช้ไฟฟ้าที่ผลิตจากแสงแดดหรือไฟฟ้าจากริดของการไฟฟ้า hybrid inverter และหรือให้เกิดการผสมไฟฟ้าจาก

โครงการการศึกษาและพัฒนาหอฟอกอากาศอัจฉริยะ โดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์และระบบควบคุมดูแลผ่านเทคโนโลยีไอโอที เพื่อการลดฝุ่นละอองขนาดเล็ก (PM 2.5) ในพื้นที่สาธารณะ

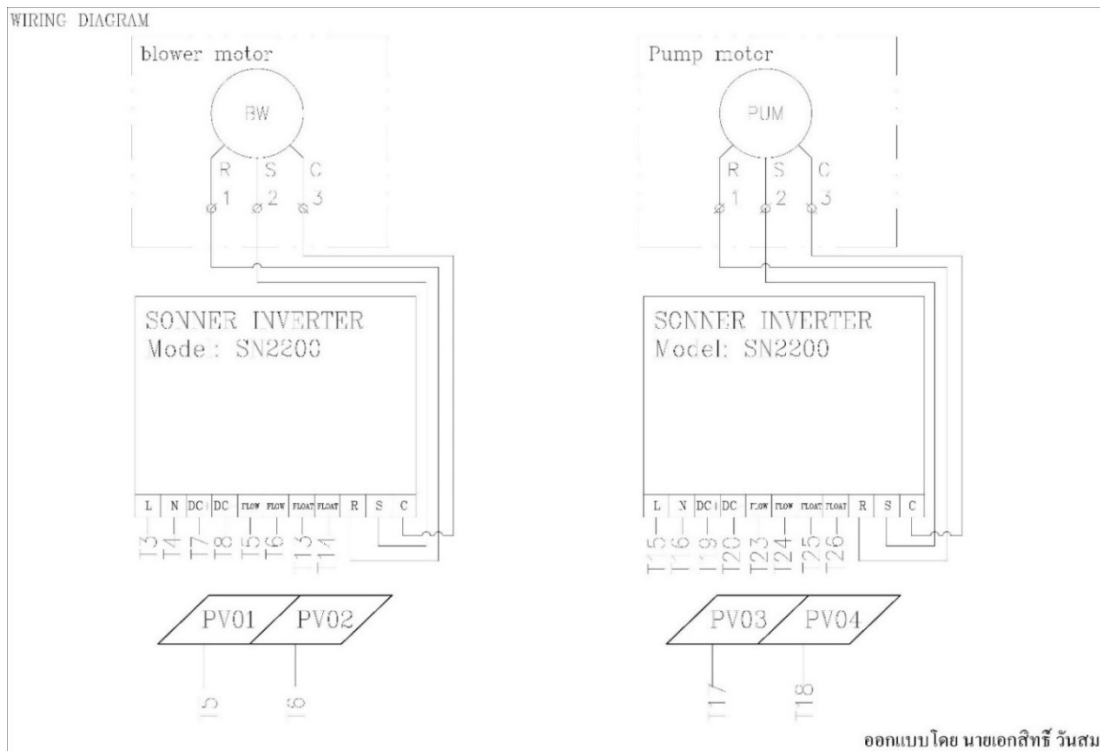
แหล่งจ่ายจากทั้ง2แหล่งพร้อมกัน hybrid co-working mode เพื่อให้เหมาะกับการนำหอฟอกไปใช้ติดตั้งในสถานที่ต่างๆและให้เกิดการประหยัดการใช้พลังงานของหอฟอกอากาศสูงสุด



ภาพที่ 28 WIRING DIAGRAM BOX สำหรับตู้ไฟฟ้า AC/DC

การออกแบบระบบจ่ายไฟฟ้ากำลังให้กับปั๊มลมและปั๊มน้ำให้กับหอฟอกอากาศ เนื่องจากปั๊มลมและปั๊มน้ำที่เลือกใช้มีขนาด แรงม้า 1 แรงม้า หรือ 745.7วัตต์ เราจึงออกแบบให้แผงโซลาร์เซลล์มีกำลังผลิตไฟฟ้ากระแสตรงไว้ 1,200วัตต์ จากแผงรุ่นใหม่ขนาด 600วัตต์ 2 แผงเพื่อรองรับค่าการสูญเสียกำลังไฟฟ้าต่างๆในระบบ

โครงการการศึกษาและพัฒนาหอฟอกอากาศอัจฉริยะ โดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์และระบบควบคุมดูแลผ่านเทคโนโลยีไอโอที เพื่อการลดฝุ่นละอองขนาดเล็ก (PM 2.5) ในพื้นที่สาธารณะ



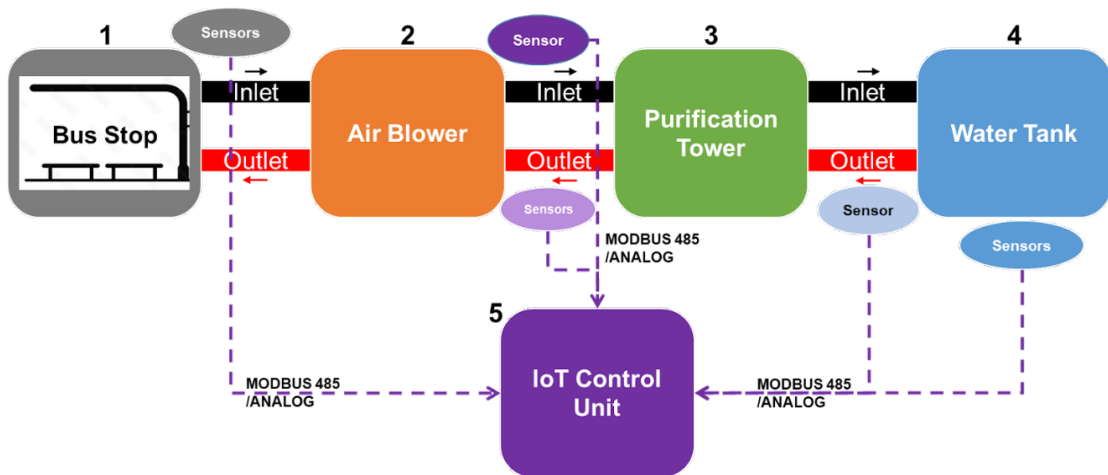
ภาพที่ 29 WIRING DIAGRAM สำหรับต่อระบบปั๊มลมและปั๊มน้ำ เข้ากับระบบจ่ายไฟฟ้าแบบไฮบริด Solar Hybrid System

ซึ่งรายละเอียดของระบบพลังงานแสงอาทิตย์สามารถดูได้ที่ ภาคผนวก ข

### การออกแบบระบบไอโอที (IoT) สำหรับควบคุมหอฟอกอากาศอัจฉริยะ

ระบบไอโอที (IoT) สำหรับควบคุมหอฟอกอากาศอัจฉริยะ มีวัตถุประสงค์เพื่อตรวจจับประสิทธิภาพการทำงานของแต่ละอุปกรณ์ในหอฟอก อาทิเช่น Air blower มีการใช้เซ็นเซอร์วัดการไหลของลมในท่อ, ในถังเก็บน้ำมีการใช้เซ็นเซอร์วัดระดับน้ำและตำแหน่งท่อต่อขาเข้าจากถังเก็บน้ำเข้าไปยังหอฟอก มีเซ็นเซอร์วัดอัตราการไหลของน้ำ เป็นต้น โดยอุปกรณ์ทั้งหมดจะส่งข้อมูลไปหา IoT control unit เพื่อส่งข้อมูลออกไปยัง platform สำหรับการ monitoring การทำงานของระบบหอฟอก โดยระบบ IoT ดังกล่าวจะใช้การสื่อสารผ่าน protocol Modbus RTU/TCP

โครงการการศึกษาและพัฒนาหอฟอกอากาศอัจฉริยะ โดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์และระบบควบคุมดูแลผ่านเทคโนโลยีไอโอที เพื่อการลดฝุ่นละอองขนาดเล็ก (PM 2.5) ในพื้นที่สาธารณะ



ภาพที่ 30 แผนภาพแสดงสถาปัตยกรรมของระบบ IoT ของหอฟอกจะแสดงส่วนประกอบหลักของการออกแบบทั้งหมด

การออกแบบและติดตั้งเซ็นเซอร์เพื่อวัดประสิทธิภาพการทำงานภายในหอฟอก

**จุดที่ 1** บริเวณป้ายรถโดยสารประจำทาง จะประกอบไปด้วยเซ็นเซอร์วัดความเร็วลม (Anemometer), เซ็นเซอร์วัดฝุ่นละอองขนาดเล็ก (PM2.5), เซ็นเซอร์วัดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO2 sensor), เซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิและความชื้นอากาศ (Temp-Humid sensor) ขาเข้าก่อนจะส่งผ่าน Air blower เข้า tower (inlet 1 กับ 2)

**จุดที่ 2** บริเวณ Air blower จะประกอบไปด้วยเซ็นเซอร์วัดการไหลของอากาศ (Air Flow sensor) ขาเข้าก่อนจะส่งผ่านอากาศไปยังหอฟอกอากาศ (inlet ระหว่าง 2 กับ 3) และเซ็นเซอร์วัดฝุ่นละอองขนาดเล็ก (PM2.5), เซ็นเซอร์วัดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO2 sensor), เซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิและความชื้นอากาศ (Temp-Humid sensor) ขาออกจาก tower (outlet 2 กับ 3)

**จุดที่ 3** บริเวณหอฟอกฯ จะประกอบไปด้วยเซ็นเซอร์วัดอัตราการไหลของน้ำ (water flow sensor) ขาออกจากถังเก็บน้ำกลับมาสู่ tower (outlet 3 กับ 4)

**จุดที่ 4** บริเวณถังเก็บน้ำ จะประกอบไปด้วยเซ็นเซอร์วัดความสามารถในการนำกระแสไฟฟ้าในน้ำ (EC/TDS sensor), เซ็นเซอร์วัดความเป็นกรด-ด่างของน้ำ (pH sensor), เซ็นเซอร์วัดระดับของเหลว (Liquid level sensor) ซึ่งรายละเอียดของเซ็นเซอร์ทั้งหมดสามารถดูได้ที่ภาคผนวก ค

การรับส่งข้อมูลระหว่างเซ็นเซอร์และส่วนควบคุม

โปรโตคอลการสื่อสาร I2C

โครงการการศึกษาและพัฒนาหอฟอกอากาศอัจฉริยะ โดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์และระบบควบคุมดูแลผ่านเทคโนโลยีไอโอที เพื่อการลดฝุ่นละอองขนาดเล็ก (PM 2.5) ในพื้นที่สาธารณะ

I2C ย่อมาจาก Inter-Integrated Circuit คือรูปแบบการสื่อสารข้อมูลอย่างหนึ่งที่สร้างขึ้นมาเพื่อสื่อสารข้อมูลความเร็วต่ำ นิยมใช้กับอุปกรณ์จำพวกไมโครโพรเซสเซอร์ ไมโครคอนโทรลเลอร์และอุปกรณ์ต่างๆที่เกี่ยวข้อง I2C ถูกคิดค้นขึ้นมาในปี ค.ศ. 1982 โดย Philip semiconductor (ปัจจุบันเปลี่ยนชื่อเป็น NXP semiconductor) ข้อดีของการสื่อสารอนุกรมแบบ I2C คือ สามารถรับ-ส่งข้อมูลได้หลายอุปกรณ์ในบัสเดียวกัน ดังรูป การเชื่อมต่อระบบด้วยการสื่อสารอนุกรมแบบ I2C และใช้สายสัญญาณเพียง 2 เส้นในการรับส่ง-ข้อมูล ทำให้สามารถลดสายสัญญาณที่ใช้ในการเชื่อมต่ออุปกรณ์ลงมาก โดยสายสัญญาณทั้ง 2 เส้นแบ่งเป็น

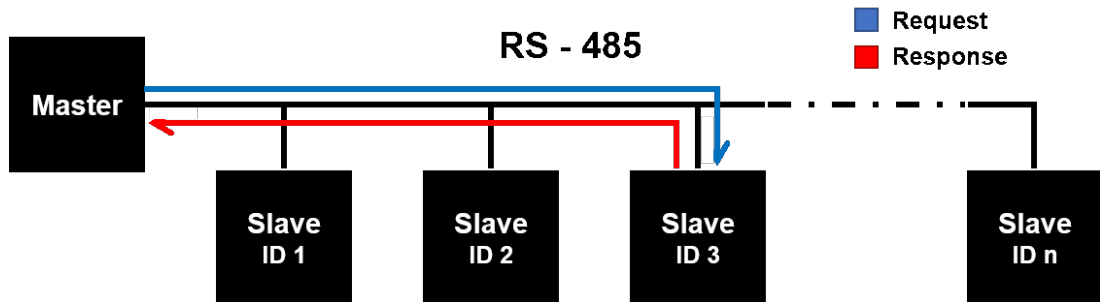
- SDA (Serial Data) คือ สายสัญญาณสำหรับรับ-ส่งข้อมูล
- SCL (Serial Clock) คือ สายสัญญาณนาฬิกา ใช้เป็นสำหรับควบคุมการรับ-ส่งข้อมูล

### โปรโตคอลการสื่อสาร Modbus

การสื่อสารตามมาตรฐาน Modbus เป็นหนึ่งในมาตรฐานการสื่อสารแบบอนุกรม (Serial Communications protocol) ที่ใช้งานอย่างแพร่หลายในระบบอัตโนมัติอุตสาหกรรม (Industrial Automation Systems : IAS) เพื่อสร้างการเชื่อมโยงข้อมูลระหว่างอุปกรณ์ต่างๆ เช่น อุปกรณ์ควบคุมพีแอลซี (Programmable Logic Controllers : PLC) อุปกรณ์ตรวจวัด (Sensor) อุปกรณ์เครื่องกล อุปกรณ์ขับเคลื่อน (Actuator) หน่วยตรวจวัดระยะไกล (Remote Terminal Unit : RTU) รวมถึงระบบคอมพิวเตอร์ที่ใช้ในการควบคุมและแสดงสถานะของอุปกรณ์ต่างๆ (Supervisory control and Data acquisition : SCADA) ในปัจจุบันนี้การสื่อสารสามารถแบ่งได้เป็น 2 ระบบคือ Modbus RTU และ Modbus TCP โดยความแตกต่างอยู่ที่โปรโตคอลการสื่อสารที่ใช้ ซึ่งในระบบ Modbus RTU จะใช้โปรโตคอลการสื่อสารแบบอนุกรม (Serial-based Protocol) ในขณะที่ระบบ Modbus TCP จะใช้โปรโตคอลการสื่อสารแบบอีเทอร์เน็ต (Ethernet-based Protocol) ซึ่งทั้งสองแบบจะแตกต่างกันตรงที่ความเร็วและระยะทางในการรับส่งข้อมูล โดย Modbus RTU สามารถรับส่งได้ระยะทางสูงสุดถึง 1.2 กิโลเมตร (ที่ความเร็ว 57.6 kbps) ในขณะที่ Modbus TCP สามารถรับส่งได้ที่ความเร็ว สูงสุดถึง 100 Mbps (ที่ระยะทาง 100 เมตร)

โครงการการศึกษาและพัฒนาหอฟอกอากาศอัจฉริยะ โดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์และระบบควบคุมดูแลผ่านเทคโนโลยีไอโอที เพื่อการลดฝุ่นละอองขนาดเล็ก (PM 2.5) ในพื้นที่สาธารณะ

### 1) Modbus RTU



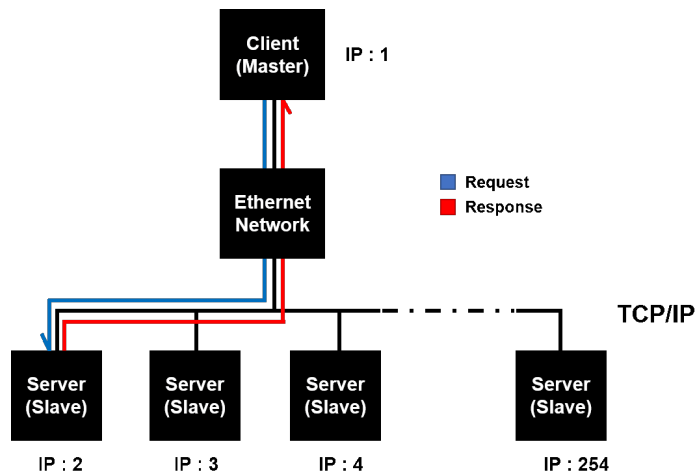
ภาพที่ 31 การสื่อสารแบบอนุกรมด้วย RS - 485 สำหรับ Modbus RTU

Modbus RTU คือ โพรโทคอลที่ใช้การสื่อสารแบบอนุกรม (Serial-based Protocol) ด้วยสถาปัตยกรรมการสื่อสารแบบ Master/Slave หรืออาจกล่าวได้ว่าอุปกรณ์ Slave จะไม่ส่งข้อมูล (Response) กลับมาจนกว่าจะมีการร้องขอ (Request) จากอุปกรณ์ Master ดังรูปที่ 1 Modbus RTU โดยทั่วไปจะใช้การสื่อสารในระดับกายภาพ (Physical Layer) แบบ RS-232 หรือ RS-485 ข้อมูลในโพรโทคอล Modbus จะถูกเก็บ 4 รูปแบบ คือ Output coils, Input contacts, Input registers และ Holding register โดย Output coils และ Input contacts แต่ละแอดเดรสจะเก็บค่าเพียง 1 บิต หรือมีค่าได้แค่ “0” กับ “1” เปรียบเสมือนค่าการเปิดและปิดของอุปกรณ์รีเลย์และสวิตช์ที่พบได้ในระบบงานอัตโนมัติอุตสาหกรรม ในขณะที่ Input registers และ Holding registers สามารถเก็บค่าเป็นตัวเลขได้ถึง 16 บิต เปรียบเสมือนค่าที่มาจากอุปกรณ์ตรวจวัดที่ส่งข้อมูลแบบอนาล็อก (Analog)

### 2) Modbus TCP

Modbus TCP คือ โพรโทคอลที่ครอบ Modbus RTU เพื่อใช้การสื่อสารแบบอีเทอร์เน็ต (Ethernet-based protocol) ด้วย TCP/IP (Transmission control protocol) ที่พอร์ต (Port) 502 แทนการใช้การสื่อสารแบบอนุกรม ดังรูปที่ 9 ทำให้อุปกรณ์สามารถสร้างการสื่อสารผ่านเครือข่ายเฉพาะบริเวณ (Local area network : LAN) หรือ เครือข่ายอินเทอร์เน็ต (Internet network) รวมไปถึงการเชื่อมต่อแบบไร้สาย (Wireless) โดยมีอุปกรณ์กระจายสัญญาณ (Router หรือ Access point) เป็นตัวกลางในการเชื่อมต่อ ชุดข้อความใน Modbus TCP (รายละเอียดดังรูปที่ 10 และ 11) เริ่มต้นข้อมูลด้วย Modbus application protocol (MBAP) Header ซึ่งประกอบด้วย Transaction ID, Protocol ID, Length, Unit ID ซึ่งเพิ่มเติมขึ้นมาจาก Modbus RTU ส่วนชุดข้อมูล Function code และ Data จะยังคงเหมือนเดิม ยกเว้นชุดข้อมูล CRC สำหรับเช็คความผิดพลาดจะไม่มี แต่เปลี่ยนไปใช้ของ Ethernet ใน Data link layer แทน

โครงการการศึกษาและพัฒนาหอฟอกอากาศอัจฉริยะ โดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์และระบบควบคุมดูแลผ่านเทคโนโลยีไอโอที เพื่อการลดฝุ่นละอองขนาดเล็ก (PM 2.5) ในพื้นที่สาธารณะ



ภาพที่ 32 รูปภาพการสื่อสารแบบอีเทอร์เน็ตสำหรับ Modbus TCP

### การออกแบบและพัฒนาเครื่องวัดฝุ่นละอองขนาดเล็ก (PM 2.5)

เครื่องวัดฝุ่นละอองขนาดเล็ก (PM2.5) ได้รับการออกแบบเพื่อใช้วัดฝุ่นละอองขนาดเล็ก PM2.5 และ PM10 เพื่อเก็บข้อมูลฝุ่นละอองขนาดเล็กในบริเวณที่ติดตั้ง นอกจากนี้ยังสามารถวัดค่าแก๊สได้แก่ คาร์บอนมอนนอกไซด์ (CO) และ ไนโตรเจนไดออกไซด์ (NO2) ซึ่งเป็นแก๊สที่มีผลกระทบต่อสุขภาพและร่างกายของมนุษย์

การออกแบบเครื่องวัดฝุ่นละอองขนาดเล็กในโครงการนี้จะใช้เทคโนโลยีสื่อสารประเภท LPWAN (Low-Power, Wide-Area Network) ซึ่งเป็นเทคโนโลยีที่ถูกพัฒนาขึ้นมาภายหลังและมีคุณสมบัติเหมาะสมอย่างมากในการนำไปใช้เพื่อการพัฒนาอุปกรณ์ IoT สำหรับการรับส่งข้อมูลขนาดเล็ก โดยใช้เทคโนโลยีกลุ่ม LPWAN จะจุดเด่นร่วมกันคือสามารถเชื่อมต่อเพื่อส่งรับข้อมูลในบริเวณกว้าง โดยใช้พลังงานต่ำอย่างมากในการสื่อสารทำให้อุปกรณ์สามารถทำงานได้ด้วยพลังงานจากแบตเตอรี่เพียงอย่างเดียวเป็นระยะเวลานาน

ในประเทศไทยปัจจุบันมีเทคโนโลยีสื่อสารประเภท LPWAN ที่ใช้งานอย่างแพร่หลายและครอบคลุมพื้นที่ในประเทศที่สุด 2 ประเภท ได้แก่ LoRa และ NB-IoT โดยในโครงการนี้ผู้พัฒนาได้เลือกใช้เทคโนโลยี NB-IoT เพื่อการพัฒนาเครื่องวัดฝุ่นละอองขนาดเล็ก (PM2.5) เนื่องจากจุดเด่นสำคัญของเทคโนโลยี NB-IoT คือเป็นการใช้เสาสัญญาณและคลื่นความถี่เซลลูลาร์เดิมของผู้ให้บริการ โดยเครือข่ายผู้ให้บริการ NB-IoT ที่มีอยู่ในประเทศไทยและได้นำมาใช้ในงานในโครงการคือเครือข่ายของบริษัท AIS ซึ่งสามารถให้บริการเครือข่าย NB-IoT ได้ครอบคลุมทั่วประเทศ แตกต่างจากเทคโนโลยี LoRa ที่ให้บริการโดยบริษัทโทรคมนาคมแห่งชาติ (NT) ซึ่งยังมีพื้นที่ให้บริการที่จำกัด

โครงการการศึกษาและพัฒนาหอฟอกอากาศอัจฉริยะ โดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์และระบบควบคุมดูแลผ่านเทคโนโลยีไอโอที เพื่อการลดฝุ่นละอองขนาดเล็ก (PM 2.5) ในพื้นที่สาธารณะ

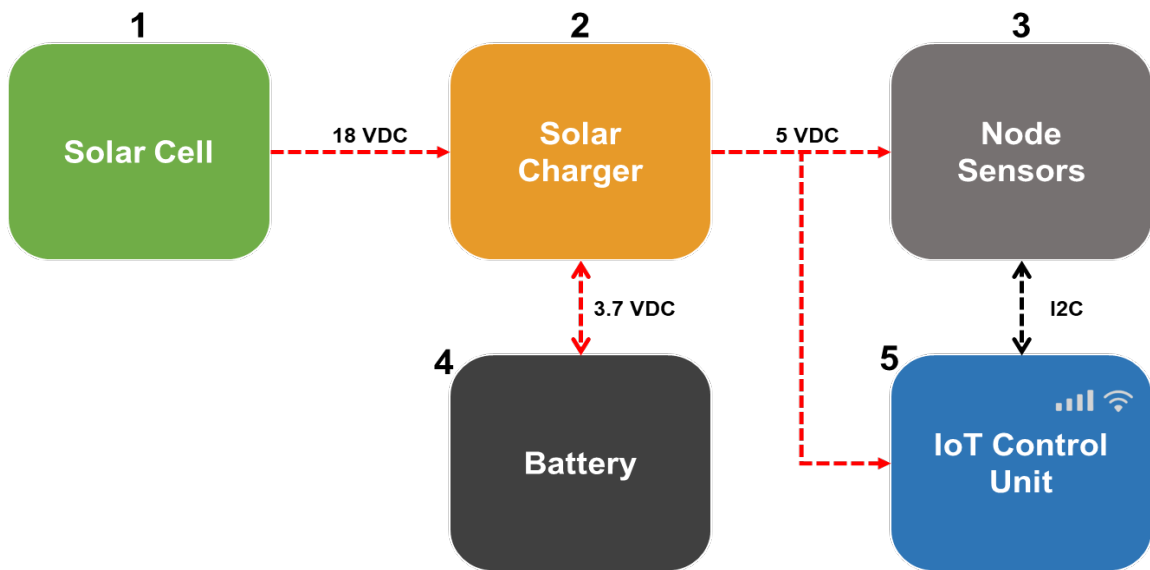
NB-IoT (Narrow Band Internet of Thing) เป็นเทคโนโลยีการสื่อสารที่พัฒนาตามมาตรฐาน 3GPP Rel.13 สามารถรับส่งข้อมูลได้ถึง 100 kbps ทั้ง Uplink และ Downlink โดยใช้ช่องสัญญาณในการสื่อสารที่มีขนาดแบนด์วิธ 200kHz โดยหากเปรียบเทียบกับเทคโนโลยีการสื่อสารประเภทอื่นที่ไม่ได้จัดอยู่ในกลุ่ม LPWAN จุดเด่นที่สำคัญของเทคโนโลยีนี้คือการใช้พลังงานต่ำมากหากกำหนดการทำงานให้มีประสิทธิภาพอาจจะสามารถอุปกรณ์ทำได้ด้วยแบตเตอรี่เพียงอย่างเดียวได้นานถึง 10 ปี

สำหรับแหล่งพลังงานที่ใช้สำหรับเครื่องวัดฝุ่นละอองขนาดเล็ก (PM2.5) นั้นจะใช้แบตเตอรี่แบบ 18650 จำนวน 2 ก้อน ในการเก็บพลังงานไฟฟ้าแบบ DC และจะมีวงจรการจัดการและการชาร์จไฟจากโซลาร์เซลล์ (Solar Charger) เป็นอุปกรณ์ในการจัดการเก็บ การจ่ายไฟและการชาร์จไฟ และมีแผงโซลาร์เซลล์ ขนาด 10 W ทำให้เครื่องวัดฝุ่นละอองขนาดเล็ก (PM2.5) ไม่จำเป็นต้องใช้พลังงานไฟฟ้าจากภายนอกและใช้พลังงานสะอาดจากแผงโซลาร์เซลล์เป็นแหล่งพลังงานหลักทั้งหมดดังภาพแสดงอุปกรณ์ทั้งหมดของเครื่องวัดฝุ่นละอองขนาดเล็ก (PM2.5)



ภาพที่ 33 เครื่องวัดฝุ่นละอองขนาดเล็ก (PM2.5)

โครงการการศึกษาและพัฒนาหอฟอกอากาศอัจฉริยะ โดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์และระบบควบคุมดูแลผ่านเทคโนโลยีไอโอที เพื่อการลดฝุ่นละอองขนาดเล็ก (PM 2.5) ในพื้นที่สาธารณะ



ภาพที่ 34 แสดงสถาปัตยกรรมของเครื่องวัดฝุ่นละอองขนาดเล็ก (PM2.5)

จากแผนภาพแสดงสถาปัตยกรรมของเครื่องวัดฝุ่นละอองขนาดเล็ก (PM2.5) แบ่งส่วนประกอบหลักออกเป็น 5 ส่วนได้แก่

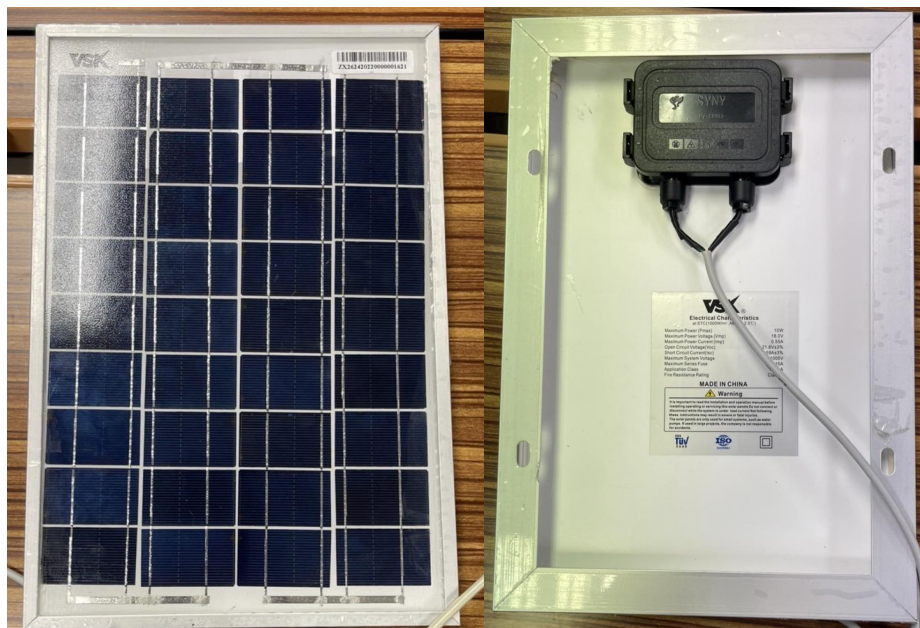
- 1) Solar cell แผงโซลาร์เซลล์สำหรับเป็นแหล่งพลังงานของเครื่องวัดฝุ่นละอองขนาดเล็ก (PM2.5)
- 2) Solar charger วงจรชุดควบคุมการชาร์จและการจัดการพลังงานให้กับอุปกรณ์ทั้งหมด
- 3) ชุดเซ็นเซอร์สำหรับการวัดค่าฝุ่นละอองขนาดเล็ก (PM2.5) และค่าแก๊ส CO NO2
- 4) Battery แบตเตอรี่สำหรับเป็นเก็บพลังงานจากแผงโซลาร์เซลล์
- 5) IoT Control Unit ชุดระบบควบคุม สั่งการและรับข้อมูลจากชุดเซ็นเซอร์ รวมทั้งการส่งข้อมูลผ่าน NB-IoT เข้าสู่ Platform สำหรับแสดงผลและประมวลผลข้อมูลที่ได้รับจากเซ็นเซอร์

รายละเอียดดังต่อไปนี้

**1. Solar cell** แผงโซลาร์เซลล์ที่ใช้เป็นแบบ Mono Crystalline Solar PV Module แบบกรอบและกระจกนิรภัย และมี Junction Box ด้านหลังแผง สำหรับต่อสายไฟ ซึ่งมีรายละเอียดเบื้องต้นดังนี้

- Maximum power(Pmax): 10W
- Voltage at Pmax(Vmp): 18V
- Current at Pmax(Imp): 0.56A
- Module dimension: 350x230x17 mm.

โครงการการศึกษาและพัฒนาหอฟอกอากาศอัจฉริยะ โดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์และระบบควบคุมดูแลผ่านเทคโนโลยีไอโอที เพื่อการลดฝุ่นละอองขนาดเล็ก (PM 2.5) ในพื้นที่สาธารณะ



ภาพที่ 35 แผงโซลาร์เซลล์ที่ใช้เป็นแบบ Mono Crystalline Solar PV Module แบบกรอบอลูมิเนียมและกระจกนิรภัย

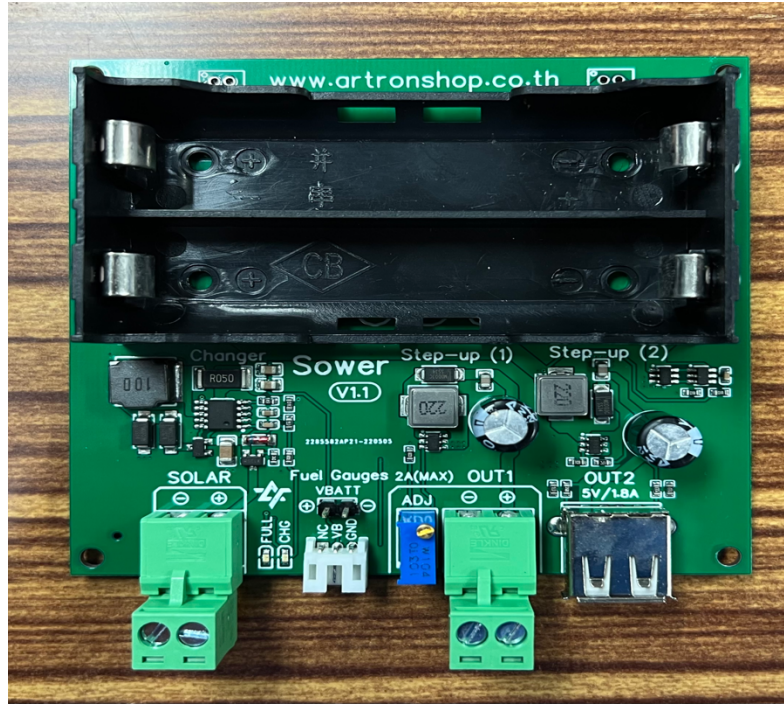
2. Solar charger หรือ วงจรชุดควบคุมการชาร์จและการจัดการพลังงานให้อุปกรณ์ทั้งหมด เพื่อใช้งานร่วมกับอุปกรณ์ IoT ซึ่งเน้นใช้งานร่วมกับระบบการจัดการพลังงานแสงอาทิตย์ ซึ่งรองรับการใช้งานร่วมกับโซลาร์เซลล์ทั้งขนาด 12V/ 18V/ 24V และแบตเตอรี่แบบ 18650 จำนวน 2 ก้อน ตัวบอร์ดสามารถจ่ายไฟปรับได้ 5V ถึง 16V และมีช่องจ่ายไฟคงที่ 5V ที่ช่อง USB ทำงานด้วย Maximum Power Point Tracking (MPPT) ซึ่งจะสามารถทำให้โซลาร์เซลล์ทำงานได้อย่างเต็มประสิทธิภาพ และมาพร้อมกับวงจรป้องกันต่อโพลาร์เซลล์ผิดขั้ว (Reverse polarity protection) ป้องกันแบตเตอรี่ป้องกันลัดวงจร ป้องกันกระแสเกิน รวมทั้งมีไฟบอกสถานะการทำงานอีกด้วย รายละเอียดและคุณสมบัติเบื้องต้นมีดังนี้

- Voltage Input: 12V to 28V
- Voltage (MPPT): 12V
- Compatible battery: 18650 3.7V
- Minimum capacity battery: 30000mA
- Current Input: 2A
- Voltage output (OUT1): 5V to 16V (adjustable)
- Voltage output (OUT2): 5V (USB Type A female)
- Current Output: 2A

โครงการการศึกษาและพัฒนาหอฟอกอากาศอัจฉริยะ โดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์และระบบควบคุมดูแลผ่านเทคโนโลยีไอโอที เพื่อการลดฝุ่นละอองขนาดเล็ก (PM 2.5) ในพื้นที่สาธารณะ

- Protection: Short circuit and overload

สำหรับการจ่ายไฟให้ระบบนั้นจะใช้ Voltage output (OUT2) แบบ USB Type A female ซึ่งจะใช้สายแบบ Type A male to Micro USB เพื่อจ่ายไฟให้กับ IoT Control Unit (DEVIO NB-DEVKIT)



ภาพที่ 36 วงจรชุดควบคุมการชาร์จและการจัดการพลังงาน

3. ชุดเซ็นเซอร์ที่ประกอบด้วยชุดเซ็นเซอร์หลัก 2 ชุด ประกอบด้วยชุดเซ็นเซอร์ได้แก่ ชุดเซนเซอร์สำหรับการวัดฝุ่นละอองขนาดเล็ก (PM2.5) และชุดเซ็นเซอร์วัดแก๊ส 4 ชนิด โดยใช้โปรโตคอลในการสื่อสารและส่งข้อมูลระหว่างชุดเซ็นเซอร์กับ IoT Control Unit คือ Inter-Integrated Circuit (I2C) เป็นรูปแบบการสื่อสารที่ออกแบบมาเพื่อสื่อสารข้อมูลความเร็วต่ำ นิยมใช้กับ Microcontroller และอุปกรณ์ IoT ซึ่งมีข้อดีสำหรับการสื่อสารแบบอนุกรมที่สามารถรับ-ส่งข้อมูลได้หลายอุปกรณ์ในบัสเดียวกัน ซึ่งใช้สายสัญญาณ 2 เส้นในการรับส่งข้อมูล ทำให้สามารถลดสายสัญญาณที่ใช้ในการเชื่อมต่ออุปกรณ์ได้มาก โดยสายสัญญาณ 2 เส้นประกอบด้วย

- SDA (Serial Data) เป็นสายสัญญาณสำหรับการรับส่งข้อมูล
  - SCL (Serial Clock) เป็นสายสัญญาณนาฬิกาใช้สำหรับควบคุมการรับส่งสัญญาณ
- สำหรับชุดเซ็นเซอร์ทั้งสองแบบจะเชื่อมต่อกันแบบอนุกรม I2C และใส่อยู่ใน Plates Radiation Shields ซึ่งทำจากวัสดุพลาสติก ABS ทนต่อแดดและฝุ่น ซึ่งเหมาะสมกับการใช้งานนอก

โครงการการศึกษาและพัฒนาหอฟอกอากาศอัจฉริยะ โดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์และระบบควบคุมดูแลผ่านเทคโนโลยีไอโอที เพื่อการลดฝุ่นละอองขนาดเล็ก (PM 2.5) ในพื้นที่สาธารณะ

อาคารเป็น Weather station โดยสามารถใช้งานได้หลายรูปแบบ เช่น สำหรับสถานีตรวจอากาศ อุตุนิยมวิทยา งานการเกษตร แสดงให้เห็นตามภาพ

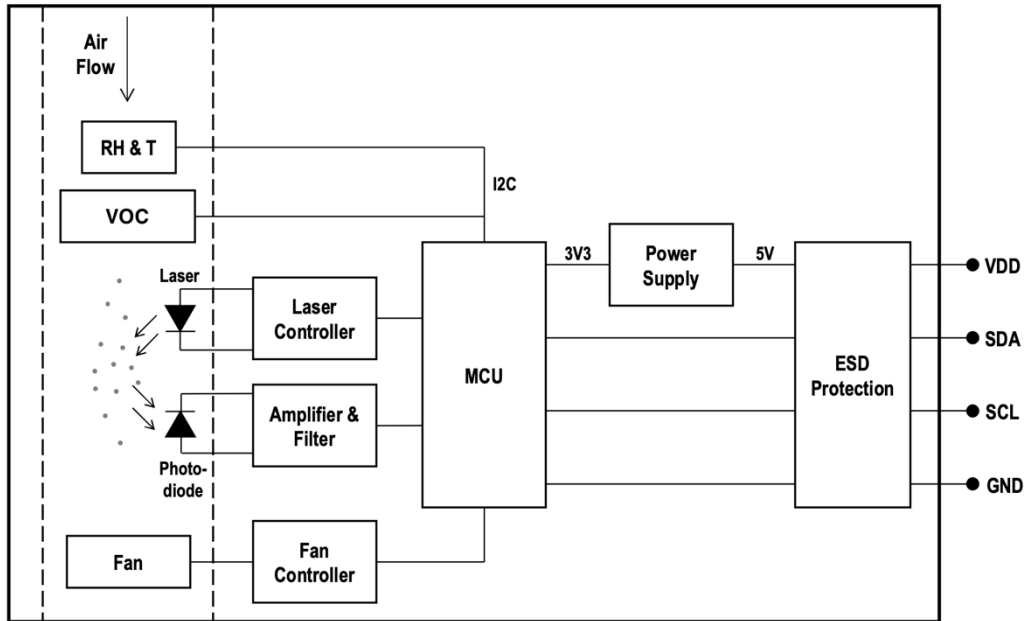


ภาพที่ 37 ชุดเซ็นเซอร์ที่ประกอบอยู่ใน Plates Radiation Shields ซึ่งทำจากวัสดุพลาสติก ABS

### 2.1 ชุดเซ็นเซอร์สำหรับวัดฝุ่นละอองขนาดเล็ก (PM 2.5)

ชุดเซ็นเซอร์สำหรับวัดฝุ่นละอองขนาดเล็ก (PM 2.5) เป็นชุดเซ็นเซอร์ที่มีคุณสมบัติในการวัดตัวชี้วัดคุณภาพของอากาศได้แก่อุณหภูมิในอากาศ ความชื้น อุณหภูมิ และ VOC (สารประกอบอินทรีย์ระเหยง่ายในอากาศ) ซึ่งรวมอยู่ในชุดเซ็นเซอร์เดียว สามารถนำไปวัดค่าต่างๆ ของอากาศได้ทั้งในและนอกอาคาร โดยการเชื่อมต่อสำหรับการใช้งาน ทาง PORT I2C 3.3V TTL (POWER 5VDC) โดยใช้พัดลมขนาดเล็กดูดอากาศเข้าไปยังตัว SENSOR แล้วทำการวัดค่า ซึ่งหลักการทำงานเบื้องต้นดังนี้

โครงการการศึกษาและพัฒนาหอฟอกอากาศอัจฉริยะ โดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์และระบบควบคุมดูแลผ่านเทคโนโลยีไอโอที เพื่อการลดฝุ่นละอองขนาดเล็ก (PM 2.5) ในพื้นที่สาธารณะ



ภาพที่ 38 แผนภาพแสดงการทำงานของชุดเซ็นเซอร์ SEN54 ประการด้วยเซ็นเซอร์ ความชื้น อุณหภูมิ VOC และ ชุดเลเซอร์สำหรับวัดค่าฝุ่นละออง

ตารางที่ 5 รายละเอียดของชุดเซ็นเซอร์วัดฝุ่นละอองขนาดเล็ก (PM 2.5)

Parameter	Condition	Values	Units
Sampling interval	-	1±0.03	s
Lifetime*	24 h/day operation	>10	years
Acoustic emission level	0.2 m	24	dB(A)
Long time acoustic emission level drift	0.2 m	+0.5	dB(A)/year
Weight	-	36.4±10%	g

\*Lifetime ขึ้นอยู่กับการคำนวณ Mean-Time-To-Failure (MTTF) ซึ่งจะขึ้นอยู่กับเงื่อนไขของสภาพแวดล้อมในการใช้งานชุดเซ็นเซอร์

โครงการการศึกษาและพัฒนาหอฟอกอากาศอัจฉริยะ โดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์และระบบควบคุมดูแลผ่านเทคโนโลยีไอโอที เพื่อการลดฝุ่นละอองขนาดเล็ก (PM 2.5) ในพื้นที่สาธารณะ

ตารางที่ 6 ตารางแสดงรายละเอียดของเซ็นเซอร์วัดค่าฝุ่นละออง โดยเงื่อนไขพื้นฐานที่ทดสอบ อุณหภูมิอยู่ที่  $25\pm 2^{\circ}\text{C}$  และความชื้นสัมพัทธ์ที่  $50\pm 10\%$  ที่ไฟเลี้ยง 5 V

Parameter	Condition	Values	Units
Mass concentration specification range	-	0 to 1,000	$\mu\text{g}/\text{m}^3$
Mass concentration size range	PM1.0	0.3 to 1.0	$\mu\text{m}$
	PM2.5	0.3 to 2.5	$\mu\text{m}$
	PM4	0.3 to 4.0	$\mu\text{m}$
	PM10	0.3 to 10.0	$\mu\text{m}$
Mass concentration precision for PM1 and PM2.5	0 to 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	$\pm 5\mu\text{g}/\text{m}^3$ AND 5	% m.v.
	100 to 1000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	$\pm 10$	% m.v.
Mass concentration precision for PM4 and PM10	0 to 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	$\pm 25$	$\mu\text{g}/\text{m}^3$
	100 to 1000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	$\pm 25$	% m.v.
Maximum long-term mass concentration precision limit drift	0 to 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	$\pm 1.25$	$\mu\text{g}/\text{m}^3 / \text{year}$
	100 to 1000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	$\pm 1.25$	% m.v. / year
Typical start-up time (Number concentration)	200 - 300 $\#/\text{cm}^3$	8	s
	100 - 200 $\#/\text{cm}^3$	16	s

โครงการการศึกษาและพัฒนาหอฟอกอากาศอัจฉริยะ โดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์และระบบควบคุมดูแลผ่านเทคโนโลยีไอโอที เพื่อการลดฝุ่นละอองขนาดเล็ก (PM 2.5) ในพื้นที่สาธารณะ

	50 - 100 #/cm <sup>3</sup>	30	s
Sensor output characteristics	PM2.5 mass concentration	Calibrated to TSI DustTrack™ DRX 8533 Ambient Mode	
Additional T-dependent mass precision limit drift <sup>3</sup>	Temperature difference to 25°C	±0.5	% m.v. / °C
Laser wavelength	Typical	660	nm

ตารางที่ 7 ตารางแสดงรายละเอียดของเซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิและความชื้น

Parameter	Condition	Values	Units
Compensated output	-	Temperature and Relative Humidity	°C and %RH
Typical accuracy temperature	@ 15-30 °C, 50 %RH	±0.45	°C
Maximum accuracy temperature	@ 15-30 °C, 50 %RH	±0.7	°C
Repeatability temperature	@ 25 °C, 5d0 %RH	0.1	°C
Response time temperature	@ 25 °C, 50 %RH, τ 63%	< 60	s
Typical accuracy relative humidity	@ 25 °C, 30-70	±0.45	%RH

โครงการการศึกษาและพัฒนาหอฟอกอากาศอัจฉริยะ โดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์และระบบควบคุมดูแลผ่านเทคโนโลยีไอโอที เพื่อการลดฝุ่นละอองขนาดเล็ก (PM 2.5) ในพื้นที่สาธารณะ

	%RH		
Maximum accuracy relative humidity	@ 25 °C, 30-70 %RH	±6	%RH
Repeatability relative humidity	@ 25 °C, 50 %RH	±1	%RH
Response time relative humidity	@ 25 °C, 50 %RH, $\tau$ 63%	<20	s

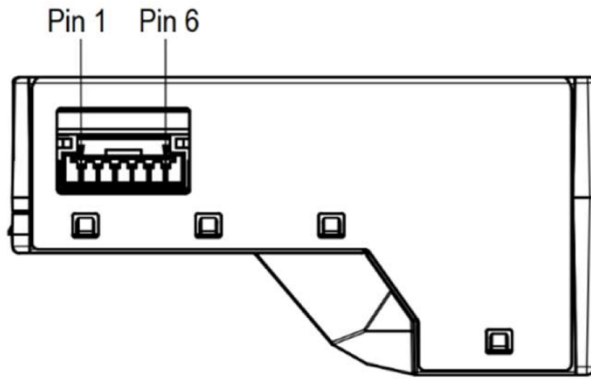
ตารางที่ 8 ตารางแสดงคำแนะนำและเงื่อนไขในการใช้งานชุดเซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิและความชื้น

Conditions	Parameters	Recommended		Absolute		Units
		Min	Max	Min	Max	
Operating conditions	Temperature	10	40	-10	50	°C
	Relative humidity	20	80	0	90 (non-condensing)	%RH
Storage conditions	Temperature	10	30	-40	70	°C
	Relative humidity	20	60	0	80 (non-condensing)	%RH

#### การเชื่อมต่อชุดเซ็นเซอร์สำหรับวัดฝุ่นละอองขนาดเล็ก (PM 2.5)

ในการเชื่อมต่อกับเซ็นเซอร์สามารถเชื่อมต่อแบบ Serial ซึ่งตัวชุดเซ็นเซอร์จำเป็นจะต้องตั้งบริเวณทางออกของอากาศ โดยการเชื่อมต่อ Serial ต้องใช้หัวต่อแบบ ACES 51451-0060N-001 เข้ากับชุดเซ็นเซอร์ ซึ่งรูปของชุดเซ็นเซอร์และตำแหน่งของหัวต่อแสดงในภาพ และรายละเอียดของช่องสัญญาณของหัวต่อในตาราง

โครงการการศึกษาและพัฒนาหอฟอกอากาศอัจฉริยะ โดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์และระบบควบคุมดูแลผ่านเทคโนโลยีไอโอที เพื่อการลดฝุ่นละอองขนาดเล็ก (PM 2.5) ในพื้นที่สาธารณะ



ภาพที่ 39 ชุดเซ็นเซอร์และช่องเชื่อมต่อสัญญาณสำหรับวัดฝุ่นละอองขนาดเล็ก (PM 2.5)

ตารางที่ 9 ตารางรายละเอียดช่องสัญญาณของชุดเซ็นเซอร์วัดฝุ่นละอองขนาดเล็ก (PM 2.5)

Pin	Name	Values	Comments
1	VDD	Supply voltage	5V±10%
2	GND	Ground	
3	SDA	Serial data input / output	LVTTL 3.3V compatible
4	SCL	Serial clock input	LVTTL 3.3V compatible
5	SEL	Interface select	Connect to GND
6	NC	Do not connect	

2.2 ชุดเซ็นเซอร์วัดแก๊ส ซึ่งประกอบด้วย คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ไนโตรเจนไดออกไซด์ (NO<sub>2</sub>) ซึ่งมีข้อดีคือ ตัวเซ็นเซอร์มีขนาดเล็กแต่ยังคงประสิทธิภาพในการใช้งานให้มีเสถียรภาพและความน่าเชื่อถือสูง เหมาะสมกับการวัดแบบคุณภาพมากกว่าการวัดแบบปริมาณ

โครงการการศึกษาและพัฒนาหอฟอกอากาศอัจฉริยะ โดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์และระบบควบคุมดูแลผ่านเทคโนโลยีไอโอที เพื่อการลดฝุ่นละอองขนาดเล็ก (PM 2.5) ในพื้นที่สาธารณะ

ตารางที่ 10 ตารางแสดงรายละเอียดและส่วนประกอบเบื้องต้นของ Gas sensor (Multichannel)

Parameters	Details
MCU	STM32F030
Interface	I <sup>2</sup> C
I <sup>2</sup> C	0x55
Output voltage	3.3V to 5V

**เซ็นเซอร์ไนโตรเจนไดออกไซด์ (NO<sub>2</sub>):**

เซ็นเซอร์ไนโตรเจนไดออกไซด์ (NO<sub>2</sub>) เป็นเซ็นเซอร์ที่ใช้เทคโนโลยี Micro-Electro-Mechanical-System (MEMS) แบบ Micro-fabrication hot plate บน Si substrate base โดยใช้วัสดุที่ไวต่อแก๊สจะถูกนำไปใช้ผลิตเซ็นเซอร์ในห้องสะอาดที่มีค่า Metal oxide semiconductor ต่ำ ซึ่งจะทำให้การตรวจวัดค่าของแก๊สมีความแม่นยำสูง

ตารางที่ 11 แสดงรายละเอียดและคุณลักษณะเบื้องต้นของเซ็นเซอร์ไนโตรเจนไดออกไซด์ (NO<sub>2</sub>)

Parameters	Details
Sensor Type	MEMS
Standard Encapsulation	Ceramic
Detection Gas	NO <sub>2</sub>
Detection Range	0.1 to 10 ppm

โครงการการศึกษาและพัฒนาหอฟอกอากาศอัจฉริยะ โดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์และระบบควบคุมดูแลผ่านเทคโนโลยีไอโอที เพื่อการลดฝุ่นละอองขนาดเล็ก (PM 2.5) ในพื้นที่สาธารณะ

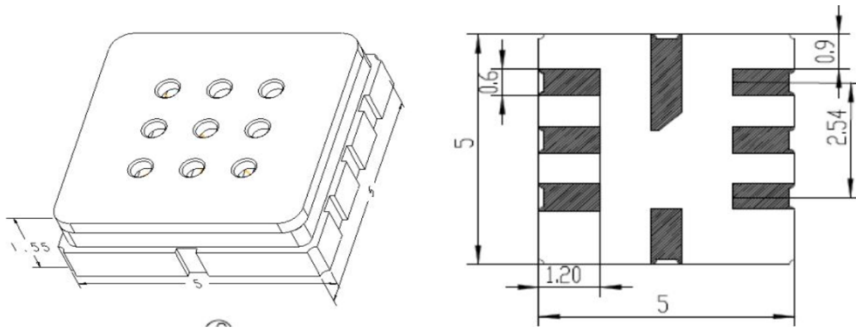
ตารางที่ 12 ตารางแสดงคำแนะนำและเงื่อนไขในการใช้งานเซ็นเซอร์ไนโตรเจนไดออกไซด์ (NO<sub>2</sub>)

Conditions	Parameters	Details	Units
Standard circuit conditions	Loop voltage ( $V_C$ )	$\leq 24$	V DC
	Heater voltage ( $V_H$ )	$2.0 \pm 0.1$	V AC or V DC
	Load resistance ( $R_L$ )	Adjustable	$\Omega$
Sensor character under standard test conditions	Heater resistance ( $R_H$ )	$80 \pm 20$	$\Omega$
	Heater consumption ( $P_H$ )	$\leq 40$	mW
	Sensitive materials resistance ( $R_S$ )	10 to 1000	$K\Omega$
	Sensitivity (S)	$R_0(\text{in air})/R_S(\text{in } 2 \text{ ppm NO}_2) \leq 0.5$	-
Standard test conditions	Temperature	$20 \pm 2$	$^{\circ}\text{C}$
	Humidity	$55\% \pm 5\%$	%RH
	Standard test circuit	$V_H: 2.0 \pm 0.1;$ $V_C: 5.0 \pm 0.1$	V

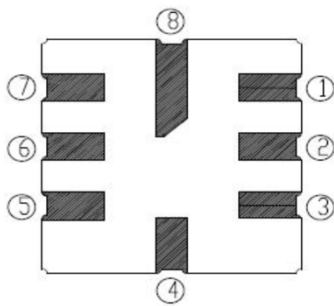
#### ลักษณะขนาดและช่องสัญญาณ

รูปภาพแสดงขนาดของเซ็นเซอร์เซ็นเซอร์ไนโตรเจนไดออกไซด์ (NO<sub>2</sub>) และตำแหน่งของช่องสัญญาณของเซ็นเซอร์ โดยหน่วยที่ระบุในภาพเป็นหน่วยมิลลิเมตร (mm.)

โครงการการศึกษาและพัฒนาหอฟอกอากาศอัจฉริยะ โดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์และระบบควบคุมดูแลผ่านเทคโนโลยีไอโอที เพื่อการลดฝุ่นละอองขนาดเล็ก (PM 2.5) ในพื้นที่สาธารณะ



ภาพที่ 40 ขนาดของเซ็นเซอร์ไนโตรเจนไดออกไซด์ (NO<sub>2</sub>)



Pn	Values
1	R <sub>H1</sub>
2	-
3	R <sub>F2</sub>
4	-
5	R <sub>S1</sub>
6	-
7	R <sub>S1</sub>
8	-

ภาพที่ 41 ภาพแสดงรายละเอียดตำแหน่งช่องเชื่อมต่อสัญญาณของเซ็นเซอร์ไนโตรเจนไดออกไซด์ (NO<sub>2</sub>)

#### ระยะเวลาในการให้ความร้อนเซ็นเซอร์ก่อนการใช้งาน (Preheating time)

หากเซ็นเซอร์ไม่ได้รับการใช้งานยาวนาน อาจจะทำให้ความต้านทานภายในเซ็นเซอร์มีความคลาดเคลื่อน ซึ่งจะทำให้การตอบสนองในการวัดค่า จึงจำเป็นต้องทำการให้ความร้อนแก่ตัวเซ็นเซอร์เพื่อทำให้คุณสมบัติทางเคมีของเซ็นเซอร์มีค่าที่เหมาะสม ซึ่งมีรายละเอียดในการทำการให้ความร้อนของเซ็นเซอร์แสดงในตาราง

โครงการการศึกษาและพัฒนาหอฟอกอากาศอัจฉริยะ โดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์และระบบควบคุมดูแลผ่านเทคโนโลยีไอโอที เพื่อการลดฝุ่นละอองขนาดเล็ก (PM 2.5) ในพื้นที่สาธารณะ

ตารางที่ 13 ตารางรายละเอียดการให้ความร้อนเซ็นเซอร์คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ก่อนการใช้งาน

Storage time	Suggested aging time
Less than one month	No less than 24 hours
1 to 6 months	No less than 48 hours
More than six months	No less than 72 hours

โครงการการศึกษาและพัฒนาหอฟอกอากาศอัจฉริยะ โดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์และระบบควบคุมดูแลผ่านเทคโนโลยีไอโอที เพื่อการลดฝุ่นละอองขนาดเล็ก (PM 2.5) ในพื้นที่สาธารณะ

#### รายละเอียดเซ็นเซอร์คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO)

เซ็นเซอร์คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) เป็นเซ็นเซอร์ที่ใช้เทคโนโลยี Micro-Electro-Mechanical-System (MEMS) แบบ Micro-fabrication hot plate บน Si substrate base โดยวัสดุที่ไวต่อแก๊สจะถูกนำไปผลิตเซ็นเซอร์ในห้องสะอาดที่มีค่า Metal oxide semiconductor ต่ำ ซึ่งจะทำให้การตรวจวัดค่าของแก๊สมีความแม่นยำสูง ซึ่ง จะมีค่าความไวสูงต่อการตรวจจับคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) โดยเฉพาะ

#### ตารางที่ 14 ตารางแสดงรายละเอียดและคุณลักษณะเบื้องต้นของเซ็นเซอร์คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO)

Parameters	Details
Sensor Type	MEMS
Standard Encapsulation	Ceramic
Detection Gas	CO
Detection Range	5 to 5000 ppm

#### ตารางที่ 15 ตารางแสดงคำแนะนำและเงื่อนไขในการทำงานเซ็นเซอร์คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO)

Conditions	Parameters	Details	Units
Standard circuit conditions	Loop voltage ( $V_L$ )	$\leq 24$	V DC
	Heater voltage ( $V_H$ )	0.5±0.1 (Low temperature); 2.5±0.1 (High temperature)	V AC or V DC
	Heating Time ( $T_L$ )	90±1 (Low temperature); 60±1 (High temperature)	s

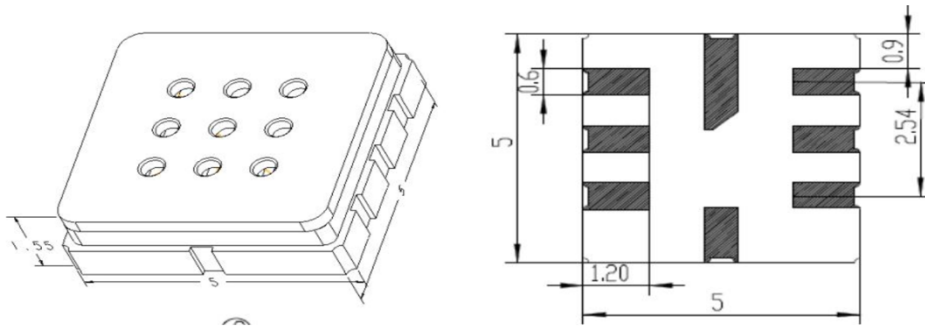
โครงการการศึกษาและพัฒนาหอฟอกอากาศอัจฉริยะ โดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์และระบบควบคุมดูแลผ่านเทคโนโลยีไอโอที เพื่อการลดฝุ่นละอองขนาดเล็ก (PM 2.5) ในพื้นที่สาธารณะ

	Load resistance ( $R_L$ )	Adjustable	$\Omega$
Sensor character under standard test conditions	Heater resistance ( $R_H$ )	$80 \pm 20$	$\Omega$ (Room temperature)
	Heater consumption ( $P_H$ )	$\leq 50$	mW
	Sensitive materials resistance ( $R_S$ )	1 to 30	$K\Omega$
	Sensitivity (S)	$R_0(\text{in air})/R_5(\text{in 2 ppm NO}_2) \leq 0.5$	-
Standard test conditions	Temperature	$20 \pm 2$	$^{\circ}\text{C}$
	Humidity	$55\% \pm 5\%$	%RH
	Standard test circuit	$V_H: 0.5 \pm 0.1$ (Low temperature); $V_H: 2.5 \pm 0.1$ (High temperature) $V_C: 5.0 \pm 0.1$	V

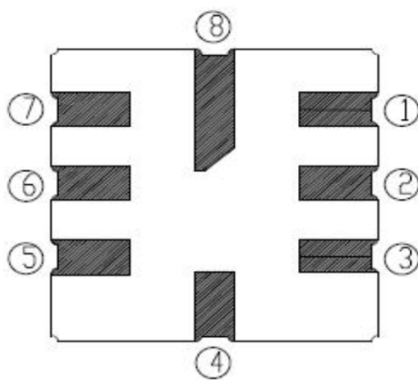
#### ลักษณะขนาดและช่องสัญญาณ

รูปภาพแสดงขนาดของเซ็นเซอร์เซ็นเซอร์คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) และตำแหน่งของช่องสัญญาณของเซ็นเซอร์ โดยหน่วยที่ระบุในภาพเป็นหน่วยมิลลิเมตร (mm.)

โครงการการศึกษาและพัฒนาหอฟอกอากาศอัจฉริยะ โดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์และระบบควบคุมดูแลผ่านเทคโนโลยีไอโอที เพื่อการลดฝุ่นละอองขนาดเล็ก (PM 2.5) ในพื้นที่สาธารณะ



ภาพที่ 42 ภาพขนาดของเซ็นเซอร์คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO)



An	Value
1	$R_{H1}$
2	-
3	$R_{H2}$
4	-
5	$R_{S1}$
6	-
7	$R_{S1}$
8	-

ภาพที่ 43 ภาพรายละเอียดและตำแหน่งช่องเชื่อมต่อสัญญาณของเซ็นเซอร์คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO)

#### ระยะเวลาในการให้ความร้อนเซ็นเซอร์ก่อนการใช้งาน (Preheating time)

หากเซ็นเซอร์ไม่ได้รับการใช้งานยาวนาน อาจจะทำให้ความต้านทานภายในเซ็นเซอร์มีความคลาดเคลื่อน ซึ่งจะทำให้การตอบสนองในการวัดค่า จึงจำเป็นต้องทำการให้ความร้อนแก่ตัวเซ็นเซอร์เพื่อให้คุณสมบัติทางเคมีของเซ็นเซอร์มีค่าที่เหมาะสม ซึ่งรายละเอียดในการทำการให้ความร้อนของเซ็นเซอร์แสดงในตาราง

ตารางที่ 16 ตารางรายละเอียดการให้ความร้อนเซ็นเซอร์คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ก่อนการใช้งาน

Storage time	Suggested aging time
Less than one month	No less than 48 hours
1 to 6 months	No less than 72 hours
More than six months	No less than 168 hours

โครงการการศึกษาและพัฒนาหอฟอกอากาศอัจฉริยะ โดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์และระบบควบคุมดูแลผ่านเทคโนโลยีไอโอที เพื่อการลดฝุ่นละอองขนาดเล็ก (PM 2.5) ในพื้นที่สาธารณะ

**4. Battery** แบตเตอรี่ที่นำมาใช้ร่วมกับ Solar charger คือ แบตเตอรี่แบบ 18650 ซึ่งถูกเรียกตามเส้นผ่านศูนย์กลางและความยาวของตัว (18mm x 65mm) ซึ่งองค์ประกอบของเซลล์แบตเตอรี่คือ Lithium-Ion ทำให้แบตเตอรี่ 18650 สามารถจ่ายกระแสได้สูงกว่าแบตเตอรี่แบบ AA และมีความจุที่สูงกว่ามาก จึงทำให้เป็นที่นิยมในการใช้ร่วมกับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์และอุปกรณ์ IoT การใช้งานแรงดันไฟระดับปกติของแบตเตอรี่ lithium-ion จะอยู่ที่ 3.7V โดยแรงดันที่ชาร์จเต็มจะอยู่ 4.2V หากมีการดึงกระแสไฟจากแบตเตอรี่จนแรงดันต่ำกว่า 2.5V นั้นจะทำให้ cell เสียหายถาวรและไม่สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ ซึ่งสำหรับเครื่องวัดฝุ่นละอองขนาดเล็ก (PM2.5) Solar charger จะมีวงจรในการจัดการไม่ใช้แบตเตอรี่เสียหายจากการดึงกระแสไฟจากแบตเตอรี่ไปใช้จะได้รับความปลอดภัยซึ่งมั่นใจได้ว่าอุปกรณ์จะมีอายุการใช้งานที่ยาวนานขึ้น



ภาพที่ 44 ภาพแบตเตอรี่แบบ 18650 แรงดันไฟที่ 3.7V

**5. IoT Control Unit** เป็นชุดควบคุมที่เป็นบอร์ดที่ประกอบไปด้วยบอร์ด DEVIO NB-DEVKIT ของ AIS ซึ่งใช้ Microcontroller แบบ ESP32 โดยในบอร์ดมีโมดูลสื่อสาร WiFi และ Bluetooth รวมไปถึง NB-IoT (Narrow Band Internet of Thing) เพื่อรับส่งข้อมูลผ่านทาง NB-IoT ด้วยโมดูล SIM7020E ของ SIMCom และใช้งานร่วมกับเสาอากาศแบบสติกเกอร์ ชนิด IPEX MHF1 (u.FL) ซึ่งสามารถขยายสัญญาณได้ประมาณ 2dBi ซึ่งรายละเอียดของตัวบอร์ดแสดงในตาราง

ตารางที่ 17 ตารางรายละเอียดและคุณสมบัติของ บอร์ด DEVIO NB-DEVKIT

Parameters	Details
Microprocessor	Xtensa® single-/dual-core 32-bit LX6 microprocessor(s), up to 600 MIPS (200 MIPS for ESP32-S0WD, 400 MIPS for ESP32-D2WD)
RAM	520 KB

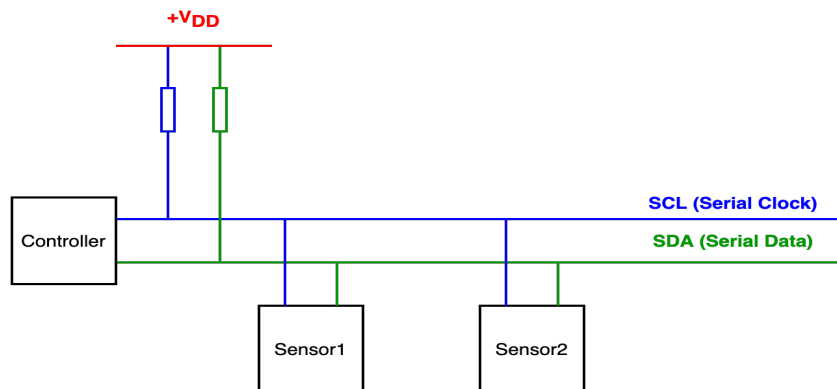
โครงการการศึกษาและพัฒนาหอฟอกอากาศอัจฉริยะ โดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์และระบบควบคุมดูแลผ่านเทคโนโลยีไอโอที เพื่อการลดฝุ่นละอองขนาดเล็ก (PM 2.5) ในพื้นที่สาธารณะ

ROM	448 KB
SRAM in RTC	16 KB
Clock Frequency	Up to 240 MHz
Wi-Fi	802.11 b/g/n 2.4GHz, up to 150 Mbps
Bluetooth	V4.2 BR and BLE application
Network Technology	LTE Cat. NB1 (NB-IoT)
Frequency	B1 (2100MHz) B3 (1800MHz) B5 (850MHz) B8 (900MHz) B20 (800MHz) B28 (700MHz)
Data Transmission	Uplink: 62.5 kbps Downlink: 26.15 kbps
Transmission Power (Maximum)	23dBm (200mW)
Protocol Stack	TCP/UDP LWM2M/CoAP MQTT/FTP/HTTP/HTTPS/SSL/DTLS
NB-IoT Module Certification	CE/GCF RoHS/REACH
Antenna Specification	Brand: FLEXA01 Working Frequency: 820~960/1710~2170 MHz Bandwidth: 140/460 MHz

โครงการการศึกษาและพัฒนาหอฟอกอากาศอัจฉริยะ โดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์และระบบควบคุมดูแลผ่านเทคโนโลยีไอโอที เพื่อการลดฝุ่นละอองขนาดเล็ก (PM 2.5) ในพื้นที่สาธารณะ

	<p>Connector Type: IPEX1</p> <p>Gain (Maximum Direction): 2dB</p> <p>Polarization: Linear polarization</p>
Integrated Sensor	<p>Ambient Light Sensors</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>● Brand: Vishay Semiconductor</li> <li>● Model: TEMA6000X01</li> <li>● Interface Type: ADC</li> </ul> <p>Humidity Sensor &amp; Temperature Sensor</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>● Brand: Texas Instrument</li> <li>● Model: HDC1080</li> <li>● Interface Type: I<sup>2</sup>C</li> </ul>

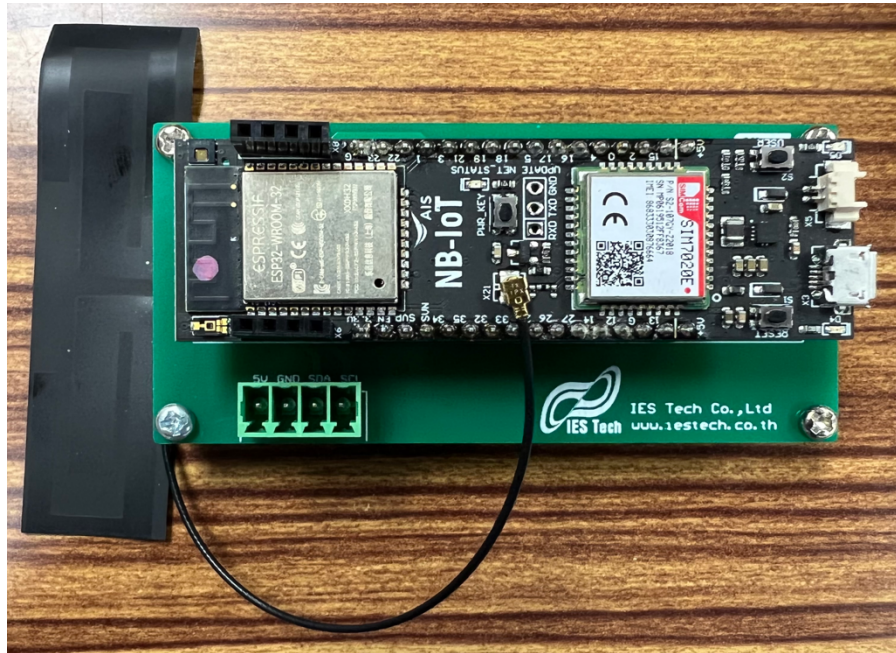
ในส่วนของการเชื่อมต่อกับ Node sensors ใช้โปรโตคอลในการสื่อสารเพื่อรับส่งข้อมูลแบบ Inter-Integrated Circuit (I2C) โดยในบอร์ด IoT Control Unit นั้นได้มีการต่อความต้านทานขนาด 10K แบบขนาน สำหรับการทำให้ Pull-up resistor ตามภาพ



ภาพที่ 45 รูปภาพ Pull-up resistor diagram ภายใน IoT Control Unit

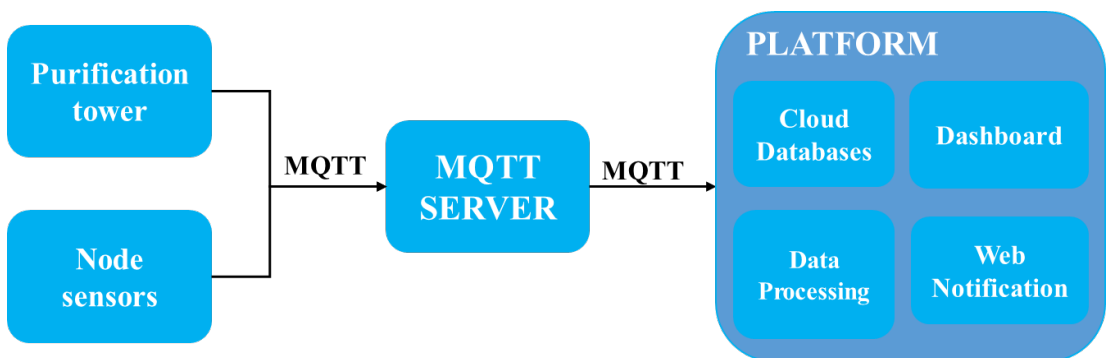
สำหรับไฟเลี้ยง IoT Control Unit ได้รับจาก Solar Charger ผ่านสาย USB type A male to Micro-USB โดยในฝั่งของ Solar Charger จะเชื่อมต่อเข้ากับช่อง USB type A female และฝั่ง IoT Control Unit จะเชื่อมต่อเข้ากับช่อง Micro-USB ของ DEVIO NB-DEVKIT

โครงการการศึกษาและพัฒนาหอฟอกอากาศอัจฉริยะ โดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์และระบบควบคุมดูแลผ่านเทคโนโลยีไอโอที เพื่อการลดฝุ่นละอองขนาดเล็ก (PM 2.5) ในพื้นที่สาธารณะ



ภาพที่ 46 ภาพ IoT Control Unit เป็นชุดควบคุมที่เป็นบอร์ดที่ประกอบไปด้วยบอร์ด DEVIO NB-DEVKIT และเสาสัญญาณแบบสตีกเกอร์ ชนิด IPEX MHF1 (u.FL) การออกแบบและพัฒนาระบบออนไลน์สำหรับการจัดการ แสดงผล และประมวลผลข้อมูลจากหอฟอกอากาศอัจฉริยะ และเครื่องวัดฝุ่นละอองขนาดเล็ก (PM2.5)

ระบบออนไลน์สำหรับการจัดการ แสดงผล และประมวลผลข้อมูลจากหอฟอกอากาศอัจฉริยะ และเครื่องวัดฝุ่นละอองขนาดเล็ก (PM2.5) ถูกออกแบบให้มีลักษณะเป็น Platform แบบ Web Application โดยมีชื่อเรียกว่า Air Quality Monitoring Platform



ภาพที่ 47 รูปภาพแสดงกรอบแนวคิดของ platform

โครงการการศึกษาและพัฒนาหอฟอกอากาศอัจฉริยะ โดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์และระบบควบคุมดูแลผ่านเทคโนโลยีไอโอที เพื่อการลดฝุ่นละอองขนาดเล็ก (PM 2.5) ในพื้นที่สาธารณะ

โดย Platform ดังกล่าวมีหน้าที่ในการรับข้อมูลที่มาจกเซ็นเซอร์ชนิดต่าง ๆ ทั้งจากเซ็นเซอร์ของระบบไอโอที (IoT) สำหรับควบคุมหอฟอกอากาศอัจฉริยะ และ เซ็นเซอร์ของเครื่องวัดฝุ่นละอองขนาดเล็ก (PM 2.5) ในพื้นที่สาธารณะ ซึ่งเป็นการรับส่งข้อมูลด้วย protocol การสื่อสาร MQTT ผ่าน MQTT server เพื่อนำเข้ามบันทึกข้อมูลลงฐานข้อมูล จากนั้นข้อมูลจะถูกนำไปประมวลผลเพื่อการแสดงผลบน Dashboard ของ Platform

Air Quality Monitoring Platform จะประกอบไปด้วยฟังก์ชันการทำงานหลักดังนี้

1. Data Processing
2. Cloud Databases
3. Dashboard
4. Web notification

โครงการการศึกษาและพัฒนาหอฟอกอากาศอัจฉริยะ โดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์และระบบควบคุมดูแลผ่านเทคโนโลยีไอโอที เพื่อการลดฝุ่นละอองขนาดเล็ก (PM 2.5) ในพื้นที่สาธารณะ

### การออกแบบและพัฒนาระบบออนไลน์ โดยการอ้างอิงแบบจำลอง Security Threat Model แบบ STRIDE

โครงการนี้ผู้พัฒนาได้เลือกใช้การปรับปรุงโครงสร้างระบบจาก platform Thingboard ซึ่งออกแบบเพื่อจัดการอุปกรณ์ และแสดงผลข้อมูลอุปกรณ์ IoT ควบคู่กับใช้งาน cloud service ในการติดตั้งระบบ ทำให้การออกแบบและพัฒนาระบบออนไลน์สำหรับการจัดการ แสดงผล และประมวลผลข้อมูลจากหอฟอกอากาศอัจฉริยะในโครงการนี้มีความปลอดภัยและน่าเชื่อถือซึ่งสอดคล้องกับแบบจำลอง security threat แบบ STRIDE โดยสามารถวิเคราะห์ความปลอดภัยในแต่ละแง่มุมได้ดังตารางสรุปต่อไปนี้

### ตารางที่ 18 ตารางสรุปการวิเคราะห์ความปลอดภัยตามแบบจำลอง security threat แบบ STRIDE

ชนิดของความ เสี่ยง	วิเคราะห์ความปลอดภัยของระบบ
Spoofing	ระบบมีการออกแบบให้มีความปลอดภัยในการเข้าใช้งาน โดยกำหนดให้ผู้ใช้ที่ต้องการเข้าถึงการปรับแก้ข้อมูลในระบบต้องใช้อีเมลล์และรหัสผ่านในการยืนยันตัวตนสำหรับเข้าระบบเสมอ
Tampering	ฐานข้อมูลของระบบมีการป้องกันการเข้าถึงจากภายนอกทั้งการเรียกดูข้อมูลและการแก้ไข
Repudiation	การเข้าใช้งานระบบและการแก้ไขใดๆในระบบจะมีการเก็บข้อมูลทุกอย่างอยู่ตลอดเวลาเป็น log file อยู่ในระบบ ซึ่งไม่สามารถลบหรือแก้ไขได้
Information disclosure	ระบบมีการป้องกันการเข้าถึงข้อมูลจากภายนอก เพื่อป้องกันการเข้าถึงข้อมูลที่ไม่ได้รับอนุญาต
Denial of service	ระบบถูกติดตั้งให้ทำงานอยู่บน cloud service ที่มีความปลอดภัยและน่าเชื่อถือ (SLA uptime >99%)
Elevation of privilege	ระบบมีการจัดการผู้ใช้โดยสามารถกำหนดสิทธิ์เพื่อป้องกันผู้ใช้เข้าถึงระบบหรือข้อมูลที่ไม่ได้รับอนุญาต

โครงการการศึกษาและพัฒนาหอฟอกอากาศอัจฉริยะ โดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์และระบบควบคุมดูแลผ่านเทคโนโลยีไอโอที เพื่อการลดฝุ่นละอองขนาดเล็ก (PM 2.5) ในพื้นที่สาธารณะ

## การออกแบบและการใช้งาน Air Quality Monitoring Platform

### การเข้าใช้งาน Platform

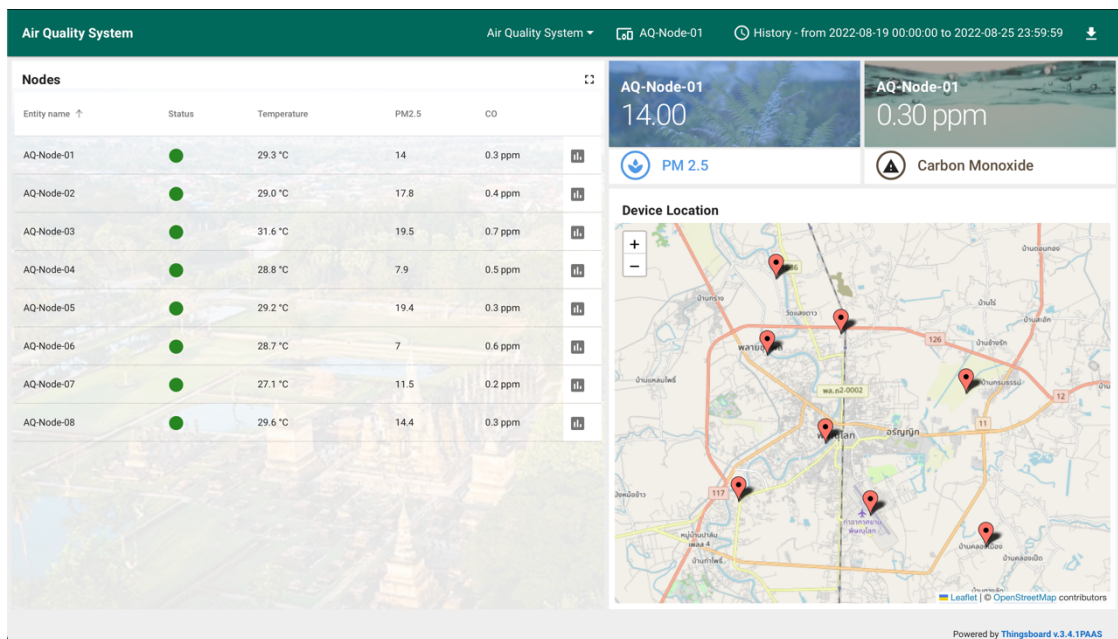
การเข้าสู่ระบบ Air Quality Monitoring Platform สามารถเข้าไปที่ URL:

<https://bit.ly/3e2pDQv> หรือสแกน QR Code ด้านล่างนี้



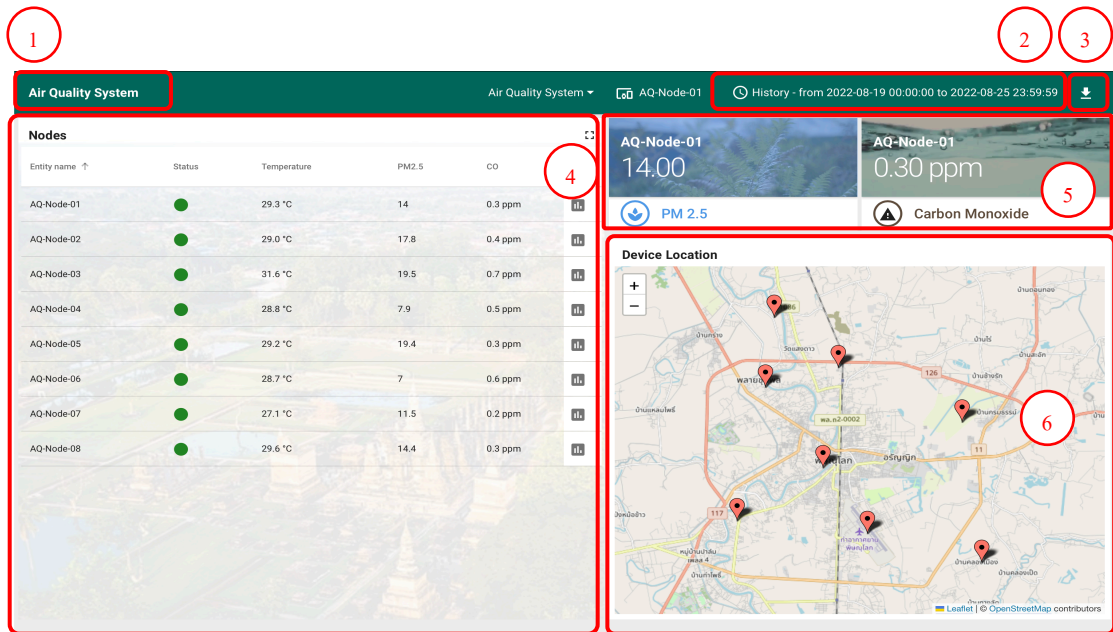
ภาพที่ 48 รูปภาพ QR Code สำหรับการเข้าใช้งาน Air Quality Monitoring Platform

การออกแบบ Platform นั้น เมื่อผู้ใช้งานเข้าสู่ Platform จะพบกับหน้าแรกซึ่งเป็นลักษณะของหน้าจอ Dashboard เพื่อแสดงของอุปกรณ์เซ็นเซอร์จากจุดต่างๆ ดังภาพประกอบตัวอย่าง



ภาพที่ 49 รูปภาพหน้าแรกของ Air Quality Monitoring Platform

โครงการการศึกษาและพัฒนาหอฟอกอากาศอัจฉริยะ โดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์และระบบควบคุมดูแลผ่านเทคโนโลยีไอโอที เพื่อการลดฝุ่นละอองขนาดเล็ก (PM 2.5) ในพื้นที่สาธารณะ



ภาพที่ 50 รูปภาพแสดงองค์ประกอบของ Platform

หมายเลขที่ 1 แสดงชื่อ Dashboard

หมายเลขที่ 2 บริเวณกำหนดช่วงเวลาและความละเอียดของข้อมูลห้บริการแสดงผล รายละเอียดเพิ่มเติมดูที่ 2.1

หมายเลขที่ 3 ปุ่มสำหรับการนำข้อมูลที่เก็บไว้ออกมาในรูปแบบไฟล์ชนิดต่าง ๆ ได้แก่ PDF PNG JPEG และ JSON รายละเอียดเพิ่มเติมดูใน 2.2

หมายเลขที่ 4 บริเวณแสดงรายละเอียดของอุปกรณ์วัดคุณภาพอากาศที่สื่อสารด้วย NB-IoT รวมทั้งหอฟอกอากาศอัจฉริยะ ที่เชื่อมต่ออยู่กับ Air Quality Monitoring Platform ทั้งหมด

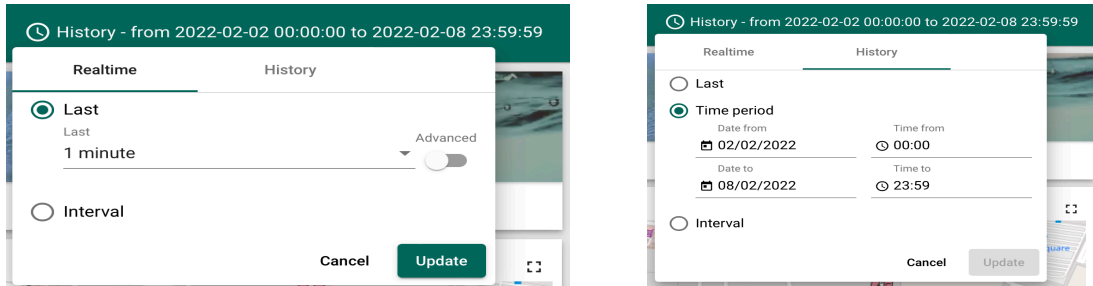
หมายเลขที่ 5 บริเวณแสดงค่า PM 2.5 และ Carbon Monoxide แบบเรียลไทม์ของอุปกรณ์วัดคุณภาพอากาศที่เชื่อมต่ออยู่กับ Air Quality Monitoring Platform โดยสามารถเลือกอุปกรณ์จากบริเวณ หมายเลข 3 เพื่อแสดงค่าของแต่ละอุปกรณ์ได้ทันที

หมายเลขที่ 6 บริเวณแสดงแผนที่และตำแหน่งที่ตั้งของอุปกรณ์วัดคุณภาพอากาศและหอฟอกอากาศอัจฉริยะที่เชื่อมต่ออยู่กับ Air Quality Monitoring Platform ทั้งหมด

โครงการการศึกษาและพัฒนาหอฟอกอากาศอัจฉริยะ โดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์และระบบควบคุมดูแลผ่านเทคโนโลยีไอโอที เพื่อการลดฝุ่นละอองขนาดเล็ก (PM 2.5) ในพื้นที่สาธารณะ

### การกำหนดช่วงเวลาเพื่อแสดงผลข้อมูล

เมื่อผู้ใช้กดปุ่มที่แถบเมนูตามภาพด้านบนจะปรากฏหน้าต่างแสดงรายละเอียดให้ผู้ใช้สามารถระบุช่วงเวลาของข้อมูลที่จะถูกนำมาแสดงผลหรือสำหรับการแสดงผลของข้อมูลและให้ผู้ใช้ดาวน์โหลดข้อมูลตามช่วงเวลา



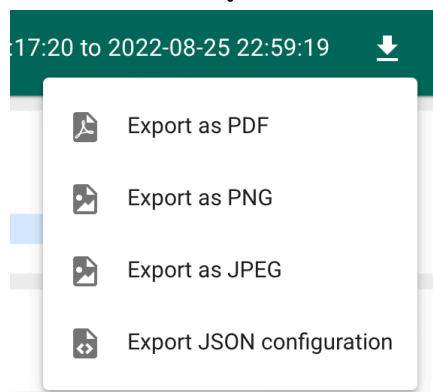
ภาพที่ 51 รูปภาพการกำหนดช่วงเวลาเพื่อแสดงผลข้อมูล

ซึ่งสามารถกำหนดได้ 2 รูปแบบหลัก

1. Realtime กำหนดความละเอียดของเวลา ซึ่งมีค่าละเอียดที่สุดคือ 1 วินาที ถึง 30 วัน รวมทั้งยังสามารถกำหนดแบบช่วงเวลาได้
2. History กำหนดการแสดงผลย้อนหลัง แบ่งตามความละเอียดของเวลา ช่วงเวลา และ แบบช่วงเวลา

### การนำข้อมูลที่เก็บไว้ออกมาในรูปแบบไฟล์ชนิดต่าง ๆ

เมื่อผู้ใช้กดปุ่มบริเวณด้านบนขวามือของจอที่มีสัญลักษณ์  เมื่อกดเข้าแล้วจะปรากฏหน้าต่างสำหรับการเลือกรูปแบบของไฟล์สำหรับการนำข้อมูลออก



ภาพที่ 52 ภาพแสดงประเภทไฟล์ที่สามารถดาวน์โหลดได้นั้นมีทั้งหมด 4 ประเภท ได้แก่ PDF, PNG, JPEG, JSON

โครงการการศึกษาและพัฒนาหอฟอกอากาศอัจฉริยะ โดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์และระบบควบคุมดูแลผ่านเทคโนโลยีไอโอที เพื่อการลดฝุ่นละอองขนาดเล็ก (PM 2.5) ในพื้นที่สาธารณะ

### การเข้าสู่ข้อมูลรายละเอียดแต่ละอุปกรณ์

เมื่อผู้ใช้งานเข้าถึงหน้าแรกของ Dashboard และกดเลือกบริเวณกรอบสีแดงตามภาพด้านล่างจะสามารถเข้าสู่หน้าแสดงผลของอุปกรณ์ที่เลือกได้

The screenshot displays the 'Air Quality System' dashboard. On the left, a table lists eight nodes (AQ-Node-01 to AQ-Node-08) with columns for Entity name, Status, Temperature, PM2.5, and CO. A red box highlights the 'AQ-Node-01' row. On the right, a detailed view for 'AQ-Node-01' shows a clock at 14:00, a PM 2.5 reading of 0.30 ppm, and a Carbon Monoxide icon. Below this is a 'Device Location' map showing the node's position in a city area.

Entity name ↑	Status	Temperature	PM2.5	CO
AQ-Node-01	●	29.3 °C	14	0.3 ppm
AQ-Node-02	●	29.0 °C	17.8	0.4 ppm
AQ-Node-03	●	31.6 °C	19.5	0.7 ppm
AQ-Node-04	●	28.8 °C	7.9	0.5 ppm
AQ-Node-05	●	29.2 °C	19.4	0.3 ppm
AQ-Node-06	●	28.7 °C	7	0.6 ppm
AQ-Node-07	●	27.1 °C	11.5	0.2 ppm
AQ-Node-08	●	29.6 °C	14.4	0.3 ppm

ภาพที่ 53 ภาพแสดงตำแหน่งใน platform การเข้าสู่รายละเอียดของแต่ละอุปกรณ์

โครงการการศึกษาและพัฒนาหอฟอกอากาศอัจฉริยะ โดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์และระบบควบคุมดูแลผ่านเทคโนโลยีไอโอที เพื่อการลดฝุ่นละอองขนาดเล็ก (PM 2.5) ในพื้นที่สาธารณะ



ภาพที่ 54 ภาพแสดงตำแหน่งการแสดงผลใน platform

หมายเลขที่ 1 ชื่ออุปกรณ์วัดคุณภาพอากาศ

หมายเลขที่ 2 บริเวณกำหนดช่วงเวลาและความละเอียดของข้อมูลสำหรับการแสดงผล

หมายเลขที่ 3 ปุ่มสำหรับการนำข้อมูลที่เก็บไว้ออกมาในรูปแบบไฟล์ชนิดต่าง ๆ ได้แก่ PDF PNG JPEG และ JSON

หมายเลขที่ 4 เกจแสดงค่าฝุ่นละอองขนาดเล็ก PM2.5

โครงการการศึกษาและพัฒนาหอฟอกอากาศอัจฉริยะ โดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์และระบบควบคุมดูแลผ่านเทคโนโลยีไอโอที เพื่อการลดฝุ่นละอองขนาดเล็ก (PM 2.5) ในพื้นที่สาธารณะ

หมายเลขที่ 5 เกจแสดงค่าฝุ่นละอองขนาดเล็ก PM10

หมายเลขที่ 6 เกจแสดงค่าอุณหภูมิ (Temperature)

หมายเลขที่ 7 เกจแสดงค่าความชื้น (Humidity)

หมายเลขที่ 8 เกจแสดงค่าไนโตรเจนไดออกไซด์ NO2

หมายเลขที่ 9 เกจแสดงค่าคาร์บอนมอนอกไซด์ CO

หมายเลขที่ 10 บริเวณกำหนดช่วงเวลาและกำหนดขนาดข้อมูลที่ต้องการแสดงผล

หมายเลขที่ 11 กราฟแสดงค่าอุณหภูมิและความชื้น

หมายเลขที่ 12 กราฟแสดงค่า PM2.5 และ PM10

หมายเลขที่ 13 กราฟแสดงค่า NO2 และ CO

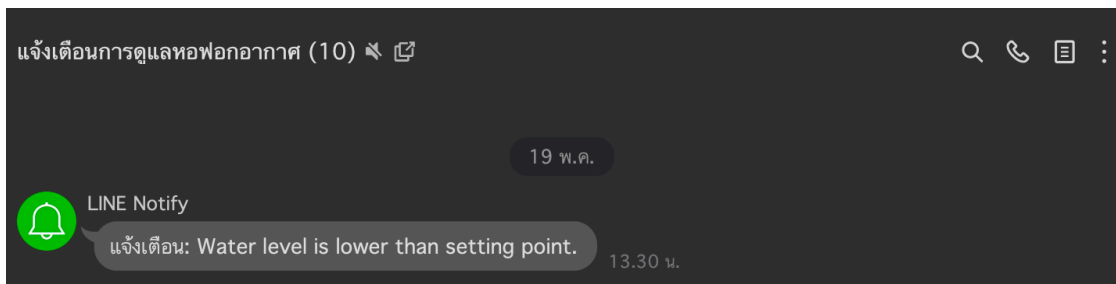
หมายเลขที่ 14 ตารางแสดงค่าที่วัดได้ทั้งหมดแบบเรียลไทม์

### ระบบการบำรุงรักษาเชิงป้องกัน และระบบการแจ้งเตือนตรวจสอบอัจฉริยะ (Preventive Maintenance and Smart Alert Monitoring System)

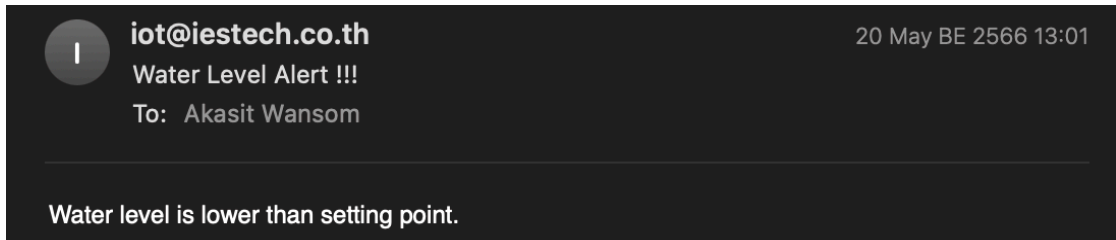
ข้อมูลที่ได้รับจากเซนเซอร์ที่ติดตั้งในหอฟอกอัจฉริยะ นอกจากจะใช้เพิ่มการตรวจสอบประสิทธิภาพการทำงานของหอฟอกอากาศแล้วนั้น ยังถูกใช้มาวิเคราะห์สำหรับการบำรุงรักษาตัวหอฟอกอากาศ ซึ่งการบำรุงรักษาเชิงป้องกันได้ถูกนำมาประยุกต์ใช้ร่วมกับการตรวจสอบและบำรุงรักษาหอฟอกอากาศอัจฉริยะ โดยการบำรุงรักษาเชิงป้องกันเป็นหนึ่งในรูปแบบการดูแลสภาพเครื่องจักรและอุปกรณ์ต่าง ๆ ซึ่งได้ประยุกต์ใช้ภายในโรงการอุตสาหกรรม เพื่อใช้สำหรับการตรวจสอบ ซ่อมบำรุงหรือเปลี่ยนแปลงอุปกรณ์ต่าง ๆ ตามเวลาที่มีการกำหนดไว้ ซึ่งมีข้อดีคือทำให้เครื่องจักรหรืออุปกรณ์ที่มีการวางแผนการใช้งานในระยะยาว ผู้ตรวจสอบรับรู้ว่าอุปกรณ์ใดควรเปลี่ยนเวลาใดและแต่ละชิ้นส่วนต้องดูแลรักษาในเวลาใด เพื่อให้สามารถวิเคราะห์และพิจารณาวางแผนการดูแลรักษาและซ่อมบำรุงหลีกเลี่ยงอุบัติเหตุหรือความผิดพลาดที่อาจเกิดขึ้นจากอายุการใช้งาน รวมถึงการใช้งานอุปกรณ์หรือของเหลวที่ใกล้จะหมด เพื่อดำเนินการเติมหรือดูแลคุณภาพของอุปกรณ์ ให้สามารถใช้งานเครื่องจักรและอุปกรณ์ได้อย่างต่อเนื่อง ทั้งนี้ในส่วนของแพลตฟอร์มได้มีการทำงาน ร่วมกับระบบ Smart Alert Monitoring System ที่ช่วยในการแจ้งเตือนเจ้าหน้าที่หรือหน่วยงานที่ทำหน้าที่ดูแลและซ่อมบำรุงหอฟอกอากาศอัจฉริยะ ที่สามารถแจ้งเตือนผ่าน Line Notify และ การส่ง Email เพื่อให้เจ้าหน้าที่เข้ามาดูแลและตรวจสอบการทำงานของหอฟอกอากาศได้อย่างทันท่วงที เช่นสิ่งสำคัญของหอฟอกอากาศอัจฉริยะคือน้ำ เป็นสิ่งจำเป็นในหลักการการฟอกอากาศของหอฟอกอากาศอัจฉริยะ ซึ่งปริมาณน้ำในหอฟอกมีผลต่อประสิทธิภาพในการฟอกอากาศของหอฟอกอากาศอัจฉริยะ

โครงการการศึกษาและพัฒนาหอฟอกอากาศอัจฉริยะ โดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์และระบบควบคุมดูแลผ่านเทคโนโลยีไอโอที เพื่อการลดฝุ่นละอองขนาดเล็ก (PM 2.5) ในพื้นที่สาธารณะ

ระบบ Smart Alert Monitoring System จึงเข้ามาช่วยในการตรวจสอบวัดรับน้ำในหอฟอกอากาศแบบ Realtime และสามารถส่งการแจ้งเตือนอัตโนมัติไปยังเจ้าหน้าที่หรือหน่วยงานที่ดูแล ซึ่งในโครงการนี้ ทางเทศบาลเมืองพิษณุโลกได้กรุณาให้ความร่วมมือในการดูแลตัวหอฟอกอากาศอัจฉริยะ ดังนั้นเมื่อระดับในภาวนในหอฟอกอากาศมีระดับต่ำกว่าค่าที่กำหนดซึ่งส่งกระทบโดยตรงต่อประสิทธิภาพการทำงานของหอฟอกอากาศ ระบบจะแจ้งเตือนผ่าน Line Notify และ Email เพื่อแจ้งให้ตรวจสอบระดับน้ำและดำเนินการเติมน้ำให้อยู่ในระดับที่เหมาะสม ทำให้สะดวกสบายในการดูแลรักษาและคงประสิทธิภาพการทำงานอย่างเต็มที่ของหอฟอกอากาศได้ต่อเนื่อง



ภาพที่ 55 ภาพการแจ้งเตือนระดับน้ำ ผ่าน Line Notify ในหอฟอกอากาศต่ำกว่าระดับที่ทำให้หอฟอกอากาศมีประสิทธิภาพสูงสุด



ภาพที่ 56 ภาพการแจ้งเตือนระดับน้ำ ผ่าน Email ในหอฟอกอากาศต่ำกว่าระดับที่ทำให้หอฟอกอากาศมีประสิทธิภาพสูงสุด

โดยในการพัฒนาระบบ Smart Alert Monitoring System ทางคณะผู้จัดทำยังคำนึงถึงการพัฒนาระบบให้สามารถต่อยอดในการทำงานร่วมกับการดูแลบำรุงรักษาแบบการทำนายล่วงหน้า หรือ Predictive Maintenance โดยในการพัฒนาส่วนนี้ทางคณะวิจัยได้วางแผนเพื่อพัฒนาในส่วนของโครงการต่อเนื่องข้างหน้า ซึ่งทางคณะวิจัยกำลังดำเนินจัดทำเอกสารเพื่อขอของบสนับสนุนเงินจากกองทุนฯ ในการพัฒนาระบบดังกล่าวต่อไปในอนาคต เพื่อพัฒนาประสิทธิภาพการทำงานควบคู่กับการพัฒนาหอฟอกอากาศให้มีประสิทธิภาพสูงสุด เพื่อตอบสนองต่อการแก้ปัญหาเรื่องฝุ่นละอองขนาดเล็ก PM 2.5 ในอนาคต

โครงการการศึกษาและพัฒนาหอฟอกอากาศอัจฉริยะ โดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์และระบบควบคุมผ่านเทคโนโลยีไอโอที เพื่อการลดฝุ่นละอองขนาดเล็ก (PM 2.5) ในพื้นที่สาธารณะ

โครงการการศึกษาและพัฒนาหอฟอกอากาศอัจฉริยะ โดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์และระบบควบคุมดูแลผ่านเทคโนโลยีไอโอที เพื่อการลดฝุ่นละอองขนาดเล็ก (PM 2.5) ในพื้นที่สาธารณะ

## บทที่ 4

### ผลการวิจัย และการวิจารณ์ผล

#### การติดตั้งเครื่องวัดฝุ่นละอองขนาดเล็ก (PM2.5)

จากการพัฒนาเครื่องวัดฝุ่นละอองขนาดเล็ก (PM2.5) จำนวนทั้งหมด 8 ตัว ซึ่งมีการเชื่อมต่อผ่าน NB-IoT เพื่อรับส่งข้อมูลกับ Air Quality Monitoring Platform และการดำเนินโครงการในช่วงที่ 3 และ 4 เครื่องวัดฝุ่นละอองฯ ทั้งหมดจะถูกนำไปติดตั้งใน 2 พื้นที่ ได้แก่

1. ในพื้นที่จังหวัดพิษณุโลก ซึ่งเป็นพื้นที่เป้าหมายของการดำเนินโครงการ โดยผ่านความร่วมมือกับมหาวิทยาลัยนเรศวร และเทศบาลจังหวัดพิษณุโลก
2. ในบริเวณศูนย์วิจัยเชื้อเพลิงและพลังงานจากชีวมวล ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ซึ่งตั้งอยู่ที่จังหวัดสระบุรี เนื่องจากพื้นที่ดังกล่าวเป็นสถานที่สำหรับขั้นตอนการประกอบและทดสอบประสิทธิภาพของหอฟอกอากาศที่ได้พัฒนาขึ้นในโครงการ

เครื่องวัดฝุ่นละอองขนาดเล็ก แต่ละตัวได้ถูกกำหนดชื่อและพื้นที่การติดตั้งดังตารางสรุปข้อมูลด้านล่างนี้

#### ตารางที่ 19 แสดงรายละเอียดตำแหน่งจุดการติดตั้งเครื่องวัดฝุ่นละอองขนาดเล็ก (PM2.5)

ลำดับ	หมายเลขเครื่อง	สถานที่ติดตั้ง
1	AQ-2154	บริษัท ไทยโซลาร์เวย์ จำกัด
2	AQ-6912	บริษัท ไทยโซลาร์เวย์ จำกัด
3	AQ-2739	วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยนเรศวร จังหวัดพิษณุโลก
4	AQ-7704	วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยนเรศวร จังหวัดพิษณุโลก
5	AQ-6656	จุดรอกขนส่งสาธารณะหน้าโรงพยาบาลพุทธชินราช จังหวัดพิษณุโลก
6	AQ-6758	หลังวัดพระศรีรัตนมหาธาตุวรมหาวิหาร จังหวัดพิษณุโลก
7	AQ-9844	ศูนย์วิจัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อำเภอแก่งคอย จังหวัดสระบุรี
8	AQ-6626	ศูนย์วิจัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อำเภอแก่งคอย จังหวัดสระบุรี

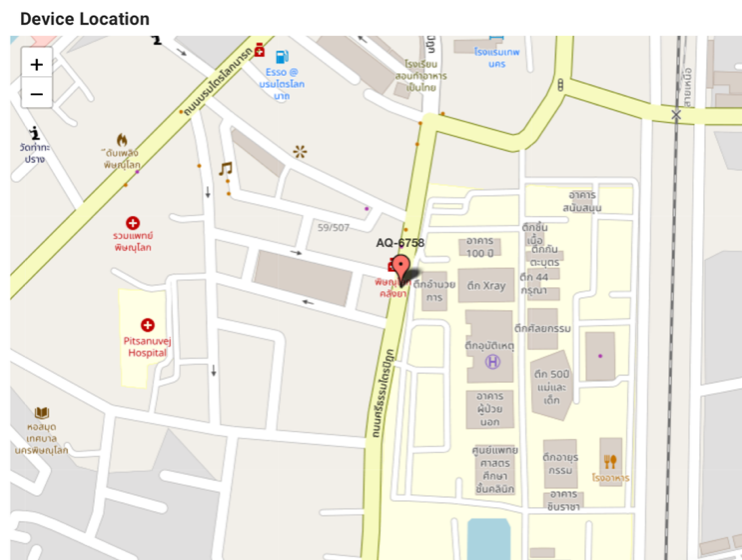
โครงการการศึกษาและพัฒนาหอฟอกอากาศอัจฉริยะ โดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์และระบบควบคุมดูแลผ่านเทคโนโลยีไอโอที เพื่อการลดฝุ่นละอองขนาดเล็ก (PM 2.5) ในพื้นที่สาธารณะ

รายละเอียดตำแหน่งจุดการติดตั้งเครื่องวัดฝุ่นละอองขนาดเล็ก (PM2.5) ในจังหวัดพิษณุโลก

1. บริเวณจุดรอรถขนส่งหน้าธารณะหน้าโรงพยาบาลพุทธชินราช จังหวัดพิษณุโลก



ภาพที่ 57 การติดตั้งเครื่องวัดฝุ่นละอองขนาดเล็ก (PM2.5) บริเวณจุดรอรถขนส่งสาธารณะหน้าโรงพยาบาลพุทธชินราช



ภาพที่ 58 แผนที่ตำแหน่งติดตั้งเครื่องวัดฝุ่นละอองขนาดเล็ก (PM2.5) บริเวณจุดรอรถขนส่งสาธารณะหน้าโรงพยาบาลพุทธชินราช

โครงการการศึกษาและพัฒนาหอฟอกอากาศอัจฉริยะ โดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์และระบบควบคุมดูแลผ่านเทคโนโลยีไอโอที เพื่อการลดฝุ่นละอองขนาดเล็ก (PM 2.5) ในพื้นที่สาธารณะ

## 2. บริเวณวิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยนเรศวร จังหวัดพิษณุโลก



ภาพที่ 59 การติดตั้งเครื่องวัดฝุ่นละอองขนาดเล็ก (PM2.5) บริเวณวิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยนเรศวร



ภาพที่ 60 แผนที่ตำแหน่งติดตั้งเครื่องวัดฝุ่นละอองขนาดเล็ก (PM2.5) บริเวณวิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยนเรศวร

โครงการการศึกษาและพัฒนาหอฟอกอากาศอัจฉริยะ โดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์และระบบควบคุมดูแลผ่านเทคโนโลยีไอโอที เพื่อการลดฝุ่นละอองขนาดเล็ก (PM 2.5) ในพื้นที่สาธารณะ

3. บริเวณจตุรอรบประจำทางหลังวัดพระศรีมหาธาตุวรมหาวิหาร จังหวัดพิษณุโลก



ภาพที่ 61 การติดตั้งเครื่องวัดฝุ่นละอองขนาดเล็ก (PM2.5) บริเวณหลังวัดพระศรีมหาธาตุวรมหาวิหาร จังหวัดพิษณุโลก



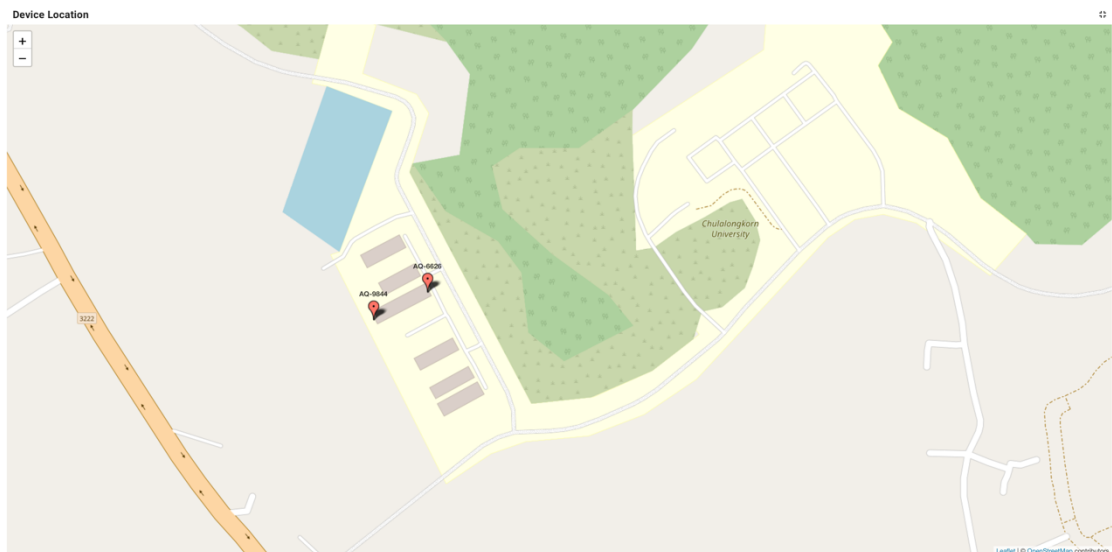
ภาพที่ 62 แผนที่ตำแหน่งติดตั้งเครื่องวัดฝุ่นละอองขนาดเล็ก (PM2.5) บริเวณหลังวัดพระศรีมหาธาตุวรมหาวิหาร จังหวัดพิษณุโลก

โครงการการศึกษาและพัฒนาหอฟอกอากาศอัจฉริยะ โดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์และระบบควบคุมดูแลผ่านเทคโนโลยีไอโอที เพื่อการลดฝุ่นละอองขนาดเล็ก (PM 2.5) ในพื้นที่สาธารณะ

#### 4. บริเวณศูนย์วิจัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อำเภอแก่งคอย จังหวัดสระบุรี



ภาพที่ 63 การติดตั้งเครื่องวัดฝุ่นละอองขนาดเล็ก (PM2.5) บริเวณศูนย์วิจัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย จังหวัดสระบุรี

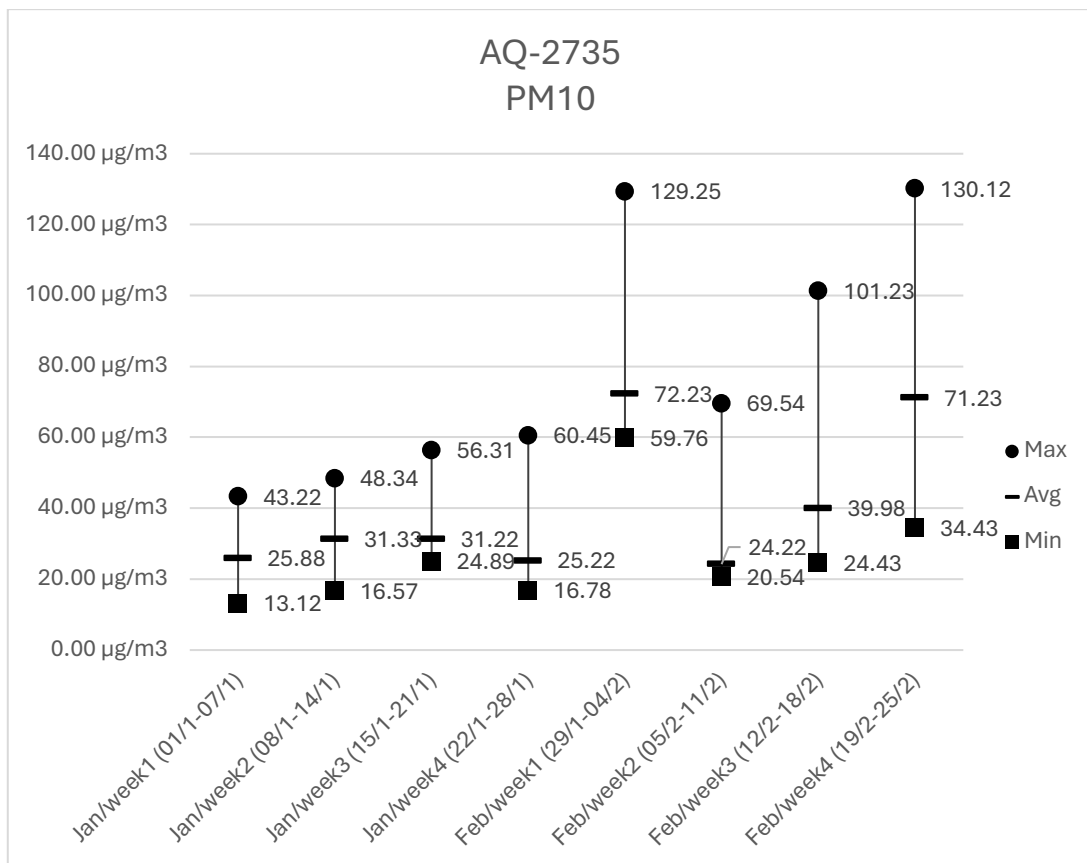


ภาพที่ 64 แผนที่ตำแหน่งติดตั้งเครื่องวัดฝุ่นละอองขนาดเล็ก (PM2.5) บริเวณศูนย์วิจัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย จังหวัดสระบุรี

โครงการการศึกษาและพัฒนาหอฟอกอากาศอัจฉริยะ โดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์และระบบควบคุมดูแลผ่านเทคโนโลยีไอโอที เพื่อการลดฝุ่นละอองขนาดเล็ก (PM 2.5) ในพื้นที่สาธารณะ

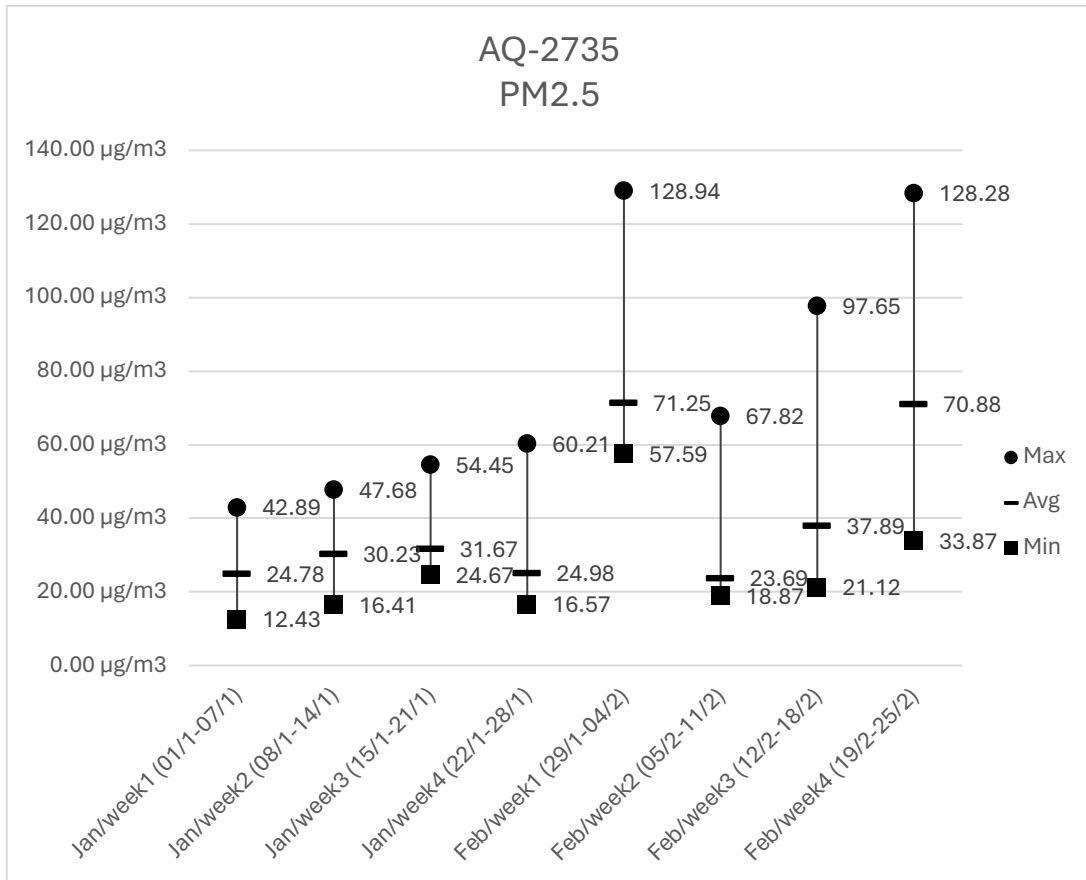
### ผลการศึกษาและวิเคราะห์ระดับปัญหาฝุ่นละอองในพื้นที่ดำเนินโครงการ

จากการดำเนินการติดตั้งเครื่องวัดฝุ่นละอองขนาดเล็ก PM 2.5 ในพื้นที่การดำเนินโครงการ ในงวดงานที่สาม ได้แก่ที่จังหวัดพิษณุโลกจำนวน 4 จุด ที่บริษัทไทยโซลาร์เวย์จำนวน 2 จุด และที่ศูนย์วิจัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย จังหวัดสระบุรี จำนวน 2 จุด เพื่อทดสอบการทำงาน การเกิดปัญหาระหว่างใช้งาน และการวัดคุณภาพอากาศ ณ พื้นที่ดำเนินโครงการจริง พบว่าอุปกรณ์เครื่องวัดฝุ่นละอองขนาดเล็ก สามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ และสามารถวัดค่าฝุ่นละอองขนาดเล็กทั้งขนาดได้ทั้ง PM 2.5 และ PM 10 ซึ่งสามารถนำค่าฝุ่นละอองจากเครื่องวัดฝุ่นละอองขนาดเล็กจำนวน 4 จุด ที่จังหวัดพิษณุโลกมาศึกษาวิเคราะห์และสรุปผลเบื้องต้นได้ดังนี้



ภาพที่ 65 แผนภาพแสดงข้อมูลสรุปของ ฝุ่นละอองขนาดเล็ก PM10 จากเครื่องวัดฝุ่นละอองขนาดเล็ก (PM2.5) หมายเลข AQ-2735 ตั้งแต่เดือน มกราคม ถึง กุมภาพันธ์ ปี 2566 เป็นรายสัปดาห์ บริเวณวิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยนเรศวร

โครงการการศึกษาและพัฒนาหอฟอกอากาศอัจฉริยะ โดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์และระบบควบคุมดูแลผ่านเทคโนโลยีไอโอที เพื่อการลดฝุ่นละอองขนาดเล็ก (PM 2.5) ในพื้นที่สาธารณะ



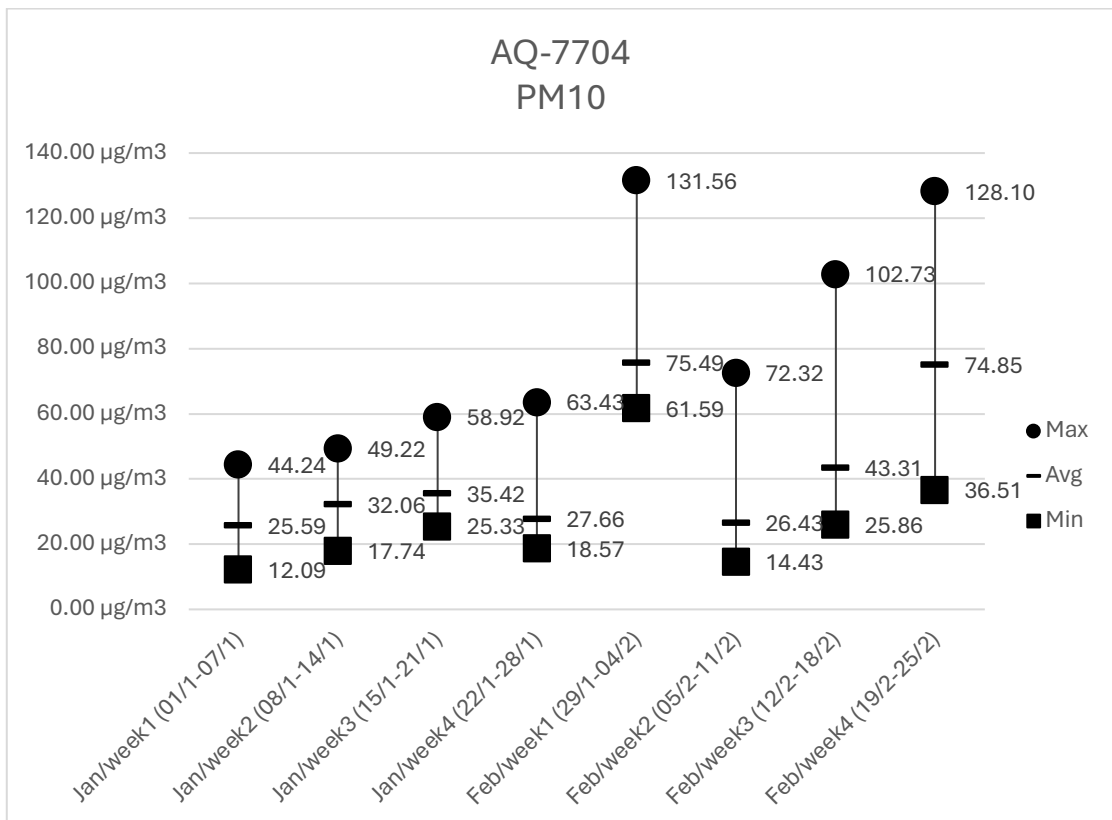
ภาพที่ 66 แผนภาพแสดงข้อมูลสรุปของ ฝุ่นละอองขนาดเล็ก PM2.5 จากเครื่องวัดฝุ่นละอองขนาดเล็ก (PM2.5) หมายเลข AQ-2735 ตั้งแต่เดือน มกราคม ถึง กุมภาพันธ์ ปี 2566 เป็นรายสัปดาห์ บริเวณวิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยนเรศวร

จากกราฟสรุปข้อมูลค่าฝุ่นละอองขนาดเล็ก PM10 และ PM 2.5 จากเครื่องวัดฝุ่นละอองขนาดเล็ก PM2.5 หมายเลข AQ-7704 ที่ติดตั้ง บริเวณ วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยนเรศวร จังหวัด พิษณุโลก พบว่าตั้งแต่ช่วงเดือนมกราคม 2566 ถึง สิ้นเดือนกุมภาพันธ์ 2566 นั้น ค่าฝุ่นละอองขนาดเล็ก PM10 และ PM2.5 สูงที่สุดที่วัดค่าได้ อยู่ในช่วงสัปดาห์แรกของเดือนกุมภาพันธ์ โดยค่าสูงสุดของค่าฝุ่นละอองขนาดเล็ก PM10 อยู่ที่  $129.25 \mu\text{g}/\text{m}^3$  และ ค่าสูงสุดของค่าฝุ่นละอองขนาดเล็ก PM2.5 อยู่ที่  $128.94 \mu\text{g}/\text{m}^3$  ในส่วนของค่าฝุ่นละอองขนาดเล็ก PM10 และ PM2.5 ต่ำที่สุดที่วัดค่าได้ อยู่ในช่วงสัปดาห์แรกของเดือนมกราคม โดยค่าต่ำสุดของค่าฝุ่นละอองขนาดเล็ก PM10 อยู่ที่  $13.12 \mu\text{g}/\text{m}^3$  และ ค่าต่ำสุดของค่าฝุ่นละอองขนาดเล็ก PM2.5 อยู่ที่  $12.45 \mu\text{g}/\text{m}^3$

ซึ่งจากทั้งสองกราฟแสดงข้อมูลสรุปค่าฝุ่นละอองขนาดเล็ก PM10 และ PM 2.5 มีค่าเฉลี่ยสูงสุดของค่าฝุ่นละอองขนาดเล็ก PM10 อยู่ที่  $72.23 \mu\text{g}/\text{m}^3$  และ ค่าเฉลี่ยสูงสุดของค่าฝุ่นละอองขนาดเล็ก

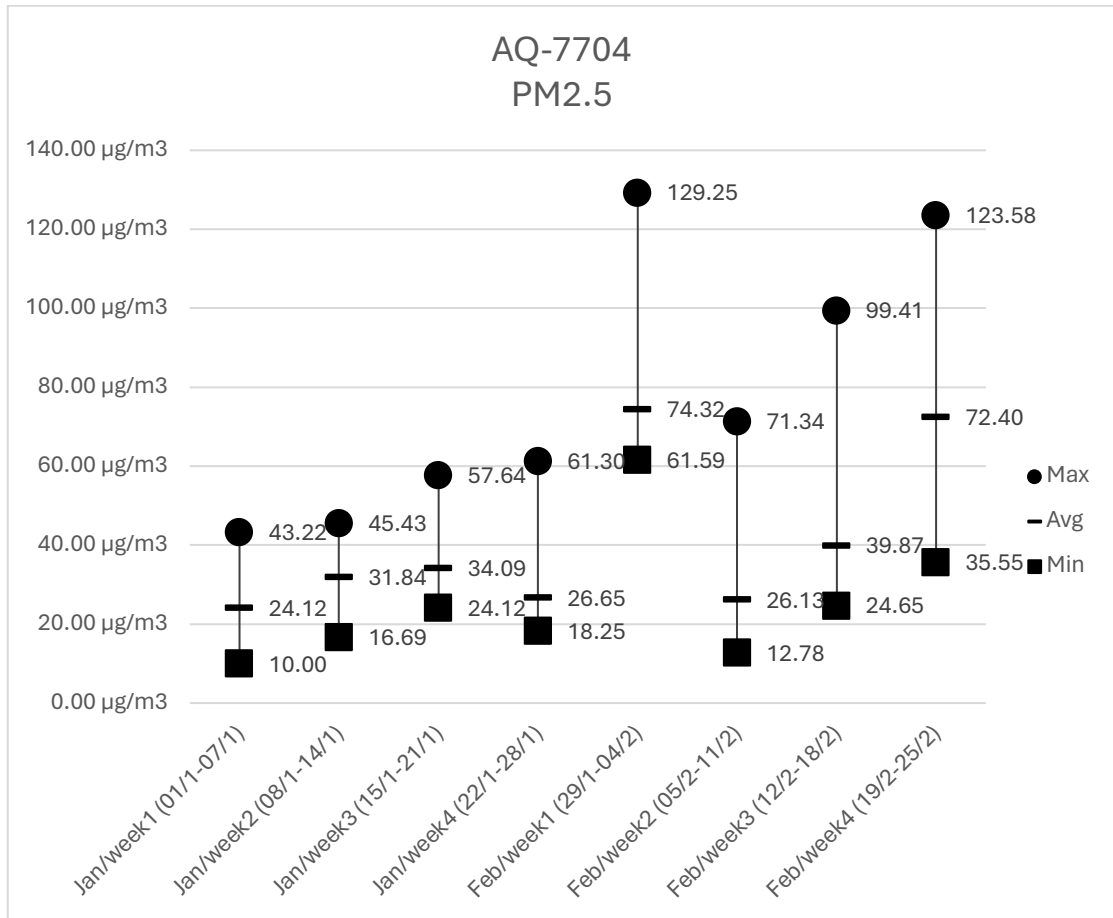
โครงการการศึกษาและพัฒนาหอฟอกอากาศอัจฉริยะ โดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์และระบบควบคุมดูแลผ่านเทคโนโลยีไอโอที เพื่อการลดฝุ่นละอองขนาดเล็ก (PM 2.5) ในพื้นที่สาธารณะ

PM2.5 อยู่ที่  $71.25 \mu\text{g}/\text{m}^3$  ตามลำดับ ซึ่งสามารถสรุปได้ว่าค่าฝุ่นละอองเฉลี่ยทั้ง PM10 และ PM2.5 ในสัปดาห์แรกและสัปดาห์สุดท้ายเดือนกุมภาพันธ์ 2566 มีค่าเกิน  $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$  ตามมาตรฐานของกรมควบคุมมลพิษกำหนด แม้ว่าในสัปดาห์อื่นค่าเฉลี่ยของค่าฝุ่นละอองขนาดเล็ก PM10 และ PM 2.5 นั้นจะอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานแต่ค่าสูงสุดที่สุดได้ยังคงมีค่าเกินมาตรฐานของกรมควบคุมมลพิษที่กำหนดไว้



ภาพที่ 67 แผนภาพแสดงข้อมูลสรุปของ ฝุ่นละอองขนาดเล็ก PM10 จากเครื่องวัดฝุ่นละอองขนาดเล็ก (PM2.5) หมายเลข AQ-7704 ตั้งแต่เดือน มกราคม ถึง กุมภาพันธ์ ปี 2566 เป็นรายสัปดาห์ บริเวณวิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยนเรศวร

โครงการการศึกษาและพัฒนาหอฟอกอากาศอัจฉริยะ โดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์และระบบควบคุมดูแลผ่านเทคโนโลยีไอโอที เพื่อการลดฝุ่นละอองขนาดเล็ก (PM 2.5) ในพื้นที่สาธารณะ

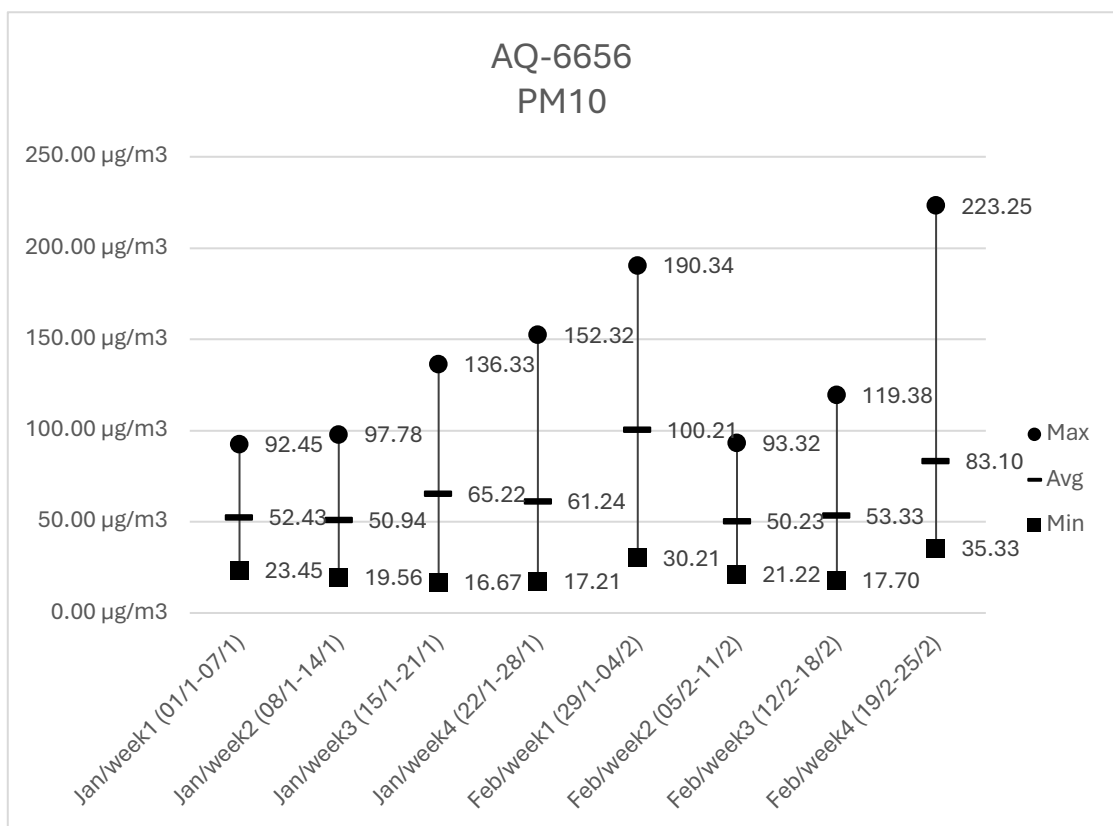


ภาพที่ 68 แผนภาพแสดงข้อมูลสรุปของ ฝุ่นละอองขนาดเล็ก PM2.5 จากเครื่องวัดฝุ่นละอองขนาดเล็ก (PM2.5) หมายเลข AQ-7704 ตั้งแต่เดือน มกราคม ถึง กุมภาพันธ์ ปี 2566 เป็นรายสัปดาห์ บริเวณวิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยนเรศวร

จากกราฟสรุปข้อมูลค่าฝุ่นละอองขนาดเล็ก PM10 และ PM 2.5 จากเครื่องวัดฝุ่นละอองขนาดเล็ก PM2.5 หมายเลข AQ-7704 ที่ติดตั้ง บริเวณ วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยนเรศวร จังหวัด พิษณุโลก พบว่าตั้งแต่ช่วงเดือนมกราคม 2566 ถึง สิ้นเดือนกุมภาพันธ์ 2566 นั้น ค่าฝุ่นละอองขนาดเล็ก PM10 และ PM2.5 สูงที่สุดที่วัดค่าได้ อยู่ในช่วงสัปดาห์แรกของเดือนกุมภาพันธ์ โดยค่าสูงสุดของค่าฝุ่นละอองขนาดเล็ก PM10 อยู่ที่  $131.56 \mu\text{g}/\text{m}^3$  และ ค่าสูงสุดของค่าฝุ่นละอองขนาดเล็ก PM2.5 อยู่ที่  $129.25 \mu\text{g}/\text{m}^3$  ในส่วนของค่าฝุ่นละอองขนาดเล็ก PM10 และ PM2.5 ต่ำที่สุดที่วัดค่าได้ อยู่ในช่วงสัปดาห์แรกของเดือนมกราคม โดยค่าต่ำสุดของค่าฝุ่นละอองขนาดเล็ก PM10 อยู่ที่  $12.09 \mu\text{g}/\text{m}^3$  และ ค่าต่ำสุดของค่าฝุ่นละอองขนาดเล็ก PM2.5 อยู่ที่  $10.00 \mu\text{g}/\text{m}^3$

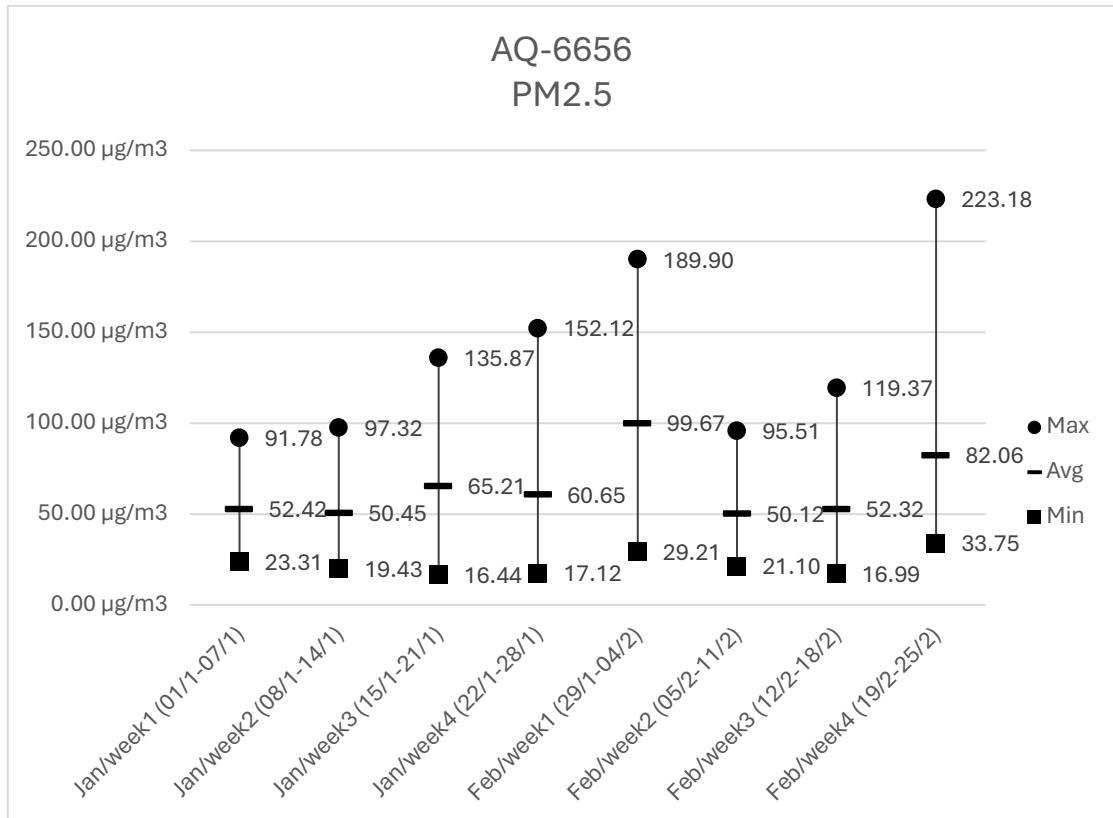
โครงการการศึกษาและพัฒนาหอฟอกอากาศอัจฉริยะ โดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์และระบบควบคุมดูแลผ่านเทคโนโลยีไอโอที เพื่อการลดฝุ่นละอองขนาดเล็ก (PM 2.5) ในพื้นที่สาธารณะ

ซึ่งจากทั้งสองกราฟแสดงข้อมูลสรุปค่าฝุ่นละอองขนาดเล็ก PM10 และ PM 2.5 มีค่าเฉลี่ยสูงสุดของค่าฝุ่นละอองขนาดเล็ก PM10 อยู่ที่  $75.49 \mu\text{g}/\text{m}^3$  และ ค่าเฉลี่ยสูงสุดของค่าฝุ่นละอองขนาดเล็ก PM2.5 อยู่ที่  $74.32 \mu\text{g}/\text{m}^3$  ตามลำดับ ซึ่งสามารถสรุปได้ว่าค่าฝุ่นละอองเฉลี่ยทั้ง PM10 และ PM2.5 ในสัปดาห์แรกและสัปดาห์สุดท้ายเดือนกุมภาพันธ์ 2566 มีค่าเกิน  $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$  ตามมาตรฐานของกรมควบคุมมลพิษกำหนด แม้ว่าในสัปดาห์อื่นค่าเฉลี่ยของค่าฝุ่นละอองขนาดเล็ก PM10 และ PM 2.5 นั้นจะอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานแต่ค่าสูงสุดที่สุดได้ยังคงมีค่าเกินมาตรฐานของกรมควบคุมมลพิษที่กำหนดไว้



ภาพที่ 69 แผนภาพแสดงข้อมูลสรุปของ ฝุ่นละอองขนาดเล็ก PM10 จากเครื่องวัดฝุ่นละอองขนาดเล็ก (PM2.5) หมายเลข AQ-6656 ตั้งแต่เดือน มกราคม ถึง กุมภาพันธ์ ปี 2566 เป็นรายสัปดาห์ บริเวณจุดรอรถสาธารณะหน้าโรงพยาบาลพุทธชินราช

โครงการการศึกษาและพัฒนาหอฟอกอากาศอัจฉริยะ โดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์และระบบควบคุมดูแลผ่านเทคโนโลยีไอโอที เพื่อการลดฝุ่นละอองขนาดเล็ก (PM 2.5) ในพื้นที่สาธารณะ

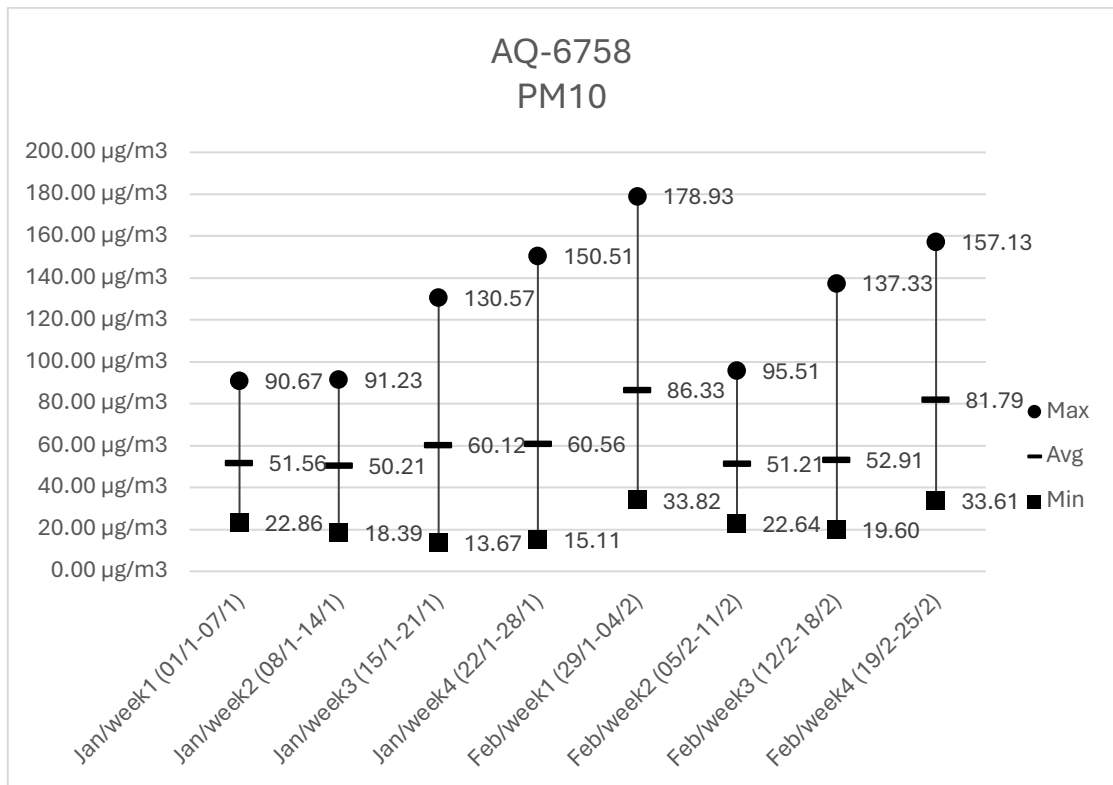


ภาพที่ 70 แผนภาพแสดงข้อมูลสรุปของ ฝุ่นละอองขนาดเล็ก PM2.5 จากเครื่องวัดฝุ่นละอองขนาดเล็ก (PM2.5) หมายเลข AQ-6656 ตั้งแต่เดือน มกราคม ถึง กุมภาพันธ์ ปี 2566 เป็นรายสัปดาห์ บริเวณจุดรอตสาธารณะหน้าโรงพยาบาลพุทธชินราช

จากกราฟสรุปข้อมูลค่าฝุ่นละอองขนาดเล็ก PM10 และ PM 2.5 จากเครื่องวัดฝุ่นละอองขนาดเล็ก PM2.5 หมายเลข AQ-6656 ที่ติดตั้ง บริเวณจุดรอตสาธารณะหน้าโรงพยาบาลพุทธชินราช จังหวัดพิษณุโลก พบว่าตั้งแต่ช่วงเดือนมกราคม 2566 ถึง สิ้นเดือนกุมภาพันธ์ 2566 นั้น ค่าฝุ่นละอองขนาดเล็ก PM10 และ PM2.5 สูงที่สุดที่วัดค่าได้ อยู่ในช่วงสัปดาห์สุดท้ายของเดือนกุมภาพันธ์ โดยค่าสูงสุดของค่าฝุ่นละอองขนาดเล็ก PM10 อยู่ที่ 223.25  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  และ ค่าสูงสุดของค่าฝุ่นละอองขนาดเล็ก PM2.5 อยู่ที่ 223.18  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  ในส่วนของค่าฝุ่นละอองขนาดเล็ก PM10 และ PM2.5 ต่ำที่สุดที่วัดค่าได้ อยู่ในช่วงสัปดาห์ที่สามของเดือนมกราคม โดยค่าต่ำสุดของค่าฝุ่นละอองขนาดเล็ก PM10 อยู่ที่ 16.67  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  และ ค่าต่ำสุดของค่าฝุ่นละอองขนาดเล็ก PM2.5 อยู่ที่ 16.44  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  ซึ่งจากทั้งสองกราฟแสดงข้อมูลสรุปค่าฝุ่นละอองขนาดเล็ก PM10 และ PM 2.5 โดยมีค่าเฉลี่ยสูงสุดของค่าฝุ่นละอองขนาดเล็ก PM10 อยู่ที่ 83.10  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  และ ค่าเฉลี่ยสูงสุดของค่าฝุ่นละอองขนาดเล็ก PM2.5 อยู่ที่ 82.06  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  ตามลำดับ ซึ่งสามารถสรุปได้ว่าค่าฝุ่นละอองเฉลี่ยทั้ง

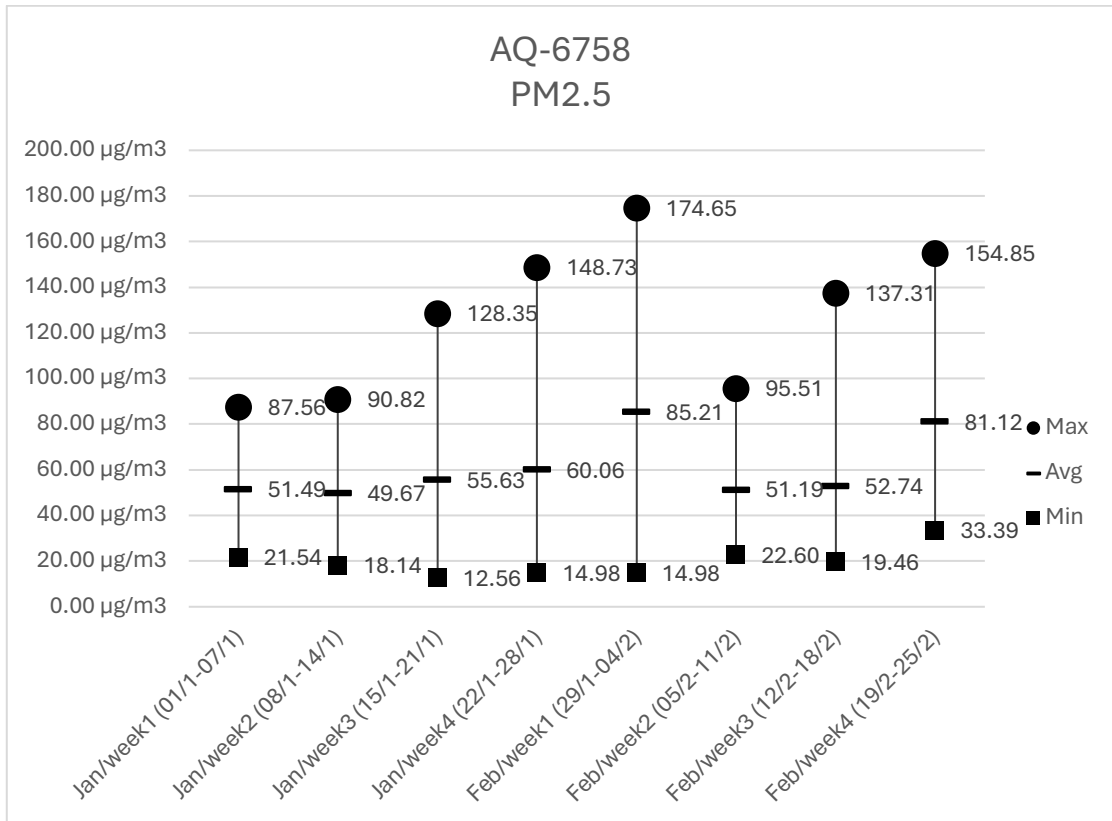
โครงการการศึกษาและพัฒนาหอฟอกอากาศอัจฉริยะ โดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์และระบบควบคุมดูแลผ่านเทคโนโลยีไอโอที เพื่อการลดฝุ่นละอองขนาดเล็ก (PM 2.5) ในพื้นที่สาธารณะ

PM10 และ PM2.5 ในตลอดช่วงเดือนมกราคม 2566 ถึง สิ้นเดือนกุมภาพันธ์ 2566 มีค่าเกิน 50  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  ตามมาตรฐานของกรมควบคุมมลพิษกำหนด โดยมีค่าเฉลี่ยสูงสุดของค่าฝุ่นละอองขนาดเล็ก PM10 ในสัปดาห์สุดท้ายของเดือนกุมภาพันธ์



ภาพที่ 71 แผนภาพแสดงข้อมูลสรุปของ ฝุ่นละอองขนาดเล็ก PM10 จากเครื่องวัดฝุ่นละอองขนาดเล็ก (PM2.5) หมายเลข AQ-6758 ตั้งแต่เดือน มกราคม ถึง กุมภาพันธ์ ปี 2566 เป็นรายสัปดาห์ บริเวณจตุรอรธสาธารณะหลังวัดพระศรีมหาธาตุวรมหาวิหาร

โครงการการศึกษาและพัฒนาหอฟอกอากาศอัจฉริยะ โดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์และระบบควบคุมดูแลผ่านเทคโนโลยีไอโอที เพื่อการลดฝุ่นละอองขนาดเล็ก (PM 2.5) ในพื้นที่สาธารณะ



ภาพที่ 72 แผนภาพแสดงข้อมูลสรุปของ ฝุ่นละอองขนาดเล็ก PM2.5 จากเครื่องวัดฝุ่นละอองขนาดเล็ก (PM2.5) หมายเลข AQ-6758 ตั้งแต่เดือน มกราคม ถึง กุมภาพันธ์ ปี 2566 เป็นรายสัปดาห์ บริเวณจตุรอรธสาธารณะหลังวัดพระศรีมหาธาตุวรรมหาวิหาร

จากกราฟสรุปข้อมูลค่าฝุ่นละอองขนาดเล็ก PM10 และ PM 2.5 จากเครื่องวัดฝุ่นละอองขนาดเล็ก PM2.5 หมายเลข AQ-6758 ที่ติดตั้ง บริเวณ จตุรอรธสาธารณะหลังวัดพระศรีมหาธาตุวรวิหาร จังหวัดพิษณุโลก พบว่าตั้งแต่ช่วงเดือนมกราคม 2566 ถึง สิ้นเดือนกุมภาพันธ์ 2566 นั้น ค่าฝุ่นละอองขนาดเล็ก PM10 และ PM2.5 สูงที่สุดที่วัดค่าได้ อยู่ในช่วงสัปดาห์แรกของเดือนกุมภาพันธ์ โดยค่าสูงสุดของค่าฝุ่นละอองขนาดเล็ก PM10 อยู่ที่ 178.93  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  และ ค่าสูงสุดของค่าฝุ่นละอองขนาดเล็ก PM2.5 อยู่ที่ 174.65  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  ในส่วนของค่าฝุ่นละอองขนาดเล็ก PM10 และ PM2.5 ต่ำที่สุดที่วัดค่าได้ อยู่ในช่วงสัปดาห์ที่สามของเดือนมกราคม โดยค่าต่ำสุดของค่าฝุ่นละอองขนาดเล็ก PM10 อยู่ที่ 13.67  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  และ ค่าต่ำสุดของค่าฝุ่นละอองขนาดเล็ก PM2.5 อยู่ที่ 12.56  $\mu\text{g}/\text{m}^3$

ซึ่งจากทั้งสองกราฟแสดงข้อมูลสรุปค่าฝุ่นละอองขนาดเล็ก PM10 และ PM 2.5 โดยมีค่าเฉลี่ยสูงสุดของค่าฝุ่นละอองขนาดเล็ก PM10 อยู่ที่ 86.33  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  และ ค่าเฉลี่ยสูงสุดของค่าฝุ่นละออง

โครงการการศึกษาและพัฒนาหอฟอกอากาศอัจฉริยะ โดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์และระบบควบคุมดูแลผ่านเทคโนโลยีไอโอที เพื่อการลดฝุ่นละอองขนาดเล็ก (PM 2.5) ในพื้นที่สาธารณะ

ขนาดเล็ก PM2.5 อยู่ที่  $85.25 \mu\text{g}/\text{m}^3$  ตามลำดับ ซึ่งสามารถสรุปได้ว่าค่าฝุ่นละอองเฉลี่ยทั้ง PM10 และ PM2.5 ในตลอดช่วงเดือนมกราคม 2566 ถึง สิ้นเดือนกุมภาพันธ์ 2566 มีค่าเกิน  $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$  ตามมาตรฐานของกรมควบคุมมลพิษกำหนด ยกเว้นสัปดาห์ที่สองของเดือนมกราคมที่มีค่าเฉลี่ยของค่าฝุ่นละอองขนาดเล็ก PM2.5 อยู่ที่  $49.67 \mu\text{g}/\text{m}^3$  ซึ่งใกล้เคียงกับมาตรฐานของกรมควบคุมมลพิษที่กำหนดไว้มาก

โดยข้อมูลที่ได้รับจากเครื่องวัดฝุ่นละอองขนาดเล็ก PM2.5 ทั้ง 4 จุด ณ จังหวัดพิษณุโลก นั้น จะสามารถสรุปเบื้องต้นได้ว่า ในบริเวณที่เครื่องวัดฝุ่นละอองขนาดเล็ก PM2.5 ใกล้ถนนหรือบริเวณพื้นที่ที่มีการสัญจรด้วยรถยนต์หรือจักรยานยนต์นั้นจะมีค่าฝุ่นละอองขนาดเล็กทั้ง PM10 และ PM 2.5 สูงกว่าในบริเวณที่ติดตั้งไกลจากถนน ซึ่งระบุได้ว่า ค่าฝุ่นละอองที่เพิ่มขึ้นมานั้น เกิดจากรถยนต์ จักรยานยนต์ และรถขนส่งสาธารณะ ซึ่งตรงกับสมมุติฐานและข้อมูลอ้างอิง ซึ่งเป็นไปตามวัตถุประสงค์และความต้องการของคณะทำงานในการออกแบบและจัดทำหอฟอกอากาศ ภายใต้การจัดทำโครงการนี้ขึ้นมา ซึ่งจะเห็นได้ว่า จังหวัดพิษณุโลกเป็นอีกจังหวัดหนึ่งในประเทศไทยที่ได้รับผลกระทบโดยตรงจากฝุ่นละอองขนาดเล็ก PM2.5 โดยทราบได้จากการรายงานสภาพปัญหาของฝุ่นละอองขนาดเล็ก PM 2.5 ตามรายงานของสำนักข่าวในประเทศไทยในช่วงเดือนมกราคมและกุมภาพันธ์ ที่ผ่านมา

โครงการการศึกษาและพัฒนาหอฟอกอากาศอัจฉริยะ โดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์และระบบควบคุมดูแลผ่านเทคโนโลยีไอโอที เพื่อการลดฝุ่นละอองขนาดเล็ก (PM 2.5) ในพื้นที่สาธารณะ

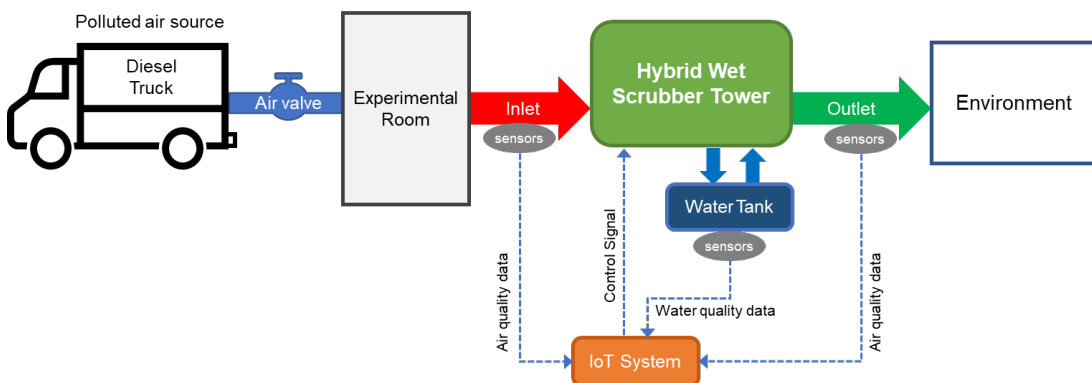
## บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ

### การดำเนินการทดสอบประสิทธิภาพของหอฟอกอากาศอัจฉริยะ

ในลำดับถัดมาหลังจากการดำเนินการประกอบหอฟอกอากาศอัจฉริยะจนแล้วเสร็จ ซึ่งประกอบด้วยโครงสร้างหอฟอกอากาศที่ติดตั้งระบบควบคุมด้วย IoT และระบบพลังงานแสงอาทิตย์ ทางผู้วิจัยได้ออกแบบการทดลองเพื่อทำการทดสอบประสิทธิภาพของหอฟอกอากาศอัจฉริยะ ซึ่งแบ่งการทดสอบออกเป็น 2 ประเภท โดยประเภทที่ 1 การทดสอบประสิทธิภาพการทำงานภายใต้สภาวะควบคุมในห้องทดสอบ และการทดสอบประเภทที่ 2 การทดสอบประสิทธิภาพการทำงานภายในสภาวะแวดล้อมจริง ซึ่งจะเป็นการติดตั้งหอฟอกอากาศที่บริเวณจุดรกรถสาธารณะเพื่อวัดประสิทธิภาพการทำงานของหอฟอกอากาศและระบบต่างๆ

### การทดสอบประสิทธิภาพการทำงานภายใต้สภาวะควบคุมในห้องทดสอบ

การทดสอบประสิทธิภาพการทำงานของหอฟอกอากาศอัจฉริยะในขั้นตอนนี้ ทางผู้วิจัยได้ดำเนินการเคลื่อนย้ายหอฟอกอากาศไปยังศูนย์วิจัยและทดสอบ ในสังกัดของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่อำเภอแก่งคอย จังหวัดสระบุรี เพื่อทำการทดสอบการทำงานของหอฟอกอากาศและวิเคราะห์ประสิทธิภาพในการกำจัดฝุ่นละออง PM2.5 ในห้องทดสอบ



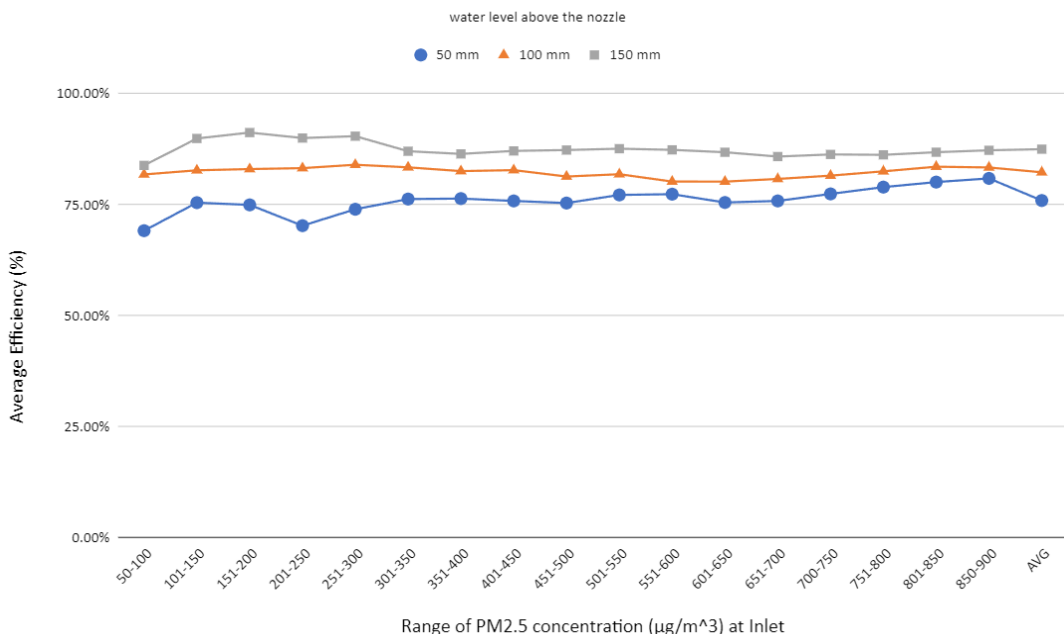
ภาพที่ 73 แผนภาพแสดงการทดสอบประสิทธิภาพการทำงานภายใต้สภาวะควบคุมในห้องทดสอบ

ผู้วิจัยได้ทำการวัดผลการทำงานของหอฟอกซึ่งทดลองปรับระดับความลึกของน้ำในกล่อง Turbulence ตั้งแต่ระดับ 50, 100 และ 150 mm และคำนวณประสิทธิภาพดังตารางแสดงผลการ

โครงการการศึกษาและพัฒนาหอฟอกอากาศอัจฉริยะ โดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์และระบบควบคุมดูแลผ่านเทคโนโลยีไอโอที เพื่อการลดฝุ่นละอองขนาดเล็ก (PM 2.5) ในพื้นที่สาธารณะ

ทดลองด้านล่าง โดยตารางผลการทดลองแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพการทำงานของหอฟอกอากาศโดยวิเคราะห์การทำงานแบ่งตามช่วงความเข้มข้นของฝุ่น PM2.5 ขาเข้า(Inlet) ในช่วงตั้งแต่ 0  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  จนถึง 900  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  โดยประสิทธิภาพของหอฟอกอากาศจะถูกคำนวณจากการวัดค่าระดับความเข้มข้นของฝุ่น PM2.5 ที่บริเวณขาเข้า(Inlet) เพื่อเปรียบเทียบกับบริเวณขาออก(Outlet) จากหอฟอกอากาศซึ่งจะวัดผลและบันทึกผล โดยใช้ระบบควบคุมด้วย IoT ของหอฟอก และการทดลองในขั้นตอนนี้ผู้วิจัยได้ดำเนินการทดลองโดยกำหนดการทำงานของหอฟอกอากาศดังตารางด้านล่าง

เมื่อวัดความเข้มข้นเปรียบเทียบกับคุณภาพอากาศบริเวณขาเข้าของหอฟอกเทียบกับบริเวณขาออกจากหอฟอก ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าอากาศที่มีฝุ่นละออง PM2.5 เจือปนที่ความเข้มข้น ในระดับไม่เกิน 200  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  ซึ่งเป็นระดับฝุ่นละอองที่อาจเกิดขึ้นได้จริงในพื้นที่สาธารณะ โดยทั่วไปรวมถึงบริเวณริมถนน เมื่อผ่านกระบวนการกรองอากาศโดยหอฟอกอากาศที่ผู้วิจัยได้พัฒนาขึ้น จะสามารถลดระดับความเข้มข้นของฝุ่นละออง PM2.5 ในอากาศให้เหลือต่ำกว่าเกณฑ์ขององค์การอนามัยโลก (WHO) ที่ระบุว่าค่าประชาชนทั่วไปควรสัมผัสกับระดับค่า PM2.5 เฉลี่ยทั้งวันที่ความเข้มข้นสูงไม่เกิน 15  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  และจากการวิเคราะห์ประสิทธิภาพดังกล่าว และ รูปภาพที่ 1 ซึ่งแสดงกราฟประสิทธิภาพในการฟอกอากาศ (Efficiency) แสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพในการฟอกอากาศที่ระดับเฉลี่ยตั้งแต่ 75% ถึง 87%



ภาพที่ 74 กราฟแสดงประสิทธิภาพในการฟอกอากาศของหอฟอกอากาศที่ระดับความลึกของน้ำในกล้อง Turbulence 50, 100 และ 150 mm

โครงการการศึกษาและพัฒนาหอฟอกอากาศอัจฉริยะ โดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์และระบบควบคุมดูแลผ่านเทคโนโลยีไอโอที เพื่อการลดฝุ่นละอองขนาดเล็ก (PM 2.5) ในพื้นที่สาธารณะ

ตารางที่ 20 ผลการทดสอบแสดงประสิทธิภาพการทำงานของหอฟอกอากาศที่ระดับความลึกของน้ำในกล่อง Turbulence 50, 100 และ 150 mm

ช่วงความเข้มข้น PM2.5 ขาเข้า	ความลึกของน้ำในกล่อง Turbulence 50 mm		ความลึกของน้ำในกล่อง Turbulence 100 mm		ความลึกของน้ำในกล่อง Turbulence 150 mm	
	ค่าเฉลี่ยขาออก	ประสิทธิภาพการกรอง	ค่าเฉลี่ยขาออก	ประสิทธิภาพการกรอง	ค่าเฉลี่ยขาออก	ประสิทธิภาพการกรอง
50-100	23.61	69.12%	14.75	81.78%	11.88	83.81%
101-150	31.28	75.43%	21.30	82.71%	12.57	89.87%
151-200	43.10	74.93%	29.90	82.99%	15.78	91.20%
201-250	66.74	70.25%	37.39	83.20%	22.62	89.97%
251-300	72.13	73.95%	43.70	83.96%	25.78	90.39%
301-350	77.01	76.24%	53.74	83.38%	42.81	87.00%
351-400	88.49	76.35%	65.48	82.53%	51.83	86.40%
401-450	102.97	75.82%	73.06	82.75%	55.14	87.07%
451-500	117.81	75.34%	88.28	81.31%	60.86	87.27%
501-550	120.33	77.17%	95.32	81.83%	65.35	87.57%
551-600	129.90	77.34%	114.17	80.18%	73.04	87.31%
601-650	153.60	75.47%	123.80	80.17%	82.57	86.77%
651-700	164.13	75.82%	130.28	80.77%	96.11	85.80%
700-750	164.46	77.40%	133.85	81.51%	99.32	86.28%
751-800	163.67	78.93%	135.91	82.48%	107.06	86.19%
801-850	163.67	80.06%	135.94	83.52%	108.41	86.78%
850-900	166.68	80.89%	144.47	83.35%	111.93	87.21%
<b>AVG</b>	<b>108.80</b>	<b>75.91%</b>	<b>84.78</b>	<b>82.26%</b>	<b>61.36</b>	<b>87.46%</b>

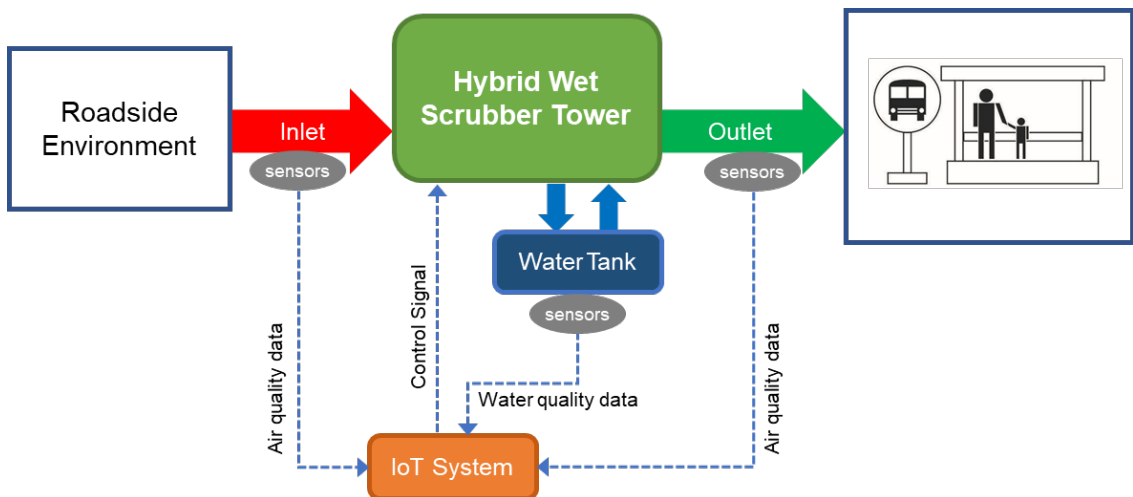
ทั้งนี้จากผลการทดสอบแสดงประสิทธิภาพการทำงานของหอฟอกอากาศ ตามตารางที่ 2 ในช่วงความเข้มข้นของ PM2.5 ขาเข้า ตั้งแต่ 151-200  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  ที่ความลึกของระดับน้ำในกล่อง Turbulence 150 mm นั้น ค่าเฉลี่ยของ PM2.5 ขาออกอยู่ที่ 15.78  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  ซึ่งสอดคล้องและใกล้เคียงกับกับเกณฑ์

โครงการการศึกษาและพัฒนาหอฟอกอากาศอัจฉริยะ โดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์และระบบควบคุมดูแลผ่านเทคโนโลยีไอโอที เพื่อการลดฝุ่นละอองขนาดเล็ก (PM 2.5) ในพื้นที่สาธารณะ

ขององค์การอนามัยโลก (WHO) ที่แนะนำว่าประชาชนปกติไม่ควรอยู่ภายใต้คุณภาพอากาศที่มีระดับ PM 2.5 เกินกว่า  $15 \mu\text{g}/\text{m}^3$  ดังนั้นจึงสามารถสรุปเบื้องต้นได้ว่าหอฟอกอากาศที่พัฒนาขึ้นในโครงการนั้นมีประสิทธิภาพและความเหมาะสมกับการใช้งานเมื่อระดับ PM2.5 ไม่เกินค่า  $200 \mu\text{g}/\text{m}^3$  อย่างต่อเนื่อง ซึ่งสอดคล้องกับคุณภาพอากาศในพื้นที่ประเทศไทยโดยส่วนใหญ่

การทดสอบประสิทธิภาพการทำงานภายใต้สภาวะแวดล้อมจริงที่จุดรอรถสาธารณะในจังหวัดพิษณุโลกและข้อเสนอแนะ

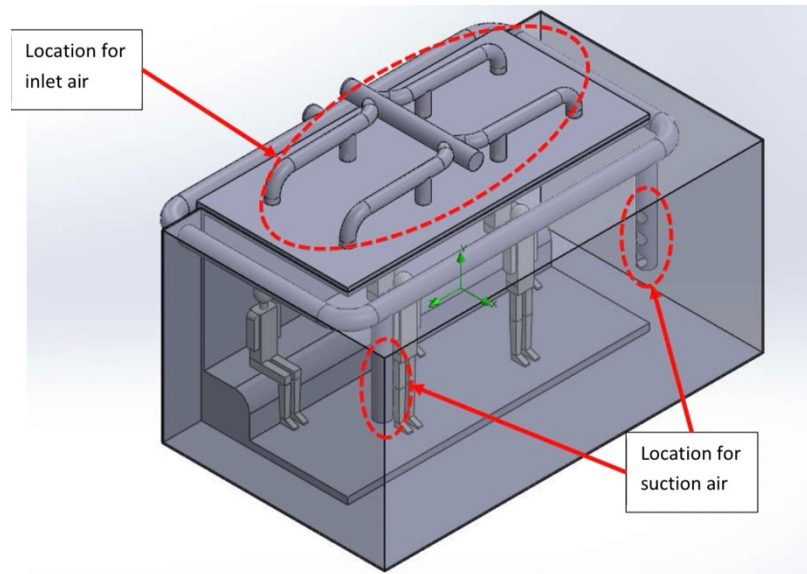
ในขั้นตอนนี้ผู้วิจัยได้จะทำการติดตั้งหอฟอกอากาศอัจฉริยะเข้ากับจุดรอรถสาธารณะ โดยมีเป้าหมายในการทดสอบประสิทธิภาพของหอฟอกอากาศเพื่อการกรองอากาศจากบริเวณจุดที่คุณภาพอากาศมีแนวโน้มที่จะได้รับผลกระทบจากฝุ่นละอองขนาดเล็ก (PM 2.5) และมีผลกระทบต่อประชาชนในบริเวณอย่างมาก



ภาพที่ 75 แผนภาพแสดงการออกแบบและติดตั้งหอฟอกอากาศอัจฉริยะเข้ากับจุดรอรถสาธารณะ

การทำงานของหอฟอกอากาศจำเป็นต้องมีส่วนเชื่อมต่อมายังบริเวณจุดรอรถสาธารณะ 2 ส่วน ได้แก่ ส่วนแรกคือท่อดูดอากาศเพื่อส่งไปกรองยังหอฟอกอากาศ (Inlet) ซึ่งทำหน้าที่ดูดอากาศที่มีการปนเปื้อนจากฝุ่นละอองขนาดเล็ก (PM 2.5) จากบริเวณโดยรอบของจุดรอรถสาธารณะ และส่วนที่สองคือท่อปล่อยอากาศที่ผ่านการฟอกออกจากหอฟอกอากาศกลับเข้ามาในบริเวณจุดรอรถสาธารณะ (Outlet)

โครงการการศึกษาและพัฒนาหอฟอกอากาศอัจฉริยะ โดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์และระบบควบคุมดูแลผ่านเทคโนโลยีไอโอที เพื่อการลดฝุ่นละอองขนาดเล็ก (PM 2.5) ในพื้นที่สาธารณะ

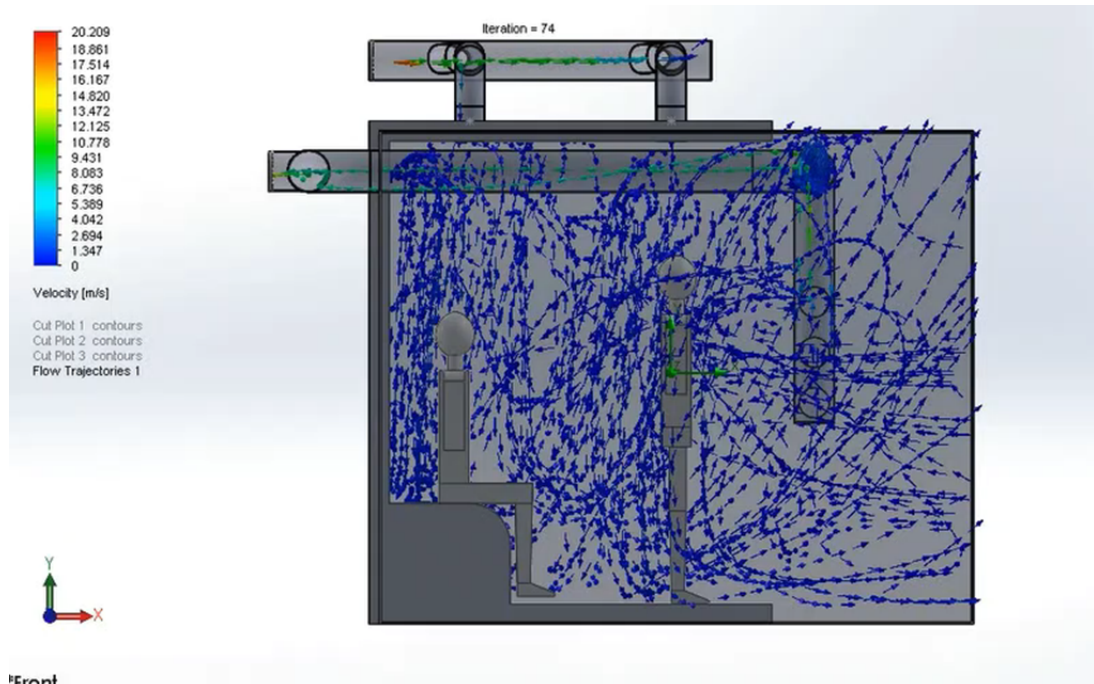


ภาพที่ 76 ภาพแสดงการออกแบบส่วนเชื่อมต่อจากหอฟอกอากาศมายังจุดรอรถสาธารณะซึ่งประกอบด้วย 2 ส่วน ได้แก่ท่อดูดอากาศสกปรกเข้าหอฟอก(Inlet) และท่อปล่อยอากาศที่ผ่านการฟอกเข้ามาในบริเวณ(Outlet)

โดยส่วนเชื่อมต่อที่เป็นท่อดูดอากาศสกปรกได้ถูกออกแบบเป็นท่อคู่เพื่อติดตั้งบริเวณด้านหน้าจุดรอรถสาธารณะซึ่งมีวัตถุประสงค์ในการดูดอากาศที่มีระดับค่า PM 2.5 สูง เนื่องจากเป็นอากาศสกปรกจากรถที่ขับผ่านบริเวณดังกล่าว แต่สำหรับท่อปล่อยอากาศที่ผ่านการฟอกกลับมายังจุดรอรถสาธารณะนั้น ทางผู้วิจัยได้ออกแบบให้มีลักษณะเป็นท่อปล่อยอากาศสะอาดลงจากความสูงเหนือศีรษะของผู้ใช้บริการจุดรอรถสาธารณะ

นอกจากนี้ผู้วิจัยยังมีการทดสอบประสิทธิภาพการออกแบบและการติดตั้งท่อดูดอากาศสกปรกและท่อปล่อยอากาศที่ผ่านการฟอกโดยใช้โปรแกรมจำลองการเคลื่อนที่ของอากาศซึ่งจะเห็นว่าอากาศที่ผ่านกาฟอกแล้วจะหมุนเวียนอยู่ในบริเวณจุดรอรถสาธารณะซึ่งมีลักษณะเป็นพื้นที่กึ่งปิด (Semi-enclose area) และยังช่วยป้องกันอากาศสกปรกจากภายนอกเข้ามาในพื้นที่ได้

โครงการการศึกษาและพัฒนาหอฟอกอากาศอัจฉริยะ โดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์และระบบควบคุมดูแลผ่านเทคโนโลยีไอโอที เพื่อการลดฝุ่นละอองขนาดเล็ก (PM 2.5) ในพื้นที่สาธารณะ



\*Front

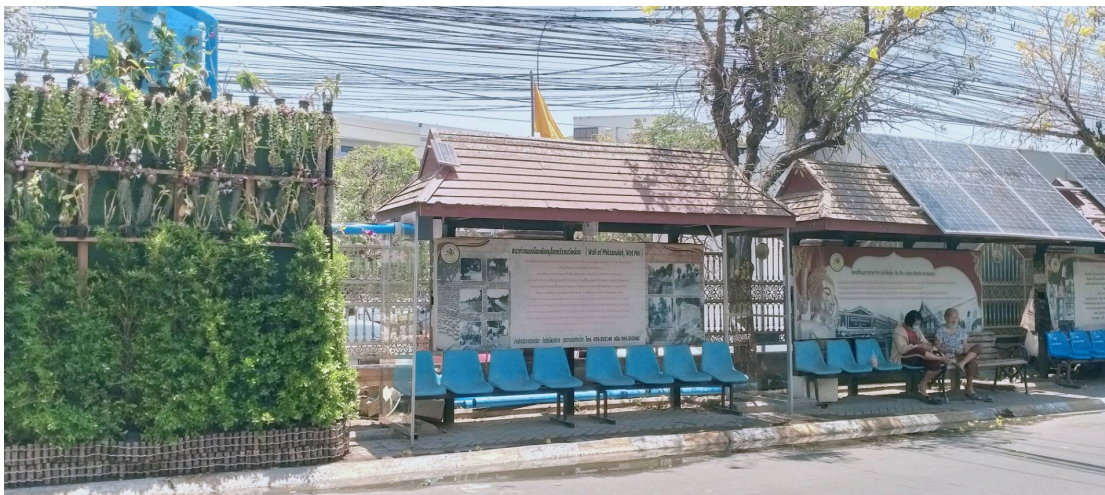
ภาพที่ 77 ภาพแสดงผลการจำลองการเคลื่อนที่ของอากาศในบริบบริเวณจุดจอดรถสาธารณะซึ่งมีลักษณะเป็นพื้นที่กึ่งปิด(Semi-enclose area)

โครงการการศึกษาและพัฒนาหอฟอกอากาศอัจฉริยะ โดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์และระบบควบคุมดูแลผ่านเทคโนโลยีไอโอที เพื่อการลดฝุ่นละอองขนาดเล็ก (PM 2.5) ในพื้นที่สาธารณะ

การทดสอบประสิทธิภาพภายในสภาวะแวดล้อมจริงนั้น ทางผู้วิจัยได้ดำเนินการติดตั้งหอฟอกอากาศใน จังหวัดพิษณุโลก และทำการติดตั้งหอฟอกอากาศเข้ากับบริเวณจุดรอรถสาธารณะ 2 จุด ได้แก่บริเวณหลังวัดพระศรีมหาธาตุวรวิหาร และบริเวณหน้าโรงพยาบาลพุทธชินราช



(ก)



(ข)

ภาพที่ 78 ภาพแสดงการติดตั้งหอฟอกอากาศที่(ก)บริเวณจุดรอรถสาธารณะบริเวณหลังวัดพระศรีมหาธาตุวรวิหารและ (ข)บริเวณจุดรอรถสาธารณะบริเวณหน้าโรงพยาบาลพุทธชินราช

โครงการการศึกษาและพัฒนาหอฟอกอากาศอัจฉริยะ โดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์และระบบควบคุมดูแลผ่านเทคโนโลยีไอโอที เพื่อการลดฝุ่นละอองขนาดเล็ก (PM 2.5) ในพื้นที่สาธารณะ



(ก)



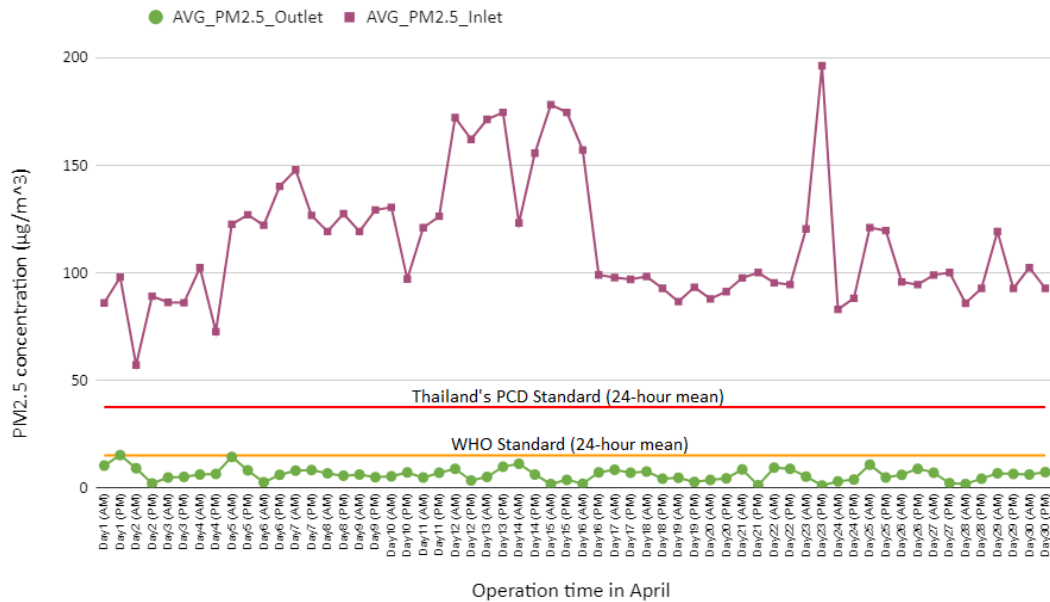
(ข)

ภาพที่ 79 ภาพแสดงการติดตั้ง (ก) การติดตั้งท่อดูดอากาศสกปรกและท่อปล่อยอากาศที่ผ่านการฟอกตามการออกแบบ และเซ็นเซอร์วัดคุณภาพอากาศในบริเวณ

เนื่องจากระยะเวลาในการดำเนินโครงการฯ มีระยะเวลา 1 ปี ซึ่งรวมไปถึงการพัฒนาเครื่องวัดอากาศขนาดเล็ก PM2.5 และหอฟอกอากาศ ดังนั้นประสิทธิภาพการทำงานของหอฟอกอากาศในพื้นที่จริงจึงสามารถเริ่มเก็บข้อมูลได้เป็นระยะเวลา 30 วัน ตลอดเดือนเมษายน การทดลองวัดประสิทธิภาพการทำงานของหอฟอกอากาศในขั้นตอนนี้อ้างอิงจากความหนาแน่นของการใช้งานจุดรอรถสาธารณะในพื้นที่ติดตั้ง ทางผู้วิจัยได้ดำเนินการโดยกำหนดช่วงเวลาการทำงานของหอฟอกอากาศในแต่ละวันแบ่งเป็น 2 ช่วงเวลา ได้แก่ ช่วงเวลาเช้า และช่วงเวลาตอนบ่าย โดยช่วงเวลาเช้าหอฟอกอากาศจะทำงานตั้งแต่เวลา 07:00 จนถึงเวลา 13:00 และหอฟอกอากาศจะ

โครงการการศึกษาและพัฒนาหอฟอกอากาศอัจฉริยะ โดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์และระบบควบคุมดูแลผ่านเทคโนโลยีไอโอที เพื่อการลดฝุ่นละอองขนาดเล็ก (PM 2.5) ในพื้นที่สาธารณะ

เริ่มทำงานช่วงบ่ายอีกครั้งตั้งแต่เวลา 14:00 ถึงเวลา 20:00 ของทุกวัน ซึ่งการทำงานตลอด 30 วันของเดือนเมษายน สามารถสรุปเป็นข้อมูลการทำงาน 60 ชั่วโมงโดยแสดงผลในรูปแบบกราฟประสิทธิภาพการทำงานของหอฟอกอากาศในสถานะแวดล้อมจริงดังภาพด้านล่าง



ภาพที่ 80 กราฟแสดงถึงประสิทธิภาพการทำงานของหอฟอกอากาศในสถานะแวดล้อมจริงในการติดตั้งที่จุดรอรถสาธารณะในจังหวัดพิษณุโลกเปรียบเทียบระหว่างอากาศที่ดูดมาจากท่อขาเข้า (Inlet)และอากาศที่ผ่านการกรองและปล่อยออกจากท่อขาออก(Outlet)

จากกราฟแสดงการทำงานของหอฟอกอากาศในสถานะแวดล้อมจริงในพื้นที่ติดตั้งจุดรอรถสาธารณะในจังหวัดพิษณุโลก โดยนำเสนอระดับค่าเฉลี่ยฝุ่นละอองขนาดเล็ก PM 2.5 เปรียบเทียบระหว่างอากาศที่ดูดมาจากท่อขาเข้า(Inlet)และอากาศที่ผ่านการกรองและปล่อยออกจากท่อขาออก (Outlet) จะเห็นได้ว่าหอฟอกอากาศสามารถกรองอากาศให้มีระดับคุณภาพอากาศให้เป็นไปตามเกณฑ์ของกรมควบคุมมลพิษของประเทศไทยที่แนะนำให้ประชาชนทั่วไปควรสัมผัสกับระดับค่า PM2.5 เฉลี่ยทั้งวันมีความเข้มข้นไม่เกิน 37.5 µg/m<sup>3</sup> และยังเป็นไปตามเกณฑ์แนะนำขององค์การอนามัยโลก (WHO) ที่แนะนำให้ประชาชนสัมผัสกับระดับPM2.5 เฉลี่ยทั้งวันมีความเข้มข้นไม่เกิน 15 µg/m<sup>3</sup>

ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่าผลการทดสอบประสิทธิภาพการทำงานของหอฟอกอากาศในภายใต้สภาวะแวดล้อมจริงที่จุดรอรถสาธารณะซึ่งเป็นพื้นที่แบบกึ่งปิด(Semi-enclosed) นั้น แสดง

โครงการการศึกษาและพัฒนาหอฟอกอากาศอัจฉริยะ โดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์และระบบควบคุมดูแลผ่านเทคโนโลยีไอโอที เพื่อการลดฝุ่นละอองขนาดเล็ก (PM 2.5) ในพื้นที่สาธารณะ

ให้เห็นถึงประสิทธิภาพของหอฟอกอากาศที่กล่าวมาสามารถช่วยให้อากาศที่หายใจเข้าไปในบริเวณจุดรวมคนสาธารณะ ดีขึ้นในระดับอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งสอดคล้องกับข้อเสนอแนะขององค์การอนามัยโลก (WHO) และกรมควบคุมมลพิษของประเทศไทย

การสรุปการวิจัยและพัฒนาหอฟอกอากาศภายในกรอบเวลาของโครงการนั้นทางวิจัยได้ดำเนินโครงการตามวัตถุประสงค์ได้แก่ การศึกษาพัฒนาเทคนิคการแยกมลภาวะที่ปนอยู่ในอากาศ อาทิเช่น โมเลกุลฝุ่นละอองขนาดเล็ก (PM2.5) ทางผู้วิจัยได้ข้อสรุปว่าการเทคนิคการดักจับฝุ่นละอองโดยใช้น้ำ (Turbulence Technique) เพื่อช่วยฟอกอากาศนั้นเป็นเทคนิคที่มีประสิทธิภาพและเหมาะสมเพียงกับการพัฒนาเป็นหอฟอกอากาศสำหรับติดตั้งในพื้นที่จริงภายนอกในประเทศไทย ซึ่งประสิทธิภาพการทำงานของเทคนิคดังกล่าวผ่านการทดสอบโดยการพัฒนาหอฟอกอากาศต้นแบบและทดสอบประสิทธิภาพในห้องทดลองที่มีการสร้างสภาวะแวดล้อมของอากาศที่มีฝุ่นละออง PM2.5 ในระดับที่แตกต่างกัน รวมถึงการทดสอบประสิทธิภาพการทำงานในสภาวะแวดล้อมจริงโดยนำหอฟอกอากาศไปติดตั้งที่จุดรวมคนสาธารณะในจังหวัดพิษณุโลก

โดยประสิทธิภาพการทำงานของหอฟอกอากาศที่พัฒนาขึ้นและนำไปติดตั้งในพื้นที่สภาวะแวดล้อมจริงรักษาระดับความสามารถในการกรองฝุ่นละออง PM2.5 ที่มีความเข้มข้นเปลี่ยนแปลงตลอดเวลาได้อย่างมีประสิทธิภาพเช่นเดียวกับผลการทดสอบภายในห้องทดลอง

นอกจากนี้ยังมีการทำ Computer Simulation ในโครงการนี้ เป็นการจำลองการเคลื่อนที่ของอากาศที่ถูกปล่อยจากหอฟอกอากาศที่บริเวณท่อ outlet ในบริเวณจุดรวมคนสาธารณะเป็นการคาดการณ์การเคลื่อนตัวของอากาศสะอาดจากหอฟอกอากาศเพื่อทดแทนการวัดค่าโดยเซ็นเซอร์อย่างละเอียดทุกจุดในบริเวณจุดรวมคนซึ่งยังไม่อยู่ในขอบเขตของการดำเนินโครงการในระยะปัจจุบัน ซึ่งการวัดการกระจายตัวของอากาศสะอาดที่ผลิตจากหอฟอกในพื้นที่จริง รวมถึงวิจัยปัญหาต่างๆที่อาจเกิดขึ้นจากการใช้งานหอฟอกอากาศ อาทิเช่น อายุการใช้งานของหอฟอกอากาศ ปัญหาการเสื่อมสภาพและการดูแลรักษานั้น เป็นเป้าหมายของการทดลองในลำดับต่อไป

โครงการการศึกษาและพัฒนาหอฟอกอากาศอัจฉริยะ โดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์และระบบควบคุมดูแลผ่านเทคโนโลยีไอโอที เพื่อการลดฝุ่นละอองขนาดเล็ก (PM 2.5) ในพื้นที่สาธารณะ

### บรรณานุกรม

- [1] Attavanich, W., R. Mungkung, I. Mahathanaseth, S. Sanglestsawai, and A. Jirajariyavech. (2016). Developing Green GDP Accounting for Thai Agricultural Sector Using the Economic Input Output - Life Cycle Assessment to Assess Green Growth. Conference Proceeding of SEE 2016 in conjunction with ICGSI 2016 and CTI 2016. [https://mpra.ub.uni-muenchen.de/83785/1/MPRA\\_paper\\_83785.pdf](https://mpra.ub.uni-muenchen.de/83785/1/MPRA_paper_83785.pdf)
- [2] Aziz, A.A., Lee, K., Park, B., Park, H., Park, K., Choi, I.G. and Chang, I.S., 2018. Comparative Performance evaluation and environmental benefit assessment of fine particle removal using a co-current flow rotating packed bed." Process Safety and Environmental Protection, 2020, pp.73-81.
- [3] Lin, Kai-Yu, Tse-Lun Chen, Yi-Hung Chen, and Pen-Chi Chiang. "Performance evaluation and environmental benefit assessment of fine particle removal using a co-current flow rotating packed bed." Process Safety and Environmental Protection, 2020, pp.73-81.
- [4] Mussatti DC, Srivastava R, Hemmer PM, Strait R, "EPA air pollution control cost manual." Air Quality Strategies and Standards Division of the Office of Air Quality Planning and Standards, US Environmental Protection Agency, Research Triangle Park, NC 2002
- [5] Sharma, R., Sharma, S. And Tiwari, S., "Design optimization of solar PV water pumping system." Materials Today: Proceedings, 2020, pp.1673-1679.
- [6] Kanabkaew, T., Mekbungwan, P., Raksakietisak, S. And Kanchanasut, K., "Detection of PM2. 5 plume movement from iot ground level monitoring data." Environmental pollution, 2019, pp.543-552.
- [7] H. Gupta, D. Bhardwaj, H. Agrawal, V. A. Tikkiwal and A. Kumar, "An iot Based Air Pollution Monitoring System for Smart Cities," 2019 IEEE International Conference on Sustainable Energy Technologies and Systems (ICSETS), Bhubaneswar, 2019, pp. 173-177
- [8] Da Silva, A.F., Ohta, R.L., dos Santos, M.N. and Binotto, A.P., "A cloud-based architecture for the internet of things targeting industrial devices

โครงการการศึกษาและพัฒนาหอฟอกอากาศอัจฉริยะโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์และระบบควบคุมดูแลผ่านเทคโนโลยีไอโอทีเพื่อการลดฝุ่นละอองขนาดเล็ก (PM 2.5) ในพื้นที่สาธารณะ

- remote monitoring and control.” IFAC-papersonline, 2019, 49(30), pp.108-113.
- [8] Danzomo, B.A., Salami, M.J.E. and Khan, M.R., 2014, September. Hardware implementation of ANFIS controller for gas-particle separations in wet scrubber system. In 2014 IEEE International Conference on Computer and Communication Engineering, 2014, pp.277-280.
- [9] Sari, I.R.J., Fatkhurrahman, J.A., Marlana, B., Harihastuti, N., Crisnaningtyas, F., Andriani, Y. And Nasuka, N., “Wet Scrubber Performance Optimization Application Assisted with Electrochemical-Based Ammonia Sensors.” Jurnal Riset Teknologi Pencegahan Pencemaran Industri, 2019, 10(2), pp.36-42.
- [10]Danzomo, Bashir A., Momoh-Jimoh E. Salami, S. Jibrin, M. R. Khan, and I. M. Nor. "Performance evaluation of wet scrubber system for industrial air pollution control.", Journal of Engineering and Applied Sciences (ARPN), 2012.
- [11]Guo, Y., Li, S., Tawatsupa, B., Punnasiri, K., Jaakkola, J.J. and Williams, G., 2014. The association between air pollution and mortality in Thailand. Scientific reports, 2004, pp.5509.
- [12]Srithawirat, T., Latif, M.T. and Sulaiman, F.R., “Indoor PM10 and its heavy metal composition at a roadside residential environment, Phitsanulok, Thailand.” Atmosfera, 2016, 29(4), pp.311-322.
- [13]Vichit-Vadakan and Vajanapoom, “Health impact from air pollution in Thailand: Current and future challenges”, Environ. Health. Perspect., 2011, pp. A197-A198
- [14]Johnston, S.J., Basford, P.J., Bulot, F.M., Apetroaie-Cristea, M., Easton, N.H., Davenport, C., Foster, G.L., Loxham, M., Morris, A.K. and Cox, S.J., “City scale particulate matter monitoring using lorawan based air quality iot devices.” Sensors, 2019, pp.209.
- [15]Vashishtha, Pranavi, and Tanupriya Choudhury. "DMAPS: An Effective and Efficient Way for the Air Purification of the Outdoors:(Deep-mind Air

โครงการการศึกษาและพัฒนาหอฟอกอากาศอัจฉริยะโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์และระบบควบคุมดูแลผ่านเทคโนโลยีไอโอทีเพื่อการลดฝุ่นละอองขนาดเล็ก (PM 2.5) ในพื้นที่สาธารณะ

Purification System for a smart city)." *Procedia Computer Science* 167, 2020.

- [16] Smog Depletion Tower: A Smart Cost Effective and Eco-friendly Solution for Reduction of Photochemical Smog Pratibha kabade<sup>1</sup>, Manisha Nimje<sup>2</sup>, Pratiksha Thorat<sup>3</sup>, Komal Suryawanshi<sup>4</sup> <sup>1</sup>Assistant Professor, Dept of Civil Engineering, G. H. Rasoni Institute of Engineering and Technology, Pune. 2-4B.E. Student, Dept. Of Civil Engineering, G. H. Rasoni Institute of Engineering and Technology
- [17] Communication Can We Vacuum Our Air Pollution Problem Using Smog Towers? Sarath Guttikunda \* and Puja Jawahar Urban Emissions, New Delhi 110019, India; puja@urbanemissions.info \* Correspondence: sguttikunda@urbanemissions.info Received: 29 July 2020; Accepted: 28 August 2020; Published: 29 August 2020.
- [18] Surwase, Shubham V., et al. "SMOG DEPLETING TOWER-A REVIEW." *INTERNATIONAL JOURNAL* 5.7 (2020).
- [19] INTRODUCTION TO SMOG FREE TOWER, To Built Pollution Free Environment, Prof. Vijaya D. Gayki<sup>1</sup>, Mr. Tushar S. Masane<sup>2</sup>, Mr. Rushikesh J. Ingle<sup>3</sup>, Ms. Shraddha R. Shelke<sup>4</sup>, <sup>1,2,3,4</sup>Civil Engineering, Siddhivinayak Technical Campus, Khamgaon *International Journal of Advance Engineering and Research Development A National Conference On Spectrum Of Opportunities In Science & Engineering Technology Volume 5, Special Issue 06, April-2018, UGC Approved.*
- [20] Laxmipriya, S., et al. "Reduction of Air Pollution Using Smog-free-tower a Review Paper." *IRJAET* 4 (2018)
- [21] Blocken, Bert, Rob Vervoort, and Twan van Hooff. "Reduction of outdoor particulate matter concentrations by local removal in semi-enclosed parking garages: a preliminary case study for Eindhoven city center." *Journal of wind engineering and industrial aerodynamics* 159 (2016): 80-98.

โครงการการศึกษาและพัฒนาหอฟอกอากาศอัจฉริยะ โดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์และระบบควบคุมดูแลผ่านเทคโนโลยีไอโอที เพื่อการลดฝุ่นละอองขนาดเล็ก (PM 2.5) ในพื้นที่สาธารณะ

- [22]Khutsoane, O., Isong, B. And Abu-Mahfouz, A.M., “iot devices and applications based on lora/lorawan.”, IECON 2017-43rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, 2017, pp. 6107-6112.
- [23]Petäjäljärvi J, Mikhaylov K, Hämäläinen M, Linatti J. Evaluation of lora LPWAN technology for remote health and wellbeing monitoring. In 2016 10th International Symposium on Medical Information and Communication Technology (ISMICT), 2016
- [24]Ali, A.H., Chisab, R.F. and Mnati, M.J., “A smart monitoring and controlling for agricultural pumps using lora IOT technology.” Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science, 2019, pp.286-292.
- [25]Shah, J. And Mishra, B., “iot-enabled low power environment monitoring system for prediction of PM2. 5.”, Pervasive and Mobile Computing., 2020, pp.101175.
- [26]Dales, R., Liu, L., Szyszkowicz, M., Dalipaj, M., Willey, J., Kulka, R. And Ruddy, T.D., “Particulate air pollution and vascular reactivity: the bus stop study.”, International archives of occupational and environmental health, 2007, pp.159-164.
- [27]Gómez-Perales, J.E., et al. “Bus, minibus, metro inter-comparison of commuters’ exposure to air pollution in Mexico City.” Atmospheric Environment, 2007, pp.890-901.
- [28]Oanh, N.T.K., Thiansathit, W., Bond, T.C., Subramanian, R., Winijkul, E. And Paw-armart, I., “Compositional characterization of PM2. 5 emitted from in-use diesel vehicles.” Atmospheric Environment, 2010, pp.15-22.
- [29]คู่มือการเฝ้าระวังผลกระทบต่อสุขภาพจากปัญหาหมอกควัน สำหรับบุคลากรสาธารณสุข (ฉบับปรับปรุง พ.ศ. 2561) [http://envocc.ddc.moph.go.th/uploads/media/manual/final\\_ble\\_0001.pdf](http://envocc.ddc.moph.go.th/uploads/media/manual/final_ble_0001.pdf)
- [30]คู่มือการปฏิบัติงานเพื่อการตรวจประเมินคุณภาพอากาศภายในอาคาร สำหรับเจ้าหน้าที่ พ.ศ. 2559 [http://env.anamai.moph.go.th/ewt\\_dl\\_link.php?Nid=824](http://env.anamai.moph.go.th/ewt_dl_link.php?Nid=824)
- [31]The Standards for Ventilation and Indoor Air Quality ANSI/ASHRAE Standards 62.1 and 62.2

โครงการการศึกษาและพัฒนาหอฟอกอากาศอัจฉริยะ โดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์และระบบควบคุมดูแลผ่านเทคโนโลยีไอโอที เพื่อการลดฝุ่นละอองขนาดเล็ก (PM 2.5) ในพื้นที่สาธารณะ

<https://www.ashrae.org/technical-resources/bookstore/standards-62-1-62-2>

[32]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)

[33]air pollution control<https://www.britannica.com/technology/air-pollution-control>

[34]Air-pollution and its control

[https://www.academia.edu/35360870/Air\\_pollution\\_and\\_its\\_control?email\\_work\\_card=thumbnail](https://www.academia.edu/35360870/Air_pollution_and_its_control?email_work_card=thumbnail)

โครงการการศึกษาและพัฒนาหอฟอกอากาศอัจฉริยะ โดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์และระบบควบคุมผ่านเทคโนโลยีไอโอที เพื่อการลดฝุ่นละอองขนาดเล็ก (PM 2.5) ในพื้นที่สาธารณะ

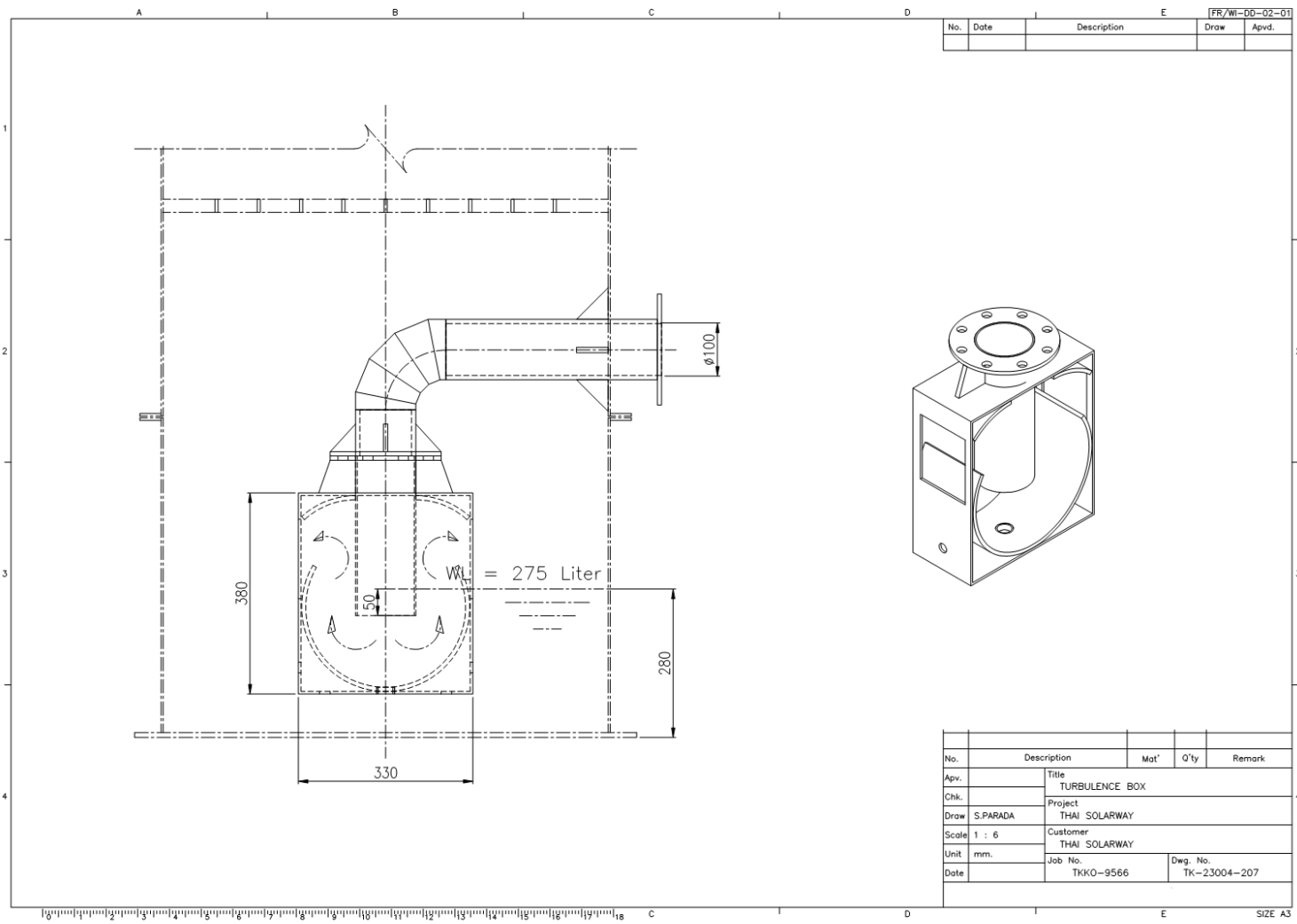
## ภาคผนวก ก

### รายละเอียดแบบร่างหอฟอกอากาศ



โครงการการศึกษาและพัฒนาหอฟอกอากาศอัจฉริยะที่ใช้พลังงานแสงอาทิตย์และระบบควบคุมดูแลผ่านเทคโนโลยีไอโอที เพื่อการลดฝุ่นละอองขนาดเล็ก (PM 2.5) ในพื้นที่สาธารณะ

แบบร่าง Turbulence box



โครงการการศึกษาและพัฒนาหอฟอกอากาศอัจฉริยะ โดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์และระบบควบคุมดูแลผ่านเทคโนโลยีไอโอที เพื่อการลดฝุ่นละอองขนาดเล็ก (PM 2.5) ในพื้นที่สาธารณะ

#### การพัฒนา

ซึ่งคณะทำงานได้ดำเนินการจัดทำและสรุปตัวโครงสร้างหอฟอกตามแบบร่างหอฟอกอากาศและแบบร่าง Turbulence box ซึ่งเป็นส่วนสำคัญในการฟอกอากาศของตัวหอฟอกอากาศ ซึ่งได้ประกอบเสร็จเรียบร้อยแล้วตามภาพดังต่อไปนี้



โดยในปัจจุบันได้ทำการติดตั้งและประกอบเข้ากับส่วนของอุปกรณ์ไอโอทีและระบบโซลาร์เซลล์ เพื่อทำการทดสอบประสิทธิภาพ อยู่ที่ศูนย์ทดสอบ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อำเภอแก่งคอย จังหวัดสระบุรี

โครงการการศึกษาและพัฒนาหอฟอกอากาศอัจฉริยะที่ใช้พลังงานแสงอาทิตย์และระบบควบคุมดูแลผ่านเทคโนโลยีไอโอที เพื่อการลดฝุ่นละอองขนาดเล็ก (PM 2.5) ในพื้นที่สาธารณะ



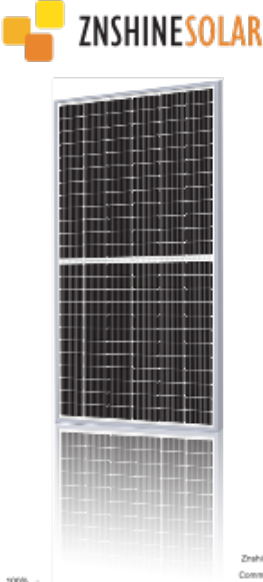
โครงการการศึกษาและพัฒนาหอฟอกอากาศอัจฉริยะ โดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์และระบบควบคุมผ่านเทคโนโลยีไอโอที เพื่อการลดฝุ่นละอองขนาดเล็ก (PM 2.5) ในพื้นที่สาธารณะ

ภาคผนวก ข  
รายละเอียดระบบพลังงานแสงอาทิตย์

โครงการการศึกษาและพัฒนาหอฟอกอากาศอัจฉริยะโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์และระบบควบคุมดูแลผ่านเทคโนโลยีไอโอที เพื่อการลดฝุ่นละอองขนาดเล็ก (PM 2.5) ในพื้นที่สาธารณะ

## รายละเอียดระบบพลังงานแสงอาทิตย์

### 1. รายละเอียดคุณสมบัติของแผงโซลาร์เซลล์

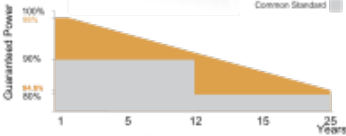


## ZXM6-NH144 Series

9BB HALF-CELL Monocrystalline PERC PV Module

**435-460W**    **21.16%**    **0.55%**  
**POWER RANGE**    **MAXIMUM EFFICIENCY**    **YEARLY DEGRADATION**

**12** 12 YEARS PRODUCT WARRANTY    **25** 25 YEARS OUTPUT GUARANTEE



Znshin Standard  
Common Standard







100%  
92%  
84.5%  
82%  
0%  
1    5    12    15    25  
Years

\*Please check the valid version of United Product Warranty which is officially released by ZNSHINE PV-TECH Co., Ltd.

IEC 61215 / IEC 61730 / IEC 61701 / IEC 62716  
 ISO 14001: Environmental Management System  
 ISO 9001: Quality Management System  
 ISO 45001: Occupational Health and Safety Management System

\*As there are different certification requirements in different markets, please contact your local znshin sales representative for the specific certificates applicable to the products in the region in which the products are to be used.

## KEY FEATURES

- 
**Excellent Cells Efficiency**  
 9BB technology reduce the distance between busbars and finger grid line which is benefit to power increase.
- 
**Better Weak Illumination Response**  
 More power output in weak light condition, such as haze, cloudy, and early morning.
- 
**Anti PID**  
 Ensured PID resistance through the quality control of cell manufacturing process and raw materials.
- 
**Adapt To Harsh Outdoor Environment**  
 Resistant to harsh environments such as salt, ammonia, sand, high temperature and high humidity environment.
- 
**TIER 1**  
 Global, Tier 1 bankable brand, with independently certified advanced automated manufacturing.
- 
**Excellent Quality Management System**  
 Warranted reliability and stringent quality assurances well beyond certified requirements.

Founded in 1988, ZnShine solar is a world's leading high-tech PV module manufacturer. With the advanced production lines, the company boasts module capacity of 10GW. Bloomberg has listed ZnShine as a global Tier 1 PV module maker. Today Znshin has distributed its sales to more than 60 countries around the globe.

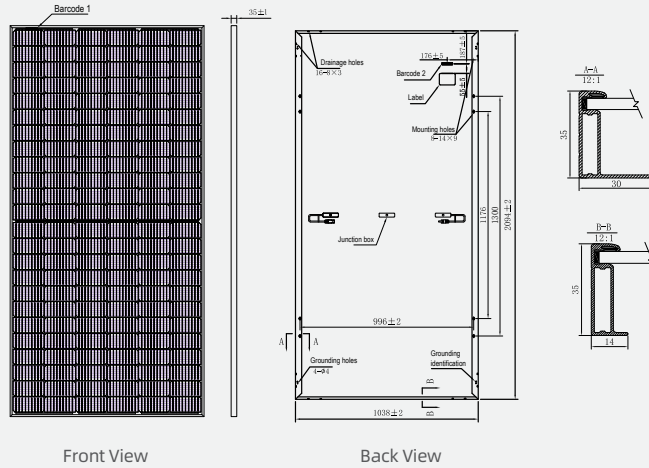
[www.znshinesolar.com](http://www.znshinesolar.com)

โครงการการศึกษาและพัฒนาหอฟอกอากาศอัจฉริยะโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์และระบบควบคุมดูแลผ่านเทคโนโลยีไอโอที เพื่อการลดฝุ่นละอองขนาดเล็ก (PM 2.5) ในพื้นที่สาธารณะ

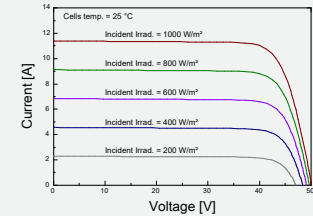
ZXM6-NH144 Series | Zshinesolar 9BB HALF-CELL Monocrystalline PERC PV Module



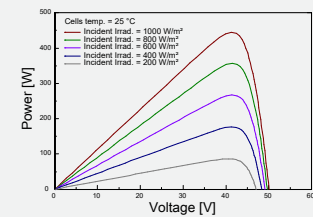
DIMENSIONS OF PV MODULE(mm)



I-V CURVES OF PV MODULE(445W)



P-V CURVES OF PV MODULE(445W)



\*Remark: customized frame color and cable length available upon request

ELECTRICAL CHARACTERISTICS | STC\*

Nominal Power Watt Pmax(W)*	435	440	445	450	455	460
Maximum Power Voltage Vmp(V)	40.80	41.00	41.20	41.40	41.60	41.80
Maximum Power Current Imp(A)	10.67	10.74	10.81	10.87	10.94	11.01
Open Circuit Voltage Voc(V)	49.70	49.90	50.10	50.30	50.50	50.70
Short Circuit Current Isc(A)	11.26	11.33	11.40	11.46	11.53	11.60
Module Efficiency (%)	20.01	20.24	20.47	20.70	20.93	21.16

\*The data above is for reference only and the actual data is in accordance with the practical testing  
 \*STC (Standard Test Condition): Irradiance 1000W/m², Module Temperature 25±2°C, AM 1.5  
 \*Measuring uncertainty: ±3%, all the electrical characteristics such as Power, Im, Vm and FF are within ±3% tolerance.

MECHANICAL DATA

Solar cells	Mono PERC
Cells orientation	144 (6x24)
Module dimension	2094x1038x35 mm (With Frame)
Weight	23.5 ±1.0 kg
Glass	3.2mm, High Transmission, AR Coated Tempered Glass
Junction box	IP 68, 3 diodes
Cables	4 mm² , 350 mm (With Connectors)
Connectors*	MC4-compatible

\*Please refer to regional datasheet for specified connector

ELECTRICAL CHARACTERISTICS | NMOT

Maximum Power Pmax(Wp)	325.20	328.90	332.70	336.10	339.80	343.60
Maximum Power Voltage Vmpp(V)	38.10	38.20	38.40	38.60	38.80	39.00
Maximum Power Current Imp(A)	8.54	8.60	8.66	8.70	8.76	8.81
Open Circuit Voltage Voc(V)	46.40	46.60	46.70	46.90	47.10	47.30
Short Circuit Current Isc(A)	9.09	9.15	9.21	9.25	9.31	9.37

\*NMOT: Irradiance 800W/m², Ambient Temperature 20°C, AM 1.5, Wind Speed 1m/s

TEMPERATURE RATINGS

NMOT	44°C ±2°C	Maximum system voltage	1500 V DC
Temperature coefficient of Pmax	-0.36%/°C	Operating temperature	-40°C~+85°C
Temperature coefficient of Voc	-0.29%/°C	Maximum series fuse	20 A
Temperature coefficient of Isc	0.05%/°C	Front Side Maximum Static Loading	Up to 5400 Pa
		Rear Side Maximum Static Loading	Up to 2400 Pa

\*Remark: Do not connect Fuse in Combiner Box with two or more strings in parallel connection  
 \*Remark: Electrical data in this catalog do not refer to a single module and they are not part of the offer.  
 They only serve for comparison among different module types.  
 \*Caution: Please be kindly advised that PV modules should be handled and installed by qualified people who have professional skills and please carefully read the safety and installation instructions before using our PV modules.

PACKAGING CONFIGURATION \*

Piece/Box	31
Piece/Container(40'HQ)	682

\*Customized packaging is available upon request.

Add : 1#, Zhixi Industrial Zone, Jintanjiangsu 213251, P.R. China Tel: +86 519 6822 0233 E-mail: info@zshinesolar.com

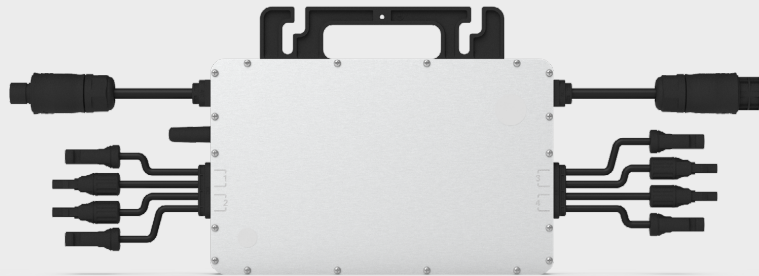
Note: Specifications included in this datasheet are subject to change without notice. ZSHINE reserves the right of final interpretation © ZSHINE SOLAR 2022 | Version: ZXM6-NH144 2208.E  
 No special undertaking or warranty for the suitability of special purpose or being installed in extraordinary surroundings is granted unless as otherwise specifically committed by manufacturer in contract document

โครงการการศึกษาและพัฒนาหอฟอกอากาศอัจฉริยะ โดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์และระบบควบคุมดูแลผ่านเทคโนโลยีไอโอที เพื่อการลดฝุ่นละอองขนาดเล็ก (PM 2.5) ในพื้นที่สาธารณะ

## 2. รายละเอียดคุณสมบัติของอินเวอร์เตอร์สำหรับจัดการพลังงานจากแผงโซลาร์เซลล์



Open Energy For All



### Microinverter Datasheet

HM-1200  
HM-1500

#### Description

Hoymiles 4-in-1 microinverter is one of the most cost-effective module-level solar solutions, as it can support up to 4 panels at once and maximize the PV production of your installation.

Both models listed are equipped with reactive power control and can meet the requirements of EN 50549-1:2019, VDE-AR-N 4105:2018, UL 1741, etc. They're also designed with external antenna for stronger communication with Hoymiles gateway DTU.

#### Features

01

Easy installation, just plug and play

02

With Reactive Power Control, compliant with VDE-AR-N 4105: 2018 & EN 50549-1: 2019

03

External antenna for stronger communication with DTU

04

High reliability: IP67 (NEMA 6) enclosure, 6000 V surge protection

โครงการการศึกษาและพัฒนาหอฟอกอากาศอัจฉริยะโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์และระบบควบคุมดูแลผ่านเทคโนโลยีไอโอที เพื่อการลดฝุ่นละอองขนาดเล็ก (PM 2.5) ในพื้นที่สาธารณะ

## Technical Specifications

Model	HM-1200	HM-1500
<b>Input Data (DC)</b>		
Commonly used module power (W)	240-405+	300-505+
Maximum input voltage (V)		60
MPPT voltage range (V)		16-60
Start-up voltage (V)		22
Maximum input current (A)		4 × 11.5
Maximum input short circuit current (A)		4 × 15
<b>Output Data (AC)</b>		
Rated output power (VA)	1200	1500
Rated output current (A)	5.22	6.52
Nominal output voltage (V)		230/180-275
Nominal output voltage range (V) <sup>1</sup>		180-275
Nominal frequency/range (Hz) <sup>1</sup>		50/45-55
Power factor (adjustable)		> 0.99 default 0.8 leading...0.8 lagging
Total harmonic distortion		< 3%
Maximum units per branch <sup>2</sup>	4	3
<b>Efficiency</b>		
CEC peak efficiency		96.70%
CEC weighted efficiency		96.50%
Nominal MPPT efficiency		99.80%
Nighttime power consumption (mW)		< 50
<b>Mechanical Data</b>		
Ambient temperature range (°C)		-40 to +65
Dimensions (W × H × D mm)		280 × 176 × 33
Weight (kg)		3.75
Enclosure rating		Outdoor IP67 (NEMA 6)
Cooling		Natural convection (no fans)
<b>Features</b>		
Communication		2.4GHz Proprietary RF
Type of isolation		Galvanically Isolated HF Transformer
Monitoring		S-Miles Cloud <sup>3</sup>
Compliance	EN 50549-1: 2019, VDE-AR-N 4105: 2018, UL 1741, ABNT NBR 16150, IEC/EN 62109-1/-2, IEC/EN 61000-6-1/-2/-3/-4, IEC/EN 61000-3-2/-3	

\*1 Nominal voltage/frequency range can vary depending on local requirements.

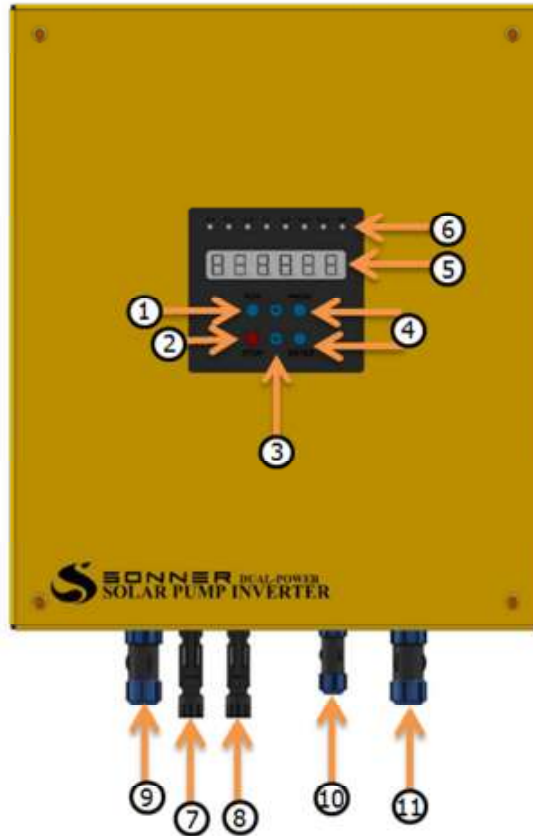
\*2 Refer to local requirements for exact number of microinverters per branch.

\*3 Hoymiles Monitoring System.

โครงการการศึกษาและพัฒนาหอฟอกอากาศอัจฉริยะ โดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์และระบบควบคุมดูแลผ่านเทคโนโลยีไอโอที เพื่อการลดฝุ่นละอองขนาดเล็ก (PM 2.5) ในพื้นที่สาธารณะ

### 3. รายละเอียดคุณสมบัติของอินเวอร์เตอร์สำหรับการควบคุมการทำงานของปั๊ม

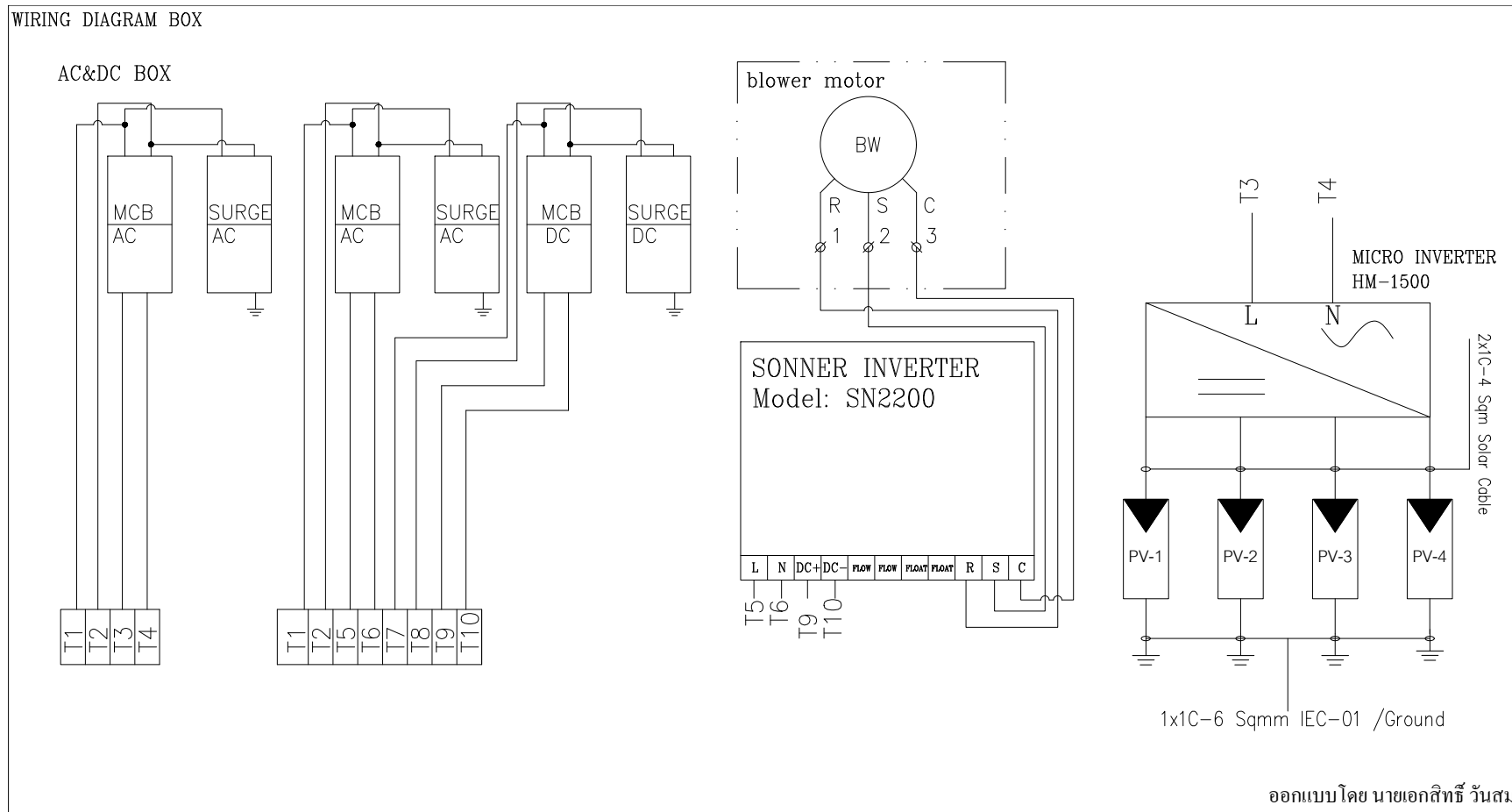
#### ลักษณะภายนอก และปุ่มกด



- |                       |                                    |
|-----------------------|------------------------------------|
| ① ปั๊มเริ่มทำงาน      | ⑦ ไฟเข้า DC +                      |
| ② ปั๊มหยุดการทำงาน    | ⑧ ไฟเข้า DC -                      |
| ③ ปั๊มเลือกดูค่าต่างๆ | ⑨ ไฟเข้า AC                        |
| ④ ปั๊มตั้งค่า         | ⑩ ทางออกสายลูกลอยและเซนเซอร์น้ำไหล |
| ⑤ จอแสดงผล            | ⑪ ทางออกสายมอเตอร์และสายดิน        |
| ⑥ ไฟแสดงผล            |                                    |

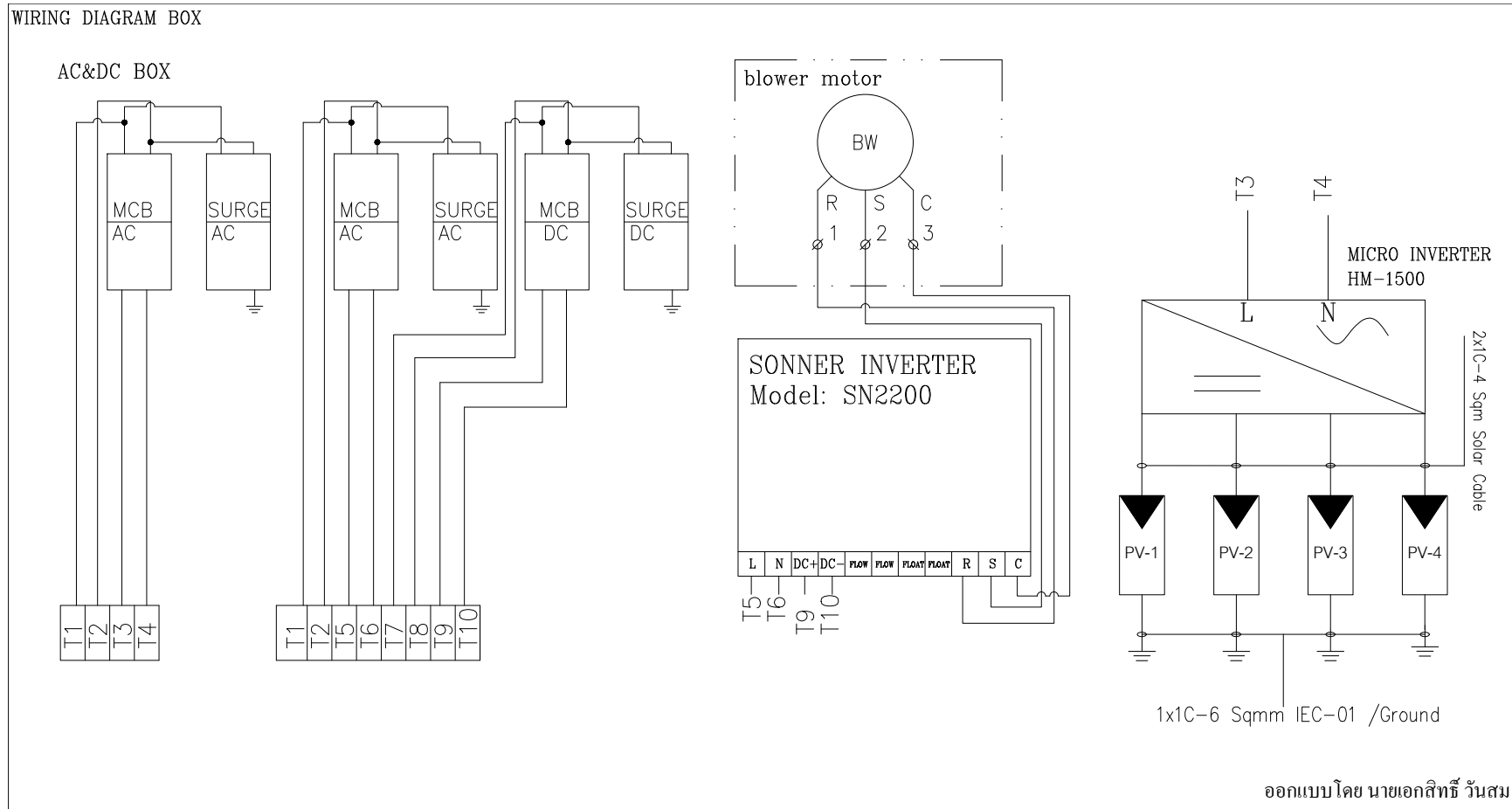
โครงการการศึกษาและพัฒนาหอฟอกอากาศอัจฉริยะโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์และระบบควบคุมดูแลผ่านเทคโนโลยีไอโอที เพื่อการลดฝุ่นละอองขนาดเล็ก (PM 2.5) ในพื้นที่สาธารณะ

4. รายละเอียดแผนภาพการเดินสายไฟของระบบแบบใช้งานร่วมกับระบบ GRID



โครงการการศึกษาและพัฒนาหอฟอกอากาศอัจฉริยะ โดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์และระบบควบคุมดูแลผ่านเทคโนโลยีไอโอที เพื่อการลดฝุ่นละอองขนาดเล็ก (PM 2.5) ในพื้นที่สาธารณะ

5. รายละเอียดแผนภาพการเดินสายไฟของระบบแบบใช้งานเฉพาะแผงโซลาร์เซลล์



โครงการการศึกษาและพัฒนาหอฟอกอากาศอัจฉริยะ โดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์และระบบควบคุมผ่านเทคโนโลยีไอโอที เพื่อการลดฝุ่นละอองขนาดเล็ก (PM 2.5) ในพื้นที่สาธารณะ

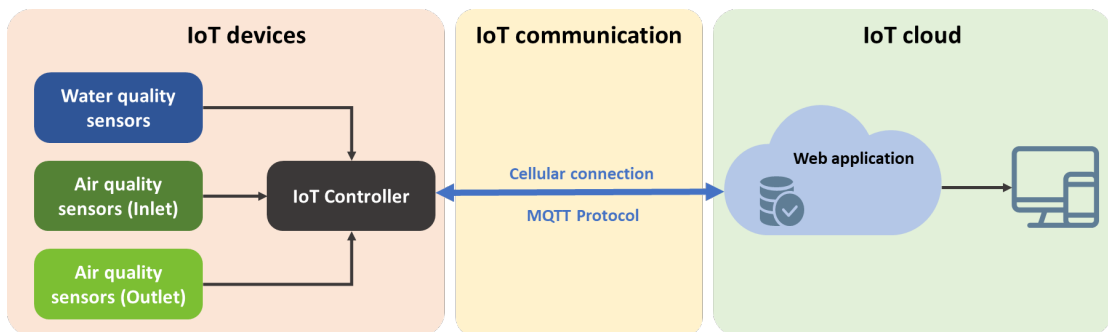
## ภาคผนวก ค

### รายละเอียดระบบเทคโนโลยีไอโอที

โครงการการศึกษาและพัฒนาหอฟอกอากาศอัจฉริยะ โดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์และระบบควบคุมดูแลผ่านเทคโนโลยีไอโอที เพื่อการลดฝุ่นละอองขนาดเล็ก (PM 2.5) ในพื้นที่สาธารณะ

### รายละเอียดเทคโนโลยีไอโอที

ระบบไอโอที (IoT) สำหรับควบคุมหอฟอกอากาศอัจฉริยะ มีวัตถุประสงค์เพื่อตรวจจับประสิทธิภาพการทำงานของแต่ละอุปกรณ์ในหอฟอก อาทิเช่น Air blower มีการใช้เซ็นเซอร์วัดการไหลของลมในท่อ, ในถังเก็บน้ำมีการใช้เซ็นเซอร์วัดระดับน้ำและตำแหน่งท่อต่อขาเข้าจากถังเก็บน้ำเข้าไปยังหอฟอก มีเซ็นเซอร์วัดอัตราการไหลของน้ำ เป็นต้น โดยอุปกรณ์ทั้งหมดจะส่งข้อมูลไปหา IoT control unit เพื่อส่งข้อมูลออกไปยัง platform สำหรับการ monitoring การทำงานของระบบหอฟอก โดยระบบ IoT ดังกล่าวจะใช้การสื่อสารผ่าน protocol Modbus RTU/TCP ในส่วนของการส่งข้อมูลจากระบบเพื่อไปจัดเก็บและแสดงผลบน Platform นั้นใช้การสื่อสารแบบ 4 Generation หรือ 4G ผ่านเครือข่ายสัญญาณโทรศัพท์เคลื่อนที่ โดยใช้เทคโนโลยีแบบ Long Term Evolution (LTE) ซึ่งสามารถรับส่งข้อมูลได้ 10 Mbps ถึง 1 Gbps สาเหตุที่ใช้การสื่อสารแบบ 4G สาเหตุหลักเพราะตัวเครือข่ายการสื่อสารครอบคลุมทั่วประเทศ และสามารถรับส่งข้อมูลได้เพียงพอต่อความต้องการของตัวระบบแล้ว



แผนภาพแสดงสถาปัตยกรรมของระบบ IoT ของหอฟอกจะแสดงส่วนประกอบหลักของในการออกแบบทั้งหมด

ตัวประมวลผลและจัดการหลัก (IoT Control Unit) สำหรับหอฟอกอากาศที่ออกแบบนั้นมีการเลือกใช้เป็น Micro PLC ที่ออกแบบมาเพื่อรองรับการทำงานร่วมกับระบบ IoT โดยเฉพาะ และมีความเสถียรในการทำงานสูง รวมทั้งทนต่อการทำงานในระยะเวลายาวนานตามมาตรฐานการใช้งานในโรงงานอุตสาหกรรม มากกว่านั้นยังสามารถรองรับการเขียนภาษา Ladder ซึ่งเป็นภาษามาตรฐานในการใช้งาน PLC เพื่อทำงานร่วมกับระบบ IoT ได้อีกด้วย โดยรายละเอียด Micro PLC ของ SIEMENS รุ่น 6ED1052-1MD08-0BA1 ที่ถูกนำมาใช้มีดังนี้

โครงการการศึกษาและพัฒนาหอฟอกอากาศอัจฉริยะ โดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์และระบบควบคุมดูแลผ่านเทคโนโลยีไอโอที เพื่อการลดฝุ่นละอองขนาดเล็ก (PM 2.5) ในพื้นที่สาธารณะ

<b>Display</b>	
with display	Yes
<b>Installation type/mounting</b>	
Mounting	on 35 mm DIN rail, 4 spacing units wide
<b>Supply voltage</b>	
Rated value (DC)	
• 12 V DC	Yes
• 24 V DC	Yes
permissible range, lower limit (DC)	10.8 V
permissible range, upper limit (DC)	28.8 V
<b>Time of day</b>	
Time switching clocks	
• Number	400; Max. 400, function-specific
• Power reserve	480 h
<b>Digital inputs</b>	
Number of digital inputs	8; Of which 4 can be used in analog mode (0 to 10 V)
<b>Digital outputs</b>	
Number of digital outputs	4; Relays
Short-circuit protection	No; external fusing necessary
<b>Output current</b>	
• for signal "1" permissible range for 0 to 55 °C, max.	10 A
<b>Relay outputs</b>	
Switching capacity of contacts	
— with inductive load, max.	3 A
— with resistive load, max.	10 A
<b>EMC</b>	
Emission of radio interference acc. to EN 55 011	
• Limit class B, for use in residential areas	Yes; Radio interference suppression according to EN55011, Limit Value Class B

โครงการการศึกษาและพัฒนาหอฟอกอากาศอัจฉริยะ โดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์และระบบควบคุมดูแลผ่านเทคโนโลยีไอโอที เพื่อการลดฝุ่นละอองขนาดเล็ก (PM 2.5) ในพื้นที่สาธารณะ

Standards, approvals, certificates	
CE mark	Yes
CSA approval	Yes
UL approval	Yes
FM approval	Yes
developed in accordance with IEC 61131	Yes
according to VDE 0631	Yes
Marine approval	Yes
Ambient conditions	
Ambient temperature during operation	
• min.	-20 °C; No condensation
• max.	55 °C
Ambient temperature during storage/transportation	
• min.	-40 °C
• max.	70 °C
Altitude during operation relating to sea level	
• Ambient air temperature-barometric pressure-altitude	Tmin ... Tmax at 1 080 hPa ... 795 hPa (-1 000 m ... +2 000 m)
Dimensions	
Width	71.5 mm
Height	90 mm
Depth	60 mm

สำหรับการเชื่อมต่ออินเทอร์เน็ตเพื่อส่งข้อที่รับจากเซ็นเซอร์ ได้นำเราเตอร์ 4G LTE ซึ่งเป็นเราเตอร์ที่สามารถเชื่อมต่อเข้ากับ Micro PLC ของ SIEMENS ผ่านสาย LAN ซึ่งเป็นมาตรฐานที่ใช้ในระบบอุตสาหกรรม โดยรายละเอียดคุณสมบัติเบื้องต้นไปดังนี้



โครงการการศึกษาและพัฒนาหอฟออากาศอัจฉริยะ โดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์และระบบควบคุมดูแลผ่านเทคโนโลยีไอโอที เพื่อการลดฝุ่นละอองขนาดเล็ก (PM 2.5) ในพื้นที่สาธารณะ

#### Wireless Features

Wireless Standards	IEEE 802.11b, 802.11g, 802.11n
Frequency	2.4 GHz
Signal Rate	300 Mbps at 2.4 GHz
Reception Sensitivity	11g 54M: -74 dBm 11n HT20: -71 dBm 11n HT40: -67 dBm
Transmit Power	<20 dBm (2.4 GHz)
Wireless Functions	Enable/Disable Wireless Radio, Wireless Schedule, WMM, Wireless Statistics
WAN Failover	Yes
Wireless Security	64/128-bit WEP, WPA/WPA2, WPA-PSK/WPA2-PSK encryptions
Network Type	4G: FDD-LTE Cat4 (800/900/1800/2100/2600 MHz), TDD-LTE (2300/2500/2600 MHz) 3G: DC-HSPA+/HSPA+/HSPA/UMTS (900/2100 MHz)

#### Software Features

Quality of Service	WMM, QoS
Operating Modes	3G/4G Router, Wireless Router
Management	Access Control, Local Management, Remote Management
WAN Connection Type	Dynamic IP/Static IP/PPPoE/PPTP(Dual Access)/L2TP(Dual Access)
DHCP	Server, Client, DHCP Client List, Address Reservation
Port Forwarding	TP-Link DDNS, DynDns, NO-IP
VPN Pass-Through	PPTP, L2TP, IPSec
Access Control	Parental Controls, Local Management Control, Host List, Access Control
Firewall Security	DoS, SPI Firewall, IP and MAC Address Binding
Protocols	Supports IPv4 and IPv6

โครงการการศึกษาและพัฒนาหอฟอกอากาศอัจฉริยะ โดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์และระบบควบคุมดูแลผ่านเทคโนโลยีไอโอที เพื่อการลดฝุ่นละอองขนาดเล็ก (PM 2.5) ในพื้นที่สาธารณะ

Guest Network	2.4 GHz Guest Network
VPN Server	PPTP VPN, OpenVPN

#### Others

Certification	CE, RoHS
Package Contents	300Mbps Wireless N 4G LTE Router TL-MR6400 Power Adapter RJ45 Ethernet Cable Quick Installation Guide
Environment	Operating Temperature: 0°C~40°C (32°F ~104°F) Storage Temperature: -40°C~60°C (-40°F ~140°F) Operating Humidity: 10%~90% non-condensing Storage Humidity: 5%~90% non-condensing

จากแผนภาพแสดงสถาปัตยกรรมของระบบ IoT ของหอฟอกอากาศ มีรายละเอียดของเซนเซอร์ที่ใช้ทั้งหมดดังนี้

1. Conductivity EC/TDS Sensor
2. PH Temperature Transmitter Detection Sensor
3. Liquid Level Sensor
4. Water Flow Sensor
5. Air Flow Sensor
6. CO<sub>2</sub> Sensor
7. Temperature and Humidity Sensor
8. PM2.5 Sensor
9. Anemometer

โดยรายละเอียดและคุณสมบัติของเซนเซอร์แต่ละชนิดเป็นดังนี้

1. Conductivity EC/TDS Sensor

โครงการการศึกษาและพัฒนาหอฟอกอากาศอัจฉริยะ โดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์และระบบควบคุมดูแลผ่านเทคโนโลยีไอโอที เพื่อการลดฝุ่นละอองขนาดเล็ก (PM 2.5) ในพื้นที่สาธารณะ



Working voltage	DC12~24V	
Power waste	<1W	
Measuring range	0-4400uS/cm	
(optionally one)	0-44000uS/cm	
response time	≤5S	
check the accuracy	≤±2%F*S(full scale)	
Signal output	4~20mA	
(optionally one)	DC0-5V output	
	ModbusRTU-RS485	
Load resistance	Current output: $R_{load} \leq (U_{vcc}(\text{supply voltage}) - 3) / 0.02\Omega$	
Work environment	temperature	0~100°C
	humidity	0-100%RH
Storage environment	temperature	10~50°C (-20~80°C Peak value)
	humidity	20~60%RH
Shape size	65mm*46mm*28.5mm	

โครงการการศึกษาและพัฒนาหอฟอกอากาศอัจฉริยะ โดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์และระบบควบคุมดูแลผ่านเทคโนโลยีไอโอที เพื่อการลดฝุ่นละอองขนาดเล็ก (PM 2.5) ในพื้นที่สาธารณะ

## 2. PH Temperature Transmitter Detection Sensor



Working voltage	DC12~24V	
Power consumption	<1W	
Temperature range	-20 ° C to + 80 ° C	
Temperature accuracy	± 0.5 ° C	
Measuring PH range	0.0-14.0PH	
Measuring precision	PH± 0.1PH	
Signal output (optionally one)	4~20mA	
	DC0-5V output	
	ModbusRTU-RS485	
Load resistance	≥ 10KΩ	
Current output	Current output: $R_{load} \leq \frac{(U_{vcc}(\text{supply voltage})-3)}{0.02} \Omega$	
Work environment	temperature	-20 ° C to + 80 ° C
	humidity	0-100%RH
Storage environment	temperature	10~50°C (-20~80°C Peak value)
	humidity	20~60%RH
Shape size	65mm×46mm×28.5mm	

โครงการการศึกษาและพัฒนาหอฟอกอากาศอัจฉริยะ โดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์และระบบควบคุมดูแลผ่านเทคโนโลยีไอโอที เพื่อการลดฝุ่นละอองขนาดเล็ก (PM 2.5) ในพื้นที่สาธารณะ

### 3. Liquid Level Sensor



#### Features

- Strong anti-interference and long-term stability
- Anti-corrosion material, excellent anti-corrosion performance and durable
- Anti-blocking design, easy to clean
- Modbus-RTU RS485 protocol, it can be used with display device, PLC, inverter, recorder and other instruments
- The shell is made of stainless steel and durable, and with waterproof cable, safe to use

#### Applications

- Reservoir detection
- High pool pump station
- River monitoring
- Marine monitoring station
- Dammed lake monitoring
- Wastewater treatment
- Deep well level monitoring
- Tank level monitoring

#### Introduction

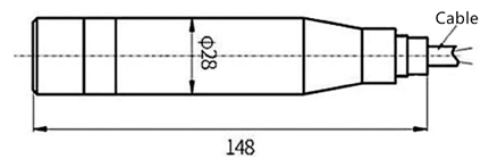
The liquid level sensor measures the height of the liquid and converting it to Modbus-RTU protocol. It works with a data logger or other device which supports RS485 Modbus-RTU protocol.

The liquid level sensor has a built-in high performance and highly sensitive silicon piezoresistive core. The internal chip converts the sensor millivolt signal into a standard protocol, which can be connected to a computer, control instrument, or PLC. It's small size and lightweight, and it has a stainless steel sealing structure that can work in a corrosive environment. The sensor is easy to install and has high anti-vibration and anti-impact performance. It can widely be used in process control, aviation, aerospace, automobile, medical equipment, HVAC, and other applications.

#### Specifications

Product Model	S-YW-01B
Measurement Range	0 ~ 5 meters
Cable Length	5.3 meters
Output	RS485 Modbus-RTU Protocol
Accuracy	±0.25%F.S
Zero Temperature Drift	±0.03%F.S/C
Sensitivity Temperature Drift	±0.03%F.S/C
Long-term Stability	≤0.2%F.S/year
Response Time	5ms (≤ 90%F.S)
Measurement Liquid	slightly corrosive liquid (water, edible oil, etc.)
Power Supply	11~30V DC
Overload Capacity	200%F.S
Compensation Temperature	-10 ~ +70 C
Medium Temperature	-40 ~ +80 C
Storage Temperature	-40 ~ +85 C
Material	304 stainless steel shell & 316L stainless steel core & special rubber-insulated cables
IP Rating	IP68
Device Weight	670g

#### Probe Dimensions

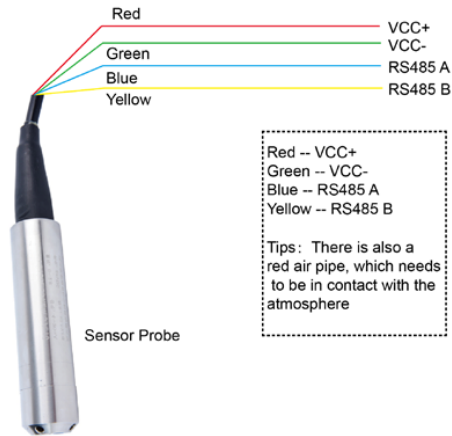


#### Certifications



## Liquid Level Sensor (S-YW-01B)

### Wiring Diagram



### Modbus-RTU Protocol

Default communication parameters: baud rate 9600bps, eight data bits, no check, one stop bit.

Slave address: 0x1A

Baud Rate supports: 1200, 2400, 4800, 9600, 19200, 38400, 57600, 115200

The polynomial of CRC check is 0xA001

The data in the process of data communication is all processed according to the double-byte signed shaping data. If the data is identified as a floating point number, the write needs to read the decimal point to determine the size of the data.

#### Read the command format (03 function code) for example

Format of sending read command:							
Address	Fuction Code	Start register address(H)	Start register address(L)	The number of registers(H)	The number of registers(L)	CRC16(L)	CRC16(H)
0x1A	0x03	0x00	0x00	0x00	0x01	0x87	0xE1

Returns the format of read data:						
Address	Fuction Code	Data length	Value(H)	Value(L)	CRC16(L)	CRC16(H)
0x1A	0x03	0x02	0x00	0x01	0x1D	0x86

#### Write the command format (06 function code) for example

Format of sending read command:							
Address	Fuction Code	Start register address(H)	Start register address(L)	Value(H)	Value(L)	CRC16(L)	CRC16(H)
0x1A	0x06	0x00	0x00	0x00	0x02	0x0B	0xE0

Returns the format of data:							
Address	Fuction Code	Start register address(H)	Start register address(L)	Value(H)	Value(L)	CRC16(L)	CRC16(H)
0x1A	0x06	0x00	0x00	0x00	0x02	0x0B	0xE0

#### Abnormal reply return

Address	Fuction Code	Error code	CRC16(L)	CRC16(H)
0x1A	0x80+fuction code	0x01(invalid instruction) 0x02(invalid address)		

โครงการการศึกษาและพัฒนาหอฟอกอากาศอัจฉริยะ โดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์และระบบควบคุมดูแลผ่านเทคโนโลยีไอโอที เพื่อการลดฝุ่นละอองขนาดเล็ก (PM 2.5) ในพื้นที่สาธารณะ

**Liquid Level Sensor (S-YW-01B)**

**Protocol command list**

Fuction Code	Start register address	The number of registers	Data byte	Data range	Description
0x03	0x0000	1	2	1~255	Read the slave address Default:0x1A (26 DEC)
0x03	0x0001	1	2	0 (1200) 1 (2400) 2 (4800) 3 (9600) 4 (19200) 5 (38400) 6 (57600) 7 (115200)	Read the Baud rate Default:3
0x03	0x0002	1	2	0 (not display) 1 (cm) 2 (mm) 3 (Mpa) 4 (Pa) 5 (kPa) 6 (MA)	Read the Unit
0x03	0x0003	1	2	0 (####) 1 (###.#) 2 (##.##) 3 (#.###)	The decimal points represent 0 to 3 decimal points
0x03	0x0004	1	2	-32768~32767	Measurement Value
0x03	0x0005	1	2	-32768~32767	Read the Zero Point
0x06	0x0000	-	2	1-255	Modify the slave address
0x06	0x0001	-	2	0 (1200) 1 (2400) 2 (4800) 3 (9600) 4 (19200) 5 (38400) 6 (57600) 7 (115200)	Modify the Baud rate

1. The modified value will take effect immediately. If it does not take effect, power off and restart.  
2.Only address and baud rate can be changed.

โครงการการศึกษาและพัฒนาหอฟอกอากาศอัจฉริยะ โดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์และระบบควบคุมดูแลผ่านเทคโนโลยีไอโอที เพื่อการลดฝุ่นละอองขนาดเล็ก (PM 2.5) ในพื้นที่สาธารณะ

#### 4. Water Flow Sensor










### UFM-702 Ultrasonic Clamp On Flow Meter



| Liquid Type |

This flowmeter can be virtually applied to a wide range of measurement. A variety of liquid applications can be accommodated: ultra-pure liquids, potable water, chemicals, raw sewage, reclaimed water, cooling water, river water, plant effluent. etc

| Measuring Diagram |

Flow Measurement	Heat Measurement	Features
		<ul style="list-style-type: none"> <li>No need to cut off water, no pressure loss</li> <li>Easy for installation</li> <li>Connect clamp on temperature transducer can finish the heat/energy measurement</li> </ul>
Clamp on		
		<ul style="list-style-type: none"> <li>No need to cut off water, no pressure loss</li> <li>Stable and reliable for long term operation</li> <li>Connect Pt100 temperature transducer, can finish the heat/energy measurement</li> </ul>
Insertion		
		<ul style="list-style-type: none"> <li>Need to cut off pipe</li> <li>With high accuracy and stability</li> <li>Connect Pt100 temperature transducer, can finish the heat/energy measurement</li> </ul>
Front View	Wiring Diagram	Back View
 <ul style="list-style-type: none"> <li>Dimensions: 92×90×34mm</li> <li>LCD Display: 60×19mm</li> <li>4 keyboard operation</li> </ul>		 <ul style="list-style-type: none"> <li>Installation Method: Guide Rail (width is 35mm)</li> </ul>

โครงการการศึกษาและพัฒนาหอฟอกอากาศอัจฉริยะ โดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์และระบบควบคุมดูแลผ่านเทคโนโลยีไอโอที เพื่อการลดฝุ่นละอองขนาดเล็ก (PM 2.5) ในพื้นที่สาธารณะ

**| Features |**

**High Accuracy**

Better than  $\pm 1\%$

**Wide Measuring Range**

Several types transducer for selection, pipe size from Dn15mm to Dn6000mm

**High Reliability**

Adopt low voltage, multi-pulse technology to improve accuracy, useful life and reliability.

**Strong Anti-interference**

Dual-balance signal differential receiver/driver circuit to avoid interference of converter, TV tower, high voltage line etc.

**Powerful Recording Function**

Automatically record the following data:

1. The totalizer data of the last 512 days/128 months/10 years
2. The time and corresponding flow rate of the last 64 times of power on and off events
3. The working status of the last 32 days

**Far transmission distance, easy for networking**

RS485 support wireless network

**Support Heat Measurement**

Connect the temperature transducer, can finish the heat/energy measurement

Items	Performance & Parameter		
Converter	Principle	Transit-time ultrasonic flowmeter	
	Accuracy	$\pm 1\%$	
	Operation	4 keyboards operation	
	Signal Output	1 way 4~20mA output, electric resistance 0~1K, accuracy 0.1%	
		1 way OCT pulse output ( Pulse width 6~1000ms, default is 200ms)	
		1 way Relay output	
Signal Input	3 way 4~20mA input, accuracy 0.1%, acquisition signal such as temperature, press and liquid level		
	Connect the temperature transducer Pt100, can finish the heat/energy measurement		
Data Interface	Insulate Rs485 serial interface, upgrade the flowmeter software by computer, support the MODBUS		
Special Cable	Twisted-pair cable, generally, the length under 50 meters; Select the RS485, transmission distance can over 1000m		
Pipe Installation Condition	Pipe Material	Steel, Stainless steel, Cast iron, Copper, Cement pipe, PVC, Aluminum, Glass steel product, liner is allowed	
	Pipe Diameter	15~6000mm	
	Straight Pipe	Transducer installation should be satisfied: upstream 10D, downstream 5D, 30D from the pump	
Measuring Medium	Type of Liquid	Single liquid can transmit sound wave, such as Water (hot water, chilled water, city water, sea water, waste water, etc.); Sewage with small particle content; Oil (crude oil, lubricating oil, diesel oil, fuel oil, etc.); Chemicals (alcohol, etc.); Plant effluent; Beverage; Ultra-pure liquids, etc.	
	Temperature	-30~160℃	
	Turbidity	No more than 10000ppm and less bubble	
	Flowrate	0~7m/s	
Working Environment	Temperature	Converter: -20~60℃; Flow Transducer: -30~160℃	
	Humidity	Converter: 85%RH; Flow Transducer: can measure under water, water depth≤2m (transducer sealed glue)	
Power Supply	DC8~36V or AC10~30V		
Power consumption	1.5W		
Dimension	95*95*35MM(Converter)		

โครงการการศึกษาและพัฒนาหอฟอกอากาศอัจฉริยะ โดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์และระบบควบคุมดูแลผ่านเทคโนโลยีไอโอที เพื่อการลดฝุ่นละอองขนาดเล็ก (PM 2.5) ในพื้นที่สาธารณะ

## 5. Air Flow Sensor



### Technical Data Sheet

Pressure / Temperature / Humidity / Air Velocity / Airflow / Sound level



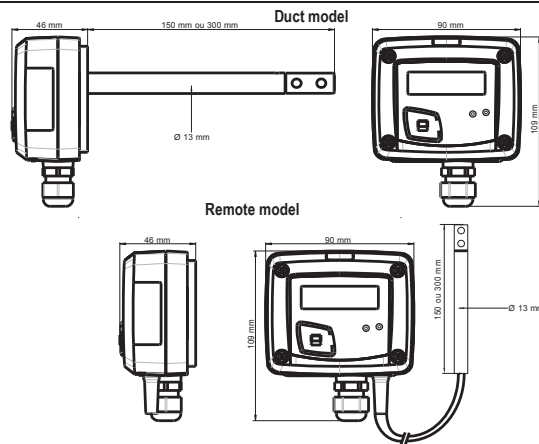
## Temperature and air velocity transmitter CTV 110

### KEY POINTS

- Measuring range from 0 to 30 m/s and from 0 to 50 °C
- 0-10 V or 4-20 mA output, active, power supply 24 Vac/Vdc (3-4 wires)
- ABS V0 housing, IP65, with or without display
- Alternating display of air velocity and temperature
- "¼ turn" system mounting with wall-mount plate
- Housing with simplified mounting system



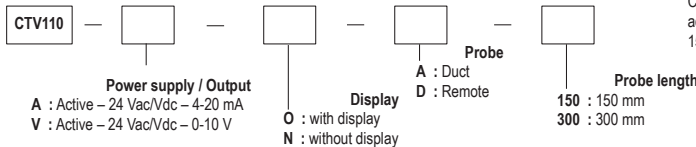
### FEATURES OF THE HOUSING



- Material**  
ABS V0 as per UL94
- Protection**  
IP65
- Display**  
LCD 10 digits. Size : 50 x 17 mm  
Alternating display of air velocity and temperature
- Height of digits**  
Values : 10 mm  
Units : 5 mm
- Cable gland**  
For cable Ø 8 mm maximum
- Weight**  
164 g
- Cable of remote probe** : length 2 m and Ø 4.8 mm in PVC

### PART NUMBER

To order, just add the codes to complete the part number :



**Example : CTV 110 - AOD150**  
CTV110 temperature and air velocity transmitter, active 4-20 mA, with display and remote probe of 150 mm length

### TECHNICAL FEATURES IN TEMPERATURE

Measuring range	From 0 to 50 °C (possibility to set the output on the following ranges : from -20 to +80 °C, from -50 to +50 °C and from 0 to +100 °C)
Accuracy*	±0.3% of reading ±0.25 °C
Unit of measurement	°C, °F
Response time	1/e (63%) 5 s
Type of sensor	Pt100 1/3 DIN
Resolution	0.1 °C
Type of fluid	Air and neutral gases

\*All the accuracies indicated in this technical datasheet were stated in laboratory conditions, and can be guaranteed for measurements carried out in the same conditions, or carried out with calibration compensation.

โครงการการศึกษาและพัฒนาหอฟอกอากาศอัจฉริยะ โดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์และระบบควบคุมดูแลผ่านเทคโนโลยีไอโอที เพื่อการลดฝุ่นละอองขนาดเล็ก (PM 2.5) ในพื้นที่สาธารณะ

TECHNICAL FEATURES IN AIR VELOCITY

Outputs settings	From 0 to 5m/s, from 0 to 10 m/s, from 0 to 15 m/s, from 0 to 20 m/s and from 0 to 30 m/s
Accuracy*	From 0 to 3 m/s : $\pm 3\%$ of reading $\pm 0.05$ m/s From 3 to 30 m/s : $\pm 3\%$ of reading $\pm 0.2$ m/s
Units of measurement	m/s and fpm
Response time	1/e (63%) 2 s
Resolution	From 0 to 3 m/s : 0.01 m/s From 3 to 30 m/s : 0.1 m/s
Type of fluid	Air and neutral gases

TECHNICAL SPECIFICATIONS

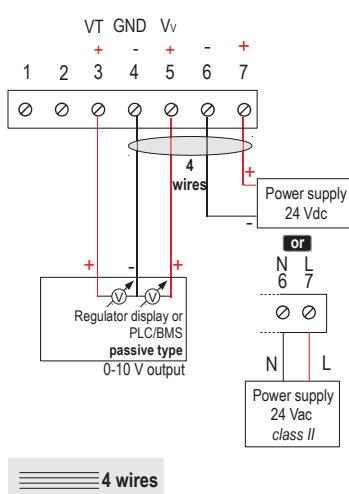
Output / Power supply	- active sensor 0-10 V or 4-20 mA (alim. 24 Vac/Vdc $\pm 10\%$ ), 3-4 wires - maximum load : 500 Ohms (4-20 mA) - minimum load : 1 K Ohms (0-10 V)
Consumption	40 mA (0-10 V) or max. 80 mA (4-20 mA)
Electromagnetical compatibility	EN61326
Electrical connection	Screw terminal block for cables $\varnothing 0.05$ to 2.5 mm <sup>2</sup>
PC communication	Kimo USB-mini Din cable
Environment	Air and neutral gases
Operating temperature	From 0 to +50 °C
Storage temperature	From -10 to +70 °C

ELECTRICAL CONNECTIONS – as per *NFC15-100 standard*

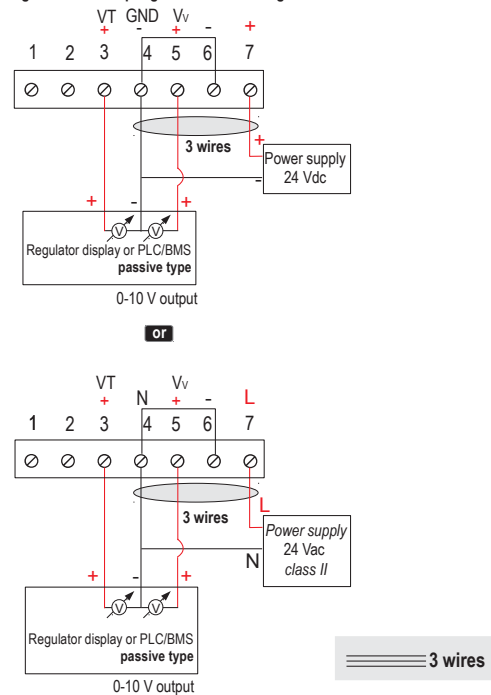


This connection must be made by a qualified technician. To make the connection, the transmitter must not be energized.

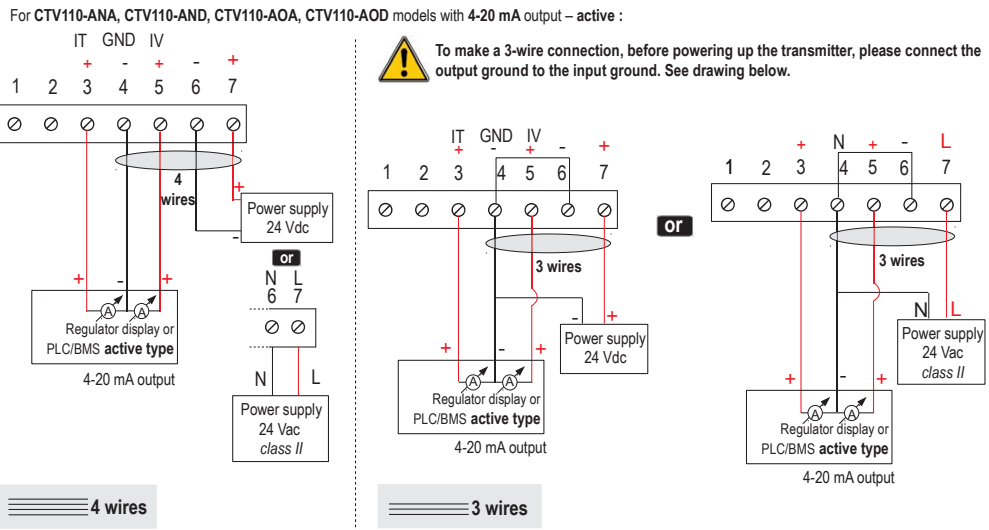
For CTV110-VNA, CTV110-VND, CTV110-VOA, CTV110-VOD models with 0-10 V output – active :



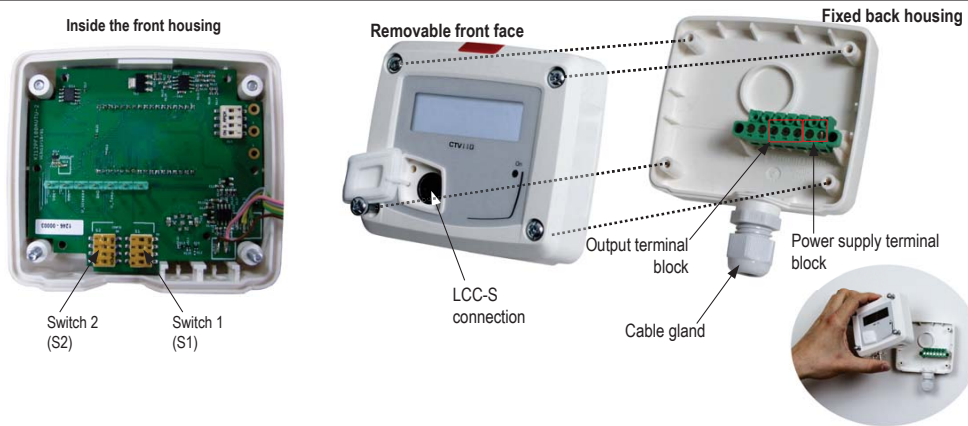
To make a 3-wire connection, before powering up the transmitter, please connect the output ground to the input ground. See drawing below.



โครงการการศึกษาและพัฒนาหอฟอกอากาศอัจฉริยะ โดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์และระบบควบคุมผ่านเทคโนโลยีไอโอที เพื่อการลดฝุ่นละอองขนาดเล็ก (PM 2.5) ในพื้นที่สาธารณะ



CONNECTIONS



SETTINGS AND USE OF THE TRANSMITTER

> Configuration

It is possible to configure the measuring ranges and the units of the transmitter via switch and/or software.



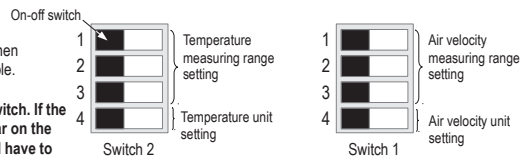
To configure the transmitter, it must not be energized. Then, you can make the settings required, with the DIP switches (as shown on the drawing below). When the transmitter is configured, you can power it up.

> Configuration by switch

To configure the transmitter, unscrew the 4 screws from the housing then open it. DIP switches allowing the different settings are then accessible.



Please follow carefully the combinations beside with the DIP switch. If the combination is wrongly done, the following message will appear on the display of the transmitter "CONF ERROR". In that case, you will have to unplug the transmitter, place the DIP switches correctly, and then power the transmitter up.



> Air velocity unit setting – switch 1

To set a measurement unit in air velocity, put the on-off switch 4 of the units as shown in the table beside.

Configurations	m/s	fpm
Combinations	1 <input type="checkbox"/>	1 <input type="checkbox"/>
	2 <input type="checkbox"/>	2 <input type="checkbox"/>
	3 <input type="checkbox"/>	3 <input type="checkbox"/>
	4 <input type="checkbox"/>	4 <input type="checkbox"/>

โครงการการศึกษาและพัฒนาหอฟอกอากาศอัจฉริยะ โดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์และระบบควบคุมดูแลผ่านเทคโนโลยีไอโอที เพื่อการลดฝุ่นละอองขนาดเล็ก (PM 2.5) ในพื้นที่สาธารณะ

> **Outputs setting in air velocity – switch 1**

To set a measuring range, put the on-off switches 1, 2 and 3 as shown beside.

Configurations	From 0 to 5 m/s	From 0 to 10 m/s	From 0 to 15 m/s	From 0 to 20 m/s	From 0 to 30 m/s
Combinations	1	1	1	1	1
	2	2	2	2	2
	3	3	3	3	3
	4	4	4	4	4

> **Setting of temperature unit – switch 2**

To set the temperature unit, put the on-off switch 4 of the unit as shown beside.

Configurations	°C	°F
Combinations	1	1
	2	2
	3	3
	4	4

> **Outputs setting in temperature – switch 2**

To set a measuring range in temperature, put the on-off switches 1, 2 and 3 of the measuring ranges as shown beside.

Configurations	From 0 to +50°C	From -20 to +80°C	From -50 to +50°C	From 0 to 100°C	From 0 to 200°C
Combinations	1	1	1	1	1
	2	2	2	2	2
	3	3	3	3	3
	4	4	4	4	4

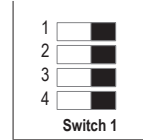
CONFIGURATION VIA LCC-S SOFTWARE (option)

**An easy and friendly configuration with the software !**

You can configure your own intermediary ranges.

Example : for a 0-30 m/s transmitter, the minimum delta of the range is 5 m/s. The instrument could be then configured from 5 to 10 m/s.

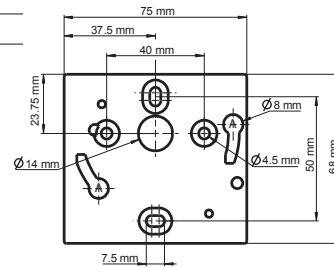
- To access the configuration via software :
  - Set the DIP switches as shown beside.
  - Connect the cable of the LCC-S to the connection of the transmitter.
- Please refer to the user manual of the LCC 100 to make the configuration.



*The configuration of the parameters can be done either with the DIP switch or via software (you can not combine both solutions).*

MOUNTING

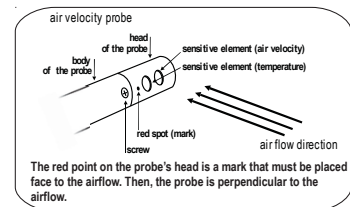
To mount the transmitter, mount the ABS plate on the wall (drilling : Ø6 mm, screws and pins are supplied). Insert the transmitter on the fixing plate (see A on the drawing beside). Rotate the housing in clockwise direction until you hear a "click" which confirms that the transmitter is correctly installed.



**Positioning of the measuring element in the air flow :**

The probe must be placed perpendicular to the air flow, as shown beside. For the duct mount probes, it is possible to place the probe's head front of the air flow, and keep the housing straight :

- Locate the red point marked on the probe's head.
- Remove the screw located on the tip of the probe's body.
- Rotate the probe's head by ¼ turn, ½ turn or ¾ turn, in order to place the red spot front to the air flow.
- Replace the screw on the probe's body.



MAINTENANCE

Please avoid any aggressive solvent. Please protect the transmitter and its probes from any cleaning product containing formalin, that may be used for cleaning rooms or ducts.

OPTIONS AND ACCESSORIES

- KIAL-100A** : Power supply class 2 , 230 Vac input, 24 Vac output
- LCC-S** : configuration software with USB cable
- Sliding fittings, mounting brackets, wall-mount support for hotwire probes

[www.kimo.fr](http://www.kimo.fr)

Distributed by :



**EXPORT DEPARTMENT**  
Tel : + 33. 1. 60. 06. 69. 25 - Fax : + 33. 1. 60. 06. 69. 29  
e-mail : export@kimo.fr

F1ang - transmitter\_CTV110 - 31/05/13 - RCS (24) Périgueux 345 282 095 Non-contractual document - We reserve the right to modify the characteristics of our products without prior notice.

โครงการการศึกษาและพัฒนาหอฟอกอากาศอัจฉริยะ โดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์และระบบควบคุมดูแลผ่านเทคโนโลยีไอโอที เพื่อการลดฝุ่นละอองขนาดเล็ก (PM 2.5) ในพื้นที่สาธารณะ

## 6. CO<sub>2</sub> Sensor

### Technical parameter

- Measuring range : 2000ppm
- DC power supply : 12-24VDC
- Precision :  $\pm(20\text{ppm}+3\%\text{Readings})$  (25°C)
- Average current : <85mA
- NoN-linear : <1%F.S
- Output signal : RS485 Modbus
- Power :  $\leq 1\text{W}$  (@12V DC 25°C)
- Working humidity environment : 0-95%RH
- Working temperature environment : -10-50 °C
- Pressure range : 0.9-1.1atm



### Interface Description

Line Color	Description
Brown	12-24 VDC
Black	Power supply Negative
Yellow	485-A
Blue	485-B

### Communication protocol

Parameter	Description
Code	8-bit binary
Data bit	8 bit
Parity bit	None
Stop bit	1 bit
Error check	CRC
Baud rate	2400bit/s, 4800bit/s, 9600 bit/s default is 9600 bit/s

โครงการการศึกษาและพัฒนาหอฟอกอากาศอัจฉริยะ โดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์และระบบควบคุมดูแลผ่านเทคโนโลยีไอโอที เพื่อการลดฝุ่นละอองขนาดเล็ก (PM 2.5) ในพื้นที่สาธารณะ

## 7. Temperature and Humidity Sensor

### Technical parameter

- DC power supply : 7~36 VDC
- Temperature Range : -40°C~125°C )
- Humidity Range : 0%RH ~100%RH
- Accuracy Temperature :  $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$  (25°C)
- Accuracy Humidity : 3%RH (5%RH ~ 95%RH, 25°C)
- Long-term stability Temperature:  $\leq 0.1\text{C/y}$
- Long-term stability Humidity:  $\leq 1\%RH/y$
- Response time Temperature:  $\leq 18\text{S}$  (1m/s)
- Response time Humidity:  $\leq 6\text{S}$  (1m/s)
- Maximum power consumption : 0.4W
- transmitter circuit operating temperature : -20°C - 60°C, 0%RH - 80%RH
- Output: RS485 ModbusRTU



### Interface Description

Line Color	Description
Red	VCC (7~36 VDC)
Black	GND
Yellow	RS485+ (A)
White	RS485- (B)

### Communication protocol

Parameter	Description
Code	8-bit binary
Data bit	8 bit
Parity bit	None, Odd, Even (Default None)
Stop bit	0,1 (default is 1)

โครงการการศึกษาและพัฒนาหอฟอกอากาศอัจฉริยะ โดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์และระบบควบคุมดูแลผ่านเทคโนโลยีไอโอที เพื่อการลดฝุ่นละอองขนาดเล็ก (PM 2.5) ในพื้นที่สาธารณะ

Error check	CRC
Device ID	1-254 (default is 1)
Baud rate	2400,4800,9600,19200,38400,115200 (default is 9600)

## 8. PM2.5 Sensor

### ET-Modbus RTU PM2.5 Box V2



ET-Modbus RTU PM2.5 Box V2 เป็นชุดตรวจวัดอนุภาคฝุ่นละอองขนาดเล็กในอากาศ สามารถตรวจวัดค่าอนุภาคของฝุ่นละอองขนาดเล็กทั้งในระดับ PM2.5 และ PM10 ได้ โดยใช้เซ็นเซอร์ HPM115S0-XXX ของ Honeywell ซึ่งเป็นชุดเซ็นเซอร์ที่ใช้แสงเลเซอร์ในการตรวจวัดคุณภาพอากาศ โดยใช้วิธีการกระจายแสงเพื่อตรวจจับและนับอนุภาคในช่วงความเข้มข้นตั้งแต่ 0 $\mu\text{g}/\text{m}^3$  ถึง 1,000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$  ในสภาพแวดล้อมที่กำหนด แหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์ส่องสว่างอนุภาคในขณะที่มันถูกดึงผ่านห้องตรวจจับ หลักการทำงานของเซ็นเซอร์ เมื่ออนุภาคเคลื่อนผ่านลำแสงเลเซอร์ แหล่งกำเนิดแสงจะถูกบดบังและถูกบันทึกไว้ในภาพถ่ายหรืออุปกรณ์ตรวจจับแสง แสงจะถูกวิเคราะห์และแปลงเป็นสัญญาณไฟฟ้าเพื่อคำนวณความเข้มข้นแบบ Real Time เซ็นเซอร์อนุภาค Honeywell ให้ข้อมูลเป็นค่าความเข้มข้นของอนุภาคสำหรับช่วงความเข้มข้นของอนุภาคที่กำหนด ชุดเซ็นเซอร์ให้ผลการวัดเป็นข้อมูลแบบดิจิทัล ซึ่งสามารถใช้ตรวจจับจำนวนอนุภาคแขวนลอยในอากาศเช่นความเข้มข้นของอนุภาคและให้ผลการวัดออกมาในรูปแบบของข้อมูลแบบดิจิทัล เซ็นเซอร์นี้สามารถนำไปประยุกต์ติดตั้งใช้งานร่วมกับเครื่องมือต่างๆที่เกี่ยวข้องกับการตรวจวัดความเข้มข้นของอนุภาคแขวนลอยในอากาศหรืออุปกรณ์ปรับปรุงสภาพแวดล้อมอื่นๆ เพื่อให้ได้ค่าข้อมูลความเข้มข้นที่ถูกต้องทันเวลาในสภาวะแวดล้อมจริง

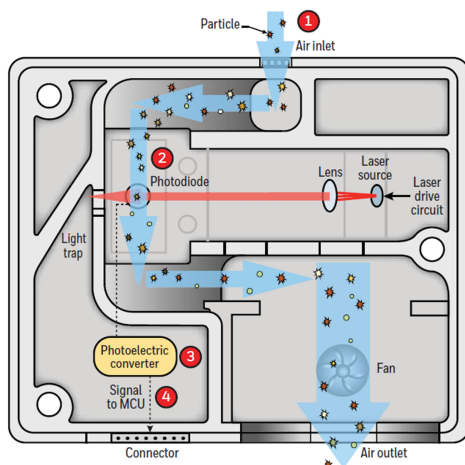
โดย ET-Modbus RTU PM2.5 Box V2 จะมีชุด MCU สำหรับประมวลผลการทำงานของเซ็นเซอร์ รองรับ การติดต่อสื่อสารผ่านพอร์ตอนุกรม RS485 แบบ Half Duplex ผ่าน Protocol แบบ Modbus RTU และ ASCII Command รองรับคำสั่งสำหรับ

- อ่านค่าเซ็นเซอร์ PM2.5 และ PM10
- กำหนดค่าระดับการแจ้งเตือนเมื่อค่าเซ็นเซอร์อยู่ในพิกัดที่กำหนดไว้แล้วทำการ ON/OFF Relay เพื่อนำไปประยุกต์ใช้งานควบคุมอุปกรณ์ไฟฟ้าต่างๆ เช่น เปิดการทำงานของหลอดไฟ Alarm หรือ เปิดการทำงานของเครื่องกรองอากาศ เมื่อค่าของฝุ่นละอองสูงเกินพิกัด

โครงการการศึกษาและพัฒนาหอฟอกอากาศอัจฉริยะ โดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์และระบบควบคุมดูแลผ่านเทคโนโลยีไอโอที เพื่อการลดฝุ่นละอองขนาดเล็ก (PM 2.5) ในพื้นที่สาธารณะ

### คุณสมบัติของ ET-Modbus RTU PM2.5 Box V2

- ใช้กับแหล่งจ่ายไฟ 7-24VDC(แนะนำ 12VDC หรือตามค่าอุปกรณ์ที่ต่อควบคุมผ่าน Relay)
- สื่อสารด้วย RS485 Half Duplex กำหนดหมายเลข Slave Device ID ได้อิสระจากคำสั่ง
- การเชื่อมต่อสื่อสารผ่านสัญญาณแบบ RS485 Half Duplex ด้วย Protocol แบบ Modbus RTU หรือ ASCII Command
  - สามารถกำหนดค่า Slave Address ได้อิสระ(1-247)จาก คำสั่ง
  - Baudrate 9600bps, Data 8Bit, None Parity, 1 Stop Bit
- มีคำสั่งรองรับการทำงานแบบ
  - Read Input Register สำหรับอ่านค่า Sensor PM2.5
  - Read Holding Register สำหรับอ่านค่าต่างๆ
  - Write Single Holding Register สำหรับกำหนดค่าต่างๆ
  - Write Multiple Holding Register สำหรับกำหนดค่า ต่างๆ
- 1 Channel Relay
  - Relay เป็น Contact อิสระ NO/Common/NC(Contact Rating 220VAC / 3A) สามารถกำหนดการใช้งานรีเลย์ได้ 3 แบบ
    - แบบหน้าสัมผัสสวิตซ์ ON/OFF(Normal Open/Common)
    - แบบ ON/OFF Power 5VDC/1A (5VDC/GND)
    - แบบ ON/OFF Power VIN (7-24VDC/GND)
- 1 Sensor HPMA115S0-XXX
- ขนาดกล่อง 100 x 68 x 50 mm. (L x W x H) , พร้อมรูยึดกล่อง



1. พัดลมดึงอากาศผ่านเข้ามาทางเข้า
2. อากาศผ่านเลนเซอร์ที่ส่งแสงสะท้อนออกมา อนุภาคถูกจับโดยโฟโตไดโอด
3. โฟโตไดโอดส่งผ่านข้อมูลไปยังเครื่องแปลงโฟโตอิเล็กทริก และโฟโตอิเล็กทริกคอนเวอร์เตอร์ประมวลผลสัญญาณจากอนุภาคเป็นความหนาแน่น
4. สัญญาณจะถูกส่งไปยังชุดควบคุมไมโครคอนโทรลเลอร์เพื่อใช้อัลกอริทึมประมวลผลข้อมูลและส่งออกเป็นค่าความหนาแน่นของฝุ่นละออง ( $g / m^3$ )

โครงการการศึกษาและพัฒนาหอฟอกอากาศอัจฉริยะ โดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์และระบบควบคุมดูแลผ่านเทคโนโลยีไอโอที เพื่อการลดฝุ่นละอองขนาดเล็ก (PM 2.5) ในพื้นที่สาธารณะ

### คุณสมบัติทางเทคนิคของ Sensor HPMA115S0-XXX

Characteristic	Parameter
Operating principle	laser scattering
Detection <sup>1,2</sup>	PM2.5 and PM10
Output data <sup>1, 2</sup>	PM2.5 in µg/m <sup>3</sup> and PM10 in µg/m <sup>3</sup>
Concentration range	0 µg/m <sup>3</sup> to 1,000 µg/m <sup>3</sup>
Accuracy (at 25°C ±5°C): 0 µg/m <sup>3</sup> to 100 µg/m <sup>3</sup> 100 µg/m <sup>3</sup> to 1000 µg/m <sup>3</sup>	±15 µg/m <sup>3</sup> ±15 %
Response time	<6 s
Supply voltage	5 V ±0.2 V
Standby current (at 25°C ±5°C)	<20 mA
Supply current (at 25°C ±5°C)	<80 mA
Temperature: operating storage	-10°C to 50°C [-14°F to 122°F] -30°C to 65°C [-22°F to 149°F]
Humidity (operating and storage)	0 %RH to 95 %RH non-condensing
Output protocol <sup>3</sup>	UART; baudrate:9600, databits:8, stopbits:1, parity: no
Operating time: continuous mode intermittent mode	20,000 hr depends on duty cycle
Laser class	Laser Class 1: IEC/EN 60825-1: 650 nm
ESD	±4 kV contact, ±8 kV air per IEC 61000-4-2
Radiated immunity	1 V/m (80 MHz to 1000 MHz) per IEC 61000-4-3
Fast transient burst	±0.5 kV per IEC61000-4-4
Immunity to conducted disturbances radiated emissions	3 V per IEC61000-4-6
Radiated emissions	40 dB 30 MHz to 230 MHz; 47 dB 230 MHz to 1000 MHz per CISPR 14
Conducted emissions	0.15 MHz to 30 MHz in compliance with CISPR 14

1 PM2.5 is particulate matter <2.5 µm in diameter; PM10 is particulate matter <10 µm in diameter.

2 PM10 in µg/m<sup>3</sup> is calculated from PM 2.5 readings.

3 Contact Honeywell for other output options.

โครงการการศึกษาและพัฒนาหอฟอกอากาศอัจฉริยะ โดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์และระบบควบคุมดูแลผ่านเทคโนโลยีไอโอที เพื่อการลดฝุ่นละอองขนาดเล็ก (PM 2.5) ในพื้นที่สาธารณะ

### ข้อกำหนดในการสื่อสาร RS485

ข้อกำหนดในการติดต่อสื่อสาร จะใช้การสื่อสารแบบอนุกรม ผ่านระบบสัญญาณ RS485 แบบ Half Duplex ด้วย Modbus RTU หรือ ASCII Command โดยในการสื่อสารจะมีข้อกำหนดของค่าพารามิเตอร์ของการสื่อสารอนุกรมเป็นดังนี้

- Baudrate 9600BPS
- Data 8Bit
- None Parity
- 1 Stop Bit

### การติดต่อสื่อสารในโหมด Modbus RTU

Modbus PM2.5 Relay จะใช้ Modbus Register จำนวน 2 กลุ่ม สำหรับเป็นตัวกลางในการสื่อสารระหว่างบอร์ดกับอุปกรณ์ภายนอกผ่าน Modbus RTU Protocol ดังนี้

Holding Register(16 Bit Read/Write Register)		
Address	Function	Data Type
0000	Read/Write: Slave ID Code(1...247)	unsigned 16Bit(1..247)
0001	Read/Write: Alarm PM2.5	unsigned 16Bit(0, 1...999) µg/m3
0002	Read/Write: Alarm PM10	unsigned 16Bit(0, 1...999) µg/m3
0003	Read/Write: Alarm Hysteresis	Unsigned 16Bit(0, 1...999) µg/m3

- Holding Register[0] ใช้กำหนดค่าหมายเลข Slave ID ของบอร์ด กำหนดค่าได้ระหว่าง 1-247
- Holding Register[1] ใช้กำหนดค่าระดับการแจ้งเตือนของ PM2.5 (0,1-999)
- Holding Register[2] ใช้กำหนดค่าระดับการแจ้งเตือนของ PM10 (จม1-999)
- Holding Register[3] ใช้กำหนดค่า ฮิสเทอรีซิส เพื่อลดการ ON/OFF ของ Relay แบบถั่ว เมื่อค่าของ Sensor อยู่ใกล้จุด Alarm ที่กำหนดไว้ โดยจะเพิ่มช่องห่างระหว่างการ ON/OFF ให้กว้างขึ้น ตัวอย่างเช่น ถ้ากำหนด Alarm Hysteresis = 0 เมื่อกำหนดค่า Alarm ของ PM2.5 = 51 และกำหนดค่า Alarm Hysteresis = 0 เมื่อค่าของ Sensor PM2.5 มีค่าเท่ากับหรือมากกว่า 51 จะทำให้ Relay ON และเมื่อ Sensor PM2.5 ลดค่าน้อยกว่า 51 จะทำให้ Relay OFF ซึ่งเมื่อค่า PM2.5 อยู่ระหว่าง 50 และ 51 อาจทำให้ Relay ON/OFF สลับกันไปมาบ่อยๆ แต่เมื่อกำหนดค่า Alarm Hysteresis = 1 เมื่อค่าของ Sensor PM2.5 มีค่าเท่ากับหรือมากกว่า 51+1(52) จะทำให้ Relay ON และเมื่อ Sensor PM2.5 ลดค่าน้อยกว่า 51-1(50) จะทำให้ Relay OFF ซึ่งเมื่อค่า PM2.5 เท่ากับ 50 จึงจะทำให้ Relay OFF และ Relay จะเริ่ม ON อีกครั้ง เมื่อค่าของ Sensor PM2.5 = 52 แทน

Input Register(16 Bit Read Only Register)		
Address	Function	Data Type
0000	Read: Firmware Version	Unsigned 16Bit
0001	Read: Sensor PM2.5 Value	unsigned 16Bit(0...999) µg/m3
0002	Read: Sensor PM10 Value	unsigned 16Bit(0...999) µg/m3

- Input Register[0] ใช้แสดงค่า ของ Firmware Version
- Input Register[1] ใช้แสดงค่า PM2.5 เป็นค่าเลขจำนวนเต็ม 16 Bit มีค่าระหว่าง 0-999
- Input Register[2] ใช้แสดงค่า PM10 เป็นค่าเลขจำนวนเต็ม 16 Bit มีค่าระหว่าง 0-999

โครงการการศึกษาและพัฒนาหอฟอกอากาศอัจฉริยะ โดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์และระบบควบคุมดูแลผ่านเทคโนโลยีไอโอที เพื่อการลดฝุ่นละอองขนาดเล็ก (PM 2.5) ในพื้นที่สาธารณะ

### 1 การสั่งอ่านค่า และ กำหนดค่า Configuration ต่างๆ

Modbus PM2.5 Relay จะใช้ Holding Register ของ Modbus Protocol ในการส่งผ่านค่า สำหรับกำหนดการทำงานและตั้งค่าพารามิเตอร์ต่างๆของบอร์ด ซึ่งผู้ใช้สามารถสั่งอ่านค่าสถานะ ของ Holding Register ต่างๆ ผ่านทาง Modbus RTU โดยใช้ Function 0x03(Read Holding Register) สำหรับสั่งอ่านค่าจาก Address ระหว่าง 0 ถึง 3 หรือ ใช้ Function 0x06(Write Single Register) สำหรับกำหนดค่าให้ Holding Register ตำแหน่ง 0 ถึง 3 ตามลำดับ ดังตารางดังนี้

Holding Register(16 Bit Read/Write Register)		
Address	Function	Data Type
0000	Read/Write: Slave ID Code(1...247)	unsigned 16Bit(1..247)
0001	Read/Write: Alarm PM2.5	unsigned 16Bit(0, 1...999) µg/m3
0002	Read/Write: Alarm PM10	unsigned 16Bit(0, 1...999) µg/m3
0003	Read/Write: Alarm Hysteresis	Unsigned 16Bit(0, 1...999) µg/m3

ตาราง แสดงตำแหน่ง Holding Register สำหรับกำหนดค่า Configuration ต่างๆ

AQI	PM2.5	PM10	ระดับคุณภาพอากาศ
	เฉลี่ย 24 ชั่วโมง		
0-25	0-25	0-50	ดีมาก
26-50	26-37	51-80	ดี
51-100	38-50	81-120	ปานกลาง
101-200	51-90	121-180	เริ่มมีผลกระทบต่อสุขภาพ
มากกว่า 200	มากกว่า 90	มากกว่า 180	มีผลกระทบต่อสุขภาพ

ตารางแสดง ค่าระดับฝุ่นละอองขนาดเล็กในอากาศ เปรียบเทียบกับ ระดับคุณภาพอากาศ

ตารางที่ 2 ค่าความเข้มข้นของสารมลพิษทางอากาศที่เทียบเท่ากับค่าดัชนีคุณภาพอากาศ

AQI	PM <sub>2.5</sub>	PM <sub>10</sub>	O <sub>3</sub>
	(มคก./ลบ.ม.)	(มคก./ลบ.ม.)	(ppb)
เฉลี่ย 24 ชั่วโมงต่อเนื่อง			
0 - 25	0 - 25	0 - 50	0 - 25
26 - 50	26 - 37	51 - 80	36 - 50
51 - 100	38 - 50	81 - 120	51 - 70
101 - 200	51 - 90	121 - 180	71 - 120
มากกว่า 200	91 ขึ้นไป	181 ขึ้นไป	121 ขึ้นไป

ช่วงเวลาเฉลี่ย และหน่วยสารมลพิษทางอากาศที่ใช้ในการคำนวณ

- PM<sub>2.5</sub> เฉลี่ย 24 ชั่วโมงต่อเนื่อง : ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร หรือ มคก./ลบ.ม. หรือ µg/m<sup>3</sup>
- PM<sub>10</sub> เฉลี่ย 24 ชั่วโมงต่อเนื่อง : ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร หรือ มคก./ลบ.ม. หรือ µg/m<sup>3</sup>
- O<sub>3</sub> เฉลี่ย 8 ชั่วโมงต่อเนื่อง : ส่วนในพันล้านส่วน หรือ ppb หรือ 1/1,000,000,000
- CO เฉลี่ย 8 ชั่วโมงต่อเนื่อง : ส่วนในล้านส่วน หรือ ppm หรือ 1/1,000,000
- NO<sub>2</sub> เฉลี่ย 1 ชั่วโมง : ส่วนในพันล้านส่วน หรือ ppb หรือ 1/1,000,000,000
- SO<sub>2</sub> เฉลี่ย 1 ชั่วโมง : ส่วนในพันล้านส่วน หรือ ppb หรือ 1/1,000,000,000

ข้อมูลอ้างอิงจาก website กองจัดการคุณภาพอากาศและเสียงกรมควบคุมมลพิษ [http://air4thai.pcd.go.th/webV2/aqi\\_info.php](http://air4thai.pcd.go.th/webV2/aqi_info.php)

โครงการการศึกษาและพัฒนาหอฟอกอากาศอัจฉริยะ โดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์และระบบควบคุมดูแลผ่านเทคโนโลยีไอโอที เพื่อการลดฝุ่นละอองขนาดเล็ก (PM 2.5) ในพื้นที่สาธารณะ

## 2 การส่งอ่านค่า Input Register(Sensor Value)

ในบอร์ด ET-Modbus RTU PM2.5 V2 Box จะรองรับการเชื่อมต่อกับ Sensor สำหรับตรวจจับค่าฝุ่นละอองขนาดเล็กในอากาศ โดย Sensor สามารถตรวจวัดได้ทั้งอนุภาคฝุ่นละอองขนาด 2.5µg และ 10µg ในตัวเดียวกัน และจะใช้ Input Register ของ Modbus Protocol ในการส่งผ่านค่าของ Sensor ในรูปแบบของเลขจำนวนเต็ม 16Bit ผู้ใช้สามารถส่งอ่านค่าของ Sensor ทั้ง PM2.5 และ PM10 ผ่านทาง Modbus RTU โดยใช้ Function 0x04(Read Input Register) ส่งอ่านค่าจาก Address 0 ถึง 1 ตามลำดับ โดยมีตำแหน่งดังนี้

Input Register(16 Bit Read Only Register)		
Address	Function	Data Type
0000	Read: Firmware Version	Unsigned 16Bit
0001	Read: Sensor PM2.5 Value	unsigned 16Bit(0...999) µg/m3
0002	Read: Sensor PM10 Value	unsigned 16Bit(0...999) µg/m3

- Firmware Version เป็นรหัสรุ่นของ Firmware เช่น 110 หมายถึง Version 1.10
- PM2.5 เป็นค่าปริมาณอนุภาคฝุ่นละอองขนาด 2.5µ มีค่าระหว่าง 0-1000 มีหน่วยเป็น µg/m3
- PM10 เป็นค่าปริมาณอนุภาคฝุ่นละอองขนาด 10µ มีค่าระหว่าง 0-1000 มีหน่วยเป็น µg/m3

การอ่านค่า Input Register สามารถทำได้โดยใช้ Function 0x04 (Read Input Register) ตามตำแหน่งแอดเดรสของค่าที่ต้องการอ่านดังตารางที่3

โครงการการศึกษาและพัฒนาหอฟอกอากาศอัจฉริยะ โดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์และระบบควบคุมดูแลผ่านเทคโนโลยีไอโอที เพื่อการลดฝุ่นละอองขนาดเล็ก (PM 2.5) ในพื้นที่สาธารณะ

## 9. Anemometer



Cable outlet method	Waterproof aviation plug
model	JL-FS2
name	Universal wind speed sensor
Signal output method	Current type 4-20mA / voltage type 0-5V
Sensor style	Three cups
Starting wind speed	0. 4-0.8 m/s
Resolution	0.1m/s
Effective wind speed measurement range	0-30 m/s or 0-60 m/s
system error	± 3%
Transmission distance	> 1000m
Transmission medium	Cable transmission
Wiring	Three-wire system
Operating temperature	-40°C ~80 °C
Supply voltage	DC12-24V is universal
Power consumption	Voltage type MAX≤0.3W Current type MAX≤0.7W
size	See dimension chart
weight	<1Kg



กองทุนวิจัยและพัฒนากิจการกระจายเสียง กิจการโทรทัศน์ และกิจการโทรคมนาคม เพื่อประโยชน์สาธารณะ  
(สำนักงาน กสทช.)