



## รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

การศึกษาและพัฒนาอากาศยานไร้คนขับเพื่อตรวจวัดปริมาณมลพิษทาง  
อากาศสำหรับสถานะแวดล้อมเมืองอัจฉริยะและพื้นที่เสี่ยงอันตราย

**A Study and Development of UAV Air Pollution Monitoring for  
Smart City and Risk Area Environment**

คณะผู้วิจัย

หัวหน้าโครงการ ดร. ศรัญ ดวงสุวรรณ

ได้รับทุนสนับสนุนงานวิจัยจาก กองทุนวิจัยสถาบัน ประจำปี พ.ศ. 2561

วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์ จังหวัดชุมพร

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



## รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

การศึกษาและพัฒนาอากาศยานไร้คนขับเพื่อตรวจวัดปริมาณมลพิษทาง  
อากาศสำหรับสถานะแวดล้อมเมืองอัจฉริยะและพื้นที่เสี่ยงอันตราย

**A Study and Development of UAV Air Pollution Monitoring for  
Smart City and Risk Area Environment**

คณะผู้วิจัย

หัวหน้าโครงการ ดร. ศรัญ ดวงสุวรรณ

ได้รับทุนสนับสนุนงานวิจัยจาก กองทุนวิจัยสถาบัน ประจำปี พ.ศ. 2561

วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์ จังหวัดชุมพร

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**ชื่อโครงการ** การศึกษาและพัฒนาอากาศยานไร้คนขับเพื่อตรวจวัดปริมาณมลพิษทางอากาศสำหรับสภาวะแวดล้อมเมืองอัจฉริยะและพื้นที่เสี่ยงอันตราย

**แหล่งเงิน** กองทุนวิจัยสถาบัน สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

**ประจำปีงบประมาณ** พ.ศ. 2561      **จำนวนเงินที่ได้รับการสนับสนุน** 100,000 บาท

**ระยะเวลาทำการวิจัย** 1 ปี ตั้งแต่ 1 มิถุนายน พ.ศ 2561 ถึง 30 มิถุนายน พ.ศ 2562

**หัวหน้าโครงการ** ดร.ศรัณู ดวงสุวรรณ

**หน่วยงานต้นสังกัด** วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์

**ภาควิชา** วิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิศวกรรมสารสนเทศ

### บทคัดย่อ

เนื่องจากปัจจุบันเทคโนโลยีอากาศยานไร้คนขับหรือ โดรนมีการประยุกต์ใช้งานด้านสิ่งแวดล้อมสำหรับงานสำรวจพื้นที่ต่าง ๆ ในมุมสูง อย่างไรก็ตาม อีกบทบาทหนึ่งยังไม่มีการนำมาประยุกต์ใช้งาน คือ การใช้งานด้านการตรวจสอบมลภาวะอากาศ โดยเฉพาะพื้นที่ที่ไม่สามารถให้เจ้าหน้าที่หรือคนเข้าไปทำงานได้ เช่น พื้นที่โรงงานที่มีก๊าซรั่วไหล พื้นที่ไฟไหม้อย่างรุนแรง หรือพื้นที่ฝุ่นละอองเกินมาตรฐาน เป็นต้น มลพิษอากาศปัจจุบันเป็นปัจจัยที่มีความเสี่ยงสูงต่อสุขภาพร่างกายมนุษย์เป็นอย่างมาก เช่น ฝุ่นละอองขนาดเล็กในเมืองขนาดใหญ่ ควันไฟจากการเผาทำลายป่า หรือกลิ่นเหม็นจากโรงงานปล่อยน้ำเสีย เป็นต้น สิ่งเหล่านี้ล้วนเป็นปัญหาที่เกิดขึ้นในสังคมปัจจุบัน วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัยนี้ คือ การแก้ไขปัญหาพื้นที่ที่เข้าถึงได้ยากและเป็นพื้นที่เสี่ยงอันตรายของการปฏิบัติงานเพื่อตรวจวัดปริมาณมลพิษอากาศ โครงการวิจัยนี้ได้คิดค้นการพัฒนาอากาศยานไร้คนขับหรือโดรนขนาดใหญ่ 4 ใบพัด เพื่อใช้ในการตรวจวัดปริมาณมลพิษในอากาศ ทั้งนี้ผู้วิจัยได้ออกแบบชุดติดตั้งเซ็นเซอร์มลพิษอากาศที่สามารถตรวจวัดได้ คือ ค่าโอโซน ค่าไนโตรเจนไดออกไซด์ ค่าคาร์บอนมอนอกไซด์ ค่าฝุ่นละอองขนาดเล็ก  $PM_{10}$  และ  $PM_{2.5}$  และค่าซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ตามลำดับ โดยการทดลองสามารถรายงานผลข้อมูลปริมาณมลพิษอากาศแบบเรียลไทม์ได้บนฐานข้อมูลออนไลน์ผ่าน โมบายแอปพลิเคชัน

**คำสำคัญ :** โดรนตรวจวัดมลพิษในอากาศแบบเรียลไทม์, เมืองอัจฉริยะ, พื้นที่เสี่ยงอันตราย, การตรวจจับแบบเคลื่อนที่

**Research Title:** A study and development of UAV air pollution monitoring for smart city and risk area environment

**Researcher:** Dr. Sarun Duangsuwan

**Faculty:** Prince of Chumphon Campus

**Department:** Information Engineering

### ABSTRACT

An uncommand aerial vehicle (UAV) or drone has been applied in the environmental work for the surveying of the higher area point of view. Nevertheless, there is no point out that applying on air pollution monitoring. In particular, poor accessibility such as gas leakage in the factory, fire forest area or high particulate matter area. Air pollution is a risk dramatically to human health such as small particulate matter in the city, fire smoke from the forest burn or the bad smell from the wastewater discharge plate, etc. All of these situations are being the problem in the current. The objective of this project is to resolve the air pollution monitoring in poor accessibility and risk areas, anywhere, anytime. We developed a quadcopter drone that called drone real-time air pollution monitoring (Dr-TAPM) to monitor the air pollutants, the sensor box was developed to equip on the drone that includes ozone (O<sub>3</sub>), nitrogen dioxides (NO<sub>2</sub>), carbon dioxides (CO), particulate matter (PM<sub>10</sub>) and (PM<sub>2.5</sub>) and sulfur dioxides (SO<sub>2</sub>) respectively. Experimentally, the results of air pollutant can monitor online via mobile application as the real-time.

**Keywords:** Dr-TAPM, Smart city, Risk area, Mobile sensing

## กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอกล่าวขอบคุณนายชิตี นิลศรี และนายปริญญา วงศ์ดิณชาติ นักศึกษาชั้นปีที่ 4 สาขาวิชาวิศวกรรมสารสนเทศ ภาควิชาวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์ จังหวัดชุมพร ผู้ช่วยวิจัยที่ทุ่มเทแรงกายและแรงใจร่วมมือในการศึกษาวิจัยโครงการนี้จนสำเร็จได้เป็นอย่างดี ทั้งนี้ผู้วิจัยขอกล่าวขอบคุณกองทุนวิจัยจากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้การสนับสนุนการทำวิจัยจากแหล่งทุนวิจัยเริ่มต้นสำหรับอาจารย์ใหม่ ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2561

ดร.ศรัญญา ดวงสุวรรณ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ

|  | หน้า      |
|--|-----------|
| บทคัดย่อภาษาไทย.....                                     | ก         |
| บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....                                  | ข         |
| กิตติกรรมประกาศ.....                                     | ค         |
| สารบัญ.....  | ง         |
| สารบัญตาราง.....   | ช         |
| สารบัญภาพ.....   | ฉ         |
| <b>บทที่ 1 บทนำ</b> .....                                | <b>1</b>  |
| 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....                  | 1         |
| 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....                         | 2         |
| 1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....                               | 2         |
| 1.4 วิธีดำเนินการวิจัย.....                              | 2         |
| 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....                       | 5         |
| <b>บทที่ 2 ทบทวนวรรณกรรม และทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง</b> ..... | <b>6</b>  |
| 2.1 ทบทวนวรรณกรรม.....                                   | 6         |
| 2.2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....                              | 8         |
| 2.2.1 เมืองอัจฉริยะ (Smart City).....                    | 8         |
| 2.2.2 มลพิษอากาศ (Air Pollution).....                    | 9         |
| 2.2.3 ดัชนีคุณภาพอากาศ (AQI).....                        | 11        |
| 2.2.4 อากาศยานไร้คนขับ หรือ โดรน.....                    | 12        |
| 2.2.5 หลักการทำงานของอากาศยานไร้คนขับ หรือ โดรน.....     | 15        |
| 2.2.6 การเชื่อมต่อไร้สาย.....                            | 17        |
| 2.2.7 โพรโทคอล MQTT.....                                 | 18        |
| 2.2.8 Android Studio.....                                | 19        |
| 2.2.9 ระบบฐานข้อมูล Firebase.....                        | 20        |
| <b>บทที่ 3 องค์ประกอบ โครงสร้าง และการออกแบบ</b> .....   | <b>22</b> |
| 3.1 ระบบโดรน 4 ใบพัด.....                                | 22        |
| 3.2 การควบคุมโดรน.....                                   | 25        |
| 3.3 การออกแบบชุดเซ็นเซอร์วัดมลพิษ.....                   | 25        |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

|   | หน้า      |
|---|-----------|
| 3.3 การออกแบบชุดเซ็นเซอร์วัดมลพิษ.....  | 25        |
| 3.3.1 เซ็นเซอร์แก๊สโอโซน (O <sub>3</sub> ) และการต่อวงจรใช้งาน.....                               | 26        |
| 3.3.2 ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์ (NO <sub>2</sub> ) และการต่อวงจรใช้งาน..... | 27        |
| 3.3.3 เซ็นเซอร์ตรวจวัดฝุ่นละออง และการต่อวงจรใช้งาน.....  | 28        |
| 3.3.4 เซ็นเซอร์แก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO <sub>2</sub> ) และการต่อวงจรใช้งาน.....                  | 29        |
| 3.3.5 ไมโครคอนโทรลเลอร์.....  | 29        |
| 3.3.1 เซ็นเซอร์แก๊สโอโซน (O <sub>3</sub> ) และการต่อวงจรใช้งาน.....                               | 26        |
| 3.4 ชุดอุปกรณ์ต้นแบบ Dr-TAPM.....   | 31        |
| 3.5 การออกแบบแอปพลิเคชันบนมือถือ.....   | 32        |
| 3.5.1 หน้าเรียลไทม์ค่าดัชนีคุณภาพอากาศ AQI.....   | 32        |
| 3.5.2 หน้ากราฟย้อนหลัง.....   | 32        |
| 3.5.3 หน้าตารางย้อนหลัง.....  | 33        |
| 3.6 การออกแบบฐานข้อมูล.....   | 33        |
| <b>บทที่ 4 แบบจำลอง และผลการตรวจวัดมลพิษอากาศ.....</b>  | <b>34</b> |
| 4.1 แบบจำลองการทดสอบในกรณีปราศจากแหล่งกำเนิดควันไฟ (Without Smoke).....                           | 34        |
| 4.2 แบบจำลองการทดสอบในกรณีมีแหล่งกำเนิดควันไฟ (With Smoke).....                                   | 35        |
| 4.3 ผลการตรวจวัดมลพิษอากาศ.....   | 36        |
| 4.3.1 กรณีปราศจากแหล่งกำเนิดควันไฟ (Without smoke) ที่ความสูง 5 เมตร.....                         | 32        |
| 4.3.2 กรณีมีแหล่งกำเนิดควันไฟ (With smoke) ที่ความสูง 5 เมตร.....                                 | 39        |
| 4.3.3 กรณีปราศจากแหล่งกำเนิดควันไฟ (Without smoke) ที่ความสูง 10 เมตร.....                        | 41        |
| 4.3.4 กรณีมีแหล่งกำเนิดควันไฟ (With smoke) ที่ความสูง 10 เมตร.....                                | 44        |
| <b>บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....</b>   | <b>47</b> |
| 5.1 สรุปผลการวิจัย.....   | 47        |
| 5.2 ข้อเสนอแนะ.....   | 48        |
| 5.3 แนวทางการพัฒนาและวิจัยต่อไปในอนาคต.....   | 49        |
| <b>บทที่ 6 สรุปผลผลิตที่ได้จากงานวิจัย.....</b>   | <b>50</b> |
| 6.1 การประชุมวิชาการระดับนานาชาติ (อยู่ในฐาน SCOPUS).....   | 51        |
| <b>บรรณานุกรม.....</b>  | <b>55</b> |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

|   | หน้า |
|---|------|
| ภาคผนวก   |      |
| ภาคผนวก ก ผลผลิตงานวิจัย.....                         | 58   |
| ภาคผนวก ข รายละเอียดผลการทดลอง.....                   | 70   |
| ภาคผนวก ค สรุปค่าใช้จ่ายการดำเนินงานโครงการวิจัย..... | 81   |
| ประวัตินักผู้วิจัย.....                               | 83   |



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญตาราง

| ตารางที่   | หน้า |
|--|------|
| 1.1 ระดับค่าดัชนีคุณภาพอากาศสำหรับประเทศไทย..... | 4    |
| 2.1 แสดงค่าข้อมูลมาตรฐาน.....                    | 12   |



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพ

| ภาพที่  | หน้า |
|---|------|
| 1.1 โดรนสำหรับตรวจวัดมลพิษในอากาศของประเทศเกาหลีใต้   | 2    |
| 1.2 ตัวอย่างเซ็นเซอร์มลพิษอากาศทั้ง 5 ชนิด  | 3    |
| 1.3 แบบจำลองการเชื่อมต่อกับเครือข่ายอินเทอร์เน็ต  | 3    |
| 1.4 ตัวอย่างการแสดงผลกราฟปริมาณมลพิษอากาศ   | 4    |
| 1.5 ตัวอย่างการแสดงผลกราฟ AQI แบบ 3 มิติ โดยใช้การวัดข้อมูลจาก Dr-TAPM                                    | 5    |
| 2.1 แสดงส่วนหุ่นของโดรน   | 13   |
| 2.2 มอเตอร์Brushless  | 13   |
| 2.3 สปีดคอนโทรล   | 14   |
| 2.4 ใบพัดโดรน   | 14   |
| 2.5 แบตเตอรี่ LiPo  | 14   |
| 2.6 ไมโครคอนโทรลเลอร์สำหรับโดรน   | 15   |
| 2.7 เครื่องรับสัญญาณวิทยุ และรีโมตควบคุม  | 15   |
| 2.8 วงจรระบบควบคุมการบินของโดรน 4 ใบพัด   | 16   |
| 2.9 การหมุนของใบพัด   | 17   |
| 2.10 โครงสร้างของ Packet ในการรับส่งข้อมูล MQTT   | 18   |
| 2.11 หน้าแรกการสร้าง New project ของ Android Studio   | 19   |
| 2.12 หน้าการเลือก Activity  | 20   |
| 2.13 การส่งข้อมูลจาก User A ไปยัง User B ผ่านระบบ Firebase  | 21   |
| 3.1 ส่วนแขนโดรน   | 22   |
| 3.2 องค์ประกอบขนาดของโดรน 4 ใบพัด   | 23   |
| 3.3 วงจรระบบควบคุมการบินของโดรน ขนาด 4 ใบพัด  | 24   |
| 3.4 รีโมตควบคุม   | 25   |
| 3.5 กล่องชุดเซ็นเซอร์ตรวจวัดมลพิษอากาศสำหรับโดรน  | 26   |
| 3.6 การต่อวงจรใช้งานเซ็นเซอร์ตรวจวัดแก๊สโอโซน (O <sub>3</sub> )   | 27   |
| 3.7 การต่อวงจรใช้งานเซ็นเซอร์ตรวจวัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) และก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์ (NO <sub>2</sub> ) | 27   |
| 3.8 การต่อวงจรใช้งานเซ็นเซอร์ฝุ่นละออง PM <sub>10, 2.5</sub>  | 28   |
| 3.9 การต่อวงจรใช้งานเซ็นเซอร์แก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO <sub>2</sub> )                                     | 29   |
| 3.10 วงจรระบบควบคุมชุดเซ็นเซอร์ตรวจวัดมลพิษทางอากาศ   | 30   |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพ (ต่อ)

| ภาพที่  | หน้า |
|---|------|
| 3.11 ต้นแบบ โดรนตรวจวัดมลพิษอากาศ Dr-TAPM.....  | 31   |
| 3.12 การเชื่อมต่อข้อมูลเข้าเครือข่ายอินเทอร์เน็ต.....   | 31   |
| 3.13 แอปพลิเคชันบนมือถือสำหรับ โดรนตรวจวัดมลพิษอากาศ.....   | 32   |
| 3.14 การออกแบบฐานข้อมูล.....  | 33   |
| 4.1 แบบจำลองการตรวจวัดมลพิษอากาศกรณีปราศจากแหล่งกำเนิดควันไฟ (Without smoke).....                       | 34   |
| 4.2 การทดสอบจริงสำหรับแบบจำลองการตรวจวัดมลพิษอากาศ<br>กรณีปราศจากแหล่งกำเนิดควันไฟ (Without smoke)..... | 35   |
| 4.3 แบบจำลองการตรวจวัดมลพิษอากาศกรณีมีแหล่งกำเนิดควันไฟ (With smoke).....                               | 35   |
| 4.4 การทดสอบจริงสำหรับแบบจำลองการตรวจวัดมลพิษอากาศ<br>กรณีมีแหล่งกำเนิดควันไฟ (With smoke).....         | 36   |
| 4.5 กราฟผลการวัดค่า PM <sub>10</sub> ที่ความสูง 5 เมตร.....   | 36   |
| 4.6 กราฟผลการวัดค่า PM <sub>2.5</sub> ที่ความสูง 5 เมตร.....  | 37   |
| 4.7 กราฟผลการวัดค่า CO ที่ความสูง 5 เมตร.....   | 37   |
| 4.8 กราฟผลการวัดค่า NO <sub>2</sub> ที่ความสูง 5 เมตร.....  | 37   |
| 4.9 กราฟผลการวัดค่า O <sub>3</sub> ที่ความสูง 5 เมตร.....   | 38   |
| 4.10 กราฟผลการวัดค่า SO <sub>2</sub> ที่ความสูง 5 เมตร.....   | 38   |
| 4.11 กราฟผลการวัดค่า PM <sub>10</sub> กรณีมีแหล่งกำเนิดควันไฟ (With smoke) ที่ความสูง 5 เมตร.....       | 39   |
| 4.12 กราฟผลการวัดค่า PM <sub>2.5</sub> กรณีมีแหล่งกำเนิดควันไฟ (With smoke) ที่ความสูง 5 เมตร.....      | 39   |
| 4.13 กราฟผลการวัดค่า CO กรณีมีแหล่งกำเนิดควันไฟ (With smoke) ที่ความสูง 5 เมตร.....                     | 40   |
| 4.14 กราฟผลการวัดค่า NO <sub>2</sub> กรณีมีแหล่งกำเนิดควันไฟ (With smoke) ที่ความสูง 5 เมตร.....        | 40   |
| 4.15 กราฟผลการวัดค่า O <sub>3</sub> กรณีมีแหล่งกำเนิดควันไฟ (With smoke) ที่ความสูง 5 เมตร.....         | 40   |
| 4.16 กราฟผลการวัดค่า SO <sub>2</sub> กรณีมีแหล่งกำเนิดควันไฟ (With smoke) ที่ความสูง 5 เมตร.....        | 41   |
| 4.17 กราฟผลการวัดค่า PM <sub>10</sub> ที่ความสูง 10 เมตร.....   | 41   |
| 4.18 กราฟผลการวัดค่า PM <sub>2.5</sub> ที่ความสูง 10 เมตร.....  | 42   |
| 4.19 กราฟผลการวัดค่า CO ที่ความสูง 5 เมตร.....  | 42   |
| 4.20 กราฟผลการวัดค่า NO <sub>2</sub> ที่ความสูง 10 เมตร.....  | 42   |
| 4.21 กราฟผลการวัดค่า O <sub>3</sub> ที่ความสูง 10 เมตร.....   | 43   |
| 4.22 กราฟผลการวัดค่า SO <sub>2</sub> ที่ความสูง 10 เมตร.....  | 43   |
| 4.23 กราฟผลการวัดค่า PM <sub>10</sub> กรณีมีแหล่งกำเนิดควันไฟ (With smoke) ที่ความสูง 10 เมตร.....      | 44   |

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของโรงเรียนเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้ไปใช้ประโยชน์ท่านควรทำ

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญญภาพ (ต่อ)

| ภาพที่  | หน้า |
|---|------|
| 4.24 กราฟผลการวัดค่า PM <sub>2.5</sub> กรณีมีแหล่งกำเนิดควันไฟ (With smoke) ที่ความสูง 10 เมตร.....   | 44   |
| 4.25 กราฟผลการวัดค่า CO กรณีมีแหล่งกำเนิดควันไฟ (With smoke) ที่ความสูง 10 เมตร.....                  | 45   |
| 4.26 กราฟผลการวัดค่า NO <sub>2</sub> กรณีมีแหล่งกำเนิดควันไฟ (With smoke) ที่ความสูง 10 เมตร.....     | 45   |
| 4.27 กราฟผลการวัดค่า O <sub>3</sub> กรณีมีแหล่งกำเนิดควันไฟ (With smoke) ที่ความสูง 10 เมตร.....      | 45   |
| 4.28 กราฟผลการวัดค่า SO <sub>2</sub> กรณีมีแหล่งกำเนิดควันไฟ (With smoke) ที่ความสูง 10 เมตร.....     | 46   |
| 5.1 แนวทางการพัฒนาและวิจัยต่อในอนาคตแบบจำลองคุณภาพอากาศ 3 มิติ โดยใช้โครนตรวจวัดปริมาณมลพิษอากาศ..... | 49   |



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

มลพิษทางอากาศเป็นปัญหาที่พบได้ทั่วไปโดยเฉพาะในเมืองใหญ่ทั่วโลก ซึ่งปัญหามลพิษทางอากาศส่วนมากจะเกิดขึ้นจากการมุ่งพัฒนาเศรษฐกิจเพื่อนำประเทศไปสู่ความเป็นประเทศอุตสาหกรรมอย่างรวดเร็วมีการขยายตัวของการก่อสร้างเพื่อสร้างที่อยู่อาศัยและโรงงานอุตสาหกรรม ตลอดจนก่อสร้างถนนเพื่ออำนวยความสะดวกทางด้านการคมนาคมขนส่ง ซึ่งผลจากการพัฒนาประเทศที่มุ่งเป้าหมายจะเป็นประเทศอุตสาหกรรมได้ก่อให้เกิดปัญหามลพิษทางอากาศขึ้นมากมาย โดยเฉพาะในบริเวณที่ตั้งของแหล่งอุตสาหกรรมต่าง ๆ และในบริเวณที่มีการจราจรหนาแน่น เพราะฉะนั้น ปัญหามลพิษทางอากาศเป็นปัญหาที่มีความซับซ้อนและแก้ไขได้ยากในชีวิตประจำวันของประชากรในปัจจุบัน

การจัดการกับปัญหาที่ดีที่สุด คือ การควบคุมที่แหล่งปล่อยมลพิษสู่อากาศ และการพัฒนาระบบตรวจวัดแจ้งเตือนปริมาณมลพิษในอากาศ ซึ่งเมื่อมีระบบการตรวจวัดแจ้งเตือนที่ได้มาตรฐานก็จะสามารถควบคุมแหล่งปล่อยปริมาณของมลพิษสู่สภาวะแวดล้อมได้ โดยที่ระดับปริมาณมลพิษในชั้นบรรยากาศที่เหมาะสมจะถูกเจือจางออกไปจากชั้นบรรยากาศได้เองตามธรรมชาติ แต่ถ้ามลพิษเหล่านี้ถูกปล่อยสู่ชั้นบรรยากาศในปริมาณที่มากจนเกินความสามารถที่ชั้นบรรยากาศจะรองรับได้ก็จะเกิดการสะสมของมลพิษขึ้นในชั้นบรรยากาศทันทีและก่อให้เกิดอันตรายต่อสุขภาพของมนุษย์และสัตว์ตลอดจนส่งผลกระทบต่อการเจริญเติบโตของพืชซึ่งทำให้ผลผลิตทางการเกษตรลดลงได้ ดังนั้น การพัฒนาระบบตรวจวัดแจ้งเตือนปริมาณมลพิษในอากาศให้หน่วยงานที่ควบคุมหรือประชากรในทั่วไปได้ทราบข้อมูลได้อย่างรวดเร็วจึงมีความสำคัญมาก

โครงการวิจัยนี้มุ่งเน้นการพัฒนาอุปกรณ์ตรวจวัดมลพิษอากาศด้านสิ่งแวดล้อมตอบสนองการเจริญเติบโตของโลกดิจิทัล (Digital transformation) และนวัตกรรมสมัยใหม่ รวมถึงการขยายคุณภาพความเป็นอยู่รองรับเมืองอัจฉริยะ (Smart city) ในช่วง พ.ศ 2560 – พ.ศ 2565 เพื่อให้ประชากรได้เข้าถึงข้อมูลสาธารณประโยชน์ได้อย่างรวดเร็วขึ้น เช่น แผนที่การท้องเที่ยว ข้อมูลรถประจำทาง ข้อมูลโรงพยาบาล ข้อมูลการจราจร ข้อมูลปริมาณมลพิษในอากาศ ข้อมูลพยากรณ์อากาศ และอื่น ๆ อีกมาก เป็นต้น ดังนั้น การพัฒนาระบบอากาศยานไร้คนขับเพื่อตรวจวัดปริมาณมลพิษทางอากาศจะเป็นนวัตกรรมสมัยใหม่ด้านสิ่งแวดล้อมสำหรับการใช้รายงานข้อมูลปริมาณมลพิษในอากาศโดยเชื่อมต่อผ่านเครือข่ายอินเทอร์เน็ตทุกสรรพสิ่งหรือที่เรียกว่า IoT (Internet of Things) เพื่อสามารถใช้งานได้ในพื้นที่เสี่ยงอันตรายได้ตลอดเวลา

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- 1.2.1 เพื่อศึกษาปัญหามลพิษในอากาศของประเทศไทยในปัจจุบัน
- 1.2.2 เพื่อพัฒนาโครงตรวจวัดปริมาณมลพิษในอากาศแบบเรียลไทม์
- 1.2.3 เพื่อนำไปใช้ในการรายงานผลมลพิษในอากาศสำหรับพื้นที่เมืองและพื้นที่เสี่ยงอันตราย

## 1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1.3.1 ศึกษาสาเหตุที่ทำให้เกิดปัญหาด้านมลพิษในอากาศของเมืองใหญ่ รวมถึงระบบรายงานผลมลพิษในอากาศที่มีอยู่ในปัจจุบัน

1.3.2 ออกแบบและพัฒนาโครงขนาด 4 ใบพัด ควบคุมด้วยระบบสื่อสารไร้สาย รองรับกรยกน้ำหนักได้ไม่เกิน 2.5 กิโลกรัม

1.3.3 สร้างชุดอุปกรณ์เซ็นเซอร์มลพิษในอากาศทั้งหมด 5 ชนิด ได้แก่ ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO<sub>2</sub>) โอโซน (O<sub>3</sub>) ไนโตรเจนไดออกไซด์ (NO<sub>2</sub>) คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) และฝุ่นละอองขนาด PM<sub>10</sub> PM<sub>2.5</sub> ที่สามารถติดตั้งได้บนโครง

1.3.4 สร้างฐานข้อมูลออนไลน์สำหรับรองรับการแสดงผลบนหน้าจอมือถือและผ่านเว็บไซต์

## 1.4 วิธีดำเนินการวิจัย

โครงการวิจัยนี้จะพัฒนาอากาศยานไร้คนขับหรือโครงขนาด 4 ใบพัด เพื่อใช้สำหรับการตรวจวัดปริมาณมลพิษในอากาศในพื้นที่ที่เข้าถึงได้ยาก และเสี่ยงอันตราย ระบบจะช่วยเพิ่มความรวดเร็วในการรายงานผลผ่านเครือข่ายออนไลน์ โดยสามารถใช้งานโครงเพื่อตรวจวัดมลพิษในอากาศในพื้นที่เหล่านี้ได้ เช่น พื้นที่ฝุ่นละอองหนาแน่น พื้นที่อันตรายในโรงงานอุตสาหกรรม หรือบ่อขยะ และพื้นที่ของไฟฟ้า เป็นต้น



ภาพที่ 1.1 โครงสำหรับตรวจวัดมลพิษในอากาศของประเทศเกาหลีใต้ [1]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครงการวิจัยนี้จะพัฒนาชุดกล่องเซ็นเซอร์ตรวจวัดมลพิษที่ประกอบด้วย เซ็นเซอร์โอโซน ( $O_3$ ) เซ็นเซอร์ไนโตรเจนไดออกไซด์ ( $NO_2$ ) เซ็นเซอร์คาร์บอนมอนอกไซด์ ( $CO$ ) เซ็นเซอร์ฝุ่น ( $PM_{10,2.5}$ ) และเซ็นเซอร์ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ( $SO_2$ ) ตามลำดับ โดยสามารถใช้หลักการรายงานผลข้อมูลเช่นเดียวกับทางกรมควบคุมมลพิษ ซึ่งได้แสดงดัชนีคุณภาพอากาศของประเทศไทยตามพระราชบัญญัติส่งเสริมและรักษาคุณภาพสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ พ.ศ. 2535



ภาพที่ 1.2 ตัวอย่างเซ็นเซอร์มลพิษอากาศทั้ง 5 ชนิด

โดยเซ็นเซอร์ทั้งหมดจะถูกออกแบบให้ติดตั้งบน โดรนและเชื่อมต่อกับเครือข่ายสัญญาณอินเทอร์เน็ตด้วย โมดูลรับส่งข้อมูลแบบไร้สายย่านความถี่ 850/1800 MHz เพื่อจะสามารถรายงานผลปริมาณมลพิษลงบนฐานข้อมูลเว็บไซต์ที่ได้ออกแบบไว้ ซึ่งแสดงรูปแบบแบบจำลองได้ดังนี้

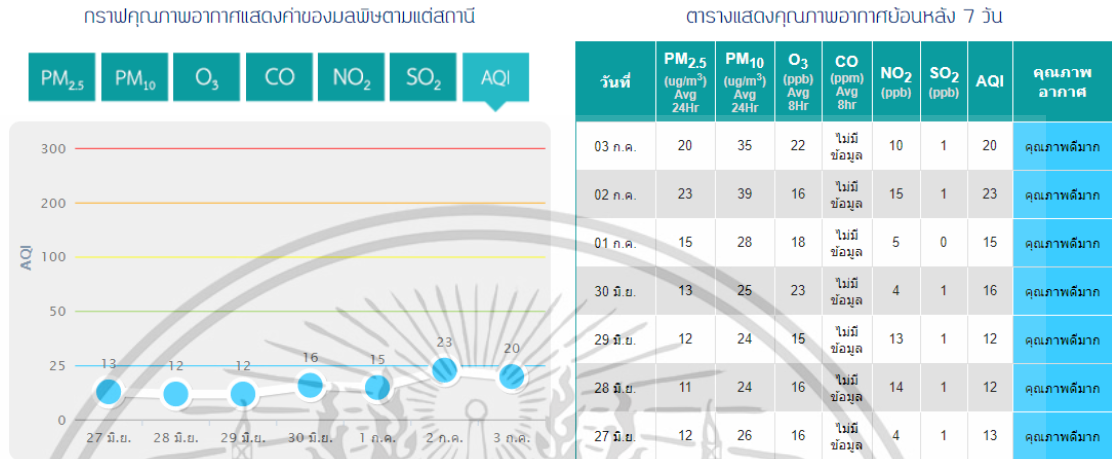


ภาพที่ 1.3 แบบจำลองการเชื่อมต่อกับเครือข่ายอินเทอร์เน็ต

ผู้ควบคุม โดรน จะทำการตรวจสอบความพร้อมของเซ็นเซอร์ทั้งหมดผ่านแอปพลิเคชันและควบคุม โดรน ให้สามารถตรวจวัดปริมาณมลพิษในสถานที่ตรวจวัด พร้อมทั้งส่งผลข้อมูลผ่านเครือข่ายอินเทอร์เน็ตแบบ Real-time

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่ผู้ใช้งานจากภายนอกสามารถเข้าถึงข้อมูลการรายงานผลได้ตลอดเวลา ตัวอย่างรูปแบบของการรายงานผลบนเว็บไซต์แสดงได้ดังนี้



ภาพที่ 1.4 ตัวอย่างการแสดงผลกราฟปริมาณมลพิษอากาศ [2]

ตารางที่ 1.1 แสดงระดับคุณภาพอากาศที่สามารถชีวิตได้ด้วยผลดัชนีคุณภาพอากาศ AQI (Air quality index) ซึ่งเป็นรูปแบบการรายงานผลที่ง่ายต่อการเข้าใจของประชาชนทั่วไปเพื่อเผยแพร่ประชาสัมพันธ์ให้ได้รับทราบถึงสถานการณ์มลพิษในอากาศว่าอยู่ในระดับใดและมีผลกระทบต่อสุขภาพอนามัย โดยที่ดัชนีคุณภาพอากาศในประเทศไทยสามารถแบ่งระดับความรุนแรงได้ 5 ระดับ ดังนี้

ตารางที่ 1.1 ระดับค่าดัชนีคุณภาพอากาศสำหรับประเทศไทย [2]

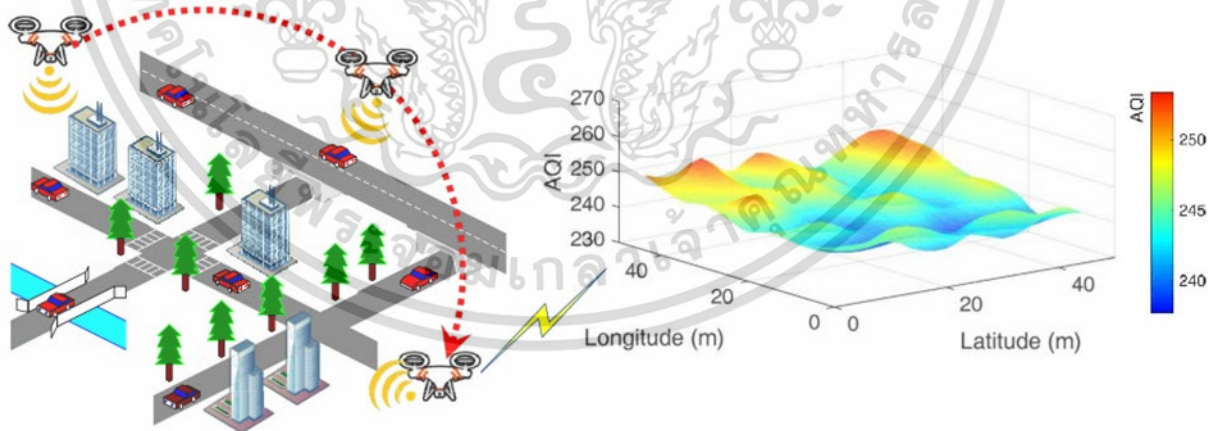
| AQI            | ความหมาย         | สีที่ใช้ | แนวทางป้องกันผลกระทบ  |
|----------------|------------------|----------|---|
| 0-25           | คุณภาพอากาศดีมาก | ฟ้า      | ไม่มีผลกระทบต่อสุขภาพ   |
| 26-50          | คุณภาพอากาศดี    | เขียว    | ไม่มีผลกระทบต่อสุขภาพ   |
| 51-100         | ปานกลาง          | เหลือง   | ผู้ป่วยระบบทางเดินหายใจ บุคคลทั่วไป เด็ก ผู้สูงอายุ ไม่ควรอยู่บริเวณนี้ |
| 101-200        | มีผลต่อสุขภาพมาก | ส้ม      | ผู้ป่วยระบบทางเดินหายใจ บุคคลทั่วไป เด็ก ผู้สูงอายุ ไม่ควรอยู่บริเวณนี้ |
| มากกว่า<br>201 | อันตราย          | แดง      | บุคคลทั่วไปไม่ควรอยู่บริเวณนี้  |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

การใช้อากาศยานไร้คนขับหรือโดรนกับงานด้านสิ่งแวดล้อมได้ถูกนำมาเป็นเครื่องมือตรวจสอบคุณภาพอากาศแบบเรียลไทม์ โดยเฉพาะการนำไปใช้งานในพื้นที่เฉพาะเจาะจง เช่น โรงงานอุตสาหกรรม เป็นต้น โดยผู้ใช้งานสามารถนำโดรนติดกล้องและอุปกรณ์ตรวจสอบคุณภาพอากาศ เช่น เครื่อง Spectrophotometer หรืออุปกรณ์เก็บตัวอย่าง Particulate matter เป็นต้น เพื่อตรวจวัดปริมาณคุณภาพอากาศที่ปลายปล่องควันของโรงงานอุตสาหกรรม การประยุกต์ใช้งานโดรนกับการตรวจวัดคุณภาพอากาศเป็นวิธีการที่เจ้าหน้าที่ของรัฐบาลจีนดำเนินการเพื่อป้องกันการให้ข้อมูลเท็จของโรงงาน ทั้งนี้ ถึงแม้ว่าโรงงานจะมีระบบการส่งข้อมูลการตรวจวัดมลพิษที่ปลายปล่องอยู่แล้ว โรงงานบางแห่งในจีนมีวิธีการหลีกเลี่ยงการตรวจสอบ เช่น การป้อนข้อมูลปลอม หรือการแอบปล่อยมลพิษขณะที่ระบบไม่มีการเชื่อมต่อ อย่างไรก็ตาม การใช้โดรนสามารถบ่งชี้แหล่งกำเนิดมลพิษอากาศและน้ำได้โดยสังเกตจากปล่องหรือน้ำที่เปลี่ยนสีขณะออกจากโรงงาน โดรนสามารถนำมาประยุกต์ใช้ในงานฉุกเฉินสารเคมี เช่น การสำรวจขอบเขตสารปนเปื้อนมลพิษในน้ำ หรือการถักทอทั้งกากของเสียในบริเวณหุบเขาหรือพื้นที่ที่กว้างเข้าถึงได้ยาก เป็นต้น

ดังนั้น ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการศึกษาโครงการวิจัยนี้ คือ สามารถนำไปเป็นอุปกรณ์ใช้งานได้จริง โดยใช้ชื่อว่า Drone real-time air pollution monitoring (Dr-TAPM) และสามารถต่อยอดงานวิจัยสำหรับการพัฒนาแบบจำลองคุณภาพอากาศแบบ 3 มิติได้เป็นอย่างดีในอนาคต ดังแสดงภาพตัวอย่างแบบจำลองการใช้งาน Dr-TAPM สำหรับวิเคราะห์ข้อมูลผลค่า AQI แบบ 3 มิติ ดังภาพที่ 1.5



ภาพที่ 1.5 ตัวอย่างการแสดงผลกราฟ AQI แบบ 3 มิติ โดยใช้การวัดข้อมูลจาก Dr-TAPM [3]

## บทที่ 2

### บททวนวรรณกรรม และทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 บททวนวรรณกรรม

จากข้อมูลกรมควบคุมมลพิษ (คพ.) กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อมพบว่า ในพ.ศ. 2561 มีการร้องเรียนปัญหามลพิษมายังหน่วยงานภาครัฐที่มีหน้าที่รับผิดชอบ รวม 6,026 เรื่อง ปัญหาที่ร้องเรียนมากที่สุด คือ มลพิษทางอากาศ ได้แก่ กลิ่นเหม็น ฝุ่นละออง เขม่าควัน 2,475 เรื่อง (ร้อยละ 41) รองลงมาคือ ปัญหาด้านเสียงความสั่นสะเทือน 2,331 เรื่อง (ร้อยละ 38) ซึ่งส่วนใหญ่มาจากโรงงานอุตสาหกรรม และร้องเรียนเกี่ยวกับขยะมูลฝอยสิ่งปฏิกูล ของเสียอันตรายมีมากกว่า 500 เรื่อง และอีกหลายกรณีเป็นอุบัติเหตุ เช่น ไฟไหม้บ่อขยะแพรกษา บ่อขยะบางปลาที่นิคมอุตสาหกรรมที่บางปู จังหวัดสมุทรปราการเพลิงไหม้โกดังเก็บสารเคมี ข่าวไฟไหม้ น้ำมันรั่ว สารเคมีรั่วไหล อีกเกือบ 20 ครั้ง [4] และผลการตรวจวัดสารมลพิษทางอากาศจากกองจัดการคุณภาพอากาศและเสียงสำนักสิ่งแวดล้อม ช่วงเดือนมกราคม พ.ศ. 2562 ถึงเดือนเมษายน พ.ศ. 2562 ที่ผ่านมา ระบุชี้ว่ากรุงเทพมหานครกำลังประสบปัญหาเรื่องมลภาวะอากาศเป็นพิษเกินมาตรฐาน จากการตรวจวัดพบว่า มีสารมลพิษแต่ละชนิดอยู่ในอัตราสูงเกินค่ามาตรฐาน คือ ประเภทฝุ่นละอองขนาดเล็ก 2.5 ไมครอนมีค่าเฉลี่ย ที่กรุงเทพมหานคร อยู่ที่ 28-212 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร (มกก./ลบ.ม.) เกินจากค่ามาตรฐาน 120 ไมโครกรัมที่กำหนดไว้ ประเภทฝุ่นละอองขนาดเล็กกว่า 2.5 ไมครอน อยู่ที่ 13-86 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร เกินจากค่ามาตรฐาน 50 ไมโครกรัมที่กำหนดไว้ รวมถึงปริมาณก๊าซโอโซนที่เกินกว่าค่ามาตรฐาน โดยเฉพาะสถานีสำนักงานเขตราชเทวีและราษฎร์บูรณะ เสี่ยงต่อปัญหาสุขภาพทางเดินหายใจ [4] และจากรายงานสถานที่ที่ประสบมลพิษมากที่สุดในโลก (World's Worst Polluted Places) ของสถาบันแบล็กสมิธ (Blacksmith Institute) ใน ค.ศ. 2017 พบว่าการสะสมของมลพิษทางอากาศภายในอาคาร และคุณภาพของอากาศในเมืองจัดเป็นปัญหามลพิษโลก 2 ปัญหาที่เลวร้ายที่สุด และตามรายงานขององค์การอนามัยโลก (WHO) ใน ค.ศ. 2018 พบว่ามลพิษทางอากาศคร่าชีวิตคนประมาณ 7 ล้านคนทั่วโลก [5]

การพัฒนาเซ็นเซอร์ตรวจวัดมลพิษทางอากาศได้ถูกนำเสนอในบทความวิชาการระดับนานาชาติลำดับที่ [6] และ [7] ตามลำดับ โดยผลการศึกษาวิจัยพบว่า การทดสอบสามารถแสดงระดับข้อมูลค่ามลพิษอากาศของแต่ละเซ็นเซอร์แบบเรียลไทม์จากฐานข้อมูลที่พัฒนาบนแพลตฟอร์มของกูเกิล (Google firebase) ได้อย่างมีประสิทธิภาพ อย่างไรก็ตาม ในบทความวิจัยที่ [6] และ [7] นี้ยังไม่ได้ดำเนินการทดสอบร่วมกับโดรนในพื้นที่ต่าง ๆ จากการทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวกับกับการตรวจวัดมลพิษอากาศโดยใช้อากาศยานไร้คนขับพบว่าเป้าหมาย (Target) หลักของการใช้งานอากาศยานไร้คนขับหรือโดรน คือ การตรวจวัดปริมาณมลพิษในพื้นที่เสี่ยงอันตรายและเข้าถึงได้ยาก และสามารถแสดงข้อมูลความเข้มข้น (concentration) ของระดับ AQI ได้อย่างแม่นยำ บทความวิจัยลำดับที่ [8] ได้กล่าวว่า

การใช้โดรนสามารถเก็บข้อมูลมลพิษอากาศได้แม่นยำในพื้นที่หลากหลายระดับและเหมาะสมกับนำมาวิเคราะห์แบบสามมิติได้ง่าย ต่อมามีการพัฒนาให้โดรนสามารถรองรับเครือข่ายร่วมกับอินเทอร์เน็ตท้องถิ่นไร้สาย หรือ WiFi มาตรฐาน IEEE 802.11 [9] ด้วยการเชื่อมต่อแบบ โหนดต่อโหนด (node-to-node) หรือเครือข่ายแอดฮอค (Ad-Hoc network) อย่างไรก็ตาม การใช้งานจริงอาจต้องอาศัยบริเวณพื้นที่ที่รองรับสัญญาณ WiFi ได้เท่านั้น โครงการวิจัย ARIA [10] ได้พัฒนาขึ้นมาในปี ค.ศ. 2018 โดยมหาวิทยาลัยพาโดวา (University of Padova) ประเทศอิตาลี ได้พัฒนาโดรนสำหรับตรวจวัดมลพิษทางอากาศที่สามารถส่งข้อมูลผลค่าระดับโอโซน ( $O_3$ ) ระดับไนโตรเจนไดออกไซด์ ( $NO_2$ ) ระดับคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ระดับฝุ่นละออง ( $PM_{2.5,10}$ ) และระดับก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ( $SO_2$ ) ได้ตามลำดับ ผลจากการทดลองพบว่าโดรนสามารถบินตรวจวัดมลพิษอากาศในระดับความสูงได้ตั้งแต่ 5 – 20 เมตร การวัดตามระดับความสูงสามารถช่วยในการแยกแยะความเข้มข้นของปริมาณคุณภาพอากาศได้เป็นอย่างดี สอดคล้องกับการศึกษาวิจัยของ Y. Yang et al. [11] ในปี ค.ศ. 2017 ได้นำเสนอโครงการวิจัย Arms (AQI real-time monitoring system) ที่พัฒนาโดรนติดตั้งชุดเซ็นเซอร์มลพิษอากาศเพื่อตรวจวัดในพื้นที่เมือง นอกจากนี้ได้นำเสนอหลักการตรวจวัดคุณภาพอากาศแบบสามมิติโดยใช้ทฤษฎี Adaptive Gaussian Plume Model (AGPM) สำหรับการประมวลผลค่า AQI แบบระนาบสามมิติ หรือแกน x แกน y และแกน z ผลการทดลองพบว่าอัลกอริทึม AGPM สามารถคาดการณ์ผลค่า AQI ได้แม่นยำถึง 80 เปอร์เซ็นต์ จากการทดสอบผ่านการจำลองทางโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ในผลงานวิจัยต่อมาของ Y. Yang et al. [12] ในปี ค.ศ. 2018 ได้นำเสนอแบบจำลอง Entropy-based semi-supervised learning (ESSL model) และอัลกอริทึม Entropy minimization ranking (EMR) เปรียบเทียบกับผลการทดสอบของอัลกอริทึมแบบ Semi-supervised learning เช่น Deep neural network (DNN), k-nearest Neighbors (kNN), classification and regressive tree (CART), support vector regressive (SVR), linear interpolation (LI), multi-variable linear regressive (MLR) เป็นต้น เพื่อประเมินผลค่าความผิดพลาดน้อยสุด (Root mean square error: RMSE) จากผลข้อมูลของชุดเซ็นเซอร์ตรวจวัดมลพิษทางอากาศ ผลการทดลองพบว่าแบบจำลอง ESSL และอัลกอริทึม EMR เหมาะสมกับการใช้งานร่วมกับชุดเซ็นเซอร์ตรวจวัดมลพิษทางอากาศ อย่างไรก็ตาม ผลการทดลองวิจัยยังไม่ได้พิจารณาจากการทดสอบในสภาพแวดล้อมจริงเมื่อโดรนตรวจวัดปริมาณมลพิษอากาศและรายงานผลเข้าระบบแสดงข้อมูล บทความวิจัยต่อมาของ Y. Yang et al. [3] ที่ได้ตีพิมพ์ลงในวารสาร IEEE Internet of Things Journal ฉบับที่ 5 ในปี ค.ศ. 2018 ได้กล่าวว่าการประยุกต์ใช้อัลกอริทึม GPM ร่วมกับอัลกอริทึม NN หรือเรียกว่า GPM-NN สามารถช่วยให้อากาศยานไร้คนขับประหยัดพลังงานได้ด้วยการบินเพื่อตรวจวัดปริมาณมลพิษอากาศ นอกจากนี้การใช้อัลกอริทึมโครงข่ายประสาทเทียม (Neural network) สามารถช่วยให้การประมวลผลค่า AQI มีประสิทธิภาพมากขึ้นด้วย

จากการทบทวนวรรณกรรมพบว่างานวิจัยด้านการพัฒนาอากาศยานไร้คนขับสำหรับใช้ตรวจวัดปริมาณคุณภาพอากาศกำลังได้รับความสนใจเป็นอย่างมาก เพราะช่วยประโยชน์ในเรื่องการเข้าถึงในพื้นที่เสี่ยงอันตรายและพื้นที่

โรงงานอุตสาหกรรมหรือเมืองใหญ่ แนวโน้มการวิเคราะห์ผลค่า AQI จะเปลี่ยนเป็นแบบจำลองแสดงผลแบบสามมิติ โดยอาศัยหลักการทางคณิตศาสตร์สมัยใหม่มาช่วยแยกแยะข้อมูล (Classification) และประมวลผลข้อมูล (Data processing) ให้รวดเร็วขึ้นตอบสนองการใช้งานเทคโนโลยีแบบเรียลไทม์

## 2.2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

### 2.2.1 เมืองอัจฉริยะ (Smart City)

เมืองอัจฉริยะ หมายถึง เมืองที่ใช้ประโยชน์จากเทคโนโลยีดิจิทัล หรือนวัตกรรม ที่ทันสมัยและชาญฉลาด ในการเพิ่มประสิทธิภาพการให้บริการ การบริหารจัดการเมืองการลดค่าใช้จ่ายและการใช้ทรัพยากร การมีส่วนร่วมของประชาชนในการพัฒนาเมือง ทั้งนี้การพัฒนาเมืองต้องดำเนินการภายใต้แนวคิดเมืองน่าอยู่ ซึ่งผู้อำนวยการสำนักงานส่งเสริมเศรษฐกิจดิจิทัล ผู้อำนวยการสำนักนโยบายและแผนการขนส่งและจราจร และผู้อำนวยการสำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน ในฐานะเลขานุการร่วมของคณะกรรมการขับเคลื่อนการพัฒนาเมืองอัจฉริยะ (Smart City) ได้ให้นิยามไว้และได้กำหนดรูปแบบเมืองอัจฉริยะต้นแบบ ประกอบด้วย 6 สาขา ได้แก่

1. เศรษฐกิจอัจฉริยะ (Smart Economy)
2. ระบบขนส่งและการสื่อสารอัจฉริยะ (Smart Mobility)
3. พลังงานและสิ่งแวดล้อมอัจฉริยะ (Smart Energy & Environment)
4. ระบบบริหารภาครัฐอัจฉริยะ (Smart Governance)
5. พลเมืองอัจฉริยะ (Smart People)
6. การดำรงชีวิตอัจฉริยะ (Smart Living)

จะเห็นได้ถึงการให้ความสำคัญที่ภาครัฐใส่ใจด้านสิ่งแวดล้อมของเมือง ซึ่งเป็นหนึ่งในรูปแบบเมืองอัจฉริยะต้นแบบ โดยได้กำหนดพื้นที่ 7 จังหวัด ได้แก่ กรุงเทพมหานคร เชียงใหม่ ภูเก็ต ขอนแก่น ชลบุรี ระยอง และฉะเชิงเทรา เพื่อดำเนินโครงการนำร่องการพัฒนาเมืองอัจฉริยะ [13]

ทั้งนี้ การพัฒนาเมืองสิ่งแวดล้อมอัจฉริยะเป็นการพัฒนาเพื่อยกระดับคุณภาพชีวิตของคนในชุมชนและสังคม โดยรอบให้มีสภาพแวดล้อมที่ดี มีการใช้ทรัพยากรอย่างมีประสิทธิภาพ เช่น สามารถลดการปลดปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์ (Carbon dioxide) มีการบริหารจัดการพื้นที่สีเขียว มีการใช้พลังงานทดแทน เช่น พลังงานลม พลังงานน้ำ พลังงานแสงอาทิตย์ เป็นต้น ตลอดจนการนำเทคโนโลยีดิจิทัลมาใช้ในการจัดการระบบสารสนเทศ การจัดการผังเมือง ระบบการคมนาคมและโครงสร้างพื้นฐานของเมืองทำให้ลดการสร้างผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมให้ลดน้อยลง เป็นแนวทางในการพัฒนาเมืองให้ยั่งยืนในอนาคต

### 2.2.2 มลพิษอากาศ (Air Pollution)

มลพิษอากาศก่อให้เกิดผลเสียหลายต่อสิ่งต่าง ๆ ได้มากมายซึ่งก่อให้เกิดอันตรายต่อสุขภาพอนามัยของคนและสัตว์ ทำลายพืช ทำให้วัสดุเสียหาย ทำให้เกิดผลเสียแก่สภาพภูมิอากาศและเป็นอันตรายต่อสิ่งแวดล้อมและระบบนิเวศวิทยา เช่น ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO<sub>2</sub>) ก่อให้เกิดความเป็นฝนกรด หรือ ก๊าซโอโซน (O<sub>3</sub>) ที่เกิดจากปฏิกิริยาระหว่างก๊าซไฮโดรคาร์บอน (HCs) กับออกไซด์ของไนโตรเจน (NO<sub>2</sub>) จากไอเสียของรถยนต์ที่มีแสงแดดเป็นตัวเร่งซึ่งมีผลกระทบโดยตรงต่อระบบทางเดินหายใจของคนและสัตว์ และการเจริญเติบโตของพืช เป็นต้น ลักษณะและความรุนแรงของผลเสียที่เกิดขึ้นจะขึ้นอยู่กับประเภทและความเข้มข้นของสารมลพิษในอากาศแต่ละชนิดหรือผลรวมของสารมลพิษในอากาศตั้งแต่หนึ่งชนิดขึ้นไป และความยาวนานของการสัมผัสกับสารมลพิษในอากาศ สารมลพิษในอากาศบางชนิดอาจมีผลที่เสริมฤทธิ์กัน (Synergism) ทำให้ผลเสียที่เกิดขึ้นทวีความรุนแรงมากขึ้นกว่าผลเสียที่เกิดจากกรณีสารพิษในอากาศเพียงชนิดใดชนิดหนึ่งเท่านั้น หรืออาจมีผลหักล้างซึ่งกันและกัน (Antagonism) ทำให้ผลเสียที่เกิดขึ้นมีความรุนแรงน้อยลง ดังนั้น ผลเสียที่มีต่อสุขภาพอนามัยของมนุษย์เป็นผลเสียที่มีความสำคัญมากที่สุดเนื่องจากเกี่ยวพันถึงชีวิตและความแข็งแรงสมบูรณ์ของมนุษย์ อันตรายที่เกิดขึ้นอาจเริ่มตั้งแต่การก่อให้เกิดความรำคาญระคายเคืองเกิดการเปลี่ยนแปลงในร่างกายโดยไม่แสดงอาการจนกระทั่งมีอาการชัดเจนและถึงขั้นเสียชีวิตได้ในที่สุด นอกจากนี้อันตรายต่อสุขภาพอาจจะไม่ได้เกิดขึ้นโดยตรงเนื่องจากสารมลพิษทางอากาศเพียงอย่างเดียวแต่อาจเกิดโดยทางอ้อมจากโรคแทรกซ้อนที่เกิดขึ้นเมื่อร่างกายอ่อนแอลงจากการได้รับหรือสัมผัสกับสารมลพิษในอากาศ โดยปกติแล้วมนุษย์เราจะรับสารมลพิษในอากาศเข้าสู่ร่างกายโดยการหายใจและโดยการสัมผัสทางผิวหนังและตา

ปัญหามลพิษในอากาศโดยทั่วไปมาจากการเผาขยะหรือไฟฟ้า โรงงานอุตสาหกรรม สิ่งก่อสร้าง และการจราจร โดยเฉพาะสารมลพิษจากไอเสียรถยนต์เป็นสิ่งที่ใกล้ตัวผู้คนทั่วไปมากที่สุด ผู้ใช้รถใช้ถนนตลอดจนผู้ปฏิบัติงานบนท้องถนนล้วนได้รับผลกระทบต่อสุขภาพอนามัยจากไอเสียรถยนต์ประชาชนทั่วไปตลอดจนนักธุรกิจผู้ลงทุน และนักท่องเที่ยวจากต่างประเทศระบุว่าภาวะมลพิษอากาศเป็นปัญหาอันดับหนึ่งที่ต้องได้รับการแก้ไขโดยด่วนมิฉะนั้นแล้วจะมีผลกระทบระยะยาวต่อการลงทุนและธุรกิจการท่องเที่ยวในประเทศไทย และโดยเฉพาะอย่างยิ่งต่อคุณภาพชีวิตของคนในเมือง

#### 2.2.2.1 ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO)

คาร์บอนมอนอกไซด์ เป็นก๊าซไม่มีสี ไม่มีรสและกลิ่น เบากว่าอากาศทั่วไปเล็กน้อย เมื่อหายใจเข้าไปก๊าซนี้จะรวมกับเฮโมโกลบิน (Hemoglobin) ในเม็ดเลือดแดงได้มากกว่าออกซิเจนถึง 200 – 250 เท่า เกิดเป็นคาร์บอกซีเฮโมโกลบิน (COHb) ซึ่งลดความสามารถของเลือดในการเป็นตัวนำออกซิเจนจากปอดไปยังเนื้อเยื่อต่าง ๆ โดยทั่วไปองค์ประกอบสำคัญที่ทำให้เกิดคาร์บอกซีเฮโมโกลบินในเลือดมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของก๊าซ

คาร์บอนมอนอกไซด์ในอากาศที่สูดเข้าไป และระยะเวลาที่อยู่ในสภาวะนั้น สำหรับอาการสนองตอบของมนุษย์ขึ้นอยู่กับเปอร์เซ็นต์คาร์บอนมอนอกไซด์ โมเลกุล และความเร็วของแต่ละบุคคลเป็นสำคัญ สรุปได้ว่า ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์จะทำให้ร่างกายได้รับออกซิเจนไม่เพียงพอ ทำให้หัวใจต้องทำงานสูบน้ำเลือดมากกว่าปกติ ทำให้มีอาการมึนงง ตาพร่ามัว ปวดศีรษะ คลื่นไส้ อ่อนเพลีย เป็นลม หมดสติ และถึงตายได้ในที่สุด บริเวณที่มักพบว่ามี ความเข้มข้นของคาร์บอนมอนอกไซด์สูง ได้แก่ บริเวณริมถนน และบริเวณสี่แยกของถนนที่มีการจราจรหนาแน่น เป็นต้น

#### 2.2.2.2 ก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์ (NO<sub>2</sub>)

ออกไซด์ของไนโตรเจนประกอบด้วย ไนตรัสออกไซด์ (N<sub>2</sub>O) ไนตริกออกไซด์ (NO) ไดไนโตรเจนไดออกไซด์ (N<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) ไนโตรเจนออกไซด์ (NO<sub>2</sub>) ไดไนโตรเจนไดออกไซด์ (N<sub>2</sub>O<sub>2</sub>) ไดไนโตรเจนเตตราออกไซด์ (N<sub>2</sub>O<sub>4</sub>) และไดไนโตรเจนเพนต็อกไซด์ (N<sub>2</sub>O<sub>5</sub>) ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งเกิดจากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงต่าง ๆ เช่น ก๊าซถ่านหิน ฟืน เป็นต้น ไนตริกออกไซด์ เป็นก๊าซไม่มีสีและกลิ่น ซึ่งส่วนมากเมื่อทำปฏิกิริยาทางเคมีกับออกซิเจนในอากาศจะเปลี่ยนเป็นไนโตรเจนไดออกไซด์ซึ่งมีกลิ่นกรด และอาจมีผลต่อมนุษย์ ค่าต่ำสุดที่ก่อให้เกิดผลกระทบต่อสุขภาพของผู้ป่วยเป็นหืด คือ 190 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร (0.1 ppm)

#### 2.2.2.3 ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO<sub>2</sub>)

ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์เป็นก๊าซไม่มีสี ไม่มีไอไฟ มีกลิ่นฉุนแสบจมูก เมื่อทำปฏิกิริยากับออกซิเจนในอากาศจะเกิดเป็นซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ และจะรวมตัวเป็นกรดซัลฟิวริกเมื่อมีความชื้นเพียงพอ ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์และ ละอองกรดซัลฟิวริกอาจก่อให้เกิดอันตรายต่อระบบทางเดินหายใจ เช่น โรคหลอดลมอักเสบเรื้อรัง เป็นต้น

#### 2.2.2.4 ก๊าซโอโซน (O<sub>3</sub>)

โอโซนเป็นสารซึ่งเกิดจากปฏิกิริยาทางเคมีระหว่างไฮโดรคาร์บอน และออกไซด์ของไนโตรเจน โดยมีแสงแดดเป็นตัวเร่งสารที่เกิดขึ้นมีลักษณะเหมือนหมอกสีขาว ๆ ปกคลุมอยู่ทั่วไปในอากาศ โดยทั่วไปแล้ว ก๊าซโอโซนจะก่อให้เกิดการระคายเคืองตาและระคายเคืองต่อระบบทางเดินหายใจ ลดความสามารถในการทำงานของปอด หนึ่อยเร็ว โดยเฉพาะในเด็ก คนชรา และคนที่เป็็นโรคปอดเรื้อรัง

#### 2.2.2.5 ฝุ่นละออง (PM<sub>10, 2.5</sub>)

ฝุ่นละอองที่มีขนาดเล็กไม่เกิน 10 ไมครอน หรือที่รู้จัก PM<sub>10</sub> และ PM<sub>2.5</sub> มีความสามารถก่อให้เกิดปัญหาต่อสุขภาพ สามารถเข้าไปในระบบทางเดินหายใจผ่านโพรงจมูกเข้าไปถึงถุงลมในปอดทำให้เกิดการอักเสบ และระคาย

เครื่องเรือน และมีพิษมากยิ่งขึ้นถ้าหากเกิดจากการรวมตัวของก๊าซบางชนิด เช่น ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ออกไซด์ของไนโตรเจนเข้าไปในอนุภาคของฝุ่น โดยก่อให้เกิดการแพ้ และระคายเคืองผิวหนัง ทางเดินหายใจ และดวงตา

### 2.2.3 ดัชนีคุณภาพอากาศ (AQI)

การรายงานคุณภาพอากาศ โดยทั่วไปมักจะรายงานค่าในรูปของความเข้มข้นของสารมลพิษต่อปริมาณอากาศ มีการเปรียบเทียบกับมาตรฐานคุณภาพอากาศว่าอยู่ในระดับที่เกินหรือไม่เกินค่ามาตรฐานซึ่งประชาชนทั่วไปจะทราบโดยรวมว่า หากค่าความเข้มข้น ไม่เกินมาตรฐานก็จะเป็นอันตรายต่อสุขภาพหากเกินค่ามาตรฐานที่กำหนดไว้ก็จะเป็นอันตรายต่อสุขภาพ วิธีการรายงานค่าดัชนีคุณภาพอากาศให้กับประชาชนทราบสามารถส่งข้อมูลบนออนไลน์ในระบบอินเทอร์เน็ต หรืออาจจะใช้วิธีการรายงานข้อมูลที่เกิดขึ้นจริงให้กับชุมชน เมื่อค่าดัชนีคุณภาพอากาศสูงเกิน 100 ดังแสดงในตารางที่ 1.1

ดัชนีคุณภาพอากาศของประเทศไทยแบ่งเป็น 5 ระดับ คือ ตั้งแต่ 0 ถึง มากกว่า 300 ซึ่งแต่ละระดับจะใช้สีเป็นสัญลักษณ์เปรียบเทียบกับระดับของผลกระทบต่อสุขภาพอนามัย โดยดัชนีคุณภาพอากาศ 100 จะมีค่าเทียบเท่ามาตรฐานคุณภาพอากาศในบรรยากาศโดยทั่วไป หากดัชนีคุณภาพอากาศมีค่าสูงเกินกว่า 100 แสดงว่าค่าความเข้มข้นของมลพิษทางอากาศมีค่าเกินมาตรฐานและคุณภาพอากาศในวันนั้นจะเริ่มมีผลกระทบต่อสุขภาพอนามัยของประชาชน โดยคำนวณค่าจากตารางที่ 2.1 ได้จากสมการ ดังนี้

$$AQI = \left[ \frac{AQI_{High} - AQI_{Low}}{C_{High\ avg} - C_{Low\ avg}} \right] \times (C_{High\ avg} - C_{Low\ avg}) + AQI_{Low} \quad (2.1)$$

เมื่อ

AQI = ดัชนีคุณภาพอากาศ

$AQI_{High}$  = ดัชนีคุณภาพอากาศสูงสุด

$AQI_{Low}$  = ดัชนีคุณภาพอากาศต่ำสุด

$C_{High\ avg}$  = ค่าเฉลี่ยสูงสุด

$C_{Low\ avg}$  = ค่าเฉลี่ยต่ำสุด

ตารางที่ 2.1 แสดงค่าข้อมูลมาตรฐาน

| CO                            | O <sub>3</sub>                | SO <sub>2</sub>               | NO <sub>2</sub>               | PM <sub>10</sub>                          | AQI                                       | AQI                       |
|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|---|---|---------------------------|
| $C_{Low} - C_{High}$<br>(avg) | $C_{Low} - C_{High}$<br>(avg) | $C_{Low} - C_{High}$<br>(avg) | $C_{Low} - C_{High}$<br>(avg) | $C_{Low} - C_{High}$<br>(avg)             | AQI <sub>Low} - AQI<sub>High}</sub></sub> | ประเภท                    |
| 0 - 4.4 (ppm)                 | 0 - 54 (ppb)                  | 0 - 35 (ppb)                  | 0 - 53 (ppb)                  | 0 - 54 ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )       | 0 - 50                                    | คุณภาพดี                  |
| 4.5 - 9.4<br>(ppm)            | 55 - 70 (ppb)                 | 36 - 75 (ppb)                 | 54 - 100 (ppb)                | 55 - 154<br>( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )  | 51 - 100                                  | ปานกลาง                   |
| 9.5 - 15.4<br>(ppm)           | 71 - 105<br>(ppb)             | 76 - 304<br>(ppb)             | 101 - 649<br>(ppb)            | 155 - 354<br>( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) | 101 - 200                                 | มีผลกระทบต่อสุขภาพ        |
| 15.5 - 30.4<br>(ppm)          | 106 - 200<br>(ppb)            | 305 - 604<br>(ppb)            | 650 - 1249<br>(ppb)           | 355 - 424<br>( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) | 201 - 300                                 | มีผลกระทบต่อสุขภาพ<br>มาก |
| 30.5 - 50.4<br>(ppm)          | 201 - 300<br>(ppb)            | 605 - 1004<br>(ppb)           | 1250 - 2049<br>(ppb)          | 425 - 504<br>( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) | มากกว่า 300                               | อันตราย                   |

#### 2.2.4 อากาศยานไร้คนขับ หรือโดรน

เฮลิคอปเตอร์แบบสี่ใบพัดขนาดเล็กได้ถูกพัฒนาสำหรับเป็นอากาศยานไร้คนขับขนาดเล็กแบบขึ้นลงในแนวดิ่งเพื่อใช้ในกิจการต่างๆ ในปี ค.ศ. 1992 ได้มีการพัฒนาอากาศยานชื่อว่า Hover bot ช่วงกลางทศวรรษที่ 90 ได้มีการสร้างอากาศยาน 4 ใบพัดขนาดเล็กเชิงพาณิชย์เพื่องานอดิเรกโดยใช้เซ็นเซอร์ใจโรแบบโครงสร้างจักรกลไฟฟ้าขนาดเล็ก หรือเรียกว่า MEMs (Micro electro mechanical structure) ชื่อว่า Roswell flyer และ HMX-4 ต่อมากลายเป็น Dragon flyer มีโครงสร้างขนาดเล็ก น้ำหนักเบา สำหรับโดรนนั้นมีอยู่หลายรูปแบบ แต่ที่นิยมนำมาใช้งานมากที่สุดคือ โดรนคอปเตอร์แบบ 4 ใบพัด และ 6 ใบพัด [14]

ส่วนประกอบของโดรน ประกอบด้วย 4 ส่วน คือ

1. ส่วนหุ่นของโดรน
2. ส่วนอุปกรณ์การกำลัง
3. ส่วนวงจรอิเล็กทรอนิกส์ควบคุม
4. ส่วนรีโมตคอนโทรล

##### 2.2.4.1 ส่วนหุ่นของโดรน

ส่วนหุ่นของโดรนจะประกอบไปด้วยแผ่นเฟรม แขน และขาตั้ง ซึ่งโดยทั่วไปจะสามารถประกอบได้สำเร็จรูปจากวัสดุ เช่น อะลูมิเนียม คอมโพสิต คาร์บอนไฟเบอร์ อะคริลิก หรือพลาสติก ส่วนแขนโดรนจะออกแบบเพื่อให้

รองรับมอเตอร์และใบพัด และส่วนของขาตั้งโดรนที่จะต้องรองรับน้ำหนักทั้งหมดและความแข็งแรงขณะโดรนลงจอด ภาพที่ 2.1 แสดงตัวอย่างเฟรม แขน และขาตั้งของโดรนขนาด 4 ใบพัด



ภาพที่ 2.1 แสดงส่วนหุ่นของโดรน

#### 2.2.4.2 ส่วนอุปกรณ์การกำลัง

สำหรับอุปกรณ์การกำลังของโดรน หรืออุปกรณ์สร้างแรงยกและแรงเคลื่อนที่ของโดรน ได้แก่ มอเตอร์Brushless (Brushless motor) คือ มอเตอร์ที่ไม่มีแปรงถ่าน ใช้พลังงานสนามแม่เหล็กที่สร้างจากขดลวดสองขด โดยสนามแม่เหล็กจะกลับทิศกันเพื่อผลักให้แกนโรเตอร์หมุน ถ้ามอเตอร์หมุนช้าจะต้องเลือกใช้ใบพัดที่ใหญ่กว่า แต่ถ้ามอเตอร์หมุนเร็วจะต้องเลือกใช้ใบพัดเล็กกว่า เช่น ใบพัดขนาด 8 นิ้ว จะเหมาะสมใช้งานกับมอเตอร์ขนาด 950 Kv เป็นต้น ภาพที่ 2.2 แสดงตัวอย่างมอเตอร์Brushlessที่นิยมนำมาใช้งาน



ภาพที่ 2.2 มอเตอร์Brushless

การควบคุมมอเตอร์จะควบคุม 3 ส่วน คือ ควบคุมความเร็วมอเตอร์ ควบคุมแรงบิดของมอเตอร์ และควบคุมทิศทางการหมุนของมอเตอร์ อุปกรณ์ที่ใช้ควบคุมหลัก คือ สปีดคอนโทรล (Electronic speed control) ดังแสดงภาพที่ 2.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 2.3 สปีดคอนโทรล

สำหรับใบพัด โดรนจะมีอยู่หลายขนาดขึ้นอยู่กับน้ำหนักของโดรน รวมถึงกำลังมอเตอร์ที่เหมาะสม โดยจะแบ่งการหมุนเป็น 2 ระบบ คือ ระบบหมุนทวนเข็มนาฬิกา และตามเข็มนาฬิกา นอกจากนี้ จะแบ่งชนิดของใบพัดเป็น 2 ชนิด คือ ใบพัดความเร็วรอบจัด และความเร็วรอบสูง ดังแสดงภาพที่ 2.4



ภาพที่ 2.4 ใบพัดโดรน

แบตเตอรี่เป็นแหล่งพลังงานไฟฟ้าให้กับโดรน ส่วนใหญ่จะนิยมใช้ชนิดแบตเตอรี่ลิเทียม-โพลิเมอร์ หรือเรียกกันว่า (Lithium Polymer: LiPo) ดังแสดงภาพที่ 2.5



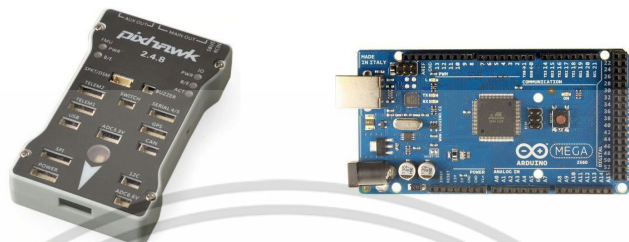
ภาพที่ 2.5 แบตเตอรี่ LiPo

#### 2.2.4.3 ส่วนวงจรอิเล็กทรอนิกส์ควบคุม

ส่วนวงจรอิเล็กทรอนิกส์ควบคุมของโดรน ถือเป็นหัวใจสำคัญของโดรนเนื่องจากส่วนนี้ถือเป็นศูนย์กลางการรับสัญญาณจากรีโมตคอนโทรล และสั่งการให้สปีดคอนโทรลควบคุมมอเตอร์ทุกตัว นั่นคือ ไมโครคอนโทรลเลอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทำหน้าที่ควบคุมสั่งการการทำงานของโดรนทั้งหมด ส่วนใหญ่นิยมใช้บอร์ดเอนกประสงค์ เช่น Pixhawk หรือ Arduino เป็นต้น ดังแสดงในภาพที่ 2.6



ภาพที่ 2.6 ไมโครคอนโทรลเลอร์สำหรับโดรน

เครื่องรับสัญญาณวิทยุ (Receiver) คือ อุปกรณ์ที่ใช้รับสัญญาณจากรีโมตควบคุม และส่งสัญญาณไปยังไมโครคอนโทรลเลอร์ โดยส่วนใหญ่จะใช้งานความถี่ย่าน 2.4 GHz ดังแสดงในภาพที่ 2.7



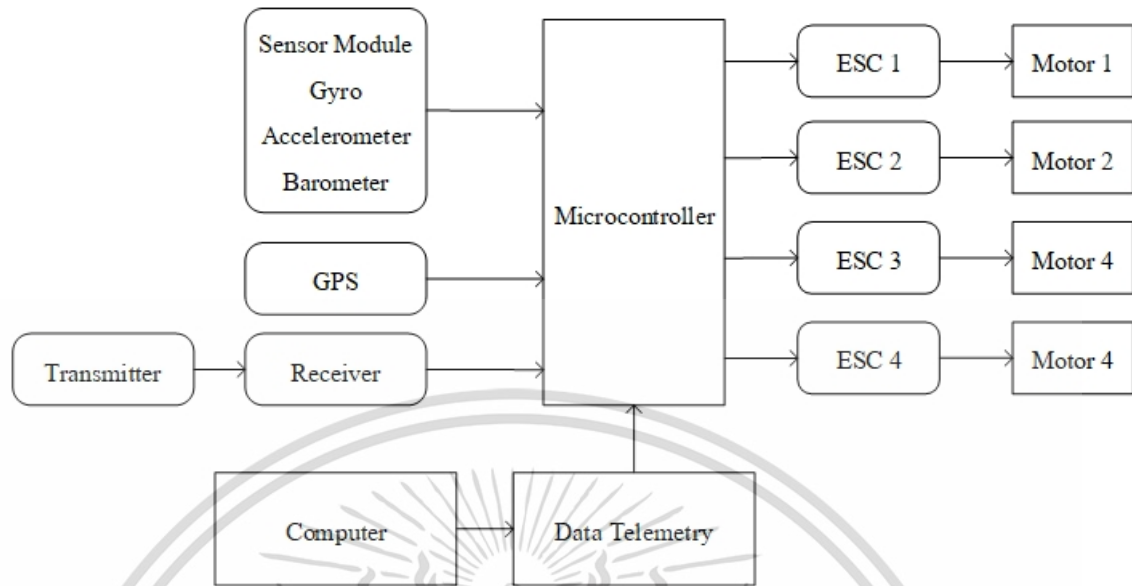
ภาพที่ 2.7 เครื่องรับสัญญาณวิทยุ และรีโมตควบคุม

### 2.2.5 หลักการทำงานของอากาศยานไร้คนขับ หรือโดรน

การทำงานทั้งหมดของโดรนจะอาศัยระบบควบคุมการบิน (Flight controller) เป็นหัวใจหลักในการสั่งการ โดยระบบควบคุมการบินจะทำหน้าที่ควบคุมเสถียรภาพในการบินทั้งหมด

สำหรับการควบคุมเสถียรภาพการบินจะมีหน้าที่ควบคุมระดับความเอียง ควบคุมระดับความสูง ควบคุมตำแหน่ง และควบคุมทิศทาง ดังแสดงบล็อกไดอะแกรมการทำงานของโดรนในภาพที่ 2.8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 2.8 วงจรระบบควบคุมการบินของโดรน 4 ใบพัด

ขั้นตอนการทำงาน คือ

1. ทำหน้าที่รับ-ส่งข้อมูล Data telemetry ซึ่งเป็นการอัปเดตโปรแกรมจากคอมพิวเตอร์ไปยังไมโครคอนโทรลเลอร์
2. รับคำสั่งจากรีโมตคอนโทรลภายใต้การควบคุมของนักบิน
3. รับผลการค้นหาตำแหน่งจาก GPS และประมวลผล เพื่อส่งข้อมูลกลับมายังภาคพื้นดิน
4. รับผลการตรวจจับของเซ็นเซอร์โมดูล และประมวลผล เช่น เซ็นเซอร์วัดความเร็วเชิงมุมของโดรน เซ็นเซอร์วัดความเร่งตามแรงโน้มถ่วงของโดรน เซ็นเซอร์ควบคุมทิศทาง และเซ็นเซอร์วัดความดันอากาศ เป็นต้น

เมื่อคดปุ่มบังคับที่รีโมตคอนโทรลก็จะส่งสัญญาณไปยังเครื่องรับสัญญาณวิทยุ และส่งสัญญาณต่อไปยังไมโครคอนโทรลเลอร์ เพื่อประมวลผลคำสั่งไปยังสปีดคอนโทรล ESC ทั้ง 4 ตัว ซึ่ง ESC ก็จะควบคุมความเร็วของมอเตอร์ เช่น นักบินสั่งให้โดรนบินเอียงไปทางซ้าย ไมโครคอนโทรลเลอร์ก็จะส่งสัญญาณดิจิทัลไปยังสปีดคอนโทรล ESC เพื่อควบคุมการหมุนของมอเตอร์ของใบพัดหน้าและหลังให้มีความแรงคงที่เท่าเดิม และควบคุมให้ใบพัดด้านซ้ายหมุนเร็วขึ้นส่วนใบพัดทางด้านขวาจะต้องหมุนช้าลง เป็นต้น ดังแสดงหลักการเคลื่อนที่อย่างอิสระของโดรน คือ

### 1. หลักการลอยตัวอยู่กับที่ของโดรน

สำหรับการลอยตัวอยู่กับที่ของโดรน จะทำได้โดยการควบคุมให้ความเร็วของใบพัดทั้ง 4 ตัว มีความเร็วเท่ากัน เพื่อสร้างแรงบิดที่หักล้างกัน โดยกำหนดให้แรงบิดที่เกิดจากด้านหนึ่ง เช่น ใบพัดตัวที่ 1 และ 4 ด้านซ้าย ตัวหนึ่งหมุนทวนเข็มนาฬิกา อีกตัวหนึ่งจะต้องหมุนตามเข็มนาฬิกา ส่วนใบพัดตัวที่ 2 และ 3 ตัวหนึ่งหมุนทวนเข็มนาฬิกา และอีกตัวหนึ่งจะต้องหมุนตามเข็มนาฬิกาเช่นเดียวกัน ดังแสดงในภาพที่ 2.9



ภาพที่ 2.9 การหมุนของใบพัด

### 2. หลักการบินเอียงซ้ายและขวาของโดรน

เมื่อต้องการให้โดรนบินเอียงซ้ายและเอียงขวาจะสามารถทำได้โดยเพิ่มความเร็วรอบของใบพัดที่ 1 และ 4 หรือใบพัดที่ 2 และ 3

### 3. หลักการบินเคลื่อนที่ไปข้างหน้าและข้างหลัง

และเมื่อต้องการให้โดรนบินไปข้างหน้าและข้างหลังจะสามารถทำได้โดยการเพิ่มความเร็วรอบของใบพัดที่ 3 และ 4 หรือใบพัดที่ 1 และ 2

#### 2.2.6 การเชื่อมต่อไร้สาย

เทคโนโลยีการเชื่อมต่อและการสื่อสารระหว่างอุปกรณ์เซ็นเซอร์ และเครือข่ายอินเทอร์เน็ต ในปัจจุบันมีหลากหลายรูปแบบ เช่น

##### 1. การเชื่อมต่อผ่าน WiFi, Zigbee หรือ Bluetooth

จะรองรับการสื่อสารไร้สายระยะทางไม่เกิน 100 เมตร โดยใช้งานที่ความถี่ 2.4 GHz ซึ่งเป็นวิธีการเชื่อมต่อเครือข่ายไร้สายที่ได้รับความนิยมมากที่สุด [15]

##### 2. การเชื่อมต่อผ่าน Low power wide area (LPWAN)

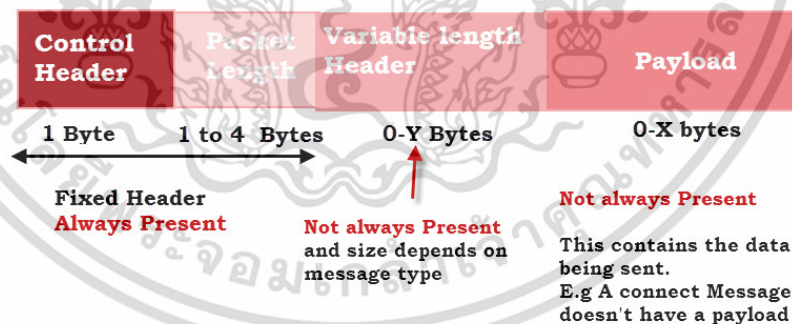
วิธีการนี้กำลังได้รับความนิยมเพิ่มขึ้น เนื่องจากเป็นเครือข่ายที่รองรับการใช้งานครอบคลุมระยะทางได้ไกลถึง 5 กิโลเมตร ถึง 15 กิโลเมตร ใช้พลังงานในการสื่อสารต่ำกว่าเครือข่าย WiFi มากถึง 3 เท่า ในทางกลับกัน ความถี่การใช้งานจะรองรับที่ 920 – 925 MHz ตามมาตรฐาน AS923 Unlicensed band [16]

### 3. การเชื่อมต่อผ่าน Cellular network

เป็นการเชื่อมต่อข้อมูลแบบไร้สายผ่านโครงข่ายโทรศัพท์แบบเคลื่อนที่ ที่สามารถรองรับระยะทางครอบคลุมสัญญาณที่ดีกว่า LPWAN สำหรับเทคโนโลยีที่สามารถนำมาใช้งานเชื่อมต่อกับเซ็นเซอร์สมัยใหม่ที่เรียกว่า NB-IoT (Narrowband Internet of Things) จะใช้พลังงานในการสื่อสารต่ำเช่นเดียวกับ LPWAN เหมาะสมกับการรองรับปริมาณการเชื่อมต่อข้อมูลกับเซ็นเซอร์แบบ IoT ได้หลาย ๆ ตัวพร้อมกัน [17]

## 2.2.7 โพรโทคอล MQTT

MQ telemetry transport (MQTT) เป็น โพรโทคอลสื่อสารแบบเครื่องกับเครื่อง หรือที่เรียกว่า Machine-to-Machine (M2M) ทำงานในรูปแบบ Publish/Subscribe คือ ผู้ส่งจะทำการส่งข้อมูลออกไป (Publish) ส่วนผู้รับที่สนใจจะต้องทำการสมัคร (Subscribe) รับเฉพาะเรื่องที่สนใจ [18] MQTT ถูกออกแบบโดย Dr. Andy Stanford-Clark และ Arlen Nipper ในปี 1999 โดยเน้นการออกแบบให้โพรโทคอลใช้แบนวิดที่น้อยและกินพลังงานต่ำ สามารถรองรับทำงานแบบลักษณะ Push ข้อความเป็นยังเครื่องในกลุ่มเครือข่ายได้ตามเหตุการณ์ โดยไม่ต้องเขียนโปรแกรมคอยตรวจสอบเป็นระยะ ๆ นั้นเอง



### MQTT Standard Packet Structure

ภาพที่ 2.10 โครงสร้างของ Packet ในการรับส่งข้อมูล MQTT [19]

MQTT เป็นโพรโทคอลที่นิยมใช้งานกับอุปกรณ์ IoT ในปัจจุบัน เนื่องจาก Packet ข้อมูลที่รับส่งมีขนาดเล็ก ลดการใช้แบนวิดทำให้ประหยัดพลังงาน เพราะในอุปกรณ์ IoT จะมีขนาดเล็ก กะทัดรัด และมีปราศจากแบตเตอรี่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

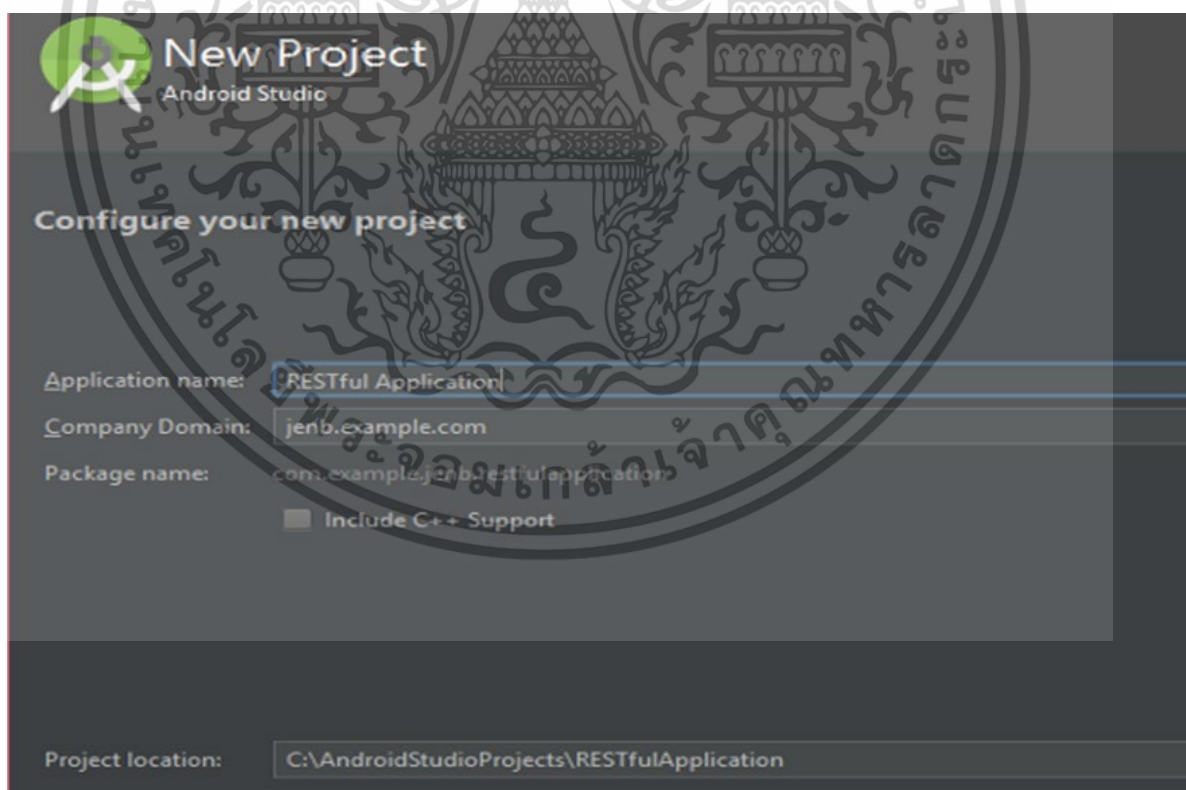
ภายใน ดังนั้น จึงให้ความสำคัญในเรื่องของการประหยัดพลังงานเป็นอย่างมาก ภาพที่ 2.10 แสดงโครงสร้างของ Packet ในการรับส่งข้อมูล MQTT

### 2.2.8 Android Studio

Android Studio เป็น Official IDE Tool จาก Google ไว้พัฒนาระบบปฏิบัติการ Android บนมือถือโดยเฉพาะ วัตถุประสงค์ของ Android Studio คือ ต้องการพัฒนาเครื่องมือ IDE ที่สามารถพัฒนา Mobile App บนระบบปฏิบัติการ Android โดยเฉพาะให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น ทั้งด้านการออกแบบ GUI ที่ช่วยให้สามารถ Preview ตัว App มุมมองที่แตกต่างกันบน Smart Phone แต่ละรุ่น สามารถแสดงผล preview ได้ทันทีโดยไม่ต้องทำการรัน App บน Emulator รวมทั้งยังแก้ไขปรับปรุงในเรื่องของความเร็วของ Emulator ที่ยังไม่สมบูรณ์ในปัจจุบัน

วิธีการใช้งาน Android Studio เบื้องต้น คือ

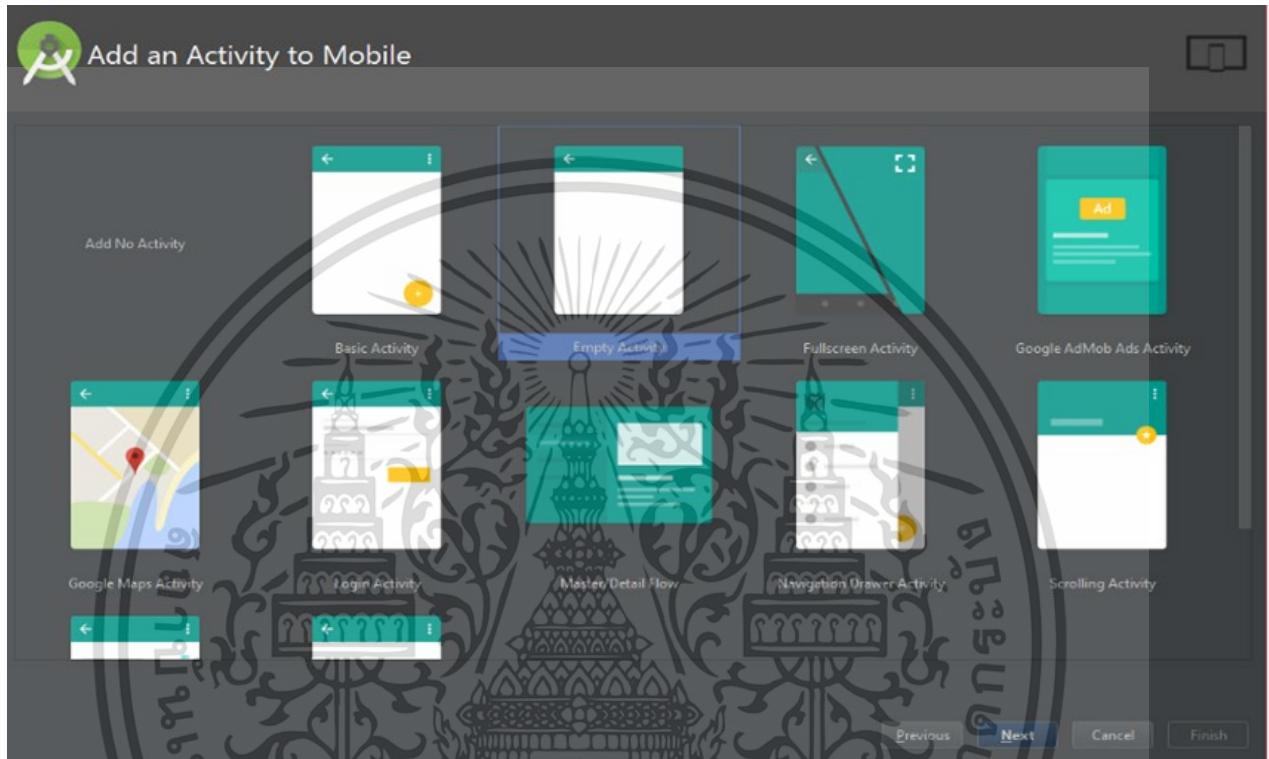
1. เปิดโปรแกรมแล้ว ให้คลิกที่ Start a new Android Studio project และกรอก Application Name ภาพที่ 2.11 จะใช้ชื่อตัวอย่างว่า RESTful Application



ภาพที่ 2.11 หน้าแรกการสร้าง New project ของ Android Studio

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. สำหรับ Android Studio จะมี Activity หลายรูปแบบให้เลือกใช้ จากภาพที่ 2.12 ให้ทำการเลือก Empty Activity



ภาพที่ 2.12 หน้าการเลือก Activity

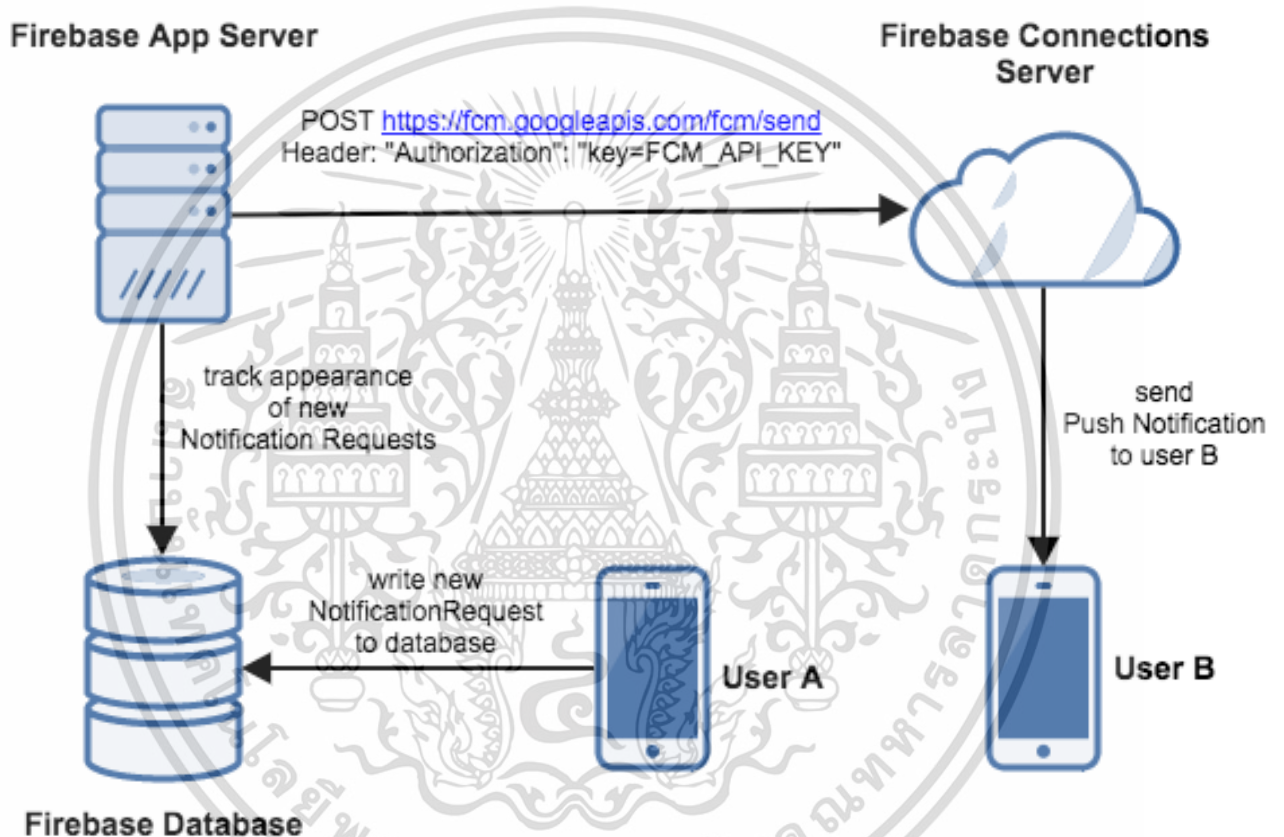
### 2.2.9 ระบบฐานข้อมูล Firebase

Firebase คือฐานข้อมูล Project ที่ถูกออกแบบมาให้เป็น API และ Cloud Storage สำหรับนักพัฒนา Real time Application รองรับหลาย Platform ทั้ง Android App, Web App, Firebase, IOS App ถูกสร้างขึ้นจากในปี 2011 [20] โดย แอนดรูว์ และเจมส์ เทมปลิน ใช้เป็นฐานข้อมูลแบบเรียลไทม์ซึ่งมี API ที่ช่วยให้ นักพัฒนาในการจัดเก็บและซิงค์ข้อมูล โดย Google Firebase 2.0 เป็นบริการของบริษัท Google ซึ่งได้ซื้อกิจการ Firebase และพัฒนาให้สามารถใช้บริการ backend เก็บข้อมูลอย่างเดียว มาเป็นแพลตฟอร์มครบวงจรสำหรับนักพัฒนาแอปพลิเคชันรองรับบริการข้อมูลที่หลากหลาย รายละเอียดเพิ่มเติมในเอกสาร

Firebase Realtime Database เป็น NoSQL cloud database ที่คอยจัดเก็บข้อมูลในรูปแบบ JSON หรือ Java Script Object Notation และมี การ sync ข้อมูลแบบ real-time กับทุก devices โดยเชื่อมต่อแบบอัตโนมัติในเวลาเสี้ยววินาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รองรับการทำงานเมื่อ Offline ข้อมูลถูกนำไปเก็บใน local จนกระทั่งกลับมา Online โดยทำการ sync ข้อมูลให้อัตโนมัติ รวมถึงมี Security Rules ให้สามารถออกแบบเงื่อนไขการเข้าถึงข้อมูลทั้ง read และ write ดังตามผู้ออกแบบมี ทั้ง Android, IOS และ Web การกำหนดรูปแบบการส่งข้อมูล JSON หรือ Java Script Object Notation เป็นวิธีการที่ทำให้ JavaScript แลกเปลี่ยนข้อมูลกับทางฝั่ง Server ดังแสดงการเชื่อมต่อระหว่าง User A และ Firebase database ไปยัง User B ในภาพที่ 2.13



ภาพที่ 2.13 การส่งข้อมูลจาก User A ไปยัง User B ผ่านระบบ Firebase [20]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

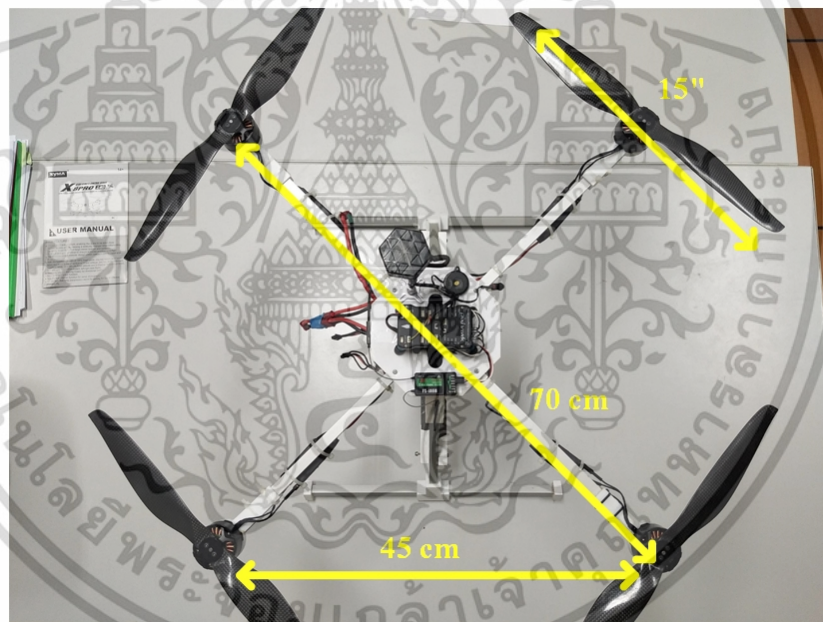
### บทที่ 3

## องค์ประกอบ โครงสร้าง และการออกแบบ

### 3.1 ระบบโดรน 4 ใบพัด

การออกแบบได้กำหนดให้อากาศยานไร้คนขับหรือโดรนสามารถแบกรับน้ำหนักได้ไม่เกิน 2.5 กิโลกรัม ขณะลอยตัวอยู่บนอากาศ และสามารถบินได้ไกลถึง 200 เมตร ในแนวระนาบ รวมถึงสามารถบินได้ในระดับความสูงไม่เกิน 90 เมตร ตามข้อกำหนดมาตรฐานของกรมการบินพลเรือน

โดยโครงสร้างได้กำหนดให้มีขนาดแขนของโดรนกว้างเท่ากับ 70 เซนติเมตร และยาวเท่ากับ 70 เซนติเมตร ใบพัดขนาด 15 นิ้ว สำหรับการยกน้ำหนัก ดังแสดงในภาพที่ 3.1



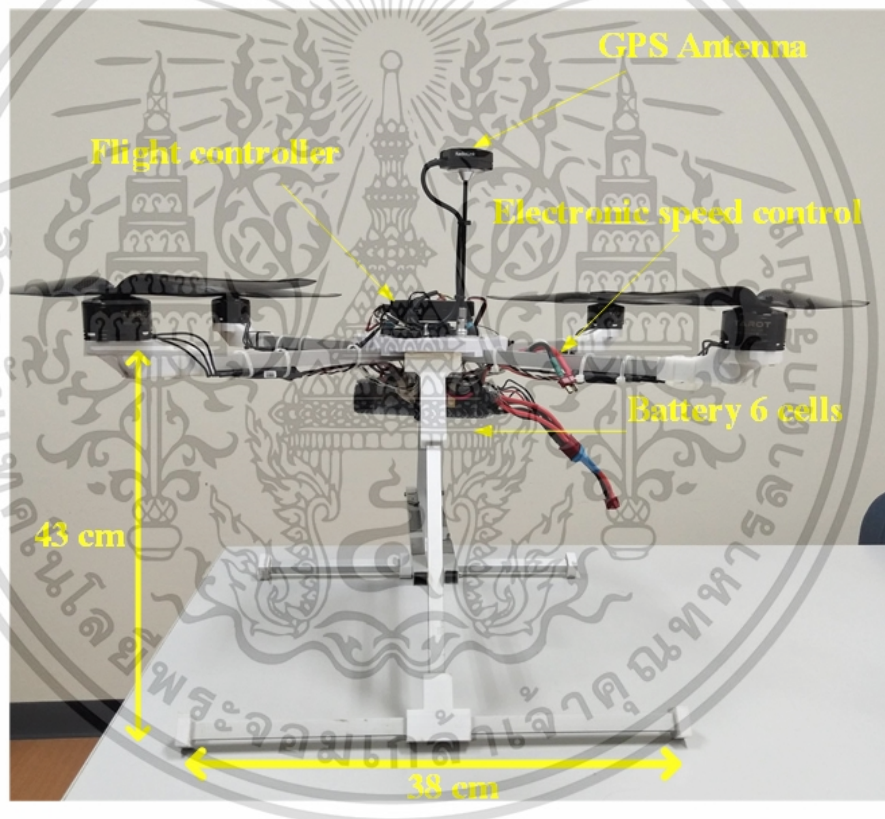
ภาพที่ 3.1 ส่วนแขน โดรน

อุปกรณ์ที่นำมาใช้ในการออกแบบโดรน ได้แก่

1. มอเตอร์ไร้แปดขั้ว (Brushless Motor) รุ่น Tarot 4s 4114-11 320 kv
2. สปีดคอนโทรล (Electronic Speed Controller : ESC) 40A รองรับ Li-Po 6S

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. ใบพัด (Propeller) คาร์บอนไฟเบอร์ขนาด 15 นิ้ว
4. แบตเตอรี่ (Battery) Mega 6S 6300 30C XT LiPo 6 cells 22.2V
5. ไมโครคอนโทรลเลอร์ หรือ Flight controller รุ่น Pixhawk 2.4.7
6. เครื่องรับสัญญาณวิทยุ (Receiver) รุ่น Flysky FS-i6X 2.4G RC
7. รีโมทคอนโทรล(remote control)รุ่น Flysky FS-i6X 2.4G RC
8. ท่ออลูมิเนียม และวัสดุตกแต่ง
9. ชุดเครื่องรับ GPS
10. เซ็นเซอร์วัดมุมและการเอียง

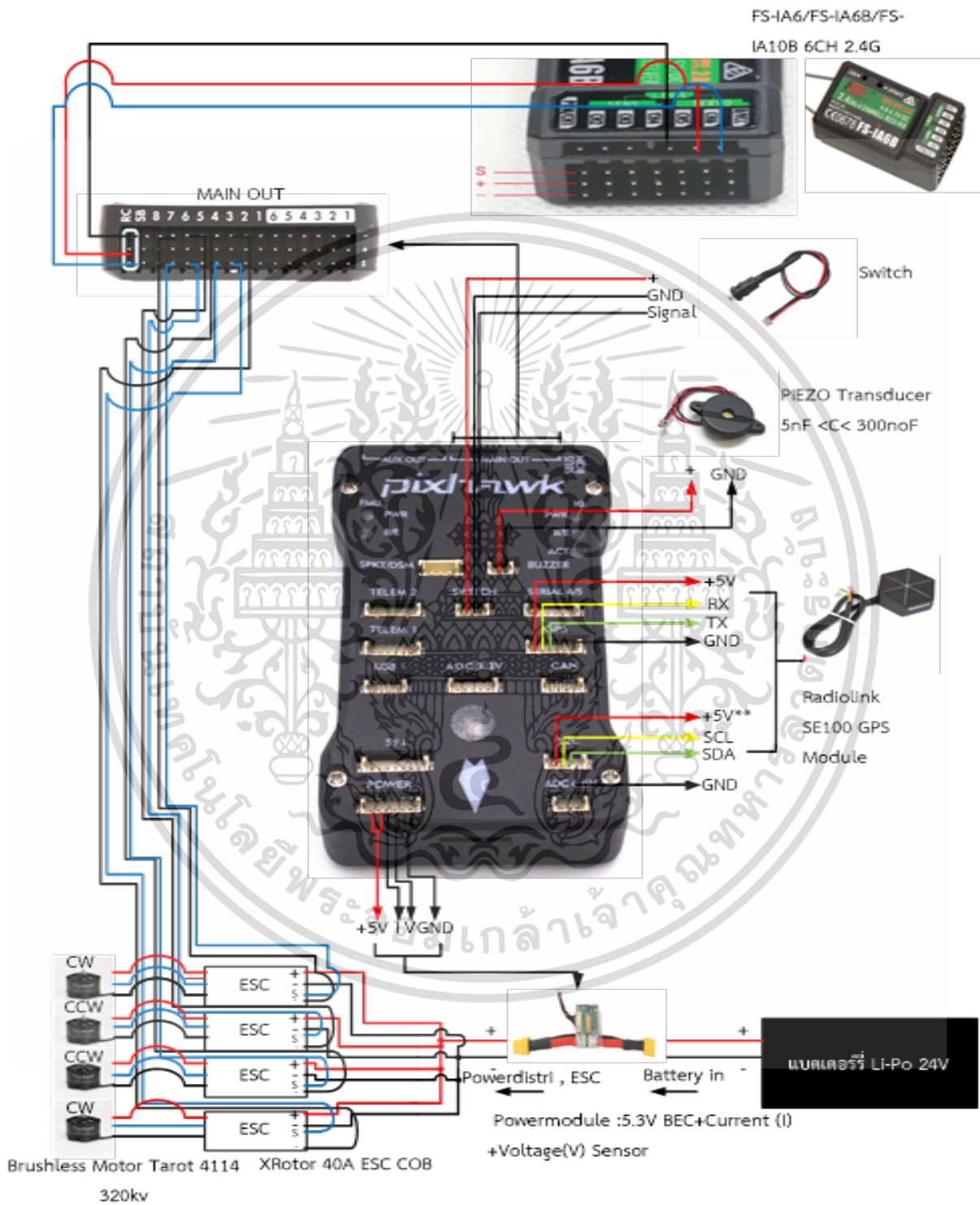


ภาพที่ 3.2 องค์ประกอบขนาดของโดรน 4 ใบพัด

ภาพที่ 3.2 แสดงองค์ประกอบขนาดของโดรน 4 ใบพัด ที่มีระยะความสูงจากขาโดรนประมาณ 43 เซนติเมตร ติดตั้งชุดแบตเตอรี่ขนาด 6 เซลล์ สามารถใช้งานได้นานถึง 25 นาที แบบต่อเนื่อง โดยการออกแบบจะติดตั้งชุดเครื่องรับ GPS เพื่อให้โดรนสามารถจดจำตำแหน่งขึ้น-ลงได้อย่างแม่นยำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในส่วนของวงจรระบบควบคุมการบินของโดรน ขนาด 4 ใบพัดสามารถแสดงได้ดังภาพที่ 3.3



ภาพที่ 3.3 วงจรระบบควบคุมการบินของโดรน ขนาด 4 ใบพัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.2 การควบคุมโดรน

การควบคุมโดรนแบบ 4 ใบพัดจะควบคุมผ่านรีโมทคอนโทรลมีรายละเอียด ดังนี้



ภาพที่ 3.4 รีโมทควบคุม

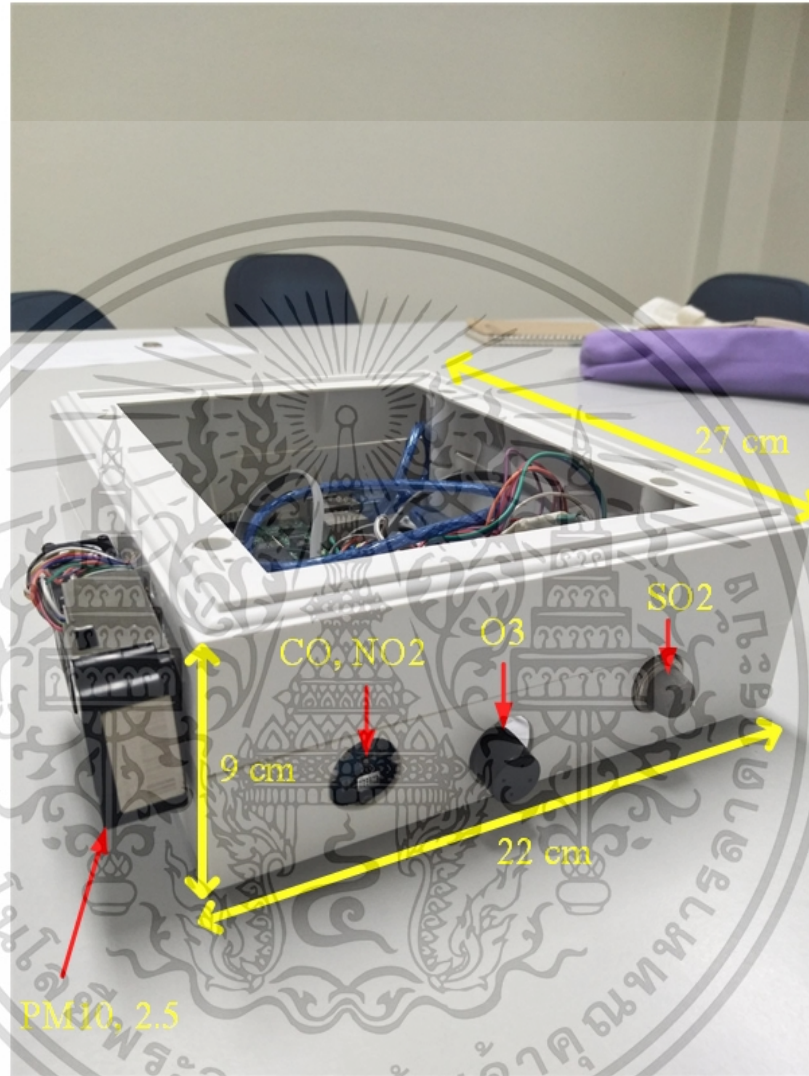
1. การเริ่มต้นใช้งานโดรนแบบ 4 ใบพัด โดยโยกคันเร่งที่ 1 ลงให้อยู่ในระดับที่ต่ำที่สุดและเลื่อนไปทางขวาสุด ค้างไว้สามวินาที ตามรูปที่ 3.4 ใบพัดจะเริ่มทำงาน แต่คันโยกคันเร่งจะต้องอยู่ในระดับที่ต่ำที่สุดมิฉะนั้น ARM จะไม่ทำงาน และหากเป็นการปิดการใช้งานก็เช่นกัน โยกคันโยกที่ 1 ลงให้อยู่ในระดับที่ต่ำที่สุดและเลื่อนไปทางซ้ายสุด ค้างไว้สามวินาที ขึ้นจะเป็นการปิดการทำงานของโดรน
2. คันโยกที่ 1 จากภาพที่ 3.4 เมื่อทำการโยกคันโยกขึ้นจะเป็นการเร่งมอเตอร์ทั้ง 4 ตัวและเมื่อโยกคันโยกลงก็จะเป็นการลดความเร็วของมอเตอร์ลง
3. คันโยกที่ 2 จากภาพที่ 3.4 เมื่อทำการโยกคันโยกไปทางซ้ายจะเป็นการควบคุมโดรนให้หมุนตัวล้าไปทางซ้าย และเมื่อคันโยกโยกไปทางขวาจะเป็นการหมุนตัวล้าโดรนหมุนไปทางขวา
4. คันโยกที่ 1 จากภาพที่ 3.4 เมื่อทำการโยกคันโยกขึ้นตัวล้าโดรนจะเดินหน้า เมื่อทำการโยกคันโยกลงตัวล้าของโดรนก็จะถอยหลัง
5. คันโยกที่ 2 จากภาพที่ 3.4 เมื่อทำการโยกคันโยกไปทางซ้ายตัวล้าโดรนจะเคลื่อนที่ไปทางด้านซ้ายและเมื่อโยกคันโยกไปทางด้านขวากตัวล้าโดรนก็จะเคลื่อนที่ไปทางด้านขวามือ

### 3.3 การออกแบบชุดเซ็นเซอร์วัดมลพิษ

ในการออกแบบชุดเซ็นเซอร์ตรวจวัดปริมาณมลพิษอากาศจะประกอบด้วยเซ็นเซอร์ทั้งหมด 5 ชนิด ได้แก่ ฝุ่นละออง (PM<sub>10,2.5</sub>) โอโซน (O<sub>3</sub>) ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO<sub>2</sub>) ก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์ (NO<sub>2</sub>) และก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ตามลำดับ โดยกล่องชุดเซ็นเซอร์จะติดตั้งบนอากาศยานไร้คนขับหรือโดรนเพื่อทำการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตรวจจับระดับคุณภาพอากาศในบริเวณพื้นที่ทดสอบ ภาพที่ 3.5 แสดงตัวอย่างกล่องชุดเซ็นเซอร์ต้นแบบที่พร้อมใช้งานซึ่งจะมีขนาดกว้างเท่ากับ 22 เซนติเมตร ยาวเท่ากับ 27 เซนติเมตร และสูงประมาณ 9 เซนติเมตร

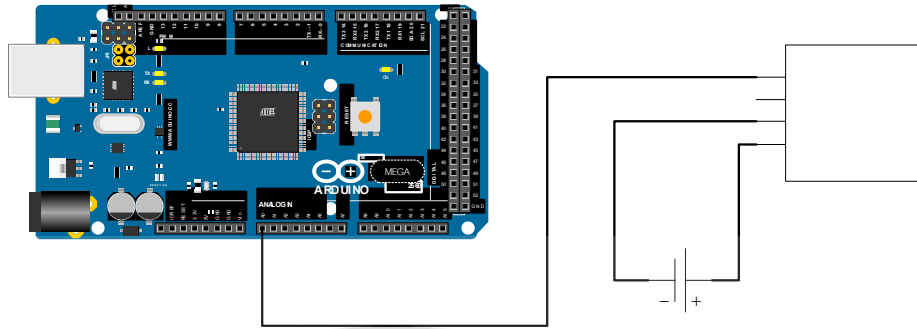


ภาพที่ 3.5 กล่องชุดเซ็นเซอร์ตรวจวัดมลพิษอากาศสำหรับโดรน

### 3.3.1 เซ็นเซอร์แก๊สโอโซน ( $O_3$ ) และการต่อวงจรใช้งาน

เซ็นเซอร์ตรวจวัดแก๊สโอโซน ( $O_3$ ) ใช้แรงดันไฟที่ 5 โวลต์ ความละเอียดเซ็นเซอร์ตั้งแต่ 1 ppm ถึง 500 ppm และรูปแบบการเชื่อมต่อกับไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino MEGA 2560 เป็นแบบแอนะล็อก คือ ขา (A0) โดยการต่อวงจรใช้งานแสดงดังภาพที่ 3.6

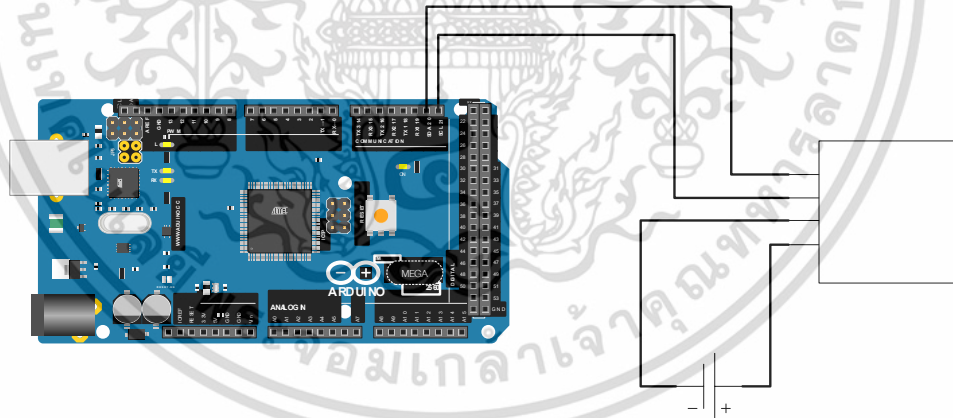
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 3.6 การต่อวงจรใช้งานเซ็นเซอร์ตรวจวัดแก๊สโอโซน ( $O_3$ )

### 3.3.2 ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ ( $CO$ ) ก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์ ( $NO_2$ ) และการต่อวงจรใช้งาน

เซ็นเซอร์ตรวจวัดแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์และแก๊สไนโตรเจนไดออกไซด์จะใช้แรงดันไฟที่ 5 โวลต์มีค่าความละเอียดเซ็นเซอร์แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ตั้งแต่ 1 ppm ถึง 1000 ppm และแก๊สไนโตรเจนไดออกไซด์ตั้งแต่ 0.05 ppm ถึง 10 ppm โดยรูปแบบการเชื่อมต่อกับไมโครคอนโทรลเลอร์จะเป็นแบบ I<sup>2</sup>C ดังแสดงในภาพที่ 3.7

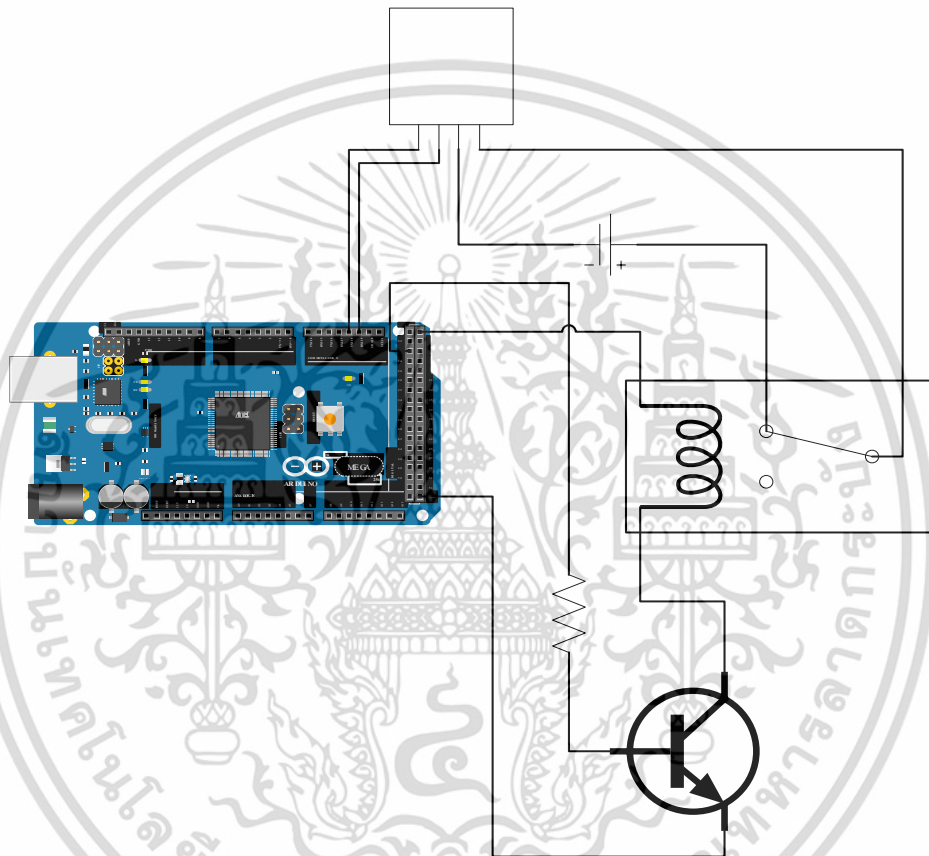


ภาพที่ 3.7 การต่อวงจรใช้งานเซ็นเซอร์ตรวจวัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ ( $CO$ ) และก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์ ( $NO_2$ )

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3.3 เซ็นเซอร์ตรวจวัดฝุ่นละออง และการต่อวงจรใช้งาน

เซ็นเซอร์ฝุ่นละออง PM จะใช้แรงดันไฟที่ใช้ 5 โวลต์และความละเอียดเซ็นเซอร์  $0 \mu\text{g}/\text{m}^3$  ถึง  $1000 \mu\text{g}/\text{m}^3$  สามารถวัดขนาดของฝุ่นได้ทั้ง  $\text{PM}_1$ ,  $\text{PM}_{2.5}$  และ  $\text{PM}_{10}$  รูปแบบการเชื่อมต่อกับไมโครคอนโทรลเลอร์จะเป็นแบบ RS232 ภาพที่ 3.7 แสดงการต่อวงจรใช้งานร่วมกับไมโครคอนโทรลเลอร์



ภาพที่ 3.8 การต่อวงจรใช้งานเซ็นเซอร์ฝุ่นละออง  $\text{PM}_{10,2.5}$

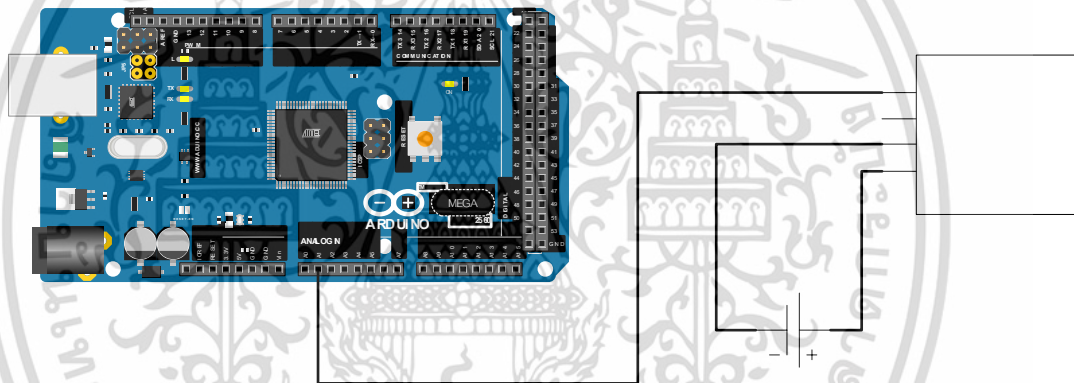
การเชื่อมต่อเซ็นเซอร์จะใช้ขา TX RX VCC และ GND โดยเชื่อมต่อขา TX เข้ากับ RX 18 และขา RX ต่อเข้ากับ TX 19 ของไมโครคอนโทรลเลอร์ ส่วนขา VCC ต่อเข้ากับรีเลย์ HRS4H-S-DC5V

เนื่องด้วยตัวเซ็นเซอร์วัดฝุ่นละอองในอากาศมีปัญหาในเรื่องของการวัดค่าหากให้เซ็นเซอร์วัดฝุ่นละอองทำงานพร้อมกับเซ็นเซอร์ตัวอื่น จึงได้มีการแก้ไขโดยการเพิ่มชุดตัดต่อไฟเลี้ยงสำหรับเซ็นเซอร์ โดยการใช้ทรานซิสเตอร์ชนิดไบโพลาร์ เบอร์ BD139 เป็นสวิตช์เพื่อส่งงานรีเลย์ เบอร์ HRS4H-S-DC5V ทำงาน โดยการต่อขา B ของทรานซิสเตอร์ อนุกรมกับตัวต้านทาน 5 กิโลโอห์ม แล้วต่อเข้าที่ขา 24 ส่วนขา C ต่ออนุกรมกับขาคลวดของรีเลย์

จากนั้นต่อเข้ากับ 5 โวลต์ ส่วนขา E ต่อเข้ากับ GND ของไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino MEGA 2560 ส่วนรีเลย์จะต่อแบบ Normal close กับเซ็นเซอร์ การทำงานเมื่อเปิดการใช้งานเครื่องเซ็นเซอร์ทุกตัวจะทำงานพร้อมกันทั้งหมด โดยไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino MEGA 2560 จะจ่ายสัญญาณที่ขา 24 ไปยังขา B ของทรานซิสเตอร์ ทำให้ทรานซิสเตอร์ทำงาน ทำให้มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านขดลวดของรีเลย์

### 3.3.4 เซ็นเซอร์แก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO<sub>2</sub>) และการต่อวงจรใช้งาน

เซ็นเซอร์ตรวจวัดแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์จะใช้แรงดันไฟฟ้าที่ใช้ 5 โวลต์ มีความละเอียดเซ็นเซอร์ 10 ppb ถึง 1 ppm โดยมีรูปแบบการเชื่อมต่อกับไมโครคอนโทรลเลอร์เป็นแบบแอนะล็อก ดังภาพที่ 3.8 แสดงการต่อวงจรใช้งานร่วมกับไมโครคอนโทรลเลอร์



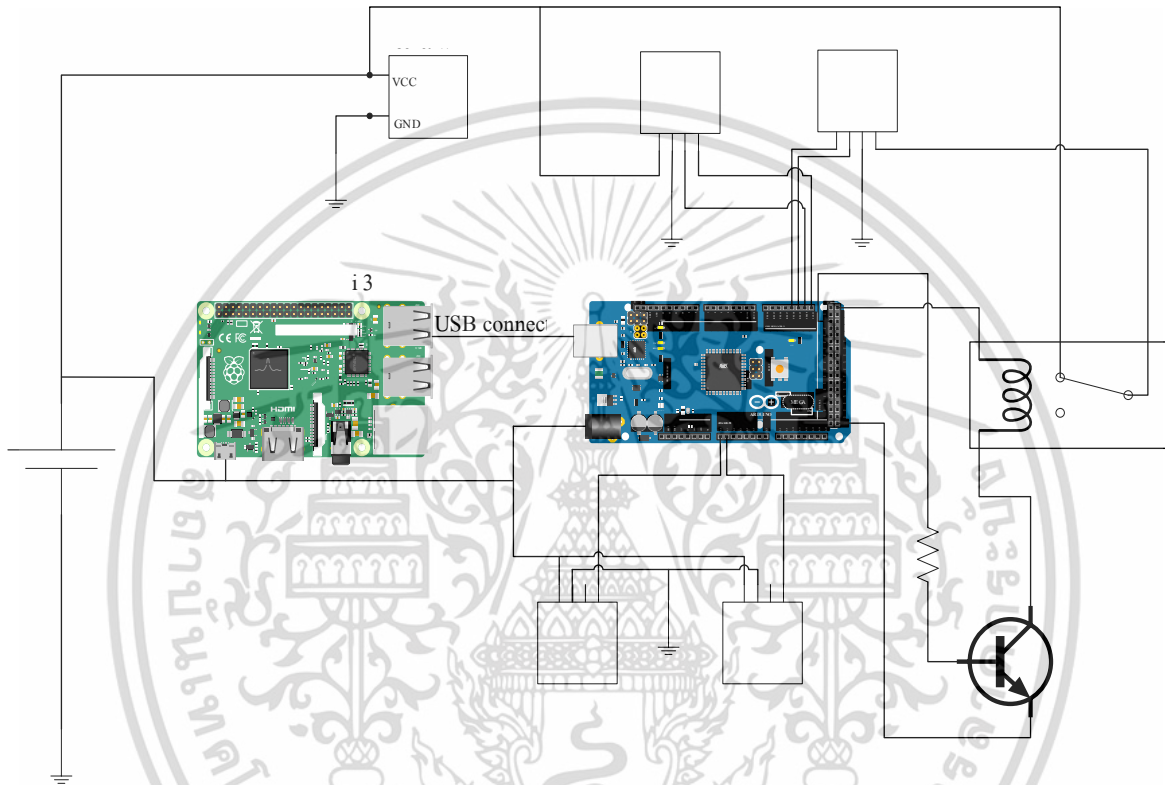
ภาพที่ 3.9 การต่อวงจรใช้งานเซ็นเซอร์แก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO<sub>2</sub>)

เซ็นเซอร์ตรวจวัดแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่ใช้งานมีทั้งหมด 4 ขา ประกอบด้วย A0, D0, VCC และ GND การเชื่อมต่อเซ็นเซอร์เข้ากับไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino MEGA 2560 จะใช้งานโดยการต่อขา A0 เข้ากับขา A1 ของไมโครคอนโทรลเลอร์ ส่วนขา VCC กับขา GND ของเซ็นเซอร์ต่อเข้ากับแหล่งจ่ายพลังงาน

### 3.3.5 ไมโครคอนโทรลเลอร์

ไมโครคอนโทรลเลอร์ที่นำมาใช้งาน ได้แก่ Raspberry Pi 3 กับ Arduino MEGA 2560 โดยหน้าที่ในการเชื่อมต่อและรับข้อมูลจากเซ็นเซอร์ทั้งหมดซึ่งการเชื่อมต่อของเซ็นเซอร์มี ดังนี้ เซ็นเซอร์ตรวจวัดแก๊ส ไอโซนจะเชื่อมต่อที่ขา A0 เซ็นเซอร์ตรวจวัดแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์และแก๊สไนโตรเจน ไดออกไซด์เชื่อมต่อที่ขา SCL 21 และ SDA

20 เซ็นเซอร์ตรวจวัดฝุ่นละอองในอากาศเชื่อมต่อที่ขา TX 18 และ RX 19 เซ็นเซอร์ตรวจวัดแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์เชื่อมต่อที่ขา A1 เมื่อได้ข้อมูลจากเซ็นเซอร์ จะทำการประมวลผลตามโปรแกรมที่ติดตั้งไว้ และจะส่งข้อมูลไปยังไมโครคอนโทรลเลอร์ Raspberry Pi 3 เพื่อการส่งข้อมูลขึ้นสู่เครือข่ายอินเทอร์เน็ต ภาพที่ 3.9 แสดงวงจรระบบควบคุมชุดเซ็นเซอร์ตรวจวัดมลพิษทางอากาศทั้งหมด



ภาพที่ 3.10 วงจรระบบควบคุมชุดเซ็นเซอร์ตรวจวัดมลพิษทางอากาศ

การเชื่อมต่อระหว่างไมโครคอนโทรลเลอร์ Raspberry Pi 3 กับ Arduino MEGA 2560 เป็นการเชื่อมต่อแบบ Serial Port โดยเชื่อมต่อผ่านทางสาย USB ซึ่งการทำงานของบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino MEGA 2560 มีหน้าที่อ่านค่าเซ็นเซอร์ทั้งหมด 5 ชนิด และส่งประมวลผลข้อมูลไปยังไมโครคอนโทรลเลอร์ Raspberry Pi 3 ซึ่งจะรับข้อมูลเข้ามาทุก ๆ 1 นาที หลังจากบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ Raspberry Pi 3 จะทำการส่งค่าทั้งหมดผ่านสัญญาณเครือข่ายโทรศัพท์ 3G/4G โดยจะทำการส่งค่าเซ็นเซอร์ทั้งหมดไปยัง Firebase เป็นฐานข้อมูล โดยมีวิธีการจัดเก็บข้อมูลแบบ JSON ซึ่งมีการจัดเก็บข้อมูลง่ายและใช้เนื้อที่ในการเก็บข้อมูลน้อยเร็วเหมาะกับงานเก็บข้อมูลและแสดงผลแบบเรียลไทม์

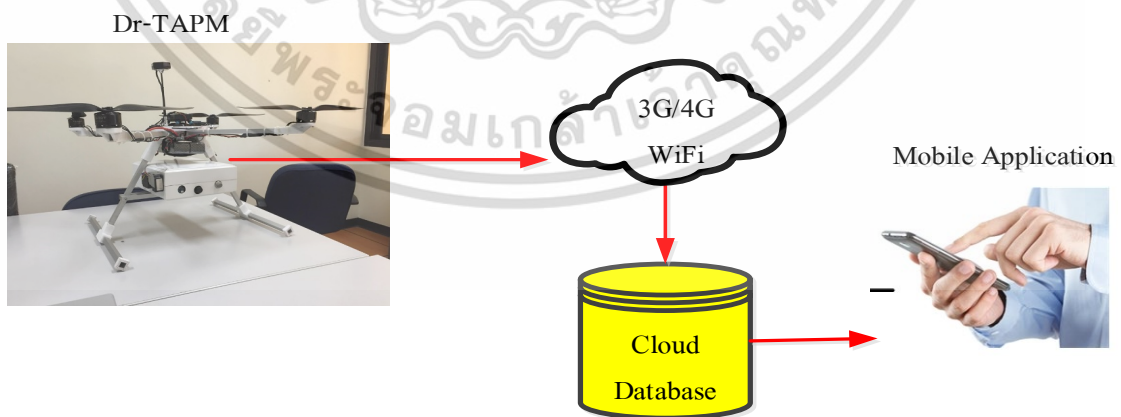
### 3.4 ชุดอุปกรณ์ต้นแบบ Dr-TAPM

ภาพที่ 3.10 แสดงชุดอุปกรณ์ต้นแบบ Drone real-time air pollution monitoring (Dr-TAPM) สำหรับใช้งานจริง โดยติดตั้งชุดกล่องเซ็นเซอร์ตรวจวัดมลพิษอากาศ ซึ่งน้ำหนักโดยรวมทั้งหมดประมาณ 2.6 กิโลกรัม



ภาพที่ 3.11 ต้นแบบ โดรนตรวจวัดมลพิษอากาศ Dr-TAPM

ภาพที่ 3.11 แสดงการเชื่อมต่อข้อมูลจาก Dr-TAPM ไปยังเครือข่ายอินเทอร์เน็ตแบบ 3G/4G หรือสามารถใช้งานกับ WiFi network เพื่อเก็บข้อมูลเข้าระบบฐานข้อมูลแบบ Cloud computing ที่ออกแบบไว้ได้



ภาพที่ 3.12 การเชื่อมต่อข้อมูลเข้าเครือข่ายอินเทอร์เน็ต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.5 การออกแบบแอปพลิเคชันบนมือถือ

หน้า Mobile Application จะแบ่งเป็น 3 หน้าหลัก ๆ ได้แก่

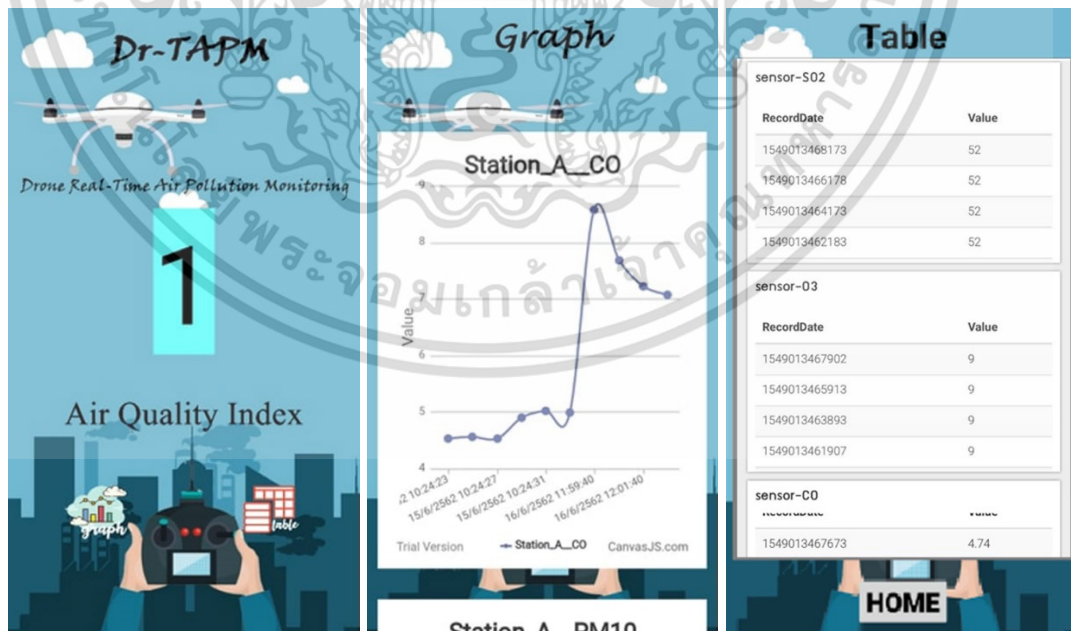
- 1) หน้าเรียลไทม์ค่าดัชนีคุณภาพอากาศ AQI
- 2) หน้ากราฟย้อนหลัง
- 3) หน้าตารางย้อนหลัง

#### 3.5.1 หน้าเรียลไทม์ค่าดัชนีคุณภาพอากาศ AQI

เป็นหน้าแสดงค่าเรียลไทม์ของค่า AQI ณ เวลานั้น ๆ โดยจะแสดงค่า AQI หรือดัชนีคุณภาพอากาศเป็นตัวเลข และจะมีสีที่บ่งบอกถึงสถานะของคุณภาพอากาศ ตามตารางที่ 1.1 โดยจะมีระดับสีดังนี้ คือ 0 - 25 สีฟ้า หมายถึง คุณภาพดี 26 - 50 สีเขียว หมายถึง คุณภาพอากาศดี 51 - 100 สีเหลือง หมายถึง คุณภาพอากาศปานกลาง 101-200 สีส้ม หมายถึง เริ่มมีผลต่อสุขภาพ 201 ขึ้นไป สีแดง หมายถึง มีผลต่อสุขภาพ

#### 3.5.2 หน้ากราฟย้อนหลัง

เป็นหน้าแสดงค่าเรียลไทม์กราฟค่าจากเซ็นเซอร์ที่ได้ทำการวัดค่ามลพิษในหน้ากราฟจะแสดงค่าฝุ่นละออง (PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub>) โอโซน (O<sub>3</sub>) ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO<sub>2</sub>) ก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์ (NO<sub>2</sub>) และก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ในรูปแบบกราฟแยกกันชัดเจน



ภาพที่ 3.13 แอปพลิเคชันบนมือถือสำหรับโดรนตรวจวัดมลพิษอากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

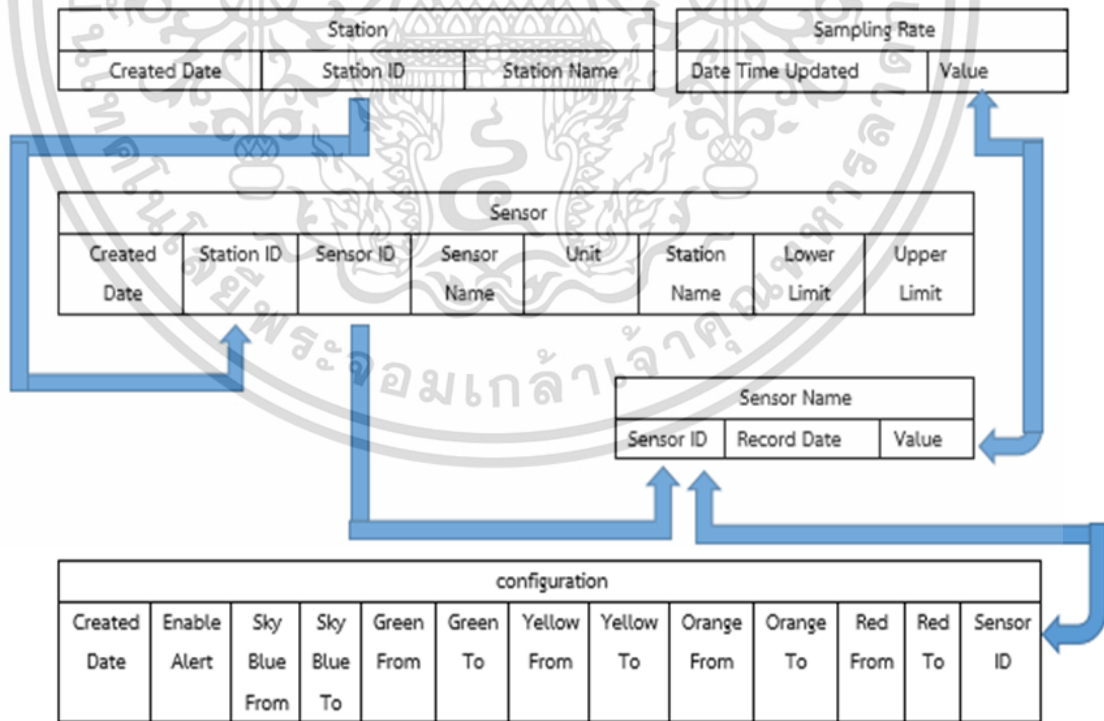
### 3.5.3 หน้าตารางย้อนหลัง

เป็นหน้าแสดงค่า เรียกดูตาราง ค่าจากเซ็นเซอร์ที่ได้ทำการวัดค่ามลพิษ ในตารางจะแสดงค่าฝุ่นละออง (PM<sub>10, 2.5</sub>) โอโซน (O<sub>3</sub>) ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO<sub>2</sub>) ก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์ (NO<sub>2</sub>) และก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) แยกกันชัดเจนย้อนหลัง

### 3.6 การออกแบบฐานข้อมูล

ส่วนของฐานข้อมูล เลือกใช้เป็น Firebase login โดยใช้รหัสผ่านของ Google โดยไม่มีค่าใช้จ่ายใด ๆ มีการติดต่อจัดเก็บข้อมูลในรูปแบบ JSON แหะสำหรับการเก็บข้อมูลแบบ Realtime

มีด้วยกัน 5 ตารางได้แก่ Station, configuration, sampling Rate, Sensor, Sensor Name, Sensor แบ่งเป็น 5 ส่วน คือ CO, SO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub>, PM<sub>2.5, 10</sub> และ NO<sub>2</sub> สามารถเพิ่มจำนวนเซ็นเซอร์ได้ โดยเริ่มจากการเก็บข้อมูลจาก Station บ่งบอกถึงสถานะของเครื่องว่า วางในตำแหน่งไหน โดยลิงค์ผ่าน Sensor ID เพื่อไปติดต่อกับฐานข้อมูลของเซ็นเซอร์ในฐานข้อมูล เซ็นเซอร์ที่สำคัญ ประกอบไปด้วย SensorID โดยเป็นตัวลิงค์ติดต่อในส่วน Configuration เพื่อกำหนดปริมาณข้อมูลเพื่อที่จะขึ้นแสดงผลผ่าน Mobile Application และนำตัวเซ็นเซอร์ที่การคำนวณ ผ่าน Sampling rate เทียบกับเวลา ณ ขณะนั้น



ภาพที่ 3.14 การออกแบบฐานข้อมูล

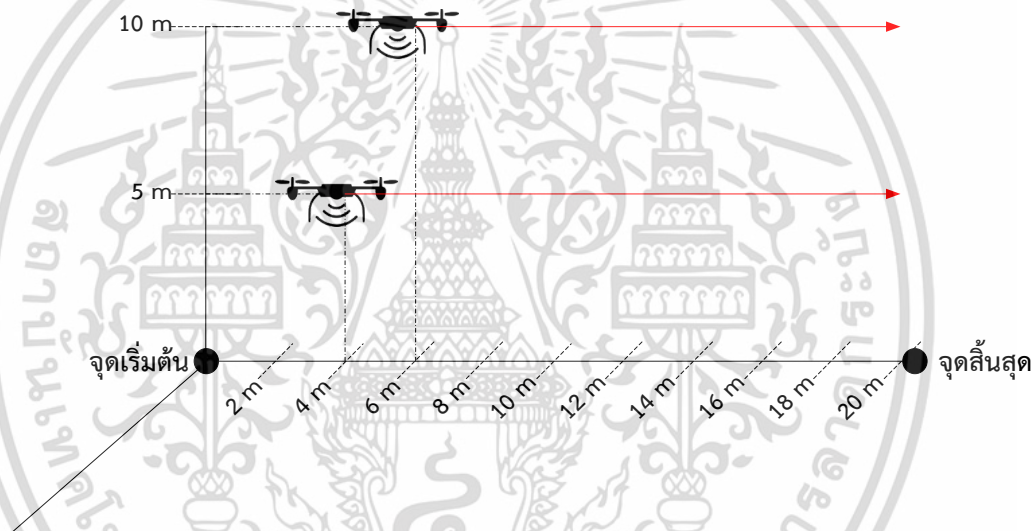
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

### แบบจำลอง และผลการตรวจวัดมลพิษอากาศ

#### 4.1 แบบจำลองการทดสอบในกรณีปราศจากแหล่งกำเนิดควันไฟ (Without Smoke)

แบบจำลองนี้จะทำการทดลองวัดค่ามลพิษอากาศในระดับความสูงที่ 5 เมตร และ 10 เมตร โดยกำหนดระยะทางจากจุดเริ่มถึงจุดสิ้นสุดเป็นระยะทาง 20 เมตร โดยจะทำการเก็บข้อมูลที่ละจุดซึ่งแต่ละจุดจะห่างกัน 2 เมตร ดังแสดงในภาพที่ 4.1

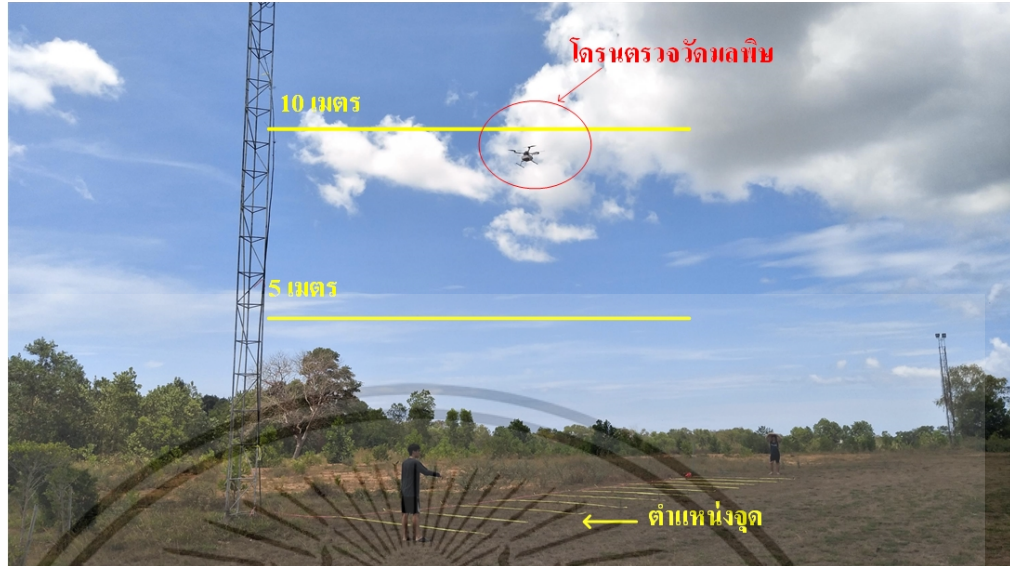


ภาพที่ 4.1 แบบจำลองการตรวจวัดมลพิษอากาศกรณีปราศจากแหล่งกำเนิดควันไฟ (Without smoke)

การทดสอบจะดำเนินการ โดยให้โดรนบินที่ระดับความสูง 5 เมตร ณ จุดเริ่มต้น และเริ่มวัดที่ระยะ 2 เมตร ไปจนถึงระยะทางที่ 20 เมตร โดยระยะเวลาแต่ละตำแหน่งจะใช้ประมาณ 5 – 10 วินาที เพื่อรอรับค่าจากเซ็นเซอร์ส่งเข้าระบบฐานข้อมูลที่แสดงบนหน้าจอแอปพลิเคชัน

การติดตั้งและทดสอบได้ดำเนินการ ณ สนามกีฬา ภายในสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์ จังหวัดชุมพร ในช่วงเวลา 07.00 น. – 09.00 น. ซึ่งอุปกรณ์ที่นำมาใช้ประกอบด้วย โดรนตรวจวัดมลพิษอากาศ (Dr-TAPM) อุปกรณ์จำลองแหล่งกำเนิดควันไฟ อุปกรณ์ที่ใช้กำหนดระยะตำแหน่ง เช่น เชือกสี และไม้ เป็นต้น ภาพที่ 4.2 แสดงการติดตั้งและทดสอบจริงสำหรับ แบบจำลองการตรวจวัดมลพิษอากาศกรณีปราศจากแหล่งกำเนิดควันไฟ (Without smoke)

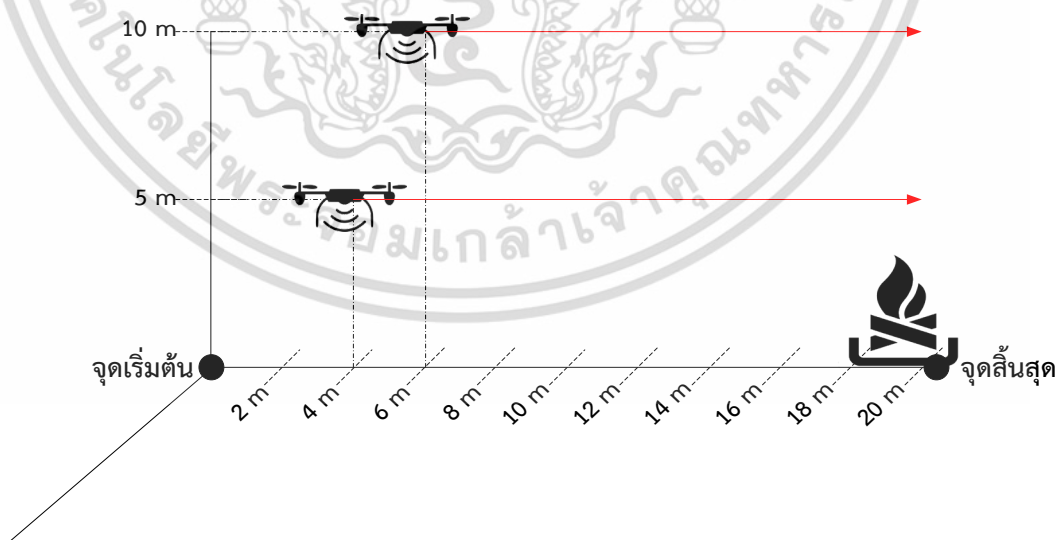
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.2 การทดสอบจริงสำหรับแบบจำลองการตรวจวัดมลพิษอากาศ  
กรณีปราศจากแหล่งกำเนิดควันไฟ (Without smoke)

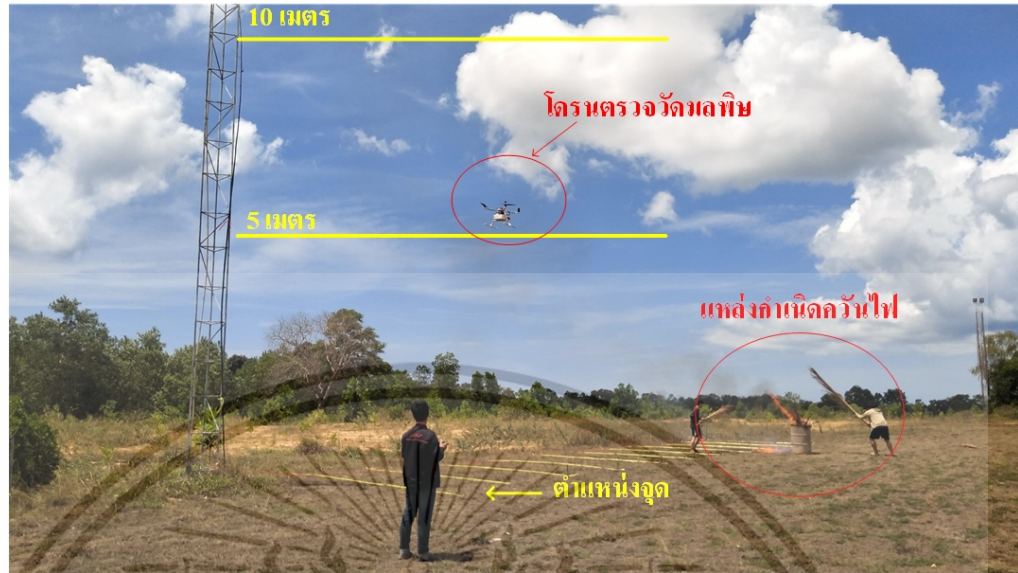
4.2 แบบจำลองการทดสอบในกรณีมีแหล่งกำเนิดควันไฟ (With Smoke)

ภาพที่ 4.3 แสดงแบบจำลองการทดสอบในกรณีมีแหล่งกำเนิดควันไฟ (With Smoke) สำหรับการจำลอง  
สถานการณ์ไฟป่าและมีเขม่าควัน อุปกรณ์ที่ใช้จำลองแหล่งกำเนิดควันไฟ เช่น ถัง และฝืน เป็นต้น



ภาพที่ 4.3 แบบจำลองการตรวจวัดมลพิษอากาศกรณีมีแหล่งกำเนิดควันไฟ (With smoke)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.4 การทดสอบจริงสำหรับแบบจำลองการตรวจวัดมลพิษอากาศ  
กรณีมีแหล่งกำเนิดควันไฟ (With smoke)

ภาพที่ 4.4 แสดงการทดสอบการทดสอบจริงสำหรับแบบจำลองการตรวจวัดมลพิษอากาศกรณีมีแหล่งกำเนิดควันไฟ (With smoke) ซึ่งได้จำลองสมมติฐานการเกิดไฟป่าขึ้น ณ ขณะนั้น โดยสามารถใช้โดรนบินสำรวจคุณภาพอากาศได้ในเวลานั้น ได้ทันที

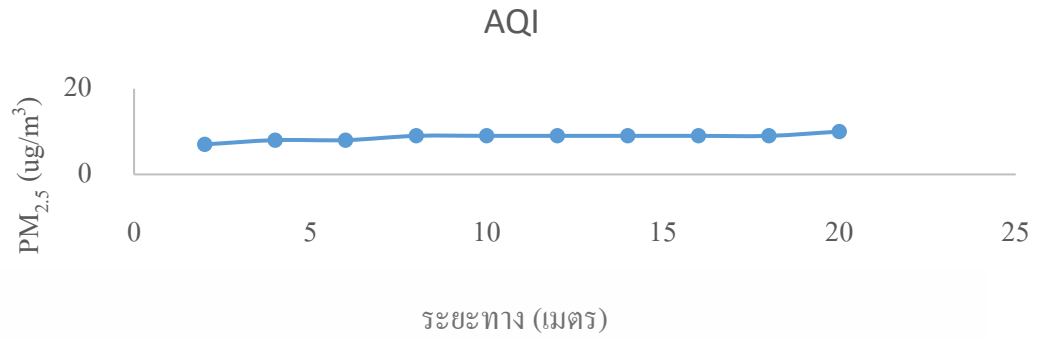
#### 4.3 ผลการตรวจวัดมลพิษอากาศ

##### 4.3.1 กรณีปราศจากแหล่งกำเนิดควันไฟ (Without smoke) ที่ความสูง 5 เมตร

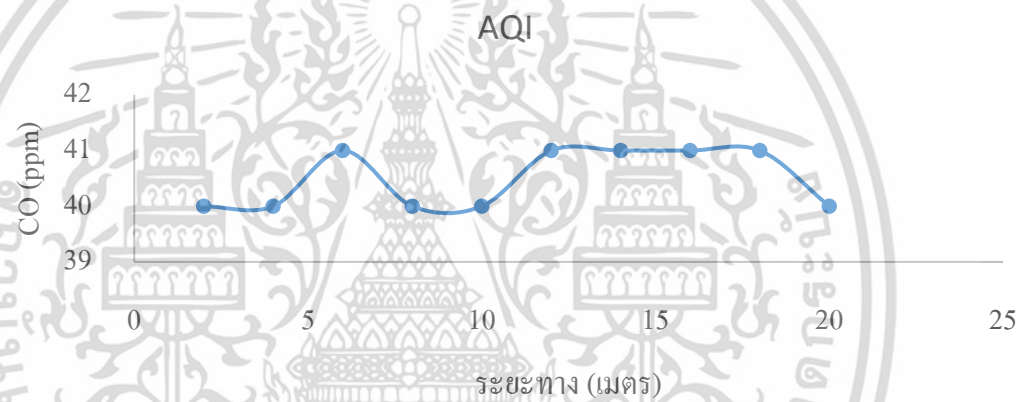


ภาพที่ 4.5 กราฟผลการวัดค่า PM<sub>10</sub> ที่ความสูง 5 เมตร

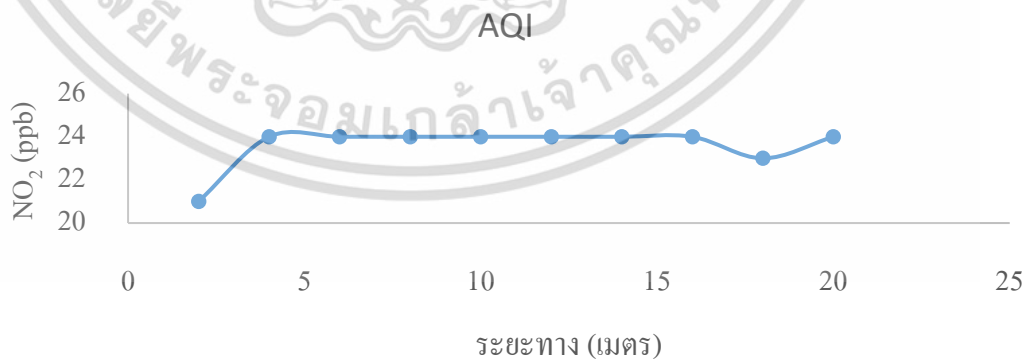
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.6 กราฟผลการวัดค่า  $PM_{2.5}$  ที่ความสูง 5 เมตร

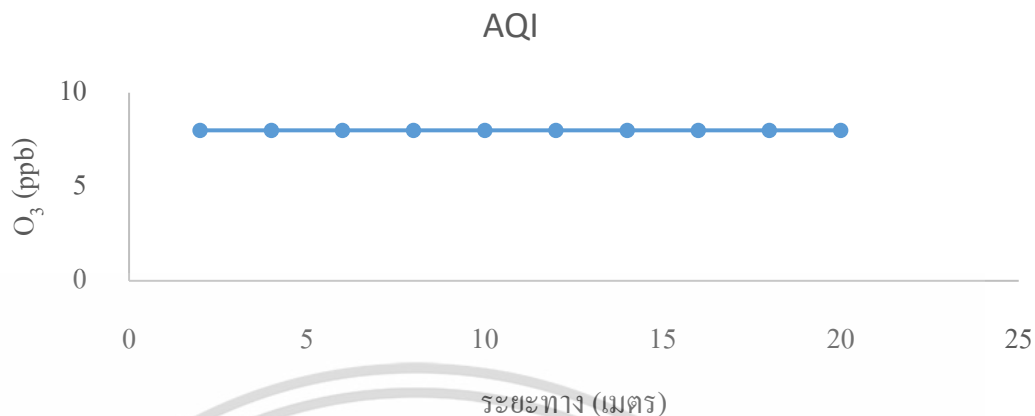


ภาพที่ 4.7 กราฟผลการวัดค่า CO ที่ความสูง 5 เมตร

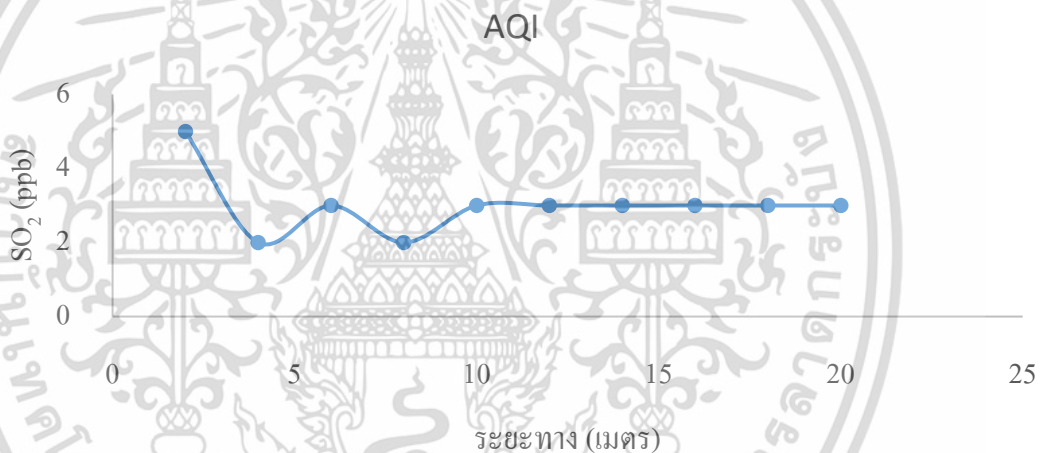


ภาพที่ 4.8 กราฟผลการวัดค่า  $NO_2$  ที่ความสูง 5 เมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.9 กราฟผลการวัดค่า O<sub>3</sub> ที่ความสูง 5 เมตร



ภาพที่ 4.10 กราฟผลการวัดค่า SO<sub>2</sub> ที่ความสูง 5 เมตร

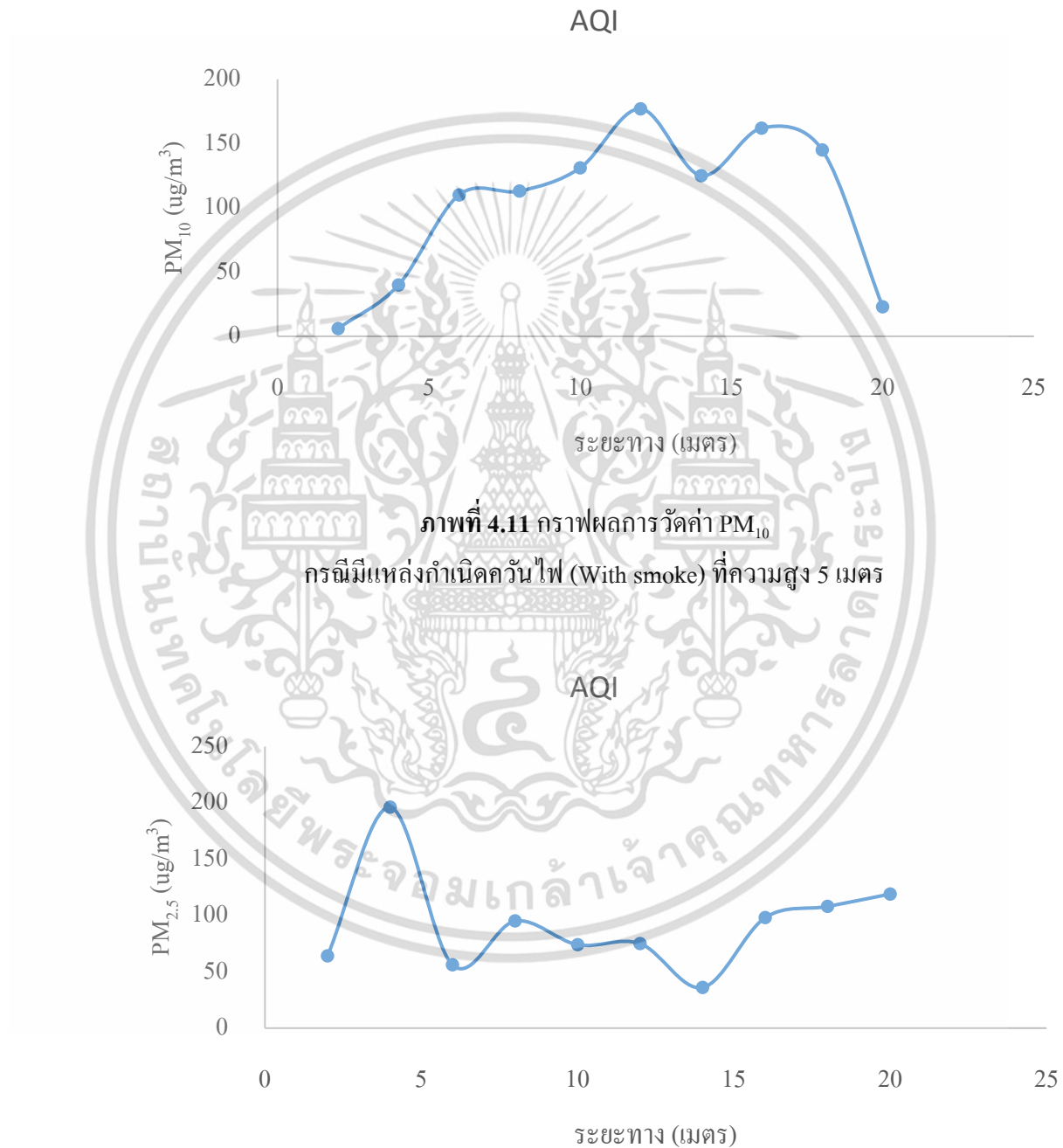
จากภาพที่ 4.5 – 4.10 แสดงถึงกราฟผลการทดลองวัดค่ามลพิษทางอากาศในกรณีปราศจากแหล่งกำเนิดควันไฟ (Without smoke) ที่ความสูง 5 เมตร ซึ่งสามารถอ่านค่าได้จากเซ็นเซอร์วัดมลพิษทั้ง 5 ชนิด ได้แก่ โอโซน (O<sub>3</sub>) ไนโตรเจนไดออกไซด์ (NO<sub>2</sub>) คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ฝุ่น (PM<sub>10,2.5</sub>) และก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO<sub>2</sub>) โดยเฉลี่ยจากการทำการทดลองวัดค่ามลพิษทางอากาศจำนวนทั้งหมด 5 ครั้ง (แสดงในภาคผนวก ก.) ทำการทดสอบในระยะ 2 เมตร ถึง 20 เมตร ที่ระดับความสูง 5 เมตร และเก็บผลทั้งหมด 10 ตำแหน่ง

ผลการทดสอบพบว่าค่าดัชนีคุณภาพอากาศ (Air Quality Index : AQI) มีค่าเฉลี่ยอยู่ในช่วง 0 - 25 จากผลของ PM<sub>2.5</sub> โดยบ่งชี้ถึง **คุณภาพอากาศดีมาก** ตามตารางที่ 1.1 (พิจารณาผล ณ ขณะทดสอบแบบเรียลไทม์)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 4.3.2 กรณีมีแหล่งกำเนิดควันไฟ (With smoke) ที่ความสูง 5 เมตร

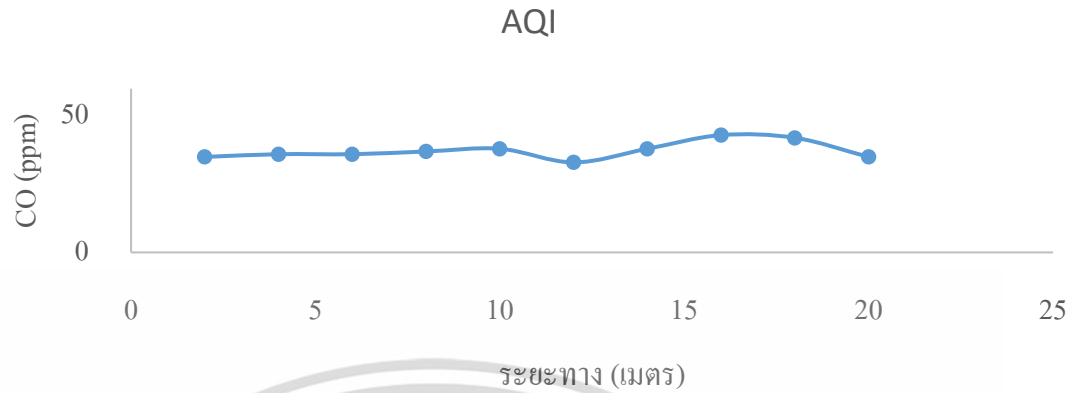
พิจารณาแบบจำลองในภาพที่ 4.3 กรณีมีแหล่งกำเนิดควันไฟ (With smoke) ที่ความสูงของโดรนบินระยะ 5 เมตร โดยสามารถเก็บผลกราฟการทดลองได้ ดังต่อไปนี้



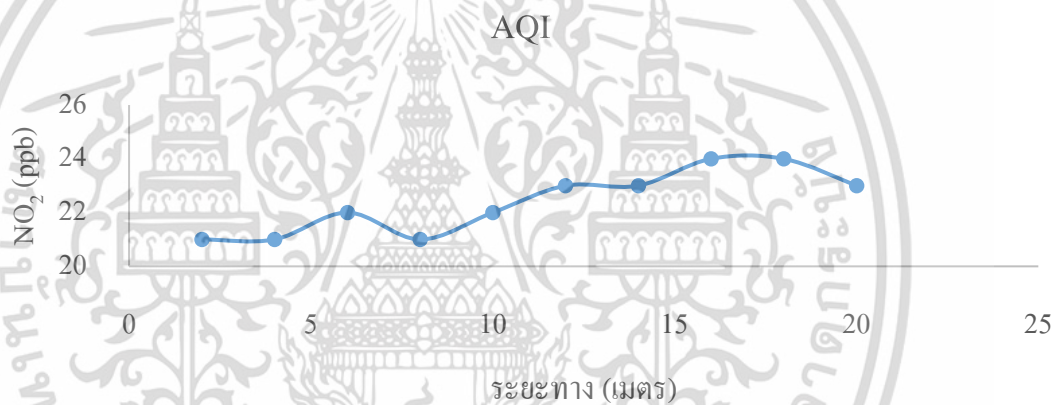
ภาพที่ 4.11 กราฟผลการวัดค่า PM<sub>10</sub> กรณีมีแหล่งกำเนิดควันไฟ (With smoke) ที่ความสูง 5 เมตร

ภาพที่ 4.12 กราฟผลการวัดค่า PM<sub>2.5</sub> กรณีมีแหล่งกำเนิดควันไฟ (With smoke) ที่ความสูง 5 เมตร

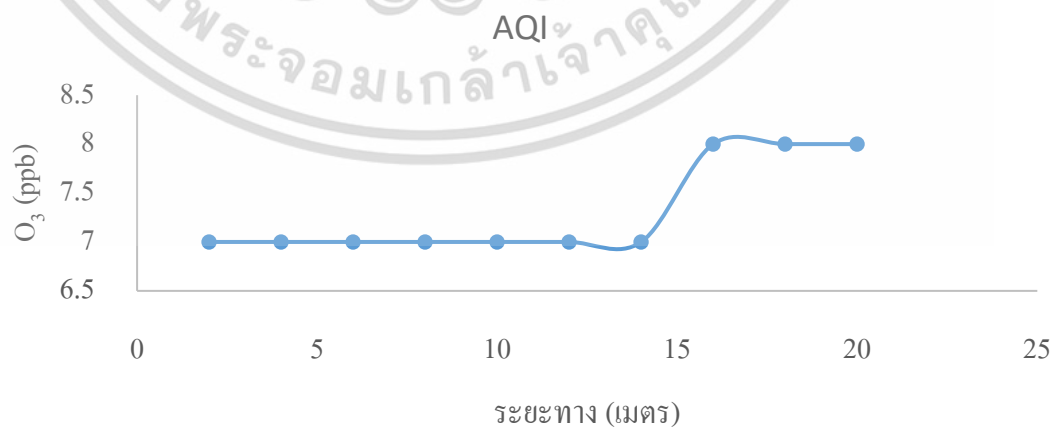
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.13 กราฟผลการวัดค่า CO กรณีมีแหล่งกำเนิดควันไฟ (With smoke) ที่ความสูง 5 เมตร

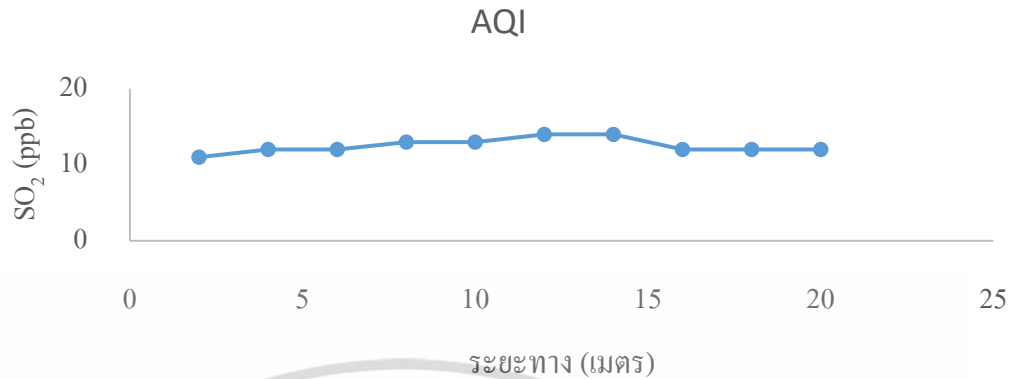


ภาพที่ 4.14 กราฟผลการวัดค่า NO<sub>2</sub> กรณีมีแหล่งกำเนิดควันไฟ (With smoke) ที่ความสูง 5 เมตร



ภาพที่ 4.15 กราฟผลการวัดค่า O<sub>3</sub> กรณีมีแหล่งกำเนิดควันไฟ (With smoke) ที่ความสูง 5 เมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.16 กราฟผลการวัดค่า SO<sub>2</sub> กรณีมีแหล่งกำเนิดควันไฟ (With smoke) ที่ความสูง 5 เมตร

จากภาพที่ 4.11 – 4.16 แสดงถึงกราฟผลการทดลองวัดค่ามลพิษทางอากาศในกรณีแหล่งกำเนิดควันไฟ (With smoke) ที่ความสูง 5 เมตร ซึ่งสามารถอ่านค่าได้จากเซ็นเซอร์วัดมลพิษทั้ง 5 ชนิด ได้แก่ โอโซน (O<sub>3</sub>) ไนโตรเจนไดออกไซด์ (NO<sub>2</sub>) คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ฝุ่น (PM<sub>10,2.5</sub>) และก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO<sub>2</sub>) โดยเฉลี่ยจากการทำการทดลองวัดค่ามลพิษทางอากาศจำนวนทั้งหมด 5 ครั้ง (แสดงในภาคผนวก ก.) ทำการทดสอบในระยะ 2 เมตร ถึง 20 เมตร และเก็บผลทั้งหมด 10 ตำแหน่ง

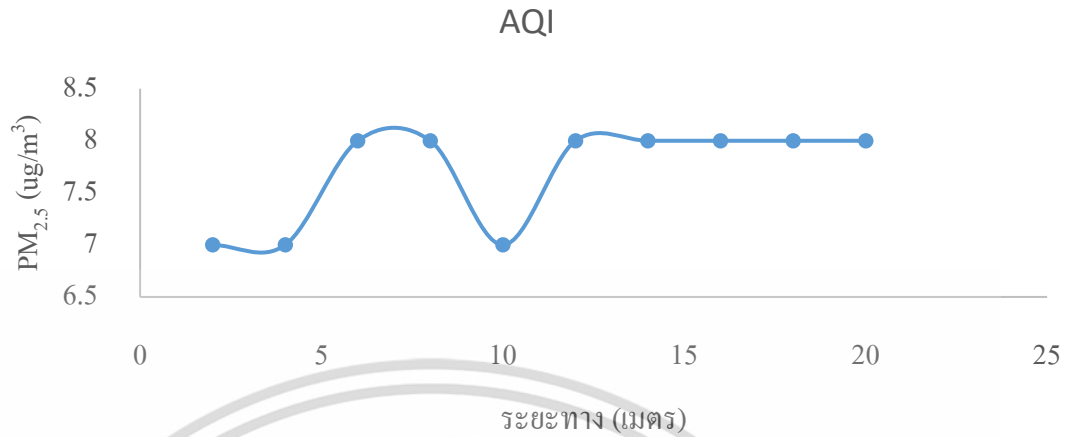
ผลการทดสอบพบว่าค่าดัชนีคุณภาพอากาศ (Air Quality Index : AQI) มีค่ามากกว่า 201 ซึ่งพิจารณาผลจากค่า PM<sub>10,2.5</sub> และ CO เป็นหลัก โดยบ่งชี้ถึงระดับ **อันตราย** ควรหลีกเลี่ยงพื้นที่เหล่านี้ ตามตารางที่ 1.1 (พิจารณาผล ณ ขณะทดสอบแบบเรียลไทม์)

#### 4.3.3 กรณีปราศจากแหล่งกำเนิดควันไฟ (Without smoke) ที่ความสูง 10 เมตร

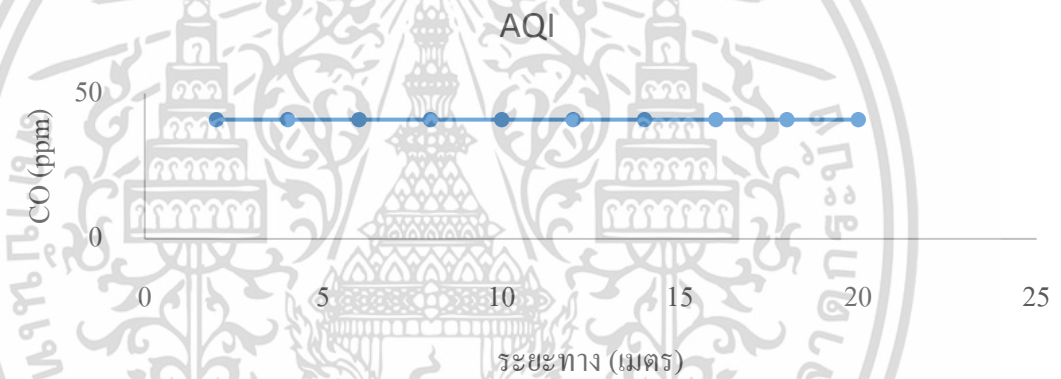


ภาพที่ 4.17 กราฟผลการวัดค่า PM<sub>10</sub> ที่ความสูง 10 เมตร

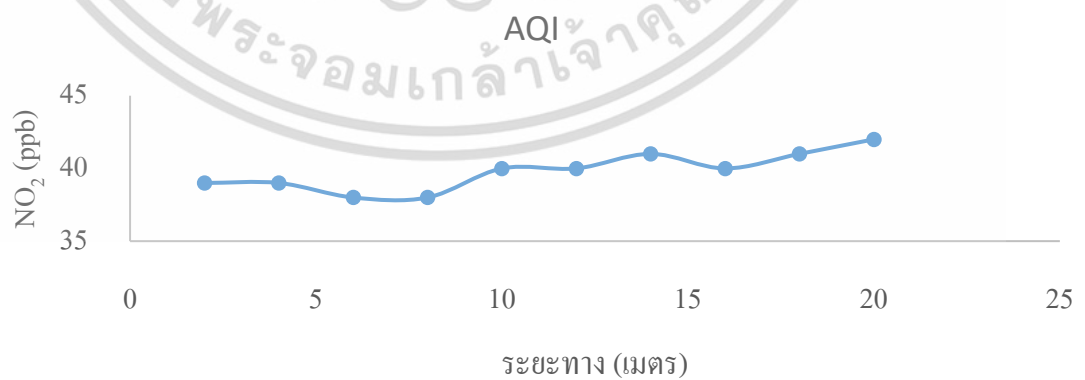
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.18 กราฟผลการวัดค่า PM<sub>2.5</sub> ที่ความสูง 10 เมตร

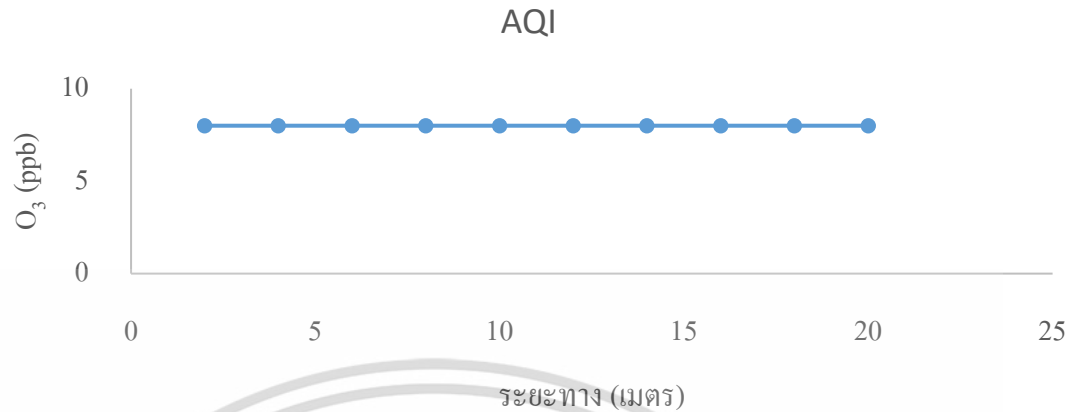


ภาพที่ 4.19 กราฟผลการวัดค่า CO ที่ความสูง 5 เมตร

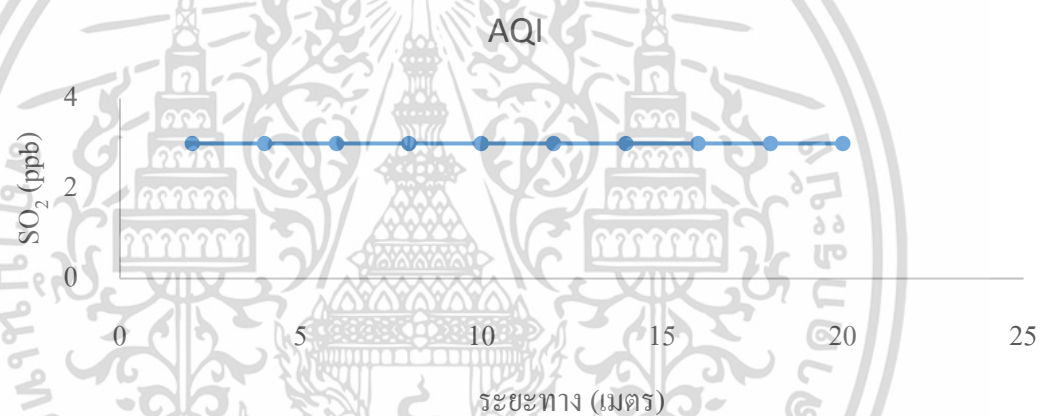


ภาพที่ 4.20 กราฟผลการวัดค่า NO<sub>2</sub> ที่ความสูง 10 เมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.21 กราฟผลการวัดค่า O<sub>3</sub> ที่ความสูง 10 เมตร



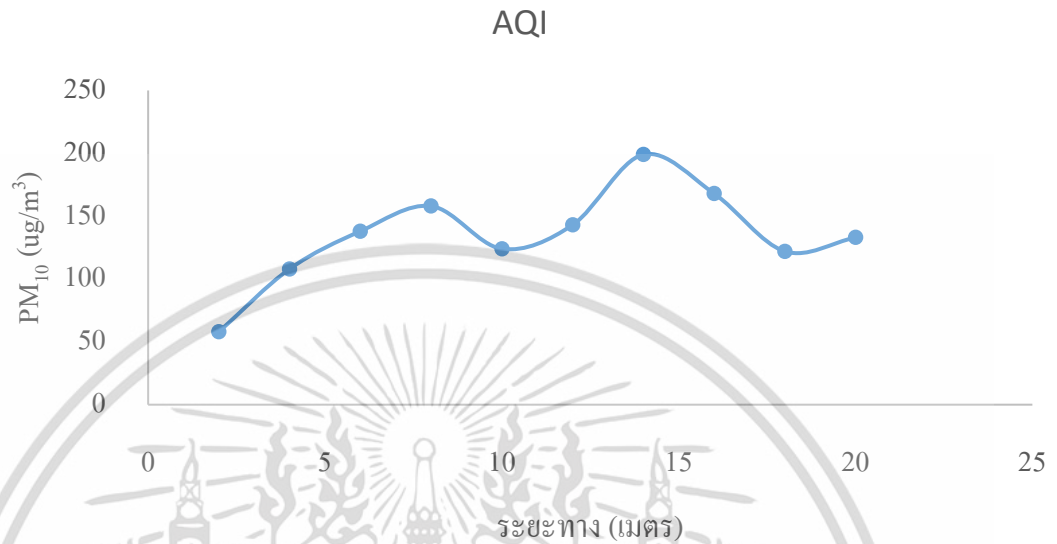
ภาพที่ 4.22 กราฟผลการวัดค่า SO<sub>2</sub> ที่ความสูง 10 เมตร

จากภาพที่ 4.17 – 4.22 แสดงถึงกราฟผลการทดลองวัดค่ามลพิษทางอากาศในกรณีแหล่งกำเนิดควันไฟ (With smoke) ที่ความสูง 10 เมตร ซึ่งสามารถอ่านค่าได้จากเซ็นเซอร์วัดมลพิษทั้ง 5 ชนิด ได้แก่ โอโซน (O<sub>3</sub>) ไนโตรเจนไดออกไซด์ (NO<sub>2</sub>) คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ฝุ่น (PM<sub>10,2.5</sub>) และก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO<sub>2</sub>) โดยเฉลี่ยจากการทำการทดลองวัดค่ามลพิษทางอากาศจำนวนทั้งหมด 5 ครั้ง (แสดงในภาคผนวก ก.) ทำการทดสอบในระยะ 2 เมตร ถึง 20 เมตร และเก็บผลทั้งหมด 10 ตำแหน่ง

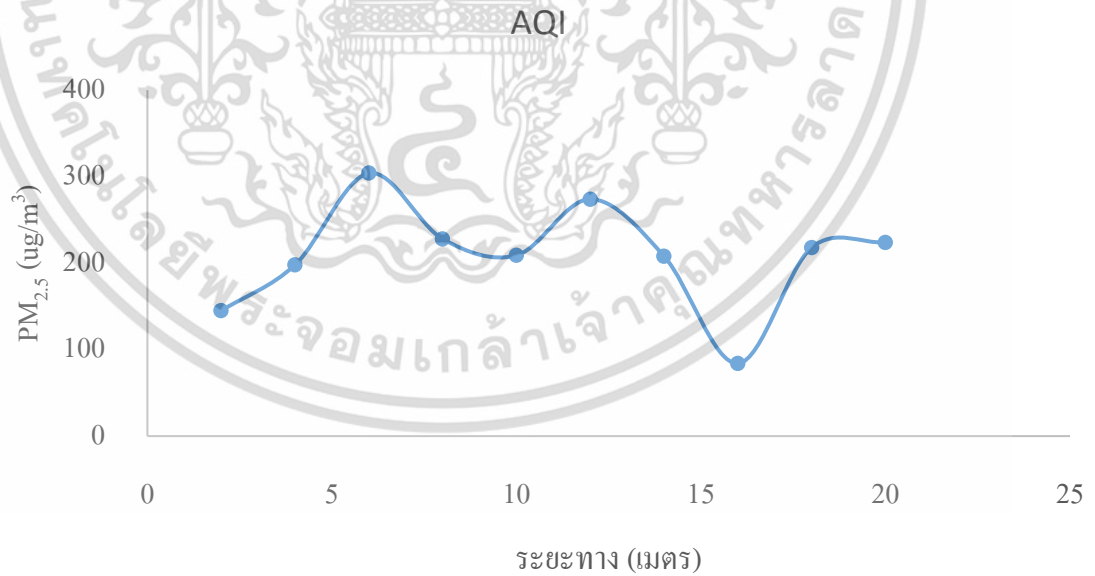
ผลการทดสอบพบว่าค่าดัชนีคุณภาพอากาศ (Air Quality Index : AQI) มีค่าเฉลี่ยอยู่ในช่วง 0 - 25 ซึ่งพิจารณาผลจากค่า PM<sub>2.5</sub> เป็นหลัก โดยบ่งชี้ถึง **คุณภาพอากาศดีมาก** ตามตารางที่ 1.1 (พิจารณาผล ณ ขณะทดสอบแบบเรียลไทม์)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.3.4 กรณีมีแหล่งกำเนิดควันไฟ (With smoke) ที่ความสูง 10 เมตร

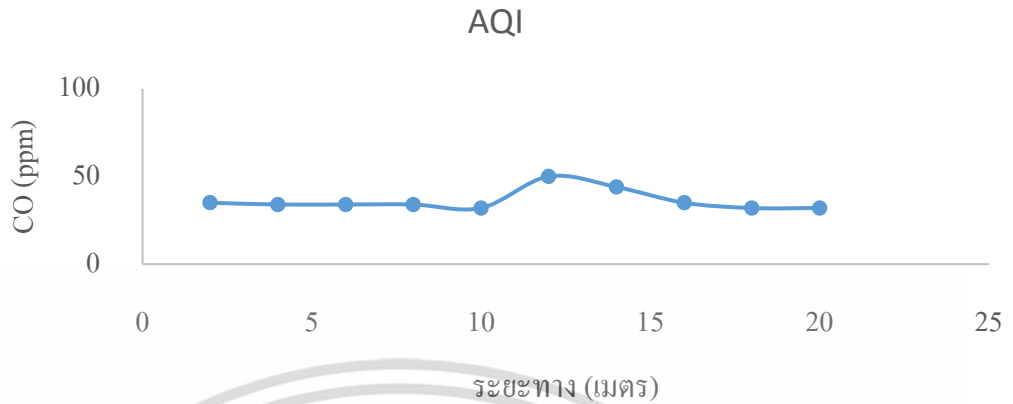


ภาพที่ 4.23 กราฟผลการวัดค่า PM<sub>10</sub>  
กรณีมีแหล่งกำเนิดควันไฟ (With smoke) ที่ความสูง 10 เมตร

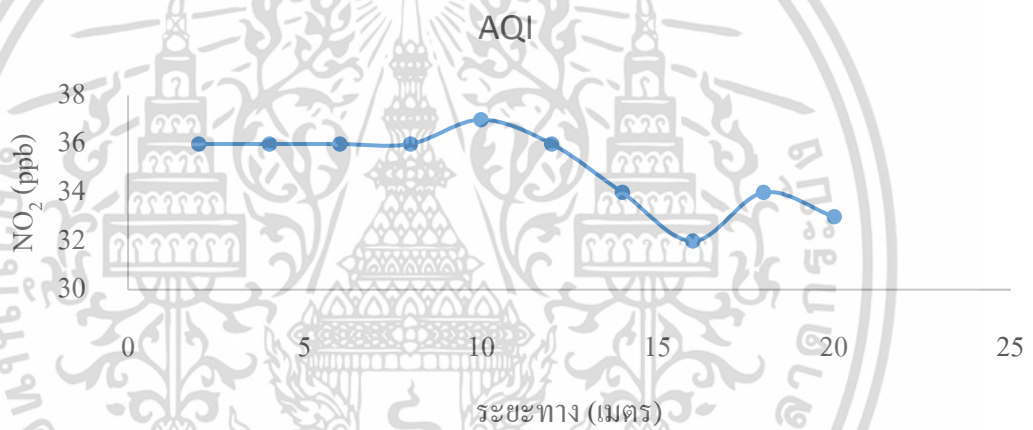


ภาพที่ 4.24 กราฟผลการวัดค่า PM<sub>2.5</sub>  
กรณีมีแหล่งกำเนิดควันไฟ (With smoke) ที่ความสูง 10 เมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.25 กราฟผลการวัดค่า CO กรณีมีแหล่งกำเนิดควันไฟ (With smoke) ที่ความสูง 10 เมตร

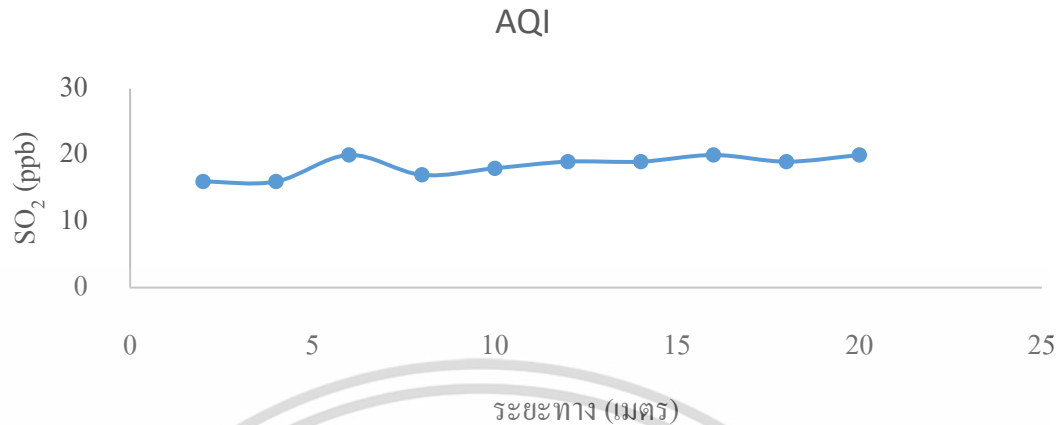


ภาพที่ 4.26 กราฟผลการวัดค่า NO<sub>2</sub> กรณีมีแหล่งกำเนิดควันไฟ (With smoke) ที่ความสูง 10 เมตร



ภาพที่ 4.27 กราฟผลการวัดค่า O<sub>3</sub> กรณีมีแหล่งกำเนิดควันไฟ (With smoke) ที่ความสูง 10 เมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.28 กราฟผลการวัดค่า SO<sub>2</sub> กรณีมีแหล่งกำเนิดควันไฟ (With smoke) ที่ความสูง 10 เมตร

จากภาพที่ 4.23 – 4.28 แสดงถึงกราฟผลการทดลองวัดค่ามลพิษทางอากาศในกรณีแหล่งกำเนิดควันไฟ (With smoke) ที่ความสูง 5 เมตร ซึ่งสามารถอ่านค่าได้จากเซ็นเซอร์วัดมลพิษทั้ง 5 ชนิด ได้แก่ โอโซน (O<sub>3</sub>) ไนโตรเจนไดออกไซด์ (NO<sub>2</sub>) คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ฝุ่น (PM<sub>10,2.5</sub>) และก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO<sub>2</sub>) โดยเฉลี่ยจากการทำการทดลองวัดค่ามลพิษทางอากาศจำนวนทั้งหมด 5 ครั้ง (แสดงในภาคผนวก ก.) ทำการทดสอบในระยะ 2 เมตร ถึง 20 เมตร และเก็บผลทั้งหมด 10 ตำแหน่ง

ผลการทดสอบพบว่าค่าดัชนีคุณภาพอากาศ (Air Quality Index : AQI) มีค่าเฉลี่ยอยู่ในช่วง 101 - 200 ซึ่งพิจารณาผลจากค่า PM<sub>10,2.5</sub> และ CO เป็นหลัก โดยบ่งชี้ถึงระดับเริ่มมีผลต่อสุขภาพมากควรหลีกเลี่ยงพื้นที่เหล่านี้ตามตารางที่ 1.1 (พิจารณาผล ณ ขณะทดสอบแบบเรียลไทม์)

ดังนั้น สรุปผลการทดสอบสามารถบ่งบอกได้ว่า กรณีมีแหล่งกำเนิดควันไฟ (With smoke) ที่ความสูง 5 เมตร และ 10 เมตร โดรนตรวจวัดมลพิษอากาศสามารถรายงานผลข้อมูลแบบเรียลไทม์เข้าสู่อินเทอร์เน็ต โดยพบว่าค่าเฉลี่ยดัชนีคุณภาพอากาศจะอยู่ในช่วงที่มี **ผลต่อสุขภาพมาก** สำหรับแบบจำลองนี้สามารถยืนยันได้ว่าโดรนตรวจวัดมลพิษอากาศ (Dr-TAPM) สามารถทำงานได้อย่างรวดเร็วแล้วสะดวก โดยเฉพาะสามารถนำไปใช้งานในกรณีพื้นที่เสี่ยงอันตราย เช่น ไฟไหม้ป่า หรือเหตุฉุกเฉินไฟไหม้ในพื้นที่ยากต่อการเข้าถึง เป็นต้น อย่างไรก็ตาม การควบคุมโดรนยังต้องอาศัยความชำนาญของผู้ใช้งานเพื่อสามารถควบคุมโดรนไปยังพื้นที่ที่จะทำการตรวจวัดมลพิษอากาศได้เป็นอย่างดี

ข้อควรคำนึงระหว่างการบิน คือ ควรตรวจสอบระดับแรงดันแบตเตอรี่ของโดรนให้อยู่ในสภาพพร้อมใช้งานอยู่เสมอ แม้ว่าระบบการควบคุมการบินจะสามารถบินกลับเองได้ด้วยระบบ GPS เมื่อระดับแรงดันแบตเตอรี่อ่อน แต่อย่างไรก็ตาม ต้องตรวจสอบความพร้อมก่อนใช้งานเสมอ

## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการวิจัย

ปัจจุบันปัญหาที่สำคัญด้านสิ่งแวดล้อมนอกเหนือจากปัญหาขยะ ก็คือ มลพิษทางอากาศซึ่งเป็นปัญหาอย่างมากในเมืองใหญ่ เช่น กรุงเทพมหานคร นนทบุรี สมุทรปราการ สมุทรสาคร ระยอง เชียงใหม่ ลำปาง แม่ฮ่องสอน ลำพูน ตาก สระบุรี ชลบุรี เป็นต้น สาเหตุส่วนมากเกิดขึ้นจากการก่อสร้างที่มีจำนวนมาก สาธารณูปโภค เส้นทางการคมนาคม ที่อยู่อาศัยและโรงงานอุตสาหกรรมต่าง ๆ ตลอดจนการจราจรติดขัด การเผาป่าเพื่อทำเกษตรกรรม และปริมาณรถยนต์ที่เพิ่มมากขึ้นทุก ๆ ปี ล้วนแล้วแต่ส่งผลให้เกิดปัญหาหมอกพิษทางอากาศภายในประเทศทั้งสิ้น

จากการศึกษาวิจัยค้นพบว่า การจัดการกับปัญหาหมอกพิษทางอากาศที่ดีที่สุด คือ การควบคุมที่แหล่งปล่อยมลพิษสู่อากาศ และการพัฒนาระบบตรวจวัดปริมาณมลพิษในอากาศแบบเรียลไทม์ ซึ่งเมื่อมีระบบการตรวจวัดก็สามารถแจ้งเตือนและควบคุมแหล่งปล่อยปริมาณของมลพิษสู่สภาวะแวดล้อมได้ โดยที่ระดับปริมาณมลพิษในชั้นบรรยากาศที่เหมาะสมจะถูกเจือจางออกไปจากชั้นบรรยากาศได้เองตามธรรมชาติ แต่ถ้ามลพิษเหล่านี้ถูกปล่อยสู่ชั้นบรรยากาศในปริมาณที่มากจนเกินความสามารถที่ชั้นบรรยากาศจะรองรับได้ก็จะเกิดการสะสมของมลพิษขึ้นในชั้นบรรยากาศทันทีและก่อให้เกิดอันตรายต่อสุขภาพของมนุษย์และสัตว์ ตลอดจนส่งผลต่อการเจริญเติบโตของพืชซึ่งทำให้ผลผลิตทางการเกษตรลดลงได้ ดังนั้น การพัฒนาระบบตรวจวัดแจ้งเตือนปริมาณมลพิษในอากาศจึงมีความสำคัญมาก ในปัจจุบันหน่วยงานกรมควบคุมมลพิษได้ให้ความสำคัญต่อการพัฒนาระบบตรวจวัดปริมาณมลพิษอากาศเพิ่มมากขึ้นโดยติดตั้งสถานีตรวจวัดคุณภาพอากาศตามจุดต่าง ๆ เพิ่มขึ้น ทั้งหมด 33 จังหวัด 63 สถานีทั่วประเทศ เพื่อให้ประชาชนได้ทราบข้อมูลตลอดเวลา อย่างไรก็ตาม ยังมีอีกหลายจุดในประเทศที่ยังไม่ได้ทำการติดตั้งสถานีตรวจวัดและประชาชนยังไม่สามารถทราบข้อมูลค่าปริมาณมลพิษทางอากาศพื้นที่เหล่านั้น

งานวิจัยในปัจจุบันได้ให้ความสำคัญกับการพัฒนาระบบตรวจวัดมลพิษอากาศแบบแบบเรียลไทม์มากขึ้น โดยเฉพาะการใช้โดรนหรืออากาศยานไร้คนขับเพื่อตรวจวัดปริมาณมลพิษอากาศ ซึ่งมีข้อดีต่าง ๆ ดังนี้ คือ

1. สามารถวัดข้อมูลปริมาณมลพิษอากาศได้แบบเรียลไทม์ทุกที่ทุกเวลา
2. สามารถสำรวจพื้นที่ทำงานที่เข้าถึงได้ยาก หรือพื้นที่ที่เสี่ยงอันตราย เช่น พื้นที่งานก่อสร้างอาคารสูง พื้นที่เกิดอัคคีไฟหรือไฟไหม้ป่า พื้นที่ที่มีก๊าซมลพิษรั่วไหลในโรงงานอุตสาหกรรม เป็นต้น
3. สามารถพัฒนาแบบจำลองคุณภาพอากาศแบบสามมิติได้ง่าย เช่น การแสดงข้อมูลปริมาณความเข้มข้นของระดับมลพิษอากาศแบบเรียลไทม์แบ่งระดับสีได้อย่างรวดเร็ว เป็นต้น ทั้งนี้การแสดงข้อมูลปริมาณมลพิษอากาศแบบออนไลน์ทั่วไปยังขึ้นอยู่กับจุดสถานีที่ติดตั้งเป็นหลัก

โครงการวิจัยนี้ได้ศึกษาวิจัยและพัฒนาโดรนหรืออากาศยานไร้คนขับที่สามารถติดตั้งชุดเซ็นเซอร์วัดปริมาณมลพิษอากาศทั้ง 5 ชนิดตามมาตรฐานของกรมมลพิษ ได้แก่ ค่าฝุ่นละออง ( $PM_{10}$ ) และ ( $PM_{2.5}$ ) ค่าโอโซน ( $O_3$ ) ค่าก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ( $SO_2$ ) ค่าคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) และค่าไนโตรเจนไดออกไซด์ ( $NO_2$ ) เป็นต้น ซึ่งใช้ชื่อโครงการวิจัยว่า Dr-TAPM โดยหลักการออกแบบโครงสร้างได้กำหนดให้มีขนาดโดรนกว้างเท่ากับ 70 เซนติเมตร และยาวเท่ากับ 70 เซนติเมตร และใช้ใบพัดขนาด 15 นิ้ว สำหรับการยกน้ำหนักได้ไม่เกิน 2.5 กิโลกรัม ขณะลอยตัวอยู่บนอากาศ รวมถึงสามารถบินได้ไกลถึง 200 เมตร ในแนวระดับสายตาควคุม รายละเอียดดังกล่าวไว้ในบทที่ 3 โดยหลักการใช้งานจะเชื่อมต่อข้อมูลเข้ากับเครือข่ายอินเทอร์เน็ตแบบ 3G/4G หรือสามารถใช้งานกับเครือข่าย WiFi เพื่อเก็บข้อมูลเข้าระบบฐานข้อมูลแบบ Cloud computing ได้อย่างรวดเร็ว ดังแสดงในภาพที่ 3.12 นอกจากนี้ ผู้วิจัยได้พัฒนาแอปพลิเคชันสำหรับแสดงผลข้อมูลปริมาณมลพิษทางอากาศแบบเรียลไทม์ ดังแสดงในภาพที่ 3.12

การทดสอบได้ดำเนินการ ณ สนามกีฬา ภายในสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์ จังหวัดชุมพร ในช่วงเวลา 07.00 น. – 09.00 น. เมื่อวันที่ 23 พฤษภาคม พ.ศ. 2562 โดยจำลองสถานการณ์ของพื้นที่เสี่ยงอันตราย คือ ไฟไหม้ป่า ซึ่งผลการทดลองพบว่า โดรนสามารถตรวจวัดปริมาณมลพิษทางอากาศได้อย่างแม่นยำ โดยผลการทดสอบจะเห็นได้ว่า ค่าฝุ่นละออง ( $PM_{10}$ ) และ ( $PM_{2.5}$ ) รวมถึงค่าคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) จะมีผลกระทบมากที่สุดและให้ค่าเฉลี่ยของดัชนีคุณภาพอากาศอยู่ในช่วง 101 – 200 ซึ่งจะมีผลสุขภาพมาก

ดังนั้น ควรหลีกเลี่ยงการทำกิจกรรมในพื้นที่ดังกล่าว จะเห็นได้ว่าการใช้โดรนตรวจวัดปริมาณมลพิษทางอากาศมีประโยชน์อย่างมากสำหรับพื้นที่เสี่ยงอันตราย โครงการวิจัยนี้จะเป็นต้นแบบของการพัฒนา Dr-TAPM เพื่อต่อยอดงานวิจัยที่เกี่ยวข้องในอนาคตได้เป็นอย่างดี

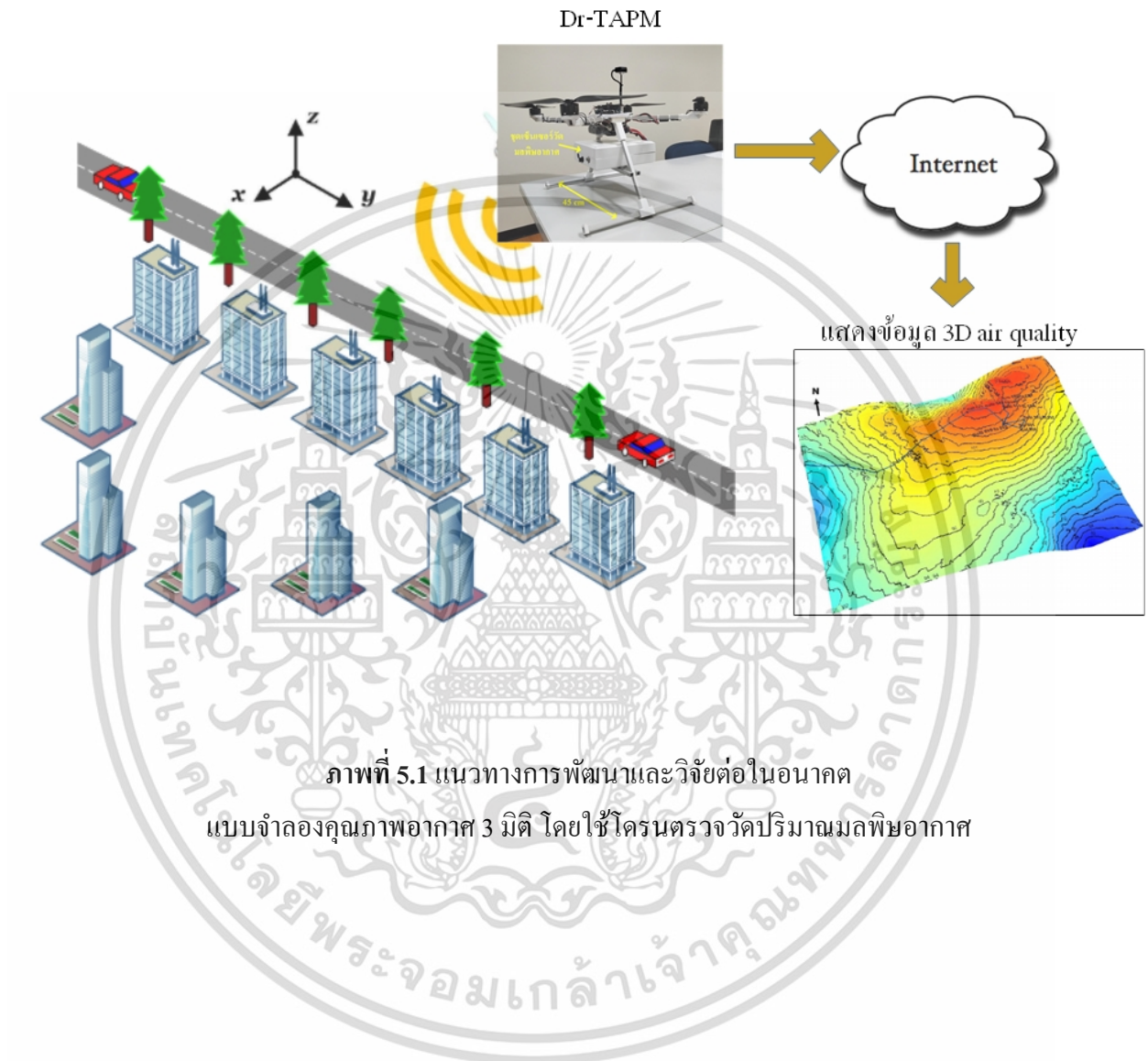
## 5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ผู้ควบคุมโดรนควรมีความชำนาญในระดับดีสำหรับการควบคุมและการบินโดรน
2. การใช้งานโดรนควรคำนึงถึงใบอนุญาตและข้อบังคับต่าง ๆ ของกรมการบินพลเรือน
3. เนื่องจากโดรนมีขนาดใหญ่ ดังนั้น ควรตรวจสอบระดับแรงดันแบตเตอรี่ทุกครั้งก่อน
4. ควรออกแบบแอปพลิเคชันใช้งานบนแพลตฟอร์มของ iOS

## 5.3 แนวทางการพัฒนาและวิจัยต่อในอนาคต

สามารถพัฒนาแบบจำลองคุณภาพอากาศแบบสามมิติ (3D air quality model) โดยใช้โดรนตรวจวัดปริมาณมลพิษอากาศ (Dr-TAPM) ดังแสดงในภาพที่ 1.5 และการแสดงผลข้อมูลคุณภาพอากาศแบบ 3 มิติ โดยใช้ Dr-TAPM ดังภาพที่ 5.1 เพื่อแสดงข้อมูลระดับความเข้มข้น (contour) ของปริมาณมลพิษในชั้นบรรยากาศแต่ละระดับความสูงที่วัด

ได้ ข้อดีของการใช้แบบจำลองคุณภาพอากาศ 3 มิติ คือ ให้ความละเอียดของข้อมูลได้ชัดเจนและสามารถนำมาคาดการณ์แหล่งกำเนิดมลพิษอากาศได้อย่างแม่นยำ



ภาพที่ 5.1 แนวทางการพัฒนาและวิจัยต่อในอนาคต  
แบบจำลองคุณภาพอากาศ 3 มิติ โดยใช้โดรนตรวจวัดปริมาณมลพิษอากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

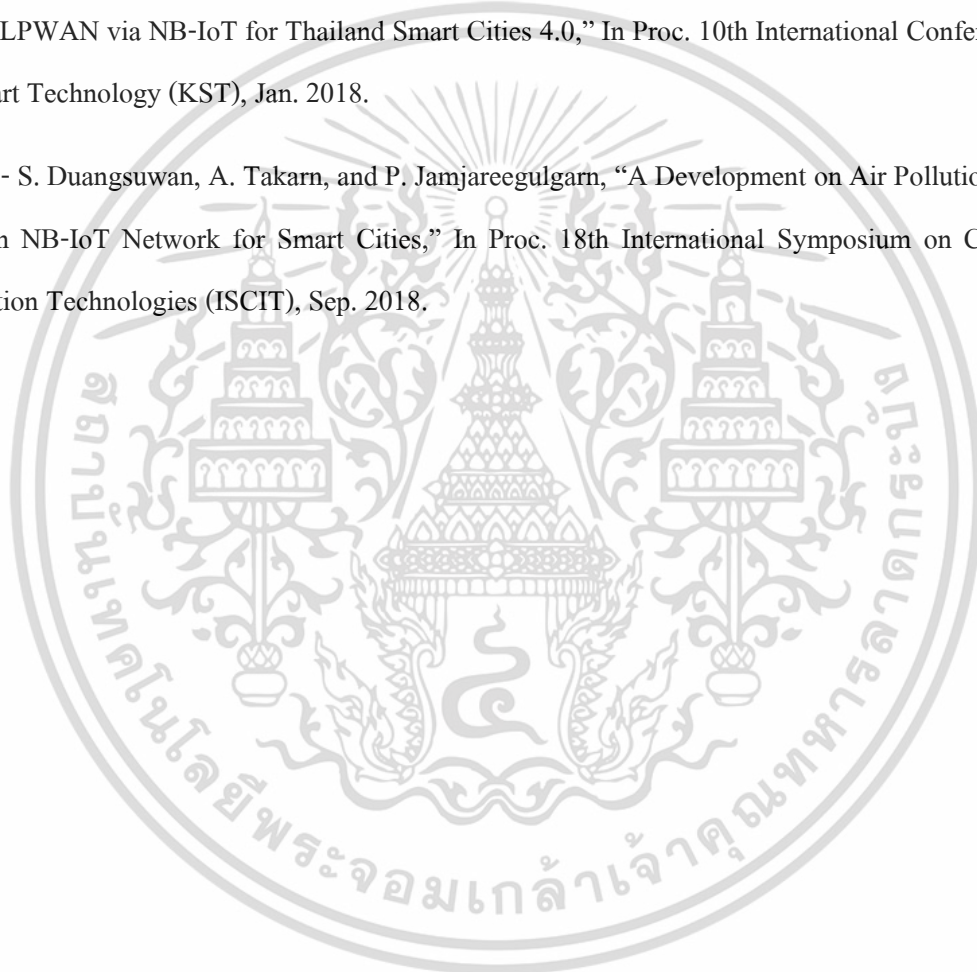
## บทที่ 6

### สรุปผลผลิตที่ได้จากงานวิจัย

#### 6.1 การประชุมวิชาการระดับนานาชาติ (อยู่ในฐาน SCOPUS)

- S. Duangsuwan, A. Takarn, R. Nujankaew, and P. Jamjareegulgarn, “A Study of Air Pollution Smart Sensors LPWAN via NB-IoT for Thailand Smart Cities 4.0,” In Proc. 10th International Conference on Knowledge and Smart Technology (KST), Jan. 2018.

- S. Duangsuwan, A. Takarn, and P. Jamjareegulgarn, “A Development on Air Pollution Detection Sensors based on NB-IoT Network for Smart Cities,” In Proc. 18th International Symposium on Communications and Information Technologies (ISCIT), Sep. 2018.





แบบรายงานผลผลิตโครงการวิจัย  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
สัญญาเลขที่ KREF186009

ชื่อโครงการ

(ภาษาไทย) การศึกษาและพัฒนาอากาศยานไร้คนขับเพื่อตรวจวัดปริมาณมลพิษทางอากาศสำหรับสภาวะแวดล้อมเมืองอัจฉริยะและพื้นที่เสี่ยงอันตราย

(ภาษาอังกฤษ) A study and development of UAV air pollution monitoring for smart city and risk area environment

หัวหน้าโครงการ ดร.ศรัญ ดวงสุวรรณ

หน่วยงานต้นสังกัด วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์

งบประมาณการวิจัยที่ได้รับ 100,000 บาท ปีงบประมาณ 2561

แหล่งทุนที่ได้รับการจัดสรร

- เงินงบประมาณแผ่นดิน/งบบูรณาการวิจัยและนวัตกรรม
- เงินรายได้ (คณะ/วิทยาลัย/วิทยาเขต/สำนัก)  กองทุนวิจัย สจล.  อื่นๆ ระบุ

ความสอดคล้องกับกลุ่มวิจัยของ สจล.

- Biomedical  Agriculture & Food  Renewable Energy
- ICT Robotics & Automation  ICT Smart City & IoT  Battery & EV
- Creative Economy  Materials  Logistics

ผลสำเร็จที่ได้จากการวิจัย

| ประเภทผลสำเร็จ  | จำนวนผลสำเร็จ | รายละเอียด |
|---|---------------|------------|
| <input type="checkbox"/> ต้นแบบผลิตภัณฑ์<br><input type="checkbox"/> ระดับอุตสาหกรรม<br><input type="checkbox"/> ระดับกึ่งอุตสาหกรรม<br><input type="checkbox"/> ระดับภาคสนาม<br><input type="checkbox"/> ระดับห้องปฏิบัติการ<br><input type="checkbox"/> อื่นๆ |               |            |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

| ประเภทผลสำเร็จ  | จำนวนผลสำเร็จ | รายละเอียด |
|---|---------------|------------|
| <input type="checkbox"/> <b>ต้นแบบเทคโนโลยี</b><br><input type="checkbox"/> ระดับ<br><input type="checkbox"/> ระดับกิ่งอุตสาหกรรม<br><input type="checkbox"/> ระดับภาคสนาม<br><input type="checkbox"/> ระดับห้องปฏิบัติการ<br><input type="checkbox"/> อื่นๆ  |               |            |
| <input type="checkbox"/> <b>กระบวนการใหม่</b><br><input type="checkbox"/> ระดับอุตสาหกรรม<br><input type="checkbox"/> ระดับกิ่งอุตสาหกรรม<br><input type="checkbox"/> ระดับภาคสนาม<br><input type="checkbox"/> ระดับห้องปฏิบัติการ<br><input type="checkbox"/> อื่นๆ  |               |            |
| <input type="checkbox"/> <b>องค์ความรู้</b>   |               |            |
| <input type="checkbox"/> <b>การใช้ประโยชน์เชิงพาณิชย์</b><br><input type="checkbox"/> งานวิจัยนำไปสู่การพัฒนาสิ่งประดิษฐ์<br><input type="checkbox"/> งานวิจัยนำไปสู่การพัฒนาผลิตภัณฑ์ซึ่งก่อให้เกิดรายได้<br><input type="checkbox"/> งานวิจัยนำไปสู่การเพิ่มประสิทธิภาพการผลิต<br><input type="checkbox"/> การถ่ายทอดเทคโนโลยี<br><input type="checkbox"/> การฝึกอบรม<br><input type="checkbox"/> การสัมมนา<br><input type="checkbox"/> อื่นๆ |               |            |
| <input type="checkbox"/> <b>การใช้ประโยชน์เชิงสาธารณะ/สังคม/ชุมชน</b><br><input type="checkbox"/> งานวิจัยสร้างองค์ความรู้แก่สาธารณชนในเรื่องต่างๆ เช่น องค์ความรู้ด้านศิลปวัฒนธรรม สาธารณสุข การ   |               |            |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

| ประเภทผลสำเร็จ   | จำนวนผลสำเร็จ | รายละเอียด                                  |
|--|---------------|---|
| บริการจัดการสำหรับวิสาหกิจ (SME)<br>ประชาธิปไตยภาคประชาชน วิถีชีวิต<br>แบบเศรษฐกิจพอเพียง เป็นต้น<br><input type="checkbox"/> การนำองค์ความรู้ไปพัฒนาคุณภาพชีวิต<br>ของประชาชนให้ดีขึ้น<br><input type="checkbox"/> การถ่ายทอดเทคโนโลยี<br><input type="checkbox"/> การฝึกอบรม<br><input type="checkbox"/> การสัมมนา<br><input type="checkbox"/> อื่นๆ |               |   |
| <input type="checkbox"/> การพัฒนากำลังคน<br><input type="checkbox"/> นักศึกษา ป.โท<br><input type="checkbox"/> นักศึกษา ป.เอก<br><input type="checkbox"/> นักวิจัยหลังปริญญาเอก<br><input type="checkbox"/> นักวิจัยภาคเอกชน/ภาคบริการและ<br>ภาคสังคม  |               |   |
| <input type="checkbox"/> ทรัพย์สินทางปัญญา<br><input type="checkbox"/> สิทธิบัตร<br><input type="checkbox"/> อนุสิทธิบัตร<br><input type="checkbox"/> ลิขสิทธิ์<br><input type="checkbox"/> เครื่องหมายทางการค้า<br><input type="checkbox"/> ความลับทางการค้า<br><input type="checkbox"/> พันธุ์พืช<br><input type="checkbox"/> อื่นๆ                  |               |   |
| <input type="checkbox"/> บทความทางวิชาการ<br><input type="checkbox"/> วารสารระดับนานาชาติ<br><input type="checkbox"/> วารสารระดับชาติ  |               |   |
| <input checked="" type="checkbox"/> การประชุม/สัมมนาระดับนานาชาติ<br><input checked="" type="checkbox"/> นำเสนอปากเปล่า<br><input type="checkbox"/> นำเสนอแบบโปสเตอร์  | 2             | แสดงรายละเอียดผลผลิตงานวิจัยใน<br>ภาคผนวก ก |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

| ประเภทผลสำเร็จ  | จำนวนผลสำเร็จ | รายละเอียด |
|---|---------------|------------|
| <input type="checkbox"/> การประชุม/สัมมนาระดับชาติ<br><input type="checkbox"/> นำเสนอปากเปล่า<br><input type="checkbox"/> นำเสนอแบบโปสเตอร์ |               |            |

ลงชื่อ.....หัวหน้าโครงการ

(ดร.ศรัญญา ดวงสุวรรณ)

วันที่ 25 กรกฎาคม พ.ศ. 2562



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บรรณานุกรม

- [1] Drones to soon measure pollution levels and air quality (2019), สืบค้นเมื่อ 26 มีนาคม พ.ศ. 2562, จาก [http://www.hani.co.kr/arti/english\\_edition/e\\_national/887470.html](http://www.hani.co.kr/arti/english_edition/e_national/887470.html).
- [2] รายงานสถานการณ์และคุณภาพอากาศประเทศไทย (2019), สืบค้นเมื่อ 4 กรกฎาคม พ.ศ. 2562, จาก <http://air4thai.pcd.go.th/webV2/station.php?station=35t>.
- [3] Y. Yang, Z. Zheng, K. Bian, Y. Jiang, L. Song, and Z. Han “Real-time profiling for fine-grained air quality index distribution using UAV sensing,” IEEE Internet of Things Journal, vol. 5, no. 1, pp. 186 – 198, in 2018.
- [4] มลพิษทางอากาศ: การบริหารจัดการสิ่งแวดล้อมไทย (2558), สืบค้นเมื่อ 4 กรกฎาคม พ.ศ. 2562, จาก [http://library2.parliament.go.th/ejournal/content\\_af/2558/may2558-2.pdf](http://library2.parliament.go.th/ejournal/content_af/2558/may2558-2.pdf)
- [5] องค์การอนามัยโลก: ประชากรโลก 9 ใน 10 คนหายใจอากาศปนเปื้อน (2561), สืบค้นเมื่อ 3 พฤษภาคม พ.ศ. 2561, จาก <https://www.bbc.com/thai/international-43987154>.
- [6] S. Duangsuwan, A. Takarn, R. Nujankaew, and P. Jamjareegulgarn “A study of air pollution smart sensors LPWAN via NB-IoT for Thailand smart cities4.0,” in Proc. 10th International Conference on Knowledge and Smart Technology (KST), pp. 206 - 209, Chiang Mai, Thailand, 2018.
- [7] S. Duangsuwan, A. Takarn, and P. Jamjareegulgarn “A development on air pollution detection sensors based on NB-IoT network for smart cities,” in Proc. 18th International Symposium on Communication and Information Technologies (ISCIT), pp. 313 - 317, Bangkok, Thailand, 2018.
- [8] J. Wivou, L. Udawatta, A. Alshehhi, E. Alzaabi, A. Albeloshi, and S. Alfalasi “Air quality monitoring for sustainable systems via drone based technology,” in IEEE International Conference on Information and Automation for Sustainability (ICIAfS), pp. 1 – 5, Galle, Sri Lanka, 2016.
- [9] T. Landolsi, A. Sagahyoon, M. Mirza, O. Aref, F. Maki, and S. Maki “Pollution monitoring system using position-aware drones with 802.11 Ad-hoc networks,” in IEEE Conference on Wireless Sensors (ICWiSe), pp. 40 – 43, Langkawi, Malaysia, 2018.

- [10] G. M. Bolla, M. Casagrande, A. Comazetto, R. D. Moro, M. Desto, E. Fantin, G. Colombatti, A. Aboudan, E. C. Lorenzini “ARIA: Air pollutants monitoring using UAVs,” in 5th IEEE International Workshop on Metrology for AeroSpace (MetroAeroSpace), pp. 225 – 229, Rome, Italy, 2018.
- [11] Y. Yang, Z. Zheng, K. Bian, Y. Jiang, L. Song, and Z. Han “Arms: A fine-grained 3D AQI realtime monitoring system by UAV,” in IEEE Global Communications Conference, pp. 1 – 6, Singapore, 2017.
- [12] Y. Yang, Z. Zheng, K. Bian, Y. Jiang, L. Song, and Z. Han “Sensor deployment recommendation for 3D fine-grained air quality monitoring using semi-supervised learning,” in IEEE Conference on Communications (ICC), pp. 1 – 6, Kansas City, MO, USA, 2018.
- [13] ภาสกร ประถมบุตร (2562), Smart Cities Development in Thailand, สืบค้นเมื่อ 4 กรกฎาคม พ.ศ. 2562, จาก [https://www.nstda.or.th/nac/2019/images/seminar/26\\_Smartcity\\_passakorn.pdf](https://www.nstda.or.th/nac/2019/images/seminar/26_Smartcity_passakorn.pdf)
- [14] กฎหมายควบคุมการใช้โดรนเพื่อคุ้มครองสิทธิในความเป็นส่วนตัว (2561), สืบค้นเมื่อ 12 พฤษภาคม พ.ศ. 2561, จาก [https://library2.parliament.go.th/ejournal/content\\_af/2561/jun2561-2.pdf](https://library2.parliament.go.th/ejournal/content_af/2561/jun2561-2.pdf)
- [15] A. G-Perez, R. Sanchez-Iborra, M-Dolores Cano, J. C. Sanchez-Aarnoutse, and J. G-Haro “WiFi networks on drones,” in ITU WT, Bangkok, Thailand, 2016.
- [16] กสทช. อนุมัติคลื่นความถี่ย่าน 920-925 MHz (2561), สืบค้นเมื่อ 15 พฤษภาคม พ.ศ. 2562, จาก <https://positioningmag.com/1133619>
- [17] R. Ratasuk, B. Vejlgaard, N. Mangalvedhe, and A. Ghosh “NB-IoT system for M2M communication,” in IEEE Wireless Communications and Networking Conference, Doha, Qatar, 2016.
- [18] P. Alqinsi, I. J. M. Edward, N. Ismail, and W. Darmalaksana “IoT-Based UPS Monitoring System Using MQTT Protocols,” in 4<sup>th</sup> International Conference on Wireless and Telematics (ICWT), Nusa Dua, Indonesia, 2018.
- [19] Understanding the MQTT Protocol Packet Structure (2019), สืบค้นเมื่อ 1 มิถุนายน พ.ศ. 2562, จาก <http://www.steves-internet-guide.com/mqtt-protocol-messages-overview/>
- [20] TechMagic (2019), สืบค้นเมื่อ 24 มิถุนายน พ.ศ. 2562, จาก <https://blog.techmagic.co/firebase-cloud-messaging-for-push-notifications>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**ภาคผนวก ก****ผลผลิตงานวิจัย****การประชุมวิชาการระดับนานาชาติ (อยู่ในฐาน SCOPUS)**

S. Duangsuwan, A. Takarn, R. Nujankaew, and P. Jamjareegulgarn, “A Study of Air Pollution Smart Sensors LPWAN via NB-IoT for Thailand Smart Cities 4.0,” In Proc. 10th International Conference on Knowledge and Smart Technology (KST), Jan. 2018.

S. Duangsuwan, A. Takarn, and P. Jamjareegulgarn, “A Development on Air Pollution Detection Sensors based on NB-IoT Network for Smart Cities,” In Proc. 18th International Symposium on Communications and Information Technologies (ISCIT), Sep. 2018.

the 2018-10<sup>th</sup> International Conference on Knowledge and Smart Technology

**"Cybernetics in the Next Decades"**

**KST 2018**  
Jan 31-Feb 3

KST Research Center  
Knowledge & Smart Technology  
Systems

Kantary Hills Hotel  
Chiangmai, Thailand

พระจอมเกล้า  
Organized by  
Knowledge and Smart Technology Research Center  
Faculty of Informatics, Suazha University

ISBN 978-1-5386-4015-9

Sponsored by **IEEE** IEEE Xplore<sup>®</sup> **IEEE**

Patronage by **IEEE** **IEEE** **IEEE**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# A Study of Air Pollution Smart Sensors LPWAN via NB-IoT for Thailand Smart Cities 4.0

Sarun Duangsuwan, Aekarong Takarn, Rachan Nujankaew, Punyawij Jamjareegulgarn  
Electronic Engineering, Department of Engineering  
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Prince of Chumphon Campus  
Chumcho District, Pathio, Chumphon, Thailand 86160

Email: sarun.du@kmitl.ac.th, paerx7@windowlive.com, superbuf747@gmail.com, punyawij.ja@kmitl.ac.th

**Abstract**—The problem of air pollutant has to improve urgently, in particular, approach to smart city in 2024 of Thailand 4.0. This paper presents a development of smart sensors of air pollution to monitor the air quality in smart city. We propose the smart sensors that consist of the particulate matter ( $PM_{10}$ ) or dust sensor, carbon monoxide (CO), carbon dioxide ( $CO_2$ ), noise level (dB), and ozone ( $O_3$ ) respectively. These sensors are solution of a low power wide area network (LPWAN). In the experiment, the measurement has been investigated in Bangkok metropolitan, and the results show air quality index (AQI) via Narrowband Internet of Things (NB-IoT). The proposed of this paper can help the people know the real-time air quality via IoT as a service.

**Keywords**— Air pollution; smart sensors; NB-IoT; smart cities; LPWAN.

## I. INTRODUCTION

In Thailand, air pollution was risking to the people dead as to the third levels in the world, in particular, Bangkok city that increasing of the citizens rapidly, which leading to the demanding of traffic is inordinate. Not only the increasing of the dense city, but also the growing up of industrials reaching to the demands of marketing, Thailand 4.0 has become a strategic policy that to drive the economy based on digital transformation, where the development people quality and raising the industry sectors. Smart city is a part of the developing of people quality based on IT trends. Nowadays, the research challenges on smart city are of smart metering, smart water, air quality monitoring, health monitoring, and so on [1].

From a reporting of pollution control department, Ministry of Natural Resource and Environment in 2016 found that the air pollution in Bangkok city has been risked from the particulate matter of dust ( $PM_{10}$ ) and ozone ( $O_3$ ). Figure 1 shows the point of view in the Bangkok environment as a suffering from the air pollution [2].

In the surveillance of smart city, a sustainable air quality monitoring is very important to measure the

pollution levels. There are many research interests to study and develop the innovative technologies in smart city. Smart sensor is a solution that it can be applied by using wireless sensor network (WSN). Literature work on a smart vehicle monitoring system for air pollution detection [3] show that the using of WSN plays an important role in the application of environmental monitoring. The sensors were mounted to the vehicle which has more 20 mobile nodes, then the sensor sends data to the smart phone in order to monitor the humidity, temperature, Co, and  $NO_2$ , respectively. In this solution, the result still be simulated. Interesting work on air quality monitoring in [4], cleanWiFi concept was presented by using the wireless network. The cleanWiFi network constantly monitors the air pollution gases, uses that the information to feed into big sensor data, and uses the same data for automatic configuration of the WiFi network. This way it raises the public awareness about the state of air pollution and alarm suddenly. However, the cost of big sensor data and WiFi service charge is still being high. Recently, the new WSN approach to use for the air pollution monitoring has been presented [5], which the spatial data cluster technique. Unlike as in [4] that, they proposed aims to



Figure 1. Air pollution in Bangkok city environment.

fine the optimal sensors and sinks locations in order to ensure the air pollution coverage and network connectivity. In addition, the air pollution analysis using enhanced K-means clustering algorithm in [6] is suitable for real time sensor data. This method employs more data point or sensor node in several locations. Other the interesting work, the using of low cost sensor via mobile phone to monitor the air quality is presented in [7]. However, the sensor size has been factored mainly to build in mobile; IoT is a solution of the smart sensor technology. In [8], the proposed IoT sensing environment for smart city has been presented. The sensors implemented that consists of temperature, humidity, and CO<sub>2</sub> sensor sends the data to IoT network. Meanwhile, there are several applications in a last few years as described therein [9]-[12] that to interest the air pollution control and monitoring in smart city.

This paper presents the air pollution monitoring by using smart sensors up to five sensor boards, where the particulate matter (PM<sub>10</sub>) or dust sensor, carbon monoxide (CO), carbon dioxide (CO<sub>2</sub>), noise level (dB), and ozone (O<sub>3</sub>) is implemented as respectively. We claim that our proposed sends the data via NB-IoT network based on the low power wide area network (LPWAN). The benefits of NB-IoT that is low complexity in transceiver design, lower power consumption, lower cost of a radio chip, and coverage enhancement. The spectrum sensing of NB-IoT showed in the subsection II. In this paper, we have experimented the results as an air quality index (AQI) from the measuring area of Bangkok city.

The rest of the paper is described as follows: The section II brief presents the descriptions of NB-IoT, LPWAN, and the proposed of smart sensors air pollution. Then, we mention to the experimental setup as showed the map location of the measurement air pollution, and discusses the results of AQI. Finally, the concluded of this paper is drawn.

## II. DESCRIPTION

### A. NB-IoT

The state of the art overview of the spectrum sensing of NB-IoT as shown in Fig. 2, the downlink is based on orthogonal frequency division multiplexing access (OFDMA) with 15 kHz subcarrier spacing as LTE. Slot, subframe, and frame duration are 0.5 ms, 1 ms, and 10 ms, respectively. Furthermore, slot format in terms of cyclic prefix (CP) duration and number of OFDM symbols per slot is also identical to those in LTE. In fact, NB-IoT carrier uses one LTE in the frequency domain, i.e. 15 kHz subcarriers for a total of 180 kHz. Reusing the same OFDM numerology as LTE ensures the coexistence performance with LTE in the downlink. Fig. 2 shows the deployment of NB-IoT downlink spectrum with a 10 MHz LTE bandwidth. The PRB right above the DC subcarrier, i.e., PRB 25, is centered at 97.5 kHz (i.e. spacing of 6.5 subcarriers) above the DC subcarrier. Since the LTE DC subcarrier is placed on the 100 kHz raster, the center of PRB#25 is 2.5 kHz from the nearest 100 kHz grid. A spacing between the centers of 2 neighboring a

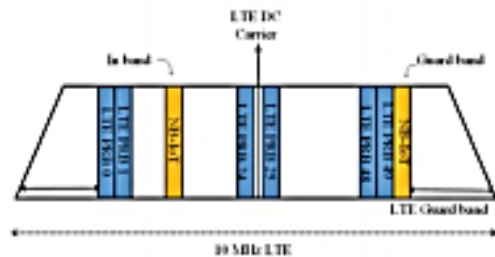


Figure 2. Deployment of NB-IoT downlink spectrum with a 10 MHz LTE bandwidth.

PRBs above the DC subcarrier is 180 kHz. Thus, PRB 30, 35, 40, and 45 are all centered at 2.5 kHz from the nearest 100 kHz grid. It can be shown that for LTE carriers of 10 MHz and 20 MHz, there exists a set of PRB indexes that are all centered at 2.5 kHz from the nearest 100 kHz grid, whereas for LTE carriers of 3 MHz, 5 MHz, and 15 MHz bandwidth, the PRB indexes are centered at least 7.5 kHz away from the 100 kHz raster. Further, an NB-IoT anchor carrier should not be any of the middle 6 PRBs of the LTE carrier (e.g. PRB 25 of 10 MHz LTE, although its center is 2.5 kHz from the nearest 100 kHz raster). This is due to that LTE synchronization and broadcast channels occupying many resource elements in the middle 6 PRBs, making it difficult to use these PRBs for NB-IoT [13].

### B. LPWAN

From the description therein of the literature [14], IEEE 802.15.4k is standard of LPWAN technology, which deployed to the air quality monitoring. In [15], they describe that LPWAN evolved the machine-to-machine (M2M) communicate in the 5G network. The application is mainly used for smart metering or related applications. The LPWAN technologies are promising for the internet of low power, and low throughput things. A very long range of LPWAN enables device to spread and move over large areas. The IoT and M2M devices connected by LPWA can be used at anywhere and anytime to sense and interact with their environment instantly. The research in [15] described that the applications of LPWAN can apply to be an air quality monitoring in real-time based on long range (LoRa) wireless communication. The advantages are long distance, and high coverage area.

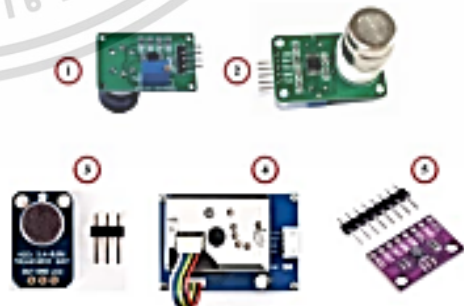


Figure 3. The five types of smart sensor air pollution.

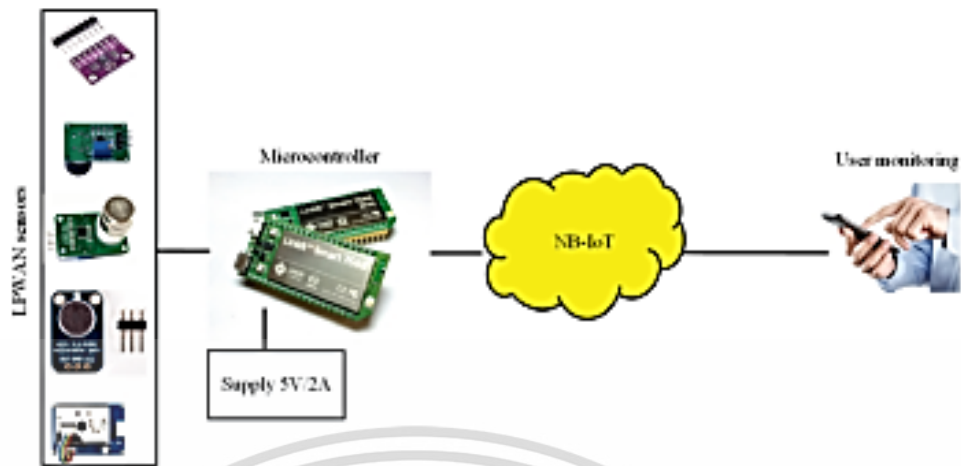


Figure 4. Block diagram of air pollution smart sensors LPWAN via NB-IoT system.

### C. Smart Sensors

Fig 3 shows the five types of the smart sensors as follow: Firstly, ozone sensor ( $O_3$ ). The specification of product consists of size was  $32\text{ mm} \times 22\text{ mm} \times 30\text{ mm}$ , operating voltage at DC 5 V, and the main chip is based on MQ131 gas-detection probe. Secondly, shows noise sensor (dB). This sensor detects the intensity of ambient sound that it can be used in the city, to monitor the sound level parameters. The maximum level detects as 30 to 100 dB. Thirdly, in the Fig.3 shows the carbon dioxide ( $CO_2$ ) sensor module, size as  $32\text{ mm} \times 22\text{ mm} \times 33\text{ mm}$ , the working voltage DC 6 V, and the main chip is based on LM393 gas sensing probe. The maximum sensitivity of  $CO_2$  sensor module is range 0 to 10000 ppm. Fourthly, the particulate matter ( $PM_{10}$ ) or dust sensor is shown, where it is effective to detect very fine particle dust in the air. This model is GP2Y1010AU0F that provides by using the optical sensing system. Finally, fifth, we present the carbon monoxide (CO) sensor module. This model is CJMCU-811 ultra-low power digital gas sensor which integrates a metal-oxide (MOX) gas sensor to detect a wide range of Volatile Organic Compound (VOC) for indoor air quality monitoring with a microcontroller unit (MCU), which includes an analog to digital converter (ADC) and I2C interface. All the proposed smart sensors, the interfaces of data-transmission is controlled by using Linkit smart 7688 microcontroller.

### III. EXPERIMENTAL SETUP AND RESULTS

Fig.4 shows a block diagram of air pollution smart sensors LPWAN via NB-IoT system. The proposed sensor system is controlled by using Linkit Smart 7688 microcontroller. We used the power supply as DC 5V/2A to treat the on board circuit. Then, the data post processing sent to the NB-IoT network via the LTE technology. As the results, the users can monitor by smartphone in the existing of our website.

The measurement location is shown in Fig. 5, where P1 is the location of the Bangkok Yai district, and P2 is in of Pathumwan district, in Bangkok.



Figure 5. Locations of the measurement in field trial.

TABLE I. EXAMPLE OF RESULTS ON OCT. 13, 2017

| Sensor Types                           | Measurement Locations |      |
|--|-----------------------|------|
|  | P1                    | P2   |
| Noise (dB)                             | 42                    | 46   |
| $PM_{10}$ ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) | 80                    | 73   |
| $O_3$ (ppb)                            | 32                    | 42   |
| $CO$ (ppm)                             | 2.95                  | 2.31 |
| $CO_2$ (ppm)                           | 2.68                  | 2.22 |
| AQI                                    | 77                    | 71   |

The AQI is calculated by the pollutant with the highest index [2]-[6].

The measurement data were shown from Oct. 7 to Oct. 13, 2017 both locations and we just show the example measured data of Oct. 13 in Table 1. We claim that the AQI scale is range 0 to 200 that is unhealthy for the people. The range 0 – 50 is good air quality, 51 – 100 is medium, and above is unhealthy. In the results, the graph level is shown in Fig. 6 - 7.

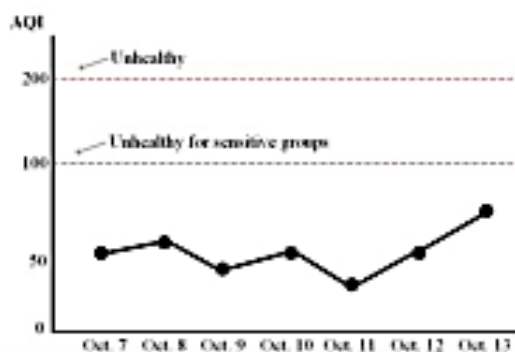


Figure 6. AQI result of P1 location within Oct. 7 to Oct. 13, 2017.

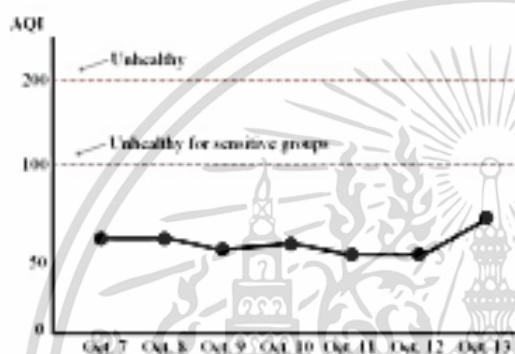


Figure 7. AQI result of P2 location within Oct. 7 to Oct. 13, 2017.

Fig. 6 shows the AQI results at the curve level in each day. We can see that the maximum AQI is Oct. 13, 2017, where the level on Oct. 11 is lowest. The AQI is medium on Oct. 8, Oct. 10, and Oct. 12 respectively. These air quality totally of the P1 zone that there is good air quality. In addition, the AQI of P2 zone as shown in Fig. 7. The calculation of AQI in each day is similar index the location P1. Even though the curve is almost the same, but the AQI of Oct. 11 and Oct. 13 are slightly different. We note that the measurement data was conducted in the afternoon on these days. However, the measurement data from the proposed smart sensors were also calibrated with the standard instrument.

#### IV. CONCLUSION

To protect the air quality from the pollution, the smart sensor is necessary to detect the pollutant index, in particular, in Bangkok Thailand smart city 4.0. In this paper, we have proposed the development of smart sensors LPWAN, in order to monitor the air pollution monitoring data via NB-IoT network for the smart city. The proposed of sensors that includes the particulate matter ( $PM_{10}$ ), carbon monoxide (CO), carbon dioxide ( $CO_2$ ), noise level (dB), and ozone ( $O_3$ ), respectively. Experimental Result, we can show that the AQI level is not above 100, which is secured of location zone for the people.

#### ACKNOWLEDGMENT

This paper is financially supported by the project of the research seed grant for new lecturers, KMUTT research fund.

#### REFERENCES

- [1] M. Postranecky, and M. Svitek, "Smart city near to 4.0-an adaptation of industry 4.0 conception model," in Smart City Symposium Pragas (SCSP), Pragas Czech Republic, May 2017, pp.1-5.
- [2] Pollution Control Department, "Report on a situation of air pollution in Bangkok," Pollution Control Department, Ministry of Natural Resource and Environment, Thailand, Oct. 2016.
- [3] E. Suganya, and S. Vijayarathni, "Smart vehicle monitoring system for air pollution detection using WSN," in International Conference on Communication and Signal Processing, India, April, 2016, pp.719-722.
- [4] G. Ruiz, and C. Andres, "CleanWiFi: The wireless network for air quality monitoring, community internet access and environmental education in smart city," in ITU Kaleidoscope: ICTs for a Sustainable World (ITU WT), Bangkok, Thailand, Nov. 2016, pp.1-6.
- [5] A. Boshriya, W. Boachit, and H. Rivano, "A new WSN deployment approach for air pollution monitoring," in 14<sup>th</sup> IEEE Annual Consumer Communication and Networking Conference (CCNC), NV, USA, Jan. 2017, pp. 455-460.
- [6] K. Grace, G. Devasena, and R. Basaria, "Air pollution analysis using enhanced K-means clustering algorithm for real time sensor data," in IEEE Region 10 Conference (TENCON), Singapore, Nov. 2016, pp.1945-1949.
- [7] T. Khumsongkiet, and E. Boonchong, "Convoting air quality monitoring low cost sensor data to digital value via mobile interface," in 9<sup>th</sup> Biomedical Engineering International Conference (BMEICON), Luang Prabang, Laos, Dec. 2016, pp. 1-5.
- [8] M. Reom, and F. Touato, "Energy neutral design of an IoT system for pollution monitoring," in IEEE Workshop on Environmental, Energy, and Structural Monitoring System (EESMS), Milan, Italy, July 2017, pp. 1-6.
- [9] W. Wang, S. Du, Y. Zhou, X. Huang, and K. Moeamer, "Distributed sensor data computing in smart city applications," in 15<sup>th</sup> IEEE International Symposium on A World of Wireless, Mobile and Multimedia Network (WoWMoM), Macau, China, Jun. 2017, pp. 1-5.
- [10] J. Shah, and B. Mishra, "IoT enabled environmental monitoring system for smart cities," in International Conference on Internet of Things and Applications (IoTA), Pune, India, Jan. 2016, pp. 383-388.
- [11] B. Bezem, S. Latze, F. Leroux, P. Demaoster, T. Coenen, and F. Ballon, "Designing a smart city playground: Real time air quality measurements and visualization in the city of things hubod," in IEEE International Smart Cities Conference (ISC2), Trento, Italy, Sep. 2016, pp. 1-2.
- [12] H. Ali, J. K. Soz, and S. K. Weller, "A real-time ambient air quality monitoring wireless sensor network for schools in smart cities," in IEEE First International Smart Cities Conference (ISC2), Guadalajara, Mexico, Oct. 2015, pp. 1-6.
- [13] Y. D. Boyens, K. Jantti, O. Tirkkonen, K. rutik, S. Traji, A. Larso, T. Tirronen, and J. Toranen, "NB-IoT technology overview and experience from cloud-RAN implementation," IEEE Wireless Communications, vol. 24, 2017, pp. 26-32.
- [14] K. Zhang, S. Zhou, Z. Yang, X. Xiong, and W. Xiang, "Design and implementation of LPWA-based air quality monitoring system," IEEE Access, vol. 4, 2016, pp. 3238-3245.
- [15] U. Kaza, P. Kulkarni, and M. Sooriyabandara, "Low power wide area Networks: An overview," IEEE Communication Surveys and Tutorials, vol. 19, 2017, pp. 855-873.

**IS<sup>C</sup> IT**  
**2018**  
"Communication and IT for Smart City"

**60<sup>th</sup> KMUTNB**  
FUNDING BY GOVERNMENT

**Proceedings of**  
**The 18<sup>th</sup> International Symposium**  
**on Communications and**  
**Information Technologies**

September 26-29, 2018  
at Sukosol Hotel, Bangkok, Thailand

 **KMUTNB**  **ECTI**  
Association  **IEEE**  
THAILAND SECTION  **IEEE**  
Computational  
Intelligence  
Society  
Thailand Chapter



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# A Development on Air Pollution Detection Sensors based on NB-IoT Network for Smart Cities

Sarun Duangsuwan<sup>†</sup>, Aekarong Takarn<sup>††</sup>, and Punyawit Jamjareegulgarn<sup>†</sup>

*Electronic Engineering, Department of Engineering*

*King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Prince of Chumphon Campus*

*<sup>††</sup>Information Engineering, Faculty of Engineering*

*King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang*

sarun.du@kmitl.ac.th<sup>†</sup>, paerx7@windowlive.com<sup>††</sup>, punyawit.ja@kmitl.ac.th<sup>†</sup>

**Abstract**—Currently, air pollution is a big problem for people health in cities that suffered from the more factors such as the traffic, industrial, or forest fire or polluted skies. This paper presents a development of air pollution detection sensors and monitoring for smart city, Thailand 4.0. The development is designed by using five standard sensors such as carbon dioxide: CO, ozone: O<sub>3</sub>, particulate matter: PM<sub>10</sub>, nitrogen dioxide: NO<sub>2</sub>, and sulfur dioxide: SO<sub>2</sub> respectively, and web monitor shows the graph of the air quality index (AQI). To monitor the air quality, the data processing is computed by using Arduino MEGA 2560 and Raspberri Pi 3 to connect with Narrowband Internet of Things (NB-IoT) module network. Experimental setup, the measurement location is examined at Sai Mai District, Bangkok. As the result, we found that the AQI level of measured location is good air quality. We emphasize that the monitoring of air pollution in smart cities is very important.

**Index Terms**—Air pollution, smart sensors, NB-IoT, smart city.

## I. INTRODUCTION

In 2020, air pollution is risking to the people healthy, in particular, Bangkok city that the citizens are increasing rapidly. Not only the increasing of the dense city, but also the growing up of industrials reaching to the demands of marketing. Thailand 4.0 has become a strategic policy that to drive the economy based on digital transformation, where the development people quality and raising the industry sectors. Smart city is a part of the developing of people quality based on IoT network. Presently, the research challenges on smart city are to smart metering, smart water, air quality monitoring, health monitoring, and so on [1]. From a reporting of pollution control department [2], Ministry of Natural Resource and Environment in 2018 found that the air pollution in Bangkok city and Chiang Mai city has been very risked from the particulate matter (PM<sub>2.5</sub>) and ozone (O<sub>3</sub>). Figure 1 shows the reporting news in the Bangkok city and smoke area in Chiang Mai city that suffering from the air pollution.

According to the IoT paradigm, everything and everyone can be connected [3]-[6]. Nowadays, LTE Release 13 has been launched a standardization of new radio access network (RAN) technology that so-called NB-IoT [7]-[10] which has a frequency at 200 kHz carrier. Essentially, NB-IoT has been provided for long battery life, low cost, long coverage, and



Fig. 1: A problem of air pollution in cities, Thailand.

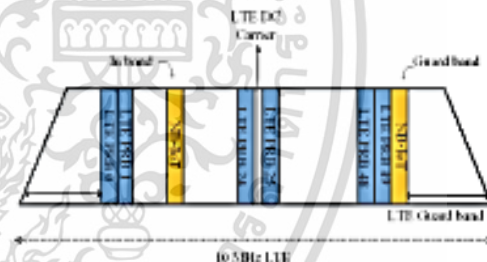


Fig. 2: Deployment of NB-IoT downlink spectrum sensing.

support to a large number of devices. The state of the art overview of the spectrum sensing usage of NB-IoT is shown in Fig. 2.

The existing services for which air quality is focusing in a smart city for monitoring the strength of living, weather monitoring, waste management, traffic management, noise monitoring, parking management, energy consumption, management, and also air quality monitoring is very important. There are several research focusing on the development of sensor technologies in smart city. Literature work on a smart vehicle monitoring system for air pollution detection is shown in [11] by using of wireless sensor network (WSN) for application of environmental monitoring. The sensors were mounted to the vehicle which has more 20 mobile nodes, where the

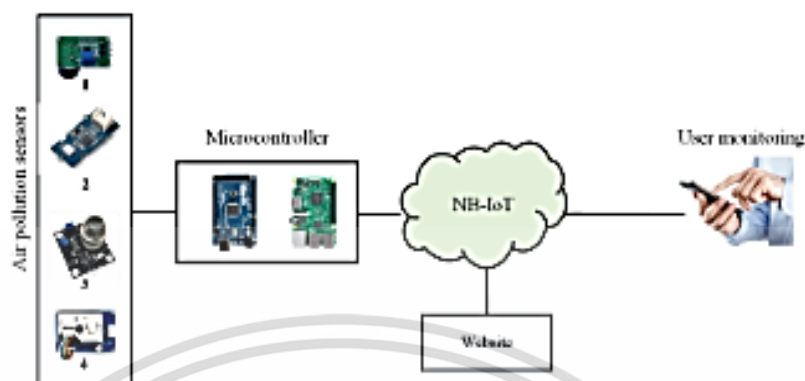


Fig. 3: Block diagram of design and implementation of air pollution detection sensors.

sensors are connected to the smart phone in order to monitor the humidity, temperature, CO, and NO<sub>2</sub>. The luminosity sensor (LDR) and noise sensor (dB) has been presented in [12], interestingly. However, a solution of IoT is focusing on a lower power wide area network (LPWAN), where the design and implementation of LPWAN for air quality monitoring is presented in [13], the architecture of the LPWAN based air quality monitoring is therein as Fig.1. With an area range of a few to tens of kilometers [14] and battery life of long time, LPWA solutions are developing for the IoT, low-cost, low-power, and low-throughput. A very long range of LPWA based on smart chip enables devices to move and spread over large location areas. Normally, the air pollution monitoring station is high cost. Most of researchers have been focused on design and implementation for smart city. The portable sensor in low cost has been presented in [15], evaluating is emphasize. While the forecasting model based on machine learning algorithm is very interesting [16]. HazeEst is a platform of machine learning to estimate air pollution both fixed and mobile station as described in [17]. As well-known that the development of air pollution detection sensor is designed by using WSN as described in [18]-[27].

In this paper, we present a development of the air pollution detection sensors based on NB-IoT for smart cities in Thailand. While the sensors such as carbon monoxide: CO, ozone: O<sub>3</sub>, particulate matter: PM<sub>10</sub>, nitrogen dioxide: NO<sub>2</sub>, and sulfur dioxide: SO<sub>2</sub> is presented in this paper.

The rest of the paper is described as follows: The section II presents the descriptions of design and implementation. Section III mentions to the experimental result, map location, measurement result and AQI evaluated. Finally, the concluded of this paper is drawn.

## II. DESIGN AND IMPLEMENTATION

### A. Sensors Description

Figure 3 shows the five types of the air pollution sensors as following: Firstly, ozone sensor (O<sub>3</sub>). The specification of product size was 32 mm 22 mm 30 mm, operating voltage

at DC 5 V, and the resolution of sensor is 1 ppm to 500 ppm, and interfaced with analog circuit. Secondly, carbon monoxide: CO and nitrogen dioxide: NO<sub>2</sub> sensor. The resolution of CO sensor is 1 ppm to 1000 ppm under DC 5 V, and is 0.05 ppm to 10 ppm for NO<sub>2</sub> sensor by using I<sup>2</sup>C interface. Thirdly, sulfur dioxide: SO<sub>2</sub> sensor module, size as 32 mm 22 mm 33 mm, the working voltage DC 5 V, and the main chip is based on LM393 gas sensing probe with the resolution is 10 ppb to 1 ppm. Fourthly, the particulate matter or dust sensor (PM<sub>10</sub>), (PM<sub>2.5</sub>) and (PM<sub>1</sub>). The resolution of sensor is 0 μg/m<sup>3</sup> to 1000 μg/m<sup>3</sup> and interfaced by using RS232.

### B. Microcontroller

In Fig.3 shows the double microcontroller between Arduino MEGA 2560 and Raspberri Pi 3. The data processing of all sensors are computed by using Arduino MEGA 2560 where ozone sensor (O<sub>3</sub>) is connected to A0, carbon monoxide: CO and nitrogen dioxide: NO<sub>2</sub> sensor are connected to SCL 21 and SCL 20, particulate matter (PM<sub>10</sub>) sensor is connected to TX 18 and TX 19, and sulfur dioxide: SO<sub>2</sub> sensor is connected to A1. After the data processing, the measured results send to the Raspberri Pi 3 for connecting with NB-IoT module.

### C. Website

In order to display the air pollution parameters, we design the web service for the user monitoring as shown in Fig. 3. The web portal shows a user-interface, all sensors status, and analytic result. As the result, the server stores the real-time data in the google firebase on could-computing, runs the analysis models, generates a graph for estimated data, and processing via APIs to real-time applications. The user on side can access a web portal form everywhere that allows users to enter check, AQI where selected with the query result, and other parameters. The AQI graph evaluated is generated on visualization, choose for easily to check, standard as the same with the pollution control department (PCD). The user can use standard HTML of web technologies, based on Javascript, and also applies the power of asynchronous JavaScript and XML

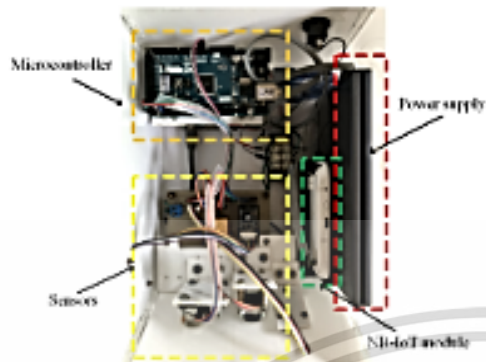


Fig. 4: Air pollution detection sensors platform developing.



Fig. 5: Measurement location in Bangkok.

with PHP server which a scripting to support the maximum data collecting and visualization capabilities.

### III. EXPERIMENTATION

TABLE I: Thailand's Air Quality Index (AQI)

| AQI values | Description    | Colors | Level of Health Concern    |
|------------|----------------|--------|----------------------------|
| 0-50       | Good           | Blue   | no health risk             |
| 51-100     | Moderate       | Green  | no health risk             |
| 101-200    | Unhealthy      | Yellow | Avoid outdoor exercise.    |
| 201-300    | very Unhealthy | Orange | Restrict outdoor exercise. |
| 301-500    | Hazardous      | Red    | Should stay indoors.       |

Pollution Control Department [2]

#### A. Measurement Setup

In Fig. 4 shows the platform developing of air pollution detection sensors, where there are four parts such as power supply, microcontroller, sensors, and NB-IoT module is integrated in box set. The measurement location is shown in Fig. 5 where the area under test is Sai Mai District, Bangkok. The measurement is around 8 hour per day since April 8, 2018 to April 17, 2018 in summer season of Thailand, we confirm that the measurement setup was conducted as follow the standard of the pollution control department.

#### B. Results and Discussion

1) *Ozone  $O_3$  sensor*:  $O_3$  is a natural gas composed of three atoms of oxygen. Normally, good  $O_3$  occurs naturally in the upper 6 miles from the earth. In Fig. 6 (a) shows the air quality monitoring of ozone sensor  $O_3$  on April 8, 2018 to April 17, 2018. As the results, we observe that the minimum of  $O_3$  is approximate 9 ppb level on April 16, 2018. However,  $O_3$  increases to 13 ppb on April 17, 2018. We discuss that this level is no effect for healthy, and the  $O_3$  on these days is good level of monitoring.

2) *Carbon dioxide  $CO$  sensor*:  $CO$  is a poisonous, colorless, odorless, and tasteless gas. Although it has no detectable odor,  $CO$  is often mixed with other gases that do have an odor. Our the result monitoring of  $CO$  sensor is shown in Fig. 6 (b). We found that the  $CO$  level varies between 4 ppm to 7 ppm where the lower than 5 ppm on April 10, 2018, however, it is higher than 5 ppm on the other days. The  $CO$  level monitors as good air quality in this experiment.

3) *Sulfur dioxide  $SO_2$  sensor*:  $SO_2$  is gas sensor with a colorless. This sensor is a liquid when under pressure, and it dissolves in water very easily.  $SO_2$  in the air comes normally from activities such as oil at power plants or from copper smelting and the burning of coal. In nature,  $SO_2$  can be released to the air from volcanic eruptions. In Fig. 6 (c) illustrates the  $SO_2$  gas sensor in measurement location at Sai Mai District, Bangkok. We observe that  $SO_2$  level has a lower than 15 ppb on April 11, 2018 to April 12, 2018 and up to 63 ppb on April 9, 2018.

4) *Nitrogen dioxide  $NO_2$  sensor*:  $NO_2$  is one of a group of highly reactive gases known as oxides of nitrogen.  $NO_2$  is an important air pollutant because it contributes to the formation of photochemical smog, which can have significant impacts on human health. In Fig. 6 (d) illustrates the  $NO_2$  level of air quality monitoring. It can be seen that the maximum of  $NO_2$  level is up to 168 ppb on April 8, 2018, which is close to high the standard of  $NO_2$  level. Nevertheless, it has no effect for healthy.

5) *Particulate matter  $PM_{10}$  sensor*:  $PM_{10}$  is particulate matter 10 micrometers or less in diameter. The Fig. 6 (e) shows the graph of  $PM_{10}$  air pollution monitoring on April 8, 2018 to April 17, 2018. It can be seen that the result of  $PM_{10}$  remains as no effect for healthy, but we found that it is higher than 50 ppm on April 16, 2018. On the same way, the measurement result of  $PM_{10}$  is no effect for healthy level.

6) *AQI*: AQI is calculated for measuring the concentration of pollutants in the air. The increase in AQI increases severe adverse health effects to the large percentage of population. The level zone of AQI can be divided by 5 levels that the detail as shown in Table 1.

The calculation of AQI is written as

$$AQI = \left[ \frac{I_{high} - I_{low}}{C_{high} - C_{low}} \right] \times [C_{high} - C_{low}] + I_{low} \quad (1)$$

where,  $I_{high}$  is the maximum AQI instantaneously and  $I_{low}$  is the minimum AQI instantaneously. The  $C_{high}$  is maximum pollutant of each sensor and  $C_{low}$  is minimum respectively.

## The 18th International Symposium on Communications and Information Technologies (ISCIT 2018)

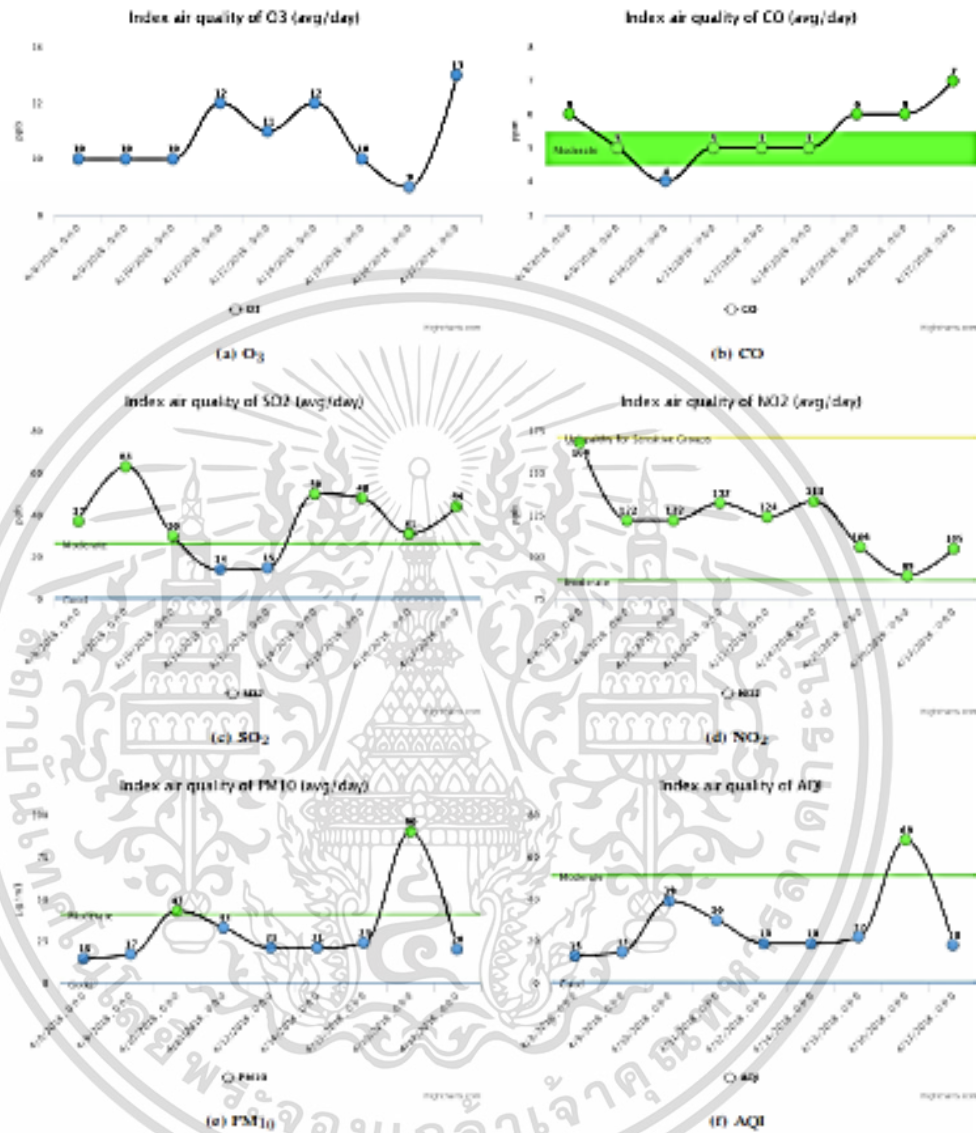


Fig. 6: The results of air pollution measured curves in each sensors.

In Fig. 6 (f) illustrates the AQI from the experimental result sensors. We can see that the air quality of the test days are good level that it has no effect of the air pollution for the people healthy. However, the AQI can be declared in Table 2.

#### IV. CONCLUSION

Air quality is an important problem that directly affects human health. In this paper, we have presented the development of air pollution detection sensors based on the NB-IoT network for smart cities. The system development consists of the air

detection sensors, microcontroller, NB-IoT module, database and web monitoring. The real-time data are monitored such as the carbon dioxide:  $CO$ , ozone:  $O_3$ , particulate matter:  $PM_{10}$ , nitrogen dioxide:  $NO_2$ , and sulfur dioxide:  $SO_2$  in Sai Mai District, Bangkok, Thailand. These sensors consumes little power and are very accurate. Additionally, the data processing is sent via NB-IoT module for air interface with LTE network. For the data processing, the microcontroller is used both Arduino MEGA 2560 and Raspberri Pi 3 in order to sample the data on web of monitoring. Experimental results show that

TABLE II: Summary of AQI levels.

| Date of Test<br>(8 hours per day) | Air Pollution Sensor Types |       |                 |                 |                             | AQI<br>Levels |
|-----------------------------------|----------------------------|-------|-----------------|-----------------|-----------------------------|---------------|
|                                   | O <sub>3</sub>             | CO    | SO <sub>2</sub> | NO <sub>2</sub> | PM <sub>10</sub>            |               |
| April 8, 2018                     | 10 ppb                     | 6 ppm | 37 ppb          | 166 ppb         | 15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ | 13            |
| April 9, 2018                     | 10 ppb                     | 5 ppm | 63 ppb          | 122 ppb         | 17 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ | 15            |
| April 10, 2018                    | 10 ppb                     | 4 ppm | 30 ppb          | 122 ppb         | 43 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ | 39            |
| April 11, 2018                    | 11 ppb                     | 5 ppm | 14 ppb          | 132 ppb         | 33 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ | 30            |
| April 12, 2018                    | 11 ppb                     | 5 ppm | 15 ppb          | 124 ppb         | 21 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ | 19            |
| April 14, 2018                    | 11 ppb                     | 5 ppm | 15 ppb          | 124 ppb         | 21 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ | 19            |
| April 15, 2018                    | 10 ppb                     | 6 ppm | 48 ppb          | 106 ppb         | 24 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ | 22            |
| April 16, 2018                    | 9 ppb                      | 6 ppm | 31 ppb          | 89 ppb          | 90 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ | 68            |
| April 17, 2018                    | 13 ppb                     | 7 ppm | 44 ppb          | 105 ppb         | 20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ | 18            |

Note that no data measurement on April 13, 2018.

the air quality index (AQI) of the measurement location, is good quality for healthy. We realize that the problem of air pollution in smart cities is very important, therefore, the smart multi-sensors detection via NB-IoT network for real-time air pollution monitoring has been developed in this paper.

#### ACKNOWLEDGMENT

This paper is financially supported by the project of the research seed grant for new lecturers, KMITL research fund.

#### REFERENCES

- [1] M. Postranecky, and M. Svitek, Smart city near to 4.0-an adaption of industry 4.0 conception model, in Smart City Symposium Prague (SCSP), Prague Czech Republic, May 2017, pp.1-3.
- [2] Pollution Control Department, Report on a situation of air pollution in Bangkok, Pollution Control Department, Ministry of Natural Resource and Environment, Thailand, Oct. 2016.
- [3] J. Shah, and B. Mishra, IoT enabled environmental monitoring system for smart cities, in International Conference on Internet of Things and Applications (IOTA), Pune, India, Jan. 2017, pp.333-338.
- [4] H-C. Lee, K-H. Ko, Monitoring of large-area IoT sensors using a LoRa wireless mesh network system: design and evaluation, IEEE Trans. on Instrumentation and Measurement, pp. 1-11, Early Access in 2018.
- [5] C. Xianjun, L. Xiangqiong, and X. Feng, IoT based air pollution monitoring and forecasting system, in International Conference on Computer and Computational Sciences (ICCCS), Noida, India, Jan. 2015, pp.257-260.
- [6] M. Koozi, and F. Towati, Energy neutral design of an IoT system for pollution monitoring, in IEEE Workshop on Environmental, Energy, and Structural Monitoring System (EESMS), Milan, Italy, July 2017, pp. 1-6.
- [7] Y-F. E. Wang, X. Lin, A. Adhikary, A. Grovlen, Y. Sui, B. Blankenship, J. Bergman, and H. S. Razaghi, A Primer on 3GPP Narrowband Internet of Things, IEEE Communications Magazine, Vol. 55, No. 3, pp. 117-123, 2017.
- [8] Y. Dagne Beyene, R. Jantli, O. Tiekonen, K. Kuttik, S. Erali, A. Larmo, T. Tironen, and J. Torsner, NB-IoT Technology Overview and Experience from Cloud-RAN Implementation, IEEE Wireless Communications, Vol. 24, No. 3, pp. 26-32, 2017.
- [9] A. Hoglund, X. Lin, O. Liberg, A. Behravan, E. A. Yavuz, M. V. D. Zou, Y. Sui, T. Tironen, A. Katilainen, D. Eriksson, Overview of 3GPP Release 14 Enhanced NB-IoT, IEEE Wireless Communications, Vol. 24, No. 3, pp. 26-32, 2017. IEEE Network, Vol. 31, No. 6, pp. 16-22, 2017.
- [10] J. Xu, J. Yao, L. Wang, Z. Ming, K. Wu, L. Chen, Narrowband Internet of Things: Evolutions, Technologies, and Open Issues, IEEE Internet of Things Journal, Vol. 5, No. 3, pp. 1449-1462, 2018.
- [11] E. Suganya, and S. Vijayakrathi, Smart vehicle monitoring system for air pollution detection using WSN, in International Conference on Communication and Signal Processing, India, April, 2016, pp.719-722.
- [12] B. Sirogza, A. Badril, A. Naution, P. Fahmi, Integrated pollution monitoring system for smart city, in International Conference on ICT For Smart Society (ICISS), Surabaya, Indonesia, 2016, pp.49-52.
- [13] K. Zheng, S. Zhao, Z. Yang, X. Xiong, and W. Xiang, Design and Implementation of LPWA-Based Air Quality Monitoring System, IEEE Access, Vol. 4, pp. 3238-3248, 2016.
- [14] U. Kaza, F. Kulkarni, and M. Sooriyabandara, Low Power Wide Area Networks: An Overview, IEEE Communications Survey and Tutorials, Vol. 19, No. 4, pp. 855 - 873, 2017.
- [15] K. Hu, V. Sivaraman, B. C. Luan, and A. Rahman, Design and evaluation of a metropolitan air pollution sensing system, IEEE Sensors Journal, Vol. 16, No. 5, pp. 1448-1459, 2016.
- [16] K. B. Shaban, A. Kadri, and E. Rozk, Urban air pollution monitoring system with forecasting models, IEEE Sensors Journal, Vol. 16, No. 8, pp. 2593-2606, 2016.
- [17] K. Hu, A. Rahman, and H. Bhurugunda, Vajay Sivaraman Hazard: Machine learning based metropolitan air pollution estimation from fixed and mobile sensors, IEEE Sensors Journal, Vol. 17, No. 11, pp. 3517-3525, 2017.
- [18] A. Boubrima, W. Beackal, and H. Kivano, A new WSN deployment approach for air pollution monitoring, in 14th IEEE Annual Consumer Communication and Networking Conference (CCNC), NV, USA, Jan. 2017, pp. 455-460.
- [19] S. Nagaraj and R. V. Biradar, Applications of wireless sensor networks in the real-time ambient air pollution monitoring and air quality in metropolitan cities: A survey, in International Conference On Smart Technologies For Smart Nation (SmartTechCon), Bangalore, India, Aug. 2017, pp. 1393-1398.
- [20] B. Bathija, S. Srivastava, and B. Mishra, Air pollution monitoring using wireless sensor network, in IEEE International WIE Conference on Electrical and Computer Engineering (WIECON-ECE), Pune, India, Dec. 2016, pp. 112-117.
- [21] M. Prvani and P. Trinatha Rao, Real time pollution monitoring using Wireless Sensor Networks, in IEEE 7th Annual Information Technology, Electronics and Mobile Communication Conference (IEMCON), Vancouver, BC, Canada, Oct. 2016, pp. 1-6.
- [22] T. Fieri and M. P. Michaelides, Air pollution monitoring in Lemosos using a wireless sensor network, in 18th Mediterranean Electrotechnical Conference (MELTECON), Lemosos, Cyprus, Apr. 2016, pp. 1-6.
- [23] A. Boubrima, P. Maltog, W. Bechkt, H. Kivano, and A. Kuz, Optimal deployment of wireless sensor networks for air pollution monitoring, in 24th International Conference on Computer Communication and Networks (ICCCN), Las Vegas, NV, USA, Aug. 2015, pp. 1-7.
- [24] A. Kadri, E. Yaacoub, M. Muehalla, and A. A. Dayya, Wireless sensor network for real-time air pollution monitoring, in 1st International Conference on Communications, Signal Processing, and their Applications (ICCSPA), Sharjah, United Arab Emirates, Feb. 2013, pp. 1-5.
- [25] A. Ouel, S. Kay, F. Agrawal, and N. Chandra, Air pollution detection based on head selection clustering and average method from wireless sensor network, in Second International Conference on Advanced Computing and Communication Technologies, Rohtak, Haryana, India, Jan. 2012, pp. 434-438.
- [26] H. Zhu-gang and C. Cai-hui, The Application of Zigbee Based Wireless Sensor Network and GIS in the Air Pollution Monitoring, in International Conference on Environmental Science and Information Application Technology, Wuhan, China, July 2009, pp. 546-549.
- [27] H. Eren, A. A. Ghamdi, and J. Luo, Application of zigbee for pollution monitoring caused by automobile exhaust gases, in IEEE Sensors Applications Symposium, LA, USA, Feb. 2009, pp. 164-168.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## การทดสอบครั้งที่ 1 (กรณี Without smoke ความสูง 5 เมตร)

| เวลา    | ระยะทาง<br>(m) | AQI                 |                      |      |                   |                    |                    |
|---------|----------------|---------------------|----------------------|------|-------------------|--------------------|--------------------|
|         |                | (PM <sub>10</sub> ) | (PM <sub>2.5</sub> ) | (CO) | (O <sub>3</sub> ) | (NO <sub>2</sub> ) | (SO <sub>2</sub> ) |
| 8:03:01 | 2              | 1                   | 5                    | 40   | 8                 | 11                 | 5                  |
| 8:03:39 | 4              | 2                   | 6                    | 40   | 8                 | 14                 | 3                  |
| 8:03:45 | 6              | 2                   | 7                    | 41   | 8                 | 15                 | 3                  |
| 8:03:49 | 8              | 2                   | 8                    | 39   | 8                 | 16                 | 3                  |
| 8:03:57 | 10             | 2                   | 8                    | 40   | 8                 | 15                 | 3                  |
| 8:04:03 | 12             | 2                   | 10                   | 41   | 8                 | 15                 | 4                  |
| 8:04:07 | 14             | 2                   | 10                   | 41   | 8                 | 16                 | 4                  |
| 8:04:13 | 16             | 2                   | 10                   | 41   | 8                 | 15                 | 4                  |
| 8:04:19 | 18             | 2                   | 10                   | 41   | 8                 | 15                 | 3                  |
| 8:04:29 | 20             | 2                   | 10                   | 40   | 8                 | 17                 | 3                  |

## การทดสอบครั้งที่ 2 (กรณี Without smoke ความสูง 5 เมตร)

| เวลา    | ระยะทาง<br>(m) | AQI                 |                      |      |                   |                    |                    |
|---------|----------------|---------------------|----------------------|------|-------------------|--------------------|--------------------|
|         |                | (PM <sub>10</sub> ) | (PM <sub>2.5</sub> ) | (CO) | (O <sub>3</sub> ) | (NO <sub>2</sub> ) | (SO <sub>2</sub> ) |
| 8:12:21 | 2              | 2                   | 7                    | 40   | 9                 | 14                 | 6                  |
| 8:12:55 | 4              | 1                   | 7                    | 40   | 9                 | 18                 | 2                  |
| 8:13:01 | 6              | 1                   | 8                    | 40   | 8                 | 20                 | 2                  |
| 8:13:05 | 8              | 1                   | 8                    | 41   | 9                 | 20                 | 2                  |
| 8:13:11 | 10             | 1                   | 9                    | 40   | 8                 | 21                 | 3                  |
| 8:13:13 | 12             | 1                   | 8                    | 41   | 9                 | 19                 | 3                  |
| 8:13:15 | 14             | 1                   | 9                    | 41   | 8                 | 21                 | 2                  |
| 8:13:21 | 16             | 1                   | 10                   | 40   | 8                 | 20                 | 2                  |
| 8:13:22 | 18             | 1                   | 10                   | 42   | 8                 | 21                 | 2                  |
| 8:13:25 | 20             | 1                   | 11                   | 39   | 8                 | 22                 | 2                  |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**การทดสอบครั้งที่ 3 (กรณี Without smoke ความสูง 5 เมตร)**

| เวลา    | ระยะทาง<br>(m) | AQI                 |                      |      |                   |                    |                    |
|---------|----------------|---------------------|----------------------|------|-------------------|--------------------|--------------------|
|         |                | (PM <sub>10</sub> ) | (PM <sub>2.5</sub> ) | (CO) | (O <sub>3</sub> ) | (NO <sub>2</sub> ) | (SO <sub>2</sub> ) |
| 8:13:41 | 2              | 1                   | 11                   | 40   | 9                 | 20                 | 6                  |
| 8:13:45 | 4              | 1                   | 10                   | 41   | 9                 | 21                 | 3                  |
| 8:13:47 | 6              | 1                   | 11                   | 41   | 8                 | 21                 | 3                  |
| 8:13:49 | 8              | 1                   | 11                   | 40   | 9                 | 21                 | 2                  |
| 8:13:51 | 10             | 1                   | 11                   | 41   | 8                 | 22                 | 3                  |
| 8:13:53 | 12             | 1                   | 11                   | 41   | 8                 | 21                 | 3                  |
| 8:13:57 | 14             | 1                   | 11                   | 41   | 8                 | 21                 | 3                  |
| 8:13:59 | 16             | 1                   | 11                   | 41   | 8                 | 22                 | 4                  |
| 8:14:02 | 18             | 1                   | 11                   | 41   | 8                 | 23                 | 5                  |
| 8:14:07 | 20             | 1                   | 10                   | 40   | 8                 | 22                 | 5                  |

**การทดสอบครั้งที่ 4 (กรณี Without smoke ความสูง 5 เมตร)**

| เวลา    | ระยะทาง<br>(m) | AQI                 |                      |      |                   |                    |                    |
|---------|----------------|---------------------|----------------------|------|-------------------|--------------------|--------------------|
|         |                | (PM <sub>10</sub> ) | (PM <sub>2.5</sub> ) | (CO) | (O <sub>3</sub> ) | (NO <sub>2</sub> ) | (SO <sub>2</sub> ) |
| 8:23:44 | 2              | 1                   | 7                    | 40   | 8                 | 29                 | 2                  |
| 8:23:46 | 4              | 1                   | 7                    | 40   | 8                 | 31                 | 2                  |
| 8:23:50 | 6              | 1                   | 7                    | 40   | 8                 | 30                 | 3                  |
| 8:23:52 | 8              | 1                   | 7                    | 41   | 8                 | 32                 | 3                  |
| 8:23:54 | 10             | 1                   | 7                    | 40   | 8                 | 32                 | 3                  |
| 8:23:58 | 12             | 1                   | 7                    | 42   | 8                 | 33                 | 3                  |
| 8:24:02 | 14             | 1                   | 7                    | 41   | 8                 | 32                 | 3                  |
| 8:24:04 | 16             | 1                   | 7                    | 41   | 8                 | 32                 | 3                  |
| 8:24:06 | 18             | 1                   | 7                    | 42   | 8                 | 35                 | 3                  |
| 8:24:11 | 20             | 1                   | 7                    | 42   | 8                 | 33                 | 3                  |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทดสอบครั้งที่ 5 (กรณี Without smoke ความสูง 5 เมตร)

| เวลา    | ระยะทาง<br>(m) | AQI                 |                      |      |                   |                    |                    |
|---------|----------------|---------------------|----------------------|------|-------------------|--------------------|--------------------|
|         |                | (PM <sub>10</sub> ) | (PM <sub>2.5</sub> ) | (CO) | (O <sub>3</sub> ) | (NO <sub>2</sub> ) | (SO <sub>2</sub> ) |
| 8:24:22 | 2              | 1                   | 7                    | 41   | 8                 | 32                 | 4                  |
| 8:24:24 | 4              | 1                   | 8                    | 41   | 8                 | 34                 | 4                  |
| 8:24:26 | 6              | 1                   | 7                    | 41   | 8                 | 34                 | 4                  |
| 8:24:28 | 8              | 1                   | 9                    | 41   | 8                 | 33                 | 4                  |
| 8:24:30 | 10             | 1                   | 10                   | 41   | 8                 | 32                 | 4                  |
| 8:24:32 | 12             | 1                   | 9                    | 41   | 8                 | 33                 | 3                  |
| 8:24:34 | 14             | 1                   | 10                   | 41   | 8                 | 30                 | 3                  |
| 8:24:36 | 16             | 1                   | 7                    | 41   | 8                 | 22                 | 3                  |
| 8:24:40 | 18             | 1                   | 6                    | 41   | 8                 | 23                 | 3                  |
| 8:24:42 | 20             | 1                   | 10                   | 42   | 8                 | 25                 | 3                  |

การทดสอบครั้งที่ 1 (กรณี Without smoke ความสูง 10 เมตร)

| เวลา    | ระยะทาง<br>(m) | AQI                 |                      |      |                   |                    |                    |
|---------|----------------|---------------------|----------------------|------|-------------------|--------------------|--------------------|
|         |                | (PM <sub>10</sub> ) | (PM <sub>2.5</sub> ) | (CO) | (O <sub>3</sub> ) | (NO <sub>2</sub> ) | (SO <sub>2</sub> ) |
| 8:31:40 | 2              | 0                   | 2                    | 41   | 8                 | 32                 | 3                  |
| 8:31:43 | 4              | 0                   | 3                    | 41   | 8                 | 35                 | 2                  |
| 8:31:46 | 6              | 0                   | 2                    | 41   | 8                 | 34                 | 2                  |
| 8:31:48 | 8              | 0                   | 2                    | 41   | 8                 | 35                 | 2                  |
| 8:31:53 | 10             | 0                   | 4                    | 40   | 8                 | 37                 | 3                  |
| 8:31:56 | 12             | 0                   | 5                    | 39   | 8                 | 35                 | 2                  |
| 8:31:58 | 14             | 0                   | 5                    | 40   | 8                 | 38                 | 2                  |
| 8:31:58 | 16             | 0                   | 5                    | 40   | 8                 | 38                 | 2                  |
| 8:32:01 | 18             | 0                   | 3                    | 40   | 8                 | 38                 | 2                  |
| 8:32:04 | 20             | 1                   | 6                    | 41   | 8                 | 38                 | 2                  |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทดสอบครั้งที่ 2 (กรณี Without smoke ความสูง 10 เมตร)

| เวลา    | ระยะทาง<br>(m) | AQI                 |                      |      |                   |                    |                    |
|---------|----------------|---------------------|----------------------|------|-------------------|--------------------|--------------------|
|         |                | (PM <sub>10</sub> ) | (PM <sub>2.5</sub> ) | (CO) | (O <sub>3</sub> ) | (NO <sub>2</sub> ) | (SO <sub>2</sub> ) |
| 8:32:14 | 2              | 1                   | 8                    | 41   | 8                 | 39                 | 2                  |
| 8:32:16 | 4              | 1                   | 6                    | 41   | 8                 | 41                 | 3                  |
| 8:32:22 | 6              | 1                   | 8                    | 41   | 8                 | 40                 | 3                  |
| 8:32:24 | 8              | 1                   | 8                    | 42   | 8                 | 37                 | 4                  |
| 8:32:26 | 10             | 1                   | 7                    | 41   | 8                 | 40                 | 4                  |
| 8:32:28 | 12             | 1                   | 7                    | 41   | 8                 | 39                 | 3                  |
| 8:32:30 | 14             | 1                   | 7                    | 41   | 8                 | 39                 | 3                  |
| 8:32:32 | 16             | 1                   | 7                    | 41   | 8                 | 41                 | 3                  |
| 8:32:34 | 18             | 1                   | 7                    | 40   | 8                 | 41                 | 3                  |
| 8:32:38 | 20             | 1                   | 7                    | 40   | 8                 | 44                 | 3                  |

การทดสอบครั้งที่ 3 (กรณี Without smoke ความสูง 10 เมตร)

| เวลา    | ระยะทาง<br>(m) | AQI                 |                      |      |                   |                    |                    |
|---------|----------------|---------------------|----------------------|------|-------------------|--------------------|--------------------|
|         |                | (PM <sub>10</sub> ) | (PM <sub>2.5</sub> ) | (CO) | (O <sub>3</sub> ) | (NO <sub>2</sub> ) | (SO <sub>2</sub> ) |
| 8:32:52 | 2              | 1                   | 8                    | 41   | 8                 | 41                 | 3                  |
| 8:32:55 | 4              | 1                   | 10                   | 41   | 8                 | 39                 | 3                  |
| 8:32:58 | 6              | 1                   | 11                   | 42   | 8                 | 34                 | 3                  |
| 8:33:00 | 8              | 1                   | 12                   | 41   | 8                 | 39                 | 3                  |
| 8:33:02 | 10             | 1                   | 8                    | 42   | 8                 | 41                 | 3                  |
| 8:33:06 | 12             | 1                   | 8                    | 41   | 8                 | 41                 | 3                  |
| 8:33:08 | 14             | 1                   | 8                    | 41   | 8                 | 42                 | 3                  |
| 8:33:12 | 16             | 1                   | 10                   | 41   | 8                 | 43                 | 3                  |
| 8:33:14 | 18             | 1                   | 8                    | 40   | 8                 | 43                 | 4                  |
| 8:33:16 | 20             | 1                   | 7                    | 41   | 8                 | 43                 | 3                  |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทดสอบครั้งที่ 4 (กรณี Without smoke ความสูง 10 เมตร)

| เวลา    | ระยะทาง<br>(m) | AQI                 |                      |      |                   |                    |                    |
|---------|----------------|---------------------|----------------------|------|-------------------|--------------------|--------------------|
|         |                | (PM <sub>10</sub> ) | (PM <sub>2.5</sub> ) | (CO) | (O <sub>3</sub> ) | (NO <sub>2</sub> ) | (SO <sub>2</sub> ) |
| 8:33:28 | 2              | 1                   | 8                    | 41   | 8                 | 39                 | 4                  |
| 8:33:30 | 4              | 1                   | 7                    | 41   | 8                 | 39                 | 3                  |
| 8:33:32 | 6              | 1                   | 8                    | 41   | 8                 | 41                 | 3                  |
| 8:33:34 | 8              | 1                   | 8                    | 42   | 8                 | 41                 | 3                  |
| 8:33:36 | 10             | 1                   | 8                    | 42   | 8                 | 43                 | 4                  |
| 8:33:40 | 12             | 1                   | 8                    | 41   | 8                 | 42                 | 4                  |
| 8:33:44 | 14             | 1                   | 10                   | 42   | 8                 | 45                 | 3                  |
| 8:33:45 | 16             | 1                   | 8                    | 42   | 8                 | 40                 | 3                  |
| 8:33:47 | 18             | 1                   | 8                    | 42   | 8                 | 41                 | 3                  |
| 8:33:49 | 20             | 1                   | 8                    | 42   | 8                 | 42                 | 3                  |

การทดสอบครั้งที่ 5 (กรณี Without smoke ความสูง 10 เมตร)

| เวลา    | ระยะทาง<br>(m) | AQI                 |                      |      |                   |                    |                    |
|---------|----------------|---------------------|----------------------|------|-------------------|--------------------|--------------------|
|         |                | (PM <sub>10</sub> ) | (PM <sub>2.5</sub> ) | (CO) | (O <sub>3</sub> ) | (NO <sub>2</sub> ) | (SO <sub>2</sub> ) |
| 8:33:59 | 2              | 1                   | 10                   | 41   | 8                 | 42                 | 3                  |
| 8:34:01 | 4              | 1                   | 11                   | 40   | 8                 | 43                 | 3                  |
| 8:34:03 | 6              | 1                   | 10                   | 41   | 8                 | 43                 | 3                  |
| 8:34:07 | 8              | 1                   | 12                   | 41   | 8                 | 39                 | 3                  |
| 8:34:09 | 10             | 1                   | 8                    | 40   | 8                 | 40                 | 3                  |
| 8:34:11 | 12             | 1                   | 10                   | 41   | 8                 | 41                 | 4                  |
| 8:34:13 | 14             | 1                   | 10                   | 42   | 8                 | 41                 | 4                  |
| 8:34:21 | 16             | 1                   | 11                   | 41   | 8                 | 38                 | 3                  |
| 8:34:25 | 18             | 1                   | 12                   | 42   | 8                 | 41                 | 4                  |
| 8:34:31 | 20             | 1                   | 14                   | 41   | 8                 | 44                 | 3                  |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## การทดสอบครั้งที่ 1 (กรณี With smoke ความสูง 5 เมตร)

| เวลา    | ระยะทาง<br>(m) | AQI                 |                      |      |                   |                    |                    |
|---------|----------------|---------------------|----------------------|------|-------------------|--------------------|--------------------|
|         |                | (PM <sub>10</sub> ) | (PM <sub>2.5</sub> ) | (CO) | (O <sub>3</sub> ) | (NO <sub>2</sub> ) | (SO <sub>2</sub> ) |
| 9:45:36 | 2              | 2                   | 4                    | 42   | 7                 | 22                 | 5                  |
| 9:45:38 | 4              | 2                   | 5                    | 42   | 7                 | 22                 | 5                  |
| 9:45:40 | 6              | 10                  | 35                   | 41   | 7                 | 22                 | 4                  |
| 9:45:42 | 8              | 321                 | 221                  | 46   | 7                 | 22                 | 5                  |
| 9:45:48 | 10             | 390                 | 238                  | 44   | 7                 | 23                 | 5                  |
| 9:45:50 | 12             | 231                 | 246                  | 41   | 7                 | 23                 | 5                  |
| 9:45:52 | 14             | 109                 | 50                   | 44   | 7                 | 22                 | 6                  |
| 9:45:54 | 16             | 197                 | 15                   | 42   | 7                 | 23                 | 6                  |
| 9:45:56 | 18             | 97                  | 9                    | 42   | 7                 | 23                 | 6                  |
| 9:46:02 | 20             | 13                  | 8                    | 41   | 7                 | 24                 | 8                  |

## การทดสอบครั้งที่ 2 (กรณี With smoke ความสูง 5 เมตร)

| เวลา    | ระยะทาง<br>(m) | AQI                 |                      |      |                   |                    |                    |
|---------|----------------|---------------------|----------------------|------|-------------------|--------------------|--------------------|
|         |                | (PM <sub>10</sub> ) | (PM <sub>2.5</sub> ) | (CO) | (O <sub>3</sub> ) | (NO <sub>2</sub> ) | (SO <sub>2</sub> ) |
| 9:52:03 | 2              | 3                   | 8                    | 34   | 8                 | 4                  | 15                 |
| 9:52:05 | 4              | 7                   | 9                    | 32   | 7                 | 4                  | 16                 |
| 9:52:07 | 6              | 26                  | 8                    | 34   | 8                 | 4                  | 18                 |
| 9:52:09 | 8              | 99                  | 19                   | 34   | 8                 | 4                  | 19                 |
| 9:52:11 | 10             | 143                 | 19                   | 34   | 8                 | 4                  | 20                 |
| 9:52:13 | 12             | 126                 | 67                   | 34   | 8                 | 4                  | 20                 |
| 9:52:15 | 14             | 64                  | 67                   | 34   | 7                 | 4                  | 20                 |
| 9:53:09 | 16             | 126                 | 76                   | 65   | 8                 | 4                  | 17                 |
| 9:53:21 | 18             | 367                 | 234                  | 67   | 8                 | 4                  | 16                 |
| 9:53:25 | 20             | 48                  | 253                  | 36   | 8                 | 4                  | 16                 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## การทดสอบครั้งที่ 3 (กรณี With smoke ความสูง 5 เมตร)

| เวลา    | ระยะทาง<br>(m) | AQI                 |                      |      |                   |                    |                    |
|---------|----------------|---------------------|----------------------|------|-------------------|--------------------|--------------------|
|         |                | (PM <sub>10</sub> ) | (PM <sub>2.5</sub> ) | (CO) | (O <sub>3</sub> ) | (NO <sub>2</sub> ) | (SO <sub>2</sub> ) |
| 9:54:57 | 2              | 23                  | 13                   | 34   | 8                 | 4                  | 19                 |
| 9:54:59 | 4              | 80                  | 570                  | 35   | 8                 | 4                  | 20                 |
| 9:55:01 | 6              | 131                 | 50                   | 35   | 7                 | 4                  | 20                 |
| 9:55:03 | 8              | 64                  | 51                   | 35   | 8                 | 4                  | 21                 |
| 9:55:05 | 10             | 28                  | 100                  | 36   | 8                 | 4                  | 20                 |
| 9:55:25 | 12             | 43                  | 50                   | 35   | 8                 | 4                  | 20                 |
| 9:55:27 | 14             | 155                 | 51                   | 49   | 8                 | 4                  | 19                 |
| 9:55:33 | 16             | 272                 | 384                  | 51   | 8                 | 4                  | 16                 |
| 9:55:37 | 18             | 229                 | 284                  | 36   | 8                 | 4                  | 16                 |
| 9:55:41 | 20             | 33                  | 319                  | 36   | 8                 | 4                  | 15                 |

## การทดสอบครั้งที่ 4 (กรณี With smoke ความสูง 5 เมตร)

| เวลา     | ระยะทาง<br>(m) | AQI                 |                      |      |                   |                    |                    |
|----------|----------------|---------------------|----------------------|------|-------------------|--------------------|--------------------|
|          |                | (PM <sub>10</sub> ) | (PM <sub>2.5</sub> ) | (CO) | (O <sub>3</sub> ) | (NO <sub>2</sub> ) | (SO <sub>2</sub> ) |
| 10:04:37 | 2              | 1                   | 5                    | 39   | 7                 | 35                 | 5                  |
| 10:04:39 | 4              | 109                 | 216                  | 40   | 7                 | 35                 | 5                  |
| 10:04:44 | 6              | 384                 | 289                  | 40   | 7                 | 36                 | 9                  |
| 10:04:45 | 8              | 82                  | 289                  | 40   | 7                 | 37                 | 11                 |
| 10:04:47 | 10             | 95                  | 7                    | 45   | 7                 | 37                 | 13                 |
| 10:04:49 | 12             | 485                 | 8                    | 31   | 7                 | 37                 | 15                 |
| 10:04:51 | 14             | 300                 | 5                    | 31   | 8                 | 42                 | 14                 |
| 10:04:53 | 16             | 214                 | 7                    | 26   | 8                 | 44                 | 13                 |
| 10:04:57 | 18             | 31                  | 8                    | 29   | 8                 | 45                 | 11                 |
| 10:04:59 | 20             | 21                  | 8                    | 29   | 8                 | 42                 | 10                 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## การทดสอบครั้งที่ 5 (กรณี With smoke ความสูง 5 เมตร)

| เวลา     | ระยะทาง<br>(m) | AQI                 |                      |      |                   |                    |                    |
|----------|----------------|---------------------|----------------------|------|-------------------|--------------------|--------------------|
|          |                | (PM <sub>10</sub> ) | (PM <sub>2.5</sub> ) | (CO) | (O <sub>3</sub> ) | (NO <sub>2</sub> ) | (SO <sub>2</sub> ) |
| 10:05:07 | 2              | 2                   | 289                  | 26   | 7                 | 39                 | 12                 |
| 10:05:09 | 4              | 2                   | 289                  | 31   | 7                 | 40                 | 12                 |
| 10:05:11 | 6              | 2                   | 7                    | 31   | 7                 | 43                 | 11                 |
| 10:05:13 | 8              | 2                   | 6                    | 30   | 7                 | 40                 | 9                  |
| 10:05:15 | 10             | 2                   | 6                    | 31   | 7                 | 43                 | 9                  |
| 10:05:17 | 12             | 2                   | 6                    | 26   | 7                 | 48                 | 10                 |
| 10:05:21 | 14             | 1                   | 6                    | 32   | 7                 | 43                 | 9                  |
| 10:05:23 | 16             | 1                   | 6                    | 32   | 7                 | 44                 | 9                  |
| 10:05:27 | 18             | 1                   | 6                    | 34   | 7                 | 44                 | 10                 |
| 10:05:29 | 20             | 1                   | 6                    | 34   | 7                 | 43                 | 11                 |

## การทดสอบครั้งที่ 1 (กรณี With smoke ความสูง 10 เมตร)

| เวลา     | ระยะทาง<br>(m) | AQI                 |                      |      |                   |                    |                    |
|----------|----------------|---------------------|----------------------|------|-------------------|--------------------|--------------------|
|          |                | (PM <sub>10</sub> ) | (PM <sub>2.5</sub> ) | (CO) | (O <sub>3</sub> ) | (NO <sub>2</sub> ) | (SO <sub>2</sub> ) |
| 10.10.40 | 2              | 1                   | 4                    | 30   | 6                 | 45                 | 4                  |
| 10.10.44 | 4              | 1                   | 5                    | 31   | 6                 | 47                 | 3                  |
| 10.10.46 | 6              | 1                   | 232                  | 31   | 7                 | 50                 | 3                  |
| 10.10.50 | 8              | 1                   | 240                  | 31   | 7                 | 48                 | 3                  |
| 10.10.54 | 10             | 1                   | 240                  | 31   | 7                 | 48                 | 3                  |
| 10.10.54 | 12             | 215                 | 240                  | 110  | 6                 | 45                 | 3                  |
| 10.10.56 | 14             | 685                 | 129                  | 86   | 7                 | 34                 | 9                  |
| 10.10.58 | 16             | 711                 | 195                  | 45   | 7                 | 27                 | 9                  |
| 10.11.00 | 18             | 510                 | 269                  | 34   | 7                 | 27                 | 9                  |
| 10.11.02 | 20             | 215                 | 260                  | 32   | 7                 | 31                 | 10                 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## การทดสอบครั้งที่ 2 (กรณี With smoke ความสูง 10 เมตร)

| เวลา     | ระยะทาง<br>(m) | AQI                 |                      |      |                   |                    |                    |
|----------|----------------|---------------------|----------------------|------|-------------------|--------------------|--------------------|
|          |                | (PM <sub>10</sub> ) | (PM <sub>2.5</sub> ) | (CO) | (O <sub>3</sub> ) | (NO <sub>2</sub> ) | (SO <sub>2</sub> ) |
| 10.11.36 | 2              | 235                 | 240                  | 36   | 7                 | 35                 | 13                 |
| 10.11.38 | 4              | 416                 | 129                  | 35   | 7                 | 37                 | 14                 |
| 10.11.40 | 6              | 406                 | 195                  | 32   | 7                 | 35                 | 15                 |
| 10.11.42 | 8              | 297                 | 269                  | 34   | 7                 | 35                 | 17                 |
| 10.11.44 | 10             | 219                 | 260                  | 32   | 7                 | 38                 | 19                 |
| 10.11.47 | 12             | 161                 | 773                  | 40   | 7                 | 36                 | 22                 |
| 10.11.49 | 14             | 91                  | 636                  | 35   | 7                 | 37                 | 22                 |
| 10.11.51 | 16             | 29                  | 84                   | 35   | 7                 | 37                 | 22                 |
| 10.11.54 | 18             | 13                  | 159                  | 32   | 7                 | 39                 | 21                 |
| 10.11.55 | 20             | 19                  | 180                  | 34   | 7                 | 37                 | 21                 |

## การทดสอบครั้งที่ 3 (กรณี With smoke ความสูง 10 เมตร)

| เวลา     | ระยะทาง<br>(m) | AQI                 |                      |      |                   |                    |                    |
|----------|----------------|---------------------|----------------------|------|-------------------|--------------------|--------------------|
|          |                | (PM <sub>10</sub> ) | (PM <sub>2.5</sub> ) | (CO) | (O <sub>3</sub> ) | (NO <sub>2</sub> ) | (SO <sub>2</sub> ) |
| 10.12.18 | 2              | 25                  | 159                  | 44   | 7                 | 31                 | 20                 |
| 10.12.20 | 4              | 59                  | 458                  | 39   | 7                 | 29                 | 21                 |
| 10.12.23 | 6              | 141                 | 505                  | 36   | 7                 | 28                 | 22                 |
| 10.12.25 | 8              | 245                 | 201                  | 35   | 7                 | 30                 | 22                 |
| 10.12.27 | 10             | 200                 | 76                   | 32   | 7                 | 35                 | 23                 |
| 10.12.30 | 12             | 168                 | 11                   | 34   | 7                 | 33                 | 23                 |
| 10.12.32 | 14             | 108                 | 4                    | 34   | 7                 | 33                 | 22                 |
| 10.12.35 | 16             | 48                  | 4                    | 32   | 7                 | 35                 | 22                 |
| 10.12.38 | 18             | 43                  | 6                    | 32   | 7                 | 35                 | 20                 |
| 10.12.39 | 20             | 215                 | 6                    | 32   | 7                 | 35                 | 21                 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## การทดสอบครั้งที่ 4 (กรณี With smoke ความสูง 10 เมตร)

| เวลา     | ระยะทาง<br>(m) | AQI                 |                      |      |                   |                    |                    |
|----------|----------------|---------------------|----------------------|------|-------------------|--------------------|--------------------|
|          |                | (PM <sub>10</sub> ) | (PM <sub>2.5</sub> ) | (CO) | (O <sub>3</sub> ) | (NO <sub>2</sub> ) | (SO <sub>2</sub> ) |
| 10.12.58 | 2              | 25                  | 84                   | 34   | 7                 | 38                 | 18                 |
| 10.13.1  | 4              | 59                  | 159                  | 35   | 7                 | 37                 | 16                 |
| 10.13.3  | 6              | 141                 | 458                  | 42   | 7                 | 36                 | 18                 |
| 10.13.4  | 8              | 245                 | 500                  | 37   | 7                 | 35                 | 18                 |
| 10.13.6  | 10             | 200                 | 201                  | 35   | 7                 | 35                 | 19                 |
| 10.13.8  | 12             | 168                 | 76                   | 35   | 7                 | 33                 | 19                 |
| 10.13.11 | 14             | 108                 | 11                   | 34   | 7                 | 35                 | 19                 |
| 10.13.13 | 16             | 48                  | 6                    | 34   | 7                 | 32                 | 22                 |
| 10.13.16 | 18             | 43                  | 8                    | 32   | 7                 | 36                 | 24                 |
| 10.13.19 | 20             | 215                 | 8                    | 30   | 7                 | 31                 | 28                 |

## การทดสอบครั้งที่ 5 (กรณี With smoke ความสูง 10 เมตร)

| เวลา     | ระยะทาง<br>(m) | AQI                 |                      |      |                   |                    |                    |
|----------|----------------|---------------------|----------------------|------|-------------------|--------------------|--------------------|
|          |                | (PM <sub>10</sub> ) | (PM <sub>2.5</sub> ) | (CO) | (O <sub>3</sub> ) | (NO <sub>2</sub> ) | (SO <sub>2</sub> ) |
| 10.13.32 | 2              | 4                   | 240                  | 29   | 7                 | 32                 | 26                 |
| 10.13.35 | 4              | 3                   | 238                  | 31   | 6                 | 32                 | 26                 |
| 10.13.38 | 6              | 2                   | 129                  | 31   | 7                 | 33                 | 25                 |
| 10.13.41 | 8              | 2                   | 230                  | 32   | 7                 | 31                 | 27                 |
| 10.13.43 | 10             | 2                   | 269                  | 32   | 7                 | 31                 | 27                 |
| 10.13.46 | 12             | 2                   | 268                  | 34   | 7                 | 31                 | 26                 |
| 10.13.48 | 14             | 2                   | 260                  | 32   | 7                 | 31                 | 25                 |
| 10.13.50 | 16             | 2                   | 131                  | 31   | 7                 | 31                 | 24                 |
| 10.13.52 | 18             | 2                   | 646                  | 32   | 7                 | 31                 | 23                 |
| 10.13.54 | 20             | 2                   | 665                  | 31   | 7                 | 31                 | 22                 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก ค

สรุปค่าใช้จ่ายการดำเนินงานโครงการวิจัย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สรุปค่าใช้จ่ายการดำเนินงานโครงการวิจัย

**ชื่อโครงการ** การศึกษาและพัฒนาอากาศยานไร้คนขับเพื่อตรวจวัดปริมาณมลพิษทางอากาศสำหรับสภาวะแวดล้อมเมืองอัจฉริยะและพื้นที่เสี่ยงอันตราย

A study and development of UAV air pollution monitoring for smart city and risk area environment

### รายงานความก้าวหน้าของโครงการในรอบ 12 เดือน

**ชื่อหัวหน้าโครงการวิจัย ผู้รับทุน** ดร.ศรัญญา ดวงสุวรรณ

รายงานในช่วงตั้งแต่วันที่ 1 มิถุนายน พ.ศ 2561 ถึงวันที่ 30 มิถุนายน พ.ศ 2562

สรุปงบประมาณค่าใช้จ่ายที่ใช้นับตั้งแต่เริ่มทำการวิจัยถึงปัจจุบัน

| หมวดค่าใช้จ่าย<br>งบดำเนินการ | งบประมาณรวมทั้ง<br>โครงการ | ค่าใช้จ่ายงวด<br>ปัจจุบัน | รวมค่าใช้จ่ายสะสม<br>ถึงปัจจุบัน | คงเหลือ      |
|-------------------------------|----------------------------|---------------------------|----------------------------------|--------------|
| 1. ค่าใช้สอย                  | 50,000                     | 45,000                    | 45,000                           | -            |
| 2. ค่าวัสดุ                   | 50,000                     | 50,000                    | 50,000                           | -            |
| <b>รวม</b>                    | <b>100,000</b>             | <b>95,000</b>             | <b>95,000</b>                    | <b>5,000</b> |

จำนวนเงินที่ได้รับและจำนวนเงินที่ใช้จ่าย

| งวดเงินที่ได้รับ | จำนวนเงินที่ได้รับ (บาท) | เมื่อ (ระบุวัน เดือน ปี) |
|------------------|--------------------------|--------------------------|
| งวดที่ 1         | 95,000                   | 12 มกราคม 2561           |
| ดอกเบี้ย         | 0.48                     | 25 ธันวาคม 2560          |
| <b>รวม</b>       | <b>95,000.48</b>         | <b>A</b>                 |

| งวดที่     | จำนวนเงินที่ใช้จ่าย (บาท) |          |
|------------|---------------------------|----------|
| งวดที่ 1   | 94,840                    |          |
| <b>รวม</b> | <b>94,840</b>             | <b>B</b> |

จำนวนเงินคงเหลือ A – B = 160.48 บาท

ลงนามหัวหน้าโครงการวิจัยผู้รับทุน ลงนามเจ้าหน้าที่การเงิน  
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ประวัตินักวิจัย

### นักวิจัย (หัวหน้าโครงการวิจัย)

1. ชื่อ - นามสกุล (ภาษาไทย) นายศรัณู ดวงสุวรรณ

ชื่อ - นามสกุล (อังกฤษ) Mr. Sarun Duangsuwan

2. ตำแหน่งปัจจุบัน อาจารย์ประจำ

3. เลขบัตรประชาชน 18599-00010-27-3

4. หน่วยงานและสถานที่อยู่ที่ติดต่อได้ หมายเลขโทรศัพท์ และอีเมลล์

สาขาวิศวกรรมสารสนเทศ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพรฯ

17/1 ต.ชุมโค อ.ปะทิว จ.ชุมพร 86160 มือถือ 099-1864411 อีเมลล์: sarun.du@kmitl.ac.th

5. ประวัติการศึกษา

| ชื่อย่อปริญญา | สาขา             | สถาบันที่จบ | ปีที่จบ |
|---------------|------------------|-------------|---------|
| วศ.ค          | วิศวกรรมไฟฟ้า    | สจล.        | 2558    |
| วศ.ม          | วิศวกรรมสารสนเทศ | สจล.        | 2553    |
| วศ.บ          | วิศวกรรมสารสนเทศ | สจล.        | 2551    |

6. สาขาวิจัยที่มีความชำนาญพิเศษ

1. เทคโนโลยีการสื่อสารไร้สาย IoT, LoRa, RFID, Zigbee

2. การออกแบบอากาศยานไร้คนขับหรือโดรน

7. รางวัลด้านวิชาการ/ด้านวิจัย/งานสร้างสรรค์

Best presentation award of Informatic in National Conference of IAMBEST 2019.

Best paper award in Thailand-Japan Microwave (TJMW) 2013.

Best presentation award in Thailand-Japan Microwave (TJMW) 2011.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 8. ทุนการศึกษาและทุนวิจัยที่เคยได้รับ

1. ทุนวิจัยเริ่มต้นสำหรับอาจารย์ใหม่ กองทุนวิจัย สจล. งบประมาณ 2561
2. ทุนปริญญาเอก Doctoral scholarship from National Broadcast Telecommunication Commission (NBTC) in 2010

## 9. ผลงานวิจัย (ระดับชาติและนานาชาติ)

1. **S. Duangsuwan** and P. Jamjareegulgarn, “Development of drone real-time air pollution monitoring (Dr-TAPM) for mobile smart sensing in poor accessibility,” Sensors and Materials, in 2019 (submitted)
2. **S. Duangsuwan** and C. Teekapakvisit, “High performance detection using three different weight blind algorithms in ZF receivers or uplink multi-user massive MIMO in 5G wireless communications,” Journal of Communications, vol. 13, no. 9, pp. 1-6, Sep. 2018.
3. **S. Duangsuwan**, P. Supunakoon, and S. Promwong, “Quantitative measurement of path loss adaptation using least squares method in an urban DVB-T2 system,” International Journal of Antennas and Propagations, vol. 2018, pp. 1-9, May 2018.
4. **S. Duangsuwan** and S. Promwong, “ISI cancellation using blind equalizer based on DBC model for MIMO-RFID reader reception,” Radioengineering Journal, vol. 24, No. 1, Apr. 2015.
5. **S. Duangsuwan** and S. Promwong, “Indoor multipath interference cancellation using MMSE-CMA estimator with 2.45 GHz of MIMO channel measurement,” Advance Materials and Mechanics (AMM), vol. 781, No. 89, Aug. 2015.
6. **S. Duangsuwan** and S. Promwong, “Performance Weighted of CMA Algorithm Based on MIMO Channel Measurement for 2.45 GHz Wireless RFID System,” Advance Materials and Mechanics (AMM), vol. 781, No. 20, Aug. 2015.
7. **S. Duangsuwan**, “RFID Reader Receiver Using Blind Signal Estimation for Multiuser Detection,” International Journal of Information and Electronics Engineering (IJIEE), vol. 4, no. 425, Jan. 2014.

8. C. Teekapakvisit and **S. Duangsuwan**, “Performance Comparison of OFDM-QAM and FBMC-QAM Filtered in Multi-User Massive MIMO Channel Characterization,” In Proc. 21st International Symposium on Wireless Personal Multimedia Communications (WPMC), Nov. 2018.

9. M. Subongkod, **S. Duangsuwan**, and P. Jamjareegulgarn, “A Study on Tourism Mobile Web Application based on Big Data Analysis Platform for the South of Thailand,” In Proc. 22nd International Computer Science and Engineering Conference (ICSEC), Nov. 2018.

10. **S. Duangsuwan**, A. Takarn, and P. Jamjareegulgarn, “A Development on Air Pollution Detection Sensors based on NB-IoT Network for Smart Cities,” In Proc. 18th International Symposium on Communications and Information Technologies (ISCIT), Sep. 2018.

11. P. Jamjareegulgarn, **S. Duangsuwan**, and U. Tangtrakunphaisan, “Analysis of Bottomside Thickness Parameter-Based TEC at Equatorial and Low Latitude Stations for Global Navigation Satellite Systems,” In Proc. International Electrical Engineering Congress (iEECON), March 2018.

12. **S. Duangsuwan**, A. Takarn, R. Nujankaew, and P. Jamjareegulgarn, “A Study of Air Pollution Smart Sensors LPWAN via NB-IoT for Thailand Smart Cities 4.0,” In Proc. 10th International Conference on Knowledge and Smart Technology (KST), Jan. 2018.

13. **S. Duangsuwan**, J. Teekapakvisit, and S. Promwong, “Performance of uplink channel estimation in massive MU-MIMO system,” in Proc. International Symposium on Multimedia and Communication Technology (ISMAC), Ayutthaya, Thailand, 2017.

14. **S. Duangsuwan**, J. Teekapakvisit, and S. Promwong, “On the uplink blind equalization in massive MU-MIMO systems to avoid pilot contamination,” in Proc. International Symposium on Multimedia and Communication Technology (ISMAC), Ayutthaya, Thailand, 2017.

15. **S. Duangsuwan**, and P. Jamjareegulgarn, “Detection of data symbol in a massive MIMO system for 5G wireless communication,” in Proc. 5th International Electrical Engineering Congress (iEECON), Pattaya City, Thailand, 2017.

16. **S. Duangsuwan**, and S. Promwong, “Multipath interference cancellation in multiantenna system with blind channel estimation method,” in Proc. International Symposium on Intelligent Signal Processing and Communication Systems (ISPACS), Phuket, Thailand, 2016.

17. **S. Duangsuwan**, and S. Promwong, “SINR performance using MIMO-CMA algorithms for RFID 2.45 GHz channel measurement,” in Proc. Asia-Pacific Conference on Communication (APCC), Pattaya City, Thailand, 2014.

18. **S. Duangsuwan**, and S. Promwong, “Experimental evaluation of received signal using blind channel estimation for RFID system via MIMO antenna,” in Proc. Joint International Conference on Information and Communication Technology, Electronic and Electrical Engineering (JICTEE), Chiang Rai, Thailand, 2014.

19. ศรัญญ์ ดวงสุวรรณ, อੰณา ชูส่งแสง, สิทธิพร คงนาสร, และปณยวีร์ จามจรีกุลกาญจน์ “การวัดค่าความชื้นในดินด้วยอุปกรณ์ไร้สายและไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP8266 สำหรับการพัฒนานวัตกรรมเกษตรกรรมอัจฉริยะต้นทุนต่ำ,” การประชุมวิชาการ งานวิจัยและพัฒนาเชิงประยุกต์ ครั้งที่ 11 ECTI-CARD 2019, อุบลราชธานี, วันที่ 6 – 8 มิถุนายน พ.ศ. 2562

20. อੰณา ชูส่งแสง, สิทธิพร คงนาสร, ศรัญญ์ ดวงสุวรรณ, พรชัย วงศ์วาสนา, และปณยวีร์ จามจรีกุลกาญจน์, “การวัดค่าความชื้นในดินโดยใช้โครนสำหรับฟาร์มเกษตรกรรมขนาดใหญ่ 4.0,” การประชุมวิชาการระดับชาติ IAMBEST ครั้งที่ 4, ระนอง, วันที่ 30– 31 พฤษภาคม พ.ศ. 2562