

ระบบตรวจวัดฝุ่นละอองในโครงการก่อสร้างอาคารโดยเทคโนโลยีอากาศยานไร้คนขับ



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2564

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A DUST MONITORING SYSTEM IN BUILDING CONSTRUCTION PROJECTS BY

UNMANNED AERIAL VEHICLES



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering in Civil Engineering

Department of Civil Engineering

FACULTY OF ENGINEERING

Chulalongkorn University

Academic Year 2021

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	ระบบตรวจวัดฝุ่นละอองในโครงการก่อสร้างอาคารโดย
	เทคโนโลยีอากาศยานไร้คนขับ
โดย	นายภูมิ ฉั่วสุวรรณ
สาขาวิชา	วิศวกรรมโยธา
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	รองศาสตราจารย์ ดร.ธนิต ชงทอง

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่ง
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

.....	คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ เตชวรสินสกุล)	
คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์	
.....	ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.วัชระ เพียรสุภาพ)	
.....	อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(รองศาสตราจารย์ ดร.ธนิต ชงทอง)	
.....	กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.นพดล จอกแก้ว)	
.....	กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(รองศาสตราจารย์ ดร.ก้องกฤษณ์ โตชัยวัฒน์)	

ภูมิ ฉวีสุวรรณ : ระบบตรวจวัดฝุ่นละอองในโครงการก่อสร้างอาคารโดยเทคโนโลยี
 อากาศยานไร้คนขับ. (A DUST MONITORING SYSTEM IN BUILDING
 CONSTRUCTION PROJECTS BY UNMANNED AERIAL VEHICLES) อ.ที่ปรึกษาหลัก
 : รศ. ดร.ธนิศ ธงทอง

ในปัจจุบันปัญหามลพิษทางอากาศนับว่าเป็นปัญหาที่สำคัญ โดยเมืองใหญ่ทั่วโลกต่าง
 ประสบปัญหาฝุ่นละอองขนาดเล็กมีค่าเกินมาตรฐาน ซึ่งอุตสาหกรรมก่อสร้างเป็นหนึ่งในผู้
 ก่อให้เกิดฝุ่นละออง เนื่องจากฝุ่นละอองจากการก่อสร้างอาคารสามารถปลิวหรือฟุ้งกระจายไปได้
 ไกล งานวิจัยนี้จึงต้องการนำเสนอระบบในการวัดและตรวจสอบการกระจายตัวของฝุ่นละออง
 (PM2.5 และ PM10) ในบริเวณโดยรอบโครงการก่อสร้างอาคาร โดยนำเทคโนโลยีอากาศยานไร้
 คนขับและเซ็นเซอร์ตรวจวัดปริมาณฝุ่นละออง PM 2.5 และ PM 10 มาใช้ในการตรวจวัดการ
 กระจายตัวของฝุ่นละออง เนื่องจากการวัดปริมาณฝุ่นละอองในปัจจุบันนั้นเป็นการติดเครื่องมือวัด
 ไว้ที่จุดใดจุดหนึ่ง ดังนั้นการนำเทคโนโลยีอากาศยานไร้คนขับมาใช้นั้นจะทำให้สามารถวัดปริมาณ
 ฝุ่นละอองได้ทุกจุดที่ต้องการ ซึ่งเมื่อนำค่าปริมาณฝุ่นละอองที่วัดได้และค่าตำแหน่ง (พิกัด) มาทำ
 การพล็อตกราฟการกระจายตัวใน Building Information Modeling (BIM) และแสดงกราฟการ
 กระจายตัวโดยประยุกต์ใช้เทคโนโลยีความเป็นจริงเสริม (Augmented Reality) ทำให้เห็น
 ภาพเสมือนอยู่ในสภาพแวดล้อมจริง จะทำให้เห็นการกระจายตัวของฝุ่นละอองจากการก่อสร้าง
 อาคารไปยังพื้นที่บริเวณโดยรอบ หลังจากนั้นทำการทดสอบความคลาดเคลื่อนของเครื่องมือ และ
 ทดสอบระบบที่ใช้ในการวัดปริมาณฝุ่นละอองกับกรณีศึกษา ซึ่งเป็นโครงการก่อสร้างบ้านจัดสรร
 และโครงการก่อสร้างอาคาร วิเคราะห์ปัญหาฝุ่นละอองเบื้องต้นและศึกษาความเหมาะสมหรือ
 ข้อจำกัดการใช้งานระบบตรวจวัดปริมาณฝุ่นละออง

สาขาวิชา วิศวกรรมโยธา

ปีการศึกษา 2564

ลายมือชื่อนิสิต

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก

6170243421 : MAJOR CIVIL ENGINEERING

KEYWORD: Building constructions, Unmanned Aerial Vehicles, Dust sensors,
Building Information Modeling, Augmented Reality, PM 2.5, PM 10

Bhum Chuasuwan : A DUST MONITORING SYSTEM IN BUILDING
CONSTRUCTION PROJECTS BY UNMANNED AERIAL VEHICLES. Advisor : Assoc. Prof.
TANIT TONGTHONG, Ph.D.

At present, air pollution is a prevalent problem since many large cities are facing with dust particles of PM 2.5 and PM 10 exceeding the standard value. Construction industry is one of the sources producing dust, especially, building construction projects where dust from construction activities can spread out over neighboring areas. Therefore, this research proposes a dust monitoring system for building construction projects by using unmanned aerial vehicles integrated with PM 2.5 and PM 10 sensors to measure dust dispersion. Nowadays measuring dust particles used in building construction sites is done by installing a measuring device at a specific location. Using unmanned aerial vehicles with the designed tools, on the other hand, supports users to measure amount of dust particles dispersed from the construction at any desired areas. By using the measured dust particle concentration and coordinates to plot the dispersion in Building Information Modeling (BIM) also by applying augmented reality to visualize images in real world, it can show the dust dispersion from the construction to the surrounding areas. After that, the proposed system was used to measure the dispersion of dust with case studies. Applicability and limitation in the use of dust monitoring system were also mentioned.

Field of Study: Civil Engineering

Student's Signature

Academic Year: 2021

Advisor's Signature

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยฉบับนี้สำเร็จลงได้ด้วยดี เนื่องจากได้รับความกรุณาอย่างสูงจาก รองศาสตราจารย์ ดร.ธนิต ธงทอง อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้กรุณาเสียสละเวลาให้คำแนะนำปรึกษาแนวทางการแก้ไขปัญหาต่างๆที่เกิดขึ้นของวิทยานิพนธ์ ตลอดจนปรับปรุงแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆด้วยความเอาใจใส่เป็นอย่างดี

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.วัชระ เพียรสุภาพ ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร.นพดล จอกแก้ว และ รองศาสตราจารย์ ดร.กองกฤษณ์ โตชัยวัฒน์ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่ให้ความกรุณาแนะนำและตรวจแก้ไขปรับปรุงให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณ นายภูรินทร์ ธานีรัตน์ และนายภัทรพงศ์ พงษ์ภัทรา ที่ได้เสียสละเวลาให้คำแนะนำแนวทางในการดำเนินการและข้อมูลที่เป็นต่อการหาผลลัพธ์ของวิทยานิพนธ์

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากทุนการศึกษาศึกษาวิศวกรรมโยธา 100 ปี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภูมิ ฉั่วสุวรรณ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....ค	ค
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....ง	ง
กิตติกรรมประกาศ.....จ	จ
สารบัญ.....ฉ	ฉ
สารบัญตาราง.....ญ	ญ
สารบัญรูปภาพ.....ฎ	ฎ
บทที่ 1 บทนำ..... 1	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา..... 1	1
1.2 วัตถุประสงค์..... 5	5
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย..... 5	5
1.4 วิธีการดำเนินงานวิจัย..... 5	5
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ..... 6	6
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง..... 7	7
2.1 คำนิยาม..... 7	7
2.2 นิยาม ชนิด และแหล่งกำเนิดของฝุ่นละออง..... 8	8
2.3 ผลกระทบของฝุ่นละออง..... 10	10
2.4 ค่ามาตรฐานและวิธีการตรวจวัดฝุ่นละออง..... 12	12
2.4.1 ค่ามาตรฐานฝุ่นละอองในบรรยากาศโดยทั่วไป..... 14	14
2.4.2 วิธีการตรวจวัด..... 14	14
2.5 กิจกรรมก่อสร้างที่ก่อให้เกิดฝุ่นละออง..... 15	15
2.6 แนวทาง ระเบียบ และข้อปฏิบัติในการควบคุมฝุ่นละอองจากการก่อสร้างอาคาร..... 17	17

2.7	อากาศยานไร้คนขับ (Unmanned Aerial Vehicle, UAV).....	20
2.8	เครื่องมือวัดฝุ่นละออง.....	22
2.9	Building Information Modeling (BIM).....	28
2.10	Augmented reality (AR).....	30
2.11	สรุปงานวิจัยที่เกี่ยวข้องในอดีต	31
บทที่ 3	วิธีการดำเนินงานวิจัย	34
3.1	ลักษณะของงานวิจัย	34
3.2	ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย	34
3.2.1	ศึกษาและเก็บข้อมูลปัญหาฝุ่นละออง	35
3.2.2	วิเคราะห์สาเหตุ ปัญหาที่เกิดขึ้นรวมทั้งแนวทางแก้ไขปัญหา.....	35
3.2.3	ทบทวนเอกสารและวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย.....	36
3.2.4	ออกแบบระบบที่ใช้ในการตรวจวัดฝุ่นละอองในโครงการก่อสร้างอาคาร.....	36
3.2.5	ทดสอบความคลาดเคลื่อนของเครื่องมือที่ใช้ในระบบวัดปริมาณฝุ่นละออง	36
3.2.6	ทดสอบระบบที่ใช้ในการวัดปริมาณฝุ่นละอองกับกรณีศึกษา.....	37
3.2.7	วิเคราะห์และสรุปผลที่ได้จากระบบตรวจวัดฝุ่นละอองในโครงการก่อสร้างอาคาร	37
3.3	กรอบแนวคิดงานวิจัย.....	38
บทที่ 4	ระบบตรวจวัดฝุ่นละอองในโครงการก่อสร้างอาคาร.....	40
4.1	แนวทางการพัฒนาระบบ.....	40
4.2	เครื่องมือที่ใช้ในระบบวัดปริมาณฝุ่นละออง.....	40
4.2.1	อากาศยานไร้คนขับ (Drone).....	42
4.2.2	Arduino board.....	43
4.2.3	เซ็นเซอร์วัดปริมาณฝุ่นละออง	44
4.2.4	เซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิและความชื้น	46
4.2.5	เซ็นเซอร์กำหนดตำแหน่งบนพื้นโลก (GPS).....	46

4.2.6	ตัวรับและตัวส่งสัญญาณข้อมูล.....	46
4.2.7	เครื่องมือวัดความเร็วลม.....	47
4.2.8	เครื่องคอมพิวเตอร์ที่ใช้ในการประมวลผล.....	47
4.3	ซอฟต์แวร์ที่ใช้ในระบบวัดปริมาณฝุ่นละออง	48
4.3.1	Arduino IDE.....	48
4.3.2	Autodesk Revit และ Dynamo	60
4.3.3	Unity 3D และ Vuforia.....	68
4.4	ทดสอบความคลาดเคลื่อนของเครื่องมือที่ใช้ในระบบวัดปริมาณฝุ่นละออง.....	75
4.4.1	เซ็นเซอร์วัดปริมาณฝุ่นละออง (PMS 5003).....	75
4.4.2	เซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิและความชื้น (DHT22).....	77
4.4.3	เซ็นเซอร์กำหนดตำแหน่งบนพื้นโลก (GPS Module GY-NEO6MV2).....	79
4.4.4	ทดสอบว่าต้องใช้เชือกยาวเท่าใด สมจากใบพัดขณะทำการบินของอากาศยานไร้คนขับ จึงไม่มีผลต่อค่าปริมาณฝุ่นละออง.....	80
4.5	สรุประบบตรวจวัดฝุ่นละอองในโครงการก่อสร้างอาคาร	82
4.5.1	การเก็บข้อมูลค่าปริมาณต่างๆตามสภาพหน้างานจริง	82
4.5.2	การแสดงผลข้อมูลเพื่อนำไปวิเคราะห์ปัญหาฝุ่นละออง	82
บทที่ 5	การประยุกต์ใช้ระบบตรวจวัดฝุ่นละอองในโครงการก่อสร้างอาคารกับกรณีศึกษา	84
5.1	ขั้นตอนการประยุกต์ใช้ระบบตรวจวัดฝุ่นละอองกับกรณีศึกษา	84
5.2	ผลการประยุกต์ใช้.....	86
5.2.1	ผลการประยุกต์ใช้กับโครงการกรณีศึกษาที่ 1.....	86
5.2.2	ผลการประยุกต์ใช้กับโครงการกรณีศึกษาที่ 2.....	96
5.2.3	ผลการประยุกต์ใช้กับโครงการกรณีศึกษาที่ 3.....	102
5.2.4	ผลการประยุกต์ใช้กับโครงการกรณีศึกษาที่ 4.....	107
5.3	สรุปผลการประยุกต์ใช้ระบบตรวจวัดฝุ่นละอองในโครงการก่อสร้างอาคารกับกรณีศึกษา..	113

5.3.1 กิจกรรมก่อสร้างในโครงการกรณีศึกษา	113
5.3.2 แนวทางเบื้องต้นในการบินวัดปริมาณฝุ่นละออง.....	114
5.4 ข้อจำกัดในการประยุกต์ใช้ระบบตรวจวัดฝุ่นละอองในโครงการก่อสร้างอาคารกับกรณีศึกษา	115
บทที่ 6 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	116
6.1 สรุปการวิจัย.....	116
6.2 ข้อจำกัดของงานวิจัย.....	117
6.3 ผลการทำงานวิจัย	117
6.4 ข้อเสนอแนะและแนวทางพัฒนางานวิจัยในอนาคต	118
บรรณานุกรม	119
ประวัติผู้เขียน	125



สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 2.1 มาตรฐานคุณภาพอากาศในบรรยากาศโดยทั่วไป (ที่มา: http://www.pcd.go.th/info_serv/reg_std_airsnd01.html)	13
ตารางที่ 2.2 ตารางแสดงข้อดีและข้อจำกัดในการใช้โดรน (ที่มา: อาภาภรณ์ ศิริพรประसार, สำนักจัดการกากของเสียและสารอันตราย)	20
ตารางที่ 2.3 ตารางแสดงการประยุกต์ใช้โดรนในงานด้านการบริหารโครงการก่อสร้าง (ที่มา: Li and Liu, 2019)	21
ตารางที่ 2.4 ตารางแสดงการใช้เครื่องมือ BIM สำหรับการจัดการงานก่อสร้าง, ตัดแปลงจาก (Zaher, Greenwood et al., 2018).....	29
ตารางที่ 4.1 ตารางแสดงคุณสมบัติของเครื่องวัดฝุ่นละออง PMS 5003 ที่มา: (Zhou Yong, 2016)	45
ตารางที่ 4.2 ตารางแสดงสีที่ใช้ในการพล็อตจุดในกราฟการกระจายตัวของฝุ่นละออง โดยอ้างอิงจากผลกระทบต่อสุขภาพอนามัย (ตัดแปลงจากกองจัดการคุณภาพอากาศและเสียง กรมควบคุมมลพิษ)	67
ตารางที่ 4.3 ตารางแสดงการเปรียบเทียบค่าปริมาณฝุ่นละอองที่วัดได้จากเซ็นเซอร์ PMS 5003 และเครื่อง Xiaomi Mi Smart Air Quality Monitor PM2.5 Detector	76
ตารางที่ 4.4 ตารางแสดงการเปรียบเทียบค่าอุณหภูมิและความชื้นที่วัดได้จากเซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิและความชื้น (DHT22) กับเครื่องวัดอุณหภูมิและความชื้น Xiaomi Mijia Square Temperature and Humidity Sensor Bluetooth 4.2.....	78
ตารางที่ 4.5 ตารางแสดงการเปรียบเทียบค่าความคลาดเคลื่อนของพิกัด ที่วัดได้จากเซ็นเซอร์กำหนดตำแหน่งบนพื้นโลก (GPS Module GY-NEO6MV2) และเว็บไซต์หรือแอปพลิเคชัน Google Map... 79	
ตารางที่ 4.6 ตารางแสดงการเปรียบเทียบค่าปริมาณฝุ่นละออง PM 2.5 ที่วัดได้จากเซ็นเซอร์ตรวจวัดฝุ่นละออง (PMS 5003) ที่อยู่ในตระกร้าที่ถูกผูกติดอยู่กับอากาศยานไร้คนขับ (โดรน) กับค่าที่วัดได้จากเซ็นเซอร์ตรวจวัดฝุ่นละอองตามปกติ	81

ตารางที่ 5.1 ตารางแสดงผลการวัดค่าปริมาณฝุ่นละออง (PM2.5 และ PM10) ค่าความชื้นสัมพัทธ์ อุณหภูมิ และเวลาที่ทำการวัด ในสภาพอากาศปกติ (โครงการศึกษากรณีที่ 1) ที่แสดงผลในโปรแกรม Microsoft Excel	88
ตารางที่ 5.2 ตารางแสดงตัวอย่างเวลาที่ทำการวัด ค่าปริมาณฝุ่นละออง (PM2.5 และ PM10) ค่าความชื้นสัมพัทธ์ อุณหภูมิ ละติจูด และลองจิจูด บริเวณด้านหน้าของบ้าน (โครงการศึกษากรณีที่ 1) ซึ่งค่าปริมาณฝุ่นละอองมีค่ามากกว่าปกติ ซึ่งทำการบินวัดโดยอากาศยานไร้คนขับ.....	91
ตารางที่ 5.3 ตารางแสดงสรุปค่าปริมาณฝุ่นละออง PM2.5 และ PM10 ที่บริเวณด้านหน้าของบ้านที่ระดับความสูง 4.5 และ 6 เมตร.....	92
ตารางที่ 5.4 ตารางแสดงผลการวัดค่าปริมาณฝุ่นละออง (PM2.5 และ PM10) ค่าความชื้นสัมพัทธ์ อุณหภูมิ และเวลาที่ทำการวัด ในสภาพอากาศปกติ (โครงการศึกษากรณีที่ 2).....	97
ตารางที่ 5.5 ตารางแสดงตัวอย่างเวลาที่ทำการวัด ค่าปริมาณฝุ่นละออง (PM2.5 และ PM10) ค่าความชื้นสัมพัทธ์ อุณหภูมิ ละติจูด และลองจิจูด บริเวณด้านหน้าของบ้าน (โครงการศึกษากรณีที่ 2) ซึ่งทำการบินวัดโดยอากาศยานไร้คนขับ.....	99
ตารางที่ 5.6 ตารางแสดงผลการวัดค่าปริมาณฝุ่นละออง (PM2.5 และ PM10) ค่าความชื้นสัมพัทธ์ อุณหภูมิ และเวลาที่ทำการวัด ในสภาพอากาศปกติ (โครงการศึกษากรณีที่ 3).....	104
ตารางที่ 5.7 ตารางแสดงตัวอย่างเวลาที่ทำการวัด ค่าปริมาณฝุ่นละออง (PM2.5 และ PM10) ค่าความชื้นสัมพัทธ์ อุณหภูมิ ละติจูด และลองจิจูด บริเวณด้านหน้าของอาคาร (โครงการศึกษากรณีที่ 3) ซึ่งทำการบินวัดโดยอากาศยานไร้คนขับ	104
ตารางที่ 5.8 ตารางแสดงผลการวัดค่าปริมาณฝุ่นละออง (PM2.5 และ PM10) ค่าความชื้นสัมพัทธ์ อุณหภูมิ และเวลาที่ทำการวัด ในสภาพอากาศปกติ (โครงการศึกษากรณีที่ 4).....	109
ตารางที่ 5.9 ตารางแสดงตัวอย่างเวลาที่ทำการวัด ค่าปริมาณฝุ่นละออง (PM2.5 และ PM10) ค่าความชื้นสัมพัทธ์ อุณหภูมิ ละติจูด และลองจิจูด บริเวณรอบๆอาคาร (โครงการศึกษากรณีที่ 4) ซึ่งทำการบินวัดโดยอากาศยานไร้คนขับ.....	110

สารบัญรูปรูปภาพ

หน้า

รูปที่ 1.1 รูปภาพแสดงปริมาณฝุ่นละออง PM2.5 มีค่าเกินเกณฑ์มาตรฐานในพื้นที่กรุงเทพมหานคร ในช่วงฤดูหนาว (เดือนธันวาคมถึงเมษายน) (ที่มา: กรมควบคุมมลพิษ).....	2
รูปที่ 1.2 รูปภาพแสดงปัญหาฝุ่นละอองในเขตกรุงเทพมหานครและปริมณฑล (ที่มา: https://www.bbc.com/thai/thailand-51030236).....	3
รูปที่ 1.3 รูปภาพแสดงการประยุกต์ใช้อากาศยานไร้คนขับในงานด้านวิศวกรรมโยธา (ที่มา: (Chaturvedi, 2018).....	3
รูปที่ 2.1 รูปภาพแสดงขนาดของอนุภาคและความสามารถในการเข้าสู่ระบบทางเดินหายใจ (ที่มา: (วงศ์พันธ์, 2536).....	12
รูปที่ 2.2 รูปภาพแสดงรายละเอียดของแผนการควบคุมดูแลฝุ่นละอองจากการก่อสร้าง ดัดแปลง ซ่อมแซม หรือรื้อถอนอาคาร (ที่มา: ระเบียบ และข้อปฏิบัติในการควบคุมฝุ่นละอองจากการก่อสร้าง ประเภทต่างๆ กรมควบคุมมลพิษ (2547)).....	19
รูปที่ 2.3 รูปภาพแสดงอุปกรณ์ที่ใช้ประเมินคุณภาพอากาศภายในอาคาร (ที่มา: Karami, McMorrow et al. (2018)).....	23
รูปที่ 2.4 รูปภาพแสดงระบบเครือข่ายเซ็นเซอร์วัดฝุ่นละออง (ที่มา: Li, J., H. Li, Y. Ma et al. (2018)).....	24
รูปที่ 2.5 รูปภาพแสดงเครื่องวัดฝุ่นแบบพกพา (Dylos air quality monitor รุ่น DC 1700 Battery operated AQM) (ที่มา: สมจินตนา (2559)).....	25
รูปที่ 2.6 รูปภาพแสดงเครื่องมือวัดฝุ่นละอองที่ใช้ศึกษาประกอบด้วย (a) Speck, (b) Dylos 1700, (c) TSI Air Assure และ (d) UBAS (ที่มา: Manikonda, Ziková et al. (2016)).....	28
รูปที่ 2.7 รูปภาพแสดงตัวอย่างแอปพลิเคชัน AIR (ที่มา: MATHEWS, CHIMALAKONDA ET AL.(2021)).....	31
รูปที่ 3.1 สรุปขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	37
รูปที่ 3.2 รูปภาพแสดงกรอบแนวคิดงานวิจัยระบบตรวจวัดฝุ่นละอองในโครงการก่อสร้างอาคาร.....	38

รูปที่ 4.1 รูปภาพแสดงโดรนที่ติดตั้งอุปกรณ์วัดปริมาณฝุ่นละออง อุปกรณ์วัดอุณหภูมิและความชื้น และอุปกรณ์กำหนดตำแหน่งบนพื้นโลก (GPS)	41
รูปที่ 4.2 รูปภาพแสดงผังการทำงานและอุปกรณ์ของระบบระบบวัดปริมาณฝุ่นละออง	42
รูปที่ 4.3 รูปภาพแสดงอุปกรณ์ในตะกร้าที่ถูกผูกไว้กับโดรน ซึ่งประกอบไปด้วย Arduino board ถ่าน เซ็นเซอร์วัดปริมาณฝุ่นละออง เซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิและความชื้น เซ็นเซอร์กำหนดตำแหน่งบนพื้นโลก (GPS) และตัวส่งสัญญาณข้อมูล	42
รูปที่ 4.4 รูปภาพแสดงอากาศยานไร้คนขับ (โดรน) ยี่ห้อ DJI รุ่น Marvic Pro ที่ใช้ในงานวิจัย	43
รูปที่ 4.5 รูปภาพแสดง Arduino Board รุ่น Uno ที่ใช้ในงานวิจัย	43
รูปที่ 4.6 รูปภาพแสดงหลักการทำงานของเครื่องวัดฝุ่นละออง PMS 5003 ที่มา: (Sayahi, Butterfield et al., 2019).....	44
รูปที่ 4.7 รูปภาพแสดงเครื่องวัดความเร็วลม และอุณหภูมิ (AS816).....	47
รูปที่ 4.8 รูปภาพแสดงข้อมูลเวลา ปริมาณฝุ่นละออง (PM2.5 และ PM10) อุณหภูมิและความชื้น และตำแหน่งที่ทำการวัดปริมาณฝุ่นละอองในโปรแกรม Microsoft Excel แบบ Real time	48
รูปที่ 4.9 รูปภาพแสดงการเลือกรุ่นบอร์ด Arduino ที่ใช้ หลังจากเขียนโค้ดโปรแกรมเรียบร้อยแล้ว	49
รูปที่ 4.10 รูปภาพแสดงผังการทำงานระบบวัดปริมาณฝุ่นละอองในโครงการก่อสร้างอาคาร.....	50
รูปที่ 4.11 รูปภาพแสดงตัวอย่างการพล็อตการกระจายตัวของฝุ่นละออง (Model 3 มิติ) ในโปรแกรม Autodesk Revit	61
รูปที่ 4.12 รูปภาพแสดงข้อมูลปริมาณฝุ่นละออง (PM2.5 และ PM10) และตำแหน่งที่ทำการวัด ปริมาณฝุ่นละอองในโปรแกรม Microsoft Excel เพื่อนำไปพล็อตกราฟการกระจายตัวของฝุ่นละออง ในโปรแกรม Autodesk Revit โดยใช้ส่วนเสริม (Add-Ins) ที่ชื่อว่า Dynamo	62
รูปที่ 4.13 รูปภาพแสดงขั้นตอน (Diagram) การ Import ไฟล์ Family และ ไฟล์ Microsoft Excel ในโปรแกรม Autodesk Revit โดยใช้ส่วนเสริม (Add-Ins) ที่ชื่อว่า Dynamo	63
รูปที่ 4.14 รูปภาพแสดงขั้นตอน (Diagram) การแปลงค่าละติจูด ลองจิจูดเป็นค่าพิกัด X Y (ระบบ UTM) ในโปรแกรม Autodesk Revit โดยใช้ส่วนเสริม (Add-Ins) ที่ชื่อว่า Dynamo	64
รูปที่ 4.15 รูปภาพแสดงขั้นตอน (Diagram) การระบุเป็นค่าพิกัด X Y และ Z เพื่อเตรียมพล็อตเป็น กราฟ (Model 3 มิติ) ในโปรแกรม Autodesk Revit โดยใช้ส่วนเสริม (Add-Ins) ที่ชื่อว่า Dynamo	64

รูปที่ 4.16 รูปภาพแสดงขั้นตอน (Diagram) การเลือกค่าปริมาณฝุ่นละอองที่ต้องการนำมาพล็อตเป็นกราฟการกระจายตัว (Model 3 มิติ) ในโปรแกรม Autodesk Revit โดยใช้ส่วนเสริม (Add-Ins) ที่ชื่อว่า Dynamo.....	64
รูปที่ 4.17 รูปภาพแสดงขั้นตอน (Diagram) การสร้างกราฟการกระจายตัวของฝุ่นละออง (Model 3 มิติ) ในโปรแกรม Autodesk Revit โดยใช้ส่วนเสริม (Add-Ins) ที่ชื่อว่า Dynamo.....	65
รูปที่ 4.18 รูปภาพแสดงขั้นตอน (Diagram) ต่อจากรูปที่ 4.17 ซึ่งเป็นการสร้างกราฟการกระจายตัวของฝุ่นละออง (Model 3 มิติ) ในโปรแกรม Autodesk Revit โดยใช้ส่วนเสริม (Add-Ins) ที่ชื่อว่า Dynamo.....	65
รูปที่ 4.19 รูปภาพแสดงขั้นตอนการกำหนดค่าของจุดตามค่าปริมาณค่าฝุ่นละออง (PM2.5 และ PM10) ในโปรแกรม Autodesk Revit.....	66
รูปที่ 4.20 รูปภาพแสดงขั้นตอนเลือกแสดงเฉพาะช่วงค่าปริมาณฝุ่นละอองที่ต้องการ ในกรณีที่มีจุดสีแสดงค่าปริมาณฝุ่นละอองหลายค่า.....	67
รูปที่ 4.21 รูปภาพแสดงการใช้ซอฟต์แวร์สำหรับการนำแบบจำลอง Model 3 มิติ มาประยุกต์กับเทคโนโลยี Augmented Reality (AR).....	68
รูปที่ 4.22 รูปภาพแสดงขั้นตอนการตั้งค่าโปรเจ็ค AR ในโปรแกรม Unity 3D.....	70
รูปที่ 4.23 รูปภาพแสดงขั้นตอนการจัดการฐานข้อมูลของ Image Target ขั้นตอนที่ 2-4.....	70
รูปที่ 4.24 รูปภาพแสดงขั้นตอนการจัดการฐานข้อมูลของ Image Target ขั้นตอนที่ 7.....	71
รูปที่ 4.25 รูปภาพแสดงขั้นตอนการจัดการฐานข้อมูลของ Image Target ขั้นตอนที่ 8-12.....	71
รูปที่ 4.26 รูปภาพแสดงขั้นตอนการนำรูปภาพเป้าหมายเข้ามาในโปรแกรม Unity ขั้นตอนที่ 3-4..	72
รูปที่ 4.27 รูปภาพแสดงขั้นตอนการดับเบิลคลิกไฟล์เดอริโมเดล แล้วลากไฟล์โมเดล (.dae) ไปไว้ใน Image Target.....	73
รูปที่ 4.28 รูปภาพแสดงการกำหนดตำแหน่งที่ Position กำหนดการหมุนที่ Rotation และกำหนดขนาดที่ Scale เพื่อย่อ ขยาย หมุน และปรับตำแหน่งแบบจำลอง model 3 มิติ.....	73
รูปที่ 4.29 รูปภาพแสดงขณะที่ผู้ใช้งานระบบหันกล้องไปยังบริเวณ QR Code ทำให้แสดงผล Model 3 มิติบนมาร์คเกอร์ ซึ่งจะให้เห็นการกระจายตัวของฝุ่นละอองจากโครงการก่อสร้างอาคาร.....	74
รูปที่ 4.30 รูปภาพแสดงแบบจำลอง Model 3 มิติของอาคาร ที่นำมาประยุกต์กับเทคโนโลยี Augmented Reality (AR) ทำให้เห็นภาพเสมือนอยู่ในสภาพแวดล้อมจริง.....	74

รูปที่ 4.31 รูปภาพแสดงแบบจำลอง Model 3 มิติ บริเวณที่มีกิจกรรมก่อสร้างที่ผู้ใช้งานระบบ ต้องการทราบปริมาณฝุ่นละอองเฉพาะจุด.....	75
รูปที่ 4.32 รูปภาพแสดงเครื่องวัดปริมาณฝุ่นละอองแบบพกพา (Xiaomi Mi Smart Air Quality Monitor PM2.5 Detector).....	76
รูปที่ 4.33 รูปภาพแสดงเครื่องวัดอุณหภูมิและความชื้น Xiaomi Mijia Square Temperature and Humidity Sensor Bluetooth 4.2	77
รูปที่ 4.34 รูปภาพแสดงขณะทำการทดลองเปรียบเทียบค่าที่วัดได้จากเซ็นเซอร์ตรวจวัดฝุ่นละออง (PMS 5003) ที่อยู่ในตึกที่ผู้ถูกติดตามอยู่กับอาคารภายในรัศมี 50 เมตร กับค่าที่วัดได้จากเซ็นเซอร์ตรวจวัด ฝุ่นละอองตามปกติเพื่อทดสอบว่าต้องใช้เซ็นเซอร์เท่าใด	80
รูปที่ 5.1 รูปภาพแสดงโครงการกรณีศึกษาที่ 1 ซึ่งเป็นการก่อสร้างบ้านพักอาศัย 2 ชั้น.....	86
รูปที่ 5.2 รูปภาพแสดงกิจกรรมก่อสร้างในโครงการกรณีศึกษาที่ 1 (กิจกรรมสกัด เสาห้องผนัง) พบว่ามีฝุ่นละออง (PM 2.5) เท่ากับ $144 \mu\text{g}/\text{m}^3$	86
รูปที่ 5.3 รูปภาพแสดงกิจกรรมเสาห้องผนังเพื่อเดินสายไฟฟ้า	87
รูปที่ 5.4 รูปภาพแสดงขณะทำการวัดความเร็วลมและอุณหภูมิโดยรอบโครงการศึกษากรณีที่ 1	87
รูปที่ 5.5 รูปภาพแสดงบริเวณที่ทำการบินวัดปริมาณฝุ่นละอองในโครงการกรณีศึกษาที่ 1	89
รูปที่ 5.6 รูปภาพแสดงขณะทำการบินวัดปริมาณฝุ่นละอองบริเวณด้านหน้าของบ้านที่ทำการก่อสร้าง (โครงการกรณีศึกษาที่ 1).....	90
รูปที่ 5.7 รูปภาพแสดงขณะทำการบินวัดปริมาณฝุ่นละอองบริเวณด้านข้างของบ้านที่ทำการก่อสร้าง (โครงการกรณีศึกษาที่ 1).....	90
รูปที่ 5.8 รูปภาพแสดงขณะทำการบินวัดปริมาณฝุ่นละออง ซึ่งขณะทำการวัดมีลมพัดมาทางบริเวณ ด้านหน้าของบ้าน ทำให้ฝุ่นละอองถูกพัดพามาบริเวณด้านหน้าของบ้านเป็นจำนวนมาก	92
รูปที่ 5.9 รูปภาพแสดงการกระจายตัวของฝุ่นละออง PM2.5 จากโครงการศึกษากรณีที่ 1 ไปยังพื้นที่ บริเวณโดยรอบ	93
รูปที่ 5.10 รูปภาพแสดงการกระจายตัวของฝุ่นละออง PM10 จากโครงการศึกษากรณีที่ 1 ไปยังพื้นที่ บริเวณโดยรอบ	93
รูปที่ 5.11 รูปภาพแสดงขณะที่ผู้วิจัยหันกล้องไปยังบริเวณ QR Code ทำให้แสดงผล Model 3 มิติ โครงการศึกษากรณีที่ 1 บนมาร์คเกอร์.....	94

รูปที่ 5.12 รูปภาพแสดง Model 3 มิติบนมาร์คเกอร์ โครงการศึกษาระดับที่ 1 ซึ่งจะทำให้เห็นการกระจายตัวของฝุ่นละอองบริเวณโดยรอบของบ้าน.....	94
รูปที่ 5.13 รูปภาพแสดงค่าปริมาณฝุ่นละอองเฉพาะบริเวณด้านหน้าของบ้าน (โครงการศึกษาระดับที่ 1) โดยใช้เทคโนโลยี Augmented Reality (AR).....	95
รูปที่ 5.14 รูปภาพแสดงโครงการกรณีศึกษาที่ 2 ซึ่งเป็นการก่อสร้างบ้านพักอาศัย 2 ชั้น.....	96
รูปที่ 5.15 รูปภาพแสดงกิจกรรมก่อสร้างในโครงการกรณีศึกษาที่ 2 (กิจกรรมก่ออิฐ).....	97
รูปที่ 5.16 รูปภาพแสดงกิจกรรมก่อสร้างในโครงการกรณีศึกษาที่ 2 (กิจกรรมฉาบผนัง).....	97
รูปที่ 5.17 รูปภาพแสดงขณะทำการวัดความเร็วลมและอุณหภูมิโดยรอบโครงการศึกษาระดับที่ 2...98	
รูปที่ 5.18 รูปภาพแสดงขณะทำการวัดค่าปริมาณฝุ่นละออง PM 2.5 ในสภาพอากาศปกติ โดยรอบโครงการศึกษาระดับที่ 2 โดยใช้เครื่องวัดปริมาณฝุ่นละอองแบบพกพา (Xiaomi Mi Smart Air Quality Monitor PM2.5 Detector)	98
รูปที่ 5.19 รูปภาพแสดงขณะทำการบันทึกปริมาณฝุ่นละอองบริเวณด้านหน้าของบ้านที่ทำการก่อสร้าง (โครงการกรณีศึกษาที่ 2)	100
รูปที่ 5.20 รูปภาพแสดงการกระจายตัวของฝุ่นละออง PM2.5 จากโครงการศึกษาระดับที่ 2 ไปยังพื้นที่บริเวณโดยรอบ	100
รูปที่ 5.21 รูปภาพแสดงการกระจายตัวของฝุ่นละออง PM10 จากโครงการศึกษาระดับที่ 2 ไปยังพื้นที่บริเวณโดยรอบ	101
รูปที่ 5.22 รูปภาพแสดง Model 3 มิติบนมาร์คเกอร์ โครงการศึกษาระดับที่ 2 ซึ่งจะทำให้เห็นการกระจายตัวของฝุ่นละอองบริเวณโดยรอบของบ้าน.....	101
รูปที่ 5.23 รูปภาพแสดงโครงการกรณีศึกษาที่ 3 ซึ่งเป็นการก่อสร้างอาคารหอพักขนาด 5 ชั้น.....	102
รูปที่ 5.24 รูปภาพแสดงกิจกรรมก่อสร้างในโครงการกรณีศึกษาที่ 3 (กิจกรรมปูกระเบื้อง ตัดกระเบื้อง).....	103
รูปที่ 5.25 รูปภาพแสดงกิจกรรมก่อสร้างในโครงการกรณีศึกษาที่ 3 (งานกวาดฝุ่น และเก็บขี้ปูน)	103
รูปที่ 5.26 รูปภาพแสดงขณะทำการวัดค่าปริมาณฝุ่นละออง PM 2.5 ในสภาพอากาศปกติ โดยรอบโครงการศึกษาระดับที่ 3 โดยใช้เครื่องวัดปริมาณฝุ่นละอองแบบพกพา (Xiaomi Mi Smart Air Quality Monitor PM2.5 Detector)	103

รูปที่ 5.27 รูปภาพแสดงขณะทำการบินวัดปริมาณฝุ่นละอองบริเวณรอบๆของอาคารที่ทำการก่อสร้าง (โครงการกรณีศึกษาที่ 3).....	105
รูปที่ 5.28 รูปภาพแสดงการกระจายตัวของฝุ่นละออง PM2.5 จากโครงการศึกษากรณีที่ 3 ไปยังพื้นที่บริเวณโดยรอบ	106
รูปที่ 5.29 รูปภาพแสดงการกระจายตัวของฝุ่นละออง PM10 จากโครงการศึกษากรณีที่ 3 ไปยังพื้นที่บริเวณโดยรอบ	106
รูปที่ 5.30 รูปภาพแสดง Model 3 มิติบนมาร์คเกอร์ โครงการศึกษากรณีที่ 3 ซึ่งจะทำให้เห็นการกระจายตัวของฝุ่นละอองบริเวณโดยรอบของบ้าน.....	107
รูปที่ 5.31 รูปภาพแสดงโครงการกรณีศึกษาที่ 4 ซึ่งเป็นการก่อสร้างอาคารคอนกรีตขนาด 36 ชั้น .	108
รูปที่ 5.32 รูปภาพแสดงกิจกรรมก่อสร้างในโครงการกรณีศึกษาที่ 4 (กิจกรรมตัดไม้แบบ).....	108
รูปที่ 5.33 รูปภาพแสดงกิจกรรมก่อสร้างในโครงการกรณีศึกษาที่ 4 (กิจกรรมต่อเหล็กเสา)	109
รูปที่ 5.34 รูปภาพแสดงขณะทำการวัดความเร็วลมและอุณหภูมิโดยรอบโครงการศึกษากรณีที่ 4	110
รูปที่ 5.35 รูปภาพแสดงขณะทำการบินวัดปริมาณฝุ่นละอองบริเวณรอบๆของอาคารที่ทำการก่อสร้าง (โครงการกรณีศึกษาที่ 4).....	111
รูปที่ 5.36 รูปภาพแสดงการกระจายตัวของฝุ่นละออง PM2.5 และ PM10 จากโครงการศึกษากรณีที่ 4 ไปยังพื้นที่บริเวณโดยรอบ	111
รูปที่ 5.37 รูปภาพแสดง Model 3 มิติบนมาร์คเกอร์ โครงการศึกษากรณีที่ 4 ซึ่งจะทำให้เห็นการกระจายตัวของฝุ่นละอองบริเวณโดยรอบของบ้าน.....	112

บทที่ 1

บทนำ

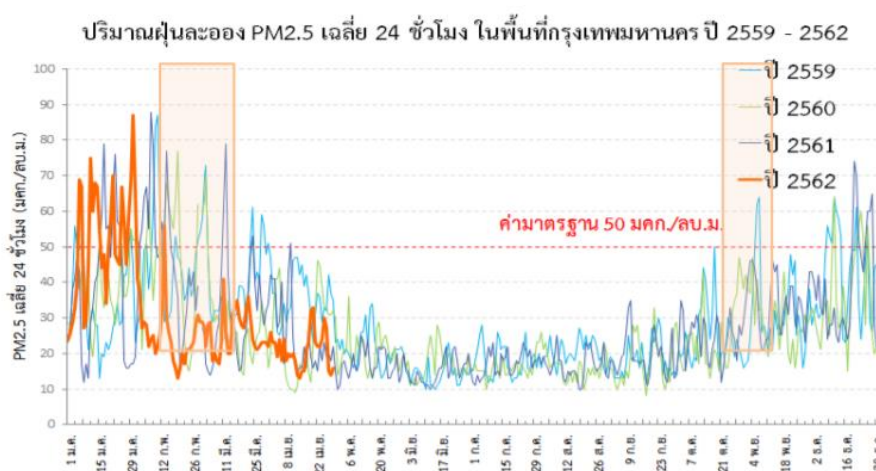
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันปัญหามลพิษทางอากาศนับว่าเป็นปัญหาที่สำคัญมาก โดยเมืองใหญ่ทั่วโลกต่างประสบปัญหาฝุ่นละอองขนาดเล็กมีค่าเกินมาตรฐาน ซึ่งข้อมูลจากองค์การอนามัยโลกกำหนดให้ฝุ่นละออง PM2.5 จัดอยู่ในกลุ่มที่ 1 เป็นสารก่อมะเร็งในมนุษย์ ตั้งแต่ปี 2556 ซึ่งเป็นสาเหตุให้ 1 ใน 8 ของประชากรโลกเสียชีวิตก่อนวัยอันควร (Theerapong, 2562) โดย PM 2.5 คือฝุ่นละอองขนาดเล็กไม่เกิน 2.5 ไมครอน อาจเทียบได้ว่ามีขนาดประมาณ 1 ใน 25 ของเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นผมมนุษย์ ขนาดเล็กมากจนชนจมูกของมนุษย์นั้นไม่สามารถกรองได้ (Chairattanawan and Patthirasinsiri, 2563) ซึ่งงานวิจัยของ Dr. Richard A. Muller นักวิจัยจากสถาบันวิจัยสภาพอากาศ Berkeley Earth ได้ทำการคำนวณเปรียบเทียบปริมาณฝุ่นละอองขนาดเล็กที่ทำให้เกิดมลพิษทางอากาศหรือ PM2.5 กับปริมาณการสูบบุหรี่พบว่า การสูบบุหรี่ 1 มวนจะทำให้เกิดมลพิษทางอากาศเทียบเท่า PM2.5 = 22 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ซึ่งฝุ่นละอองขนาดเล็กนี้สามารถผ่านเข้าสู่ปอด กระแสเลือด และก่อให้เกิดโรคต่างๆมากมายทั้งโรคปอด หอบหืด โรคหัวใจและโรคมะเร็ง เป็นต้น (Muller, 2015) โดยกลุ่มเสี่ยงที่ได้รับผลกระทบได้ง่ายได้แก่ เด็ก ผู้สูงอายุ และผู้ที่มีโรคประจำตัวเกี่ยวกับทางเดินหายใจ

องค์กร Greenpeace ซึ่งเป็นองค์การสาธารณประโยชน์นานาชาติที่ดำเนินกิจกรรมด้านสิ่งแวดล้อมและสันติภาพระดับประเทศที่มีสภาพอากาศแย่ โดยกรุงเทพมหานคร ประเทศไทย ติดอันดับมีคุณภาพอากาศแย่เป็นอันดับ 9 ของโลก และในปี พ.ศ. 2561 ประเทศไทยถูกจัดอยู่ในอันดับที่ 23 ของโลก ในฐานะประเทศที่มีความเข้มข้นเฉลี่ยรายปีของ PM2.5 มากที่สุด ซึ่งมี 10 จังหวัดในไทยที่ติดอยู่ในการจัดอันดับ 15 เมืองที่มีมลพิษ PM2.5 สูงสุดในเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ โดยประเทศไทยมักประสบปัญหาฝุ่นละอองในช่วงฤดูหนาว

ในช่วงเดือนธันวาคม พ.ศ. 2561 ถึงช่วงเดือนมีนาคม พ.ศ. 2562 สถานการณ์ปริมาณฝุ่นละอองในกรุงเทพมหานครและปริมณฑลเพิ่มสูงขึ้นเกินเกณฑ์มาตรฐาน โดยในบางช่วงเวลานั้นติดอันดับเมืองที่มีมลพิษสูงสุดของโลกตามข้อมูลของ AirVisual.com และข้อมูลที่อ้างอิงมาจากสถิติบนเว็บไซต์ The World Air Quality Index Project พบว่าในปี พ.ศ. 2563 และ 2564 กรุงเทพมหานครมีสภาพอากาศเลวร้ายเต็มไปด้วยฝุ่นพิษมากที่สุดในเดือนมกราคม สาเหตุ

เนื่องจากในช่วงฤดูหนาวกรุงเทพมหานครและปริมณฑลมีสภาพอากาศนิ่ง หรือสภาพอากาศปิด อุณหภูมิค่อนข้างต่ำ ช่วงเช้ามีหมอกปกคลุม ทำให้อากาศไม่หมุนเวียน เกิดการสะสมของฝุ่นละอองเพิ่มขึ้น โดยสภาพแล้วกรุงเทพมหานครและปริมณฑลเป็นเมืองใหญ่ มีปริมาณรถยนต์มาก การจราจรติดขัด ทำให้ควันรถยนต์หรือฝุ่นละอองขนาด 2.5 ไมครอน ซึ่งเกิดจากการเผาไหม้ผสมกับหมอก กลายเป็นหมอกควันจำนวนมาก เมื่อเจอกับอากาศนิ่ง หมอกปกคลุม ทำให้ฝุ่นละอองขนาดเล็กบนท้องถนนและพื้นที่ที่มีการเผาไหม้กระจายตัวอยู่บนพื้นราบ ไม่สามารถลอยขึ้นสู่ข้างบนได้ (กรมควบคุมมลพิษ, 2561)



รูปที่ 1.1 รูปภาพแสดงปริมาณฝุ่นละออง PM2.5 มีค่าเกินเกณฑ์มาตรฐานในพื้นที่กรุงเทพมหานคร ในช่วงฤดูหนาว (เดือนธันวาคมถึงเมษายน) (ที่มา: กรมควบคุมมลพิษ)

ปัญหาฝุ่นละอองที่เกิดขึ้นในกรุงเทพมหานครและปริมณฑลนั้นเกิดจากโครงการก่อสร้างระบบขนส่งมวลชนขนาดใหญ่ การปรับปรุงถนน และการก่อสร้างอาคาร (กรมควบคุมมลพิษ, 2562) ซึ่งอุตสาหกรรมก่อสร้างมักได้รับการวิพากษ์วิจารณ์ว่าเป็นหนึ่งในผู้ก่อมลพิษหนักหน่วง (Li, Zhao et al., 2019) ซึ่งในปัจจุบันและอนาคตนั้นมีโครงการก่อสร้างอาคารจำนวนมากในบริเวณพื้นที่กรุงเทพมหานครและปริมณฑล ซึ่งถือเป็นสาเหตุสำคัญที่ทำให้เกิดปัญหาฝุ่นละออง เนื่องจากฝุ่นละอองจากการก่อสร้างอาคารสามารถปลิวหรือฟุ้งกระจายไปได้ไกล โดยฝุ่นละอองจากการก่อสร้างอาคารเกิดจากกิจกรรมก่อสร้างมากมายเช่น การขุดดิน การตัด การเลื่อย การสกัด การขัดผิววัสดุ และการทาสี ฝุ่นจากผงปูนซีเมนต์ เป็นต้น นอกจากนั้นโครงการก่อสร้างอาคารบางโครงการก็ไม่เอาใจใส่ในการทำมาตรการป้องกันฝุ่นละออง ไม่ทำที่ป้องกัน ไม่มีการตรวจวัดปริมาณฝุ่นละออง ทำให้ฝุ่นละอองเกิดการฟุ้งกระจายไปยังบริเวณโดยรอบ ซึ่งสร้างความเดือดร้อนให้แก่ประชาชนที่อาศัยบริเวณใกล้เคียงกับพื้นที่ก่อสร้าง



รูปที่ 1.2 รูปภาพแสดงปัญหาฝุ่นละอองในเขตกรุงเทพมหานครและปริมณฑล (ที่มา: <https://www.bbc.com/thai/thailand-51030236>)

ในอดีตนั้นเทคโนโลยีอากาศยานไร้คนขับหรือโดรน ถูกใช้ในกิจกรรมทางทหารเป็นหลัก แต่ในปัจจุบันอากาศยานไร้คนขับได้ถูกนำมาประยุกต์ใช้ในการดำเนินธุรกิจและอุตสาหกรรมต่างๆ เนื่องจากสามารถใช้ลดต้นทุนในด้านแรงงาน อากาศยานไร้คนขับไม่จำเป็นต้องใช้ถนนและสามารถเข้าถึงสถานที่ที่ทำได้ยาก ทำให้อากาศยานไร้คนขับสามารถเข้าถึงสภาพแวดล้อมที่อันตรายที่มนุษย์ไม่สามารถเข้าถึงได้ (Otto, Agatz et al., 2018) นอกจากนี้อากาศยานไร้คนขับได้ถูกนำมาประยุกต์ใช้ในงานด้านวิศวกรรมโยธามากมาย เช่น เก็บข้อมูลระดับผิวดิน ตรวจสอบความสมบูรณ์ของโครงสร้าง ตรวจสอบสภาพการจราจร เป็นต้น และในด้านสิ่งแวดล้อมนั้นผู้ใช้งานสามารถใช้โดรนที่ติดกล้องและอุปกรณ์ตรวจสอบคุณภาพอากาศ เพื่อตรวจวัดคุณภาพอากาศ หรือภาพถ่ายจากโดรนสามารถใช้ในการบ่งชี้เบื้องต้นของแหล่งกำเนิดมลพิษต่างๆ เช่น สังเกตจากควันดำที่ออกจากปล่อง หรือน้ำที่เปลี่ยนสีขณะออกจากโรงงาน เป็นต้น



รูปที่ 1.3 รูปภาพแสดงการประยุกต์ใช้อากาศยานไร้คนขับในงานด้านวิศวกรรมโยธา ที่มา: (Chaturvedi, 2018)

เทคโนโลยีแบบจำลองสารสนเทศอาคาร (Building Information Modeling: BIM) ถูกนำมาประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมการก่อสร้างในด้านต่างๆมากมายเช่น การออกแบบโครงการ การวิเคราะห์โครงการก่อสร้าง การดูแลและตรวจสอบโครงการ (Bradley, Li et al., 2016) การตรวจสอบข้อขัดแย้งกันของแบบ นอกจากนั้นยังสามารถใช้ BIM เพื่อเข้าถึงข้อมูลด้านสิ่งแวดล้อมในการประเมินผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมของโครงการ โดยการทำ Simulation เพื่อประเมินวัฏจักรชีวิต (Life Cycle Energy) ของโครงการก่อสร้าง การประเมินของเสีย (Waste) ที่เกิดจากการก่อสร้าง เป็นต้น (Mansathit, 2565)

เทคโนโลยีความเป็นจริงเสริม หรือ Augmented Reality (AR) เป็นเทคโนโลยีที่สามารถนำข้อมูลทางดิจิทัลที่ถูกสร้างด้วยคอมพิวเตอร์มาแสดงเป็นภาพเสมือนบนโลกความจริง โดยใช้วิธีซ้อนภาพในโลกเสมือนไว้บนภาพในโลกความเป็นจริง ผ่านอุปกรณ์ดิจิทัล (Wang, Wang et al., 2014) ในปัจจุบันเทคโนโลยี Augmented Reality ถูกนำมาประยุกต์ใช้อย่างแพร่หลาย ซึ่งในอุตสาหกรรมก่อสร้างเทคโนโลยีความเป็นจริงเสริมมักถูกนำมาประยุกต์ใช้เพื่อแสดงแบบจำลองสามมิติของโครงการก่อสร้าง เพื่อเพิ่มความเข้าใจในแบบรายละเอียดของงาน ซึ่งจะช่วยในด้านการควบคุมเวลา ราคาค่าก่อสร้าง และป้องกันปัญหาความขัดแย้งในงานก่อสร้างได้ (Shanbari, Blinn et al., 2016)

งานวิจัยนี้จึงต้องการนำเสนอการพัฒนาระบบตรวจวัดฝุ่นละอองในโครงการก่อสร้างอาคาร โดยประยุกต์ใช้เซ็นเซอร์ตรวจวัดฝุ่นละออง (PM2.5 และ PM10) เซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิและความชื้น เซ็นเซอร์กำหนดตำแหน่งบนพื้นโลก (GPS) และตัวส่งสัญญาณข้อมูล มาติดกับอากาศยานไร้คนขับ (โดรน) เพื่อนำไปบินวัดปริมาณฝุ่นละอองรอบๆตัวอาคาร เนื่องจากการวัดปริมาณฝุ่นละอองในโครงการก่อสร้างอาคารในปัจจุบันนั้นเป็นการติดเครื่องมือวัดไว้ที่จุดใดจุดหนึ่ง หรือให้คนงานถือเครื่องมือวัดเดินไปบริเวณใดบริเวณหนึ่ง ซึ่งอาจทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนจากตัวผู้วัดและยังเป็นการวัดบริเวณใดบริเวณหนึ่งทำให้ทราบค่าปริมาณฝุ่นละอองบริเวณภายในอาคาร หรือภายในโครงการก่อสร้างเท่านั้น ซึ่งค่าปริมาณฝุ่นละอองนี้อาจไม่สะท้อนถึงปัญหา เนื่องจากไม่ทราบค่าที่กระจายไปยังบริเวณโดยรอบ ซึ่งการนำเทคโนโลยีอากาศยานไร้คนขับมาใช้นั้นจะทำให้สามารถวัดปริมาณฝุ่นละอองได้ทุกจุดที่ต้องการอย่างสะดวกและรวดเร็ว ทำให้เห็นการกระจายตัวของฝุ่นละอองเนื่องจากอากาศยานไร้คนขับสามารถบินไปตามตำแหน่งที่ผู้บังคับโดรนบังคับหรือบินตามตำแหน่ง GPS ที่ผู้บังคับสั่งการ หลังจากนั้นเซ็นเซอร์จะส่งค่าต่างๆมายังคอมพิวเตอร์ของผู้วิจัยทันที เพื่อนำค่าปริมาณฝุ่นละอองที่วัดได้และค่าตำแหน่ง (พิกัด) มาทำการพล็อตกราฟการกระจายตัว (Model 3

มิติ) แบบ Real time ใน Building Information Modeling (BIM) และนำแบบจำลอง Model 3 มิติ มาประยุกต์กับเทคโนโลยี Augmented Reality (AR) ทำให้เห็นภาพเสมือนอยู่ในสภาพแวดล้อมจริง ซึ่งจะทำให้เห็นการกระจายตัวของฝุ่นละอองจากโครงการก่อสร้างอาคารไปยังพื้นที่บริเวณชุมชน โดยรอบอย่างชัดเจน หลังจากนั้นทดสอบความคลาดเคลื่อนของเครื่องมือและทดสอบระบบที่ใช้ในการวัดปริมาณฝุ่นละอองกับโครงการกรณีศึกษา รวมทั้งวิเคราะห์และสรุปผลที่ได้จากระบบตรวจวัดฝุ่นละอองในโครงการก่อสร้างอาคาร

1.2 วัตถุประสงค์

เพื่อสร้างระบบในการวัดและตรวจสอบการกระจายตัวของฝุ่นละออง (PM2.5 และ PM10) ในบริเวณโดยรอบโครงการก่อสร้างบ้านจัดสรร และโครงการก่อสร้างอาคาร ที่ได้จากการสำรวจโดยเทคโนโลยีอากาศยานไร้คนขับ รวมทั้งพล็อตกราฟการกระจายตัว (Model 3 มิติ) ของฝุ่นละอองใน Building Information Modeling (BIM) และแสดงกราฟการกระจายตัวโดยประยุกต์ใช้เทคโนโลยีความเป็นจริงเสริม (Augmented Reality) ทำให้เห็นภาพเสมือนอยู่ในสภาพแวดล้อมจริง

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1. ศึกษาปัญหาฝุ่นละอองโดยศึกษาอนุภาคที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กกว่า 2.5 ไมครอน (PM2.5) และอนุภาคที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.5-10 ไมครอน (PM10)
2. ศึกษาปัญหาฝุ่นละอองโดยมีกรณีศึกษาเป็นโครงการก่อสร้างบ้านจัดสรร และโครงการก่อสร้างอาคาร ซึ่งมีการก่อสร้างอยู่ในขั้นตอนของงานโครงสร้าง หรืองานสถาปัตยกรรม
3. ศึกษาปัญหาฝุ่นละอองที่กระจายออกมาบริเวณด้านนอกตัวบ้านหรืออาคาร ซึ่งจะสามารถแพร่กระจายและส่งผลกระทบต่อบริเวณชุมชนโดยรอบ

1.4 วิธีการดำเนินงานวิจัย

1. ศึกษาและเก็บข้อมูลปัญหาฝุ่นละอองในบริเวณโดยรอบโครงการก่อสร้างบ้านจัดสรร และโครงการก่อสร้างอาคาร โดยเป็นการสำรวจเบื้องต้นเกี่ยวกับวิธีการวัดและป้องกันฝุ่นละอองในโครงการก่อสร้าง การแสดงและการนำเสนอผลที่ได้จากการวัดปริมาณฝุ่นละออง รวมทั้งผลกระทบของปัญหาฝุ่นละอองต่อบริเวณชุมชนโดยรอบ
2. วิเคราะห์สาเหตุ ปัญหาที่เกิดขึ้นรวมทั้งแนวทางแก้ไขปัญหา

3. ทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยทั้งในส่วนของเอกสารงานวิจัย ตำราเรียน วารสาร กฎหมาย บทความทางวิชาการและสิ่งตีพิมพ์

4. ออกแบบระบบที่ใช้ในการตรวจวัดฝุ่นละอองในโครงการก่อสร้างอาคาร ซึ่งจากการศึกษา สภาพปัญหาและการลงเก็บข้อมูลรวมทั้งทบทวนวรรณกรรมทำให้เกิดการออกแบบระบบที่ใช้ในการ ตรวจวัดฝุ่นละอองในโครงการก่อสร้างอาคาร

5. ทดสอบความคลาดเคลื่อนของเครื่องมือที่ใช้ในระบบวัดปริมาณฝุ่นละออง โดย เปรียบเทียบค่าที่วัดได้จากเซ็นเซอร์ตรวจวัดฝุ่นละออง เซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิและความชื้น เซ็นเซอร์ กำหนดตำแหน่งบนพื้นโลก (GPS) กับเครื่องมือหรือระบบที่ได้มาตรฐาน และทำการเปรียบเทียบค่า ปริมาณฝุ่นละอองที่วัดได้จากอากาศยานไร้คนขับ (โดรน) กับค่าที่วัดได้ตามปกติ

6. ทดสอบระบบที่ใช้ในการวัดปริมาณฝุ่นละอองกับกรณีศึกษา ซึ่งเป็นโครงการก่อสร้างบ้าน จัดสรรและโครงการก่อสร้างอาคาร

7. วิเคราะห์ผลลัพธ์ที่ได้จากระบบตรวจวัดปริมาณฝุ่นละออง รวมทั้งวิเคราะห์สาเหตุและ ปัญหาฝุ่นละอองที่ส่งผลกระทบต่อบริเวณชุมชนโดยรอบจากกรณีศึกษา ศึกษาความเหมาะสมหรือ ข้อจำกัดต่างๆในการใช้งานระบบตรวจวัดปริมาณฝุ่นละออง และเสนอแนะแนวทางในการพัฒนา ระบบตรวจวัดฝุ่นละอองในโครงการก่อสร้าง พร้อมทั้งสรุปผลการวิจัย

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ระบบที่สามารถวัดปริมาณและตรวจสอบการกระจายตัวของฝุ่นละอองในโครงการ ก่อสร้าง ทำให้สามารถวิเคราะห์สาเหตุและปัญหาฝุ่นละอองที่ส่งผลกระทบต่อบริเวณชุมชนโดยรอบ

2. ทราบถึงเทคนิคหรือวิธีการในการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีอากาศยานไร้คนขับ Building Information Modeling (BIM) และเทคโนโลยีความเป็นจริงเสริม (Augmented Reality: AR) ใน อุตสาหกรรมการก่อสร้างโดยเฉพาะในด้านสิ่งแวดล้อมและการจัดการปัญหาฝุ่นละอองจากโครงการ ก่อสร้าง

3. ทราบถึงศักยภาพและความเป็นไปได้ในการพัฒนาแนวทางหรือแนวคิดใหม่ในการวัด ปริมาณและตรวจสอบการเกิดฝุ่นละออง การนำเสนอแบบจำลอง (Model 3 มิติ) การกระจายตัวของ ฝุ่นละออง จากโครงการก่อสร้าง

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 คำนิยาม

พระราชบัญญัติส่งเสริมและรักษาคุณภาพสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ (2535) ได้บัญญัติความหมายต่างๆไว้ดังนี้ (กรมควบคุมมลพิษ, 2535)

มลพิษ หมายความว่า ของเสีย วัตถุอันตราย และมลสารอื่น ๆ รวมทั้งกาก ตะกอนหรือสิ่งตกค้างจากสิ่งเหล่านั้น ที่ถูกปล่อยทิ้งจากแหล่งกำเนิดมลพิษ หรือที่มีอยู่ในสิ่งแวดล้อมตามธรรมชาติ ซึ่งก่อให้เกิดหรืออาจก่อให้เกิดผลกระทบต่อคุณภาพสิ่งแวดล้อม หรือภาวะที่เป็นพิษภัยอันตรายต่อสุขภาพอนามัยของประชาชนได้ และให้หมายความรวมถึง รั้วสี ความร้อน แสง เสียง กลิ่น ความสั่นสะเทือน หรือเหตุรำคาญอื่น ๆ ที่เกิดหรือถูกปล่อยออกจากแหล่งกำเนิดมลพิษด้วย

ภาวะมลพิษ หมายความว่า สภาวะที่สิ่งแวดล้อมเปลี่ยนแปลงหรือปนเปื้อนโดยมลพิษซึ่งทำให้คุณภาพของสิ่งแวดล้อมเสื่อมโทรมลง เช่น มลพิษทางน้ำ มลพิษทางอากาศ มลพิษในดิน

แหล่งกำเนิดมลพิษ หมายความว่า ชุมชน โรงงานอุตสาหกรรม อาคาร สิ่งก่อสร้าง ยานพาหนะ สถานที่ประกอบกิจการใดๆซึ่งเป็นแหล่งที่มาของมลพิษ

อากาศเสีย หมายความว่า ของเสียที่อยู่ในสภาพเป็นไอเสีย กลิ่นควัน ก๊าซ เขม่า ฝุ่นละออง เถ้าถ่าน หรือมลสารอื่นที่มีสภาพละเอียดบางเบาจนสามารถรวมตัวอยู่ในบรรยากาศได้

อาคาร หมายความว่า อาคารตามกฎหมายว่าด้วยการควบคุมอาคาร โดยพระราชบัญญัติควบคุมอาคาร พ.ศ. 2522 ได้บัญญัติความหมายของอาคารดังนี้

อาคาร หมายความว่า ตึก บ้าน เรือน โรง ร้าน แพ คลังสินค้า สำนักงาน และสิ่งที่สร้างขึ้นอย่างอื่นซึ่งบุคคลอาจเข้าอยู่หรือเข้าใช้สอยได้และหมายความรวมถึง

- (1) อัฒจันทร์หรือสิ่งที่สร้างขึ้นอย่างอื่นเพื่อใช้เป็นที่ชุมนุมของประชาชน
- (2) เขื่อน สะพาน อุโมงค์ทาง หรือท่อระบายน้ำ อุโมงค์คานเรือ ทำน้ำ ทำจอดเรือ รั้วกำแพง หรือประตูที่สร้างขึ้นติดต่อกับหรือใกล้เคียงกับที่สาธารณะหรือสิ่งที่สร้างขึ้นให้บุคคลทั่วไปใช้สอย
- (3) ป้ายหรือสิ่งที่สร้างขึ้นสำหรับติดหรือตั้งป้าย

(ก) ที่ติดหรือตั้งไว้เหนือที่สาธารณะและมีขนาดเกินหนึ่งตารางเมตร หรือมีน้ำหนักรวมทั้งโครงสร้างเกินสิบกิโลกรัม

(ข) ที่ติดหรือตั้งไว้ในระยะห่างจากที่สาธารณะซึ่งเมื่อวัดในทางราบแล้วระยะห่างจากที่สาธารณะมีน้อยกว่าความสูงของป้ายนั้นเมื่อวัดจากพื้นดิน และมีขนาดหรือมีน้ำหนักเกินกว่าที่กำหนดในกฎกระทรวง

(4) พื้นหรือสิ่งก่อสร้างขึ้นเพื่อใช้เป็นที่จอดรถ ที่กลับรถ และทางเข้าออกของรถสำหรับอาคารที่กำหนดตามมาตรา 8 (9)

(5) สิ่งก่อสร้างขึ้นอย่างอื่นตามที่กำหนดในกฎกระทรวง ทั้งนี้ให้หมายความรวมถึงส่วนต่าง ๆ ของอาคารด้วย

2.2 นิยาม ชนิด และแหล่งกำเนิดของฝุ่นละออง

นพภาพร พานิช และคณะ (2547) ได้กล่าวถึงนิยามของฝุ่นละอองดังนี้

ฝุ่นละออง หมายถึง อนุภาคที่เป็นของแข็งหรือของเหลวที่แขวนลอยอยู่ในอากาศหรือก๊าซ ถ้าเป็นอนุภาคที่มีขนาดเล็ก เรียกว่า แอโรโซล (Aerosol) ฝุ่นละอองที่แขวนลอยในบรรยากาศโดยทั่วไปมีขนาดตั้งแต่ 100 ไมครอนลงมา ฝุ่นละอองสามารถก่อให้เกิดผลกระทบต่อสุขภาพอนามัยของคน สัตว์ พืช เกิดความเสียหายต่ออาคารบ้านเรือน บดบังทัศนวิสัย ทำให้เกิดความเดือดร้อนรำคาญแก่ประชาชน

United State Environment Protection Agency, US.EPA, (2008) ได้กล่าวถึงนิยามของฝุ่นละอองดังนี้

ฝุ่นละออง (Particulate Matter) หมายถึง การผสมของอนุภาคของแข็งและหยดของเหลวที่แขวนลอยอยู่ในอากาศ อนุภาคที่กระจายอยู่ในอากาศบางชนิด เช่น ฝุ่น สิ่งสกปรกหรือควัน มีขนาดใหญ่และมีสีดำมืดพองจนมองเห็นได้ด้วยตาเปล่า แต่บางชนิดอาจมีขนาดเล็กมากจนไม่สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่า ต้องใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนในการมองเห็นเท่านั้น อนุภาคเหล่านี้มีหลายขนาดและรูปร่างโดยสามารถสร้างขึ้นจากสารเคมีที่แตกต่างกันหลายร้อยชนิด อนุภาคบางส่วนถูกปล่อยออกมาโดยตรงจากแหล่งที่มา เช่น สถานที่ก่อสร้าง ถนนที่ไม่ได้ลาดยาง ทุ่งนา ปล่อยควันซึ่งอนุภาคส่วนใหญ่เกิดขึ้นในชั้นบรรยากาศอันเป็นผลมาจากปฏิกิริยาที่ซับซ้อนของสารเคมี เช่น ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ และไนโตรเจนออกไซด์ ซึ่งเป็นมลพิษที่ปล่อยออกมาจากโรงไฟฟ้าอุตสาหกรรม

และรถยนต์ โดยฝุ่นละอองโดยทั่วไปมีขนาดตั้งแต่ 100 ไมครอนลงมา ฝุ่นละอองก่อให้เกิดผลกระทบมากมาย ประเทศสหรัฐอเมริกา (United State Environment Protection Agency) จึงได้มีการกำหนดค่ามาตรฐานของฝุ่นรวม (Total Suspended Particulate) และฝุ่น PM10 โดยจากการศึกษาวิจัยพบว่าฝุ่นขนาดเล็กนั้นเป็นอันตรายต่อสุขภาพมากกว่าฝุ่นรวม เนื่องจากสามารถผ่านเข้าไปในระบบทางเดินหายใจชั้นใน ดังนั้นจึงได้มีการยกเลิกค่ามาตรฐานฝุ่นรวมและกำหนดค่ามาตรฐานฝุ่นขนาดเล็กเป็น 2 ชนิดคือ PM10 และ PM2.5 ซึ่งมีความหมายดังนี้

PM10 หมายถึง ฝุ่นหยาบ (Course Particle) ซึ่งเป็นอนุภาคที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.5-10 ไมครอน

PM2.5 หมายถึง ฝุ่นละเอียด (Final Particles) ซึ่งเป็นอนุภาคที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กกว่า 2.5 ไมครอน โดยเส้นผมของมนุษย์โดยเฉลี่ยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 70 ไมครอน ทำให้มีขนาดใหญ่กว่าอนุภาคละเอียดที่ใหญ่ที่สุดถึง 30 เท่า

วสันต์ มาพริก และคณะ (2548) ได้กล่าวถึงชนิดของฝุ่นละอองโดยสามารถแบ่งตามองค์ประกอบทางเคมีได้ดังนี้

1) ฝุ่นละอองจากสารอินทรีย์ มีองค์ประกอบของคาร์บอน ไฮโดรเจน และออกซิเจน โดยแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ ฝุ่นละอองจากสารอินทรีย์ที่ไม่มีชีวิต ซึ่งเกิดจากวัชพืช หญ้า และต้นไม้มีลักษณะเป็นอนุภาคขนาดเล็กและมีน้ำหนักเบา สามารถลอยในบรรยากาศได้ขึ้นอยู่กับความชื้นในอากาศและอุณหภูมิ ส่วนอีกประเภท คือ ฝุ่นละอองจากสารอินทรีย์ที่มีชีวิต เช่น แบคทีเรีย เชื้อรา ไวรัส และสปอร์ สิ่งมีชีวิตเล็กเหล่านี้อาจล่องลอยอยู่ตามลำพังด้วยตัวของมันเองหรืออาจติดอยู่กับอนุภาคต่างๆ

2) ฝุ่นละอองจากสารอนินทรีย์ มีองค์ประกอบต่างๆ เช่น SO_4^{2-} , NO_3^- , Ca^{2+} , Na^+ , K^+ , Cl^- หรือประกอบด้วยโลหะหนัก เช่น ตะกั่ว แคดเมียม แอสเบสตอส เมื่อร่างกายได้รับเข้าไปและสะสมในร่างกายจะทำให้เกิดอันตรายอย่างร้ายแรง ส่วนฝุ่นละอองจากสารอนินทรีย์ที่ประกอบด้วยโลหะ เช่น ฝุ่นทราย (Silica) มี 2 รูปแบบคือ Amorphous (ไม่เป็นอันตราย) และ Crystalline (เป็นอันตรายหากสูดดมในปริมาณมาก)

คู่มือการตรวจวัดฝุ่นละอองในบรรยากาศ กรมควบคุมมลพิษ (2546) ได้กล่าวถึงฝุ่นละอองในบรรยากาศดังนี้

ฝุ่นละอองในบรรยากาศเป็นอนุภาคมีทั้งที่เป็นของแข็งและของเหลว ซึ่งแพร่กระจายอยู่ในอากาศ โดยทั่วไปมีขนาดแตกต่างกันตั้งแต่ 0.0002 ไมครอน จนถึงขนาดใหญ่กว่า 500 ไมครอน ฝุ่นละอองขนาดใหญ่สามารถแขวนลอยอยู่ในบรรยากาศ 2-3 นาทีจะตกลงสู่พื้นด้วยแรงดึงดูดของโลก และแรงลม ฝุ่นละอองที่แขวนลอยอยู่ในอากาศได้นานมักเป็นฝุ่นละอองขนาดเล็กไม่เกิน 10 ไมครอน (PM10) เนื่องจากมีความเร็วในการตกลงสู่พื้นต่ำ หากมีแรงกระทำจากภายนอกเข้ามาเกี่ยวข้อง เช่น การไหลเวียนของอากาศและกระแสลม เป็นต้น จะทำให้สามารถแขวนลอยอยู่ในอากาศได้นานมากขึ้น โดยทั่วไปแหล่งกำเนิดของฝุ่นละอองในบรรยากาศแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ 1) ฝุ่นละอองที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติ ได้แก่ ดิน ทราย หิน ละอองไอน้ำ เขม่าควันจากไฟฟ้า และละอองเกลือจากน้ำทะเล 2) ฝุ่นละอองที่เกิดจากกิจกรรมที่มนุษย์สร้างขึ้น ได้แก่ ฝุ่นจากการคมนาคมขนส่งและการจราจร ฝุ่นจากการก่อสร้าง และฝุ่นจากการประกอบการอุตสาหกรรม

วสุวัตดี เอกพานิช (2555) ได้กล่าวถึงฝุ่นละอองที่เกิดจากการก่อสร้างอาคารดังนี้

ฝุ่นละอองจากการก่อสร้างอาคาร คือฝุ่นละอองที่เกิดจากกิจกรรมต่างๆในการก่อสร้างอาคาร มักจะมีปัญหาในเมืองใหญ่ เช่น กรุงเทพมหานคร โดยการก่อสร้างอาคารในประเทศไทยมักมีปัญหาจากการสร้างอาคารที่ชิดติดกับเขตพื้นที่ข้างเคียง ซึ่งทำให้กระแสลมสามารถพัดพาฝุ่นละอองจากการก่อสร้างอาคารปลิวฟุ้งกระจายไปก่อเหตุเดือดร้อนรำคาญยังอาคารบ้านเรือนที่อาศัยอยู่ใกล้เคียง เนื่องจากฝุ่นละอองจากการก่อสร้างอาคารสูงสามารถปลิวหรือฟุ้งกระจายไปได้ไกล

2.3 ผลกระทบของฝุ่นละออง

ผลกระทบของอนุภาคฝุ่นละอองขนาดเล็กผ่านศูนย์กลาง 2.5 มิลลิเมตร (PM2.5) ต่อสุขภาพของมนุษย์ทั้งการเจ็บป่วยและการเสียชีวิต ได้ถูกศึกษาอย่างกว้างขวางในช่วง 15 ปีที่ผ่านมา (US.EPA, 2009) โดยผลกระทบจากฝุ่นละอองในการก่อสร้างนั้นก่อความรำคาญแก่คนงานในพื้นที่ก่อสร้างและมีผลกระทบต่อบริเวณชุมชนโดยรอบ โดย United State Environment Protection Agency, US.EPA, (2008) ได้แบ่งผลกระทบของฝุ่นละอองออกเป็น 3 ประเภทดังนี้

1. ผลกระทบต่อสุขภาพอนามัย

ขนาดของอนุภาคฝุ่นละอองนั้นมีความสัมพันธ์โดยตรงกับศักยภาพในการสร้างปัญหาสุขภาพ โดยอนุภาคขนาดเล็กที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางน้อยกว่า 10 ไมโครเมตรก่อให้เกิดปัญหาสุขภาพมากที่สุด เพราะอนุภาคสามารถแทรกตัวลึกเข้าไปถึงปอดและบางครั้งอาจแทรกเข้าสู่กระแสเลือดได้ การสัมผัสกับฝุ่นละอองเป็นเวลานานอาจส่งผลกระทบต่อทั้งปอดและหัวใจ โดยการศึกษาทางวิทยาศาสตร์

จำนวนมากกล่าวถึงผลกระทบจากฝุ่นละอองดังนี้ เสียชีวิตก่อนวัยอันควรในผู้ที่เป็โรคหัวใจหรือปอด เกิดอาการหัวใจวาย การเต้นของหัวใจผิดปกติ โรคหอบหืดกำเริบ การทำงานของปอดผิดปกติ เกิดการระคายเคืองของทางเดินหายใจทำให้ไอหรือหายใจลำบาก ซึ่งเด็ก ผู้สูงอายุ และผู้ที่เป็นโรคหัวใจหรือปอด มีแนวโน้มที่จะได้รับผลกระทบมากที่สุดจากการสัมผัสกับฝุ่นละออง

2. ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม

(1) ทักษะวิสัยในการมองเห็นไม่ดี

อนุภาคละเอียด (PM2.5) เป็นสาเหตุหลักที่ทำให้ทัศนวิสัยในการมองเห็นไม่ดี หมอกควันเกิดขึ้นเมื่อแสงแดดกระทบกับอนุภาคมลพิษเล็กๆในอากาศ ซึ่งจะทำให้ลดความชัดเจนและสีของสิ่งที่เราเห็นโดยเฉพาะอย่างยิ่งในช่วงที่มีความชื้น

(2) ความเสียหายต่อสิ่งแวดล้อม

อนุภาคของฝุ่นละอองถูกพัดพาไปได้ไกลโดยลม และตกลงบนพื้นดินหรือน้ำ ทำให้ทะเลสาบและลำธารเป็นกรด เกิดการเปลี่ยนแปลงสมดุลของสารอาหารในน้ำ ขยายพันธุ์ และแองน้ำขนาดใหญ่ ทำลายสารอาหารในดิน สร้างความเสียหายให้กับป่าไม้และพืชไร่ ส่งผลกระทบต่อความหลากหลายของระบบนิเวศ นอกจากนี้ยังมีส่วนทำให้เกิดฝนกรด

(3) ความเสียหายต่อวัสดุ

ฝุ่นละออง (PM10 PM2.5) สามารถปนเปื้อนและทำลายหินหรือวัสดุอื่นๆ รวมถึงวัตถุสำคัญทางวัฒนธรรม เช่น รูปปั้นหรืออนุสาวรีย์ โดยสาเหตุมักมาจากฝนกรด

คู่มือการตรวจวัดฝุ่นละอองในบรรยากาศ กรมควบคุมมลพิษ (2546) ได้แบ่งผลกระทบของฝุ่นละอองในบรรยากาศออกเป็น 3 ประเภทดังนี้

1. ผลกระทบต่อสุขภาพอนามัย

หากมีการหายใจเอาฝุ่นละอองที่ปะปนในอากาศเข้าไปในระบบทางเดินหายใจ ฝุ่นละอองที่มีขนาดใหญ่กว่า 15 ไมครอนจะถูกดักจับที่ระบบทางเดินหายใจส่วนต้น ในส่วนของจมูกและลำคอ ซึ่งจะถูกขับออกมาพร้อมกับเสมหะ ส่วนฝุ่นละอองขนาดเล็กไม่เกิน 10 ไมครอน (PM10) จะเป็นอันตรายต่อสุขภาพอนามัยของมนุษย์ เพราะสามารถแทรกตัวลึกเข้าไปถึงระบบทางเดินหายใจส่วนล่างเข้าไป

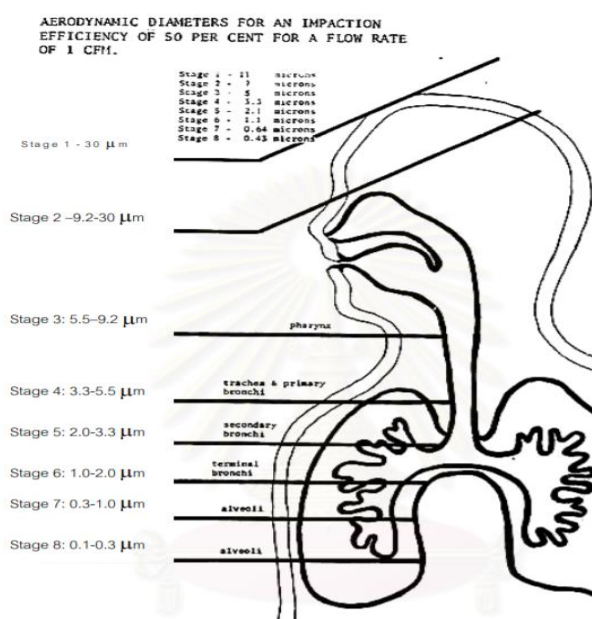
ในเนื้อเยื่อปอดและนำสารอันตรายเข้าสู่ร่างกาย โดยกลุ่มเสี่ยงที่ได้รับผลกระทบได้ง่ายได้แก่ เด็ก ผู้สูงอายุ และผู้ที่มีโรคประจำตัวเกี่ยวกับทางเดินหายใจ

2. ผลกระทบต่อทัศนวิสัย

ฝุ่นละอองจะลดความสามารถในการมองเห็น เนื่องจากฝุ่นละอองในบรรยากาศที่เป็นทั้งของแข็งและของเหลวสามารถดูดซับและหักเหแสงได้ ทำให้ทัศนวิสัยในการมองเห็นลดลง ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับขนาด ความหนาแน่น และองค์ประกอบทางเคมีของฝุ่นละอองนั้น

3. ผลกระทบต่อวัตถุ และสิ่งก่อสร้าง

เนื่องจากฝุ่นละอองในบรรยากาศมีคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีที่แตกต่างกัน สามารถส่งผลกระทบต่อวัตถุและสิ่งก่อสร้างได้ เช่น การสีกร่อนของโลหะ การทำลายผิวหน้าของสิ่งก่อสร้าง การเสื่อมคุณภาพของผลงานทางศิลปะ และความสกปรกและเอะอะของวัตถุ เป็นต้น



รูปที่ 2.1 รูปภาพแสดงขนาดของอนุภาคและความสามารถในการเข้าสู่ระบบทางเดินหายใจ ที่มา: (วงศ์พันธ์, 2536)

2.4 ค่ามาตรฐานและวิธีการตรวจวัดฝุ่นละออง

ปัญหาฝุ่นละออง (PM) ถูกรายงานว่าเป็นอันตรายต่อสุขภาพอย่างร้ายแรง ก่อให้เกิดโรคหัวใจ หลอดเลือดและระบบทางเดินหายใจ ส่งผลให้ประเทศต่างๆทั่วโลกได้กำหนดมาตรฐานทางอากาศที่กำหนดขีดจำกัดสำหรับความเข้มข้นของฝุ่นละออง (PM) (Vahlsing and Smith, 2012)

พระราชบัญญัติส่งเสริมและรักษาคุณภาพสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ (2535) ได้กล่าวถึงมาตรฐานคุณภาพอากาศในบรรยากาศโดยทั่วไป ตามตารางที่ 2.1 โดยมาตรฐานค่าเฉลี่ยระยะสั้น (1, 8 และ 24 ชม.) กำหนดขึ้นเพื่อป้องกันผลกระทบต่อสุขภาพอนามัยอย่างเฉียบพลัน (acute effect) และมาตรฐานค่าเฉลี่ยระยะยาว (1 เดือน และ 1 ปี) กำหนดขึ้นเพื่อป้องกันผลกระทบยาวหรือผลกระทบเรื้อรัง ที่อาจเกิดขึ้นต่อสุขภาพอนามัย (chronic effect)

สารมลพิษ	ค่าเฉลี่ยความเข้มข้นในเวลา	ค่ามาตรฐาน
1. ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO)	1 ชั่วโมง	ไม่เกิน 30 ppm. (34.2 มก./ลบ.ม.)
	8 ชั่วโมง	ไม่เกิน 9 ppm. (10.26 มก./ลบ.ม.)
2. ก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์ (NO ₂)	1 ชั่วโมง	ไม่เกิน 0.17 ppm. (0.32 มก./ลบ.ม.)
	1 ปี	ไม่เกิน 0.03 ppm. (0.057 มก./ลบ.ม.)
3. ก๊าซโอโซน (O ₃)	1 ชั่วโมง	ไม่เกิน 0.10 ppm. (0.20 มก./ลบ.ม.)
	8 ชั่วโมง	ไม่เกิน 0.07 ppm. (0.14 มก./ลบ.ม.)
4. ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO ₂)	1 ปี	ไม่เกิน 0.04 ppm. (0.10 มก./ลบ.ม.)
	24 ชั่วโมง	ไม่เกิน 0.12 ppm. (0.30 มก./ลบ.ม.)
	1 ชั่วโมง	ไม่เกิน 0.3 ppm. (780 มก./ลบ.ม.)
5. ตะกั่ว (Pb)	1 เดือน	ไม่เกิน 1.5 มก./ลบ.ม.
6. ฝุ่นละอองขนาดไม่เกิน 100 ไมครอน	24 ชั่วโมง	ไม่เกิน 0.33 มก./ลบ.ม.
	1 ปี	ไม่เกิน 0.10 มก./ลบ.ม.
7. ฝุ่นละอองขนาดไม่เกิน 10 ไมครอน	24 ชั่วโมง	ไม่เกิน 0.12 มก./ลบ.ม.
	1 ปี	ไม่เกิน 0.05 มก./ลบ.ม.
8. ฝุ่นละอองขนาดไม่เกิน 2.5 ไมครอน	24 ชั่วโมง	ไม่เกิน 0.05 มก./ลบ.ม.
	1 ปี	ไม่เกิน 0.025 มก./ลบ.ม.

ตารางที่ 2.1 มาตรฐานคุณภาพอากาศในบรรยากาศโดยทั่วไป (ที่มา:

http://www.pcd.go.th/info_serv/reg_std_airsnd01.html)

คู่มือการตรวจวัดฝุ่นละอองในบรรยากาศ กรมควบคุมมลพิษ (2546) ได้กล่าวถึงค่ามาตรฐานและวิธีการตรวจวัดฝุ่นละอองในประเทศไทยดังนี้

2.4.1 ค่ามาตรฐานฝุ่นละอองในบรรยากาศโดยทั่วไป

ก. ค่าเฉลี่ยของฝุ่นละอองรวมหรือฝุ่นละอองขนาดไม่เกิน 100 ไมครอน (Total Suspended Particulate Matter, TSP) ในเวลา 24 ชั่วโมงจะต้องไม่เกิน 0.33 มิลลิกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และในเวลา 1 ปีจะต้องไม่เกิน 0.1 มิลลิกรัมต่อลูกบาศก์เมตร

ข. ค่าเฉลี่ยของฝุ่นละอองขนาดไม่เกิน 10 ไมครอน (Particulate Matter with an aerodynamic diameter less than or equal to a nominal 10 micrometers, PM10) ในเวลา 24 ชั่วโมงจะต้องไม่เกิน 0.12 มิลลิกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และในเวลา 1 ปีจะต้องไม่เกิน 0.05 มิลลิกรัมต่อลูกบาศก์เมตร

ค. ค่าเฉลี่ยของฝุ่นละอองขนาดไม่เกิน 2.5 ไมครอน (Particulate Matter with an aerodynamic diameter less than or equal to a nominal 2.5 micrometers, PM2.5) ในเวลา 24 ชั่วโมงจะต้องไม่เกิน 0.05 มิลลิกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และในเวลา 1 ปีจะต้องไม่เกิน 0.025 มิลลิกรัมต่อลูกบาศก์เมตร

2.4.2 วิธีการตรวจวัด

การวัดหาค่าเฉลี่ยของฝุ่นละอองรวมหรือฝุ่นละอองขนาดไม่เกิน 100 ไมครอน และฝุ่นละอองขนาดไม่เกิน 10 ไมครอนในเวลา 24 ชั่วโมงหรือในเวลา 1 ปีให้ใช้วิธีการตรวจวัดตามระบบกราวิเมตริก (Gravimetric) หรือระบบอื่นที่กรมควบคุมมลพิษเห็นชอบ เช่น ระบบเบต้า เร (Beta Ray) ระบบเทปเปอ อิลิเมนต์ ออสซิลเลตติ้ง ไมโครบาลานซ์ (Tapered Element Oscillating Microbalance) และระบบไดโคโตมัส (Dichotomous) เป็นต้น ในการวัดหาค่าเฉลี่ยของฝุ่นละอองในบรรยากาศนั้นให้ทำการตรวจวัดในบรรยากาศทั่วไป โดยจะต้องสูงจากพื้นดินอย่างน้อย 1.5 เมตร แต่ไม่เกิน 6 เมตร ซึ่งมากพอที่จะไม่ดูดเอาฝุ่นละอองจากพื้นเขาไปด้วย ทั้งนี้ต้องคำนึงถึงตำแหน่งที่คาดการณ์ว่าจะเกิดมลพิษสูงสุด ตำแหน่งของผู้ที่ได้รับผลกระทบ และความเป็นไปได้ในทางปฏิบัติ

การเก็บตัวอย่างฝุ่นละอองที่มีขนาดอนุภาคตั้งแต่ 100 ไมครอนลงมา (TSP) โดยใช้เครื่องมือเก็บตัวอย่างชนิด High Volume Air Sampler ตัวอย่างอากาศจะถูกดูดผ่านหัวคัดเลือกขนาดฝุ่น (Size Selective Inlet) แบบ Peak Roof Inlet ด้วยอัตราการระหว่าง 40-60 ลูกบาศก์ฟุตต่อนาที (1,140-1,698 ลิตรต่อนาที) เป็นเวลา 24 ชั่วโมงอย่างต่อเนื่อง ซึ่งอนุภาคฝุ่นละอองที่มีขนาดอนุภาคตั้งแต่ 100 ไมครอนลงมาจะติดตรึงอยู่บนกระดาษกรองชนิด Glass Fiber Filter ที่มีขนาดกว้าง 20.3 เซนติเมตร ยาว 25.4 เซนติเมตร ซึ่งผ่านการชั่งน้ำหนักมาแล้ว จากนั้นนำมาหาปริมาณฝุ่น

ละอองโดยวิธีการหาค่าความแตกต่างของน้ำหนักกระดาศกรองระหว่างก่อนและหลังการเก็บตัวอย่าง แล้วคำนวณหาค่าความเข้มข้นเป็นหน่วยน้ำหนักต่อปริมาตรอากาศที่สภาวะมาตรฐาน (25 องศาเซลเซียส 760 มิลลิเมตรปรอท)

การเก็บตัวอย่างฝุ่นละอองขนาดตั้งแต่ 10 ไมครอนลงมา (PM10) โดยใช้ High Volume Air Sampler และหัวคัดเลือกขนาดฝุ่นละอองขนาดตั้งแต่ 10 ไมครอนลงมา (Size Selective Inlet) ซักตัวอย่างโดยการสูบอากาศผ่านส่วนหัวคัดเลือกขนาดฝุ่นละออง แล้วผ่านกระดาศกรองด้วยอัตรา 1.132 ลูกบาศก์เมตรต่อนาที (40 ลูกบาศก์ฟุตต่อนาที) เป็นเวลา 24 ชั่วโมงที่ความสูงของช่องซักตัวอย่าง 1.5 - 6.0 เมตรจากพื้น แล้ววิเคราะห์ปริมาณฝุ่นละอองบนกระดาศกรองด้วยวิธี Pre and Post Weight Difference แล้วจึงคำนวณปริมาณฝุ่นละอองขนาดเล็กเฉลี่ย 24 ชั่วโมงที่สภาวะมาตรฐาน (25 องศาเซลเซียส 760 มิลลิเมตรปรอท)

อังก์ศิริและณัฐพล (2559) ได้กล่าวถึงการเก็บตัวอย่างฝุ่นละอองขนาดตั้งแต่ 2.5 ไมครอนลงมา (PM2.5) โดยใช้ชุดเก็บตัวอย่าง PM2.5 ด้วยวิธีอ้างอิง ประกอบด้วยปั๊มดูดอากาศแบบพกพายี่ห้อ Gilian รุ่น GilAir5 โดยปรับเทียบอัตราการไหลเท่ากับ 2.0 ลิตรต่อนาที อุปกรณ์คัดขนาดใช้เครื่อง Personal Environmental Monitor (PEM) รุ่น 200 ซึ่งผลิตโดยบริษัท MSP ใช้กระดาศกรองชนิดใยแก้ว (Glass fiber filter) เป็นตัวกลาง เส้นผ่านศูนย์กลาง 37 มิลลิเมตร ขนาดรูกระดาศกรองขนาด 0.45 ไมครอน ปรับสภาพกระดาศกรองทั้งก่อนและหลังเก็บตัวอย่าง นำเข้าโถดูดความชื้นเป็นระยะเวลาไม่น้อยกว่า 24 ชั่วโมง ซึ่งภายในโถจะบรรจุเม็ดซิลิกาเจลไว้บริเวณด้านล่าง เมื่อครบตามระยะเวลาข้างต้นนำกระดาศกรองมาชั่งน้ำหนักด้วยเครื่องชั่งระดับไมโครกรัม ความเข้มข้นของ PM2.5 ในตัวอย่างอากาศที่ได้จากวิธีอ้างอิงชั่งน้ำหนัก หาได้โดยนำน้ำหนักฝุ่นบนกระดาศกรองหารด้วยปริมาตรอากาศขณะเก็บตัวอย่าง ดังสมการ

$$\text{ความเข้มข้นของ PM2.5} = \frac{\text{น้ำหนักกระดาศกรองหลังเก็บตัวอย่าง} - \text{น้ำหนักกระดาศกรองก่อนเก็บตัวอย่าง}}{\text{ปริมาตรอากาศขณะเก็บตัวอย่าง}}$$

2.5 กิจกรรมก่อสร้างที่ก่อให้เกิดฝุ่นละออง

ฝุ่นละออง PM 2.5 คือ ฝุ่นละอองที่มีขนาดเล็กมาก ตามองไม่เห็น คือเล็กกว่า 2.5 ไมครอน (ไมโครเมตร) หรือเล็กกว่า 3% ของเส้นผ่านศูนย์กลางเส้นผมเสีย สาเหตุหลักในเมืองใหญ่ คือ จากการเผาไหม้ของเครื่องยนต์และจากการก่อสร้าง

อุตสาหกรรมการก่อสร้างมักได้รับการวิพากษ์วิจารณ์ว่าเป็นหนึ่งในผู้ก่อมลพิษทางอากาศ โดยงานก่อสร้างปล่อยฝุ่นละอองสู่ชั้นบรรยากาศจำนวนมาก ฝุ่นก่อสร้างมีต้นกำเนิดมาจากกิจกรรมนอกสถานที่หลายประเภท เช่น การขุดเจาะ การขนส่งวัสดุ การบรรทุกสินค้าและการขนถ่าย การเก็บวัสดุในพื้นที่เปิดโล่ง งานคอนกรีตและปูน การตัดและการบรรจุ ซึ่งกิจกรรมเหล่านี้ปล่อยฝุ่นละอองขนาดเล็ก (PM2.5) ซึ่งเป็นมลพิษต่อสิ่งแวดล้อม ผลกระทบจากฝุ่นก่อสร้างก่อความรำคาญแก่คนงานในพื้นที่ก่อสร้างและมีผลกระทบต่อบริเวณชุมชนโดยรอบ (Jinding, Ye et al., 2018)

ยรรยง อภาอนันต์ (2553) และ วสวัตต์ เอกพานิช (2555) ได้กล่าวถึงกิจกรรมก่อสร้างที่ก่อให้เกิดฝุ่นละอองดังนี้

กิจกรรมในหน่วยงานก่อสร้างที่ทำให้เกิดฝุ่นละออง ได้แก่ งานดิน งานคอนกรีต งานไม้ การขนส่ง การจัดเก็บวัสดุ งานสถาปัตยกรรมและการตกแต่ง คือ การตัด การสกัด การขัด การเจาะ และยังมีการฉีดยุ่ การทาสี การทำความสะอาด และการเผาไหม้ของเครื่องจักรกล เครื่องยนต์ ก็สามารถทำให้เกิดฝุ่นละอองในการก่อสร้างได้

งานดินประกอบด้วยงานขุดดิน งานถมทราย การเคลื่อนย้ายวัสดุอื่นภายในบริเวณที่กำหนดไว้สำหรับการก่อสร้าง การเตรียมการในบริเวณที่จะขุดออกของพื้นที่และวางระบายน้ำ ส่วนงานไม้และงานสีจะมีฝุ่นจากเศษไม้และละอองทินเนอร์ซึ่งเมื่อหายใจเข้าไปจะเป็นอันตรายต่อปอด

การก่อสร้างปัจจุบันได้นำเอาเครื่องทุ่นแรงหรือเครื่องจักรกลเข้ามาใช้ดำเนินการต่างๆในงานก่อสร้างเป็นจำนวนมาก ซึ่งการเผาไหม้ของเครื่องจักร เครื่องยนต์ จะทำให้เกิดละอองตะกั่วที่เกิดจากการเผาไหม้ของน้ำมันเบนซิน เนื่องจากเครื่องยนต์เผาไหม้ไม่สมบูรณ์ตะกั่วจึงถูกปลดปล่อยออกมาพร้อมกับควันในท่อไอเสียด้วย ซึ่งส่งผลทำให้ระบบประสาท ระบบสืบพันธุ์ และระบบต่างๆในร่างกายทำงานผิดปกติ

Li, Zhao et al. (2019) ได้วัดค่าปริมาณฝุ่นละออง PM2.5 ที่เกิดขึ้นในกระบวนการก่อสร้างต่างๆ จากการใช้เทคโนโลยี Internet of Things (IoT) เพื่อตรวจสอบค่าปริมาณฝุ่นละออง PM2.5 อย่างต่อเนื่องที่โครงการก่อสร้างสถานีรถไฟใต้ดินเป็นเวลา 6 เดือน พบว่า ค่าเฉลี่ยที่เพิ่มขึ้นของ PM2.5 ในงานขุดดินคือ 17 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ค่าเฉลี่ยที่เพิ่มขึ้นของ PM2.5 ในงานเหล็กคือ 20 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และค่าเฉลี่ยสูงสุดของการเพิ่มขึ้นของ PM2.5 คืองานคอนกรีต พบว่าเพิ่มขึ้น 21 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร

2.6 แนวทาง ระเบียบ และข้อปฏิบัติในการควบคุมฝุ่นละอองจากการก่อสร้างอาคาร

สมจินตนา (2559) ได้กล่าวถึงวิธีการที่นำมาใช้ในการป้องกันและควบคุมฝุ่นละอองจากการก่อสร้างดังนี้

- 1) การออกกฎบังคับ เพื่อบังคับใช้และควบคุมแหล่งกำเนิดฝุ่นละอองซึ่งมีความเหมาะสมและความสัมพันธ์ทางวิชาการ เช่น การกำหนดมาตรฐานฝุ่นละอองที่คนงานได้รับควรมีค่าที่ไม่เกินมาตรฐานตามที่กฎหมายบังคับไว้
- 2) การแบ่งเขตเฉพาะ โดยมีการจัดวางแบ่งเขตพื้นที่ให้มีสภาพที่เหมาะสมกับลักษณะของงาน
- 3) การควบคุมการปฏิบัติงานต่างๆ โดยการควบคุมกิจกรรมต่างๆที่ก่อให้เกิดฝุ่นละอองให้เป็นไปตามมาตรฐานที่กำหนดไว้
- 4) การให้ความรู้แก่ผู้ที่มีส่วนเกี่ยวข้องกับงาน ซึ่งมีความสำคัญมากในการควบคุมสภาพแวดล้อม โดยให้ความรู้และคำแนะนำที่ถูกต้องเกี่ยวกับการปฏิบัติงานรวมถึงการหลีกเลี่ยงจากแหล่งที่ก่อกำเนิดฝุ่นละออง

ระเบียบ และข้อปฏิบัติที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยในการควบคุมฝุ่นละอองจากการก่อสร้างประเภทต่างๆ กรมควบคุมมลพิษ (2547) ได้บัญญัติระเบียบ และข้อปฏิบัติในการควบคุมฝุ่นละอองจากการก่อสร้างอาคารดังนี้

ข้อ (4) ผู้ควบคุมงานหรือผู้ดำเนินงานจักต้องควบคุมดูแลมิให้มีฝุ่นละอองออกไปนอกบริเวณพื้นที่ซึ่งเป็นทรัพย์สินที่เป็นที่ตั้งของอาคารที่กำลังดำเนินการก่อสร้าง ดัดแปลง ซ่อมแซม หรือรื้อถอนนั้นโดยมีแนวทางในการปฏิบัติขั้นต่ำดังนี้

4.4 ในขณะที่มีการก่อสร้าง ดัดแปลง รื้อถอน ซ่อมแซมอาคาร ให้จัดทำผ้าใบทึบแสงหรือผ้าใบโปร่งแสง หรือวัสดุที่คล้ายกันปกคลุมตัวอาคารตลอดแนวอาคารจนกว่าการดำเนินงานจะแล้วเสร็จ

4.6 ให้ฉีดน้ำหรือจัดให้มีกองปกคลุมวัสดุที่ใช้อย่างมิดชิด ไม่ให้มีการฟุ้งกระจายของฝุ่น หรืออาจจัดกองวัสดุให้อยู่ในพื้นที่ที่มีผนังปิดทึบด้านบนและด้านข้างอีก 3 ด้าน โดยรอบกองวัสดุเพื่อมิให้มีการฟุ้งกระจายของฝุ่นละออง

4.7 ต้องทำความสะอาด เศษหิน โคลน ทราาย ที่ตกหล่นอยู่ข้างนอกรอบรั้วโครงการ ทุกวัน โดยมีมาตรการทำความสะอาดที่ได้ผล ไม่ทำให้เกิดการฟุ้งกระจายของฝุ่น โดยอาจใช้ รถล้างกวาดและดูดฝุ่นช่วยในการทำความสะอาด

4.8 ให้ล้างทำความสะอาดตัวรถและล้อรถ ให้ปราศจากเศษหิน ดิน โคลน หรือ ทราาย ก่อนนำรถทุกชนิดออกสู่ภายนอกโครงการ โดยจัดหาบริเวณที่ใช้ล้างทำความสะอาด ใกล้บริเวณทางเข้าของโครงการ ให้มีอุปกรณ์ฉีดน้ำล้างตัวรถและหลุมสำหรับล้างล้อรถที่เหมาะสม ไม่ทำให้น้ำล้างไหลออกมานอกบริเวณโครงการ

4.11 หากมีโรงงานผลิตคอนกรีตผสมเสร็จตั้งอยู่ในพื้นที่ก่อสร้างให้เพิ่มเติมมาตรการ ป้องกันการควบคุมฝุ่นละอองตามเงื่อนไขและข้อกำหนดตามประกาศของกระทรวง อุตสาหกรรม

4.12 ให้มีการทำความสะอาดส่วนของอาคารที่อยู่ในระหว่างการก่อสร้างอาคารของ ชั้นต่างๆ โดยใช้น้ำช่วยเพื่อลดการฟุ้งกระจายของฝุ่นละออง

ข้อ (5) โดยอาศัยพระราชบัญญัติส่งเสริมและรักษาคุณภาพสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ พ.ศ. 2535 มาตรา 55 และมาตรา 38 ในกรณีที่มีข้อขัดแย้งในการพิจารณาว่าปัญหาฝุ่นละอองที่เกิดขึ้นบริเวณ การก่อสร้างมาจากการก่อสร้างนั้นหรือไม่ ให้ดำเนินการตรวจวัดด้วยเครื่องมือตรวจวัดฝุ่นละออง ขนาดต่ำกว่า 10 ไมครอน โดยใช้เครื่องมือและวิธีการตามที่กรมควบคุมมลพิษกำหนด ดำเนินการ ตรวจวัดบริเวณเหนือลมและใต้ลมซึ่งอยู่ใกล้ที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ของขอบเขตพื้นที่ ซึ่งเป็นทรัพย์สิน ที่เป็นที่ตั้งของอาคารและกำลังดำเนินการก่อสร้าง ดัดแปลง ซ่อมแซม หรือรื้อถอนนั้นๆ ผลต่างของ ค่าที่ตรวจวัดได้ (ค่าเฉลี่ยของปริมาณฝุ่นละอองตลอดช่วงเวลาที่ตรวจวัดบริเวณใต้ลมและเหนือลม ต้องน้อยกว่า 50 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตรเมื่อทำการตรวจวัดพร้อมกัน ทั้งนี้การตรวจวัดให้ทำ ต่อเนื่องกันไม่น้อยกว่า 290 นาที (4 ชั่วโมง 50 นาที) และไม่เกิน 310 นาที (5 ชั่วโมง 10 นาที) ในช่วงเวลาที่มีการก่อสร้าง)

หากผลการตรวจวัดยังมีข้อที่โต้แย้งจากฝ่ายเจ้าพนักงานท้องถิ่นหรือผู้ควบคุมงานหรือ ผู้ดำเนินการ ให้ทำการตรวจวัดใหม่สามครั้งและใช้ค่าสูงสุดของการตรวจวัดเป็นการตัดสินใจ การตัดสินใจ โดยใช้การตรวจวัดนี้ให้ถือเป็นที่สุดทางด้านวิชาการ และให้ผู้ควบคุมงานและเจ้าพนักงานท้องถิ่นร่วมกันลงนามในผลการตรวจวัดเป็นหลักฐาน

ข้อ (6) ผู้ควบคุมงานหรือผู้ดำเนินการจักต้องมีหน้าที่ในการควบคุมดูแลฝุ่นละอองจากกิจกรรมในความรับผิดชอบให้ดีที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ โดยไม่ให้ฝุ่นละอองที่บริเวณนอกขอบเขตการประกอบการสูงเกินเกณฑ์คุณภาพอากาศในบรรยากาศของประเทศไทย ซึ่งเป็นไปตามพระราชบัญญัติส่งเสริมและรักษาคุณภาพสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ พ.ศ. 2535 และจะต้องบันทึกการควบคุมดูแลฝุ่นละอองเป็นรายวันเพื่อให้เจ้าพนักงานท้องถิ่นสามารถตรวจสอบ

ข้อ (7) ให้เจ้าของโครงการเสนอแผนงานการควบคุมดูแลป้องกันปัญหาฝุ่นจากการก่อสร้างมาให้พิจารณาก่อนอนุญาตให้มีการดำเนินการก่อสร้างโดยต้องมีใจความดังนี้

**รายละเอียดของแผนการควบคุมดูแลฝุ่นละอองจากการก่อสร้าง
ตัดแปลง ซ่อมแซม หรือรื้อถอนอาคาร**

ชื่อผู้ควบคุมงาน หรือผู้ดำเนินการ (เจ้าของที่ทำการเอง)

ที่อยู่และเบอร์โทรศัพท์/โทรสาร ที่สามารถติดต่อได้

.....

สถานที่ดำเนินการพร้อมแผนที่ตั้งชัดเจนแสดงขอบเขตของทรัพย์สินที่อาคารตั้งอยู่
(BOUNDARY LINE)

.....

กิจกรรมที่ดำเนินการ

แหล่งกำเนิดฝุ่นละอองที่สำคัญ และมาตรการควบคุมฝุ่นละอองจากแหล่งกำเนิดนั้น
ว่าจะทำอะไร ความถี่ของการควบคุมเป็นอย่างไร

.....

(หากเจ้าพนักงานท้องถิ่นได้พิจารณาแผนการดังกล่าวแล้ว ยังไม่เห็นชอบ
กับมาตรการควบคุมฝุ่นละออง จักต้องแจ้งให้ผู้ควบคุมงานหรือผู้ดำเนินการทราบ
ภายในเวลา 7 วัน นับจากได้แผนการเพื่อจักได้นำแผนการดังกล่าว ไปดำเนินการ
ปรับปรุงแก้ไข มิฉะนั้นให้ถือว่าเจ้าพนักงานท้องถิ่น ให้ความเห็นชอบกับแผนการ
ดังกล่าว)

รูปที่ 2.2 รูปภาพแสดงรายละเอียดของแผนการควบคุมดูแลฝุ่นละอองจากการก่อสร้าง ตัดแปลง ซ่อมแซม หรือรื้อถอนอาคาร (ที่มา: ระเบียบ และข้อปฏิบัติในการควบคุมฝุ่นละอองจากการก่อสร้าง ประเภทต่างๆ กรมควบคุมมลพิษ (2547))

กิจกรรมการควบคุมฝูงละอองข้างต้นเป็นต้นทุนที่เพิ่มขึ้นของผู้รับเหมา ดังนั้นผู้ว่าจ้างและผู้ออกแบบมีบทบาทสำคัญในการควบคุมฝูงละอองเช่นกัน ตั้งแต่ออกแบบการป้องกันฝูงละอองและกำหนดให้มีมาตรการควบคุมฝูงละอองเป็นหนึ่งในเงื่อนไขของการก่อสร้าง รวมถึงยอมรับค่าก่อสร้างและเวลาที่อาจจะเพิ่มขึ้นเพื่อจัดการกับผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม

2.7 อากาศยานไร้คนขับ (Unmanned Aerial Vehicle, UAV)

อากาศยานไร้คนขับ (Unmanned Aerial Vehicle, UAV) หรือโดรนนั้นเป็นที่รู้จักอย่างกว้างขวางภายใต้ชื่อต่างๆ เช่นระบบอากาศยานไร้คนขับ (Unmanned Aerial System, UAS) และ Remotely Piloted Vehicles (RPVs) ในอดีตมักถูกใช้เป็นอาวุธหรือเครื่องมือสอดแนมทางทหาร แต่ปัจจุบันนั้นเทคโนโลยีของโดรนได้ถูกพัฒนาอย่างต่อเนื่องจนไม่ได้จำกัดแค่ในทางทหารเท่านั้น ในปัจจุบันโดรนถูกใช้หลากหลายรูปแบบ เช่น ใช้โดรนถ่ายภาพหรือวิดีโอจากมุมสูง ทำแผนที่ 3 มิติและสร้างแบบจำลอง ใช้ในการเกษตร ใช้โดรนตรวจสอบสภาพการจราจร และใช้ในการจัดการเหตุฉุกเฉินและภัยพิบัติ (Li and Liu, 2019)

ข้อดี	ข้อจำกัด
น้ำหนักเบา เคลื่อนย้ายง่าย	ระยะเวลาในการบินมีจำกัด
ราคาถูกและให้ภาพถ่ายที่มีความละเอียดสูง	มีข้อจำกัดในการบรรทุกทุกสิ่งและอุปกรณ์อื่น
ค่าใช้จ่ายในการดำเนินการต่ำ	กฎหมายและข้อกำหนดการใช้โดรนของแต่ละประเทศ
สามารถบินได้ในความสูงหลายระดับ	อาจถูกจำกัดความสามารถการบินด้วยความเร็ว
ถ่ายภาพในพื้นที่ที่คนหรือยานพาหนะอื่นไม่สามารถเข้าไปได้ตามกำหนดเวลาที่ต้องการ	เนื่องจากภาพที่ถ่ายได้มีขนาดเล็ก จึงต้องใช้ภาพถ่ายจำนวนมากเพื่อให้ครอบคลุมพื้นที่ที่ต้องการ
สามารถถ่ายวิดีโอได้	โปรแกรมที่ใช้ควบคุมโดรนที่เหมาะสมมีจำกัด
ให้ข้อมูล ณ ปัจจุบัน (Real time)	มีความคลาดเคลื่อนในการทำภาพภูมิศาสตร์

ตารางที่ 2.2 ตารางแสดงข้อดีและข้อจำกัดในการใช้โดรน (ที่มา: อากาศกรม ศิริพรประสาร, สำนักจัดการกากของเสียและสารอันตราย)

โดรนยังมีบทบาทเพิ่มมากขึ้นในการดำเนินธุรกิจและอุตสาหกรรมต่างๆ เนื่องจากสามารถใช้ลดต้นทุนในด้านแรงงาน โดรนไม่จำเป็นต้องใช้ถนนและสามารถเข้าถึงสถานที่ที่ทำได้ยาก ทำให้โดรน

สามารถเข้าถึงสภาพแวดล้อมที่อันตรายที่มนุษย์ไม่สามารถเข้าถึงได้ (Otto, Agatz, Campbell, Golden, & Pesch, 2018) นอกจากนั้นโดรนได้ถูกนำมาประยุกต์ใช้ในงานด้านการบริหารโครงการก่อสร้าง ดังตารางที่ 2.3

Table 2. Data collection via drones and processing for construction management.

Data	Sensors	Data processing	Application in construction management							
			On-site construction							
			Surveying	Logistics	Safety	Quality	Time	Site	Inspection	Demolition
Image	Digital camera	123D Catch	✓			✓	✓		✓	
Video	Digital camera, infrared camera, range finder	D4R, BIM			✓	✓	✓		✓	✓
3D point cloud	Camera 3D scanner, RGB-D sensor, LiDAR laser scanner	123D Catch, PhotoScan eCognition, D4R, BIM, Pix4D	✓	✓		✓	✓		✓	✓
Tag location	RFID reader	GPS, UB, RFI, BIM		✓						
Bird view	Digital camera	Nil			✓				✓	
Voice	Voice transmitter	Nil			✓					

ตารางที่ 2.3 ตารางแสดงการประยุกต์ใช้โดรนในงานด้านการบริหารโครงการก่อสร้าง (ที่มา: Li and Liu, 2019))

อภาภรณ์ ศิริพรประสาร ได้กล่าวถึงการใช้โดรนกับงานด้านสิ่งแวดล้อมดังนี้

ผู้ใช้งานสามารถใช้โดรนที่ติดกล้องและอุปกรณ์ตรวจสอบคุณภาพอากาศ เช่น เครื่อง Spectrophotometer หรืออุปกรณ์เก็บตัวอย่าง Particulate matter เป็นต้น เพื่อตรวจวัดคุณภาพอากาศ เช่น ที่ปลายปล่อง และในบางกรณีอุปกรณ์โดรนสามารถส่งสัญญาณแบบ Real time เพื่อทราบคุณภาพอากาศได้ทันที การประยุกต์ใช้งานโดรนกับการตรวจวัดคุณภาพอากาศเช่นนี้เป็นวิธีที่เจ้าหน้าที่ของรัฐบาลจีนดำเนินการเพื่อป้องกันการให้ข้อมูลเท็จของโรงงาน ทั้งนี้ถึงแม้ว่าจะมีระบบการส่งข้อมูลการตรวจวัดมลพิษที่ปลายปล่องแล้วแต่โรงงานบางแห่งในจีนมีวิธีหลีกเลี่ยงการตรวจสอบ เช่น การป้อนข้อมูลปลอมหรือการแอบปล่อยมลพิษขณะที่ระบบไม่มีการเชื่อมต่อ นอกจากนี้ภาพถ่ายจากโดรนยังสามารถใช้ในการบ่งชี้เบื้องต้นของแหล่งกำเนิดมลพิษทางอากาศและน้ำได้ โดยสังเกตจากควันดำที่ออกจากปล่องหรือน้ำที่เปลี่ยนสีขณะออกจากโรงงาน

โดรนอาจนำมาประยุกต์ใช้ในงานด้านสารเคมี เช่น การสำรวจขอบเขตการปนเปื้อนมลพิษ (กรณีสารเคมีหกรั่วไหล เช่น น้ำมันรั่วที่อ่าวพร้าว จังหวัดระยอง หรือการลักลอบทิ้งกากของเสียใน

บริเวณหุบเขาที่รกร้างซึ่งยากต่อการเข้าถึง) การตรวจวัดคุณภาพอากาศกรณีสารเคมีรั่วไหลจากโรงงาน เพลิงไหม้ หรือระเบิด เพื่อเป็นข้อมูลประกอบการพิจารณาการประเมินสถานการณ์เพื่ออพยพประชาชนบริเวณใกล้เคียง เป็นต้น

โดรนยังสามารถนำมาใช้ในงานด้านสำรวจเพื่อทำแผนที่ เช่น การสำรวจพื้นที่สถานที่ฝังกลบขยะมูลฝอย การทำแผนที่แสดงการเปลี่ยนแปลงหลังจากการฟื้นฟูพื้นที่ปนเปื้อน

นิค จำนง (2555) ได้แบ่งประเภทของอากาศยานไร้คนขับหรือ Drone ออกเป็น 2 ประเภทตามลักษณะของปีกคือ ชนิดปีกนิ่งทั่วไปหรือปีกตรึง (Fixed Wing) มีข้อดีคือมีความเร็วสูงและมีพิสัยทำการในระยะไกล แต่มีข้อเสียคือจำเป็นต้องใช้พื้นที่หรือลานในการบินขึ้นและลงจอด ทำให้อากาศยานชนิดนี้ขาดความคล่องตัว ส่วนแบบที่สองคือ ชนิดปีกหมุน (Multi Rotor หรือ Multi copter) มีข้อดีคือสามารถขึ้นลงแนวดิ่ง (Vertical Take Off and Landing) ในพื้นที่จำกัด ซึ่งสามารถทำงานได้ใกล้ชิดกับเป้าหมาย เกิดความสะดวกรวดเร็ว แต่มีข้อเสียคือมีระยะเวลาปฏิบัติการที่น้อยและมีพิสัยทำการในระยะใกล้

ในการใช้โดรนเพื่อปฏิบัติงานต้องคำนึงถึงกฎหมายของประเทศไทย พระราชบัญญัติการเดินอากาศ (2497) ได้บัญญัติไว้ว่า มาตรา 24 “ห้ามมิให้ผู้ใดบังคับหรือปล่อยอากาศยานซึ่งไม่มีนักบินหรือทิ้งร่มอากาศ นอกจากได้รับอนุญาตเป็นหนังสือจากรัฐมนตรีและปฏิบัติตามเงื่อนไขที่รัฐมนตรีกำหนด” อีกทั้งกรมการบินพลเรือนยังออกประกาศว่าด้วยหลักเกณฑ์การขออนุญาตใช้บังคับหรือปล่อยอากาศยานไร้คนขับ โดยมีหลักเกณฑ์ 3 ด้าน ดังนี้

1. โดรนจะต้องทำการบินในระยะเวลาไม่เกินกว่า 1 ชั่วโมง
2. ไม่อนุญาตให้บุคคลทั่วไปนำโดรนติดตั้งกล้องถ่ายภาพขึ้นบิน และ
3. ห้ามโดรนบินสูงกว่า 500 ฟุต หรือ 150 เมตร

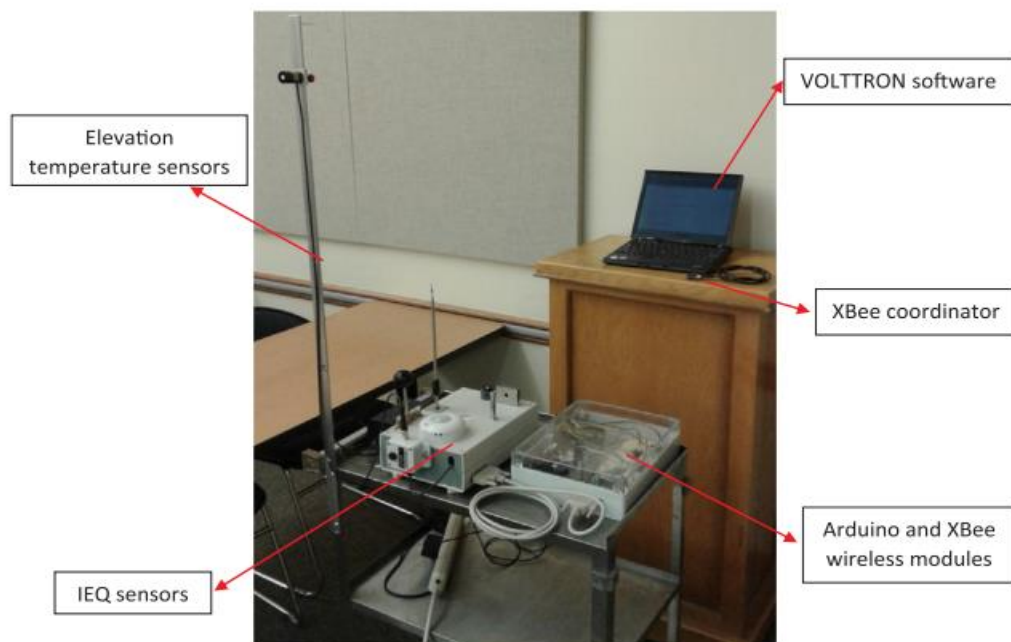
หากไม่ขออนุญาตจะถูกดำเนินคดีจำคุก 1 ปีปรับ 4 หมื่นบาท หรือทั้งจำทั้งปรับ

2.8 เครื่องมือวัดฝุ่นละออง

Arduino อ่านว่า อาดูอีโน้ หรือ อาดูยโน้ เป็นบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ที่มีการออกแบบแพลตฟอร์มที่พยายามอำนวยความสะดวกในการใช้ฮาร์ดแวร์และซอฟต์แวร์ โดยเป็นการพัฒนาแบบ Open Source ทั้งซอฟต์แวร์และฮาร์ดแวร์ ซึ่งแบ่งออกเป็นหลายรุ่นตามลักษณะการใช้งานดังนี้

Arduino UNO, Arduino Mega 2560, Arduino Micro, Arduino Nano, Arduino Wireless และ Arduino Pro Mini เป็นต้น ตัวบอร์ด Arduino นั้นถูกออกแบบมาให้ใช้งานได้ง่าย ผู้ใช้งานสามารถดัดแปลง เพิ่มเติม พัฒนาต่อยอดทั้งตัวบอร์ดหรือโปรแกรมต่อได้ นอกจากนั้นบอร์ด Arduino ยังสะดวกในการต่ออุปกรณ์เสริมต่างๆ คือผู้ใช้งานสามารถต่อวงจรรีเลย์ทรานซิสเตอร์จากภายนอกแล้วเชื่อมต่อเข้ามาที่ขา I/O ของบอร์ด หรือเพื่อความสะดวกสามารถเลือกต่อกับบอร์ดเสริม (Arduino Shield) ประเภทต่างๆมาเสียบบนบอร์ด Arduino แล้วเขียนโปรแกรมพัฒนาต่อได้เลย (Balogun, Oladapo et al., 2018)

Arduino Uno เป็นบอร์ด Arduino ที่ได้รับความนิยมมาก เนื่องจากพอร์ตการเชื่อมต่อประเภทต่างๆรวมถึงอินพุต เอาต์พุตดิจิทัล เอาต์พุต PWM และอินพุตแบบอะนาล็อกทำให้บอร์ด Arduino Uno เป็นฮาร์ดแวร์ที่ทรงพลังและประหยัดต้นทุนสำหรับการรวบรวมข้อมูล ส่วนใหญ่ Project และ Library ต่างๆที่พัฒนาขึ้นมา Support จะอ้างอิงกับบอร์ดนี้เป็นหลัก นอกจากนั้น Arduino Uno board ยังมีไมโครคอนโทรลเลอร์ซึ่งสามารถตั้งโปรแกรมในภาษา C หรือ C++ ซึ่งรองรับขาอินพุตแบบอะนาล็อก 6 ตัวซึ่งอ่านข้อมูลในช่วง 0-5 V ด้วยความละเอียด 10 บิต และสามารถรับเอาต์พุต 5 โวลต์และ 3.3 โวลต์จากบอร์ด Arduino เพื่อให้แรงดันไฟฟ้าสำหรับเซ็นเซอร์ (Karami, McMorrow et al., 2018)

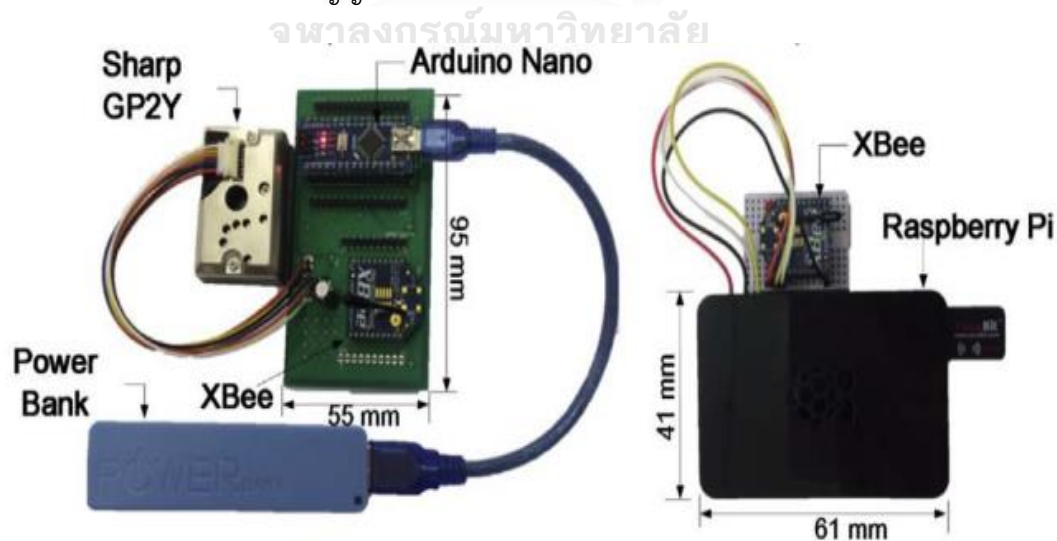


รูปที่ 2.3 รูปภาพแสดงอุปกรณ์ที่ใช้ประเมินคุณภาพอากาศภายในอาคาร (ที่มา: Karami, McMorrow et al. (2018))

Karami, McMorrow et al. (2018) ได้ใช้ Arduino Uno และเซ็นเซอร์ในการตรวจสอบ CO₂, PM2.5 และสารอินทรีย์ระเหยง่าย (VOC) เพื่อประเมินคุณภาพอากาศภายในอาคาร ซึ่งการวัดในห้องปฏิบัติการคอมพิวเตอร์แบบเปิดกับอาคารจริงแสดงว่าระดับ PM2.5 แตกต่างกันเล็กน้อย แต่ยังคงต่ำกว่าเกณฑ์ที่แนะนำ โดยค่าฝุ่นละออง PM2.5 มีค่าไม่เกิน 0.007 mg/m³ เนื่องจากอาคารตั้งอยู่ในพื้นที่ที่สะอาดจึงคาดว่าจะมีความเข้มข้นของฝุ่นละอองต่ำภายในอาคาร

Li, J., H. Li, Y. Ma et al. (2018) ได้ศึกษาการวิเคราะห์ภูมิสารสนเทศที่พิจารณาปัจจัยด้านสถานที่และเวลาพร้อมๆกัน (Spatiotemporal distribution) โดยศึกษากระจายของความเข้มข้นของฝุ่นละอองในอาคารด้วยเครือข่ายเซ็นเซอร์ต้นทุนต่ำซึ่งใช้วิธีการประมาณค่าแบบ Kriging และโครงข่ายประสาทเทียม (ANN) และเปรียบเทียบข้อดีข้อเสีย ระบบเซ็นเซอร์ไร้สายประกอบด้วยอุปกรณ์หลายอย่างเพื่อตรวจสอบความเข้มข้นของฝุ่นละออง (PM) และฐานที่รับข้อมูลจากเซ็นเซอร์เพื่อการประมวลผลเพิ่มเติม ซึ่งอุปกรณ์ทั้งหมดประกอบด้วยตัวเซ็นเซอร์วัดฝุ่นละออง (PM) GP2Y1010AU0F ของ Sharp, Arduino Nano ATmega 328 และ XBee

เซ็นเซอร์วัดฝุ่นละออง (PM) Sharp GP2Y ทำการวัดสัญญาณแสงที่กระจัดกระจายซึ่งสัมพันธ์กันกับความเข้มข้นของฝุ่นละออง อนุภาคที่ผ่านบริเวณทดสอบจะส่องสว่างและแสงจะสะท้อนไปยังโฟโตทรานซิสเตอร์ แสงจะสะท้อนหรือกระจัดกระจายมากขึ้นเมื่อความเข้มข้นของฝุ่นละอองสูงขึ้นเนื่องจากมีอนุภาคมากขึ้นที่จะเปลี่ยนเส้นทางของแสง โฟโตทรานซิสเตอร์จะแปลงความเข้มแสงที่กระจัดกระจายเป็นสัญญาณแรงดันไฟฟ้า



รูปที่ 2.4 รูปภาพแสดงระบบเครือข่ายเซ็นเซอร์วัดฝุ่นละออง (ที่มา: Li, J., H. Li, Y. Ma et al. (2018))

Arduino board นั้นทำงานเป็นตัวควบคุมในการจัดการลำดับและการไหลของข้อมูลภายในอุปกรณ์ปลายทาง (เซ็นเซอร์) Arduino จะให้แรงดันไฟฟ้ารูปสี่เหลี่ยมที่ให้กำลังแก่ไดโอดเปล่งแสงใน Sharp GP2Y หลังจากบันทึกสัญญาณความกว้างของแรงดันไฟฟ้าแบบดิจิทัลแล้ว Arduino จะสร้างชุดข้อมูลที่มีข้อมูลความกว้างของแรงดันไฟฟ้าจากนั้นส่งต่อไปยังเครื่องส่งสัญญาณไร้สาย XBee ซึ่งจะถ่ายทอดชุดข้อมูลไปยังสถานีฐานเพื่อการประมวลผลเพิ่มเติม

สมจินตนา (2559) ได้ใช้เครื่องวัดฝุ่นแบบพกพา (Dylos air quality monitor รุ่น DC 1700 Battery operated AQM) มีขนาดสูง 7 นิ้ว ยาว 4.5 นิ้ว และหนา 3 นิ้ว น้ำหนักรวม 0.55 กิโลกรัม เพื่อวิเคราะห์ปริมาณฝุ่นละอองที่มีแหล่งกำเนิดจากกิจกรรมในการก่อสร้างถนน ซึ่งเครื่องวัดฝุ่นแบบพกพานี้ใช้วัดหาปริมาณของฝุ่นละอองโดยใช้เลเซอร์สำหรับวัดปริมาณความเข้มข้นของอนุภาคในอากาศ โดยเครื่องมือสามารถวัดอนุภาคได้ 2 ขนาดได้แก่ 1. อนุภาคขนาดใหญ่ซึ่งมีขนาดใหญ่กว่า 2.5 ไมครอน และ 2. อนุภาคขนาดเล็กซึ่งมีขนาดเล็กกว่า 0.5 ไมครอน ซึ่งข้อมูลที่วัดได้ทั้งหมดจะแสดงบนหน้าจอแสดงผลของเครื่องมือ โดยค่าที่อ่านได้จากเครื่องมือจะแสดงอยู่ในหน่วยความเข้มข้นของอนุภาคที่ 0.01 ลูกบาศก์ฟุตต่อตัวอย่างที่ได้จากการวัด



รูปที่ 2.5 รูปภาพแสดงเครื่องวัดฝุ่นแบบพกพา (Dylos air quality monitor รุ่น DC 1700 Battery operated AQM) (ที่มา: สมจินตนา (2559))

จากการวิเคราะห์กิจกรรมก่อสร้างในสวนงานดินซึ่งประกอบด้วยกิจกรรมเทดินและเกลี่ยดิน พบว่า 1. กิจกรรมเทดินมีค่าเฉลี่ยความเข้มข้นของฝุ่นละอองขนาดเล็ก (PM_{2.5}) เท่ากับ 5.16 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ และค่าเฉลี่ยความเข้มข้นของฝุ่นละอองขนาดใหญ่ (PM₁₀) เท่ากับ 20.74 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ซึ่งพบว่ามิต้าน้อยกว่าค่ามาตรฐานของความเข้มข้นของฝุ่นละอองที่ 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ และ 120 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ตามลำดับ 2.

กิจกรรมเกี่ยดินมีค่าเฉลี่ยความเข้มข้นของฝุ่นละอองขนาดเล็ก (PM2.5) เท่ากับ 10.29 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ และค่าเฉลี่ยความเข้มข้นของฝุ่นละอองขนาดใหญ่ (PM10) เท่ากับ 19.92 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ซึ่งพบว่ามีย่านน้อยกว่าค่ามาตรฐานของความเข้มข้นของฝุ่นละอองที่ 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ และ 120 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ตามลำดับ ซึ่งการเพิ่มขึ้นตอนการฉีดพ่นน้ำในกิจกรรมเทดินสามารถลดการเกิดฝุ่นละอองได้สูงสุดถึง 43 เปอร์เซ็นต์ และการติดตั้งแผงกั้นฝุ่นละอองรอบบริเวณโครงการก่อสร้างในกิจกรรมเกี่ยดินสามารถลดการเกิดฝุ่นละอองได้สูงสุดถึง 85 เปอร์เซ็นต์

เซ็นเซอร์วัดฝุ่นละออง (PM) ราคาต่ำที่พบมากที่สุดคือ Optical Particle Counters (OPCs) ซึ่งขึ้นอยู่กับการกระเจิงของแสง โดยทั่วไปสามารถตรวจจับอนุภาคที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางแอโรไดนามิกตั้งแต่ 0.3 μm ถึง 10 μm เนื่องจากอนุภาคที่มีขนาดต่ำกว่า 0.3 μm ไม่กระจายแสงเพียงพอและอนุภาคที่มีขนาดเกิน 10 μm จะไม่สามารถผ่านเข้าเซ็นเซอร์ได้ เซ็นเซอร์เหล่านี้จะแปลงสัญญาณที่วัดได้เป็นจำนวนอนุภาคหรือความเข้มข้นของมวล

วิธีการอ้างอิงสำหรับการวัดความเข้มข้นของมวลของฝุ่นละออง (PM) นั้นขึ้นอยู่กับการวัดมวลอนุภาคโดยตรงมากกว่าการอนุมานของมวลอนุภาคจากการนับอนุภาค ซึ่งความเข้มข้นของมวลถูกนำมาใช้ในการออกกฎหมายและจำเป็นสำหรับการเปรียบเทียบกับเครื่องมือวัดอ้างอิง โดยข้อเสียหลักของการใช้เซ็นเซอร์ PM ราคาต่ำ คือ คุณภาพของข้อมูลและการรบกวนจากสภาพภูมิอากาศและสภาพแวดล้อมภายนอก (Johnston, Basford et al., 2019)

Manikonda, Zíková et al. (2016) ได้ประเมินผลการทำงาน เปรียบเทียบความแม่นยำในการวัดฝุ่นละอองของเครื่องวัดฝุ่นละออง (PM) ราคาประหยัดสี่แบบ คือ Speck, Dylos 1100 Pro/Dylos 1700, Air Assure PM2.5 IAQ Monitor และ Air Sense โดยได้ผลการทดสอบดังนี้

Speck เป็นผลิตภัณฑ์ของ Airviz Inc. และได้รับการพัฒนาโดย Carnegie Mellon University Robotics Institute ซึ่ง Speck นั้นจะรายงานความเข้มข้นของอนุภาคในอากาศทั้งจำนวนและมวลต่อปริมาตร โดย Speck นั้นใช้เซ็นเซอร์ Syhitech DSM501A ซึ่งเป็นตัวนับอนุภาคแบบ LED ข้อมูลฝุ่นละออง (PM) จาก Speck สามารถดึงมาจากการดาวน์โหลดโดยตรงผ่านแอปพลิเคชัน Speck Chrome หรือจอภาพสามารถเชื่อมต่อกับ Wi-Fi และสามารถเข้าถึงข้อมูลได้จากบัญชี specksensor.com ปัจจุบัน Speck ได้เปลี่ยนเซ็นเซอร์จาก Shinyei PPD42NS เป็น DSM501A เพื่อเพิ่มเวลาเฉลี่ยและปรับปรุงอัลกอริทึมการประมาณค่ามวลฝุ่นละออง

เครื่องตรวจวัดคุณภาพอากาศ Dylos (Dylos 1100 PRO และ Dylos 1700) เป็นตัวนับอนุภาคเลเซอร์ที่มีสองช่องขนาดคือ ช่องใหญ่ซึ่งวัดอนุภาคที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.5 มม. หรือใหญ่กว่า และช่องเล็กซึ่งวัดอนุภาคที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.5 มม. หรือใหญ่กว่า โดยการวัดอนุภาคจากทั้งสองช่องนั้นเป็นการประมาณจากสัญญาณ ไม่ใช่ขนาดจริงตามการสุ่มตัวอย่างแบบเลือกขนาด (Northcross et al., 2013) Dylos 1700 และ Dylos 1100 Pro นั้นมีเซ็นเซอร์เหมือนกัน แต่จอ 1700 จะบันทึกการประทับเวลาของข้อมูลที่ถูกรวบรวม ในขณะที่ 1100 Pro จะไม่บันทึกการประทับเวลาเว้นแต่จะเชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์ โดยเวลาและวันที่สำหรับจอมอนิเตอร์ Dylos สามารถปรับได้ด้วยตนเอง

TSI Air Assure ใช้เซ็นเซอร์ชาร์ป GP2Y1010AU0F เพื่อวัดความเข้มข้นของมวลของอนุภาคน้อยกว่า 2.5 มม. มอนิเตอร์ AirAssure จำเป็นต้องเชื่อมต่อกับ Wi-Fi เพื่อเข้าถึงข้อมูลโดยพัตลมที่ติดอยู่ด้านข้างของมอนิเตอร์จะช่วยให้อนุภาคไหลเวียนผ่านเซ็นเซอร์ ซึ่งข้อมูลที่แสดงจะอยู่ในรูปของความเข้มข้นของมวลในช่วง 5 ถึง 300 มก./ม³ ถ้าความเข้มข้นของมวลมีค่าเกิน 300 มก./ม³ เครื่องจะแสดงค่า 300 มก./ม³

UB Air Sense (UBAS) เป็นเครื่องตรวจสอบอากาศที่พัฒนาโดย Wenyao Xu และคณะที่มหาวิทยาลัยบัฟฟาโล นิวยอร์ก เช่นเดียวกับ Air Assure ซึ่ง Air Sense ใช้เซ็นเซอร์ชาร์ป GP2Y1010AU0F พร้อมไดโอดเปล่งแสงอินฟราเรดเพื่อตรวจจับและวัดความเข้มข้นของอนุภาคนอกจากนี้ระบบยังประกอบด้วยเซ็นเซอร์ GPS เซ็นเซอร์อุณหภูมิ เซ็นเซอร์ความชื้นสัมพัทธ์ และเซ็นเซอร์ประเมินความเข้มข้นของอนุภาคในรูปของมวล โดยอุปกรณ์จะเก็บข้อมูลไว้ใน SD การ์ด ซึ่งอุปกรณ์จะอัปเดตการประทับเวลาเมื่อมีการเชื่อมต่อกับสัญญาณ GPS

Manikonda, Zíková et al. (2016) ได้สรุปว่าการขาดความแม่นยำในเครื่องวัดฝุ่นละอองที่แตกต่างกันอาจเกิดจากปัจจัยต่างๆ ประกอบด้วยความยาวคลื่นที่แตกต่างกัน การวางแนวของแหล่งกำเนิดแสงและเครื่องตรวจจับฝุ่นละออง การถ่ายโอนอนุภาคจากทางเข้าสู่เซ็นเซอร์และอัตราการไหลของอากาศของเครื่องมือที่แตกต่างกัน นอกจากนี้เครื่องวัดฝุ่นละออง Speck, Air Assure และ Dylos มีหน้าจอในตัว ซึ่งช่วยให้ผู้ใช้สามารถอ่านค่า PM ได้ทุกๆวินาที (Real time) จอภาพ Speck และ Air Assure ยังมีหน้าจอดัชนีคุณภาพอากาศ (AQI) ซึ่งจะเปลี่ยนสีตามความเข้มข้นของ PM_{2.5} โดยประสิทธิภาพของเครื่องวัดฝุ่นละอองเหล่านี้จะได้รับผลกระทบหากอยู่ในสภาพแวดล้อมภายนอกที่มีอุณหภูมิและความชื้นแตกต่างกัน อัตราการดูดซับน้ำของฝุ่นละอองจะเพิ่มขึ้น อนุภาคจะ

เพิ่มขนาดและอาจทำให้เกิดการประเมินค่าความเข้มข้นของมลพิษอากาศมากเกินไป ดังนั้นความเข้มข้นสัมพัทธ์สูงอาจนำไปสู่การวัดแบบเอนเอียง (Burkart et al., 2010; Grimm & Eatough, 2009; Wang et al., 2015) การตอบสนองของเครื่องวัดฝุ่นละอองเหล่านี้จะขึ้นอยู่กับอัลกอริทึมที่ใช้สำหรับการประมวลผลสัญญาณจากเครื่องตรวจจับหรือโฟโตทรานซิสเตอร์

จากผลลัพธ์ข้างต้นเครื่องวัดฝุ่นละออง (PM) ต้นทุนต่ำมีความแม่นยำเพียงพอสำหรับการวัดปริมาณฝุ่นละออง (PM) ในการตรวจสอบขนาดกลาง หากทำการปรับเทียบอย่างเหมาะสมเครื่องวัดฝุ่นละอองต้นทุนต่ำมีประโยชน์สำหรับการศึกษผลกระทบของฝุ่นละอองต่อสุขภาพ นอกจากนี้ขนาดที่กะทัดรัดของเครื่องวัดฝุ่นละอองเหล่านี้ยังเหมาะสมในการศึกษาภาคสนาม สำหรับการใช้งานเฉพาะด้านสามารถพิจารณาปัจจัยอื่นๆเช่น ความยืดหยุ่นในการดาวน์โหลดข้อมูล การเชื่อมต่อต้นทุน และการตอบสนอง ประกอบไปด้วย



รูปที่ 2.6 รูปภาพแสดงเครื่องมือวัดฝุ่นละอองที่ใช้ศึกษาประกอบด้วย (a) Speck, (b) Dylos 1700, (c) TSI Air Assure และ (d) UBAS (ที่มา: Manikonda, Ziková et al. (2016))

2.9 Building Information Modeling (BIM)

Building Information Modeling (BIM) คือ แบบจำลองข้อมูลอาคารซึ่งกำลังกลายเป็นกระบวนการทำงานร่วมกันที่นิยมในอุตสาหกรรมการก่อสร้าง บริษัทก่อสร้างหลายแห่งกำลังลงทุนในเทคโนโลยี BIM ซึ่งสามารถใช้วิเคราะห์ข้อมูลได้ในทุกระบวนการของงานก่อสร้าง ตั้งแต่ระหว่างการผลิตก่อนการก่อสร้าง ขณะทำการก่อสร้าง และหลังการก่อสร้าง โดยเป็นการนำเสนอแบบและข้อมูลดิจิทัลสามมิติของอาคาร ซึ่งประกอบด้วยส่วนประกอบของอาคารที่สามารถรวมคุณลักษณะข้อมูลและกฎพารามิเตอร์สำหรับแต่ละวัสดุ (Hergunsel, 2011) ปัจจุบันเทคโนโลยี BIM

ถูกพัฒนาขึ้นในหลายรูปแบบ ส่วนใหญ่จะใช้ในการตรวจสอบข้อขัดแย้งกันของแบบ (Clash detection) ด้านการประสานงานเชิงพื้นที่ และการจัดกำหนดการ ตารางงาน ดังตารางที่ 2.4

ชื่อผลิตภัณฑ์	ผู้พัฒนา	การนำไปใช้	เว็บไซต์ผู้พัฒนา
Navisworks	Autodesk	Clash detection Scheduling Coordination	www.autodesk.com
ProjectWise Navigator	Bentley	Clash detection Scheduling Collaboration	www.bentley.com
DP Manager	Digital Project	Scheduling Model review Collaboration Quantity take-off	www.digitalproject3d.com
Visual 4D Simulation	Innovaya	Scheduling Coordination	www.innovaya.com
Vico Office	Vico Software	Scheduling Coordination Cost estimation Quantity take-off	www.vicosoftware.com
Solibri model checker	Solibri	Clash detection Coordination Quantity take-off Design review	www.solibri.com

ตารางที่ 2.4 ตารางแสดงการใช้เครื่องมือ BIM สำหรับการจัดการงานก่อสร้าง, ดัดแปลงจาก (Zaher, Greenwood et al., 2018)

ปัจจุบันมีการประยุกต์ใช้เทคโนโลยี Building Information Modeling กับงานด้านสิ่งแวดล้อมมากขึ้น เพื่อเป็นการสร้างโลกแห่งการก่อสร้างที่ยั่งยืน เช่น การเลือกวัสดุก่อสร้างและวัสดุที่อยู่ในอาคารที่เหมาะสมและเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมควบคู่กับการใช้กระบวนการ BIM โดยนำข้อมูลดิจิทัลมาวิเคราะห์ข้อมูล ทำให้การก่อสร้างเห็นภาพมากขึ้น ทำงานร่วมกัน ประสานงานกันได้ดียิ่งขึ้น และลดข้อเสียที่เกิดจากการก่อสร้าง นอกจากนี้ยังสามารถใช้ BIM เพื่อเข้าถึงข้อมูลด้านสิ่งแวดล้อมในการประเมินผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมของโครงการ โดยการทำ Simulation เพื่อประเมินวัฏจักร

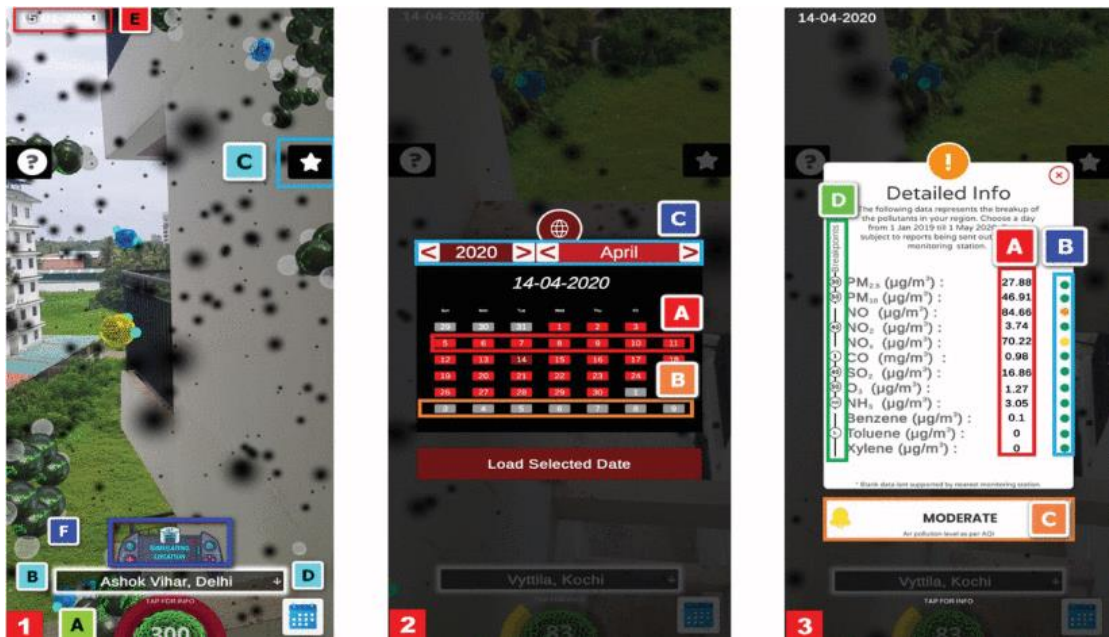
ชีวิต (Life Cycle Energy) ของโครงการก่อสร้าง การประเมินของเสีย (Waste) ที่เกิดจากการก่อสร้าง รวมถึงการระบุ (Identify) จุดชนกัน (Clash) เมื่อนำแบบจำลองมาผนวกรวมกัน (Mansathit, 2565)

2.10 Augmented reality (AR)

เทคโนโลยีความเป็นจริงเสริม หรือ Augmented Reality (AR) เป็นเทคโนโลยีที่สามารถนำข้อมูลทางดิจิทัลที่ถูกสร้างด้วยคอมพิวเตอร์มาแสดงเป็นภาพเสมือนบนโลกความจริง โดยใช้วิธีซ้อนภาพในโลกเสมือนไว้บนภาพในโลกความเป็นจริง ผ่านอุปกรณ์ดิจิทัล (Wang, Wang et al., 2014) AR มีหลักการทำงานคือ 1. ระบุจุดหรือพื้นที่ที่ต้องการแสดงข้อมูล 2. ทำการประมวลผลเพื่อนำข้อมูลดังกล่าวมาวางบนพื้นที่นั้นๆตามมุมมองและระยะที่กำหนดไว้ 3. แสดงผลผ่านหน้าจอที่ซ้อนวัตถุเสมือนเข้ากับพื้นที่จริง (สิทธิณัฐ, 2562) โดยในปัจจุบันเทคโนโลยี AR สามารถเข้าถึงได้ง่ายขึ้น และนำไปปรับใช้ในหลายอุตสาหกรรม เช่น ด้านความบันเทิง การค้าปลีก การเดินทาง การโฆษณา และการสื่อสารทางสังคม รวมถึงในอุตสาหกรรมก่อสร้างอีกด้วย (Wang, Kim et al., 2013) ความสะดวกในการใช้งานและความสามารถในการจ่ายที่เพิ่มขึ้นได้ทำให้การใช้ AR ในอุตสาหกรรมก่อสร้างถูกใช้อย่างแพร่หลายมากขึ้น

ในอุตสาหกรรมก่อสร้าง AR ถูกนำมาใช้ เพื่อให้ผู้ใช้งานสามารถเข้าถึงข้อมูลต่างๆที่เกี่ยวข้องกับโครงการก่อสร้างได้สะดวกและรวดเร็ว การสร้างภาพ (Visualization) สามารถยกระดับความรู้ความเข้าใจของผู้ใช้และช่วยในการสื่อสารข้อมูลเกี่ยวกับปรากฏการณ์ที่ซับซ้อนหรือเพื่อแสดงให้เห็นถึงการบังคับใช้แนวคิดที่เป็นนามธรรมกับสถานการณ์ในโลกแห่งความเป็นจริง (Chu, Matthews et al., 2018)

ในการประยุกต์ใช้ AR กับงานด้านสิ่งแวดล้อมนั้น Mathews, Chimalakonda et al.(2021) เสนอแอปพลิเคชัน AiR เป็นแอปพลิเคชันมือถือบน Android ที่ประยุกต์ใช้เทคโนโลยี Augmented Reality เพื่อช่วยให้ผู้ใช้งานเห็นภาพมลพิษในอากาศ แสดงภาพและเปรียบเทียบคุณภาพอากาศในสถานที่ต่างๆและสร้างประสบการณ์การใช้งานที่สมจริง โดยมีจุดมุ่งหมายเพื่อดึงดูดผู้ใช้งานที่หลากหลาย ซึ่ง AiR จะแสดงผลมลพิษ 12 ชนิด คือ PM10, PM2.5, NO, NO₂, NO_x, CO, SO₂, O₃, NH₃, C₆H₆, (CH₃)₂C₆H₅ และ (CH₃)₂C₆H₅ ผ่านรูปแบบเฉพาะตัว ซึ่งจะแสดงผลมลพิษจากสถานีตรวจอากาศต่างๆทั่วอินเดีย



รูปที่ 2.7 รูปภาพแสดงตัวอย่างแอปพลิเคชัน AIR (ที่มา: MATHEWS, CHIMALAKONDA ET AL.(2021))

2.11 สรุปงานวิจัยที่เกี่ยวข้องในอดีต

ในบทนี้ได้ทำการศึกษา ค้นคว้า และทบทวนเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับมลพิษอากาศ ปัญหาฝุ่นละอองขนาดเล็ก (PM_{2.5} และ PM₁₀) ผลกระทบจากปัญหาฝุ่นละออง ค่ามาตรฐานและวิธีการตรวจวัดฝุ่นละออง กิจกรรมก่อสร้างที่ก่อให้เกิดฝุ่นละออง แนวทาง ระเบียบ และข้อปฏิบัติในการควบคุมฝุ่นละอองจากการก่อสร้างอาคาร อากาศยานไร้คนขับ เครื่องมือวัดฝุ่นละออง Building Information Modeling (BIM) และ Augmented reality (AR) เพื่อนำมาเป็นข้อมูลพื้นฐานและแนวทางในการดำเนินงานวิจัย โดยมีประเด็นหลักที่ทำการศึกษาดังนี้

อากาศเสีย หมายความว่า ของเสียที่อยู่ในสภาพเป็นไอเสียด กลิ่นควัน ก๊าซ เขม่า ฝุ่นละออง เถ้าถ่าน หรือมลสารอื่นที่มีสภาพละเอียดบางเบาจนสามารถรวมตัวอยู่ในบรรยากาศได้

ฝุ่นละออง (Particulate Matter) หมายถึง การผสมของอนุภาคของแข็งและหยดของเหลวที่แขวนลอยอยู่ในอากาศ ซึ่ง PM₁₀ หมายถึง ฝุ่นหยาบ (Course Particle) ซึ่งเป็นอนุภาคที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.5-10 ไมครอน และ PM_{2.5} หมายถึง ฝุ่นละเอียด (Final Particles) ซึ่งเป็นอนุภาคที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กกว่า 2.5 ไมครอน

ผลกระทบของฝุ่นละอองในบรรยากาศแบ่งออกเป็น 3 ประเภทดังนี้ ผลกระทบต่อสุขภาพอนามัย ผลกระทบต่อทัศนวิสัย และผลกระทบต่อวัตถุ และสิ่งก่อสร้าง

ค่ามาตรฐานฝุ่นละอองในบรรยากาศโดยทั่วไปมีดังนี้ ค่าเฉลี่ยของฝุ่นละอองรวมหรือฝุ่นละอองขนาดไม่เกิน 100 ไมครอน (Total Suspended Particulate Matter, TSP) ในเวลา 24 ชั่วโมงจะต้องไม่เกิน 0.33 มิลลิกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และในเวลา 1 ปีจะต้องไม่เกิน 0.1 มิลลิกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ค่าเฉลี่ยของฝุ่นละอองขนาดไม่เกิน 10 ไมครอน ในเวลา 24 ชั่วโมงจะต้องไม่เกิน 0.12 มิลลิกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และในเวลา 1 ปีจะต้องไม่เกิน 0.05 มิลลิกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ค่าเฉลี่ยของฝุ่นละอองขนาดไม่เกิน 2.5 ไมครอน ในเวลา 24 ชั่วโมงจะต้องไม่เกิน 0.05 มิลลิกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และในเวลา 1 ปีจะต้องไม่เกิน 0.025 มิลลิกรัมต่อลูกบาศก์เมตร โดยวิธีการวัดหาค่าเฉลี่ยของฝุ่นละอองขนาดไม่เกิน 100 ไมครอน และฝุ่นละอองขนาดไม่เกิน 10 ไมครอนในเวลา 24 ชั่วโมงหรือในเวลา 1 ปีให้ใช้วิธีการตรวจวัดตามระบบกราวิเมตริก (Gravimetric) หรือระบบอื่นที่กรมควบคุมมลพิษเห็นชอบ และการเก็บตัวอย่างฝุ่นละอองที่มีขนาดเล็กกว่า 2.5 ไมครอน ใช้ชุดเก็บตัวอย่าง PM2.5 ด้วยวิธีอ้างอิง

อุตสาหกรรมการก่อสร้างมักได้รับการวิพากษ์วิจารณ์ว่าเป็นหนึ่งในผู้ก่อมลพิษทางอากาศ โดยงานก่อสร้างปล่อยฝุ่นละอองสู่ชั้นบรรยากาศจำนวนมาก ฝุ่นก่อสร้างมีต้นกำเนิดมาจากกิจกรรมนอกสถานที่หลายประเภท เช่น การขุดเจาะ การขนส่งวัสดุ การบรรทุกสินค้าและการขนถ่าย การเก็บวัสดุในพื้นที่เปิดโล่ง งานคอนกรีตและปูน การตัดและการบรรจุ

อากาศยานไร้คนขับมีบทบาทเพิ่มมากขึ้นในการดำเนินธุรกิจและอุตสาหกรรมต่างๆเนื่องจากสามารถใช้ลดต้นทุนในด้านแรงงาน อากาศยานไร้คนขับไม่จำเป็นต้องใช้ถนนและสามารถเข้าถึงสถานที่ที่ทำได้ยาก ทำให้อากาศยานไร้คนขับสามารถเข้าถึงสภาพแวดล้อมที่อันตรายที่มนุษย์ไม่สามารถเข้าถึงได้

เครื่องวัดฝุ่นละออง (PM) ต้นทุนต่ำมีความแม่นยำเพียงพอสำหรับการวัดปริมาณฝุ่นละออง (PM) ในการตรวจสอบขนาดกลาง หากทำการเปรียบเทียบอย่างเหมาะสมเครื่องวัดฝุ่นละอองต้นทุนต่ำมีประโยชน์สำหรับการศึกษาผลกระทบของฝุ่นละอองต่อสุขภาพ นอกจากนี้ขนาดที่กะทัดรัดของเครื่องวัดฝุ่นละอองเหล่านี้ยังเหมาะสมในการศึกษาภาคสนาม

Building Information Modeling (BIM) คือ แบบจำลองข้อมูลอาคารซึ่งกำลังกลายเป็นกระบวนการทำงานร่วมกันที่นิยมในอุตสาหกรรมการก่อสร้าง บริษัทก่อสร้างหลายแห่งกำลังลงทุนใน

เทคโนโลยี BIM ซึ่งสามารถใช้วิเคราะห์ข้อมูลได้ในทุกระบวนการของงานก่อสร้าง ตั้งแต่ระหว่างการผลิต ประมวลงาน ก่อนการก่อสร้าง ขณะทำการก่อสร้าง และหลังการก่อสร้าง ปัจจุบันมีการประยุกต์ใช้เทคโนโลยี Building Information Modeling กับงานด้านสิ่งแวดล้อมมากขึ้น เพื่อเป็นการสร้างโลกแห่งการก่อสร้างที่ยั่งยืน เช่น การเลือกวัสดุก่อสร้างและวัสดุที่อยู่ในอาคารที่เหมาะสมและเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมควบคู่กับการใช้กระบวนการ BIM โดยนำข้อมูลดิจิทัลมาวิเคราะห์ข้อมูล ทำให้การก่อสร้างเห็นภาพมากขึ้น ทำงานร่วมกัน ประสานงานกันได้ดียิ่งขึ้น และลดของเสียที่เกิดจากการก่อสร้าง

เทคโนโลยีความเป็นจริงเสริม หรือ Augmented Reality (AR) เป็นเทคโนโลยีที่สามารถนำข้อมูลทางดิจิทัลที่ถูกสร้างด้วยคอมพิวเตอร์มาแสดงเป็นภาพเสมือนบนโลกความจริง โดยใช้วิธีซ้อนภาพในโลกเสมือนไว้บนภาพในโลกความเป็นจริง ผ่านอุปกรณ์ดิจิทัล มีหลักการทำงานคือ 1. ระบุจุดหรือพื้นที่ที่ต้องการแสดงข้อมูล 2. ทำการประมวลผลเพื่อนำข้อมูลดังกล่าวมาวางบนพื้นที่นั้นๆตามมุมและระยะที่กำหนดไว้ 3. แสดงผลผ่านหน้าจอที่ซ้อนวัตถุเสมือนเข้ากับพื้นที่จริง ในอุตสาหกรรมก่อสร้าง AR ถูกนำมาใช้ เพื่อให้ผู้ใช้งานสามารถเข้าถึงข้อมูลต่างๆที่เกี่ยวข้องกับโครงการก่อสร้างได้สะดวกและรวดเร็ว การสร้างภาพ (Visualization) สามารถยกระดับความรู้ความเข้าใจของผู้ใช้และช่วยในการสื่อสารข้อมูลเกี่ยวกับปรากฏการณ์ที่ซับซ้อนหรือเพื่อแสดงให้เห็นถึงการบังคับใช้แนวคิดที่เป็นนามธรรมกับสถานการณ์ในโลกแห่งความเป็นจริง

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อสร้างระบบในการวัดและตรวจสอบการกระจายตัวของฝุ่นละออง (PM2.5 และ PM10) ในบริเวณโดยรอบโครงการก่อสร้างบ้านจัดสรร และโครงการก่อสร้างอาคาร ที่ได้จากการสำรวจโดยเทคโนโลยีอากาศยานไร้คนขับ รวมทั้งพล็อตกราฟการกระจายตัว (Model 3 มิติ) ของฝุ่นละอองใน Building Information Modeling (BIM) และแสดงกราฟการกระจายตัวโดยประยุกต์ใช้เทคโนโลยีความเป็นจริงเสริม (Augmented Reality) ทำให้เห็นภาพเสมือนอยู่ในสภาพแวดล้อมจริง สามารถวิเคราะห์สาเหตุและปัญหาฝุ่นละอองที่ส่งผลกระทบต่อบริเวณชุมชนโดยรอบ ซึ่งมีลักษณะของงานวิจัยและขั้นตอนการดำเนินงานดังต่อไปนี้

3.1 ลักษณะของงานวิจัย

งานวิจัยการพัฒนาระบบในการวัดและตรวจสอบการกระจายตัวของฝุ่นละออง (PM2.5 และ PM10) ในโครงการก่อสร้างบ้านจัดสรร และโครงการก่อสร้างอาคาร เป็นงานวิจัยประยุกต์ (Applied Research) ประเภทการวิจัยและพัฒนา เนื่องจากเป็นงานวิจัยที่ได้นำผลจากความรู้ทางทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการวัดปริมาณฝุ่นละออง และเทคโนโลยีอากาศยานไร้คนขับ Building Information Modeling (BIM) และเทคโนโลยีความเป็นจริงเสริม (Augmented Reality) มาประยุกต์ใช้ให้เกิดประโยชน์เพื่อแก้ปัญหาที่เกิดขึ้น โดยผลลัพธ์ที่คาดว่าจะได้จากงานวิจัยคือระบบที่สามารถวัดปริมาณและตรวจสอบการกระจายตัวของฝุ่นละอองในโครงการก่อสร้าง ทำให้สามารถวิเคราะห์สาเหตุและปัญหาฝุ่นละอองที่ส่งผลกระทบต่อบริเวณชุมชนโดยรอบ

3.2 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

วิธีการดำเนินงานวิจัยประกอบด้วย 1) ศึกษาและเก็บข้อมูลปัญหาฝุ่นละอองในโครงการก่อสร้างบ้านจัดสรร และโครงการก่อสร้างอาคาร 2) วิเคราะห์สาเหตุ ปัญหาที่เกิดขึ้นรวมทั้งแนวทางการแก้ไขปัญหา 3) ทบทวนเอกสารและวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย 4) ออกแบบระบบที่ใช้ในการตรวจวัดฝุ่นละอองในโครงการก่อสร้างอาคาร 5) ทดสอบความคลาดเคลื่อนของเครื่องมือที่ใช้ในระบบวัดปริมาณฝุ่นละออง 6) ทดสอบระบบที่ใช้ในการวัดปริมาณฝุ่นละอองกับกรณีศึกษา 7) วิเคราะห์และสรุปผลที่ได้จากระบบตรวจวัดฝุ่นละอองในโครงการก่อสร้างอาคาร

3.2.1 ศึกษาและเก็บข้อมูลปัญหาฝุ่นละออง

ศึกษาและเก็บข้อมูลปัญหาฝุ่นละอองในบริเวณโดยรอบโครงการก่อสร้างบ้านจัดสรร และโครงการก่อสร้างอาคาร โดยเป็นการสำรวจเบื้องต้นเกี่ยวกับวิธีการวัดและป้องกันฝุ่นละอองในโครงการก่อสร้าง การแสดงและการนำเสนอผลที่ได้จากการวัดปริมาณฝุ่นละออง รวมทั้งผลกระทบของปัญหาฝุ่นละอองต่อบริเวณชุมชนโดยรอบ

3.2.2 วิเคราะห์สาเหตุ ปัญหาที่เกิดขึ้นรวมทั้งแนวทางแก้ไขปัญหา

จากการศึกษาสภาพปัญหาและการลงเก็บข้อมูลภาคสนามทำให้ทราบสาเหตุของการเกิดปัญหาในการวัดฝุ่นละอองในบริเวณพื้นที่ก่อสร้างและชุมชนโดยรอบของโครงการก่อสร้างบ้านจัดสรร และโครงการก่อสร้างอาคาร ในปัจจุบันนั้นการวัดปริมาณฝุ่นละอองเป็นการติดเครื่องมือวัดไว้ที่จุดใดจุดหนึ่ง หรือให้คนงานถือเครื่องมือวัดเดินไปบริเวณใดบริเวณหนึ่ง ซึ่งอาจทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนจากตัวผู้วัดและยังเป็นการวัดบริเวณใดบริเวณหนึ่ง ทำให้ทราบค่าปริมาณฝุ่นละอองบริเวณภายในอาคาร หรือภายในโครงการก่อสร้างเท่านั้น ซึ่งค่าปริมาณฝุ่นละอองนี้อาจไม่สะท้อนถึงปัญหาเนื่องจากไม่ทราบค่าที่กระจายไปยังบริเวณชุมชนโดยรอบ ทำให้ไม่ทราบถึงปัญหาและผลกระทบต่อบริเวณโดยรอบ นอกจากนี้บริเวณโครงการก่อสร้างมักไม่เอาใจใส่ในการทำมาตรการป้องกันฝุ่นละออง ไม่ทำที่ป้องกัน และไม่มีการตรวจวัดปริมาณฝุ่นละออง ทำให้เกิดการฟุ้งกระจายไปยังบริเวณโดยรอบ ซึ่งสร้างความเดือดร้อนให้แก่ประชาชนที่อาศัยบริเวณใกล้เคียงกับพื้นที่ก่อสร้าง ซึ่งแนวทางการแก้ปัญหาคือการพัฒนาระบบที่ใช้ในการวัดปริมาณฝุ่นละออง โดยประยุกต์ใช้โปรแกรม Arduino IDE กับเซ็นเซอร์ตรวจวัดฝุ่นละออง (PM2.5 และ PM10) เซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิและความชื้น เซ็นเซอร์กำหนดตำแหน่งบนพื้นโลก (GPS) และตัวส่งสัญญาณข้อมูล มาติดกับอากาศยานไร้คนขับ หลังจากนั้นนำค่าปริมาณฝุ่นละอองที่วัดได้และค่าตำแหน่ง (พิกัด) มาทำการพล็อตกราฟการกระจายตัว (Model 3 มิติ) แบบ Real time ใน Building Information Modeling (BIM) และ นำแบบจำลอง Model 3 มิติ มาประยุกต์กับเทคโนโลยี Augmented Reality (AR) เพื่อให้สามารถแสดงผลผ่านอุปกรณ์โทรศัพท์มือถือ หรือ แท็บเล็ต ทำให้เห็นภาพเสมือนอยู่ในสภาพแวดล้อมจริง ซึ่งจะทำให้เห็นการกระจายตัวของฝุ่นละอองจากโครงการก่อสร้างอาคารไปยังพื้นที่บริเวณชุมชนโดยรอบอย่างชัดเจน ทำให้สามารถวิเคราะห์สาเหตุและปัญหาที่เกิดขึ้นได้

3.2.3 ทบทวนเอกสารและวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย

ทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยทั้งในส่วนของเอกสารงานวิจัย ตำราเรียน วารสาร กฎหมาย บทความทางวิชาการและสิ่งตีพิมพ์ที่เกี่ยวข้องกับมลพิษทางอากาศ การวัดปริมาณฝุ่นละอองและการป้องกันปัญหามลพิษทางอากาศ ผลกระทบจากฝุ่นละอองต่อบริเวณชุมชนโดยรอบ จากโครงการก่อสร้างบ้านจัดสรร และโครงการก่อสร้างอาคาร วิธีการและมาตรฐานการวัดปริมาณฝุ่นละอองในโครงการก่อสร้าง บอร์ด Arduino และเซ็นเซอร์ต่างๆ การใช้อากาศยานไร้คนขับในทางวิศวกรรม การประยุกต์ใช้ Building Information Modeling (BIM) และเทคโนโลยี Augmented Reality (AR) ในงานด้านวิศวกรรมโยธา เป็นต้น

3.2.4 ออกแบบระบบที่ใช้ในการตรวจวัดฝุ่นละอองในโครงการก่อสร้างอาคาร

จากการศึกษาสภาพปัญหาและการลงเก็บข้อมูลรวมทั้งทบทวนวรรณกรรมทำให้เกิดการออกแบบระบบที่ใช้ในการตรวจวัดฝุ่นละอองในโครงการก่อสร้างอาคารโดยประยุกต์ใช้โปรแกรม Arduino IDE กับเซ็นเซอร์ตรวจวัดฝุ่นละออง เซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิและความชื้น เซ็นเซอร์กำหนดตำแหน่งบนพื้นโลก (GPS) และตัวส่งสัญญาณข้อมูล มาติดกับอากาศยานไร้คนขับ เพื่อนำไปบินวัดปริมาณฝุ่นละอองรอบๆตัวอาคาร หลังจากนั้นเซ็นเซอร์จะส่งค่าต่างๆมายังคอมพิวเตอร์ของผู้วิจัยทันที เพื่อนำค่าปริมาณฝุ่นละอองที่วัดได้และค่าตำแหน่ง (พิกัด) มาทำการพล็อตกราฟการกระจายตัว (Model 3 มิติ) แบบ Real time ใน Building Information Modeling (BIM) หลังจากนั้นนำแบบจำลอง Model 3 มิติ มาประยุกต์กับเทคโนโลยี Augmented Reality (AR) เพื่อให้สามารถแสดงผลผ่านอุปกรณ์โทรศัพท์มือถือ หรือ แท็บเล็ต ทำให้เห็นภาพเสมือนอยู่ในสภาพแวดล้อมจริง ซึ่งจะทำให้เห็นการกระจายตัวของฝุ่นละอองจากโครงการก่อสร้างอาคารไปยังพื้นที่บริเวณชุมชนโดยรอบอย่างชัดเจน

3.2.5 ทดสอบความคลาดเคลื่อนของเครื่องมือที่ใช้ในระบบวัดปริมาณฝุ่นละออง

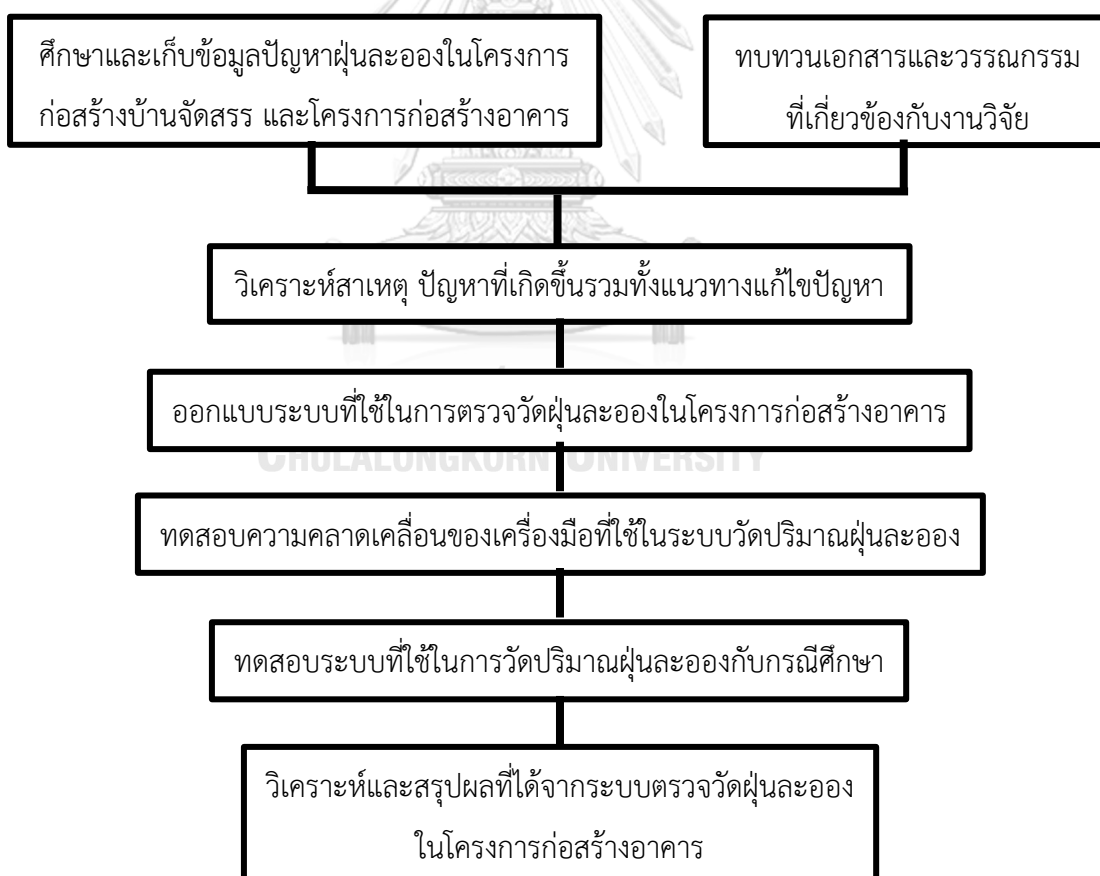
ทำการเปรียบเทียบค่าที่วัดได้จากเซ็นเซอร์ตรวจวัดฝุ่นละออง เซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิและความชื้น เซ็นเซอร์กำหนดตำแหน่งบนพื้นโลก (GPS) กับเครื่องมือหรือระบบอื่นๆ เพื่อตรวจสอบความคลาดเคลื่อนและความแม่นยำของระบบ และทำการเปรียบเทียบค่าปริมาณฝุ่นละอองที่ได้วัดได้จากอากาศยานไร้คนขับ (โดรน) กับค่าที่วัดได้ตามปกติ เพื่อทดสอบว่าต้องใช้เชือก (เชือกที่ผูกตะกร้าไว้ ซึ่งในตะกร้าจะประกอบไปด้วยอุปกรณ์คือ เซ็นเซอร์ต่างๆ) ยาวเท่าใด ลมจากใบพัดขณะทำการบินของอากาศยานไร้คนขับนั้นจะไม่มีผลต่อค่าปริมาณฝุ่นละออง

3.2.6 ทดสอบระบบที่ใช้ในการวัดปริมาณฝุ่นละอองกับกรณีศึกษา

ทดสอบระบบที่ใช้ในการวัดปริมาณฝุ่นละอองกับกรณีศึกษาซึ่งเป็นโครงการก่อสร้างบ้านจัดสรรจำนวน 2 โครงการ และโครงการก่อสร้างอาคารจำนวน 2 โครงการ ซึ่งมีการก่อสร้างอยู่ในขั้นตอนของงานโครงสร้าง หรืองานสถาปัตยกรรม โดยเปรียบเทียบปริมาณฝุ่นละอองที่เกิดขึ้นรวมทั้งวิเคราะห์สาเหตุและปัญหาฝุ่นละอองที่ส่งผลกระทบต่อบริเวณชุมชนโดยรอบ

3.2.7 วิเคราะห์และสรุปผลที่ได้จากระบบตรวจวัดฝุ่นละอองในโครงการก่อสร้างอาคาร

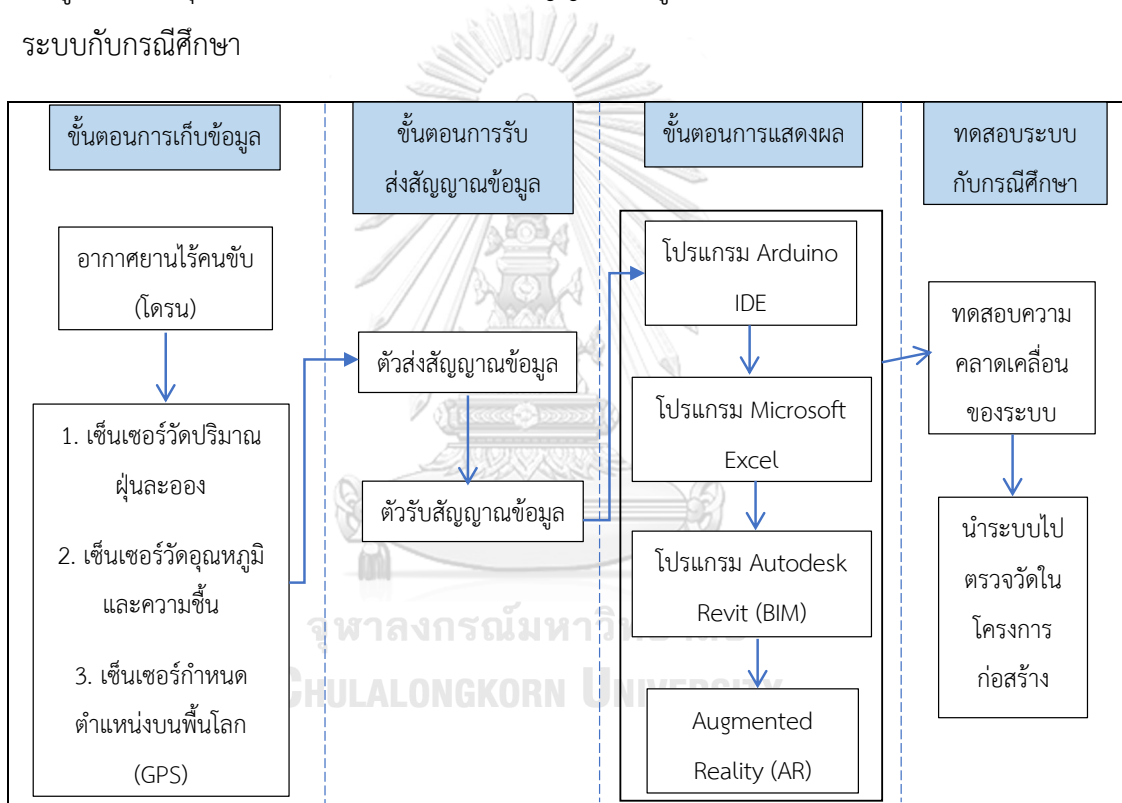
วิเคราะห์ผลลัพธ์ที่ได้จากระบบตรวจวัดปริมาณฝุ่นละออง รวมทั้งวิเคราะห์สาเหตุและปัญหาฝุ่นละอองที่ส่งผลกระทบต่อบริเวณชุมชนโดยรอบจากกรณีศึกษาโครงการก่อสร้างบ้านจัดสรรและโครงการก่อสร้างอาคาร ศึกษาความเหมาะสมหรือข้อจำกัดต่างๆในการใช้งานระบบตรวจวัดปริมาณฝุ่นละออง และเสนอแนะแนวทางในการพัฒนาระบบตรวจวัดฝุ่นละอองในโครงการก่อสร้าง พร้อมทั้งสรุปผลการวิจัย



รูปที่ 3.1 สรุปขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

3.3 กรอบแนวคิดงานวิจัย

วัตถุประสงค์ของงานวิจัยคือเพื่อสร้างระบบในการวัดและตรวจสอบการกระจายตัวของฝุ่นละออง (PM2.5 และ PM10) ในบริเวณโดยรอบโครงการก่อสร้างบ้านจัดสรร และโครงการก่อสร้างอาคาร ที่ได้จากการสำรวจโดยเทคโนโลยีอากาศยานไร้คนขับ รวมทั้งพล็อตกราฟการกระจายตัว (Model 3 มิติ) ของฝุ่นละอองใน Building Information Modeling (BIM) และแสดงกราฟการกระจายตัวโดยประยุกต์ใช้เทคโนโลยีความเป็นจริงเสริม (Augmented Reality) เพื่อบรรลุวัตถุประสงค์ของงานวิจัย ผู้วิจัยจึงได้ทำการออกแบบงานวิจัยโดยมีหัวข้อหลักดังนี้ ขั้นตอนการเก็บข้อมูลปริมาณฝุ่นละออง, ขั้นตอนการรับ-ส่งสัญญาณข้อมูล, ขั้นตอนการแสดงผล และการทดสอบระบบกับกรณีศึกษา



รูปที่ 3.2 รูปภาพแสดงกรอบแนวคิดงานวิจัยระบบตรวจวัดฝุ่นละอองในโครงการก่อสร้างอาคาร

ขั้นตอนการเก็บข้อมูลปริมาณฝุ่นละอองนั้นจะใช้อากาศยานไร้คนขับ (โดรน) ซึ่งทำการผูกตะกร้าไว้ ซึ่งในตะกร้าจะประกอบไปด้วยอุปกรณ์คือ เซ็นเซอร์วัดปริมาณฝุ่นละออง เซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิและความชื้น และเซ็นเซอร์กำหนดตำแหน่งบนพื้นโลก (GPS) โดยเซ็นเซอร์เหล่านี้จะใช้พลังงานจากถ่าน ซึ่งเซ็นเซอร์ทั้งหมดจะต่ออยู่กับบอร์ด Arduino โดยผู้วิจัยจะนำโดรนที่ทำการผูกตะกร้าไปบินบริเวณรอบโครงการก่อสร้างอาคารเพื่อทำการเก็บข้อมูลปริมาณฝุ่นละออง หลังจากนั้นจะส่งสัญญาณข้อมูลปริมาณฝุ่นละออง (PM2.5 และ PM10) อุณหภูมิและความชื้น และตำแหน่งที่ทำ

การวัดปริมาณฝุ่นละอองจากโดรนมายังเครื่องคอมพิวเตอร์ โดยใช้โมดูลสื่อสารไร้สายเป็นทั้งตัวรับและส่งสัญญาณข้อมูล

ขั้นตอนการแสดงผลนั้นจะนำข้อมูลที่แสดงในโปรแกรม Arduino IDE มาแสดงผลในรูปแบบไฟล์ Excel และนำค่าปริมาณฝุ่นละอองที่วัดได้และค่าตำแหน่ง (พิกัด) มาทำการพล็อตกราฟการกระจายตัว (Model 3 มิติ) ในโปรแกรม Autodesk Revit (BIM) หลังจากนั้นนำ Model 3 มิติ มาประยุกต์กับเทคโนโลยี Augmented Reality (AR) และนำไปทดสอบความคลาดเคลื่อนของเครื่องมือที่ใช้ในระบบวัดปริมาณฝุ่นละออง หลังจากทดสอบระบบเรียบร้อยแล้วจึงนำไปวัดในโครงการก่อสร้างอาคารและบ้านจัดสรร ซึ่งข้อมูลระบบตรวจวัดฝุ่นละอองในโครงการก่อสร้างอาคารอย่างละเอียดนั้นจะกล่าวถึงในบทถัดไป



บทที่ 4

ระบบตรวจวัดฝุ่นละอองในโครงการก่อสร้างอาคาร

ในบทนี้จะกล่าวถึงกระบวนการพัฒนาระบบตรวจวัดฝุ่นละอองในโครงการก่อสร้างอาคาร จากการประยุกต์ใช้เทคโนโลยี บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ (Arduino) เซ็นเซอร์วัดปริมาณฝุ่นละออง Building Information Modeling (BIM) และเทคโนโลยีความจริงเสริม (Augmented Reality : AR) รวมถึงการใช้งานอากาศยานไร้คนขับ (Unmanned Aerial Vehicle) และทดสอบความคลาดเคลื่อนของเครื่องมือที่ใช้ในระบบวัดปริมาณฝุ่นละออง

4.1 แนวทางการพัฒนาระบบ

งานวิจัยต้องการพัฒนาระบบที่ใช้ในการวัดปริมาณฝุ่นละออง โดยประยุกต์ใช้โปรแกรม Arduino IDE กับเซ็นเซอร์ตรวจวัดฝุ่นละออง (PM2.5 และ PM10) เซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิและความชื้น เซ็นเซอร์กำหนดตำแหน่งบนพื้นโลก (GPS) และตัวส่งสัญญาณข้อมูล มาติดกับอากาศยานไร้คนขับ เพื่อนำไปบินวัดปริมาณฝุ่นละอองรอบๆตัวอาคาร หลังจากนั้นเซ็นเซอร์จะส่งค่าต่างๆมายังคอมพิวเตอร์ของผู้วิจัยทันที เพื่อนำค่าปริมาณฝุ่นละอองที่วัดได้และค่าตำแหน่ง (พิกัด) มาทำการพล็อตกราฟการกระจายตัว (Model 3 มิติ) แบบ Real time ใน Building Information Modeling (BIM) หลังจากนั้นนำแบบจำลอง Model 3 มิติ มาประยุกต์กับเทคโนโลยี Augmented Reality (AR) เพื่อให้สามารถแสดงผลผ่านอุปกรณ์โทรศัพท์มือถือ หรือ แท็บเล็ต ทำให้ในจอภาพกลายเป็นวัตถุ 3 มิติ ลอยอยู่เหนือพื้นผิวจริง ทำให้เห็นภาพเสมือนอยู่ในสภาพแวดล้อมจริง ซึ่งจะทำให้เห็นการกระจายตัวของฝุ่นละอองจากโครงการก่อสร้างอาคารไปยังพื้นที่บริเวณชุมชนโดยรอบอย่างชัดเจน

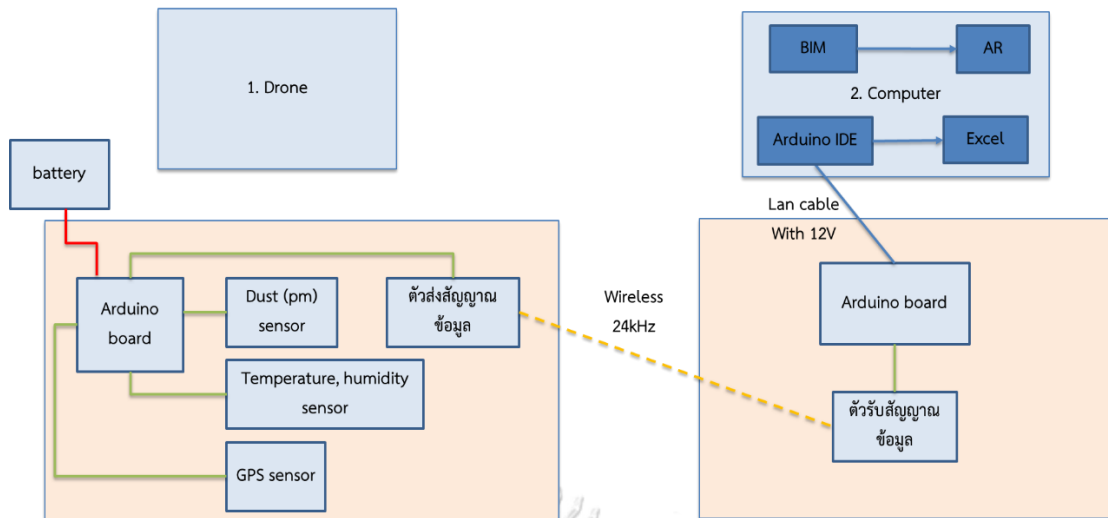
4.2 เครื่องมือที่ใช้ในระบบวัดปริมาณฝุ่นละออง

เครื่องมือที่ใช้ในระบบวัดปริมาณฝุ่นละอองนั้นประกอบด้วย 3 ส่วน คือ 1. โดรนที่ติดตั้งอุปกรณ์วัดปริมาณฝุ่นละออง อุปกรณ์วัดอุณหภูมิและความชื้น และอุปกรณ์กำหนดตำแหน่งบนพื้นโลก (GPS) 2. เครื่องมือวัดความเร็วลม โดยก่อนทำการบินวัดปริมาณฝุ่นละอองโดยอากาศยานไร้คนขับ ผู้วิจัยจะวัดความเร็วลมโดยความเร็วของลมขณะทำการวัดฝุ่นละอองต้องไม่เกิน 5 เมตรต่อวินาที หากความเร็วลมมากกว่า 5 เมตรต่อวินาที จะทำให้ค่าปริมาณฝุ่นละอองมีความคลาดเคลื่อน 3. เครื่องคอมพิวเตอร์ที่ใช้ในการประมวลผล

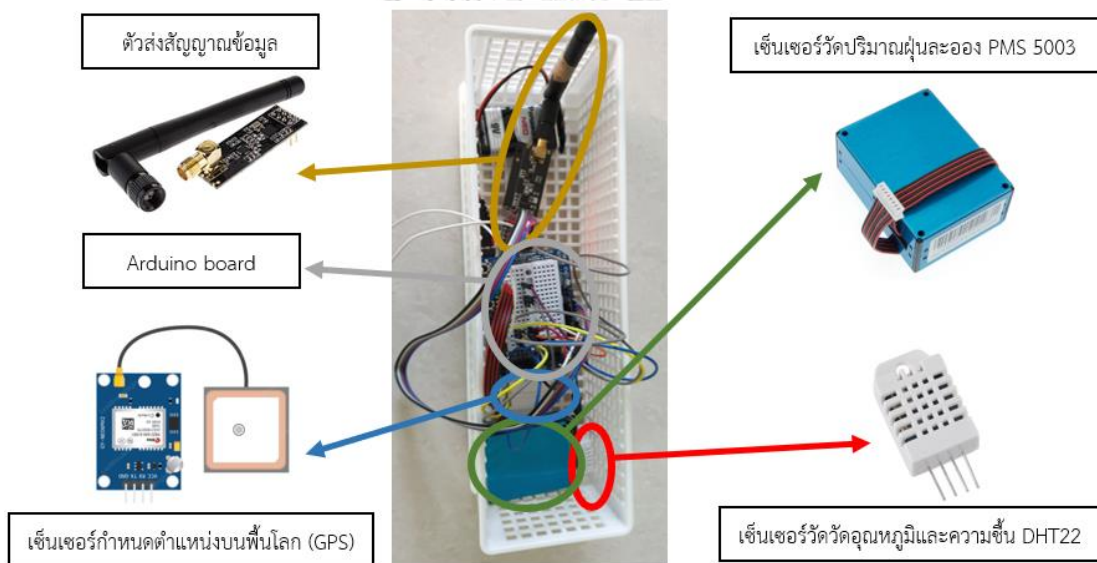


รูปที่ 4.1 รูปภาพแสดงโดรนที่ติดตั้งอุปกรณ์วัดปริมาณฝุ่นละออง อุปกรณ์วัดอุณหภูมิและความชื้น และอุปกรณ์กำหนดตำแหน่งบนพื้นโลก (GPS)

โดยในส่วนของโดรนจะทำการผูกตะกร้าไว้ ซึ่งในตะกร้าจะประกอบไปด้วยอุปกรณ์คือ เซ็นเซอร์วัดปริมาณฝุ่นละออง เซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิและความชื้น และเซ็นเซอร์กำหนดตำแหน่งบนพื้นโลก (GPS) โดยเซ็นเซอร์เหล่านี้จะใช้พลังงานจากถ่าน ซึ่งเซ็นเซอร์ทั้งหมดจะต่ออยู่กับบอร์ด Arduino โดยบอร์ด Arduino ใช้ติดต่อสื่อสารและควบคุมอุปกรณ์ไฟฟ้าด้วยการเขียนโปรแกรมให้กับ MCU โดยใช้โปรแกรม Arduino IDE เพื่อควบคุมการรับส่งสัญญาณทางไฟฟ้าตามเงื่อนไขต่างๆ และโมดูลสื่อสารไร้สาย (ตัวส่งสัญญาณข้อมูล) เพื่อใช้ในการส่งข้อมูลปริมาณฝุ่นละออง (PM2.5 และ PM10) อุณหภูมิและความชื้น และตำแหน่งที่ทำการวัดปริมาณฝุ่นละอองจากโดรนมายังเครื่องคอมพิวเตอร์ ซึ่งจะแสดงผลในรูปแบบไฟล์ Excel นำค่าปริมาณฝุ่นละอองที่วัดได้และค่าตำแหน่ง (พิกัด) มาทำการพล็อตกราฟการกระจายตัว (Model 3 มิติ) ในโปรแกรม Autodesk Revit (BIM) โดยใช้ส่วนเสริม (Add-Ins) ที่ชื่อว่า Dynamo หลังจากนั้นนำ Model 3 มิติ มาใส่ในโปรแกรม Unity 3D โดยจะทำงานร่วมกับโปรแกรม Vuforia ซึ่งสามารถส่งออกเป็นเว็บ HTML5 และแอปพลิเคชันบนระบบปฏิบัติการต่างๆ เช่น Windows, iOS และ Android แล้วนำไปติดตั้งในสมาร์ทโฟนได้ทันที เพื่อให้ผู้ใช้งานเกิดความสะดวกในการตรวจสอบปริมาณฝุ่นละอองที่กระจายอยู่บริเวณโดยรอบโครงการก่อสร้างอาคาร ซึ่งรายละเอียดอุปกรณ์ที่ใช้ในระบบวัดปริมาณฝุ่นละอองมีดังนี้



รูปที่ 4.2 รูปภาพแสดงผังการทำงานและอุปกรณ์ของระบบระบบวัดปริมาณฝุ่นละออง



รูปที่ 4.3 รูปภาพแสดงอุปกรณ์ในตะกร้าที่ถูกผูกไว้กับโดรน ซึ่งประกอบไปด้วย Arduino board ถ่าน เซ็นเซอร์วัดปริมาณฝุ่นละออง เซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิและความชื้น เซ็นเซอร์กำหนดตำแหน่งบนพื้นโลก (GPS) และตัวส่งสัญญาณข้อมูล

4.2.1 อากาศยานไร้คนขับ (Drone)

อากาศยานไร้คนขับที่นำมาใช้นั้น คืออากาศยานไร้คนขับ ยี่ห้อ DJI รุ่น Marvic Pro เครื่องยนต์ 4 ใบพัดน้ำหนัก 0.743 กิโลกรัม เนื่องจากอากาศยานไร้คนขับรุ่นนี้มีน้ำหนักเบา พกพาได้สะดวก มีความเหมาะสมสำหรับนำไปใช้ในการสำรวจภาคสนาม อากาศยานไร้คนขับรุ่นนี้ยังติดตั้ง

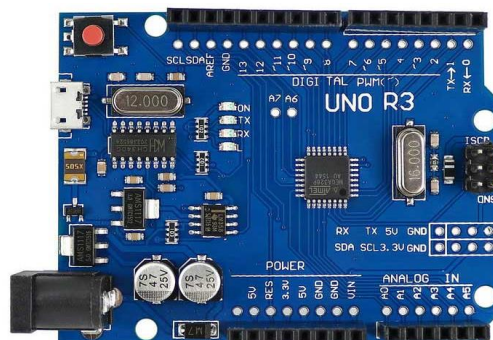
อุปกรณ์ถ่ายรูปแบบเคลื่อนไหวพร้อมอุปกรณ์ช่วยพยุงให้ตัวกล้องมีความเสถียร โดยมีเพดานบินสูงสุด 500 เมตร อุปกรณ์ควบคุมระยะไกลด้วยคลื่นความถี่ 2.4 GHz ถึง 2.43 GHz สามารถทำการบินต่อเที่ยวบินประมาณ 21 นาที (ด้วยข้อจำกัดด้านแบตเตอรี่) ผู้วิจัยได้ใช้โทรศัพท์ Samsung galaxy S9 ในการช่วยควบคุมการบินของอากาศยานไร้คนขับ เนื่องจากมีราคาประหยัด และมีความเสถียรของอุปกรณ์สูงเพื่อป้องกันอากาศยานไร้คนขับตก โดยมีซอฟต์แวร์สำหรับช่วยควบคุมการบินของอากาศยานไร้คนขับ คือซอฟต์แวร์ DJI Go 4 เนื่องจากใช้งานสะดวก มีฟังก์ชันควบคุมการบินของอากาศยานไร้คนขับสำหรับใช้เก็บภาพถ่ายทางอากาศที่เหมาะสม สามารถนำไปอ้างอิงตำแหน่งพิกัดได้



รูปที่ 4.4 รูปภาพแสดงอากาศยานไร้คนขับ (โดรน) ยี่ห้อ DJI รุ่น Mavic Pro ที่ใช้ในงานวิจัย

4.2.2 Arduino board

Arduino Board นั้นมีหลากหลายรุ่นโดยผู้วิจัยเลือกใช้รุ่น Arduino Uno มีขนาดประมาณ 68.6 x 53.4 mm. น้ำหนัก 25 กรัม ไมโครคอนโทรลเลอร์คือ ATmega 328 เนื่องจากเป็นบอร์ด Arduino ที่ได้รับความนิยม ราคาไม่แพง มีช่องสัญญาณที่สามารถเสียบได้ง่าย ส่วนใหญ่โปรเจกต์และ Library ต่างๆที่พัฒนาขึ้นมาจะอ้างอิงกับบอร์ดนี้เป็นหลัก นอกจากนั้นหากไมโครคอนโทรลเลอร์เกิดการเสียหาย ผู้ใช้งานสามารถซื้อมาเปลี่ยนเองได้ง่าย

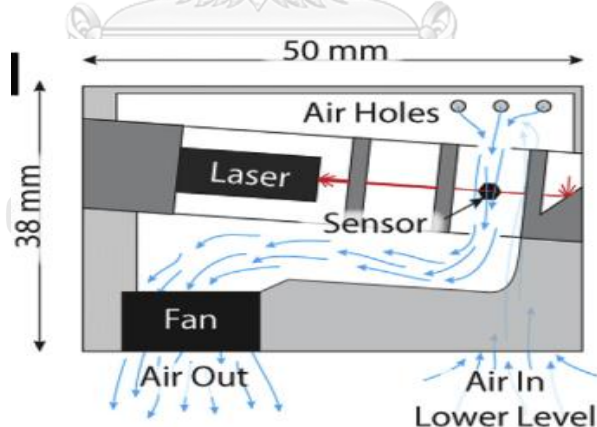


รูปที่ 4.5 รูปภาพแสดง Arduino Board รุ่น Uno ที่ใช้ในงานวิจัย

4.2.3 เซ็นเซอร์วัดปริมาณฝุ่นละออง

เซ็นเซอร์วัดฝุ่นละอองนั้นใช้อุปกรณ์ของ Digital universal particle concentration sensor (PMS 5003) เนื่องจากมีราคาถูก สามารถวัดขนาดของอนุภาคฝุ่นละอองได้ถึง 3 ขนาด คือ PM1 PM2.5 PM10 แสดงข้อมูลตามเวลาจริง (Real time) และมีการป้องกันการรบกวนการทำงาน จากสถานะแวดล้อมภายนอก โดย PMS 5003 ใช้เพื่อบันทึกจำนวนอนุภาคแขวนลอยในอากาศ เช่น ความเข้มข้นของอนุภาคฝุ่นละออง และส่งออกในรูปแบบของอินเทอร์เน็ตเฟดดิวิตอล เซ็นเซอร์นี้สามารถใช้ร่วมกับเครื่องมือต่างๆที่เกี่ยวข้องกับความเข้มข้นของอนุภาคแขวนลอยในอากาศ หรืออุปกรณ์ปรับปรุงสภาพแวดล้อมอื่นๆ เพื่อให้ข้อมูลสภาพอากาศที่ถูกต้องแม่นยำมากขึ้น

เซ็นเซอร์วัดฝุ่นละออง PMS 5003 นั้นวัดการกระเจิงแสงที่มุม 90 องศาด้วยเครื่องตรวจจับโฟโตไดโอดที่แปลงแสงที่กระจัดกระจายเป็นพัลส์แรงดันไฟฟ้า โดยแหล่งกำเนิดแสงของ PMS 5003 เป็นเลเซอร์ที่ทำงานที่ความยาวคลื่น 680 ± 10 นาโนเมตร เซ็นเซอร์ถูกแบ่งออกเป็นสองชั้น อากาศจะเข้าสู่เครื่องวัดที่ระดับต่ำกว่าและจะเดินทางผ่านระยะเลเซอร์และไหลออกมาผ่านรูในระดับเลเซอร์ จากนั้นอากาศจะเข้าสู่เส้นทางของเลเซอร์และแสงกระจัดกระจายจะถูกใช้เพื่อประเมินความเข้มข้นของฝุ่นละออง (PM) ซึ่งมีพีดลขนาดเล็กทำหน้าที่ดึงอากาศผ่านอุปกรณ์



รูปที่ 4.6 รูปภาพแสดงหลักการทำงานของเครื่องวัดฝุ่นละออง PMS 5003 ที่มา: (Sayahi, Butterfield et al., 2019)

จำนวนอนุภาคคำนวณโดยการนับพัลส์จากสัญญาณกระเจิง ซึ่งผู้ผลิตใช้อัลกอริทึมที่เป็นกรรมสิทธิ์เพื่อแปลงจำนวนพัลส์เป็นความเข้มข้นของฝุ่นละออง (PM) ภายในเครื่อง PMS 5003 ยังมีพีดลดูดอากาศผ่านเลเซอร์ที่อัตราการไหลประมาณ 0.1 L/นาที ซึ่ง PMS 5003 มีเวลาตอบสนองน้อยกว่า 10 วินาที ซึ่งแสดงว่าเซ็นเซอร์มีข้อจำกัดในสภาพแวดล้อมที่เปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว โดย

ช่วงการตรวจจับฝุ่นละอองที่มีประสิทธิภาพคือ 0-500 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ สำหรับช่วงความเข้มข้น 0-100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ และ 100-500 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ มีความไม่แน่นอนอยู่ที่ $\pm 10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ และ $\pm 10\%$ ตามลำดับ โดยมี อุณหภูมิในการทำงานอยู่ในช่วง -10 ถึง +60 องศาเซลเซียส (Sayahi, Butterfield et al., 2019)

Technical Index

Parameter	Index	unit
Range of measurement	0.3~1.0; 1.0~2.5; 2.5~10	Micrometer ($\mu\text{ m}$)
Counting Efficiency	50%@0.3 $\mu\text{ m}$ 98%@ $\geq 0.5\mu\text{ m}$	
Effective Range (PM2.5 standard)	0~500	$\mu\text{ g}/\text{m}^3$
Maximum Range (PM2.5 standard) *	≥ 1000	$\mu\text{ g}/\text{m}^3$
Resolution	1	$\mu\text{ g}/\text{m}^3$
Maximum Consistency Error (PM2.5 standard data)*	$\pm 10\%$ @100~500 $\mu\text{ g}/\text{m}^3$ $\pm 10\mu\text{ g}/\text{m}^3$ @0~100 $\mu\text{ g}/\text{m}^3$	
Standard Volume	0.1	Litre (L)
Single Response Time	<1	Second (s)
Total Response Time	≤ 10	Second (s)
DC Power Supply	Typ:5.0 Min:4.5 Max: 5.5	Volt (V)
Active Current	≤ 100	Milliamperere (mA)
Standby Current	≤ 200	Microampere ($\mu\text{ A}$)
Interface Level	L <0.8 @3.3 H >2.7@3.3	Volt (V)
Working Temperature Range	-10~+60	$^{\circ}\text{C}$
Working Humidity Range	0~99%	
Storage Temperature Range	-40~+80	$^{\circ}\text{C}$
MTTF	≥ 3	Year (Y)
Physical Size	50×38×21	Millimeter (mm)

ตารางที่ 4.1 ตารางแสดงคุณสมบัติของเครื่องวัดฝุ่นละออง PMS 5003 ที่มา: (Zhou Yong, 2016)

ผลลัพธ์ที่ได้จากเซ็นเซอร์วัดฝุ่นละออง PMS 5003 คือจำนวนของแต่ละอนุภาคฝุ่นละอองที่มีขนาดแตกต่างกันต่อหน่วยปริมาตร (PM1 PM2.5 PM10) โดยปริมาตรหน่วยของจำนวนอนุภาคคือ 0.1L และหน่วยของความเข้มข้นของมวลคือ $\mu\text{g}/\text{m}^3$

4.2.4 เซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิและความชื้น

เซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิและความชื้นนั้นใช้ DHT22 เนื่องจากเป็นเซ็นเซอร์สำหรับวัดอุณหภูมิและความชื้นที่มีความแม่นยำสูงในการวัด สามารถวัดอุณหภูมิได้ตั้งแต่ -40 องศาเซลเซียส ถึง +80 องศาเซลเซียส โดยมีความคลาดเคลื่อนอยู่ที่ 0.5 องศาเซลเซียส และวัดความชื้นสัมพัทธ์ได้ตั้งแต่ 0-100 %RH โดยมีความคลาดเคลื่อนอยู่ที่ 2-5 %RH เป็นเซ็นเซอร์ราคาไม่แพง น้ำหนักเบา เหมาะกับการติดบนอากาศยานไร้คนขับเพื่อวัดความชื้นและอุณหภูมิ

4.2.5 เซ็นเซอร์กำหนดตำแหน่งบนพื้นโลก (GPS)

เซ็นเซอร์กำหนดตำแหน่งบนพื้นโลก (GPS) นั้นใช้ GPS Module GY-NEO6MV2 เนื่องจากใช้พลังงานต่ำโดยใช้กระแสไฟเพียง 45 mA. (เหมาะสำหรับอุปกรณ์ที่ใช้แบตเตอรี่) ราคาไม่แพง ง่ายต่อการเชื่อมต่อ ซึ่งข้อมูลที่ได้รับจะแสดงในรูปอินเทอร์เฟซแบบอนุกรมเป็นประโยค National Marine Electronics Association หรือ NMEA โดย NMEA คือรูปแบบข้อความมาตรฐานสำหรับเครื่องรับ GPS เกือบทั้งหมด

NMEA ถูกจัดรูปแบบเป็นบรรทัดข้อมูลที่เรียกว่าประโยค แต่ละประโยคจะคั่นด้วยจุลภาค เพื่อให้ง่ายต่อการแยกวิเคราะห์โดยคอมพิวเตอร์และไม่โครคอนโทรลเลอร์ ประโยค NMEA เหล่านี้ถูกส่งออกในช่วงเวลาที่เรียกว่าอัตราการอัปเดต โมดูล GPS NEO-6M จะอัปเดตข้อมูลหนึ่งครั้งต่อวินาที (ความถี่ 1Hz) โดยข้อมูลที่ได้จากเซ็นเซอร์ที่ผู้วิจัยนำมาใช้จะแสดงในรูปละติจูด ลองจิจูด เช่น 13.74448, 100.58209

4.2.6 ตัวรับและตัวส่งสัญญาณข้อมูล

ตัวรับและตัวส่งสัญญาณข้อมูลนั้นใช้อุปกรณ์โมดูลสื่อสารไร้สายรุ่น NRF24L01 เนื่องจากสามารถเขียนโปรแกรมให้เป็นที่ตั้งตัวรับและตัวส่งสัญญาณ สามารถใช้กับ Arduino ได้หลายๆตัวพร้อมกัน มีความเร็ว 2.4 G จึงสื่อสารได้รวดเร็วและไม่จำเป็นต้องใช้เสาอากาศที่ยาว มีขนาดเล็กสะดวกในการต่อใช้งาน สามารถประยุกต์ใช้งานได้หลายรูปแบบเช่น ใช้เป็นอุปกรณ์ส่งข้อมูลของเซ็นเซอร์อัตโนมัติสำหรับควบคุม อุณหภูมิ ความชื้น การแจ้งเตือนต่างๆ โดยสามารถส่งสัญญาณได้ใน

ระยะไม่เกิน 500 เมตร นอกจากนั้นโมดูลสื่อสารไร้สายรุ่นนี้ยังทำงานด้วยความเร็วสูงและใช้พลังงานในการประมวลผลต่ำ

4.2.7 เครื่องมือวัดความเร็วลม

เครื่องมือวัดความเร็วลมนั้นใช้อุปกรณ์คือ เครื่องวัดความเร็วลม และอุณหภูมิ (AS816) เนื่องจากอุปกรณ์มีความคงทน ระบบมีความเสถียรมาก มีความแม่นยำสูงในการวัดความเร็วลม ถูกออกแบบให้มีขนาดกะทัดรัด สามารถวัดอุณหภูมิได้ทั้งองศาฟาเรนไฮต์ (32-122 °F) และ องศาเซลเซียส (0-50 °C) และสามารถวัดความเร็วลมได้หลายหน่วยคือ เมตรต่อวินาที (0 - 30 m/s) กิโลเมตรต่อชั่วโมง (0 - 108 km/h) และไมล์ต่อชั่วโมง (0 - 67 mph) โดยมีความคลาดเคลื่อนอยู่ที่ $\pm 5\%$



รูปที่ 4.7 รูปภาพแสดงเครื่องมือวัดความเร็วลม และอุณหภูมิ (AS816)

4.2.8 เครื่องคอมพิวเตอร์ที่ใช้ในการประมวลผล

เครื่องคอมพิวเตอร์ที่ใช้ในการประมวลผล ประกอบไปด้วยอุปกรณ์ คือตัวรับสัญญาณข้อมูล เพื่อใช้ในการรับข้อมูลปริมาณ ฝุ่นละออง อุณหภูมิและความชื้น และตำแหน่งที่ทำการวัดปริมาณฝุ่นละอองจากตัวส่งสัญญาณข้อมูลที่อยู่ในเต้าที่ห้อยไว้กับโดรน โดยผู้วิจัยใช้โปรแกรม Arduino IDE สำหรับควบคุมบอร์ด Arduino และเซ็นเซอร์ต่างๆ จากนั้นใช้โปรแกรม Microsoft Excel ในการแสดงข้อมูลและเก็บข้อมูลปริมาณฝุ่นละออง (PM2.5 และ PM10) อุณหภูมิและความชื้น และตำแหน่งที่ทำการวัดปริมาณฝุ่นละออง ดังรูปที่ 4.7 เพื่อง่ายต่อการเก็บข้อมูล วิเคราะห์ข้อมูลและนำไปใช้ในการพล็อตกราฟการกระจายตัว (Model 3 มิติ) ของฝุ่นละอองในโปรแกรม Autodesk

Revit ซึ่งจะทำให้การพล็อตกราฟการกระจายตัวแบบ Real time ทำให้เห็นการกระจายตัวของฝุ่นละอองทันที หลังจากนั้นนำ Model 3 มิติ มาใส่ในโปรแกรม Unity 3D โดยจะทำงานร่วมกับโปรแกรม Vuforia ในการสร้างเทคโนโลยีความจริงเสริม ซึ่งรายละเอียดของโปรแกรม (Software) ต่างๆจะกล่าวในหัวข้อต่อไป

1	A	ปริมาณฝุ่นละออง		D	E	ตำแหน่ง (Decimal Degrees)	
		PM2.5 (µg/m3)	PM10.0 (µg/m3)			ละติจูด	ลองจิจูด
2	เวลา (TIME)			ความชื้นสัมพัทธ์ (%)	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)		
3	12:03:07 PM	9	10	61	33	13.744389	100.58198
4	12:03:13 PM	10	11	61	33	13.744382	100.58195
5	12:03:15 PM	11	11	61	33	13.744382	100.58195
6	12:03:20 PM	10	11	61	33	13.74438	100.58193
7	12:03:25 PM	10	10	61	33	13.74438	100.58193
8	12:03:38 PM	7	7	62	33	13.74438	100.58193
9	12:03:44 PM	6	6	61	34	13.74438	100.58193
10	12:03:48 PM	6	6	63	34	13.74438	100.58193
11	12:03:50 PM	6	6	65	34	13.74438	100.58193
12	12:04:05 PM	10	10	64	35	13.74438	100.58193
13	12:04:11 PM	11	11	62	35	13.744487	100.58199
14	12:04:40 PM	12	14	54	37	13.74452	100.582
15	12:04:42 PM	15	15	54	36	13.74452	100.582

รูปที่ 4.8 รูปภาพแสดงข้อมูลเวลา ปริมาณฝุ่นละออง (PM2.5 และ PM10) อุณหภูมิและความชื้น และตำแหน่งที่ทำการวัดปริมาณฝุ่นละอองในโปรแกรม Microsoft Excel แบบ Real time

4.3 ซอฟต์แวร์ที่ใช้ในระบบวัดปริมาณฝุ่นละออง

4.3.1 Arduino IDE

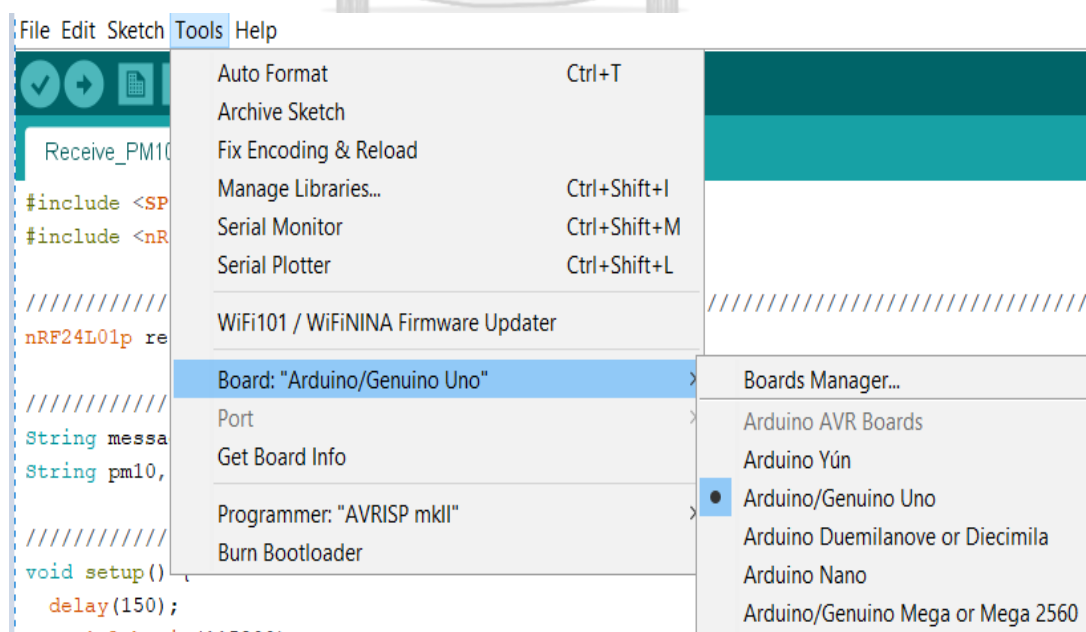
ในตระกูลที่ผูกติดอยู่กับโดรนนั้นจะประกอบไปด้วยอุปกรณ์คือ เซ็นเซอร์วัดปริมาณฝุ่นละออง เซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิและความชื้น และเซ็นเซอร์กำหนดตำแหน่งบนพื้นโลก (GPS) ซึ่งเซ็นเซอร์ทั้งหมดจะต่ออยู่กับบอร์ด Arduino โดยบอร์ด Arduino ใช้ติดต่อสื่อสารและควบคุมอุปกรณ์ไฟฟ้าด้วยการเขียนโปรแกรมให้กับ MCU โดยใช้โปรแกรม Arduino IDE เพื่อควบคุมการรับส่งสัญญาณทางไฟฟ้าตามเงื่อนไขต่างๆ และโมดูลสื่อสารไร้สาย (ตัวส่งสัญญาณข้อมูล) เพื่อใช้ในการส่งข้อมูลปริมาณฝุ่นละออง (PM2.5 และ PM10) อุณหภูมิและความชื้น และตำแหน่งที่ทำการวัดปริมาณฝุ่นละอองจากโดรนมายังโมดูลสื่อสารไร้สาย (ตัวรับสัญญาณข้อมูล) ซึ่งต่ออยู่กับเครื่องคอมพิวเตอร์ ซึ่งจะแสดงผลในรูปแบบไฟล์ Excel เพื่อนำไปพล็อตกราฟการกระจายตัว (Model 3 มิติ) ต่อไป

โปรแกรม Arduino IDE เป็นซอฟต์แวร์เครื่องมือสำหรับพัฒนาโปรแกรมด้วยภาษา C หรือ C++ สำหรับควบคุมบอร์ด Arduino และเครื่องมือต่างๆ ซึ่งใช้ในการพัฒนาโปรแกรมบนแพลตฟอร์ม Arduino และอัปโหลดโปรแกรมที่พัฒนาสำเร็จแล้วลงบนตัวบอร์ด โดย IDE (Integrated

Development Environment) คือ ส่วนเสริมของระบบการพัฒนาหรือตัวช่วยต่างๆที่จะคอยช่วยเหลือ Developer หรือช่วยเหลือคนที่พัฒนา Application เพื่อเสริมให้เกิดความรวดเร็ว ถูกต้อง แม่นยำ ตรวจสอบระบบที่จัดทำได้ ทำให้การพัฒนางานต่างๆรวดเร็วมากขึ้น นอกจากนี้ Arduino IDE ยังมีสิ่งอำนวยความสะดวกต่างๆเช่น RUN, Compile, DEBUG ซึ่งมี GUI ที่ถูกออกแบบมาให้มีสถานะแวดล้อมเหมาะสมกับการพัฒนาโปรแกรม โดยหน้าที่หลักของ IDE คือการเขียนไฟล์ เปิดไฟล์ บันทึกไฟล์ ทดสอบการทำงาน และจัดเตรียมข้อมูล

โครงสร้างพื้นฐานของภาษา C ที่ใช้กับ Arduino นั้นจะประกอบไปด้วย 3 ส่วนใหญ่ๆด้วยกัน คือ 1. Header จะกำหนดไว้ในส่วนเริ่มต้นของโปรแกรม ซึ่งส่วนของ Header ได้แก่ ส่วนที่เป็น Compiler Directive ต่างๆ รวมไปถึงส่วนของการประกาศตัวแปร และค่าคงที่ต่างๆที่จะใช้ในโปรแกรม 2. setup() ใช้สำหรับบรรจุคำสั่งในส่วนที่ต้องการให้โปรแกรมทำงานเพียงรอบเดียวตอนเริ่มต้นทำงานของโปรแกรมครั้งแรกเท่านั้น ซึ่งได้แก่คำสั่งเกี่ยวกับการ Setup ค่าการทำงานต่างๆ เช่น การกำหนดหน้าที่การใช้งานของ PinMode และการกำหนดค่า Baudrate เป็นต้น 3. loop() ใช้บรรจุคำสั่งที่ต้องการให้โปรแกรมทำงานเป็นวงรอบซ้ำๆกันไปไม่รู้จบ

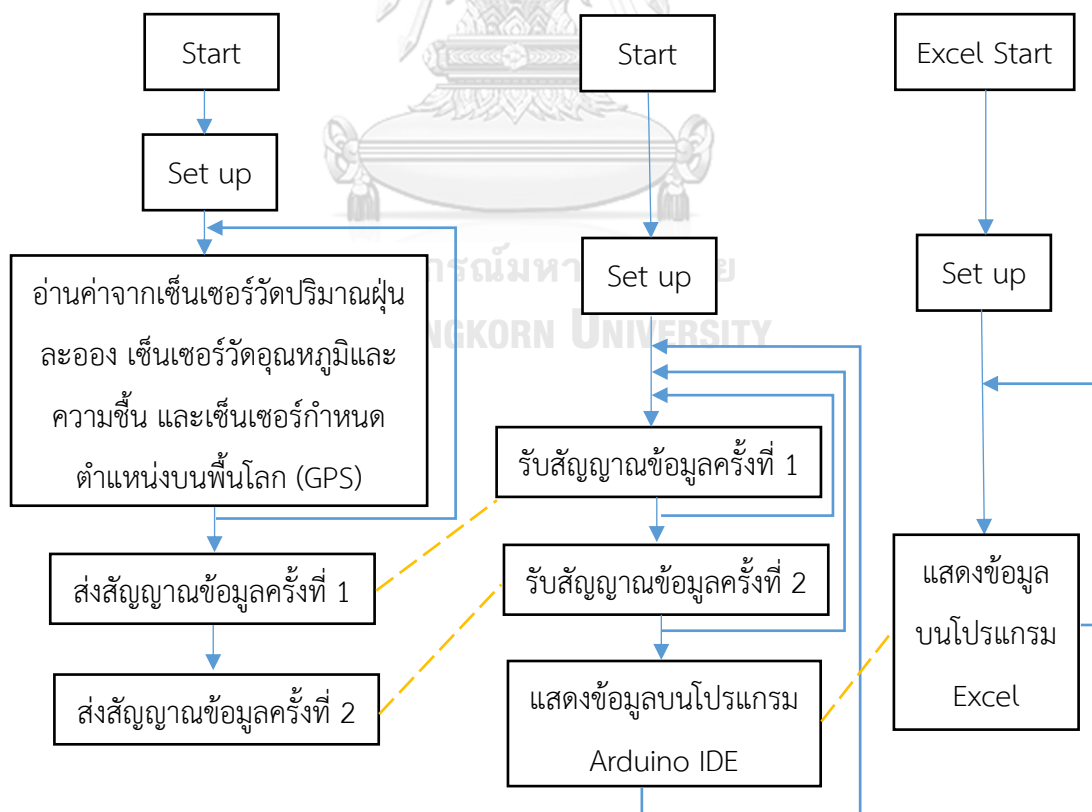
ไลบรารี (Libraries) คือ คือชุดของโค้ดโปรแกรมที่มีคนอื่นเขียนไว้แล้ว เช่น สำหรับการใช้งานเซ็นเซอร์ต่างๆ, การใช้งานหน้าจอ LCD, GPS โมดูล และส่วนขยายต่างๆ โดยที่เราไม่ต้องมาเขียนขึ้นใหม่ เราแค่ทำการเพิ่มไลบรารีใน Arduino IDE ก็สามารถนำมาใช้งานได้ทันที



รูปที่ 4.9 รูปภาพแสดงการเลือกรุ่นบอร์ด Arduino ที่ใช้ หลังจากที่เราเขียนโค้ดโปรแกรมเรียบร้อยแล้ว

รูปแบบการเขียนโปรแกรมบน Arduino มีดังนี้ 1. เขียนโปรแกรมบนคอมพิวเตอร์ผ่านทางโปรแกรม Arduino IDE 2. หลังจากที่เขียนโค้ดโปรแกรมเรียบร้อยแล้ว ให้ผู้ใช้งานเลือกรุ่นบอร์ด Arduino ที่ใช้ ดังรูปที่ 4.9 และหมายเลข Com port 3. กดปุ่ม Verify เพื่อตรวจสอบความถูกต้องและ Compile โค้ดโปรแกรม จากนั้นกดปุ่ม Upload โค้ด โปรแกรมไปยังบอร์ด Arduino ผ่านทางสาย USB เมื่ออัปโหลดเรียบร้อยแล้ว จะแสดงข้อความแถบข้างล่าง “Done uploading” และบอร์ดจะเริ่มทำงานตามที่เขียนโปรแกรมไว้ได้ทันที

ในระบบวัดปริมาณฝุ่นละอองในโครงการก่อสร้างอาคารนั้นจะทำการเขียนโค้ดในโปรแกรม Arduino IDE โดยจะมีทั้งหมด 2 ไฟล์คือ 1. ไฟล์ที่ทำการอ่านค่าจากเซ็นเซอร์วัดปริมาณฝุ่นละออง เซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิและความชื้น และเซ็นเซอร์กำหนดตำแหน่งบนพื้นโลก (GPS) และทำการส่งสัญญาณข้อมูลผ่านโมดูลสื่อสารไร้สายซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวส่งสัญญาณ 2. ไฟล์ที่รับข้อมูลจากโมดูลสื่อสารไร้สายซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวส่งสัญญาณ โดยรับข้อมูลผ่านโมดูลสื่อสารไร้สายอีกตัวหนึ่งซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวรับสัญญาณ หลังจากนั้นนำข้อมูลทั้งหมดไปแสดงผลในรูปแบบไฟล์ Excel ซึ่งมีผังการทำงาน (Flow Chart) ของโปรแกรมหาดังรูปที่ 4.10



รูปที่ 4.10 รูปภาพแสดงผังการทำงานระบบวัดปริมาณฝุ่นละอองในโครงการก่อสร้างอาคาร

ซึ่งตัวอย่างโค้ดจากไฟล์ที่ทำการอ่านค่าจากเซ็นเซอร์ต่างๆ และทำการส่งสัญญาณข้อมูลผ่านโมดูลสื่อสารไร้สายมีดังนี้ 1. การประกาศตัวแปร และ ไลบรารี (Libraries)

```
#include <SoftwareSerial.h>

#include <SPI.h>

#include <nRF24L01p.h>

#include "DHT.h"

#include <TinyGPS++.h> DHT dht;

SoftwareSerial pmsSerial(2, 3);

SoftwareSerial gpsSerial(9, 10); // RX, TX cross

TinyGPSPlus gps;

nRF24L01p transmitter(7, 8); //CSN,CE

String message;
```

2. การ Setup ค่าการทำงานต่างๆ

```
void setup() {

  //temperature & humidity

  dht.setup(3); // data pin 3

  // our debugging output (arduino)

  Serial.begin(115200);

  // เซ็นเซอร์วัดปริมาณฝุ่นละออง

  SPI.begin();

  SPI.setBitOrder(MSBFIRST);
```

```

transmitter.channel(90); // ตั้งช่องความถี่ให้ตรงกัน (ตัวรับและตัวส่งสัญญาณข้อมูล)

transmitter.TXaddress("ALL"); // ตั้งชื่อตำแหน่งให้ตรงกัน

transmitter.init();

Serial.println("READY! for send");

}

```

3. อ่านค่าจากเซ็นเซอร์วัดปริมาณฝุ่นละออง เซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิและความชื้น และเซ็นเซอร์กำหนดตำแหน่งบนพื้นโลก (GPS)

```

void loop() {

//เริ่มอ่านค่าปริมาณฝุ่นละออง

pmsSerial.begin(9600);

if (readPMSdata(&pmsSerial)) {

//เริ่มอ่านค่า temperature & humandity

delay(dht.getMinimumSamplingPeriod());

float humidity = dht.getHumidity();

float temperature = dht.getTemperature();

//เริ่มเก็บค่า ปริมาณฝุ่นละออง , temperature & humandity

message += "/";

message += data.pm10_env;

message += "/";

message += data.pm25_env;

message += "/";

```

```
message += data.pm100_env;

message += "/";

message += humidity;

message += "/";

message += temperature;

message += "/";

pmsSerial.end();

//เริ่มอ่านค่าจากเซ็นเซอร์กำหนดตำแหน่งบนพื้นโลก (GPS)

gpsSerial.begin(9600);

float lat1 = 9999.999999;

float lng1 = 9999.999999;

float alt1 = 9999.999999;

while(lat1 == 9999.999999 || lng1 == 9999.999999 || alt1 == 9999.999999){

    while (gpsSerial.available() > 0)

        if (gps.encode(gpsSerial.read())){

            lat1 = gps.location.lat();

            lng1 = gps.location.lng();

            alt1 = gps.altitude.meters();

        }

    delay(100);

}
```

```

message += String(lat1,6);

message += "/";

message += String(lng1,6);

message += "/";

message += String(alt1,6);

message += "/";

gpsSerial.end();

//END GPS

```

4. การส่งส่งสัญญาณข้อมูลผ่านโมดูลสื่อสารไร้สายซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวส่งสัญญาณ

```

int len1 = message.length();

String message1 = message.substring(0, 25);

String message2 = message.substring(25, len1);

transmitter.txPL(message1); // ค่าที่ต้องการส่ง1

transmitter.send(FAST); // สั่งให้ส่งออกไป1

transmitter.txPL(message2); // ค่าที่ต้องการส่ง2

transmitter.send(FAST); // สั่งให้ส่งออกไป2

message="";

delay(300); } else{

//Serial.println("No data");

}

}

```


ตัวอย่างโค้ดจากไฟล์ที่ทำการรับข้อมูลผ่านโมดูลสื่อสารไร้สายอีกตัวหนึ่งซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวรับสัญญาณมีดังนี้ 1. การประกาศตัวแปร และ ไลบรารี (Libraries)

```
#include <SPI.h>

#include <nRF24L01p.h>

nRF24L01p receiver(7, 8); //CSN,CE

String message;

String message1;

String message2;

String pm10, pm25, pm100;

String hh, tt;

String lat2, lng2, alt2;

int count = 0;

unsigned long starttime = 0;

String yesno;
```

2. การ Setup ค่าการทำงานต่างๆ

```
void setup() {

  delay(150);

  // our debugging output (arduino)

  Serial.begin(115200);

  // เซ็นเซอร์วัดปริมาณฝุ่นละออง

  SPI.begin();
```

```

SPI.setBitOrder(MSBFIRST);

receiver.channel(90); // ตั้งช่องความถี่ให้ตรงกัน (ตัวรับตัวส่งสัญญาณข้อมูล)

receiver.RXaddress("ALL");

receiver.init();

// การส่งข้อมูลไปยังไฟล์ Excel

Serial.println("CLEARDATA");

Serial.println("LABEL,TIME,PM1.0,PM2.5,PM10.0,hum,temp,lat,lng,alt");

}

```

3. การรับสัญญาณข้อมูลจากโมดูลสื่อสารไร้สาย และแสดงข้อมูลผ่านโปรแกรม Microsoft Excel

```

void loop() {

  yesno = "no"; //เอาไว้เช็คว่ารับค่าถูกไหม

  message = "";

  message1 = "";

  message2 = "";

  //เริ่มอ่านค่าที่ส่งมาจากโมดูลสื่อสารไร้สาย (ตัวส่งสัญญาณข้อมูล)

  if (receiver.available()) {

    receiver.read();

    receiver.rxPL(message1); //ได้ค่าที่ 1

    starttime = millis();

```

```
while(millis() - starttime < 200){

    if (receiver.available()) {

        receiver.read();

        receiver.rxPL(message2); //ได้ค่าที่ 2

    }

}

if(message2 != ""){

    yesno = "yes"; // เอามาค่ามาใช้

}else{

    while(millis() - starttime < 200);

}

}

//ใช้คว่าอ่านค่าจากตัวส่งสัญญาณข้อมูลครบทั้งสองรอบไหม ถ้าครบทำต่อได้

if (yesno == "yes") {

    message = message1 + message2;

    //แปลงค่าจากตัวส่งสัญญาณข้อมูลก่อนนำไปใช้

    int f1, f2, f3, f4, f5, f6, f7, f8, f9; //f=j

    int j = 0; //เท่ากับจำนวน "/" ในตัวส่ง

    int i = 0;

    int k = 0;
```

```
//หาตำแหน่ง "/"  
  
while (j < 9 && i != -1) {  
  
    i = message.indexOf("/", k);  
  
    k = i + 1;  
  
    if (j == 0) {  
  
        f1 = i; }  
  
    if (j == 1) {  
  
        f2 = i; }  
  
    if (j == 2) {  
  
        f3 = i; }  
  
    if (j == 3) {  
  
        f4 = i; }  
  
    if (j == 4) {  
  
        f5 = i; }  
  
    if (j == 5) {  
  
        f6 = i; }  
  
    if (j == 6) {  
  
        f7 = i; }  
  
    if (j == 7) {  
  
        f8 = i; }  
  
    if (j == 8) {
```

```
f9 = i; }

j++;

}

//แยกข้อมูลตามตำแหน่งของ "/"

pm10 = message.substring(f1 + 1, f2);

pm25 = message.substring(f2 + 1, f3);

pm100 = message.substring(f3 + 1, f4);

hh = message.substring(f4 + 1, f5);

tt = message.substring(f5 + 1, f6);

lat2 = message.substring(f6 + 1, f7);

lng2 = message.substring(f7 + 1, f8);

alt2 = message.substring(f8 + 1, f9);

//debug (display) ตัวแปรออกมา (ทางโปรแกรม excel จะเอาค่าจาก Arduino IDE ไปแสดง
เอง)

if(hh != "NAN" && tt != "NAN"){

    Serial.print("DATA,TIME,");

    Serial.print(pm10);

    Serial.print(",");

    Serial.print(pm25);

    Serial.print(",");

    Serial.print(pm100);
```

```

Serial.print(",");

Serial.print(hh);

Serial.print(",");

Serial.print(tt);

Serial.print(",");

Serial.print(lat2);

Serial.print(",");

Serial.print(lng2);

Serial.print(",");

Serial.println(alt2);

}

}

delay(200);

}

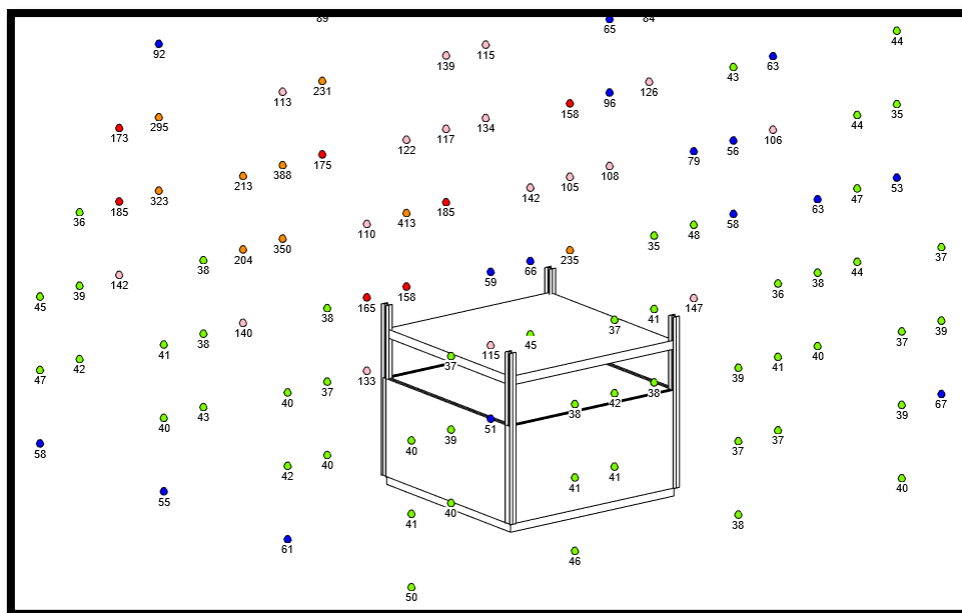
```

ข้อมูลเวลา ปริมาณฝุ่นละออง (PM2.5 และ PM10) อุณหภูมิและความชื้นและตำแหน่งที่ทำ การวัดปริมาณฝุ่นละอองจะแสดงในโปรแกรม Microsoft Excel แบบ Real time ดังรูปที่ 4.8

4.3.2 Autodesk Revit และ Dynamo

พล็อตกราฟการกระจายตัว (Model 3 มิติ) ของปริมาณฝุ่นละอองที่เกิดจากการก่อสร้าง อาคารในรูปแบบ 3 มิติ เพื่อวิเคราะห์การกระจายตัวของฝุ่นละอองไปยังบริเวณชุมชนโดยรอบ โดยนำ ค่าปริมาณฝุ่นละอองที่วัดได้ (PM2.5 หรือ PM10) และค่าตำแหน่ง (พิกัด) จากโปรแกรม Microsoft Excel มาทำการพล็อตกราฟการกระจายตัว ในโปรแกรม Autodesk Revit (BIM) โดยใช้ส่วนเสริม (Add-Ins) ที่ชื่อว่า Dynamo ซึ่งจะทำการพล็อตเป็นจุดพร้อมกับแสดงค่า PM2.5 หรือ PM10 ซึ่งจะ

แสดงจุดเป็นสีตามปริมาณค่าฝุ่นละออง โดยสีเป็นสัญลักษณ์เปรียบเทียบระดับของผลกระทบต่อสุขภาพอนามัย



รูปที่ 4.11 รูปภาพแสดงตัวอย่างการพล็อตการกระจายตัวของฝุ่นละออง (Model 3 มิติ) ในโปรแกรม Autodesk Revit

ในการพล็อตกราฟนั้นจะทำการพล็อตในโปรแกรม Autodesk Revit เนื่องจาก Autodesk Revit นั้นเป็นเป็นที่รู้จักมากที่สุดสำหรับโปรแกรมที่ใช้ในงานด้าน Building Information Modeling (BIM) โดย BIM จะเป็นการใช้ระบบคอมพิวเตอร์มาควบคุมกระบวนการต่างๆ ซึ่งโปรแกรมสามารถสร้างแบบจำลองเสมือนของอาคาร 3 มิติที่แม่นยำ นอกจากนั้น BIM ยังสามารถนำไปใช้ในทางด้านวิศวกรรมโยธาอีกมากมาย เช่น การออกแบบ การเขียนแบบ การประมาณราคา การจัดซื้อ รวมไปถึงการวางแผนงานต่างๆของอาคาร ผู้วิจัยจึงเลือกทำการพล็อตกราฟใน Autodesk Revit เนื่องจากเป็นแบบจำลอง 3 มิติ ทำให้เห็นการกระจายตัวของฝุ่นละอองเนื่องจากกิจกรรมการก่อสร้างอาคาร นอกจากนั้นยังเป็นการประยุกต์ใช้ BIM ในงานด้านการจัดการสิ่งแวดล้อมอีกด้วย

การพล็อตกราฟแบบ Real time ในโปรแกรม Autodesk Revit นั้นจะใช้ค่าที่ได้จากไฟล์ Microsoft Excel คือปริมาณฝุ่นละออง (PM2.5 หรือ PM10) และค่าพิกัดละติจูด ลองจิจูดที่ได้จากเซ็นเซอร์กำหนดตำแหน่งบนพื้นโลก (GPS) โดยต้องทำการแปลงค่าละติจูด ลองจิจูดเป็นค่าพิกัด X Y (ระบบ UTM) และค่าพิกัด Z (ความสูงในการวัดฝุ่นละออง) ซึ่งได้มาจากเซ็นเซอร์กำหนดตำแหน่งบนพื้นโลก (GPS) หรือข้อมูลจากรีโมทบังคับของอากาศยานไร้คนขับขณะทำการบินวัดปริมาณฝุ่นละออง

ดังรูปที่ 4.12 ซึ่งในการพล็อตจุดเป็นสีต่างๆตามปริมาณค่าฝุ่นละอองในโปรแกรม Autodesk Revit นั้นต้องใช้ส่วนเสริม (Add-Ins) ที่ชื่อว่า Dynamo

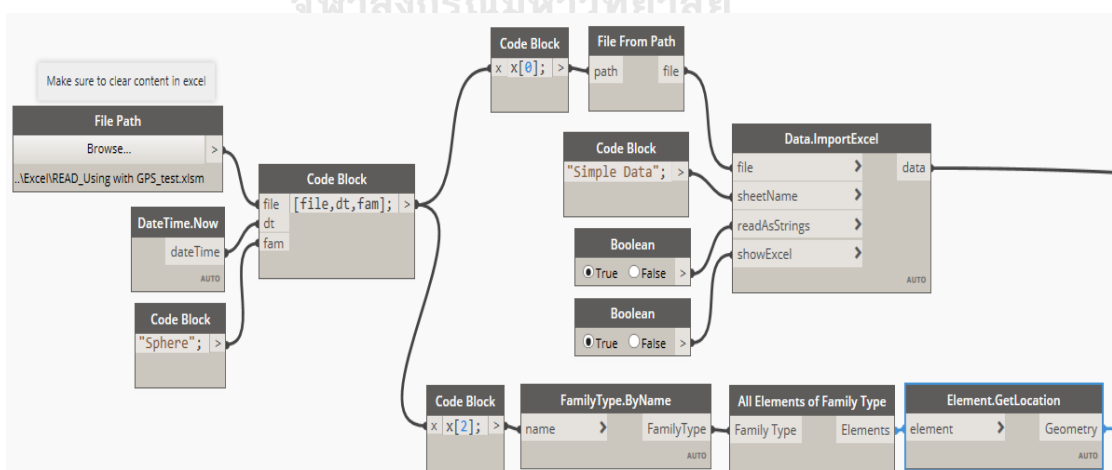
	A	B	C	D	E	F	G	H	I
1	TIME	PM1.0	PM2.5	PM10.0	ความชื้น	อุณหภูมิ	ละติจูด	ลองจิจูด	ความสูง
18	12:04:56 PM	10	13	13	56	35	13.744527	100.58199	4
19	12:04:57 PM	11	14	14	57	35	13.744512	100.58201	4
20	12:04:59 PM	10	13	13	57	35	13.744512	100.58201	4
21	12:05:02 PM	9	11	11	56	35	13.744512	100.58201	4
22	12:05:07 PM	8	11	11	57	35	13.744512	100.58201	4
23	12:05:12 PM	8	11	11	56	35	13.74448	100.58202	4
24	12:05:16 PM	7	10	10	56	35	13.74448	100.58202	4
25	12:05:18 PM	6	8	8	56	35	13.74448	100.58202	4
26	12:05:21 PM	6	8	8	56	35	13.744492	100.58206	4
27	12:05:23 PM	6	8	8	56	35	13.744492	100.58206	4
28	12:05:26 PM	5	7	7	56	35	13.744492	100.58206	4
29	12:05:29 PM	6	6	7	56	35	13.744492	100.58206	4
30	12:05:59 PM	8	9	9	57	35	13.744413	100.58202	4
31	12:06:04 PM	7	8	8	57	35	13.744413	100.58202	4
32	12:06:12 PM	7	8	8	55	35	13.74441	100.58205	4
33	12:06:16 PM	6	8	8	55	35	13.74442	100.58207	4
34	12:06:18 PM	6	7	7	55	35	13.74442	100.58207	4
35	12:06:22 PM	5	8	8	56	35	13.74442	100.58207	4
36	12:06:24 PM	5	7	7	55	35	13.74442	100.58207	4
37	12:06:26 PM	5	7	7	55	35	13.74442	100.58207	4
38	12:06:30 PM	4	7	7	55	35	13.74442	100.58207	4

รูปที่ 4.12 รูปภาพแสดงข้อมูลปริมาณฝุ่นละออง (PM2.5 และ PM10) และตำแหน่งที่ทำกราวด์ ปริมาณฝุ่นละอองในโปรแกรม Microsoft Excel เพื่อนำไปพล็อตกราฟการกระจายตัวของฝุ่นละออง ในโปรแกรม Autodesk Revit โดยใช้ส่วนเสริม (Add-Ins) ที่ชื่อว่า Dynamo

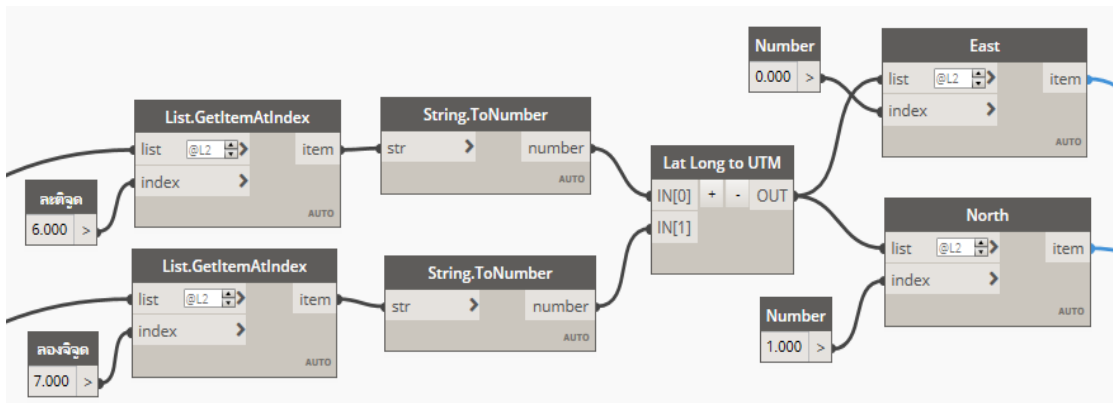
โดย Dynamo คือแพลตฟอร์มการเขียนโปรแกรมเชิงภาพ (Visual Programming) พัฒนาโดยบริษัท Autodesk inc. เพื่อใช้กับโปรแกรม Autodesk Revit เป็นโปรแกรมที่ทำให้ผู้ที่ไม่ได้มีพื้นฐานด้านการเขียนโปรแกรมคอมพิวเตอร์ สามารถทำการเขียนโปรแกรมเพื่อสร้างแบบจำลอง 3 มิติได้อย่างที่ต้องการโดยใช้การกำหนดเป็น Diagram ของแนวความคิด โดยย่อการทำงานเป็นจุด เรียกว่า Node และในแต่ละ Node ก็จะมี Input และ Output เป็นรูปภาพ โดยในระบบวัดปริมาณฝุ่นละอองนั้น จะมามีวิธีการสร้างกราฟการกระจายตัวของฝุ่นละออง (Model 3 มิติ) ในโปรแกรม Autodesk Revit โดยใช้ส่วนเสริม (Add-Ins) ที่ชื่อว่า Dynamo ตาม Diagram ซึ่งมีขั้นตอนโดยย่อดังนี้

1. สร้าง Family ในโปรแกรม Autodesk Revit (โดยผู้วิจัยตั้งชื่อ Family นี้ว่า Sphere) เป็นรูปวงกลมและมีตัวเลขอยู่บริเวณด้านหน้า โดยจะให้วงกลมแทนฝุ่นละออง (PM2.5 หรือ PM10) และตัวเลขที่อยู่บริเวณด้านหน้าวงกลมแทนค่าปริมาณฝุ่นละออง ในหน่วย $\mu\text{g}/\text{m}^3$
2. Import ไฟล์ Family ที่สร้างไว้ในขั้นตอนที่ 1 ไปยัง Dynamo ดังรูปที่ 4.13

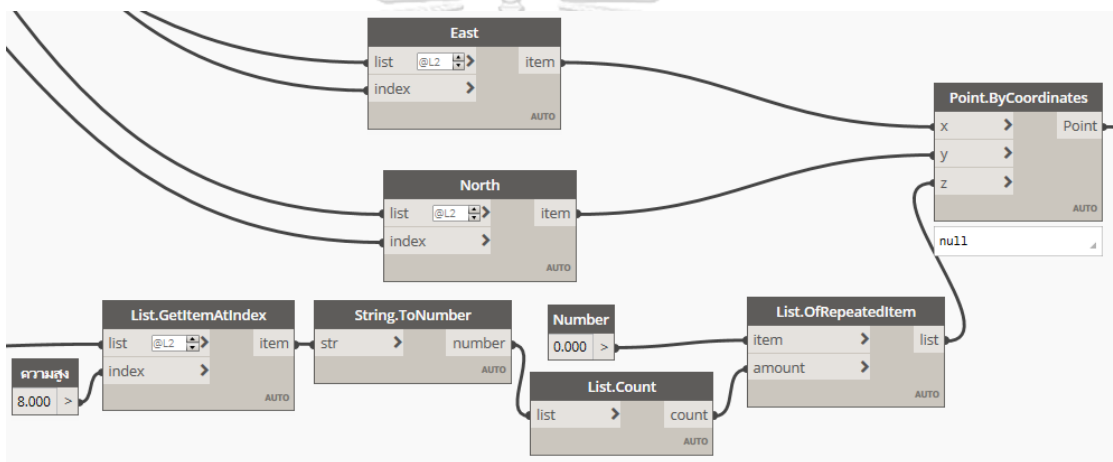
3. Import ไฟล์ Microsoft Excel คือปริมาณฝุ่นละออง (PM2.5 หรือ PM10) และค่าพิกัดละติจูด ลองจิจูดที่ได้จาก เซ็นเซอร์กำหนดตำแหน่งบนพื้นโลก (GPS) ไปยัง Dynamo โดยใช้คำสั่ง File Path และ Data.ImportExcel ดังรูปที่ 4.13
4. นำค่าละติจูดใน Column ที่ 6 (Column G) และค่าลองจิจูดใน Column ที่ 7 (Column H) จากไฟล์ Microsoft Excel ดังรูปที่ 4.12 มาทำการแปลงเป็นระบบ UTM คือ ค่าพิกัด X (East) และค่าพิกัด Y (North) โดยการใส่สูตรการคำนวณและการเขียนโปรแกรมในคำสั่ง Lat Long to UTM ดังรูปที่ 4.14
5. นำค่าพิกัด X (East) และค่าพิกัด Y (North) ที่ได้จากขั้นตอนที่ 4 และนำค่าความสูงใน Column ที่ 8 (Column I) จากไฟล์ Microsoft Excel ดังรูปที่ 4.10 มารวบรวมเป็นค่าพิกัด X Y และ Z เพื่อเตรียมพล็อตเป็นกราฟ (Model 3 มิติ) ในโปรแกรม Autodesk Revit โดยใช้คำสั่ง Point.ByCoordinates ดังรูปที่ 4.15
6. เลือกค่าปริมาณฝุ่นละอองที่ต้องการนำมาพล็อตเป็นกราฟการกระจายตัว (Model 3 มิติ) โดยหากผู้ใช้งานระบบต้องการพล็อตกราฟการกระจายตัวของ PM 2.5 ให้กรอกเลขในช่อง PM Column Number เป็นเลข 2 (Column ที่ 2 หรือ Column C จากไฟล์ Microsoft Excel ในรูปที่ 4.12) และหากผู้ใช้งานระบบต้องการพล็อตกราฟการกระจายตัวของ PM 10 ให้กรอกเลขในช่อง PM Column Number เป็นเลข 3 (Column ที่ 3 หรือ Column D จากไฟล์ Microsoft Excel ในรูปที่ 4.12) ดังรูปที่ 4.16



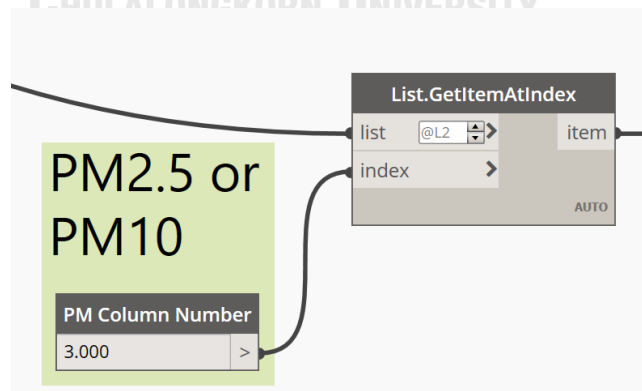
รูปที่ 4.13 รูปภาพแสดงขั้นตอน (Diagram) การ Import ไฟล์ Family และ ไฟล์ Microsoft Excel ในโปรแกรม Autodesk Revit โดยใช้ส่วนเสริม (Add-Ins) ที่ชื่อว่า Dynamo



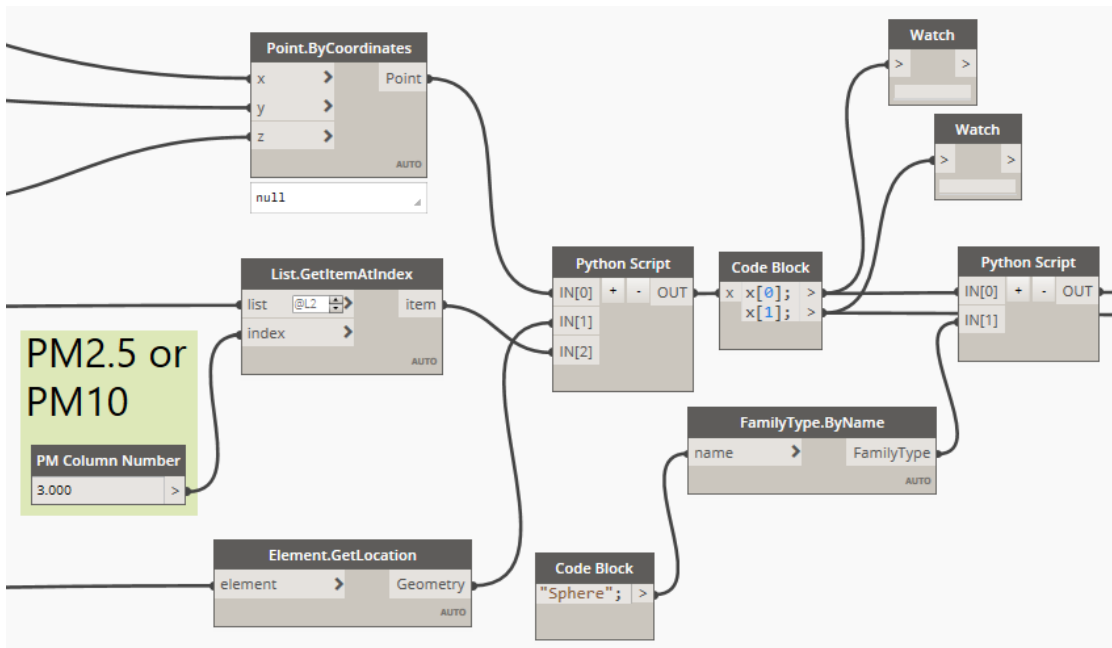
รูปที่ 4.14 รูปภาพแสดงขั้นตอน (Diagram) การแปลงค่าละติจูด ลองจิจูดเป็นค่าพิกัด X Y (ระบบ UTM) ในโปรแกรม Autodesk Revit โดยใช้ส่วนเสริม (Add-Ins) ที่ชื่อว่า Dynamo



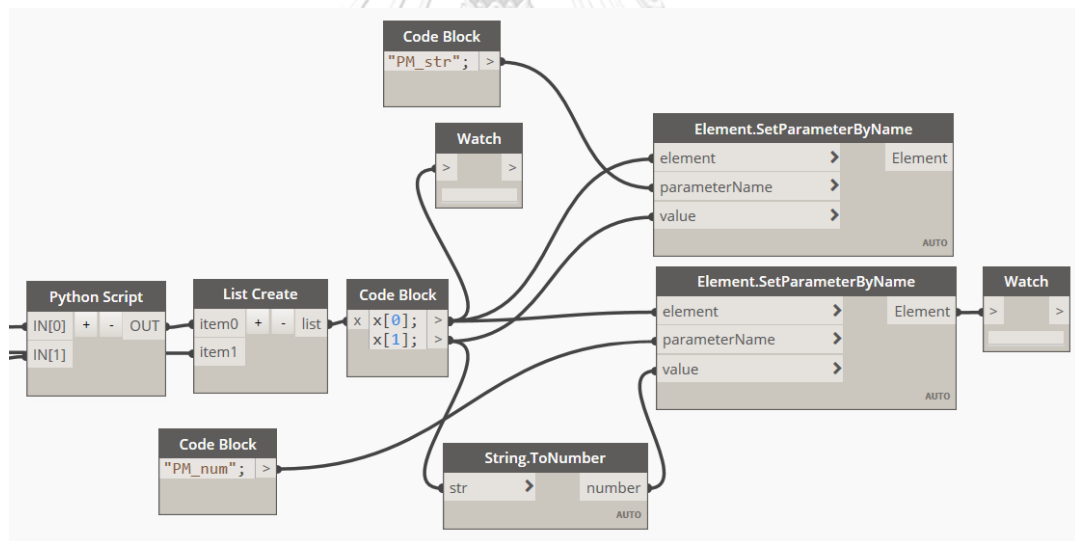
รูปที่ 4.15 รูปภาพแสดงขั้นตอน (Diagram) การระบุเป็นค่าพิกัด X Y และ Z เพื่อเตรียมพล็อตเป็นกราฟ (Model 3 มิติ) ในโปรแกรม Autodesk Revit โดยใช้ส่วนเสริม (Add-Ins) ที่ชื่อว่า Dynamo



รูปที่ 4.16 รูปภาพแสดงขั้นตอน (Diagram) การเลือกค่าปริมาณฝุ่นละอองที่ต้องการนำมาพล็อตเป็นกราฟการกระจายตัว (Model 3 มิติ) ในโปรแกรม Autodesk Revit โดยใช้ส่วนเสริม (Add-Ins) ที่ชื่อว่า Dynamo



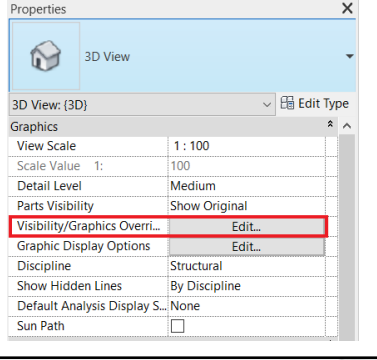
รูปที่ 4.17 รูปภาพแสดงขั้นตอน (Diagram) การสร้างกราฟการกระจายตัวของฝุ่นละออง (Model 3 มิติ) ในโปรแกรม Autodesk Revit โดยใช้ส่วนเสริม (Add-Ins) ที่ชื่อว่า Dynamo



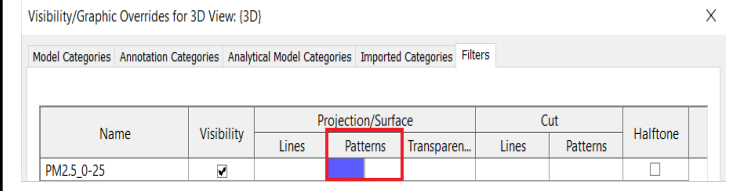
รูปที่ 4.18 รูปภาพแสดงขั้นตอน (Diagram) ต่อจากรูปที่ 4.17 ซึ่งเป็นการสร้างกราฟการกระจายตัวของฝุ่นละออง (Model 3 มิติ) ในโปรแกรม Autodesk Revit โดยใช้ส่วนเสริม (Add-Ins) ที่ชื่อว่า Dynamo

- นำค่าพิกัด X Y และ Z ค่าปริมาณฝุ่นละออง และ Family ที่สร้างไว้ในขั้นตอนที่ 1 มาสร้างเป็นกราฟการกระจายตัวของฝุ่นละออง (Model 3 มิติ) โดยเขียน Diagram ใน Dynamo ดังรูปที่ 4.17 และ 4.18

1. กดปุ่ม Edit ที่คำสั่ง Visibility/Graphics Overrides

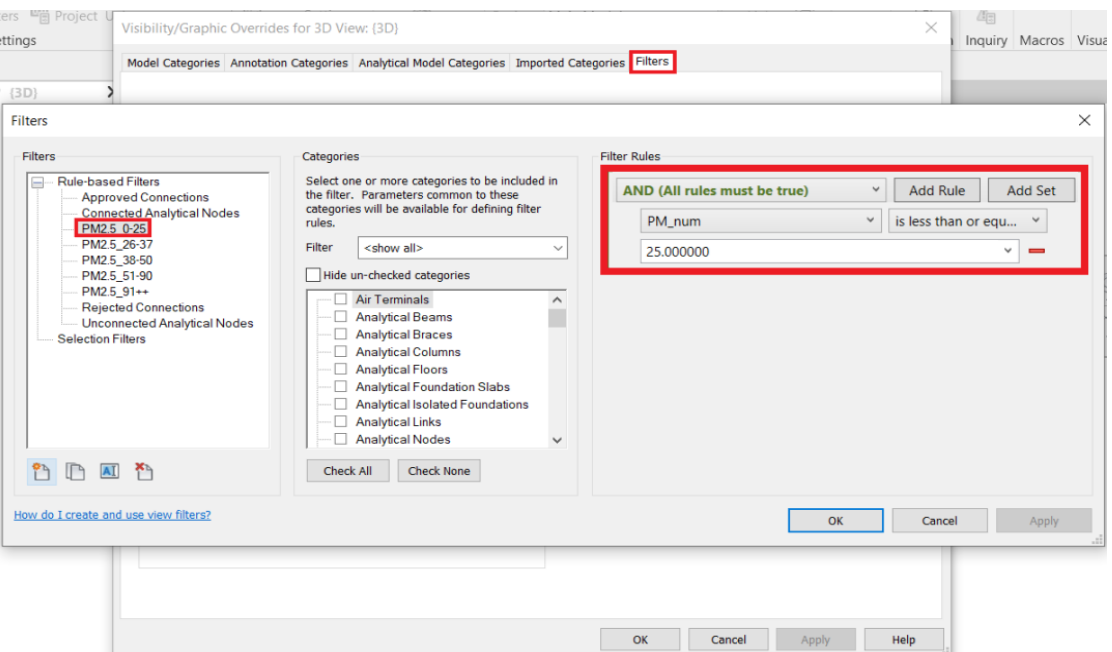


3. เลือกสีค่า PM2.5 ที่อยู่ในช่วง 0-25 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ในช่องคำสั่ง Patterns เป็นสีที่ต้องการ โดยในรูปผู้วิจัยเลือกใช้สีฟ้า



4. ทำซ้ำตามขั้นตอนที่ 2 และ 3 จนครบทุกช่วงของค่าปริมาณฝุ่นละอองตามที่ใช้ระบบต้องการ

2. กดปุ่ม Filter พร้อมกับสร้างเงื่อนไขขึ้นเป็นช่วงตามที่ต้องการ โดยในรูปผู้วิจัย อ้างอิงสีจากผลกระทบต่อสุขภาพอนามัยของกรมควบคุมมลพิษดังตารางที่ 3.2 โดยกำหนดให้ Filter Rule ที่ชื่อ PM2.5 0-25 มีค่า PM2.5 อยู่ในช่วง 0-25 $\mu\text{g}/\text{m}^3$



รูปที่ 4.19 รูปภาพแสดงขั้นตอนการกำหนดสีของจุดตามค่าปริมาณค่าฝุ่นละออง (PM2.5 และ PM10) ในโปรแกรม Autodesk Revit

8. กำหนดสีของจุดตามค่าปริมาณค่าฝุ่นละออง (PM2.5 และ PM10) ซึ่งสีเป็นสัญลักษณ์เปรียบเทียบระดับของผลกระทบต่อสุขภาพอนามัย ซึ่งผู้ใช้งานระบบอาจกำหนดจุดสีแทนค่าปริมาณฝุ่นละออง โดยอ้างอิงจากผลกระทบต่อสุขภาพอนามัยของกรมควบคุมมลพิษดังตารางที่ 4.2 หรือกำหนดเองตามความความต้องการของผู้ใช้งาน โดยมีขั้นตอนโดยย่อดังรูปที่ 4.19
9. ในกรณีที่มีจุดสีแสดงค่าปริมาณฝุ่นละอองหลายค่า ผู้ใช้งานระบบสามารถเลือกแสดงเฉพาะช่วงค่าปริมาณฝุ่นละอองที่ต้องการ โดยเลือกเครื่องหมายถูกหน้าช่วงค่าปริมาณฝุ่นละอองที่ต้องการในช่องคำสั่ง Visibility ดังรูปที่ 4.20

สี	PM2.5 (มคก./ลบ.ม.)	PM10 (มคก./ลบ.ม.)	ข้อความแจ้งเตือน
	เฉลี่ย 24 ชั่วโมงต่อเนื่อง		
สีฟ้า	0 - 25	0 - 50	คุณภาพอากาศดีมาก เหมาะสำหรับกิจกรรมกลางแจ้งและการท่องเที่ยว
สีเขียว	26 - 37	51 - 80	คุณภาพอากาศดี สามารถทำกิจกรรมกลางแจ้ง และการท่องเที่ยวได้ตามปกติ
สีเหลือง	38 - 50	81 - 120	ประชาชนทั่วไป : สามารถทำกิจกรรมกลางแจ้งได้ตามปกติ ผู้ที่ต้องดูแลสุขภาพเป็นพิเศษ : หากมีอาการเบื้องต้น เช่น ไอ หายใจลำบาก ระคายเคืองตา ควรลดระยะเวลาการทำกิจกรรมกลางแจ้ง
สีส้ม	51 - 90	121 - 180	ประชาชนทั่วไป : ควรเฝ้าระวังสุขภาพ ถ้ามีอาการเบื้องต้น เช่น ไอ หายใจลำบาก ระคายเคืองตา ควรลดระยะเวลาการทำกิจกรรมกลางแจ้ง หรือใช้อุปกรณ์ป้องกันตนเองหากมีความจำเป็น ผู้ที่ต้องดูแลสุขภาพเป็นพิเศษ : ควรลดระยะเวลาการทำกิจกรรมกลางแจ้ง หรือใช้อุปกรณ์ป้องกันตนเองหากมีความจำเป็น ถ้ามีอาการทางสุขภาพ เช่น ไอ หายใจลำบาก ตาอักเสบ แน่นหน้าอก ปวดศีรษะ หัวใจเต้นไม่เป็นปกติ คลื่นไส้ อ่อนเพลีย ควรปรึกษาแพทย์
สีแดง	91 ขึ้นไป	181 ขึ้นไป	ทุกคนควรหลีกเลี่ยงกิจกรรมกลางแจ้ง หลีกเลี่ยงพื้นที่ที่มีมลพิษทางอากาศสูง หรือใช้อุปกรณ์ป้องกันตนเองหากมีความจำเป็น หากมีอาการทางสุขภาพควรปรึกษาแพทย์

ตารางที่ 4.2 ตารางแสดงสีที่ใช้ในการพล็อตจุดในกราฟการกระจายตัวของฝุ่นละออง โดยอ้างอิงจากผลกระทบต่อสุขภาพอนามัย (ดัดแปลงจากกองจัดการคุณภาพอากาศและเสียง กรมควบคุมมลพิษ)

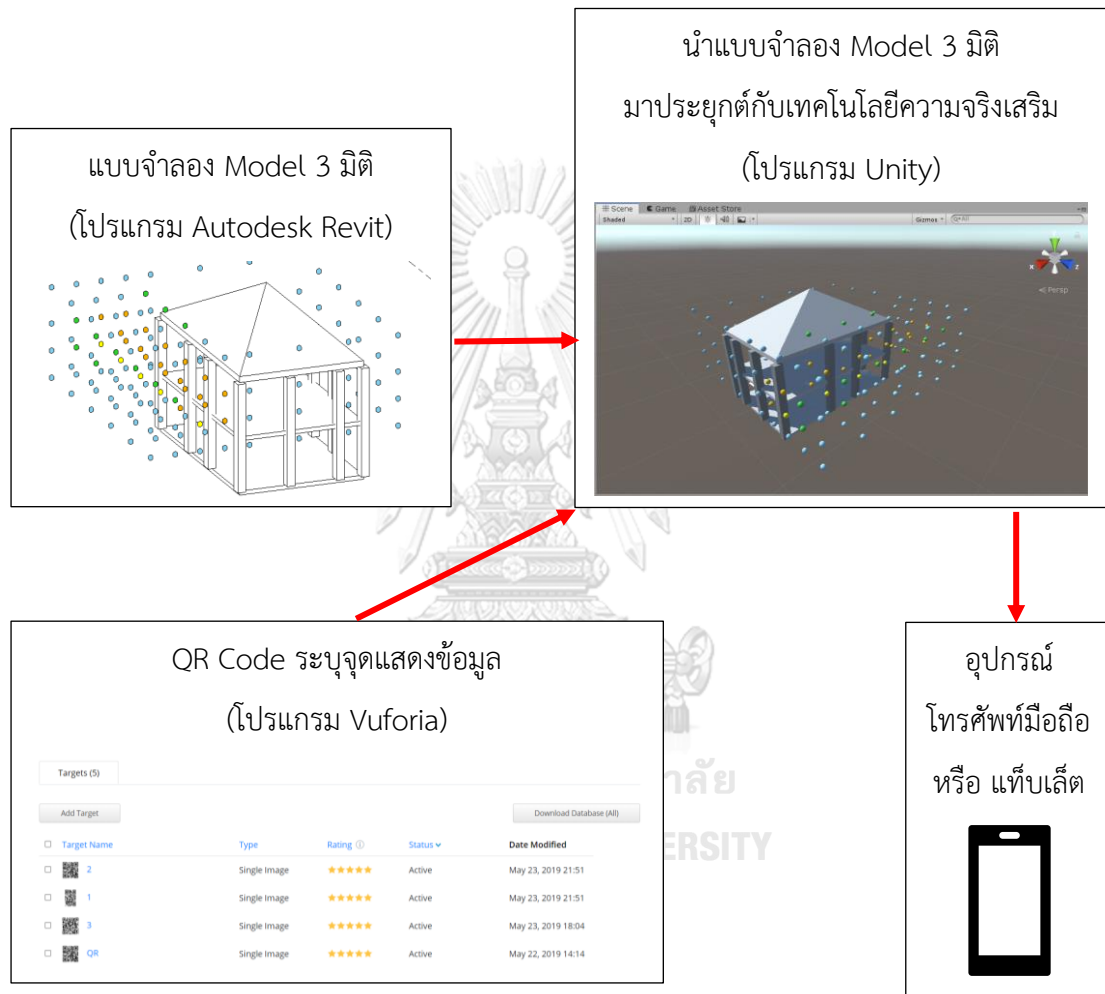
Visibility/Graphic Overrides for 3D View: {3D}

Model Categories Annotation Categories Analytical Model Categories Imported Categories Filters							
Name	Visibility	Projection/Surface			Cut		Halftone
		Lines	Patterns	Transparen...	Lines	Patterns	
PM2.5_0-25	<input checked="" type="checkbox"/>						<input type="checkbox"/>
PM2.5_91++	<input checked="" type="checkbox"/>						<input type="checkbox"/>
PM2.5_51-90	<input checked="" type="checkbox"/>						<input type="checkbox"/>
PM2.5_38-50	<input checked="" type="checkbox"/>						<input type="checkbox"/>
PM2.5_26-37	<input checked="" type="checkbox"/>						<input type="checkbox"/>

รูปที่ 4.20 รูปภาพแสดงขั้นตอนเลือกแสดงเฉพาะช่วงค่าปริมาณฝุ่นละอองที่ต้องการ ในกรณีที่มีจุดสีแสดงค่าปริมาณฝุ่นละอองหลายค่า

4.3.3 Unity 3D และ Vuforia

นำแบบจำลอง Model 3 มิติ (กราฟการกระจายตัวของปริมาณฝุ่นละอองที่เกิดจากการก่อสร้างอาคาร) ที่ได้จากโปรแกรม Autodesk Revit มาประยุกต์กับเทคโนโลยีความจริงเสริม (Augmented Reality : AR) เพื่อให้สามารถแสดงผลผ่านอุปกรณ์โทรศัพท์มือถือ หรือ แท็บเล็ต ทำให้เห็นภาพเสมือนอยู่ในสภาพแวดล้อมจริง



รูปที่ 4.21 รูปภาพแสดงการใช้ซอฟต์แวร์สำหรับการนำแบบจำลอง Model 3 มิติ มาประยุกต์กับเทคโนโลยี Augmented Reality (AR)

โดยมีหลักการทำงานเริ่มจากผู้ใช้งานระบบติดตั้งแอปพลิเคชันที่พัฒนาขึ้น เมื่อเปิดแอปพลิเคชันโปรแกรมจะสั่งให้อุปกรณ์โทรศัพท์มือถือ หรือ แท็บเล็ต เปิดการทำงานของกล้อง ออปติคัล โปรแกรมจะทำการค้นหามาร์คเกอร์ (Marker) เมื่อผู้ใช้งานไปที่มาร์คเกอร์ โปรแกรมจะจับตำแหน่งของมาร์คเกอร์เพื่อประมวลผลและระบุ Model 3 มิติที่สัมพันธ์กับมาร์คเกอร์ แล้วแสดงผล Model 3 มิติบนมาร์คเกอร์ในสภาพแวดล้อมจริง ซึ่งจะให้เห็นการกระจายตัวของฝุ่น

ละออกจากโครงการก่อสร้างอาคารไปยังพื้นที่บริเวณชุมชนโดยรอบอย่างชัดเจน โดยซอฟต์แวร์ที่ใช้ ได้แก่ โปรแกรม Unity 3D และ โปรแกรม Vuforia

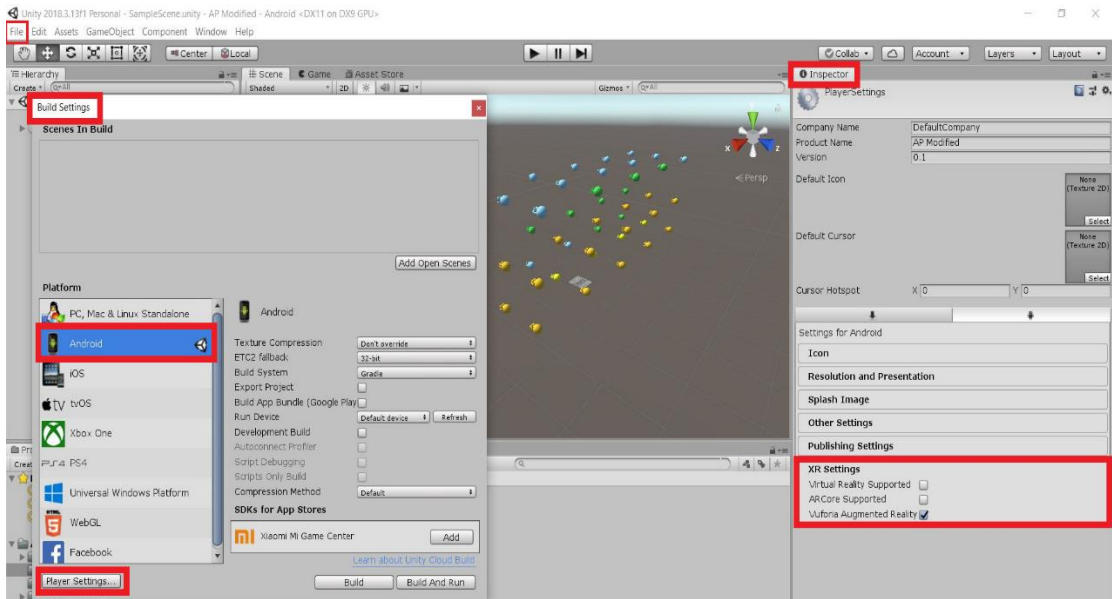
หลักแนวทางในการพัฒนาระบบประกอบด้วยการนำข้อมูลแบบจำลองสามมิติจาก โปรแกรม Autodesk Revit และใช้โปรแกรม Vuforia Engine เพื่อสร้างคิวอาร์โค้ดสำหรับการระบุ พื้นที่แสดงข้อมูล จากนั้นนำมาประยุกต์ในโปรแกรม Unity เพื่อพัฒนาเป็นแอปพลิเคชันในสมาร์ตโฟน (Smartphone) หรือแท็บเล็ตเพื่อใช้ในงานวิจัย ดังรูปที่ 4.21

โปรแกรม Unity 3D เป็นโปรแกรมที่ใช้ในการสร้างเกม 2 มิติ เกม 3 มิติ การสร้างเทคโนโลยี ความจริงเสริม (Augmented Reality: AR) และเทคโนโลยีความจริงเสมือน (Virtual Reality: VR) โดยทำงานร่วมกับโปรแกรม Vuforia และ Visual Studio ซึ่งสามารถส่งออกเป็นเว็บ HTML5 และ แอปพลิเคชันบนระบบปฏิบัติการต่างๆ เช่น Windows, iOS และ Android แล้วนำไปติดตั้งใน โทรศัพท์มือถือ หรือ แท็บเล็ตได้ทันที

โปรแกรม Vuforia เป็นโปรแกรมฟรีบนเทคโนโลยีคลาวด์ ใช้สำหรับพัฒนาฐานข้อมูล (Database) และรหัส (License) ของแอปพลิเคชันเทคโนโลยีความจริงเสริม (Augmented Reality: AR) ที่ต้องการพัฒนา มีระบบการพัฒนา SDK ที่รองรับการทำงานได้ทั้งรูปแบบ 2 มิติ และ 3 มิติ

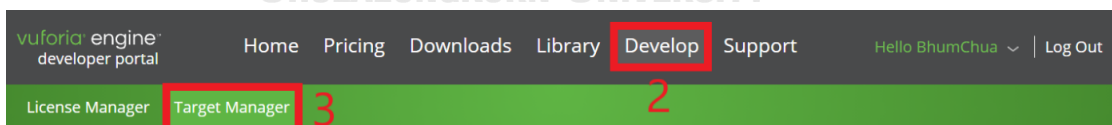
ก่อนเริ่มทำ AR นั้นต้องมีการเตรียม Model 3 มิติ ซึ่งได้มาจากโปรแกรม Autodesk Revit และรูปภาพเป้าหมาย (Image Target) หรือ มาร์คเกอร์ (Marker) ซึ่งเป็นรูปภาพที่ใช้อ้างอิงใน ฐานข้อมูล ผู้ใช้งานระบบจะต้องออกแบรูปภาพเพื่อให้โทรศัพท์มือถือ หรือ แท็บเล็ตส่อง โดยผู้วิจัย เลือกใช้รูปภาพ QR code เป็นมาร์คเกอร์ (Marker)

การตั้งค่าโปรเจ็ค AR ในโปรแกรม Unity 3D มีขั้นตอนดังรูปที่ 4.22 ดังนี้ 1. ไปที่คำสั่ง File จากนั้นคลิก Build Settings 2. ไปที่ระบบปฏิบัติการที่ผู้ใช้ระบบต้องการ โดยผู้วิจัยเลือกใช้ ระบบปฏิบัติการ Android 3. คลิก Switch Platform 4. คลิก Player Settings 5. ไปที่พาเนล Inspector 6. ไปที่ XR Settings แล้วคลิกเลือก Vuforia Augmented Reality 7. ปิดหน้าต่าง Build Settings หลังจากนั้นจัดการใบอนุญาตจาก Vuforia (developer.vuforia.com) และ เชื่อมโยงใบอนุญาตจาก Vuforia มายังโปรแกรม Unity โดยคัดลอก License Key จากเว็บ Vuforia ไปวางที่ช่อง App License Key เพื่อเสร็จสิ้นการเชื่อมโยงใบอนุญาต



รูปที่ 4.22 รูปภาพแสดงขั้นตอนการตั้งค่าโปรเจ็ค AR ในโปรแกรม Unity 3D

การจัดการฐานข้อมูลของรูปภาพเป้าหมาย (Image Target) มีขั้นตอนดังนี้ 1. ไปที่เว็บ Vuforia 2. ไปที่เมนู Develop 3. ไปที่แท็บ Target Manager 4. คลิก Add Database (ดังรูปที่ 4.23) 5. กำหนดชื่อฐานข้อมูลในช่อง Database Name 6. กำหนด Type เป็น Device แล้วคลิก Create 7. คลิกที่ฐานข้อมูลที่สร้างขึ้นและคลิก Add Target (ดังรูปที่ 4.24) 8. คลิกเลือก Single Image 9. คลิก Browse เลือกไฟล์ Image Target 10. เลือกรูปภาพที่ต้องการ โดยผู้วิจัยเลือกใช้ภาพ QR Code 11. คลิก Open และกำหนดความกว้างของ Image Target ที่ช่อง Width (ค่าที่เหมาะสมคือ 400) 12. คลิก Add รูปภาพจะปรากฏพร้อมแสดง Rating และ Status (ดังรูปที่ 4.25)



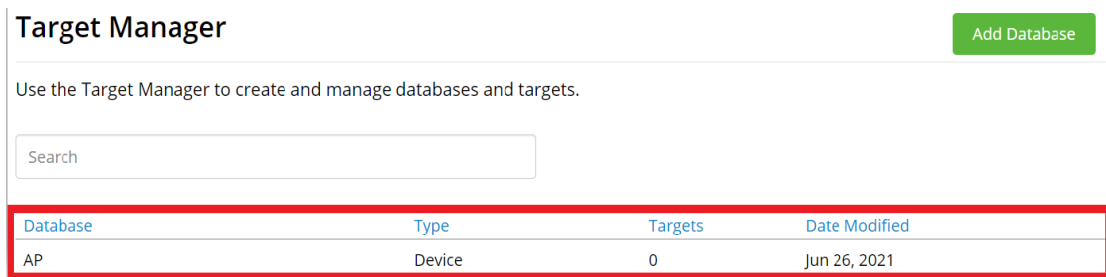
Target Manager

4 Add Database

Use the Target Manager to create and manage databases and targets.

Database	Type	Targets	Date Modified
----------	------	---------	---------------

รูปที่ 4.23 รูปภาพแสดงขั้นตอนการจัดการฐานข้อมูลของ Image Target ขั้นตอนที่ 2-4



รูปที่ 4.24 รูปภาพแสดงขั้นตอนการจัดการฐานข้อมูลของ Image Target ขั้นตอนที่ 7

Add Target

Type:



Single Image

Cuboid

Cylinder

3D Object

File:

AP 2.5 QR code.jpg

Browse...

.jpg or .png (max file 2mb)

Width:

400

Enter the width of your target in scene units. The size of the target should be on the same scale as your augmented virtual content. Vuforia uses meters as the default unit scale. The target's height will be calculated when you upload your image.

Name:

AP 2.5 QR code

Name must be unique to a database. When a target is detected in your application, this will be reported in the API.

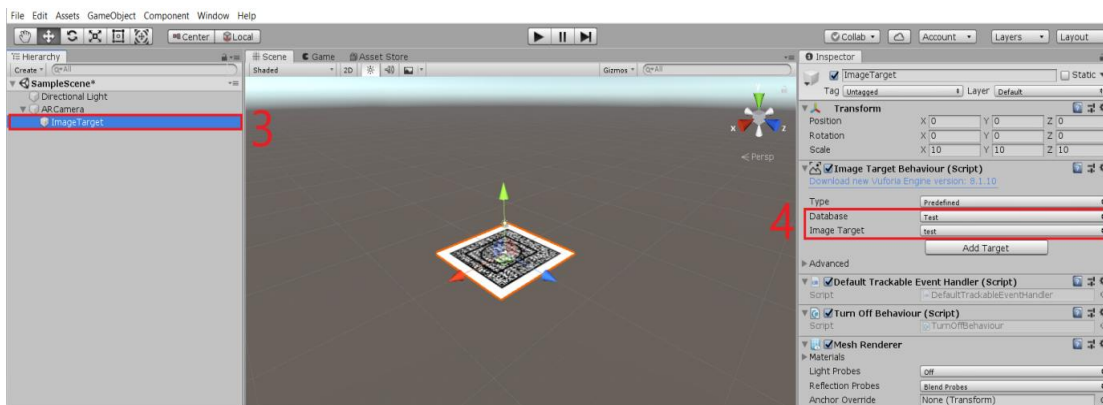
Cancel

Add

รูปที่ 4.25 รูปภาพแสดงขั้นตอนการจัดการฐานข้อมูลของ Image Target ขั้นตอนที่ 8-12

13. คลิก Download Database (All) 14. คลิกเลือก Unity Editor 15. คลิก Download เมื่อ Download เสร็จแล้วคลิกที่ไฟล์ฐานข้อมูลจะเข้าสู่โปรแกรม Unity โดยอัตโนมัติ หลังจากนั้นให้คลิก Import

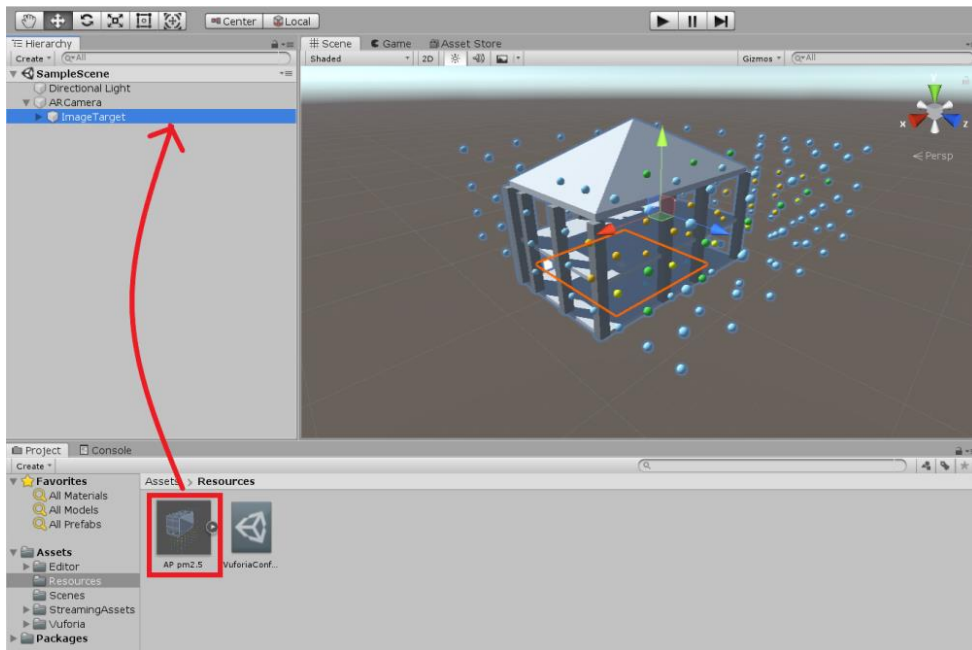
การนำรูปภาพเป้าหมาย (Image Target) เข้ามาในโปรแกรม Unity มีขั้นตอนดังนี้ 1. คลิก AR Camera 2. ไปที่ GameObject เลือกคำสั่ง Vuforia และคลิก Image 3. คลิกที่ Image Target 4. ไปที่พาเนล Inspector แล้วกำหนดคำสั่งใน Image Target Behavior ดังนี้ Database ให้เลือกฐานข้อมูลที่สร้างขึ้น และ Image Target ให้เลือกรูปภาพที่ต้องการ ดังรูปที่ 4.26



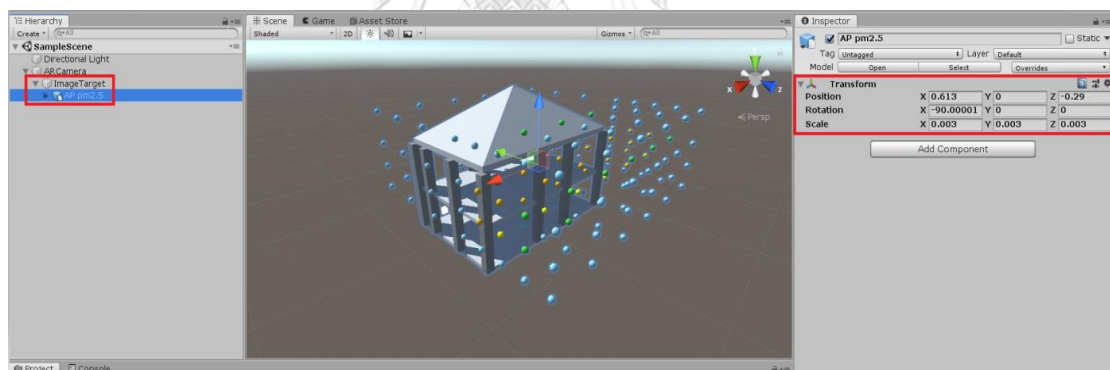
รูปที่ 4.26 รูปภาพแสดงขั้นตอนการนำรูปภาพเป้าหมายเข้ามาในโปรแกรม Unity ขั้นตอนที่ 3-4

การจัดการแบบจำลอง model 3 มิติ ใน Autodesk Revit ต้องมีการเปลี่ยนรูปแบบของข้อมูลเป็นวัตถุจำลองสามมิติ (FBX) หรือไฟล์ .skp จากนั้นทำตามขั้นตอนดังนี้ 1. ลากโพลเดอร์แบบจำลอง model 3 มิติไปวางในโปรแกรม Unity ในโพลเดอร์ Assets 2. ดับเบิลคลิกโพลเดอร์โมเดล แล้วลากไฟล์โมเดล (.dae) ไปไว้ใน Image Target ดังรูปที่ 4.27 3. ย่อ ขยาย หมุน และปรับตำแหน่งแบบจำลอง model 3 มิติ ให้อยู่ภายในรูปภาพ Image Target โดยไปที่พาเนล Inspector แล้วกำหนดตำแหน่งที่ Position กำหนดการหมุนที่ Rotation และกำหนดขนาดที่ Scale โดยการพิมพ์ค่าที่ต้องการ ดังรูปที่ 4.28 ซึ่งขนาด มุม และระยะ แปรผันตรงกับขนาดของ QR Code ดังนั้นการนำ QR Code ซึ่งสร้างขึ้นด้วยโปรแกรม Vuforia Engine มากำหนดจุดสำหรับการระบุพื้นที่แสดงแบบจำลองสามมิติของโครงการ โดยขนาดและมาตราส่วนของแบบจำลองรวมถึงระยะและมุมที่จะแสดงแบบจำลองนั้นขึ้นอยู่กับการจัดวาง QR Code ในโปรแกรม Unity ซึ่งผู้ใช้งานระบบสามารถทำการปรับค่าตามที่ต้องการ ดังรูปที่ 4.28 4. คลิก Play เพื่อทดสอบการแสดงผล 5. ส่งออกเป็นแอปพลิเคชันในอุปกรณ์โทรศัพท์มือถือ หรือ แท็บเล็ต

เมื่อผู้ใช้งานระบบต้องการทราบปริมาณฝุ่นละอองที่เกิดจากก่อสร้างอาคารที่กระจายไปยังบริเวณชุมชนโดยรอบ ผู้ใช้งานระบบเปิดแอปพลิเคชันที่ทำการติดตั้ง โดยหันกล้องไปยังบริเวณ QR Code กล้องจะทำการจับตำแหน่งของมาร์คเกอร์เพื่อประมวลผลและระบุ Model 3 มิติที่สัมพันธ์กับมาร์คเกอร์ แล้วแสดงผล Model 3 มิติบนมาร์คเกอร์ในสภาพแวดล้อมจริง ดังรูปที่ 4.29 ซึ่งจะทำให้เห็นการกระจายตัวของฝุ่นละอองจากโครงการก่อสร้างอาคารไปยังพื้นที่บริเวณชุมชนโดยรอบอย่างชัดเจน ทำให้ทราบทิศทาง แนวโน้มการกระจายตัวของฝุ่นละออง ทำให้สามารถนำไปวิเคราะห์ปริมาณฝุ่นละอองที่เกิดจากการก่อสร้างอาคารต่อไป ดังรูปที่ 4.30



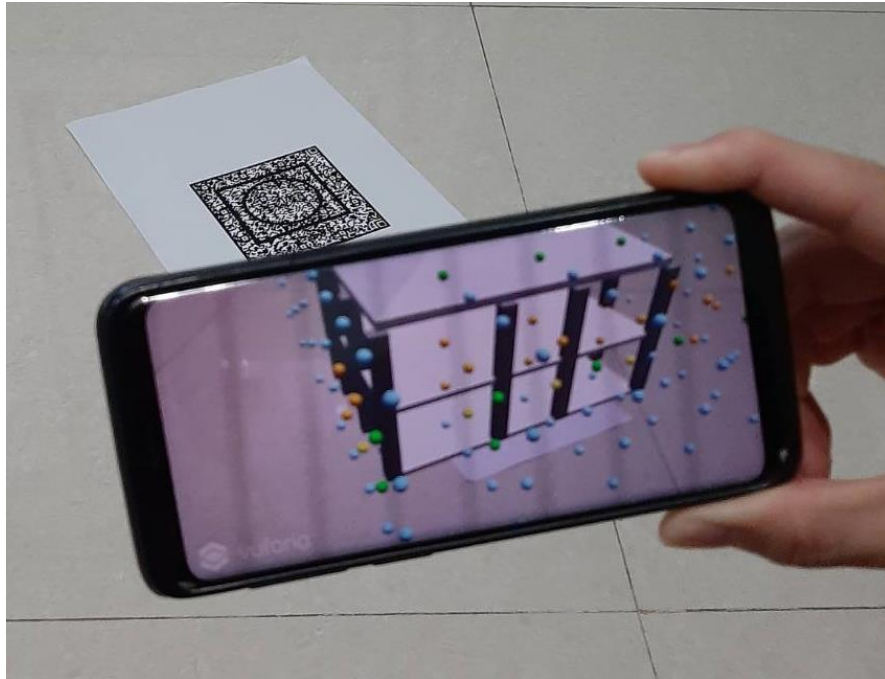
รูปที่ 4.27 รูปภาพแสดงขั้นตอนการดับเบิลคลิกโพลเดอร์โมเดล แล้วลากไฟล์โมเดล (.dae) ไปไว้ใน Image Target



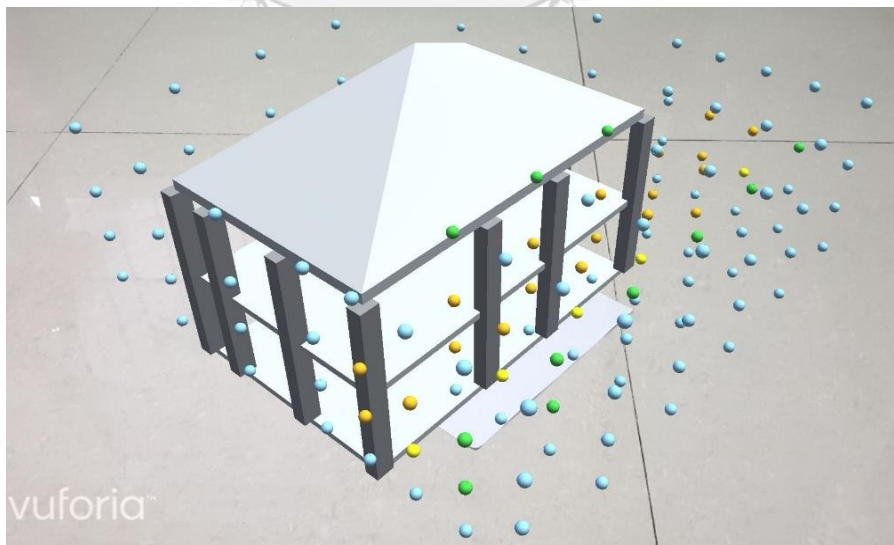
รูปที่ 4.28 รูปภาพแสดงการกำหนดตำแหน่งที่ Position กำหนดการหมุนที่ Rotation และกำหนดขนาดที่ Scale เพื่อย่อ ขยาย หมุน และปรับตำแหน่งแบบจำลอง model 3 มิติ

นอกจากนั้นยังสามารถนำไปประยุกต์โดยแสดงการกระจายตัวของฝุ่นละอองบริเวณใด บริเวณหนึ่ง หรือบริเวณที่มีกิจกรรมก่อสร้างที่ผู้ใช้งานระบบต้องการทราบปริมาณฝุ่นละอองเฉพาะจุด ซึ่งเมื่อทำการบิรวัดปริมาณฝุ่นละอองบริเวณนั้นแล้ว และนำมาสร้างแบบจำลอง model 3 มิติใน โปรแกรม Autodesk Revit จากนั้นนำ model 3 มิติมาประยุกต์กับเทคโนโลยี Augmented Reality (AR) และสร้างเป็น QR Code เพื่อนำไปติดบริเวณที่ต้องการทราบปริมาณฝุ่นละออง หรือ

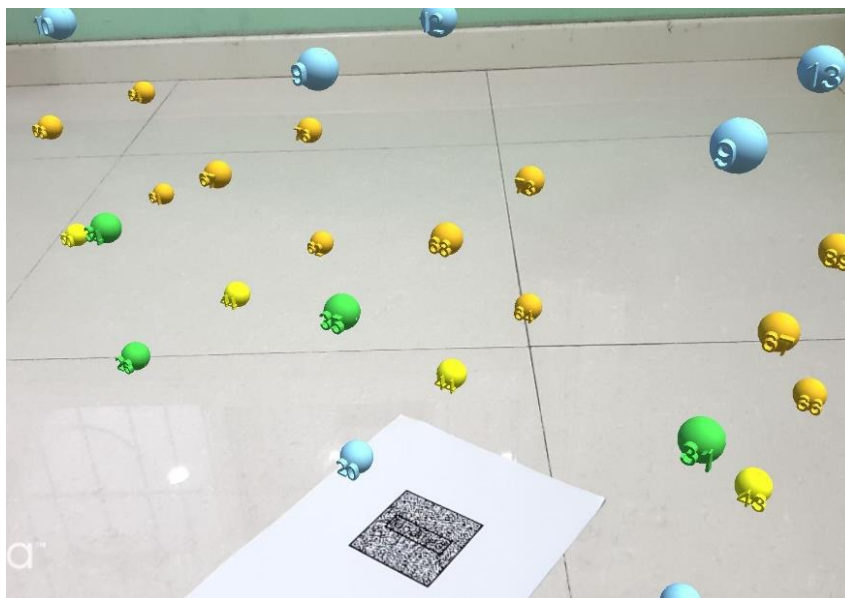
บริเวณที่มีกิจกรรมก่อสร้าง จะทำให้เห็นการกระจายตัวของฝุ่นละอองบริเวณนั้นชัดเจน สะดวกต่อการนำไปวิเคราะห์ต่อไป เช่น บริเวณพื้นมีการก่อสร้างทำให้เกิดปริมาณฝุ่นละออง ดังรูปที่ 4.31



รูปที่ 4.29 รูปภาพแสดงขณะที่ผู้ใช้งานระบบหันกล้องไปยังบริเวณ QR Code ทำให้แสดงผล Model 3 มิติบนมาร์คเกอร์ ซึ่งจะช่วยให้เห็นการกระจายตัวของฝุ่นละอองจากโครงการก่อสร้างอาคาร



รูปที่ 4.30 รูปภาพแสดงแบบจำลอง Model 3 มิติของอาคาร ที่นำมาประยุกต์กับเทคโนโลยี Augmented Reality (AR) ทำให้เห็นภาพเสมือนอยู่ในสภาพแวดล้อมจริง



รูปที่ 4.31 รูปภาพแสดงแบบจำลอง Model 3 มิติ บริเวณที่มีกิจกรรมก่อสร้างที่ผู้ใช้งานระบบ ต้องการทราบปริมาณฝุ่นละอองเฉพาะจุด

4.4 ทดสอบความคลาดเคลื่อนของเครื่องมือที่ใช้ในระบบวัดปริมาณฝุ่นละออง

ทำการเปรียบเทียบค่าที่วัดได้จากเซ็นเซอร์ตรวจวัดฝุ่นละออง เช่น เซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิและความชื้น เซ็นเซอร์กำหนดตำแหน่งบนพื้นโลก (GPS) กับเครื่องมือหรือระบบอื่นๆ เพื่อตรวจสอบความคลาดเคลื่อนของเซ็นเซอร์ต่างๆ และทำการเปรียบเทียบค่าปริมาณฝุ่นละอองที่ได้วัดได้จากอากาศยานไร้คนขับ (โดรน) กับค่าที่วัดได้ตามปกติ เพื่อทดสอบว่าต้องใช้เชือก (เชือกที่ผูกตะกร้าไว้ซึ่งในตะกร้าจะประกอบไปด้วยอุปกรณ์คือ เซ็นเซอร์ต่างๆ) ยาวเท่าใด ลมจากใบพัดขณะทำการบินของอากาศยานไร้คนขับนั้นไม่มีผลต่อค่าปริมาณฝุ่นละออง

4.4.1 เซ็นเซอร์วัดปริมาณฝุ่นละออง (PMS 5003)

ทำการเปรียบเทียบค่าปริมาณฝุ่นละออง PM 2.5 ในหน่วยไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร โดยค่าที่วัดได้เป็นการวัดขณะใดขณะหนึ่ง ที่วัดได้จากเซ็นเซอร์วัดปริมาณฝุ่นละออง (PMS 5003) กับค่าที่วัดได้จากเครื่องวัดปริมาณฝุ่นละอองแบบพกพา (Xiaomi Mi Smart Air Quality Monitor PM2.5 Detector) ซึ่งจะทำการเปรียบเทียบใน 3 สถานะ คือ ภายในตัวอาคาร บริเวณกลางแจ้ง (ในช่วงเดือนมิถุนายน) และบริเวณกลางแจ้งในช่วงฤดูหนาว (เดือนกุมภาพันธ์) ได้ผลการทดลองดังแสดงในตารางที่ 4.3



รูปที่ 4.32 รูปภาพแสดงเครื่องวัดปริมาณฝุ่นละอองแบบพกพา (Xiaomi Mi Smart Air Quality Monitor PM2.5 Detector)

บริเวณที่ทำการทดสอบ	เซ็นเซอร์ PMS 5003 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	เครื่อง Xiaomi Mi Smart Air Quality Monitor PM2.5 Detector ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	ผลต่าง $\mu\text{g}/\text{m}^3$	% ความคลาดเคลื่อน
ภายในตัวอาคาร	11	11	0	0
	9	9	0	0
	12	11	1	9.09
บริเวณกลางแจ้ง (ในช่วงเดือนเมษายน)	30	28	2	7.14
	29	30	-1	3.33
	33	32	1	3.14
บริเวณกลางแจ้ง ในช่วงฤดูหนาว (เดือนกุมภาพันธ์)	47	46	1	2.17
	50	51	-1	1.96
	53	50	3	6.00
ค่าเฉลี่ย			0.67	3.65
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน			1.32	3.15

ตารางที่ 4.3 ตารางแสดงการเปรียบเทียบค่าปริมาณฝุ่นละอองที่วัดได้จากเซ็นเซอร์ PMS 5003 และเครื่อง Xiaomi Mi Smart Air Quality Monitor PM2.5 Detector

จากตารางที่ 4.3 สรุปได้ว่าค่าปริมาณฝุ่นละออง PM 2.5 ในหน่วยไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ที่วัดได้จากเซ็นเซอร์วัดปริมาณฝุ่นละออง (PMS 5003) กับค่าที่วัดได้จากเครื่องวัดปริมาณฝุ่นละอองแบบพกพา (Xiaomi Mi Smart Air Quality Monitor PM2.5 Detector) นั้นมีค่าแตกต่างกันเพียงเล็กน้อยทั้ง 3 สภาวะ โดยมีค่าปริมาณฝุ่นละออง PM 2.5 แตกต่างกันอยู่ที่ 0-3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ค่าเฉลี่ยของผลต่างเท่ากับ 0.67 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 1.32 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ และค่าเฉลี่ยของเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนเท่ากับ 3.65% ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนเท่ากับ 3.15%

4.4.2 เซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิและความชื้น (DHT22)

ทำการเปรียบเทียบค่าอุณหภูมิในหน่วยองศาเซลเซียส และค่าความชื้นสัมพัทธ์ในหน่วยเปอร์เซ็นต์ โดยค่าที่วัดได้เป็นการวัดขณะใดขณะหนึ่ง ที่วัดได้จากเซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิและความชื้น (DHT22) กับค่าที่วัดได้จากเครื่องวัดอุณหภูมิและความชื้น Xiaomi Mijia Square Temperature and Humidity Sensor Bluetooth 4.2 ซึ่งจะทำการเปรียบเทียบในบริเวณที่มีอุณหภูมิหรือความชื้นแตกต่างกันคือ ห้องนั่งเล่น 1 (ไม่เปิดเครื่องปรับอากาศ) ห้องนั่งเล่น 2 (เปิดเครื่องปรับอากาศ) ห้องน้ำ ห้องครัว ในตู้เย็น และสนามหญ้า ได้ผลการทดลองดังแสดงในตารางที่ 4.4



รูปที่ 4.33 รูปภาพแสดงเครื่องวัดอุณหภูมิและความชื้น Xiaomi Mijia Square Temperature and Humidity Sensor Bluetooth 4.2

บริเวณที่ทำ การทดสอบ	ค่าความแตกต่างระหว่างเซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิและความชื้น (DHT22) กับ เครื่องวัดอุณหภูมิและความชื้น Xiaomi Mijia Square Temperature and Humidity Sensor Bluetooth 4.2			
	อุณหภูมิ (°C)	% ความคลาด เคลื่อน	ความชื้น สัมพัทธ์ (%)	% ความคลาด เคลื่อน
ห้องนั่งเล่น 1	0.1	0.31	0.6	0.79
ห้องนั่งเล่น 2	0.2	0.80	0.8	1.45
ห้องน้ำ	0.2	0.71	2.2	3.79
ห้องครัว	0.1	0.29	0.5	0.78
ตู้เย็น	0.5	4.54	3.4	8.50
สนามหญ้า	0.4	1.14	1.2	2.22
ค่าเฉลี่ย	0.25	1.30	1.45	2.92
ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน	0.16	1.62	1.14	2.96
ค่าเฉลี่ยกำลัง สองของข้อมูล	0.027		1.295	

ตารางที่ 4.4 ตารางแสดงการเปรียบเทียบค่าอุณหภูมิและความชื้นที่วัดได้จากเซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิและความชื้น (DHT22) กับเครื่องวัดอุณหภูมิและความชื้น Xiaomi Mijia Square Temperature and Humidity Sensor Bluetooth 4.2

จากตารางที่ 4.4 สรุปได้ว่าค่าอุณหภูมิในหน่วยองศาเซลเซียส และค่าความชื้นสัมพัทธ์ในหน่วยเปอร์เซ็นต์ ที่วัดได้จากเซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิและความชื้น (DHT22) กับค่าที่วัดได้จากเครื่องวัดอุณหภูมิและความชื้น Xiaomi Mijia Square Temperature and Humidity Sensor Bluetooth 4.2 นั้นมีค่าแตกต่างกันเพียงเล็กน้อย โดยจำแนกเป็น 1. ค่าอุณหภูมิแตกต่างกันอยู่ที่ 0.1-0.5 องศาเซลเซียส ค่าเฉลี่ยของผลต่างเท่ากับ 0.25 องศาเซลเซียส ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 0.16 องศาเซลเซียส และค่าเฉลี่ยของเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนเท่ากับ 1.3% ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนเท่ากับ 1.62% 2. ค่าความชื้นสัมพัทธ์แตกต่างกันอยู่ที่ 0.5-3.4 % ค่าเฉลี่ยของผลต่างเท่ากับ 1.45% ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 1.14% และค่าเฉลี่ยของเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนเท่ากับ 2.92% ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนเท่ากับ

2.96% ในส่วนของค่าเฉลี่ยกำลังสองของข้อมูล (ความแปรปรวน) นั้นยังมีค่าเข้าใกล้ 0 หมายความว่าค่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นมีน้อย โดยค่าเฉลี่ยกำลังสองของข้อมูลของอุณหภูมิและความชื้นเท่ากับ 0.027 และ 1.295 ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าทั้งอุณหภูมิและความชื้นมีความคลาดเคลื่อนน้อย โดยอุณหภูมิจึงมีความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นน้อยกว่าความชื้นค่อนข้างมาก

4.4.3 เซ็นเซอร์กำหนดตำแหน่งบนพื้นโลก (GPS Module GY-NEO6MV2)

ทำการเปรียบเทียบค่าพิกัดละติจูด ลองจิจูด ในหน่วยระบบพิกัดแบบค่าตัวเลขทศนิยม (DD : Decimal Degree) ที่วัดได้จากเซ็นเซอร์กำหนดตำแหน่งบนพื้นโลก (GPS Module GY-NEO6MV2) กับค่าพิกัดละติจูด ลองจิจูด ที่วัดได้จากเว็บไซต์หรือแอปพลิเคชัน Google Map โดยจะทำการเปรียบเทียบทั้งหมด 4 สถานที่ใน Google Map ว่าค่าพิกัดทั้งสองมีระยะทางแตกต่างกัน มีความคลาดเคลื่อนเท่าไร ซึ่งได้ผลการทดลองดังแสดงในตารางที่ 4.5

บริเวณที่ทำการทดสอบ	เซ็นเซอร์กำหนดตำแหน่งบนพื้นโลก (GPS Module GY-NEO6MV2)		Google Map		ผลต่าง (เมตร)
	ละติจูด	ลองจิจูด	ละติจูด	ลองจิจูด	
สถานที่ 1	13.744420	100.582070	13.7444170	100.5820767	0.80
	13.744458	100.582130	13.7444625	100.5821344	0.69
สถานที่ 2	13.846285	100.656330	13.8462851	100.6563371	0.76
	13.846221	100.656180	13.84622539	100.6561809	0.50
สถานที่ 3	13.8592728	100.5080278	13.8592711	100.5080374	1.05
	13.85946694	100.5082101	13.85946677	100.5082157	0.60
สถานที่ 4	13.73539946	100.5328163	13.73540422	100.5328216	0.78
	13.73536774	100.5329611	13.73537356	100.5329698	1.14
ค่าเฉลี่ย					0.79

ตารางที่ 4.5 ตารางแสดงการเปรียบเทียบค่าความคลาดเคลื่อนของพิกัด ที่วัดได้จากเซ็นเซอร์กำหนดตำแหน่งบนพื้นโลก (GPS Module GY-NEO6MV2) และเว็บไซต์หรือแอปพลิเคชัน Google Map

จากตารางที่ 4.5 สรุปได้ว่าค่าพิกัดละติจูด ลองจิจูด ในหน่วยระบบพิกัดแบบค่าตัวเลขทศนิยม (DD : Decimal Degree) ที่วัดได้จากเซ็นเซอร์กำหนดตำแหน่งบนพื้นโลก (GPS Module GY-NEO6MV2) กับค่าที่วัดได้จากเว็บไซต์หรือแอปพลิเคชัน Google Map นั้นมีค่าแตกต่างกันเพียง

เล็กน้อยทั้ง 4 สถานที่ โดยมีระยะทางแตกต่างกันอยู่ที่ 0.5-1.14 เมตร ค่าเฉลี่ยของผลต่างเท่ากับ 0.79 เมตร

4.4.4 ทดสอบว่าต้องใช้เชือกยาวเท่าใด ลมจากใบพัดขณะทำการบินของอากาศยานไร้คนขับจึงไม่มีผลต่อค่าปริมาณฝุ่นละออง

เนื่องจากระบบที่ใช้ในการวัดปริมาณฝุ่นละออง เป็นการประยุกต์ใช้เซ็นเซอร์ตรวจวัดฝุ่นละออง (PM2.5 และ PM10) เซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิและความชื้น เซ็นเซอร์กำหนดตำแหน่งบนพื้นโลก (GPS) และตัวส่งสัญญาณข้อมูล มาผูกติดกับอากาศยานไร้คนขับ (โดรน) ในส่วนของอากาศยานไร้คนขับจะทำการผูกตะกร้าไว้โดยใช้เชือก ดังรูปที่ 4.1 ซึ่งในตะกร้าจะประกอบไปด้วยอุปกรณ์คือ เซ็นเซอร์ต่างๆ เพื่อนำไปบินวัดปริมาณฝุ่นละอองรอบๆตัวอาคาร



รูปที่ 4.34 รูปภาพแสดงขณะทำการทดลองเปรียบเทียบค่าที่วัดได้จากเซ็นเซอร์ตรวจวัดฝุ่นละออง (PMS 5003) ที่อยู่ในตะกร้าที่ถูกผูกติดอยู่กับอากาศยานไร้คนขับ กับค่าที่วัดได้จากเซ็นเซอร์ตรวจวัดฝุ่นละอองตามปกติเพื่อทดสอบว่าต้องใช้เชือกยาวเท่าใด

ขณะทำการบินนั้นลมจากใบพัดของอากาศยานไร้คนขับจะส่งผลต่อค่าปริมาณฝุ่นละออง อาจทำให้ค่าปริมาณฝุ่นละอองมีความคลาดเคลื่อน ผู้วิจัยจึงทำการผูกเชือกแล้วห้อยตะกร้าลงมา การทดสอบนี้จึงทดสอบว่าต้องใช้เชือกยาวเท่าใด ลมจากใบพัดขณะทำการบินของอากาศยานไร้คนขับจึงไม่มีผลต่อค่าปริมาณฝุ่นละออง โดยทำการเปรียบเทียบค่าปริมาณฝุ่นละออง PM 2.5 ในหน่วย

ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ที่วัดได้จากเซ็นเซอร์ตรวจวัดฝุ่นละออง (PMS 5003) ที่อยู่ในตะกร้าที่ถูกผูกติดอยู่กับอากาศยานไร้คนขับ (โดรน) กับค่าที่วัดได้จากเซ็นเซอร์ตรวจวัดฝุ่นละอองตามปกติ (เซ็นเซอร์ตรวจวัดฝุ่นละออง (PMS 5003) ที่อยู่ในตะกร้าที่ไม่ได้ถูกผูกติดอยู่กับอากาศยานไร้คนขับ โดยผู้วิจัยจะเป็นผู้เดินถือตะกร้าไปวัดตามบริเวณต่างๆ) ซึ่งได้ผลการทดลองดังแสดงในตารางที่ 4.6

ความยาว เชือก (cm.)	ค่าปริมาณฝุ่นละออง PM2.5 ที่วัดได้ จากเซ็นเซอร์ตรวจวัดฝุ่นละออง PMS 5003 ที่อยู่ในตะกร้าที่ถูกผูกติดอยู่กับ อากาศยานไร้คนขับ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	ค่าปริมาณฝุ่นละอองที่ วัดได้จากเซ็นเซอร์ ตรวจวัดฝุ่นละออง PMS 5003 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	ผลต่าง $\mu\text{g}/\text{m}^3$
20	14	18	4
	15	20	5
40	17	18	1
	18	20	2
80	18	18	0
	19	20	1

ตารางที่ 4.6 ตารางแสดงการเปรียบเทียบค่าปริมาณฝุ่นละออง PM 2.5 ที่วัดได้จากเซ็นเซอร์ตรวจวัดฝุ่นละออง (PMS 5003) ที่อยู่ในตะกร้าที่ถูกผูกติดอยู่กับอากาศยานไร้คนขับ (โดรน) กับค่าที่วัดได้จากเซ็นเซอร์ตรวจวัดฝุ่นละอองตามปกติ

จากตารางที่ 4.6 สรุปได้ว่าเมื่อทดลองใช้ความยาวเชือกที่วัดจากอากาศยานไร้คนขับ (โดรน) ถึงตะกร้าที่ประกอบไปด้วยอุปกรณ์คือเซ็นเซอร์ต่างๆ ยาว 20 เซนติเมตร ค่าปริมาณฝุ่นละออง PM2.5 ที่วัดได้จากเซ็นเซอร์ตรวจวัดฝุ่นละออง PMS 5003 ที่อยู่ในตะกร้าที่ถูกผูกติดอยู่กับอากาศยานไร้คนขับ มีค่าน้อยกว่า ค่าปริมาณฝุ่นละอองที่วัดได้จากเซ็นเซอร์ตรวจวัดฝุ่นละออง PMS 5003 อยู่เท่ากับ 4-5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ เนื่องจากลมจากใบพัดที่หมุนด้วยความเร็วของอากาศยานไร้คนขับทำให้ฝุ่นละอองบริเวณนั้นปลิวกระจายไป ทำให้ค่าที่วัดได้คลาดเคลื่อนเล็กน้อย

จากนั้นจึงทดลองใช้ความยาวเชือกที่เพิ่มขึ้นโดยวัดจากอากาศยานไร้คนขับ (โดรน) ถึงตะกร้าที่ประกอบไปด้วยอุปกรณ์คือเซ็นเซอร์ต่างๆ ยาว 40 เซนติเมตร ค่าปริมาณฝุ่นละออง PM2.5 ที่วัดได้จากเซ็นเซอร์ตรวจวัดฝุ่นละออง PMS 5003 ที่อยู่ในตะกร้าที่ถูกผูกติดอยู่กับอากาศยานไร้คนขับ มีค่าน้อยกว่า ค่าปริมาณฝุ่นละอองที่วัดได้จากเซ็นเซอร์ตรวจวัดฝุ่นละออง PMS 5003 อยู่เท่ากับ 1-2

$\mu\text{g}/\text{m}^3$ เนื่องจากความยาวเชือกที่เพิ่มมากขึ้น ทำให้ระยะระหว่างใบพัดและตะกร้าที่ห้อยอยู่เพิ่มมากขึ้น ลมจากใบพัดที่หมุนด้วยความเร็วของอากาศยานไร้คนขับจึงส่งผลต่อค่าปริมาณฝุ่นละอองที่วัดได้จากเซ็นเซอร์น้อยมาก ทำให้ค่าปริมาณฝุ่นละอองที่วัดได้มีคลาดเคลื่อนลดลง

ผู้วิจัยจึงทดลองใช้ความยาวเชือกที่เพิ่มขึ้นโดยวัดจากอากาศยานไร้คนขับ (โดรน) ถึงตะกร้าที่ประกอบไปด้วยอุปกรณ์คือเซ็นเซอร์ต่างๆ ยาว 80 เซนติเมตร ค่าปริมาณฝุ่นละออง PM2.5 ที่วัดได้จากเซ็นเซอร์ตรวจวัดฝุ่นละออง PMS 5003 ที่อยู่ในตะกร้าที่ถูกผูกติดอยู่กับอากาศยานไร้คนขับ มีค่าน้อยกว่า ค่าปริมาณฝุ่นละอองที่วัดได้จากเซ็นเซอร์ตรวจวัดฝุ่นละออง PMS 5003 อยู่เท่ากับ 0-1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ เนื่องจากความยาวเชือกที่เพิ่มมากขึ้น ทำให้ค่าปริมาณฝุ่นละอองที่วัดได้มีคลาดเคลื่อนน้อยมาก ดังนั้นผู้วิจัยจึงเลือกใช้ความยาวเชือกที่ 80 เซนติเมตร

4.5 ระบบตรวจวัดฝุ่นละอองในโครงการก่อสร้างอาคาร

ระบบตรวจวัดฝุ่นละอองในโครงการก่อสร้างอาคารเป็นแนวทางซึ่งพัฒนาผ่านการประยุกต์ใช้เทคโนโลยี ไมโครคอนโทรลเลอร์ (Microcontroller) Building Information Modeling (BIM) Augmented Reality (AR) และ Unmanned Aerial Vehicle (UAVs) โดยระบบตรวจวัดฝุ่นละอองในโครงการก่อสร้างอาคารแบ่งการทำงานเป็นสองส่วนหลัก ได้แก่ การเก็บข้อมูลค่าปริมาณต่างๆตามสภาพหน้างานจริง และการแสดงผลข้อมูลเพื่อนำไปวิเคราะห์ปัญหาฝุ่นละออง

4.5.1 การเก็บข้อมูลค่าปริมาณต่างๆตามสภาพหน้างานจริง

การเก็บข้อมูลค่าปริมาณต่างๆนั้นระบบจะใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ (Microcontroller) ที่ควบคุมเซ็นเซอร์วัดปริมาณฝุ่นละออง เซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิและความชื้น เซ็นเซอร์กำหนดตำแหน่งบนพื้นโลก (GPS) โมดูลสื่อสารไร้สาย และอากาศยานไร้คนขับ สำหรับการเก็บข้อมูลค่าปริมาณฝุ่นละออง ค่าอุณหภูมิและความชื้น และตำแหน่งที่ทำการวัดของโครงการก่อสร้าง โดยจะส่งข้อมูลมายังเครื่องคอมพิวเตอร์ซึ่งจะแสดงผลในโปรแกรม Arduino IDE

4.5.2 การแสดงผลข้อมูลเพื่อนำไปวิเคราะห์ปัญหาฝุ่นละออง

การแสดงผลข้อมูลเพื่อนำไปวิเคราะห์ปัญหาฝุ่นละอองนั้นนำข้อมูลที่ได้จากข้อ 4.5.1 ที่แสดงในโปรแกรม Arduino IDE มาแสดงผลในรูปแบบไฟล์ Microsoft Excel เพื่อง่ายต่อการเก็บข้อมูลและวิเคราะห์ข้อมูล หลังจากนั้นนำค่าปริมาณฝุ่นละอองที่วัดได้และค่าตำแหน่ง (พิกัด) จากไฟล์ Microsoft Excel มาทำการพล็อตกราฟการกระจายตัว (Model 3 มิติ) ในโปรแกรม Autodesk Revit (BIM) และนำแบบจำลอง Model 3 มิติ มาประยุกต์กับเทคโนโลยี Augmented Reality (AR)

เพื่อให้ผู้ใช้งานเกิดความสะดวกรในการตรวจสอบและวิเคราะห์ปริมาณฝุ่นละอองที่กระจายอยู่บริเวณ โดยรอบโครงการก่อสร้างอาคาร อีกทั้งเจ้าของโครงการและผู้รับเหมาก่อสร้างสามารถนำระบบ ตรวจวัดฝุ่นละอองนี้ไปใช้ในการวัดปริมาณและตรวจสอบการกระจายตัวของฝุ่นละออง และนำผลที่ได้ไปชี้แจงและแสดงให้หน่วยงานที่เกี่ยวข้อง ประชาชนและชุมชนที่อยู่บริเวณโดยรอบรับรู้ได้อย่าง ชัดเจน



บทที่ 5

การประยุกต์ใช้ระบบตรวจวัดฝุ่นละอองในโครงการก่อสร้างอาคารกับกรณีศึกษา

บทนี้เป็น การประยุกต์ใช้ระบบตรวจวัดฝุ่นละอองในโครงการก่อสร้างอาคารกับกรณีศึกษา เพื่อทดสอบระบบที่ใช้ในการวัดปริมาณฝุ่นละอองกับโครงการก่อสร้างบ้านจัดสรรจำนวน 2 โครงการ และโครงการก่อสร้างอาคารจำนวน 2 โครงการ ซึ่งมีการก่อสร้างอยู่ในขั้นตอนของงานโครงสร้าง หรือ งานสถาปัตยกรรม โดยเปรียบเทียบปริมาณฝุ่นละอองที่เกิดขึ้นจากการก่อสร้าง รวมทั้งวิเคราะห์ สาเหตุและปัญหาฝุ่นละอองที่ส่งผลกระทบต่อบริเวณชุมชนโดยรอบ

5.1 ขั้นตอนการประยุกต์ใช้ระบบตรวจวัดฝุ่นละอองกับกรณีศึกษา

กระบวนการประยุกต์ระบบตรวจวัดฝุ่นละอองร่วมกับกรณีศึกษา โครงการก่อสร้างบ้านจัดสรรและอาคาร มีขั้นตอนดังนี้

1. สืบค้นและเก็บข้อมูลบริเวณโดยรอบโครงการก่อสร้างที่ต้องการศึกษา โดยเก็บข้อมูลต่างๆ ดังนี้ ข้อมูลทั่วไปของโครงการ กิจกรรมก่อสร้างที่กำลังดำเนินการอยู่ บริเวณที่กิจกรรมก่อสร้างนั้นกำลังดำเนินการอยู่ ค่าปริมาณฝุ่นละออง (PM2.5 และ PM10) ค่าความชื้นสัมพัทธ์ และอุณหภูมิ ในสภาพอากาศปกติ
2. ทำการวัดความเร็วลมโดยรอบโครงการก่อสร้าง โดยใช้เครื่องวัดความเร็วลมและอุณหภูมิ (AS816) เนื่องจากความเร็วของลมขณะทำการวัดฝุ่นละอองต้องไม่เกิน 5 เมตรต่อวินาที [Pasquill (1983)]
3. นำเซ็นเซอร์ตรวจวัดฝุ่นละออง (PM2.5 และ PM10) เซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิและความชื้น เซ็นเซอร์กำหนดตำแหน่งบนพื้นโลก (GPS) และตัวส่งสัญญาณข้อมูล มาใส่ในตะกร้า และนำตะกร้าไปผูกติดกับอากาศยานไร้คนขับ (โดรน) โดยใช้เชือกซึ่งความยาวเชือกที่วัดจากอากาศยานไร้คนขับถึงตะกร้าที่ประกอบไปด้วยอุปกรณ์คือเซ็นเซอร์ต่างๆ มีความยาวอย่างน้อย 80 เซนติเมตร ซึ่งความสูงที่วัดค่าปริมาณฝุ่นละอองกับกรณีศึกษาที่จะแสดงในบทนี้คือความสูงจากพื้นถึงตะกร้า
4. ต่อตัวรับสัญญาณข้อมูล (โมดูลสื่อสารไร้สายรุ่น NRF24L01) กับเครื่องคอมพิวเตอร์ และทำการเปิดโปรแกรม Arduino IDE, Microsoft Excel และ Autodesk Revit (BIM) โดยโปรแกรมต่างๆจะทำงานตามคำสั่งที่ได้ระบุไว้ในบทที่ 4
5. นำอากาศยานไร้คนขับ (โดรน) ที่ทำการผูกตะกร้าไว้ ซึ่งในตะกร้าจะประกอบไปด้วยเซ็นเซอร์ต่างๆ ตัวส่งสัญญาณข้อมูลและถ่าน ไปบินวัดค่าปริมาณฝุ่นละออง (PM2.5

และ PM10) อุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ และตำแหน่งที่ทำการวัด โดยจะทำการบินรอบๆโครงการก่อสร้างบ้านหรืออาคารที่กำลังมีกิจกรรมก่อสร้าง

6. เซ็นเซอร์จะส่งค่าต่างๆมายังคอมพิวเตอร์ของผู้วิจัยทันที เพื่อนำค่าปริมาณฝุ่นละอองที่วัดได้และค่าตำแหน่ง (พิกัด) มาทำการพล็อตกราฟการกระจายตัว (Model 3 มิติ) แบบ Real time ใน Building Information Modeling (BIM) หากพบว่าตำแหน่งที่วัดเดียวกัน (ละติจูด ลองจิจูด และความสูงเท่ากัน) มีข้อมูลหลายค่า ผู้วิจัยได้กำหนดให้ข้อมูลที่จะนำไปพล็อตกราฟการกระจายตัว คือค่าเฉลี่ยของข้อมูลทั้งหมด ซึ่งผู้วิจัยกำหนดจุดสีแทนค่าปริมาณฝุ่นละออง โดยอ้างอิงจากผลกระทบต่อสุขภาพอนามัยของกรมควบคุมมลพิษดังตารางที่ 4.2 คือ
 - เมื่อค่าปริมาณฝุ่นละออง PM2.5 มีค่าเท่ากับ 0-25 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ หรือค่าปริมาณฝุ่นละออง PM10 มีค่าเท่ากับ 0-50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ จะแสดงเป็นสีฟ้า
 - เมื่อค่าปริมาณฝุ่นละออง PM2.5 มีค่าเท่ากับ 26-37 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ หรือค่าปริมาณฝุ่นละออง PM10 มีค่าเท่ากับ 51-80 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ จะแสดงเป็นสีเขียว
 - เมื่อค่าปริมาณฝุ่นละออง PM2.5 มีค่าเท่ากับ 38-50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ หรือค่าปริมาณฝุ่นละออง PM10 มีค่าเท่ากับ 81-120 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ จะแสดงเป็นสีเหลือง
 - เมื่อค่าปริมาณฝุ่นละออง PM2.5 มีค่าเท่ากับ 51-90 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ หรือค่าปริมาณฝุ่นละออง PM10 มีค่าเท่ากับ 121-180 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ จะแสดงเป็นสีส้ม
 - เมื่อค่าปริมาณฝุ่นละออง PM2.5 มีค่าเท่ากับ 91 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ขึ้นไป หรือค่าปริมาณฝุ่นละออง PM10 มีค่าเท่ากับ 181 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ขึ้นไป จะแสดงเป็นสีแดง
7. นำแบบจำลอง Model 3 มิติ มาประยุกต์กับเทคโนโลยี Augmented Reality (AR) เพื่อให้สามารถแสดงผลผ่านอุปกรณ์โทรศัพท์มือถือ หรือ แท็บเล็ต ทำให้ในจอภาพกลายเป็นวัตถุ 3 มิติ ลอยอยู่เหนือพื้นผิวจริง ทำให้เห็นภาพเสมือนอยู่ในสภาพแวดล้อมจริง
8. เปรียบเทียบปริมาณฝุ่นละอองที่เกิดขึ้นจากการก่อสร้าง รวมทั้งวิเคราะห์สาเหตุและปัญหาการกระจายตัวของฝุ่นละอองจากโครงการก่อสร้างอาคารไปยังพื้นที่บริเวณโดยรอบ

5.2 ผลการประยุกต์ใช้

งานวิจัยนี้ตรวจสอบผลการประยุกต์ใช้ระบบตรวจวัดฝุ่นละอองในโครงการก่อสร้างอาคารกับโครงการกรณีศึกษา 4 โครงการ คือโครงการก่อสร้างบ้านจัดสรรจำนวน 2 โครงการ และโครงการก่อสร้างอาคารจำนวน 2 โครงการ

5.2.1 ผลการประยุกต์ใช้กับโครงการกรณีศึกษาที่ 1

กรณีศึกษาที่ 1 เป็นโครงการก่อสร้างบ้านจัดสรร ซึ่งเป็นการก่อสร้างบ้านพักอาศัย 2 ชั้น ซึ่งกิจกรรมก่อสร้างขณะนั้นเป็นงานสถาปัตยกรรม อยู่บริเวณชั้น 1 (บริเวณตรงกลางของบ้าน) และชั้น 2 (บริเวณด้านหน้าของบ้าน) เป็นกิจกรรมสกัด เซาะร่องผนัง เพื่อทำบล็อกร้างสำหรับงานไฟฟ้า และเดินสายไฟฟ้า



รูปที่ 5.1 รูปภาพแสดงโครงการกรณีศึกษาที่ 1 ซึ่งเป็นการก่อสร้างบ้านพักอาศัย 2 ชั้น



รูปที่ 5.2 รูปภาพแสดงกิจกรรมก่อสร้างในโครงการกรณีศึกษาที่ 1 (กิจกรรมสกัด เซาะร่องผนัง)

พบว่าฝุ่นละออง (PM 2.5) เท่ากับ $144 \mu\text{g}/\text{m}^3$



รูปที่ 5.3 รูปภาพแสดงกิจกรรมเจาะร่องผนังเพื่อเดินสายไฟฟ้า
ทำการวัดค่าปริมาณฝุ่นละออง (PM2.5 และ PM10) ค่าความชื้นสัมพัทธ์ และอุณหภูมิ ใน
สภาพอากาศปกติ (บริเวณที่ไม่ได้รับผลกระทบจากกิจกรรมก่อสร้าง) พบว่า

- ค่าปริมาณฝุ่นละออง PM2.5 เท่ากับ 7-16 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ และ PM10 เท่ากับ 7-18 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
- ค่าความชื้นสัมพัทธ์เท่ากับ 50-59 %
- อุณหภูมิเท่ากับ 32-36 องศาเซลเซียส
- ความเร็วลมเท่ากับ 0-1 เมตรต่อวินาที



รูปที่ 5.4 รูปภาพแสดงขณะทำการวัดความเร็วลมและอุณหภูมิโดยรอบโครงการศึกษากรณีที่ 1

	A	C	D	E	F
1	TIME	PM2.5	PM10.0	hum	temp
2	11:26:38 AM	14	14	56	
3	11:26:39 AM	14	14	56	
4	11:27:18 AM	12	12	57	33
5	11:27:32 AM	12	12	57	33
6	11:27:34 AM	12	12	58	33
7	11:29:01 AM	13	13	58	33
8	11:29:03 AM	13	13	57	32
9	11:29:06 AM	13	14	58	32
10	11:29:10 AM	14	16	59	33
11	11:29:14 AM	15	17	59	33
12	11:29:15 AM	16	18	59	33

TIME	PM2.5 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	PM10.0 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	ความชื้นสัมพัทธ์ (%)	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)
11:26:38 AM	14	14	56	33
11:26:39 AM	14	14	56	33
11:27:18 AM	12	12	57	33
11:27:32 AM	12	12	57	33
11:27:34 AM	12	12	58	33
11:29:01 AM	13	13	58	33
11:29:03 AM	13	13	57	32
11:29:06 AM	13	14	58	32
11:29:10 AM	14	16	59	33
11:29:14 AM	15	17	59	33
11:29:15 AM	16	18	59	33

ตารางที่ 5.1 ตารางแสดงผลการวัดค่าปริมาณฝุ่นละออง (PM2.5 และ PM10) ค่าความชื้นสัมพัทธ์ อุณหภูมิ และเวลาที่ทำการวัด ในสภาพอากาศปกติ (โครงการศึกษากรณีที่ 1) ที่แสดงผลในโปรแกรม Microsoft Excel

หลังจากนั้นทำการบินวัดปริมาณฝุ่นละอองบริเวณโครงการก่อสร้าง ดังรูปที่ 5.5 ขณะที่มีการทำกิจกรรมสกัด เขาะร่องผนัง รอบๆบริเวณบ้านโดยใช้เทคโนโลยีอากาศยานไร้คนขับ (โดรน) โดยบินทั้งหมด 4 ระดับความสูงคือ 3 4.5 6 และ 8 เมตร ตามลำดับ เนื่องจากที่ความสูงมากกว่า 8 เมตร ค่าปริมาณฝุ่นละออง (PM2.5 และ PM10) ค่าความชื้นสัมพัทธ์ และอุณหภูมิ มีค่าใกล้เคียงกับค่าที่วัดได้จากสภาพอากาศปกติ เพราะกิจกรรมสกัด เขาะร่องผนังนั้นอยู่บริเวณชั้น 1 และ 2 (ความสูงของกิจกรรมก่อสร้างที่ชั้น 2 ประมาณ 5 เมตร) ฝุ่นละอองจึงกระจายไปไม่เกิน 8 เมตร จากการบินสำรวจและวัดค่าพบว่า



รูปที่ 5.5 รูปภาพแสดงบริเวณที่ทำการบินวัดปริมาณฝุ่นละอองในโครงการกรณีศึกษาที่ 1

1. บริเวณด้านข้าง (หมายเลข 2 และ 4 ในรูปที่ 5.5) และบริเวณด้านหลังของบ้าน (หมายเลข 3 ในรูปที่ 5.5) ที่ทุกระดับความสูง (3 4.5 6 และ 8 เมตร) นั้น มีค่าปริมาณฝุ่นละออง PM2.5 อยู่ระหว่าง 12-16 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ และ PM10 อยู่ระหว่าง 12-18 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ค่าความชื้นสัมพัทธ์เท่ากับ 51-59 % อุณหภูมิเท่ากับ 33-36 องศาเซลเซียส และความเร็วลมเท่ากับ 0-1 เมตรต่อวินาที ซึ่งพบว่าค่าปริมาณฝุ่นละออง (PM2.5 และ PM10) ค่าความชื้นสัมพัทธ์ และอุณหภูมิ มีค่าใกล้เคียงกับค่าที่วัดได้จากสภาพอากาศปกติ เนื่องจากกิจกรรมก่อสร้าง (กิจกรรมสกัดและเซาะร่องผนัง) อยู่บริเวณชั้น 1 บริเวณตรงกลางของบ้าน และชั้น 2 บริเวณด้านหน้าของบ้าน (รูปดาวในรูปที่ 5.5) ทำให้บริเวณด้านข้างและด้านหลังนั้นไม่ได้รับผลกระทบจากปัญหาฝุ่นละออง
2. บริเวณด้านหน้า (หมายเลข 1 ในรูปที่ 5.5) ที่ทุกระดับความสูง (3 4.5 6 และ 8 เมตร) นั้น มีค่าความชื้นสัมพัทธ์เท่ากับ 51-59 % อุณหภูมิเท่ากับ 33-36 องศาเซลเซียส และความเร็วลมเท่ากับ 0-1 เมตรต่อวินาที ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่วัดได้จากสภาพอากาศปกติ
3. บริเวณด้านหน้า (หมายเลข 1 ในรูปที่ 5.5) ที่ระดับความสูง 3 และ 8 เมตร นั้นมีค่าปริมาณฝุ่นละออง PM2.5 อยู่ระหว่าง 12-17 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ และ PM10 อยู่ระหว่าง 12-18 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่วัดได้จากสภาพอากาศปกติ เนื่องจากกิจกรรมก่อสร้าง (กิจกรรมสกัดและเซาะร่องผนัง) อยู่บริเวณชั้น 1 บริเวณตรงกลางของบ้าน จากการสำรวจโดยการเดินวัดบริเวณรอบๆกิจกรรมก่อสร้าง พบว่าฝุ่นจากกิจกรรมก่อสร้างจะกระจายอยู่รอบๆบริเวณที่มีกิจกรรมก่อสร้าง รัศมีประมาณ 5-6 เมตร หลังจากนั้นฝุ่นจะกระจายหายไป และกิจกรรมก่อสร้างที่บริเวณชั้น 2 บริเวณด้านหน้าของบ้าน (รูปดาวใน

รูปที่ 5.5) ซึ่งความสูงของกิจกรรมก่อสร้างที่ชั้น 2 อยู่ที่ประมาณ 5 เมตร ทำให้ฝุ่นกระจายอยู่ที่ระดับ 4-6 เมตร ดังนั้นบริเวณด้านหน้า (หมายเลข 1 ในรูปที่ 5.5) ที่ระดับความสูง 3 และ 8 เมตร จึงมีค่าปริมาณฝุ่นละอองใกล้เคียงกับค่าที่วัดได้จากสภาพอากาศปกติ



รูปที่ 5.6 รูปภาพแสดงขณะทำการบินวัดปริมาณฝุ่นละอองบริเวณด้านหน้าของบ้านที่ทำการก่อสร้าง (โครงการกรณีศึกษาที่ 1)



รูปที่ 5.7 รูปภาพแสดงขณะทำการบินวัดปริมาณฝุ่นละอองบริเวณด้านข้างของบ้านที่ทำการก่อสร้าง (โครงการกรณีศึกษาที่ 1)

TIME	PM2.5 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	PM10.0 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	ความชื้น สัมพัทธ์ (%)	อุณหภูมิ (องศา เซลเซียส)	ละติจูด	ลองจิจูด
11:38:06 AM	50	72	53	35	13.79403798	100.34076762
11:38:09 AM	44	61	53	35	13.79403783	100.34079537
11:38:17 AM	44	59	54	35	13.79403768	100.34082312
11:38:21 AM	43	61	51	35	13.79403753	100.34085087
11:38:27 AM	52	76	52	35	13.79403738	100.34087861
11:38:59 AM	48	65	54	36	13.79403722	100.34090636
11:39:04 AM	61	79	52	36	13.79405154	100.34076770
11:39:16 AM	62	83	52	36	13.79405139	100.34079545
11:39:19 AM	64	85	50	36	13.79405124	100.34082319
11:39:21 AM	66	86	51	36	13.79405109	100.34085094
11:39:25 AM	69	88	51	36	13.79405094	100.34087869
11:39:29 AM	68	87	52	36	13.79405078	100.34090644
11:43:42 AM	30	36	52	35	13.79402442	100.34076754
11:43:47 AM	34	47	53	35	13.79402427	100.34079529
11:43:52 AM	35	48	52	35	13.79402412	100.34082304
11:43:57 AM	31	44	52	35	13.79402397	100.34085079
11:44:02 AM	32	41	53	35	13.79402382	100.34087854
11:44:07 AM	32	36	53	35	13.79402366	100.34090628
11:44:12 AM	66	88	53	35	13.79403798	100.34076762
11:44:17 AM	67	97	53	35	13.79403783	100.34079537
11:44:22 AM	68	100	54	35	13.79403768	100.34082312
11:44:27 AM	67	97	51	35	13.79403753	100.34085087
11:44:32 AM	68	100	52	35	13.79403738	100.34087861

ตารางที่ 5.2 ตารางแสดงตัวอย่างเวลาที่ทำการวัด ค่าปริมาณฝุ่นละออง (PM2.5 และ PM10) ค่าความชื้นสัมพัทธ์ อุณหภูมิ ละติจูด และลองจิจูด บริเวณด้านหน้าของบ้าน (โครงการศึกษากรณีที่ 1) ซึ่งค่าปริมาณฝุ่นละอองมีค่ามากกว่าปกติ ซึ่งทำการบินวัดโดยอากาศยานไร้คนขับ

4. บริเวณด้านหน้า (หมายเลข 1 ในรูปที่ 5.5) ของบ้านที่ระดับความสูง 4.5 และ 6 เมตร นั้นมีค่าปริมาณฝุ่นละออง PM2.5 และ PM10 ดังตารางที่ 5.3 ซึ่งพบว่าค่าปริมาณฝุ่นละอองมีค่ามากบริเวณชั้น 2 ด้านหน้าของบ้าน เนื่องจากมีกิจกรรมก่อสร้างที่บริเวณชั้น 2 บริเวณด้านหน้าของบ้าน (รูปดาวในรูปที่ 5.5) ซึ่งความสูงของกิจกรรมก่อสร้างที่ชั้น 2 อยู่ที่ประมาณ 5 เมตร นอกจากนั้นยังมีลมพัดมาทางบริเวณด้านหน้าของบ้าน ทำให้ฝุ่นละอองถูกพัดพามาบริเวณด้านหน้าของบ้านเป็นจำนวนมาก

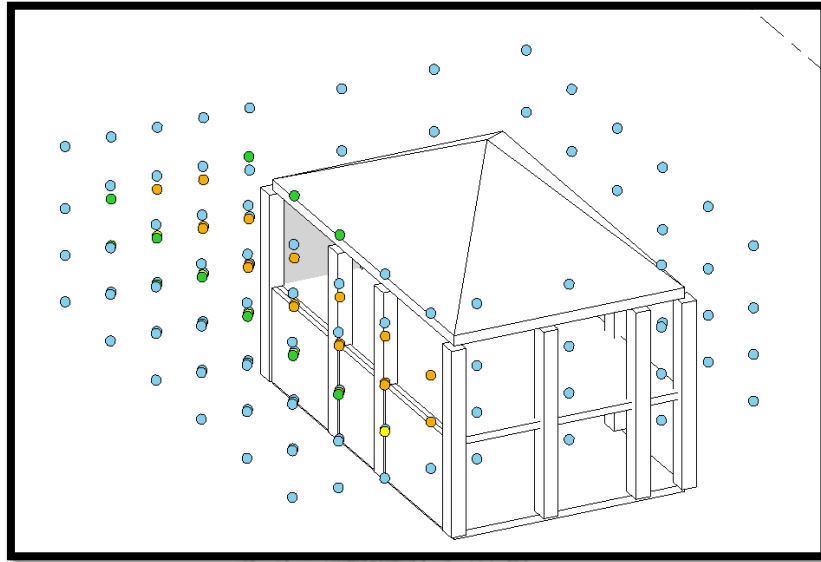
ระยะห่างจากด้านหน้า ของตัวบ้าน (เมตร)	ความสูง (เมตร)	ค่าปริมาณฝุ่นละออง PM2.5 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	ค่าปริมาณฝุ่นละออง PM10 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
1.5	4.5	61 - 69	79 - 88
3	4.5	43 - 52	59 - 76
4.5	4.5	20 - 36	20 - 45
1.5	6	64 - 86	85 - 120
3	6	66 - 68	88 - 100
4.5	6	30 - 35	36 - 48

ตารางที่ 5.3 ตารางแสดงสรุปค่าปริมาณฝุ่นละออง PM2.5 และ PM10 ที่บริเวณด้านหน้าของบ้านที่ระดับความสูง 4.5 และ 6 เมตร

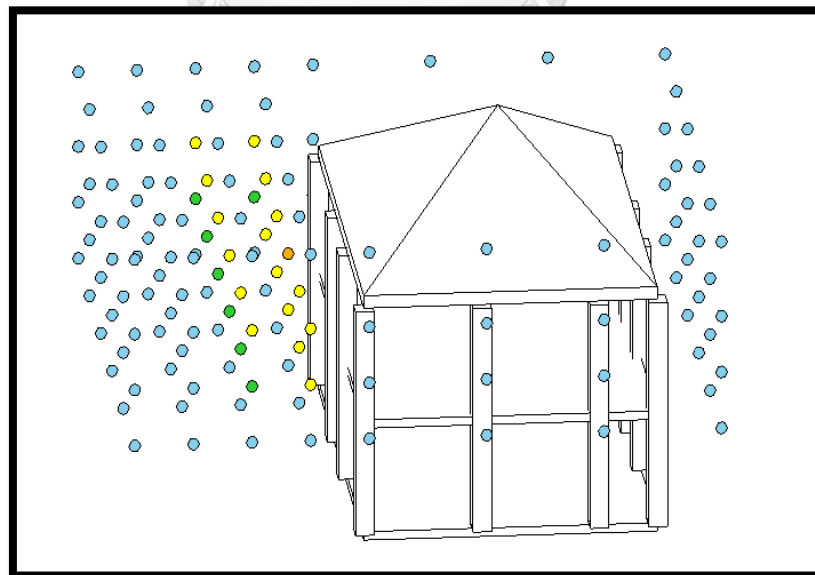


รูปที่ 5.8 รูปภาพแสดงขณะทำการบิวดัปริมาณฝุ่นละออง ซึ่งขณะทำการวัดมีลมพัดมาทางบริเวณด้านหน้าของบ้าน ทำให้ฝุ่นละอองถูกพัดพามาบริเวณด้านหน้าของบ้านเป็นจำนวนมาก

นำค่าปริมาณฝุ่นละออง (PM2.5 และ PM10) ที่วัดได้และค่าตำแหน่ง (พิกัด) มาทำการพล็อตกราฟการกระจายตัว (Model 3 มิติ) ใน Building Information Modeling (โปรแกรม Autodesk Revit) ดังรูปที่ 5.9 และรูปที่ 5.10 ซึ่งผู้วิจัยกำหนดจุดสีแทนค่าปริมาณฝุ่นละออง โดยอ้างอิงจากผลกระทบต่อสุขภาพอนามัยของกรมควบคุมมลพิษดังตารางที่ 4.2

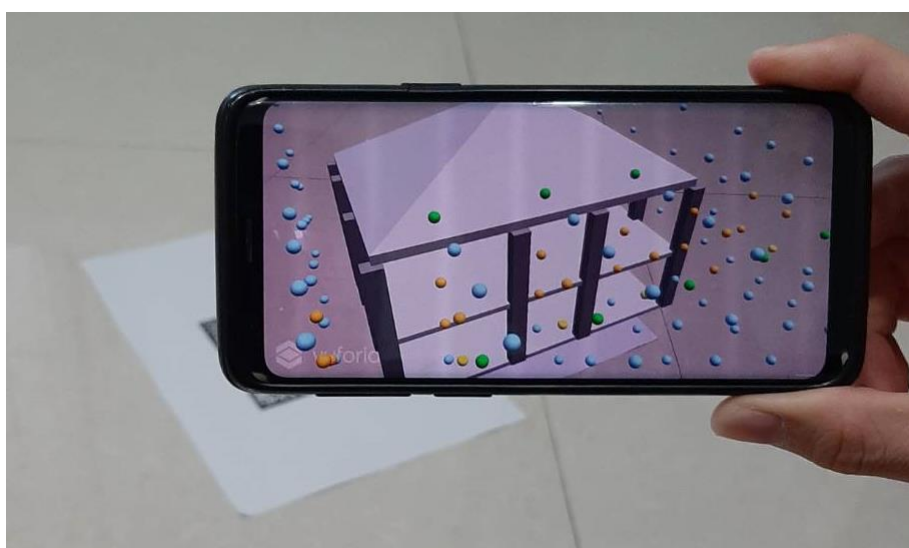


รูปที่ 5.9 รูปภาพแสดงการกระจายตัวของฝุ่นละออง PM2.5 จากโครงการศึกษาระดับที่ 1 ไปยังพื้นที่บริเวณโดยรอบ

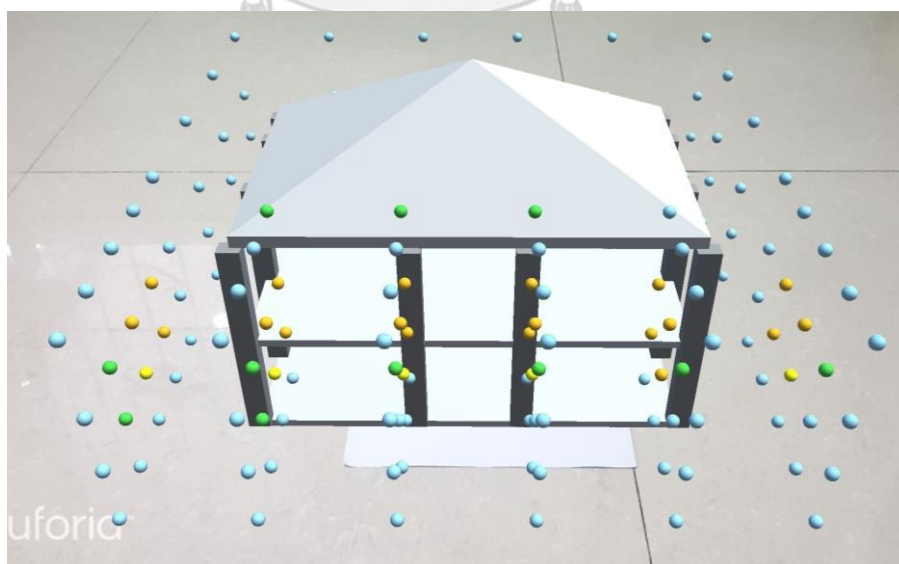


รูปที่ 5.10 รูปภาพแสดงการกระจายตัวของฝุ่นละออง PM10 จากโครงการศึกษาระดับที่ 1 ไปยังพื้นที่บริเวณโดยรอบ

หลังจากนั้นนำแบบจำลอง Model 3 มิติ มาประยุกต์กับเทคโนโลยี Augmented Reality (AR) เพื่อให้สามารถแสดงผลผ่านอุปกรณ์โทรศัพท์มือถือ หรือ แท็บเล็ต ทำให้เห็นภาพเสมือนอยู่ในสภาพแวดล้อมจริง ซึ่งจะช่วยให้เห็นการกระจายตัวของฝุ่นละอองไปยังพื้นที่โดยรอบอย่างชัดเจน ดังรูปที่ 5.11 และรูปที่ 5.12

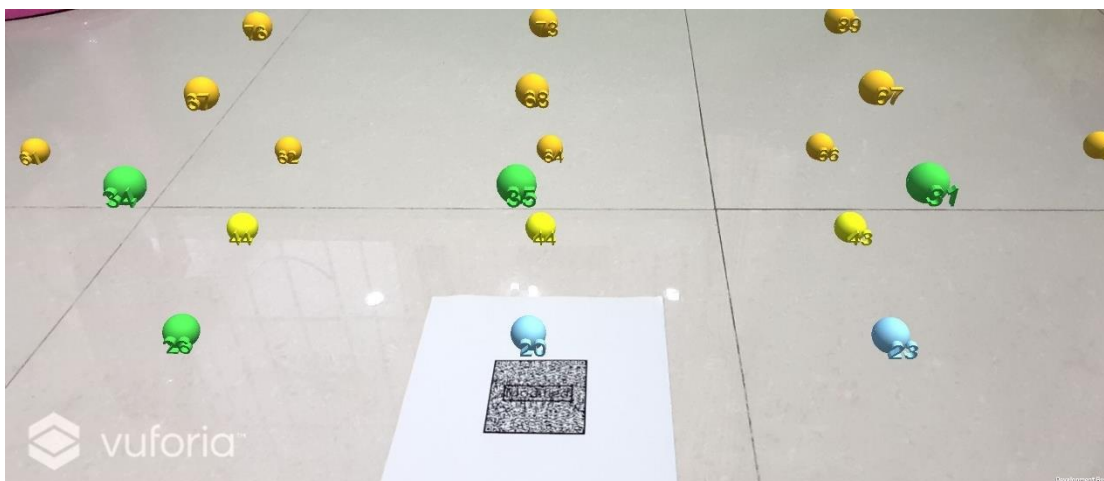


รูปที่ 5.11 รูปภาพแสดงขณะที่ผู้วิจัยหันกล้องไปยังบริเวณ QR Code ทำให้แสดงผล Model 3 มิติ โครงการศึกษาระดับที่ 1 บนมาร์คเกอร์



รูปที่ 5.12 รูปภาพแสดง Model 3 มิติบนมาร์คเกอร์ โครงการศึกษาระดับที่ 1 ซึ่งจะช่วยให้เห็นการกระจายตัวของฝุ่นละอองบริเวณโดยรอบของบ้าน

นอกจากนั้นผู้วิจัยได้นำไปประยุกต์โดยแสดงการกระจายตัวของฝุ่นละออง โดยแสดงค่าปริมาณฝุ่นละอองเฉพาะบริเวณด้านหน้าของบ้าน ดังรูปที่ 5.13 เพื่อให้เห็นความชัดเจนและสามารถนำไปวิเคราะห์ต่อไป เนื่องจากด้านหน้าของบ้านมีค่าปริมาณฝุ่นละอองที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากมีกิจกรรมก่อสร้าง (กิจกรรมสก๊ต เซาะร่องผนัง) ที่บริเวณชั้น 2 บริเวณด้านหน้าของบ้าน



รูปที่ 5.13 รูปภาพแสดงค่าปริมาณฝุ่นละอองเฉพาะบริเวณด้านหน้าของบ้าน (โครงการศึกษาระดับที่ 1) โดยใช้เทคโนโลยี Augmented Reality (AR)

จากผลการประยุกต์ใช้ระบบตรวจวัดฝุ่นละอองจากโครงการก่อสร้างอาคาร กับโครงการศึกษาระดับที่ 1 โดยผลการสำรวจที่ได้จากโปรแกรม Microsoft Excel และ Model 3 มิติ ที่ได้จากเทคโนโลยี Building Information Modeling (BIM) และเทคโนโลยี Augmented Reality (AR) สามารถสรุปและวิเคราะห์ปัญหาฝุ่นละอองได้ว่า กิจกรรมสก๊ต เซาะร่องผนัง เพื่อทำบล็อกสำหรับงานไฟฟ้า และเดินสายไฟฟ้า ทำให้ค่าปริมาณฝุ่นละออง PM_{2.5} และ PM₁₀ เพิ่มมากขึ้น (ค่าปริมาณฝุ่นละออง PM_{2.5} บริเวณชั้น 2 ด้านหน้าของบ้าน มีค่าอยู่ระหว่าง 20-86 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ และ PM₁₀ มีค่าอยู่ระหว่าง 20-120 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) โดยค่าปริมาณฝุ่นละอองจะมีค่ามากบริเวณที่มีกิจกรรมก่อสร้าง และที่ระยะห่างจากกิจกรรมก่อสร้างค่าปริมาณฝุ่นละอองจะค่อยๆลดลงจนมีค่าเท่ากับสภาพอากาศปกติ โดยจากการสำรวจพบว่าฝุ่นจากกิจกรรมก่อสร้างจะกระจายอยู่รอบๆบริเวณที่มีกิจกรรมก่อสร้าง รัศมีประมาณ 5-6 เมตรจากกิจกรรมก่อสร้าง หลังจากนั้นที่ระยะมากกว่า 5-6 เมตรจากกิจกรรมก่อสร้าง ฝุ่นละอองจะกระจายหายไปจนค่าปริมาณฝุ่นละอองมีค่าเท่ากับสภาพอากาศปกติ โดยในโครงการกรณีศึกษาที่ 1 นั้นกิจกรรมก่อสร้างคือกิจกรรมสก๊ตและเซาะร่องผนังซึ่งอยู่บริเวณชั้น 1 บริเวณตรงกลางของบ้าน และชั้น 2 บริเวณด้านหน้าของบ้าน ทำให้บริเวณด้านข้างและด้านหลังของบ้านนั้น

ไม่ได้รับผลกระทบจากปัญหาฝุ่นละออง (ค่าปริมาณฝุ่นละอองมีค่าเท่ากับค่าปริมาณฝุ่นละอองในสภาพอากาศปกติ) ส่วนบริเวณด้านหน้าของบ้านที่ระดับความสูง 3 และ 8 เมตรนั้น ค่าปริมาณฝุ่นละออง PM2.5 และ PM10 มีค่าใกล้เคียงกับค่าที่วัดได้จากสภาพอากาศปกติ และบริเวณด้านหน้าของบ้านที่ระดับความสูง 4.5 และ 6 เมตรนั้นค่าปริมาณฝุ่นละออง PM2.5 และ PM10 มีค่ามากกว่าบริเวณชั้น 2 ด้านหน้าของบ้าน เนื่องจากมีกิจกรรมก่อสร้างที่บริเวณชั้น 2 บริเวณด้านหน้าของบ้าน ซึ่งความสูงของกิจกรรมก่อสร้างที่ชั้น 2 อยู่ที่ประมาณ 5 เมตร นอกจากนั้นยังมีลมพัดมาทางบริเวณด้านหน้าของบ้าน ทำให้ฝุ่นละอองถูกพัดพามาบริเวณด้านหน้าของบ้านเป็นจำนวนมาก

5.2.2 ผลการประยุกต์ใช้กับโครงการกรณีศึกษาที่ 2

กรณีศึกษาที่ 2 เป็นโครงการก่อสร้างบ้านจัดสรร ซึ่งเป็นการก่อสร้างบ้านพักอาศัย 2 ชั้น พื้นที่ประมาณ 108 ตารางเมตร ซึ่งกิจกรรมก่อสร้างขณะนั้นอยู่บริเวณชั้น 1 ของบ้านโดยเป็นงานสถาปัตยกรรม คือกิจกรรมก่ออิฐ ฉาบผนัง



รูปที่ 5.14 รูปภาพแสดงโครงการกรณีศึกษาที่ 2 ซึ่งเป็นการก่อสร้างบ้านพักอาศัย 2 ชั้น

ทำการวัดค่าปริมาณฝุ่นละออง (PM2.5 และ PM10) ค่าความชื้นสัมพัทธ์ และอุณหภูมิ ในสภาพอากาศปกติ (บริเวณที่ไม่ได้รับผลกระทบจากกิจกรรมก่อสร้าง) พบว่า

- ค่าปริมาณฝุ่นละออง PM2.5 เท่ากับ 1-4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ และ PM10 เท่ากับ 4-6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
- ค่าความชื้นสัมพัทธ์เท่ากับ 48-50 %
- อุณหภูมิเท่ากับ 36-37 องศาเซลเซียส
- ความเร็วลมเท่ากับ 0-1 เมตรต่อวินาที



รูปที่ 5.15 รูปภาพแสดงกิจกรรมก่อสร้างในโครงการกรณีศึกษาที่ 2 (กิจกรรมก่ออิฐ)



รูปที่ 5.16 รูปภาพแสดงกิจกรรมก่อสร้างในโครงการกรณีศึกษาที่ 2 (กิจกรรมฉาบผนัง)

CHULALONGKORN UNIVERSITY

TIME	PM2.5 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	PM10.0 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	ความชื้นสัมพัทธ์ (%)	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)
3:44:33 PM	4	5	50	37
3:44:43 PM	4	4	50	37
3:44:45 PM	3	4	50	37
3:44:47 PM	3	4	50	37

ตารางที่ 5.4 ตารางแสดงผลการวัดค่าปริมาณฝุ่นละออง (PM2.5 และ PM10) ค่าความชื้นสัมพัทธ์ อุณหภูมิ และเวลาที่ทำการวัด ในสภาพอากาศปกติ (โครงการกรณีศึกษาที่ 2)



รูปที่ 5.17 รูปภาพแสดงขณะทำการวัดความเร็วลมและอุณหภูมิโดยรอบโครงการศึกษาระดับที่ 2



รูปที่ 5.18 รูปภาพแสดงขณะทำการวัดค่าปริมาณฝุ่นละออง PM 2.5 ในสภาพอากาศปกติ โดยรอบโครงการศึกษาระดับที่ 2 โดยใช้เครื่องวัดปริมาณฝุ่นละอองแบบพกพา (Xiaomi Mi Smart Air Quality Monitor PM2.5 Detector)

หลังจากนั้นทำการบินวัดปริมาณฝุ่นละอองบริเวณโครงการก่อสร้าง ขณะที่มีการทำกิจกรรมก่อสร้าง ฉาบผนัง รอบๆบริเวณบ้านโดยใช้เทคโนโลยีอากาศยานไร้คนขับ (โดรน) โดยบินทั้งหมด 3

ระดับความสูงคือ 3 6 และ 9 เมตร ตามลำดับ เนื่องจากกิจกรรมก่อสร้างขณะนั้นอยู่บริเวณชั้น 1 ของบ้าน จากการบินสำรวจและวัดค่าพบว่าค่าต่างๆเป็นไปตามตารางที่ 5.5 คือ

- ค่าปริมาณฝุ่นละออง PM2.5 เท่ากับ 2-6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ และ PM10 เท่ากับ 3-7 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
- ค่าความชื้นสัมพัทธ์เท่ากับ 48-50 %
- อุณหภูมิเท่ากับ 36-37 องศาเซลเซียส
- ความเร็วลมเท่ากับ 0-1 เมตรต่อวินาที

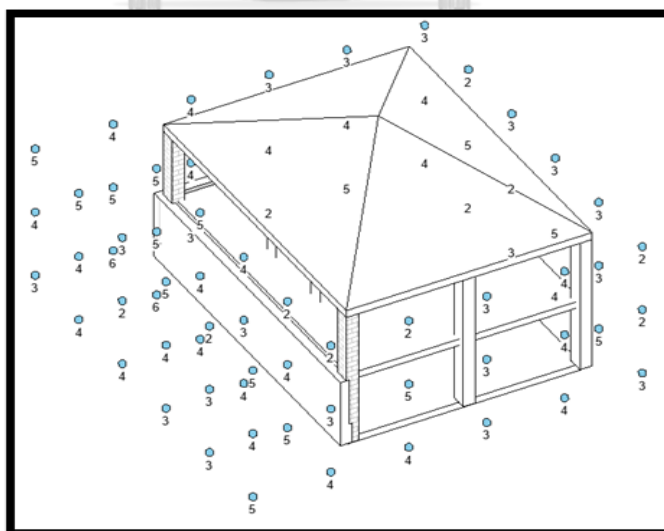
TIME	PM2.5 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	PM10.0 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	ความชื้น สัมพัทธ์ (%)	อุณหภูมิ (องศา เซลเซียส)	ละติจูด	ลองจิจูด
3:45:03 PM	6	8	50	37	14.45690806	100.10320469
3:45:06 PM	6	8	50	37	14.45690793	100.10323252
3:45:30 PM	4	7	49	37	14.45690780	100.10326035
3:45:33 PM	2	5	49	37	14.45690767	100.10328818
3:45:35 PM	4	6	49	37	14.45690754	100.10331601
3:45:37 PM	4	8	49	37	14.45690740	100.10334384
3:45:39 PM	3	6	49	37	14.45693518	100.10320482
3:45:41 PM	3	7	49	37	14.45693505	100.10323265
3:45:45 PM	4	6	49	37	14.45693492	100.10326048
3:45:50 PM	3	6	49	37	14.45693479	100.10328832
3:46:00 PM	4	8	50	37	14.45693465	100.10331615
3:46:10 PM	4	7	50	37	14.45693452	100.10334398
3:46:21 PM	3	7	50	37	14.45696230	100.10320496
3:46:35 PM	5	7	50	37	14.45696217	100.10323279
3:46:49 PM	5	6	50	37	14.45696204	100.10326062
3:47:01 PM	3	6	50	37	14.45696191	100.10328845

ตารางที่ 5.5 ตารางแสดงตัวอย่างเวลาที่ทำการวัด ค่าปริมาณฝุ่นละออง (PM2.5 และ PM10) ค่าความชื้นสัมพัทธ์ อุณหภูมิ ละติจูด และลองจิจูด บริเวณด้านหน้าของบ้าน (โครงการศึกษากรณีที่ 2) ซึ่งทำการบินวัดโดยอากาศยานไร้คนขับ

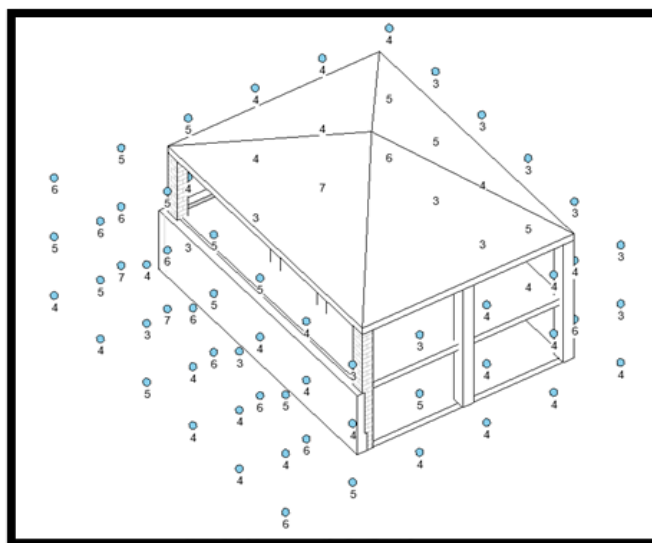


รูปที่ 5.19 รูปภาพแสดงขณะทำการบิณวัดปริมาณฝุ่นละอองบริเวณด้านหน้าของบ้านที่ทำการก่อสร้าง (โครงการกรณีศึกษาที่ 2)

นำค่าปริมาณฝุ่นละออง (PM2.5 และ PM10) ที่วัดได้และค่าตำแหน่ง (พิกัด) มาทำการพล็อตกราฟการกระจายตัว (Model 3 มิติ) ใน Building Information Modeling (โปรแกรม Autodesk Revit) ดังรูปที่ 5.20 และรูปที่ 5.21 ซึ่งผู้วิจัยกำหนดจุดสี่แทนค่าปริมาณฝุ่นละออง โดยอ้างอิงจากผลกระทบต่อสุขภาพอนามัยของกรมควบคุมมลพิษดังตารางที่ 4.2 พบว่าค่าปริมาณฝุ่นละออง PM2.5 และ PM10 เป็นสีฟ้าทั้งหมด เนื่องจากไม่เกินมาตรฐานที่กำหนด (สีฟ้า นั้นค่า PM2.5 อยู่ระหว่าง 0-25 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ และ PM10 อยู่ระหว่าง 0-50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)

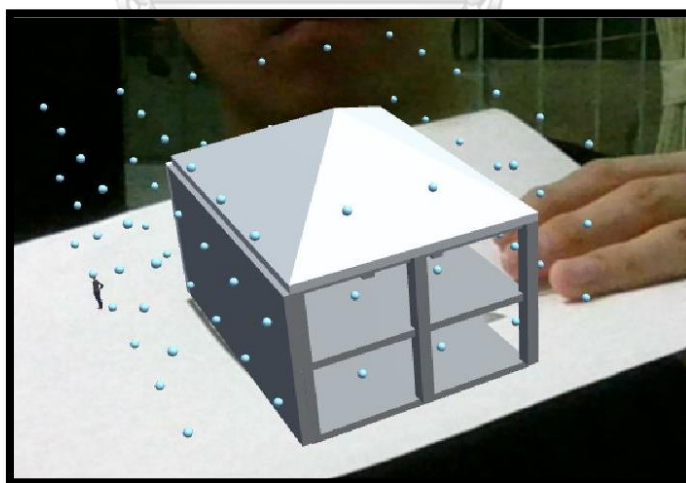


รูปที่ 5.20 รูปภาพแสดงการกระจายตัวของฝุ่นละออง PM2.5 จากโครงการศึกษากรณีที่ 2 ไปยังพื้นที่บริเวณโดยรอบ



รูปที่ 5.21 รูปภาพแสดงการกระจายตัวของฝุ่นละออง PM10 จากโครงการศึกษากรณีที่ 2 ไปยังพื้นที่บริเวณโดยรอบ

หลังจากนั้นนำแบบจำลอง Model 3 มิติ มาประยุกต์กับเทคโนโลยี Augmented Reality (AR) เพื่อให้สามารถแสดงผลผ่านอุปกรณ์โทรศัพท์มือถือ หรือ แท็บเล็ต ทำให้เห็นภาพเสมือนอยู่ในสภาพแวดล้อมจริง ซึ่งจะให้เห็นการกระจายตัวของฝุ่นละอองไปยังพื้นที่โดยรอบอย่างชัดเจน ดังรูปที่ 5.22



รูปที่ 5.22 รูปภาพแสดง Model 3 มิติบนมาร์คเกอร์ โครงการศึกษากรณีที่ 2 ซึ่งจะให้เห็นการกระจายตัวของฝุ่นละอองบริเวณโดยรอบของบ้าน

จากผลการประยุกต์ใช้ระบบตรวจวัดฝุ่นละอองจากโครงการก่อสร้างอาคาร กับโครงการศึกษากรณีที่ 2 โดยผลการสำรวจหลังจากทำการบินวัดปริมาณฝุ่นละอองโดยรอบบริเวณบ้าน ที่ได้

จากโปรแกรม Microsoft Excel และ Model 3 มิติ ที่ได้จากเทคโนโลยี Building Information Modeling (BIM) และเทคโนโลยี Augmented Reality (AR) สามารถสรุปและวิเคราะห์ปัญหาฝุ่นละอองได้ว่า กิจกรรมก่อสร้าง ฉาบผนัง มีค่าปริมาณฝุ่นละออง (PM2.5 ค่าอยู่ระหว่าง 2-6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ และ PM10 มีค่าอยู่ระหว่าง 3-7 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) ค่าความชื้นสัมพัทธ์ และอุณหภูมิ มีค่าใกล้เคียงกับค่าที่วัดได้จากสภาพอากาศปกติ และจากการเดินสำรวจบริเวณที่มีกิจกรรมก่อสร้างและฉาบผนัง บริเวณชั้น 1 ในรัศมี 5-6 เมตรจากกิจกรรมก่อสร้างโดยใช้เครื่องวัดปริมาณฝุ่นละอองแบบพกพา (Xiaomi Mi Smart Air Quality Monitor PM2.5 Detector) พบว่าค่าปริมาณฝุ่นละอองมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่วัดได้จากสภาพอากาศปกติเช่นกัน ดังนั้นกิจกรรมก่อสร้าง ฉาบผนัง ไม่ทำให้เกิดปัญหาฝุ่นละออง หรือเกิดฝุ่นละอองเพียงเล็กน้อย และฝุ่นละอองไม่แพร่กระจายไปยังบริเวณโดยรอบ ซึ่งไม่ก่อให้เกิดอันตรายต่อร่างกายและไม่ส่งผลกระทบต่อบริเวณชุมชนโดยรอบบริเวณที่ทำการก่อสร้าง

5.2.3 ผลการประยุกต์ใช้กับโครงการกรณีศึกษาที่ 3

กรณีศึกษาที่ 3 เป็นโครงการก่อสร้างอาคารหอพักขนาด 5 ชั้น ซึ่งกิจกรรมก่อสร้างขณะนั้นเป็นงานสถาปัตยกรรม อยู่บริเวณชั้น 2 ซึ่งเป็นงานปูกระเบื้อง ตัดกระเบื้อง ชั้น 4 เป็นงานเจาะฝ้า และงานกวาดฝุ่น เก็บขี้ปูน



รูปที่ 5.23 รูปภาพแสดงโครงการกรณีศึกษาที่ 3 ซึ่งเป็นการก่อสร้างอาคารหอพักขนาด 5 ชั้น

ทำการวัดค่าปริมาณฝุ่นละออง (PM2.5 และ PM10) ค่าความชื้นสัมพัทธ์ และอุณหภูมิ ในสภาพอากาศปกติ (บริเวณที่ไม่ได้รับผลกระทบจากกิจกรรมก่อสร้าง) พบว่า

- ค่าปริมาณฝุ่นละออง PM2.5 เท่ากับ 46-56 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ และ PM10 เท่ากับ 63-70 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
- ค่าความชื้นสัมพัทธ์เท่ากับ 39-43 %
- อุณหภูมิเท่ากับ 33-34 องศาเซลเซียส

- ความเร็วลมเท่ากับ 0-1 เมตรต่อวินาที



รูปที่ 5.24 รูปภาพแสดงกิจกรรมก่อสร้างในโครงการกรณีศึกษาที่ 3 (กิจกรรมปูกระเบื้อง ตัดกระเบื้อง)



รูปที่ 5.25 รูปภาพแสดงกิจกรรมก่อสร้างในโครงการกรณีศึกษาที่ 3 (งานกวาดฝุ่น และเก็บขี้ปูน)



รูปที่ 5.26 รูปภาพแสดงขณะทำการวัดค่าปริมาณฝุ่นละออง PM 2.5 ในสภาพอากาศปกติ โดยรอบโครงการศึกษากรณีที่ 3 โดยใช้เครื่องวัดปริมาณฝุ่นละอองแบบพกพา (Xiaomi Mi Smart Air Quality Monitor PM2.5 Detector)

TIME	PM2.5 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	PM10.0 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	ความชื้นสัมพัทธ์ (%)	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)
3:43:58 PM	52	64	41	33
3:44:03 PM	51	63	39	34
3:44:11 PM	55	67	39	34
3:44:54 PM	56	68	39	34

ตารางที่ 5.6 ตารางแสดงผลการวัดค่าปริมาณฝุ่นละออง (PM2.5 และ PM10) ค่าความชื้นสัมพัทธ์ อุณหภูมิ และเวลาที่ทำการวัด ในสภาพอากาศปกติ (โครงการศึกษากรณีที่ 3)

TIME	PM2.5 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	PM10.0 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	ความชื้น สัมพัทธ์ (%)	อุณหภูมิ (องศา เซลเซียส)	ละติจูด	ลองจิจูด
3:48:34 PM	58	70	41	34	13.83863458	100.56865866
3:48:52 PM	55	68	41	34	13.83863411	100.56873266
3:49:05 PM	61	72	40	34	13.83863387	100.56876966
3:49:27 PM	59	70	40	34	13.83866170	100.56865884
3:49:42 PM	53	66	40	34	13.83866146	100.56869584
3:49:55 PM	62	72	40	34	13.83866170	100.56865884
3:50:01 PM	60	70	40	34	13.83866123	100.56873284
3:50:08 PM	59	70	40	34	13.83866099	100.56876984
3:50:17 PM	52	64	39	34	13.83863387	100.56876966
3:50:33 PM	54	66	39	34	13.83866146	100.56869584
3:50:40 PM	53	65	39	34	13.83863435	100.56869566
3:50:54 PM	57	67	39	34	13.83863458	100.56865866
3:51:11 PM	57	69	39	34	13.83866099	100.56876984

ตารางที่ 5.7 ตารางแสดงตัวอย่างเวลาที่ทำการวัด ค่าปริมาณฝุ่นละออง (PM2.5 และ PM10) ค่าความชื้นสัมพัทธ์ อุณหภูมิ ละติจูด และลองจิจูด บริเวณด้านหน้าของอาคาร (โครงการศึกษากรณีที่ 3) ซึ่งทำการบินวัดโดยอากาศยานไร้คนขับ

หลังจากนั้นทำการบินวัดปริมาณฝุ่นละอองบริเวณโครงการก่อสร้าง ขณะที่มีการทำกิจกรรม ปูกระเบื้อง ตัดกระเบื้อง งานเจาะฝ้า และงานกวาดฝุ่น เก็บขี้ปูน รอบๆบริเวณอาคาร โดยใช้

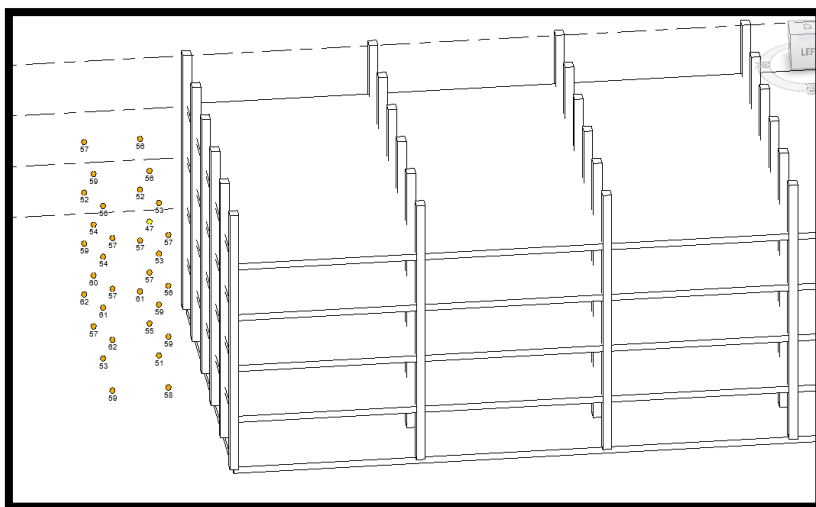
เทคโนโลยีอากาศยานไร้คนขับ (โดรน) โดยบินทั้งหมด 4 ระดับความสูงคือ 3 6 9 และ 12 เมตร ตามลำดับ เนื่องจากกิจกรรมก่อสร้างขณะนั้นอยู่บริเวณชั้น 2 และ 4 ของอาคาร จากการบินสำรวจ และวัดค่าพบว่าค่าต่างๆเป็นไปตามตารางที่ 5.7 คือ

- ค่าปริมาณฝุ่นละออง PM2.5 เท่ากับ 47-62 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ และ PM10 เท่ากับ 63-72 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
- ค่าความชื้นสัมพัทธ์เท่ากับ 39-43 %
- อุณหภูมิเท่ากับ 33-34 องศาเซลเซียส
- ความเร็วลมเท่ากับ 0-1 เมตรต่อวินาที

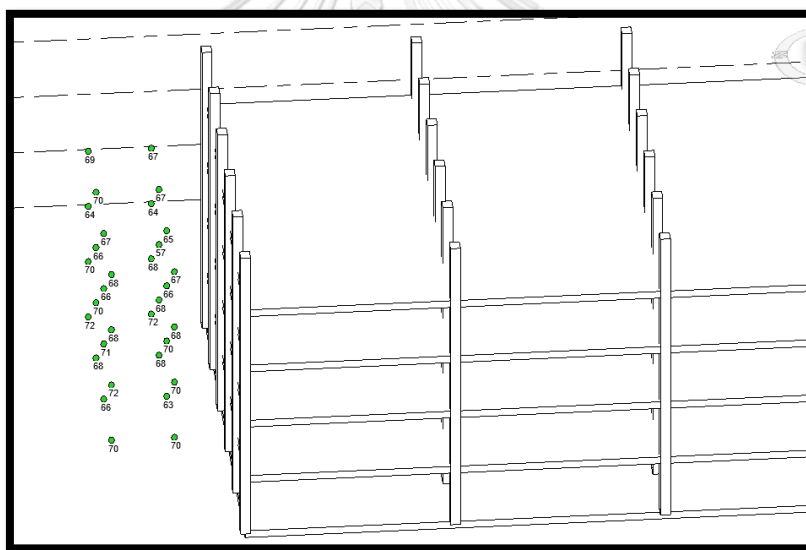


รูปที่ 5.27 รูปภาพแสดงขณะทำการบินวัดปริมาณฝุ่นละอองบริเวณรอบๆของอาคารที่ทำการก่อสร้าง (โครงการกรณีศึกษาที่ 3)

นำค่าปริมาณฝุ่นละออง (PM2.5 และ PM10) ที่วัดได้และค่าตำแหน่ง (พิกัด) มาทำการพล็อตกราฟการกระจายตัว (Model 3 มิติ) ใน Building Information Modeling (โปรแกรม Autodesk Revit) ดังรูปที่ 5.27 และรูปที่ 5.28 ซึ่งผู้วิจัยกำหนดจุดสี่แทนค่าปริมาณฝุ่นละออง โดยอ้างอิงจากผลกระทบต่อสุขภาพอนามัยของกรมควบคุมมลพิษดังตารางที่ 4.2 พบว่าค่าปริมาณฝุ่นละออง PM2.5 เป็นสีเหลืองและส้ม และ PM10 เป็นสีเขียวทั้งหมด

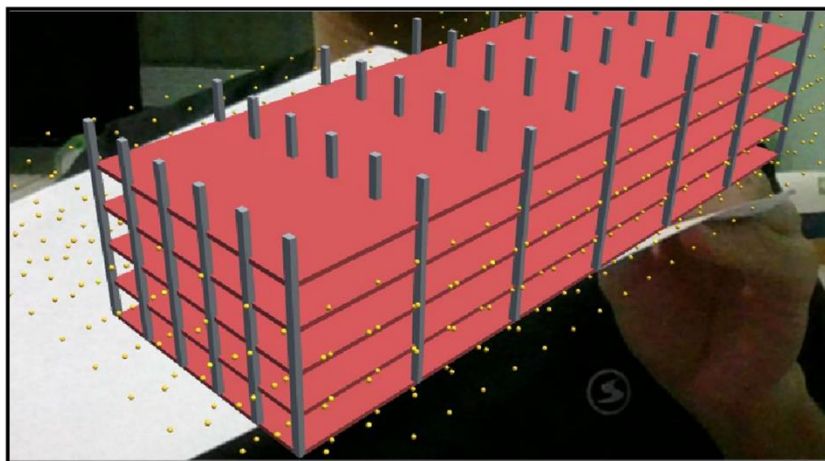


รูปที่ 5.28 รูปภาพแสดงการกระจายตัวของฝุ่นละออง PM2.5 จากโครงการศึกษาระดับที่ 3 ไปยังพื้นที่บริเวณโดยรอบ



รูปที่ 5.29 รูปภาพแสดงการกระจายตัวของฝุ่นละออง PM10 จากโครงการศึกษาระดับที่ 3 ไปยังพื้นที่บริเวณโดยรอบ

หลังจากนั้นนำแบบจำลอง Model 3 มิติ มาประยุกต์กับเทคโนโลยี Augmented Reality (AR) เพื่อให้สามารถแสดงผลผ่านอุปกรณ์โทรศัพท์มือถือ หรือ แท็บเล็ต ทำให้เห็นภาพเสมือนอยู่ในสภาพแวดล้อมจริง ซึ่งจะให้เห็นการกระจายตัวของฝุ่นละอองไปยังพื้นที่โดยรอบอย่างชัดเจน ดังรูปที่ 5.30



รูปที่ 5.30 รูปภาพแสดง Model 3 มิติบนมาร์คเกอร์ โครงการศึกษาระดับชั้นที่ 3 ซึ่งจะให้เห็นการกระจายตัวของฝุ่นละอองบริเวณโดยรอบของบ้าน

จากการสำรวจโดยการเดินวัดบริเวณรอบๆกิจกรรมก่อสร้าง (กิจกรรมปูกระเบื้อง ตัดกระเบื้อง งานเจาะฝ้า และงานกวาดฝุ่น เก็บขี้ปูน) พบว่าฝุ่นจากกิจกรรมก่อสร้างจะกระจายอยู่รอบๆบริเวณที่มีกิจกรรมก่อสร้าง รัศมีประมาณ 5-6 เมตร หลังจากนั้นที่ระยะมากกว่า 5-6 เมตรจากกิจกรรมก่อสร้าง ฝุ่นละอองจะกระจายหายไป และจากผลการประยุกต์ใช้ระบบตรวจวัดฝุ่นละอองจากโครงการก่อสร้างอาคาร กับโครงการศึกษาระดับชั้นที่ 3 โดยผลการสำรวจหลังจากทำการบินวัดปริมาณฝุ่นละอองโดยรอบบริเวณบ้าน ที่ได้จากโปรแกรม Microsoft Excel และ Model 3 มิติ ที่ได้จากเทคโนโลยี Building Information Modeling (BIM) และเทคโนโลยี Augmented Reality (AR) สามารถสรุปและวิเคราะห์ปัญหาฝุ่นละอองได้ว่า กิจกรรมปูกระเบื้อง ตัดกระเบื้อง งานเจาะฝ้า และงานกวาดฝุ่น เก็บขี้ปูน มีค่าปริมาณฝุ่นละออง (PM2.5 ค่าอยู่ระหว่าง 47-62 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ และ PM10 มีค่าอยู่ระหว่าง 63-72 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) ค่าความชื้นสัมพัทธ์ และอุณหภูมิ มีค่าใกล้เคียงกับค่าที่วัดได้จากสภาพอากาศปกติ เนื่องจากกิจกรรมก่อสร้างอยู่บริเวณกลางอาคาร ซึ่งจากการสำรวจฝุ่นจากกิจกรรมก่อสร้างจะกระจายอยู่รอบๆบริเวณที่มีกิจกรรมก่อสร้าง รัศมีประมาณ 5-6 เมตรเท่านั้น ขณะบินวัดปริมาณฝุ่นละอองบริเวณรอบๆอาคาร ค่าปริมาณฝุ่นละออง (PM2.5 และ PM10) จึงเท่าเดิมหรือเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย ฝุ่นละอองจึงไม่ส่งผลกระทบต่อบริเวณชุมชนโดยรอบ

5.2.4 ผลการประยุกต์ใช้กับโครงการกรณีศึกษาที่ 4

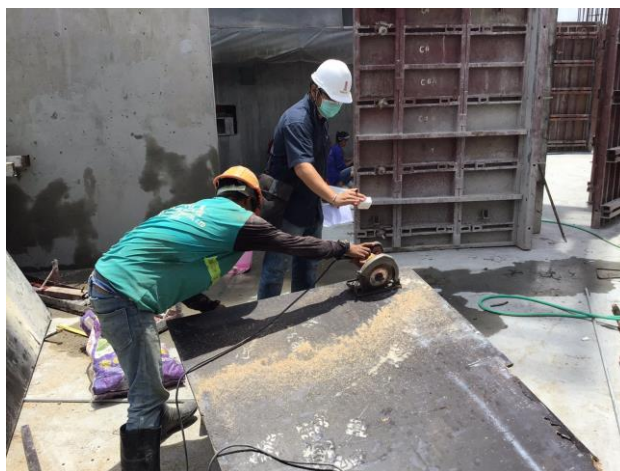
กรณีศึกษาที่ 4 เป็นโครงการก่อสร้างอาคารคอนกรีตขนาด 36 ชั้น ซึ่งกิจกรรมก่อสร้างขณะนั้นอยู่บริเวณชั้น 5 (ประมาณ 13.5 เมตร) เป็นงานโครงสร้างได้แก่ กิจกรรมเทคอนกรีต ฉีคอนกรีต ใส่แบบโครงสร้างเสา ต่อเหล็กเสา ร้อยลวดพื้น Post-tension และตัดไม้แบบ

ทำการวัดค่าปริมาณฝุ่นละออง (PM2.5 และ PM10) ค่าความชื้นสัมพัทธ์ และอุณหภูมิ ในสภาพอากาศปกติ (บริเวณที่ไม่ได้รับผลกระทบจากกิจกรรมก่อสร้าง) พบว่า

- ค่าปริมาณฝุ่นละออง PM2.5 เท่ากับ 6-9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ และ PM10 เท่ากับ 7-11 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
- ค่าความชื้นสัมพัทธ์เท่ากับ 56-58 %
- อุณหภูมิเท่ากับ 34-36 องศาเซลเซียส
- ความเร็วลมเท่ากับ 0-1.5 เมตรต่อวินาที



รูปที่ 5.31 รูปภาพแสดงโครงการกรณีศึกษาที่ 4 ซึ่งเป็นการก่อสร้างอาคารคอนกรีตขนาด 36 ชั้น



รูปที่ 5.32 รูปภาพแสดงกิจกรรมก่อสร้างในโครงการกรณีศึกษาที่ 4 (กิจกรรมตัดไม้แบบ)



รูปที่ 5.33 รูปภาพแสดงกิจกรรมก่อสร้างในโครงการกรณีศึกษาที่ 4 (กิจกรรมต่อเหล็กเสาค)

	A	C	D	E	F
1	TIME	PM2.5	PM10.0	ความชื้น	อุณหภูมิ
26	12:05:21 PM	8	8	56	35
27	12:05:23 PM	8	8	56	35
28	12:05:26 PM	7	7	56	35
29	12:05:29 PM	6	7	56	35
30	12:05:59 PM	9	9	57	35
31	12:06:04 PM	8	8	57	35

TIME	PM2.5 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	PM10.0 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	ความชื้นสัมพัทธ์ (%)	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)
12:05:21 PM	8	8	56	35
12:05:23 PM	8	8	56	35
12:05:26 PM	7	7	56	35
12:05:29 PM	6	7	56	35

ตารางที่ 5.8 ตารางแสดงผลการวัดค่าปริมาณฝุ่นละออง (PM2.5 และ PM10) ค่าความชื้นสัมพัทธ์ อุณหภูมิ และเวลาที่ทำการวัด ในสภาพอากาศปกติ (โครงการกรณีศึกษาที่ 4)

หลังจากนั้นทำการบันทึกปริมาณฝุ่นละอองบริเวณโครงการก่อสร้าง ขณะที่มีการทำกิจกรรม เทคอนกรีต จี้คอนกรีต ใส่แบบโครงสร้างเสา ต่อเหล็กเสาค ร้อยลวดพื้น Post-tension และตัดไม้แบบ รอบๆบริเวณอาคารโดยใช้เทคโนโลยีอากาศยานไร้คนขับ (โดรน) พบว่าค่าต่างๆเป็นไปตามตารางที่ 5.9 คือ

- ค่าปริมาณฝุ่นละออง PM2.5 เท่ากับ 5-15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ และ PM10 เท่ากับ 6-15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
- ค่าความชื้นสัมพัทธ์เท่ากับ 56-58 %

- อุณหภูมิเท่ากับ 34-36 องศาเซลเซียส
- ความเร็วลมเท่ากับ 0-1.5 เมตรต่อวินาที



รูปที่ 5.34 รูปภาพแสดงขณะทำการวัดความเร็วลมและอุณหภูมิโดยรอบโครงการศึกษากรณีที่ 4

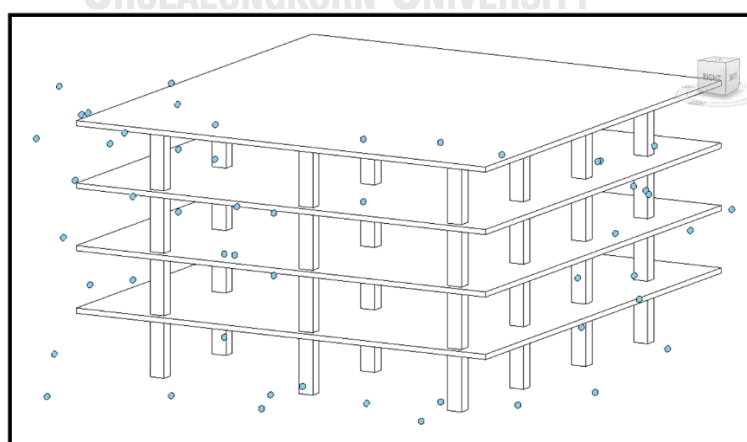
TIME	PM2.5 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	PM10.0 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	ความชื้นสัมพัทธ์ (%)	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	ละติจูด	ลองจิจูด
12:04:47 PM	15	15	56	34	13.744528	100.58197
12:07:28 PM	13	13	56	34	13.744418	100.5821
12:07:52 PM	10	10	57	34	13.744423	100.5821
12:08:14 PM	8	8	57	34	13.744458	100.58213
12:08:18 PM	8	8	57	34	13.74448	100.58209
12:08:56 PM	7	7	57	34	13.74448	100.58209
12:09:31 PM	7	7	57	34	13.744512	100.58208
12:10:12 PM	5	5	57	34	13.744547	100.58209
12:10:22 PM	6	6	57	34	13.74454	100.58212
12:10:32 PM	5	5	56	34	13.744487	100.58199
12:10:36 PM	5	5	56	34	13.744389	100.58198
12:10:42 PM	3	4	57	34	13.744382	100.58195

ตารางที่ 5.9 ตารางแสดงตัวอย่างเวลาที่ทำการวัด ค่าปริมาณฝุ่นละออง (PM2.5 และ PM10) ค่าความชื้นสัมพัทธ์ อุณหภูมิ ละติจูด และลองจิจูด บริเวณรอบๆอาคาร (โครงการศึกษากรณีที่ 4) ซึ่งทำการบินวัดโดยอากาศยานไร้คนขับ

นำค่าปริมาณฝุ่นละออง (PM2.5 และ PM10) ที่วัดได้และค่าตำแหน่ง (พิกัด) มาทำการพล็อตกราฟการกระจายตัว (Model 3 มิติ) ใน Building Information Modeling (โปรแกรม Autodesk Revit) ดังรูปที่ 5.34 ซึ่งผู้วิจัยกำหนดจุดสี่แทนค่าปริมาณฝุ่นละออง โดยอ้างอิงจากผลกระทบต่อสุขภาพอนามัยของกรมควบคุมมลพิษดังตารางที่ 4.2 พบว่าค่าปริมาณฝุ่นละออง PM2.5 และ PM10 เป็นสีฟ้าทั้งหมด เนื่องจากไม่เกินมาตรฐานที่กำหนด (สีฟ้านี้ค่า PM2.5 อยู่ระหว่าง 0-25 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ และ PM10 อยู่ระหว่าง 0-50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)

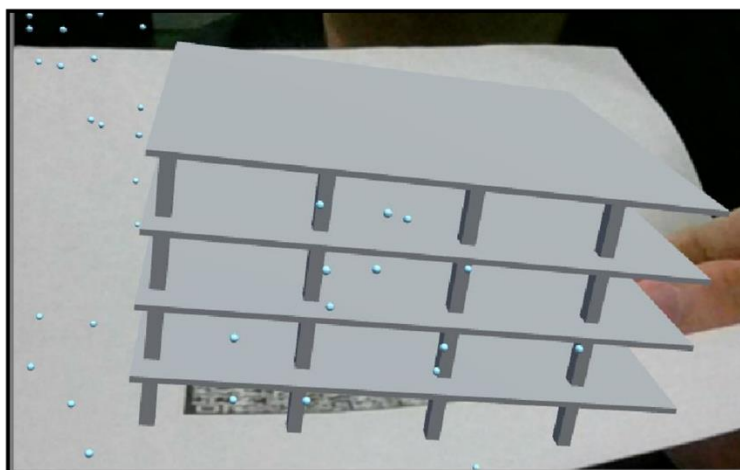


รูปที่ 5.35 รูปภาพแสดงขณะทำการบินวัดปริมาณฝุ่นละอองบริเวณรอบๆของอาคารที่ทำการก่อสร้าง (โครงการกรณีศึกษาที่ 4)



รูปที่ 5.36 รูปภาพแสดงการกระจายตัวของฝุ่นละออง PM2.5 และ PM10 จากโครงการศึกษากรณีศึกษาที่ 4 ไปยังพื้นที่บริเวณโดยรอบ

หลังจากนั้นนำแบบจำลอง Model 3 มิติ มาประยุกต์กับเทคโนโลยี Augmented Reality (AR) เพื่อให้สามารถแสดงผลผ่านอุปกรณ์โทรศัพท์มือถือ หรือ แท็บเล็ต ทำให้เห็นภาพเสมือนอยู่ในสภาพแวดล้อมจริง ซึ่งจะช่วยให้เห็นการกระจายตัวของฝุ่นละอองไปยังพื้นที่โดยรอบอย่างชัดเจน ดังรูปที่ 5.37



รูปที่ 5.37 รูปภาพแสดง Model 3 มิติบนมาร์คเกอร์ โครงการศึกษาระดับที่ 4 ซึ่งจะทำให้เห็นการกระจายตัวของฝุ่นละอองบริเวณโดยรอบของบ้าน

จากผลการประยุกต์ใช้ระบบตรวจวัดฝุ่นละอองจากโครงการก่อสร้างอาคาร กับโครงการศึกษาระดับที่ 4 โดยผลการสำรวจหลังจากทำการบินวัดปริมาณฝุ่นละอองโดยรอบบริเวณบ้าน ที่ได้จากโปรแกรม Microsoft Excel และ Model 3 มิติ ที่ได้จากเทคโนโลยี Building Information Modeling (BIM) และเทคโนโลยี Augmented Reality (AR) สามารถสรุปและวิเคราะห์ปัญหาฝุ่นละอองได้ว่า กิจกรรมเทคอนกรีต จี้คอนกรีต ใส่แบบโครงสร้างเสา ต่อเหล็กเสา ร้อยลวดพื้น Post-tension และตัดไม้แบบ มีค่าปริมาณฝุ่นละออง (PM2.5 ค่าอยู่ระหว่าง 5-15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ และ PM10 มีค่าอยู่ระหว่าง 6-15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) ค่าความชื้นสัมพัทธ์ และอุณหภูมิ มีค่าใกล้เคียงกับค่าที่วัดได้จากสภาพอากาศปกติ

จากการเดินสำรวจบริเวณที่มีกิจกรรมกิจกรรมเทคอนกรีต จี้คอนกรีต ใส่แบบโครงสร้างเสา ต่อเหล็กเสา ร้อยลวดพื้น Post-tension บริเวณชั้น 5 ในรัศมี 5-6 เมตรจากกิจกรรมก่อสร้างโดยใช้เครื่องวัดปริมาณ ฝุ่นละอองแบบพกพา (Xiaomi Mi Smart Air Quality Monitor PM2.5 Detector) พบว่าค่าปริมาณฝุ่นละอองมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่วัดได้จากสภาพอากาศปกติ ส่วนกิจกรรม

ตัดไม้แบบนั้นปริมาณฝุ่นละอองฟุ้งกระจายในระยะไม่เกิน 5-6 เมตรจากกิจกรรมก่อสร้าง เนื่องจากกิจกรรมอยู่บริเวณกลางตึก ขณะบินวัดปริมาณฝุ่นละอองบริเวณรอบตึก ค่าปริมาณฝุ่นละอองจึงมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่วัดได้จากสภาพอากาศปกติ

ดังนั้นกิจกรรมเทคอนกรีต จี้คอนกรีต ใส่แบบโครงสร้างเสา ต่อเหล็กเสา ร้อยลวดพื้น Post-tension และตัดไม้แบบ ไม่ทำให้เกิดปัญหาฝุ่นละออง หรือเกิดฝุ่นละอองเพียงเล็กน้อย และฝุ่นละอองไม่แพร่กระจายไปยังบริเวณโดยรอบ ซึ่งไม่ก่อให้เกิดอันตรายต่อร่างกายและไม่ส่งผลกระทบต่อบริเวณชุมชนโดยรอบบริเวณที่ทำการก่อสร้าง

5.3 สรุปผลการประยุกต์ใช้ระบบตรวจวัดฝุ่นละอองในโครงการก่อสร้างอาคารกับกรณีศึกษา

งานวิจัยเสนอระบบในการวัดและตรวจสอบการกระจายตัวของฝุ่นละออง (PM2.5 และ PM10) ในบริเวณโดยรอบโครงการก่อสร้างอาคาร โดยนำเทคโนโลยีอากาศยานไร้คนขับและเซ็นเซอร์ตรวจวัดปริมาณฝุ่นละออง PM2.5 และ PM10 มาใช้ในการตรวจวัดการกระจายตัวของฝุ่นละออง ซึ่งเป็นการวัดแบบขณะใดขณะหนึ่ง โดยวัดภายนอกอาคาร

ผลจากการประยุกต์ใช้ระบบตรวจวัดฝุ่นละอองในโครงการก่อสร้างอาคารกับกรณีศึกษา ทั้งหมด 4 โครงการพบว่าระบบสามารถตรวจวัดค่าปริมาณฝุ่นละออง (PM2.5 และ PM10) ค่าความชื้นสัมพัทธ์ อุณหภูมิ ค่าพิกัดละติจูด ลองจิจูด และส่งค่าจากอากาศยานไร้คนขับมายังคอมพิวเตอร์เพื่อพล็อตกราฟการกระจายตัว (Model 3 มิติ) ใน Building Information Modeling (BIM) และแสดงกราฟการกระจายตัวโดยประยุกต์ใช้เทคโนโลยีความเป็นจริงเสริม (Augmented Reality) เพื่อนำไปเปรียบเทียบปริมาณฝุ่นละอองที่เกิดขึ้นจากการก่อสร้างในโครงการกรณีศึกษา ซึ่งสรุปได้ดังนี้

5.3.1 กิจกรรมก่อสร้างในโครงการกรณีศึกษา

กิจกรรมก่อสร้างในโครงการกรณีศึกษานั้นมี 2 ประเภทคือ งานโครงสร้าง และ งานสถาปัตยกรรม

งานโครงสร้างในโครงการกรณีศึกษานั้น คือ กิจกรรมเทคอนกรีต จี้คอนกรีต ใส่แบบโครงสร้างเสา ต่อเหล็กเสา ร้อยลวดพื้น Post-tension ตัดไม้แบบ และงานสถาปัตยกรรมในโครงการกรณีศึกษานั้น คือ กิจกรรมสกัด เสาห้องผนัง เพื่อทำบล็อกสำหรับงานไฟฟ้า และเดินสายไฟฟ้า กิจกรรมก่ออิฐ ฉาบผนัง งานปูกระเบื้องและตัดกระเบื้อง งานเจาะฝ้า และงานกวาดฝุ่น เก็บขี้ปูน

จากการสำรวจพบว่ากิจกรรมเทคอนกรีต จี้คอนกรีต ใส่แบบโครงสร้างเสา ต่อเหล็กเสา ร้อย ลวดพื้น Post-tension กิจกรรมก่ออิฐ ฉาบผนัง นั้นไม่ทำให้เกิดฝุ่นละออง (PM2.5 และ PM10) แต่ กิจกรรมตัดไม้แบบ กิจกรรมสกัด เซาะร่องผนัง งานปูกระเบื้องและตัดกระเบื้อง งานเจาะฝ้า และงาน กวาดฝุ่น เก็บขี้ปูน จะทำให้เกิดฝุ่นละออง (PM2.5 และ PM10) ซึ่งปริมาณฝุ่นละอองจะมีค่ามาก บริเวณที่มีกิจกรรมก่อสร้าง และที่ระยะห่างจากกิจกรรมก่อสร้างค่าปริมาณฝุ่นละอองจะค่อยๆลดลง จนมีค่าเท่ากับสภาพอากาศปกติ โดยจากการสำรวจพบว่าฝุ่นจากกิจกรรมก่อสร้างจะกระจายอยู่ รอบๆบริเวณที่มีกิจกรรมก่อสร้าง รัศมีประมาณ 5-6 เมตรจากกิจกรรมก่อสร้าง หลังจากนั้นที่ระยะ มากกว่า 5-6 เมตรจากกิจกรรมก่อสร้าง ฝุ่นละอองจะกระจายหายไปจนค่าปริมาณฝุ่นละอองมีค่า เท่ากับสภาพอากาศปกติ เนื่องจากการวัดในงานวิจัยนี้เป็นการวัดแบบขณะใดขณะหนึ่ง โดยใช้ เทคโนโลยีอากาศยานไร้คนขับ บินวัดภายนอกอาคาร ถ้ากิจกรรมก่อสร้างอยู่บริเวณกลางอาคาร หรือ บริเวณกลางบ้าน ซึ่งห่างจากบริเวณที่ทำการบินวัดโดยอากาศยานไร้คนขับมากกว่า 5-6 เมตร ปริมาณฝุ่นละอองจะฟุ้งกระจายไม่ถึงบริเวณที่ทำการวัด ค่าปริมาณฝุ่นละอองจึงมีค่าใกล้เคียงหรือ เท่ากับค่าที่วัดได้จากสภาพอากาศปกติ แต่ถ้ากิจกรรมก่อสร้างอยู่บริเวณด้านข้างของอาคาร หรือ ด้านหน้า ซึ่งห่างจากบริเวณที่ทำการบินวัดโดยอากาศยานไร้คนขับน้อยกว่า 5-6 เมตร และมีลมพัด มาทิศทางบริเวณภายนอกของอาคาร ค่าปริมาณฝุ่นละออง (PM2.5 และ PM10) ที่วัดได้จากอากาศ ยานไร้คนขับจะมีค่ามากขึ้น และเมื่อกิจกรรมก่อสร้างยุติ ฝุ่นละอองจะฟุ้งกระจายหายไป ค่าปริมาณ ฝุ่นละอองจะมีค่าเท่ากับค่าที่วัดได้จากสภาพอากาศปกติ

5.3.2 แนวทางเบื้องต้นในการบินวัดปริมาณฝุ่นละออง

จากการใช้อากาศยานไร้คนขับ (โดรน) บินวัดปริมาณฝุ่นละอองโครงการกรณีศึกษา จำนวน 4 โครงการ พบว่าฝุ่นจากกิจกรรมก่อสร้างจะกระจายอยู่รอบๆบริเวณที่มีกิจกรรมก่อสร้าง รัศมี ประมาณ 5-6 เมตรจากกิจกรรมก่อสร้าง ดังนั้นแนวทางเบื้องต้นในการบินวัดปริมาณฝุ่นละออง โดยรอบ คือจะทำการวัดออกไปด้านละ 6 เมตรจากบริเวณอาคาร โดยวัดทั้งหมดด้านละ 4 จุด แต่ละ จุดห่างกัน 1.5 เมตร และทำการวัดที่ระดับความสูงซึ่งมีกิจกรรมก่อสร้าง โดยวัดสูงขึ้นไปจากระดับที่มี การก่อสร้าง 6 เมตร ต่ำลงไป 6 เมตร โดยทำการวัดทุกๆระดับความสูง 1.5 เมตร เนื่องจากที่ระยะ มากกว่า 5-6 เมตรจากกิจกรรมก่อสร้าง ฝุ่นละอองจะกระจายหายไปจนค่าปริมาณฝุ่นละอองมีค่า เท่ากับสภาพอากาศปกติ

ซึ่งผู้ใช้งานระบบอาจจะทำการเพิ่มจุดที่วัดปริมาณฝุ่นละออง โดยวัดอย่างละเอียดในด้านที่มี กิจกรรมก่อสร้าง และในด้านที่ไม่มีกิจกรรมก่อสร้างหรือบริเวณที่ระยะมากกว่า 6 เมตรจากอาคาร

อาจจะทำการลดจุดที่วัดปริมาณฝุ่นละออง โดยวัดเฉพาะบางจุดตามความเหมาะสมของแต่ละโครงการ

5.4 ข้อจำกัดในการประยุกต์ใช้ระบบตรวจวัดฝุ่นละอองในโครงการก่อสร้างอาคารกับกรณีศึกษา

การสรุปผลที่ได้จากการประยุกต์ใช้ระบบตรวจวัดฝุ่นละอองในโครงการก่อสร้างอาคารกับกรณีศึกษาเป็นการสรุปเบื้องต้นเท่านั้น เนื่องจากมีข้อจำกัดในการเก็บข้อมูลดังนี้

1. การกำหนดตัวแปรควบคุมค่อนข้างทำได้ยากคือ สภาพอากาศ อุณหภูมิ ความชื้น ค่าปริมาณฝุ่นละออง (PM2.5 และ PM10) ความเร็วลม ทิศทางลม และกิจกรรมก่อสร้างในแต่ละโครงการนั้นแตกต่างกัน
2. การวัดในงานวิจัยนี้เป็นการวัดแบบขณะใดขณะหนึ่ง โดยใช้เทคโนโลยีอากาศยานไร้คนขับ บินวัดภายนอกอาคาร ซึ่งขณะทำการบินบางครั้งกิจกรรมก่อสร้างมีหลากหลายกิจกรรม ทำให้ไม่สามารถสรุปได้ว่าฝุ่นละอองมาจากกิจกรรมใด
3. เวลาในการทำการบินของอากาศยานไร้คนขับนั้นประมาณ 20 นาที หลังจากนั้นต้องทำการเปลี่ยนแบตเตอรี่ หรือทำการชาร์จไฟ ซึ่งทำให้เกิดความไม่ต่อเนื่องในการวัด
4. จำนวนโครงการยังไม่เพียงพอในการวิเคราะห์และสรุปถึงปัญหาฝุ่นละอองที่แน่ชัด

บทที่ 6

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

6.1 สรุปการวิจัย

ในปัจจุบันปัญหามลพิษทางอากาศนับว่าเป็นปัญหาที่สำคัญมาก โดยเมืองใหญ่ทั่วโลกต่างประสบปัญหาฝุ่นละอองขนาดเล็กมีค่าเกินมาตรฐาน โดยในบางช่วงเวลานั้นกรุงเทพมหานครติดอันดับเมืองที่มีมลพิษสูงสุดของโลก ซึ่งอุตสาหกรรมก่อสร้างมักได้รับการวิพากษ์วิจารณ์ว่าเป็นหนึ่งในผู้ก่อมลพิษ โดยเฉพาะโครงการก่อสร้างอาคาร เนื่องจากฝุ่นละอองจากการก่อสร้างอาคารสามารถปลิวหรือฟุ้งกระจายไปได้ไกล งานวิจัยนี้จึงต้องการนำเสนอระบบในการวัดและตรวจสอบการกระจายตัวของฝุ่นละออง (PM2.5 และ PM10) ในบริเวณโดยรอบโครงการก่อสร้างอาคาร โดยนำเทคโนโลยีอากาศยานไร้คนขับและเซ็นเซอร์ตรวจวัดปริมาณฝุ่นละออง PM2.5 และ PM10 มาใช้ในการตรวจวัดการกระจายตัวของฝุ่นละออง เนื่องจากการวัดปริมาณฝุ่นละอองในปัจจุบันนั้นเป็นการติดเครื่องมือวัดไว้ที่จุดใดจุดหนึ่ง ดังนั้นการนำเทคโนโลยีอากาศยานไร้คนขับมาใช้นั้นจะทำให้สามารถวัดปริมาณฝุ่นละอองได้ทุกจุดที่ต้องการ ซึ่งเมื่อนำค่าปริมาณฝุ่นละอองที่วัดได้และค่าตำแหน่ง (พิกัด) มาทำการพล็อตกราฟการกระจายตัวใน Building Information Modeling (BIM) และแสดงกราฟการกระจายตัวโดยประยุกต์ใช้เทคโนโลยีความเป็นจริงเสริม (Augmented Reality) ทำให้เห็นภาพเสมือนอยู่ในสภาพแวดล้อมจริง จะทำให้เห็นการกระจายตัวของฝุ่นละอองจากการก่อสร้างอาคารไปยังพื้นที่บริเวณโดยรอบ โดยเจ้าของโครงการและผู้รับเหมาก่อสร้างงานอาคาร สามารถนำระบบตรวจวัดฝุ่นละอองในโครงการก่อสร้างอาคารนี้ไปใช้ในการวัดปริมาณและตรวจสอบการกระจายตัวของฝุ่นละออง และนำผลที่ได้ไปชี้แจงและแสดงให้หน่วยงานที่เกี่ยวข้อง ประชาชนและชุมชนที่อยู่บริเวณโดยรอบรับรู้ได้อย่างชัดเจน

หลังจากนั้นทำการทดสอบความคลาดเคลื่อนของเครื่องมือ และทดสอบระบบที่ใช้ในการวัดปริมาณฝุ่นละอองกับกรณีศึกษา ซึ่งเป็นโครงการก่อสร้างบ้านจัดสรรจำนวน 2 โครงการ และโครงการก่อสร้างอาคารจำนวน 2 โครงการ โดยกิจกรรมก่อสร้างในโครงการกรณีศึกษานั้นมี 2 ประเภทคือ งานโครงสร้าง และ งานสถาปัตยกรรม

จากการสำรวจพบว่ากิจกรรมเทคอนกรีต จี้คอนกรีต ใส่แบบโครงสร้างเสา ต่อเหล็กเสา ร้อยลวดพื้น Post-tension กิจกรรมก่ออิฐ ฉาบผนัง นั้นไม่ทำให้เกิดฝุ่นละออง (PM2.5 และ PM10) แต่กิจกรรมตัดไม้แบบ กิจกรรมสกัด เขาช่องผนัง งานปูกระเบื้องและตัดกระเบื้อง งานเจาะฝ้า และงานกวาดฝุ่น เก็บขี้ปูน จะทำให้เกิดฝุ่นละออง (PM2.5 และ PM10) ซึ่งปริมาณฝุ่นละอองจะมีค่ามาก

บริเวณที่มีกิจกรรมก่อสร้าง และที่ระยะห่างจากกิจกรรมก่อสร้างค่าปริมาณฝุ่นละอองจะค่อยๆลดลงจนมีค่าเท่ากับสภาพอากาศปกติ โดยจากการสำรวจพบว่าฝุ่นจากกิจกรรมก่อสร้างจะกระจายอยู่รอบๆบริเวณที่มีกิจกรรมก่อสร้าง รัศมีประมาณ 5-6 เมตรจากกิจกรรมก่อสร้าง หลังจากนั้นที่ระยะมากกว่า 5-6 เมตรจากกิจกรรมก่อสร้าง ฝุ่นละอองจะกระจายหายไปจนค่าปริมาณฝุ่นละอองมีค่าเท่ากับสภาพอากาศปกติ เนื่องจากการวัดในงานวิจัยนี้เป็นการวัดแบบขณะใดขณะหนึ่ง โดยใช้เทคโนโลยีอากาศยานไร้คนขับ บินวัดภายนอกอาคาร ถ้ากิจกรรมก่อสร้างอยู่บริเวณกลางอาคาร หรือบริเวณกลางบ้าน ซึ่งห่างจากบริเวณที่ทำการบินวัดโดยอากาศยานไร้คนขับมากกว่า 5-6 เมตร ปริมาณฝุ่นละอองจะฟุ้งกระจายมาไม่ถึงบริเวณที่ทำการวัด ค่าปริมาณฝุ่นละอองจึงมีค่าใกล้เคียงหรือเท่ากับค่าที่วัดได้จากสภาพอากาศปกติ แต่ถ้ากิจกรรมก่อสร้างอยู่บริเวณด้านข้างของอาคาร หรือด้านหน้า ซึ่งห่างจากบริเวณที่ทำการบินวัดโดยอากาศยานไร้คนขับน้อยกว่า 5-6 เมตร และมีลมพัดมาทิศทางบริเวณภายนอกของอาคาร ค่าปริมาณฝุ่นละออง (PM2.5 และ PM10) ที่วัดได้จากอากาศยานไร้คนขับจะมีค่ามากขึ้น และเมื่อกิจกรรมก่อสร้างยุติ ฝุ่นละอองจะฟุ้งกระจายหายไป ค่าปริมาณฝุ่นละอองจะมีค่าเท่ากับค่าที่วัดได้จากสภาพอากาศปกติ

6.2 ข้อจำกัดของงานวิจัย

1. การวัดในงานวิจัยนี้เป็นการวัดแบบขณะใดขณะหนึ่ง โดยใช้เทคโนโลยีอากาศยานไร้คนขับ บินวัดภายนอกอาคาร ซึ่งเวลาในการทำการบินของอากาศยานไร้คนขับนั้นประมาณ 20 นาที หลังจากนั้นต้องทำการเปลี่ยนแบตเตอรี่ หรือทำการชาร์จไฟ ซึ่งทำให้เกิดความไม่ต่อเนื่องในการวัด

2. กราฟการกระจายตัวของฝุ่นละอองที่ประยุกต์ใช้เทคโนโลยีความเป็นจริงเสริม (Augmented Reality) เพื่อให้เห็นภาพเสมือนอยู่ในสภาพแวดล้อมจริง ซึ่งในงานวิจัยนี้ไม่ได้มีการปรับขนาดและระยะห่างของภาพเสมือน (Scale) ให้เท่ากับขนาดและระยะห่างของสภาพแวดล้อมจริงของโครงการก่อสร้าง

6.3 ผลการทำงานวิจัย

1. ระบบที่สามารถวัดปริมาณและตรวจสอบการกระจายตัวของฝุ่นละออง (PM2.5 และ PM10) ในโครงการก่อสร้างบ้านจัดสรร และโครงการก่อสร้างอาคาร โดยใช้งบประมาณในการพัฒนาระบบอย่างคุ้มค่า เนื่องจากเซ็นเซอร์ต่างๆมีราคาไม่แพง ทำให้สามารถวิเคราะห์สาเหตุและปัญหาฝุ่นละอองที่ส่งผลกระทบต่อบริเวณโดยรอบ

2. ระบบที่สามารถวัดปริมาณและตรวจสอบการกระจายตัวของฝุ่นละออง (PM2.5 และ PM10) บริเวณภายนอกอาคารและบริเวณโดยรอบ ได้ทุกจุดที่ต้องการอย่างสะดวกและรวดเร็ว

3. เจ้าของโครงการและผู้รับเหมาก่อสร้างงานอาคาร สามารถนำระบบตรวจวัดฝุ่นละอองในโครงการก่อสร้างอาคารนี้ไปใช้ในการวัดปริมาณและตรวจสอบการกระจายตัวของฝุ่นละออง และนำผลที่ได้ไปชี้แจงและแสดงให้หน่วยงานที่เกี่ยวข้อง ประชาชนและชุมชนที่อยู่บริเวณโดยรอบรับรู้ได้อย่างชัดเจน

4. ทราบถึงแนวทางหรือข้อจำกัดในการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีอากาศยานไร้คนขับ Building Information Modeling (BIM) และเทคโนโลยีความเป็นจริงเสริม (Augmented Reality: AR) ในอุตสาหกรรมก่อสร้าง

5. สามารถวิเคราะห์และสรุปถึงปัญหาฝุ่นละอองจากโครงการกรณีศึกษาได้ในเบื้องต้น

6.4 ข้อเสนอแนะและแนวทางการพัฒนางานวิจัยในอนาคต

1. งานวิจัยในอนาคตควรพัฒนาระบบตรวจวัดฝุ่นละอองโดยขณะบินวัดปริมาณฝุ่นละออง (PM2.5 และ PM10) จากอากาศยานไร้คนขับ สามารถแสดงผลผ่านเทคโนโลยี Augmented Reality (AR) เพื่อให้ในจอภาพแสดง Model 3 มิติ ลอยอยู่เหนือพื้นผิวจริง ทำให้เห็นภาพเสมือนอยู่ในสภาพแวดล้อมจริงแบบตามเวลาจริง (Real time)

2. การประยุกต์ใช้เทคโนโลยีความเป็นจริงเสริม (Augmented Reality) เพื่อให้เห็นภาพเสมือนอยู่ในสภาพแวดล้อมจริง โดยขนาดและระยะห่างของภาพเสมือนเท่ากับขนาดและระยะห่างของสภาพแวดล้อมจริงของโครงการก่อสร้าง ซึ่งเมื่อนำไปแสดงการกระจายตัวของฝุ่นละอองบริเวณที่มีกิจกรรมก่อสร้าง (บริเวณหน้างานจริง) จะทำให้เห็นการกระจายตัวของฝุ่นละอองในสเกลขนาดสภาพแวดล้อมจริง

3. การประยุกต์ใช้เทคโนโลยี Artificial Intelligence (AI) ร่วมกับงานวิจัย โดยใช้เทคโนโลยีอากาศยานไร้คนขับในการบินวัดค่าปริมาณฝุ่นละออง (PM2.5 และ PM10) ค่าความชื้นสัมพัทธ์ อุณหภูมิและค่าต่างๆ ในการสร้างแบบจำลองการทำนายค่าฝุ่นละออง (PM2.5 และ PM10) เพื่อประเมินสภาวะอากาศในแต่ละพื้นที่โครงการก่อสร้างได้ทันที (Real time)

บรรณานุกรม

- Balogun, V. A., B. I. Oladapo, A. O. M. Adeoye, J. F. Kayode and S. O. Afolabi (2018). "Hysteresis analysis of Thornton (IP6, IP12E and TH5V) magnetic materials through the use of Arduino microcontroller." Journal of Materials Research and Technology 7(4): 443-449.
- Bradley, A., H. Li, R. Lark and S. Dunn (2016). "BIM for infrastructure: An overall review and constructor perspective." Automation in Construction 71: 139-152.
- Chairattanawan, K. and N. Patthirasinsiri (2563). "แหล่งกำเนิด ผลกระทบ และ แนวทางจัดการ ฝุ่น ละออง PM 2.5 บริเวณ ภาคเหนือ ของ ประเทศไทย." Journal of the Association of Researchers 25(1): 432-446.
- Chaturvedi, A. (2018). "Drones to propel new innovations in the construction industry." geospatialworld.net/blogs/drones-to-propel-new-technological-innovations-in-the-construction-industry/.
- Chu, M., J. Matthews and P. E. D. Love (2018). "Integrating mobile Building Information Modelling and Augmented Reality systems: An experimental study." Automation in Construction 85: 305-316.
- Hergunsel, M. F. (2011). "Benefits of building information modeling for construction managers and BIM based scheduling.": Worcester Polytechnic Institute.
- Jinding, X., K. Ye, J. Zuo and W. Jiang (2018). "Control Dust Pollution on Construction Sites: What Governments Do in China?" Sustainability 10: 2945.
- Johnston, J. S., J. P. Basford, M. J. F. Bulot, M. Apetroaie-Cristea, H. C. N. Easton, C. Davenport, L. G. Foster, M. Loxham, K. R. A. Morris and J. S. Cox (2019). "City

Scale Particulate Matter Monitoring Using LoRaWAN Based Air Quality IoT Devices." Sensors 19(1).

Karami, M., G. V. McMorrow and L. Wang (2018). "Continuous monitoring of indoor environmental quality using an Arduino-based data acquisition system." Journal of Building Engineering 19: 412-419.

Li, C. Z., Y. Zhao and X. Xu (2019). "Investigation of dust exposure and control practices in the construction industry: Implications for cleaner production." Journal of Cleaner Production 227: 810-824.

Li, J., H. Li, Y. Ma, Y. Wang, A. A. Abokifa, C. Lu and P. Biswas (2018). "Spatiotemporal distribution of indoor particulate matter concentration with a low-cost sensor network." Building and Environment 127: 138-147.

Li, Y. and C. Liu (2019). "Applications of multirotor drone technologies in construction management." International Journal of Construction Management 19(5): 401-412.

Manikonda, A., N. Zíková, P. K. Hopke and A. R. Ferro (2016). "Laboratory assessment of low-cost PM monitors." Journal of Aerosol Science 102: 29-40.

Mansathit, P. (2565). "บทบาทของ BIM ใน Green Construction." Construction Technique, from <https://bimspaces.com/blog/how-bim-important-in-green-construction/>.

Mathews, N. S., S. Chimalakonda and S. Jain (2021). AiR: An Augmented Reality Application for Visualizing Air Pollution. 2021 IEEE Visualization Conference (VIS).

Muller, R. and R. Elizabeth (2015). "Air Pollution and Cigarette Equivalence." Air Pollution and Cigarette Equivalence, from <http://berkeleyearth.org/air-pollution-and-cigarette-equivalence/>.

- Otto, A., N. Agatz, J. Campbell, B. Golden and E. Pesch (2018). "Optimization approaches for civil applications of unmanned aerial vehicles (UAVs) or aerial drones: A survey." Networks 72(4): 411-458.
- Sayahi, T., A. Butterfield and K. E. Kelly (2019). "Long-term field evaluation of the Plantower PMS low-cost particulate matter sensors." Environmental Pollution 245: 932-940.
- Shanbari, H., N. Blinn and R. R. A. Issa (2016). "Using augmented reality video in enhancing masonry and roof component comprehension for construction management students." Engineering, Construction and Architectural Management 23(6): 765-781.
- Theerapong, B. (2562). "The Crisis Lessons from PM 2.5 Air Pollution." EAU Heritage Journal Science and Technology 13(3): 44-58.
- United State Environment Protection Agency (2008). "Particulate matter." 2008, August 7, from <https://www.epa.gov/pm-pollution/particulate-matter-pm-basics#PM>. .
- Vahlsing, C. and K. R. Smith (2012). "Global review of national ambient air quality standards for PM10 and SO2 (24 h)." Air Quality, Atmosphere & Health 5(4): 393-399.
- Wang, J., X. Wang, W. Shou and B. Xu (2014). "Integrating BIM and augmented reality for interactive architectural visualisation." Construction Innovation 14(4): 453-476.
- Wang, X., M. J. Kim, P. E. D. Love and S.-C. Kang (2013). "Augmented Reality in built environment: Classification and implications for future research." Automation in Construction 32: 1-13.
- Zaher, M., D. Greenwood and M. Marzouk (2018). "Mobile augmented reality

applications for construction projects." Construction Innovation 18: 152-166.

Zhou Yong, W. (2016). "Digital universal particle concentration sensor PMS5003 series data manual." from http://www.aqmd.gov/docs/default-source/aq-spec/resources-page/plantower-pms1003-manual_v2-5.pdf?sfvrsn=2.

กรมควบคุมมลพิษ, สำนักจัดการคุณภาพอากาศและเสียง. พระราชบัญญัติส่งเสริมและรักษาคุณภาพสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ พ.ศ. 2535, Edited by 6, 2535.

กรมควบคุมมลพิษ. "สรุปสถานการณ์มลพิษของประเทศไทยปี 2561." กรุงเทพมหานคร, ประเทศไทย, หจก. ส. มงคลการพิมพ์, 2562

นภาพร พานิชและคณะ. ตำราระบบบำบัดมลพิษทางอากาศ, Edited by 2. กรุงเทพฯ: ศูนย์บริการวิชาการแห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2550

นิก จ้านง. การวัดระยะทางแบบสามมิติด้วยภาพในการนำร่องแบบทันการสำหรับระบบอากาศยานไร้คนขับประเภทขึ้นลงแนวตั้ง. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต, สาขาวิศวกรรมศาสตร์, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2555.

พระราชบัญญัติควบคุมอาคาร (2522). สภานิติบัญญัติแห่งชาติ. 4: 1-2.

ยรรยง อาภาอนันต์. "การศึกษาแนวทางการลดปริมาณฝุ่นละอองที่ส่งผลกระทบต่อคนงาน." จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2553

วงศ์พันธ์ ลิ้มปเสนีย์, นิตยา มหาผล และธีระ เกรอต. 2536. มลภาวะทางอากาศ. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

วสันต์ เอกพานิช. "ปัญหากฎหมายในการจัดการฝุ่นละอองจากการก่อสร้างอาคาร." มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์, 2555

วสันต์ มาพริก, เกษฎา วงษ์มาก และศุภิสร์ โลหะเวช, "ปริมาณฝุ่นละอองขนาดเล็ก (PM10) จากการ

ก่อสร้างอาคาร,” หัวข้อโครงการวิศวกรรมโยธา วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร, 2548, น. 6-7.

สมจินตนา แขนงแก้ว. "การวัดและการลดปริมาณการเกิดฝุ่นละอองจากกิจกรรมในโครงการก่อสร้างถนน กรณีศึกษาการก่อสร้างถนนในเขตจังหวัดลำปาง." จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2559

สำนักจัดการคุณภาพอากาศและเสียง กรมควบคุมมลพิษ. คู่มือการตรวจวัดฝุ่นละอองในบรรยากาศ, Edited by 1, 2546.

สำนักจัดการคุณภาพอากาศและเสียง กรมควบคุมมลพิษ. ระเบียบ และข้อปฏิบัติในการควบคุมฝุ่นละอองจากการก่อสร้างประเภทต่างๆ, Edited by 1, 2547.

สิทธิณัฐ ศรีน้อย. "การประยุกต์ใช้เทคโนโลยีความเป็นจริงเสริมเพื่อการติดตามความคืบหน้างานก่อสร้าง โครงสร้างพื้นฐานด้านการขนส่ง: กรณีศึกษาโครงการก่อสร้างทางยกระดับ." วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2562

อังก์ศิริและณัฐพล (2016). "การสอบเทียบผลการตรวจวัด PM2.5 จากเครื่องตรวจวัดแบบเรียลไทม์และวิธีวิเคราะห์เชิงน้ำหนัก." Veridian E-Journal Science and Technology, Silpakorn University 3.

อภาภรณ์ ศิริพรประสาร "โดรน ทางเลือก(ใหม่)กับงานจัดการสิ่งแวดล้อม." from <http://infofile.pcd.go.th/haz/UnmannedAerialVehicle.pdf?CFID=2022283&CFTOKE N=14667634>.



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล นายภูมิ ฉั่วสุวรรณ
วัน เดือน ปี เกิด 5 ธันวาคม 2538
วุฒิการศึกษา จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ที่อยู่ปัจจุบัน 29 ซอยรามอินทรา 67 แยก 6 หมู่บ้านรามอินทราวิเศษ ถนนรามอินทรา
แขวงรามอินทรา เขตคันนายาว กรุงเทพฯ 10230



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY