



กทปส

รายงานฉบับสมบูรณ์

โครงการขอรับการส่งเสริมและสนับสนุนจากเงินกองทุนวิจัยและพัฒนากิจการกระจายเสียง
กิจการโทรทัศน์ และกิจการโทรคมนาคม เพื่อประโยชน์สาธารณะ

การพัฒนาแพลตฟอร์มไอโอทีสำหรับการเฝ้าระวังไฟป่าและมลพิษทางอากาศด้วย
เทคโนโลยีโลล่า

The development of IoT platform for Forest Fire and Air
Pollution Monitoring using LoRa Technology

ดร.อดิสรณ์ เลิศสินทรัพย์ทวี และคณะ

กองทุนวิจัยและพัฒนากิจการกระจายเสียง กิจการโทรทัศน์ และกิจการโทรคมนาคม เพื่อประโยชน์สาธารณะ
(สำนักงาน กสทช.)

แบบ กทปส. ME-003



กทปส

รายงานฉบับสมบูรณ์

โครงการขอรับการส่งเสริมและสนับสนุนจากเงินกองทุนวิจัยและพัฒนากิจการกระจายเสียง
กิจการโทรทัศน์ และกิจการโทรคมนาคม เพื่อประโยชน์สาธารณะ

มีนาคม 2566

กองทุนวิจัยและพัฒนากิจการกระจายเสียง กิจการโทรทัศน์ และกิจการโทรคมนาคม เพื่อประโยชน์สาธารณะ
(สำนักงาน กสทช.)

แบบ กทปส. ME-003

รายงานฉบับสมบูรณ์

ทุนส่งเสริมและสนับสนุนการวิจัยและพัฒนา
สัญญารับทุนเลขที่ A63-1-(2)-005

การพัฒนาแพลตฟอร์มไอโอทีสำหรับการเฝ้าระวังไฟป่าและมลพิษทางอากาศด้วยเทคโนโลยีโลล่า

The development of IoT platform for Forest Fire and Air Pollution Monitoring using
LoRa Technology

(คณะ) นักวิจัย

- | | |
|--------------------------------|------------------------|
| 1. ดร.อดิสรณ์ เลิศสินทรัพย์ทวี | นักวิจัยหัวหน้าโครงการ |
| 2. ดร. วีรชัย ตันพิพัฒน์ | นักวิจัยร่วม |
| 3. ผศ.ดร. ธงชัย ขนบแก้ว | นักวิจัยร่วม |

ได้รับทุนอุดหนุนจาก

กองทุนวิจัยและพัฒนาโครงการกระจายเสียง กิจกรรมโทรทัศน์ และกิจกรรมโทรคมนาคม เพื่อประโยชน์สาธารณะ
(สำนักงาน กสทช.)

มีนาคม 2566

บทคัดย่อ

การพัฒนาแพลตฟอร์มไอโอทีสำหรับการเฝ้าระวังไฟป่าและมลพิษทางอากาศด้วยเทคโนโลยีโลล่า

ดร. อติสรณ์ เลิศสินทรัพย์ทวี

ธันวาคม 2565

หลายประเทศในภูมิภาคเอเชียตะวันออกเฉียงใต้กำลังประสบปัญหาเรื่องหมอกควันอย่างมากในตลอดหลายปีที่ผ่านมา โดยมีสาเหตุสำคัญมาจากไฟป่าและการเผาแปลงเกษตรหลังการเก็บเกี่ยวเกษตรกรชาวไร่ มักใช้ไฟเผาแปลงเกษตรเพื่อเป็นการเตรียมหน้าดินก่อนจะทำการเพาะปลูกครั้งใหม่ ในประเทศไทยกิจกรรมนี้มักจะเกิดขึ้นในช่วงเดือน กุมภาพันธ์ ถึง เมษายน ของทุกปี ซึ่งบ่อยครั้งจะลุกลามเข้าไปถึงบริเวณป่าเกิดเป็นภัยพิบัติไฟป่า และปัญหาหมอกควันกระทบต่อประชาชนเป็นวงกว้างเพื่อเฝ้าระวังและป้องกันผลกระทบที่เกิดจากปัญหาหมอกควันนี้โครงการนี้จึงพัฒนาแพลตฟอร์มอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง หรือ Internet of Things (IoT) ด้วยโปรโตคอลสื่อสาร LoRaWAN เพื่อเฝ้าระวังมลพิษทางอากาศและหมอกควันได้แบบเรียลไทม์ อุปกรณ์เซ็นเซอร์ตรวจวัดคุณภาพอากาศราคาไม่แพง และ เกตเวย์โลล่า ได้ถูกติดตั้งในหลายจังหวัดของพื้นที่ภาคเหนือในประเทศไทย เช่น จังหวัด เชียงราย, ลำพูน และ ตาก เพื่อรายงานสถานการณ์หมอกควันและมลพิษทางอากาศ อุปกรณ์ตรวจวัดประกอบไปด้วยเซ็นเซอร์ หลายชนิดเช่น ฝุ่นละอองขนาดเล็ก PM1/PM2.5/PM10 คาร์บอนมอนนอกไซด์ และ คาร์บอนไดออกไซด์ เป็นต้น ซึ่งเซ็นเซอร์เหล่านี้ได้ทำการเปรียบเทียบวัดกับอุปกรณ์มาตรฐาน ในห้องปฏิบัติการ และ ที่สถานีตรวจวัดคุณภาพอากาศของกรมควบคุมมลพิษ โครงการยังได้นำเสนอโมเดลตรวจจับไฟป่าที่พัฒนามาจากโมเดลการตัดสินใจด้วยแผนภูมิต้นไม้ (Decision Tree) ร่วมกับข้อมูลของเซ็นเซอร์ที่ติดตั้งอยู่ในจังหวัดตากในช่วงที่เกิดเหตุการณ์ไฟป่า ปี 2564 โดยโมเดลตรวจจับไฟป่านี้ได้ถูกนำไปประยุกต์ใช้กับระบบแจ้งเตือนภัยซึ่งสามารถแจ้งเตือนเหตุการณ์ไฟป่าให้แก่เจ้าหน้าที่ในพื้นที่ เพื่อเข้าระงับไฟป่าในบริเวณใกล้เคียงกับตำแหน่งเซ็นเซอร์ที่ติดตั้งอยู่ที่บริเวณดอยช้างป่าแป๋ จังหวัดลำพูน

คำสำคัญ:

แพลตฟอร์มเฝ้าระวังหมอกควันแบบเรียลไทม์, อินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง, ไอโอที, โลล่า, โลล่าแวน, ปัญหาหมอกควัน, ตรวจจับไฟป่า, ฝุ่นละอองขนาดเล็ก

Abstract

The development of IoT platform for Forest Fire and Air Pollution Monitoring using LoRa Technology

Dr. Adisorn Lertsinsrubtavee

December 2022

In Southeast Asia (SEA), haze disasters have been caused by wildfires and/or agricultural-related burning and usually occur during drought periods. Cultivators usually use fire to clear the plant material left over from the old crops to prepare for new planting season. In Thailand, this practice typically falls between February and April, during which the worst of the haze is evidence, and has sparked intense criticisms and controversies. To better observe and prevent the impacts of haze pollution, this project successfully developed an Internet of Things (IoT) platform based on LoRaWAN protocol to monitor the haze pollution in real-time. The low-cost wireless air quality sensor nodes together with LoRa gateways have been deployed in northern provinces of Thailand (e.g., Chiang Rai, Tak, Lamphoon). The sensor nodes equipped with several weather and air pollutant parameters such as PM1/PM2.5/PM10, CO, CO₂ which were calibrated with reference meters in laboratory setting and co-location with PCD station. The project also proposed the forest fire detection model based on Tree Model Classification by using the data collected from sensors deployed in Tak area during real forest fire events in 2021. The model has been applied to the notification system which can notify the forest fire officers to prevent the forest fire near a sensor node at Doi Chang Pa Pae mountain in Lamphoon.

Keywords:

Real time haze monitoring platform, Internet of Things, IoTs, LoRa, LoRaWAN, Haze crisis, Forest fire detection, PM2.5

สารบัญ

บทที่ 1	1
บทนำ	1
1.1 หลักการและเหตุผล	1
1.2 วัตถุประสงค์ และขอบเขตของโครงการ	3
1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	4
บทที่ 2	5
ทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	5
2.1 เทคโนโลยี LoRa และ LoRaWAN	5
2.2 คุณสมบัติของสัญญาณ LoRa	6
2.3 การวิเคราะห์ข้อมูล Big Data	8
2.4 สถานการณ์ไฟฟ้าและหมอกควันของไทย	11
บทที่ 3	27
วิธีการดำเนินการวิจัย	27
3.1 บทนำ	27
3.2 วิธีการ/ขั้นตอนการดำเนินการวิจัยและพัฒนา	27
3.3 แผนการดำเนินงานวิจัย	31
3.4 รูปแบบการใช้งานของระบบ (user scenario) โครงข่ายไอโอทีและไวร์เลสเซ็นเซอร์เน็ตเวิร์คที่ใช้เทคโนโลยีโลล่า	33
3.5 ความต้องการของระบบและการเชื่อมต่อ (system & network requirement) ของแพลตฟอร์มโครงข่ายไอโอทีและไวร์เลสเซ็นเซอร์เน็ตเวิร์คที่ใช้เทคโนโลยีโลล่า	35
3.6 การกำหนดคุณสมบัติอุปกรณ์เซ็นเซอร์ที่ใช้ในการตรวจวัดมลพิษทางอากาศ	38

3.7 การออกแบบแพลตฟอร์มโครงข่ายไอโอทีและไวร์เลสเซ็นเซอร์เน็ตเวิร์คที่ใช้เทคโนโลยีโลล่า	42
3.8 สรุป	43
บทที่ 4	44
ผลการวิจัย และการวิจารณ์ผล	44
4.1 การพัฒนาแพลตฟอร์มโครงข่ายไอโอทีและไวร์เลสเซ็นเซอร์เน็ตเวิร์คที่ใช้เทคโนโลยีโลล่า	44
4.2 การทดสอบระบบไวร์เลสเซ็นเซอร์ด้วยโปรโตคอล LoRaWAN	53
4.3 การทดสอบอุปกรณ์เซ็นเซอร์ตรวจวัดคุณภาพอากาศ	63
4.4 การสำรวจและติดตั้งอุปกรณ์โครงข่ายและเซ็นเซอร์	69
4.4.1 พื้นที่เป้าหมายสำหรับการติดตั้งอุปกรณ์เซ็นเซอร์และโครงข่าย	69
4.5 การวิเคราะห์ข้อมูลจากอุปกรณ์เซ็นเซอร์	86
4.5.1 การพัฒนาโมเดลตรวจจับการเกิดไฟป่า	86
บทที่ 5	113
สรุปผลการวิจัย	113
5.1 บทนำ	113
5.2 สรุปผลการดำเนินงานวิจัย	113
5.3 ข้อเสนอแนะสำหรับแนวทางการเฝ้าระวังไฟป่า	116
5.4 ข้อเสนอแนะเชิงนโยบาย	117
5.5 ปัญหาและอุปสรรคในการดำเนินงานวิจัย	119
5.6 แนวทางในการพัฒนาโครงการวิจัยในอนาคต	120
บรรณานุกรม	122
ภาคผนวก ก	128
ตารางสรุปคุณสมบัติของอุปกรณ์เซ็นเซอร์	128
ภาคผนวก ข	133

ตารางแสดงค่าเมทริกซ์สหสัมพันธ์ที่ใช้ในการวิเคราะห์การเคลื่อนที่ของกลุ่มหมอกควัน PM2.5	133
ภาคผนวก ค	138
ตารางแสดงจุดติดตั้งเซ็นเซอร์	138

สารบัญตาราง

ตารางที่ 1 แสดงค่าพื้นที่ไฟไหม้จากเซ็นเซอร์โมดิส ที่รายละเอียด 500 ม. ตั้งแต่ปีพ.ศ. 2544 – 2565 ที่มา HTTPS://EARTHMAP.ORG/ และ HTTPS://MODIS.GSFC.NASA.GOV/DATA/DATAPROD/MOD45.PHP	18
ตารางที่ 2 แผนการดำเนินงานวิจัยแบ่งตามรายละเอียดกิจกรรม.....	31
ตารางที่ 3 ตารางเปรียบเทียบ ค่า DATA RATE และ SPREADING FACTOR (SF) [33].....	55
ตารางที่ 4 แบบแผนการเก็บข้อมูล PM2.5, CO, CO2 ในห้องทดลองและปฏิบัติการแบบระบบปิด.....	65
ตารางที่ 5 อัตราการบริโภคพลังงานของอุปกรณ์.....	75
ตารางที่ 6 CONFUSION METRIX เปรียบประสิทธิภาพของโมเดลตรวจจับไฟป่า.....	100
ตารางที่ 7 การจำแนกโซนตามกลุ่มรัศมีและทิศทางของโหนดเซ็นเซอร์.....	106
ตารางที่ 8 สรุปข้อมูลค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของ PM2.5 ในแต่ละโซน.....	109
ตารางที่ 9 ตัวอย่างเมทริกซ์สหสัมพันธ์ของ ความเข้มข้น PM2.5 ที่เวลาปัจจุบันและความเข้มข้นของเวลาก่อนหน้าใน โซนทิศเหนือ (CRI-N5) ตะวันออกเฉียงเหนือ (CRI-NE20 และ CRI-NE10) ศูนย์กลาง (CRI-C) โซนทิศใต้ (CRI-S20 CRI-S10 CRI-S5) และตะวันตกเฉียงใต้ (CRI-SE20 และ CRI-SE10).....	111
ตารางที่ 10 คุณสมบัติของเซ็นเซอร์ PMS7003.....	129
ตารางที่ 11 คุณสมบัติของเซ็นเซอร์ BME280.....	130
ตารางที่ 12 คุณสมบัติของเซ็นเซอร์ MH-Z16.....	131
ตารางที่ 13 คุณสมบัติ ZE07-CO.....	131
ตารางที่ 14 คุณสมบัติโลโก้โมดูล ABZ ของ MURATA.....	132
ตารางที่ 15 เมทริกซ์สหสัมพันธ์ของ ความเข้มข้น PM2.5 ที่เวลาปัจจุบันและความเข้มข้นของเวลาก่อนหน้าใน 1MS 2TS 3MG และ 4PW.....	134
ตารางที่ 16 จุดติดตั้งอุปกรณ์เซ็นเซอร์.....	139

สารบัญภาพ

รูปที่ 1 ลักษณะสัญญาณ LORA	5
รูปที่ 2 การมอดดูเลชันของสัญญาณ LORA ด้วยค่า SF ที่แตกต่างกัน.....	6
รูปที่ 3 การวิเคราะห์ข้อมูลแบบ PIPELINE DATA ANALYTICS [12].....	8
รูปที่ 4 เปรียบเทียบการแสดงผลจุดฮอตสปอตที่ตรวจพบด้วยดาวเทียมบนแผนที่ของระบบ NASA FIRMS ที่มีมาตราส่วนแตกต่างกัน ภาพซ้าย 1:500, กลาง1:50 และ ขวา 1:5 กิโลเมตรตามลำดับ	13
รูปที่ 5 แสดงตำแหน่งที่อาจจะเกิดไฟในพิกเซลที่ตรวจพบไฟ.....	13
รูปที่ 6 แสดงค่าพื้นที่ไฟไหม้จากเซ็นเซอร์โมดิสที่รายละเอียด 500ม. ตั้งแต่ปีพ.ศ. 2544 – 2565 ที่มา HTTPS://EARTHMAP.ORG/ และ HTTPS://MODIS.GSFC.NASA.GOV/DATA/DATAPROD/MOD45.PHP	16
รูปที่ 7 พื้นที่ไฟไหม้ที่ตรวจเจอโดยเซ็นเซอร์โมดิสซ้อนทับตั้งแต่ปีพ.ศ. 2543 ถึง 2565 บริเวณภูมิภาคอาเซียนตอนบน ที่มา HTTPS://EARTHMAP.ORG/ และ HTTPS://MODIS.GSFC.NASA.GOV/DATA/DATAPROD/MOD45.PHP	17
รูปที่ 8 แสดงค่าฝนสะสมของภาคเหนือ ถึงวันที่ 14 ตุลาคม พ.ศ. 2565 ที่มา กรมอุตุนิยมวิทยา HTTP://CLIMATE.TMD.GO.TH/GGE/WATER/NORMALRAIN2564.HTML	19
รูปที่ 9 ค่าการปลดปล่อยคาร์บอนได้ออกไซด์ จาก ห้า GLOBAL FIRE EMISSIONS INVENTORIES ที่มีการใช้เป็นการทั่วไป. ตั้งแต่ปีพ.ศ. 2546 – 2564 ที่มา HTTPS://GLOBALFIRES.EARTHENGINE.APP/VIEW/FIRECAM และ LIU ET AL. 2020 [18]	20
รูปที่ 10 ค่าฝุ่นจิ๋ว PM2.5 จาก ห้า GLOBAL FIRE EMISSIONS INVENTORIES ที่มีการใช้เป็นการทั่วไป. ตั้งแต่ปีพ.ศ. 2546 – 2564 ที่มา HTTPS://GLOBALFIRES.EARTHENGINE.APP/VIEW/FIRECAM และ LIU ET AL. 2020 [18]	20
รูปที่ 11 พื้นที่ไฟไหม้ที่ตรวจเจอโดยเซ็นเซอร์โมดิสซ้อนทับตั้งแต่ปีพ.ศ. 2543 ถึง 2565 บริเวณภาคเหนือของประเทศไทย แหล่งข้อมูล HTTPS://EARTHMAP.ORG/ และ HTTPS://MODIS.GSFC.NASA.GOV/DATA/DATAPROD/MOD45.PHP	21
รูปที่ 12 พื้นที่ไฟไหม้ที่ตรวจเจอโดยเซ็นเซอร์โมดิสซ้อนทับตั้งแต่ปีพ.ศ. 2543 ถึง 2565 บริเวณจ. เชียงใหม่ แหล่งข้อมูล HTTPS://EARTHMAP.ORG/ และ HTTPS://MODIS.GSFC.NASA.GOV/DATA/DATAPROD/MOD45.PHP	22

รูปที่ 13	พื้นที่ไฟไหม้ที่ตรวจเจอโดยเซ็นเซอร์โมดิสซ็อนทัฟตั้งแต่ปีพ.ศ. 2543 ถึง 2565 บริเวณจ. เชียงราย แหล่งข้อมูล HTTPS://EARTHMAP.ORG/ และ HTTPS://MODIS.GSFC.NASA.GOV/DATA/DATAPROD/MOD45.PHP	22
รูปที่ 14	พื้นที่ไฟไหม้ที่ตรวจเจอโดยเซ็นเซอร์โมดิสซ็อนทัฟตั้งแต่ปีพ.ศ. 2543 ถึง 2565 บริเวณจ. ลำพูน แหล่งข้อมูล HTTPS://EARTHMAP.ORG/ และ HTTPS://MODIS.GSFC.NASA.GOV/DATA/DATAPROD/MOD45.PHP	23
รูปที่ 15	พื้นที่ไฟไหม้ที่ตรวจเจอโดยเซ็นเซอร์โมดิสซ็อนทัฟตั้งแต่ปีพ.ศ. 2543 ถึง 2565 บริเวณจ. ลำปาง แหล่งข้อมูล HTTPS://EARTHMAP.ORG/ และ HTTPS://MODIS.GSFC.NASA.GOV/DATA/DATAPROD/MOD45.PHP	23
รูปที่ 16	พื้นที่ไฟไหม้ที่ตรวจเจอโดยเซ็นเซอร์โมดิสซ็อนทัฟตั้งแต่ปีพ.ศ.2543 ถึง2565 จ.บริเวณ แม่ฮ่องสอน แหล่งข้อมูล HTTPS://EARTHMAP.ORG/ และ HTTPS://MODIS.GSFC.NASA.GOV/DATA/DATAPROD/MOD45.PHP	24
รูปที่ 17	พื้นที่ไฟไหม้ที่ตรวจเจอโดยเซ็นเซอร์โมดิสซ็อนทัฟตั้งแต่ปีพ.ศ. 2543 ถึง 2565 บริเวณ จังหวัดตาก แหล่งข้อมูล HTTPS://EARTHMAP.ORG/ และ HTTPS://MODIS.GSFC.NASA.GOV/DATA/DATAPROD/MOD45.PHP	24
รูปที่ 18	พื้นที่ไฟไหม้ที่ตรวจเจอโดยเซ็นเซอร์โมดิสซ็อนทัฟตั้งแต่ปีพ.ศ. 2543 ถึง 2565 บริเวณ จังหวัดแพร่ แหล่งข้อมูล HTTPS://EARTHMAP.ORG/ และ HTTPS://MODIS.GSFC.NASA.GOV/DATA/DATAPROD/MOD45.PHP	25
รูปที่ 19	พื้นที่ไฟไหม้ที่ตรวจเจอโดยเซ็นเซอร์โมดิสซ็อนทัฟตั้งแต่ปีพ.ศ. 2543 ถึง 2565 บริเวณ จังหวัดน่าน แหล่งข้อมูล HTTPS://EARTHMAP.ORG/ และ HTTPS://MODIS.GSFC.NASA.GOV/DATA/DATAPROD/MOD45.PHP	25
รูปที่ 20	พื้นที่ไฟไหม้ที่ตรวจเจอโดยเซ็นเซอร์โมดิสซ็อนทัฟตั้งแต่ปีพ.ศ. 2543 ถึง 2565 บริเวณจ. พะเยา แหล่งข้อมูล HTTPS://EARTHMAP.ORG/ และ HTTPS://MODIS.GSFC.NASA.GOV/DATA/DATAPROD/MOD45.PHP	26
รูปที่ 21	แผนภาพ แสดงโครงสร้างของระบบ โครงข่ายไวร์เลสเซ็นเซอร์ เน็ตเวิร์คด้วยโปรโตคอล LORAWAN.....	29
รูปที่ 22	แสดงตัวอย่างการใช้งานโปรแกรม RFBOT สํารวจรูปแบบการแพร่กระจายของคลื่น (RADIO WAVE PROPAGATION) ระหว่างอุปกรณ์ เกตเวย์ และ อุปกรณ์ เซ็นเซอร์.....	30
รูปที่ 23	ภาพรวมการใช้งานโครงข่ายไอโอทีเพื่อตรวจวัดคุณภาพอากาศแบบเรียลไทม์	35
รูปที่ 24	พื้นที่โดยรอบสถานีควบคุมไฟป่าดอยตุง.....	38
รูปที่ 25	โครงสร้างอุปกรณ์เซ็นเซอร์ตรวจวัดคุณภาพอากาศ CANARIN.....	39

รูปที่ 26 สถาปัตยกรรมของส่วนสื่อสารของเซ็นเซอร์ CANARIN.....	41
รูปที่ 27 สถาปัตยกรรมของแพลตฟอร์มไฮบริดโลล่า.....	42
รูปที่ 28 สถาปัตยกรรมของโครงข่ายโลล่าไอโอที.....	44
รูปที่ 29 การตั้งค่าความถี่บนอุปกรณ์ โลล่า เกตเวย์.....	45
รูปที่ 30 แสดง LOG ของ PACKET FORWARDER ใน KERLINK WIRNET ISTATION.....	46
รูปที่ 31 LORA โมดูล RAK 2245 สำหรับการพัฒนา LORA เกตเวย์.....	47
รูปที่ 32 อุปกรณ์ SINGLE BOARD COMPUTER ราคาสเวดดิช 3 โมเดล B+.....	47
รูปที่ 33 DIY LORA GATEWAY AP MODE.....	47
รูปที่ 34 แสดงเมนูการติดตั้งอุปกรณ์ DIY LORA GATEWAY สำหรับ โมดูล RAK2245.....	48
รูปที่ 35 ลงทะเบียน DIY LORA เกตเวย์ ที่ NETWORK SERVER.....	49
รูปที่ 36 ระบบ VPN เชื่อมต่อ อุปกรณ์ LORA กับ IOT SERVER.....	49
รูปที่ 37 แสดงรายชื่อ อุปกรณ์ LORA เกตเวย์ ที่ลงทะเบียนไว้กับ TTN3 PRIVATE SERVER.....	50
รูปที่ 38 แสดง ข้อมูล CANARIN SENSOR ที่ส่งข้อมูลมายัง KERLINK WIRNET ISTATION ด้วย เทคโนโลยีโลล่า.....	50
รูปที่ 39 สถาปัตยกรรมภายในของ LORARELAY MQTT CLIENT.....	52
รูปที่ 40 LORA RELAY DASHBOARD เพื่อตรวจสอบสถานะของอุปกรณ์ เซ็นเซอร์.....	52
รูปที่ 41 แสดง WEB APPLICATION ของแพลตฟอร์ม LORAIOT (HTTPS://HAZEMON.IN.TH/LORAIOT).....	53
รูปที่ 42 แสดงการติดตั้งอุปกรณ์โลล่า ภายในสถาบัน AIT เพื่อการทดสอบ.....	54
รูปที่ 43 ค่า เฉลี่ย RSSI เปรียบเทียบกับค่า DATA RATE ในการส่งข้อมูลแบบ UPLINK.....	55
รูปที่ 44 ค่า เฉลี่ย RSSI เปรียบเทียบกับค่า DATA RATE ในการส่งข้อมูลแบบ DOWNLINK.....	55
รูปที่ 45 อุปกรณ์ CANARIN ที่ติดตั้งอยู่บนรถยนต์สำหรับการทดสอบ MOBILITY DRIVE TEST.....	56
รูปที่ 46 ระดับสัญญาณโลล่า UPLINK บริเวณโดยรอบสถาบันฯ.....	57
รูปที่ 47 ระดับสัญญาณโลล่า DOWNLINK บริเวณโดยรอบสถาบันฯ.....	57
รูปที่ 48 ค่าเฉลี่ย RSSI เปรียบเทียบกับ ระยะห่างจากเกตเวย์โลล่า.....	57
รูปที่ 49 ค่า RSSI และ SNR ที่ระยะทางแตกต่างกันเปรียบเทียบกับค่า SPREADING FACTOR.....	59
รูปที่ 50 การอ่านค่าพารามิเตอร์จาก โลล่าแพ็คเก็ต บน TTN SERVER.....	60
รูปที่ 51 ค่า TIME ON AIR ที่ระยะทางแตกต่างกันเปรียบเทียบกับค่า SPREADING FACTOR.....	61
รูปที่ 52 ค่าอัตราการส่งข้อมูลสำเร็จ เปรียบเทียบกับค่า SPREADING FACTOR.....	62
รูปที่ 53 การทดสอบเซ็นเซอร์ในห้องทดลองและปฏิบัติการแบบระบบปิด.....	64

รูปที่ 54 ค่า R-SQUARE เปรียบเทียบระหว่าง ค่า PM2.5 ที่วัดได้จากเซ็นเซอร์ CANARIN ในโหมด ATMOSPHERIC กับ อุปกรณ์มาตรฐาน.....	65
รูปที่ 55 ค่า R-SQUARE เปรียบ เทียบระหว่าง ค่า PM2.5 ที่วัดได้จากเซ็นเซอร์ CANARIN ในโหมด CF1 กับ อุปกรณ์มาตรฐาน.....	66
รูปที่ 56 ค่า R-SQUARE เปรียบ เทียบระหว่าง ค่า CO2 ที่วัดได้จากเซ็นเซอร์ CANARIN กับ อุปกรณ์ มาตรฐาน.....	66
รูปที่ 57 R-SQUARE เปรียบ เทียบระหว่าง ค่า CO ที่วัดได้จากเซ็นเซอร์ CANARIN กับ อุปกรณ์ มาตรฐาน.....	67
รูปที่ 58 การทดสอบ CANARIN เซ็นเซอร์ กับเครื่องวัดมาตรฐานของกรมควบคุมมลพิษ บริเวณสถานี โรงพยาบาลจุฬาฯ.....	68
รูปที่ 59 TIME SERIES PLOT เปรียบเทียบการอ่านค่า PM2.5 ระหว่าง CANARIN เซ็นเซอร์ กับ เครื่องวัดมาตรฐานที่สถานี โรงพยาบาลจุฬาฯ.....	68
รูปที่ 60 SCATTER PLOT เปรียบเทียบค่า PM2.5 จาก CANARIN เซ็นเซอร์และ เครื่องวัดมาตรฐาน	69
รูปที่ 61 พื้นที่โครงการพัฒนาตอตุ้ง จังหวัดเชียงราย.....	70
รูปที่ 62 แสดงตำแหน่งหน่วยพิทักษ์ไฟฟ้า บริเวณอุทยานแห่งชาติแมปิง จังหวัดลำพูน	71
รูปที่ 63 โครงข่ายโลล่าที่จะทำการติดตั้งในพื้นที่เป้าหมาย.....	72
รูปที่ 64 ชุดอุปกรณ์เซ็นเซอร์ทำงานด้วยระบบพลังงานแสงอาทิตย์.....	73
รูปที่ 65 ปริมาณกระแสไฟฟ้าที่วัดได้จากมัลติมิเตอร์.....	74
รูปที่ 66 อุปกรณ์เซ็นเซอร์ตรวจวัดคุณภาพอากาศ.....	74
รูปที่ 67 การทดสอบอุปกรณ์เซ็นเซอร์กับระบบพลังงานแสงอาทิตย์.....	77
รูปที่ 68 ส่วนประกอบของชุดเซ็นเซอร์และระบบพลังงานแสงอาทิตย์.....	77
รูปที่ 69 การติดตั้งอุปกรณ์โลล่าเกตเวย์ ที่อำเภอแม่สอด จังหวัดตาก.....	78
รูปที่ 70 สัญญาณโลล่าในบริเวณที่ติดตั้งเกตเวย์	78
รูปที่ 71 โมเดลจำลองการส่งสัญญาณโลล่า (923MHZ) จากโลล่าเกตเวย์ที่ความสูง 24 เมตร กับพิกัด โรงเรียนแม่ปะใต้	79
รูปที่ 72 แผนที่แสดงตำแหน่งการติดตั้งอุปกรณ์เซ็นเซอร์และเกตเวย์โลล่า.....	79
รูปที่ 73 โมเดลจำลองการส่งสัญญาณโลล่า (923MHZ) จากโลล่าเกตเวย์ที่ความสูง 24 เมตร กับพิกัด สวนมูทิตา.....	80
รูปที่ 74 แสดงพื้นที่บริเวณของจุดติดตั้งอุปกรณ์ CANARIN เซ็นเซอร์ ที่ อ.แม่สอด จ.ตาก.....	81
รูปที่ 75 การติดตั้งอุปกรณ์เซ็นเซอร์ ในพื้นที่ อำเภอแม่สอด จังหวัดตาก	81

รูปที่ 76	แผนผังการติดตั้งอุปกรณ์โครงข่ายโลล่า และ อุปกรณ์เซ็นเซอร์.....	82
รูปที่ 77	การติดตั้งโลล่าเกตเวย์ ที่ สภ.ก้อ และ อุปกรณ์เซ็นเซอร์พร้อมด้วยระบบโซลาเซลล์ ที่จุดแก่ง ก้อ และ ห้วยฟ้าผ่า.....	83
รูปที่ 78	การติดตั้ง DIY โลล่าเกตเวย์ ที่สถานีควบคุมไฟฟ้าแม่ปิง.....	83
รูปที่ 79	การติดตั้งอุปกรณ์เซ็นเซอร์โดยชาวบ้านดอยช้างป่าแป๋.....	84
รูปที่ 80	ตำแหน่งการติดตั้งอุปกรณ์เซ็นเซอร์ ในจังหวัดเชียงราย.....	85
รูปที่ 81	โลล่าเกตเวย์ติดตั้งอยู่ที่ โรงเรียนป่าซางนาเงิน และ จุดเซ็นเซอร์ที่ฐานปฏิบัติการน้ำปิง บริเวณสุขขอบประเทศไทย.....	86
รูปที่ 82	ตำแหน่งและโซนการติดตั้งเซ็นเซอร์ ในพื้นที่ จังหวัดตาก ที่ใช้ในการวิเคราะห์โมเดลตรวจจับ ไฟฟ้า.....	87
รูปที่ 83	ขั้นตอนการสกัด แปลง และโหลดข้อมูลด้วย PENTAHO (PDI).....	88
รูปที่ 84	การเปลี่ยนแปลงเชิงเวลาของ PM2.5 CO และจุดความร้อน (A) และการกระจายเชิงพื้นที่ ของจุดความร้อนและข้อมูลการสำรวจไฟฟ้าภาคพื้นดิน (B).....	88
รูปที่ 85	TRAINING SET และ VALIDATION SET พร้อมรายละเอียดของ BURN (ช่วงที่เกิดไฟฟ้า) และ NO BURN (ช่วงที่ไม่เกิดไฟฟ้า).....	89
รูปที่ 86	การวิเคราะห์ข้อมูลโดยใช้ WEKA.....	89
รูปที่ 87	ค่าสหสัมพันธ์ของ PM2.5 และ CO_MAX ระหว่าง BURN 2 (A) และ BURN 3 (B).....	90
รูปที่ 88	แบบจำลอง TREE MODEL CLASSIFICATION สำหรับการตรวจจับไฟฟ้า.....	91
รูปที่ 89	การทดสอบแบบจำลองสำหรับตรวจจับไฟฟ้าด้วย VALIDATING SET.....	92
รูปที่ 90	การแปลงข้อมูลและการรวมเข้ากับ WS และ WD ด้วย PDI.....	93
รูปที่ 91	โซนที่เลือก (1MS 2TS 3MG และ 4PW) สำหรับคาดการณ์ความเข้มข้นของ PM2.5 เนื่องจากการเคลื่อนตัวของกลุ่มควันไฟฟ้า.....	94
รูปที่ 92	แสดงตัวอย่างรายงานไฟฟ้าจากสถานีควบคุมไฟฟ้าบ้านโฮ้ง และ ข้อมูลจุดความร้อนจาก NASA.....	97
รูปที่ 93	แสดงตำแหน่งเซ็นเซอร์ตรวจจับไฟฟ้า บริเวณดอยช้างป่าแป๋, ตำแหน่งจุดความร้อน (HOTSPOT) และ พิกัดไฟฟ้าที่ตรวจพบโดยเจ้าหน้าที่.....	98
รูปที่ 94	ค่าเฉลี่ย PM2.5 รายวัน เปรียบเทียบกับค่าสูงสุดของ CO ที่ตรวจวัดได้จาก CO เซ็นเซอร์.....	99
รูปที่ 95	แสดงพิกัดโหนดที่ตรวจจับไฟฟ้าได้ ในวันที่ 5 เมษายน 2565.....	100
รูปที่ 96	ข้อความแจ้งเตือนถูกส่งไปยังเจ้าหน้าที่ดับไฟฟ้า.....	100
รูปที่ 97	การเปรียบเทียบความสัมพันธ์สัมพัทธ์เฉลี่ยรายวันเปรียบเทียบกับเหตุการณ์ FALSE POSITIVE และ TRUE POSITIVE.....	102

รูปที่ 98 เปรียบเทียบประสิทธิภาพของโมเดลตรวจจับไฟป่ากับ ค่าเพื่อที่จะเพิ่มประสิทธิภาพของ โมเดลตรวจจับไฟป่ากับปัจจัยความชื้นสัมพัทธ์.....	103
รูปที่ 99 แสดงการแจ้งเตือนสถานการณ์มลพิษทางอากาศรายวันผ่านแอปพลิเคชันไลน์.....	104
รูปที่ 100 พื้นที่ศึกษาจังหวัดเชียงราย ประเทศไทย	105
รูปที่ 101 ขั้นตอนการสกัด แปลง และโหลดข้อมูลเซ็นเซอร์จังหวัดเชียงราย ด้วย PENTAHO (PDI)	107
รูปที่ 102 การเปลี่ยนแปลง PM2.5 และ CO เปรียบเทียบระหว่างพื้นที่สูง (HIGH) และพื้นที่ราบ (LOW) ระหว่างเดือนธันวาคม พ.ศ.2564 – เดือนพฤษภาคม พ.ศ.2565	108
รูปที่ 103 การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้น PM2.5 เชนพื้นที่ในโซนต่าง ในพื้นที่จังหวัดเชียงราย	110
รูปที่ 104 การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้น CO เชนพื้นที่ในโซนต่าง ในพื้นที่จังหวัดเชียงราย.....	111
รูปที่ 105 ตารางคลื่นความถี่ ISM ที่จัดสรรให้ใช้งานด้าน IOT และความถี่ข้างเคียง	117
รูปที่ 106 แสดงภาพรวมของอุปกรณ์เซ็นเซอร์ที่ติดตั้งไปแล้วบนแพลตฟอร์ม LORAIOT	143

บทที่ 1

บทนำ

1.1 หลักการและเหตุผล

เทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่งหรือ Internet of Things (IoT) ถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลาย ในหลายภาคส่วน เช่น นวัตกรรมบ้านอัจฉริยะ (Smart Home), เมืองอัจฉริยะ (Smart City) หรือนำไปประยุกต์ใช้กับอุตสาหกรรมรถยนต์ที่สามารถเพิ่มความปลอดภัยและความสะดวกสบายให้แก่ผู้ขับขี่ โดยหลักการ อุปกรณ์ IoT จะประกอบไปด้วย 3 ส่วนหลัก ได้แก่ 1) หน่วยประมวลผล หรือ Main Control Unit (MCU) มีหน้าที่ควบคุมสั่งการอุปกรณ์ทั้งหมดผ่านชุดโปรแกรมที่ฝังตัวไว้ 2) อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ที่ทำหน้าที่ในการตรวจจับข้อมูล (Sensor) และ ส่งข้อมูลไปยัง MCU เพื่อแปลผลข้อมูลให้อยู่ในรูปแบบดิจิทัล 3) ส่วนติดต่อสื่อสาร (Communication Module) ทำหน้าที่รับส่งข้อมูลไปยัง อุปกรณ์คอมพิวเตอร์หรือฐานข้อมูลเพื่อจัดเก็บข้อมูล ที่ทำงานอยู่บนโครงข่ายอินเทอร์เน็ต โดยมีเทคโนโลยีการสื่อสารแบบไร้สาย (Wireless Communication) เป็นสื่อกลางในการรับส่งข้อมูล จากอุปกรณ์ IoT มายังคอมพิวเตอร์ส่วนกลางหรือเซิร์ฟเวอร์

อุปกรณ์ IoT เหล่านี้ มีความคาดหวังว่าจะมีอายุการใช้งานที่ยืนยาว ตั้งแต่ 5 ปี ถึง 10 ปี โดยปราศจากการดูแลรักษา อุปกรณ์เหล่านี้ยังถูกคาดหวังที่จะสามารถรับส่งข้อมูลออกไปได้ในระยะทางที่ไกล ยกตัวอย่าง เช่น การติดตั้งเซ็นเซอร์ในป่า เพื่อวัดข้อมูลประเภท ความชื้น, อุณหภูมิ และ ตัวแปรอื่นๆ อุปกรณ์จำเป็นต้อง ส่งข้อมูลที่มีขนาดเล็กเพื่อที่จะรองรับการรับส่งข้อมูลระยะไกล จากคุณสมบัติเหล่านี้ได้นำไปสู่การแตกแขนงเทคโนโลยี IoT ออกมาใหม่ที่เรียกว่า Low Power Wide Area Networking (LPWAN) [1] ซึ่งเป็นเครือข่ายสื่อสารไร้สายแบบกว้างที่เน้นการใช้พลังงานต่ำและสามารถส่งข้อมูลได้ในระยะไกล เทคโนโลยี LPWAN ได้ได้รับการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง โดยเทคโนโลยีที่เริ่มมีการใช้งานอย่างแพร่หลาย ได้แก่ NB-IoT, SigFox และ LoRa ซึ่งแต่ละเทคโนโลยีก็มีความสัมพันธ์และข้อจำกัดแตกต่างกันออกไป เช่น เทคโนโลยี NB-IoT มีข้อจำกัด ในเรื่องของการใช้คลื่นความถี่เนื่องจากความถี่ที่ใช้ได้ถูกจัดสรรให้อยู่ในย่านความถี่เดียวกับการให้บริการโทรศัพท์เคลื่อนที่ ซึ่งการใช้งานจะต้องดำเนินการผ่านผู้ให้บริการเครือข่าย ซึ่งในพื้นที่ห่างไกลยังมีสัญญาณไม่ครอบคลุม รวมทั้งยังมีอัตราค่าบริการที่สูงอยู่ เทคโนโลยี SigFox นั้นในประเทศไทยยังไม่มี ความชัดเจนในเรื่องการจัดสรรคลื่นความถี่ สำหรับเทคโนโลยีนี้ ในทางกลับกันเทคโนโลยี LoRa กลายมาเป็นเทคโนโลยีที่ได้รับการพัฒนาและถูกประยุกต์ใช้ในหลายด้านทั้งในด้าน อุตสาหกรรมและงานวิจัย ทั้งนี้เนื่องจากความถี่ที่ LoRa ใช้นั้นอยู่ในย่านความถี่ ISM ที่ไม่ต้องมีใบอนุญาตการใช้งานโดย ในประเทศไทยได้กำหนดให้ย่านความถี่สำหรับ LoRa อยู่ในช่วงความถี่ 920-925 MHz เมื่อเปรียบเทียบการใช้คลื่น

ความถี่ ของ LoRa กับเทคโนโลยีสื่อสารอื่นๆ LoRa จึงมีความเหมาะสมกับการนำมาใช้กับการพัฒนา ระบบ IoT เป็นอย่างมากเนื่องจาก คลื่นความถี่ในย่านนี้เดินทางในแนวเส้นตรง สามารถเดินทางผ่าน สิ่งกีดขวาง (Non-Line-of-Sight) รวมทั้งอาคารได้ดี จึงทำให้สามารถส่งข้อมูลออกไปได้ในระยะที่ไกล เมื่อเปรียบเทียบกับย่านความถี่ WiFi ที่เป็น ความถี่ในย่าน ISM เหมือนกันแต่ทำงานในย่านความถี่สูง คือ 2.4 GHz และ 5.7 GHz จึงมีข้อจำกัดในการรับส่งข้อมูลได้ในระยะสั้นเท่านั้น

จากเหตุผลดังกล่าวจึงสมควรเป็นอย่างยิ่งที่จะมีการศึกษาการและพัฒนาระบบที่ใช้ประโยชน์ จากเทคโนโลยีโลล่า จากย่านความถี่ที่ได้รับอนุญาตนี้และพัฒนาแพลตฟอร์มไอโอทีสำหรับระบบเฝ้า ระวังมลพิษทางอากาศ (Air Pollution Monitoring) เพื่อที่จะสนับสนุนภารกิจป้องกันและบรรเทาสา ธาณภัยจากปัญหาหมอกควันและมลภาวะในอากาศซึ่งกลายมาเป็นปัญหาสำคัญ ในหลายภูมิภาค โดยเฉพาะอย่างยิ่งบริเวณภาคเหนือตอนบนซึ่งทวีความรุนแรงมากขึ้นทุกๆปี จนนับว่าเป็นภัยพิบัติ ที่ ส่งผล กระทบต่อชีวิตความเป็นอยู่ของประชาชนเป็นวงกว้าง ไม่ว่าจะเป็นปัญหาสุขภาพจากการสูดดม ฝุ่นละอองขนาดเล็ก หรือ PM2.5 อันเป็นสาเหตุของโรคระบบทางเดินหายใจ อีกทั้งปัญหาหมอกควัน ยังเป็นอุปสรรคต่อการคมนาคมขนส่ง และเป็นสาเหตุของการเกิดอุบัติเหตุบนท้องถนน นำไปสู่ความ สูญเสียทั้งในเชิงเศรษฐกิจและสังคม จากผลการสำรวจขององค์กร กรีนพีซ [2] ในช่วงครึ่งปีแรกของปี พ.ศ. ๒๕๖๐ พบว่า 54% ของปริมาณฝุ่นละอองขนาดเล็กหรือ PM2.5 ในประเทศไทยเกิด จากการเผา ไหมในที่โล่ง ซึ่งรวมถึงการเผาแปลงเกษตรและไฟฟ้า โดยพบว่าในหลายๆพื้นที่ ที่ติดตั้งสถานีตรวจวัด คุณภาพ อากาศของกรมควบคุมมลพิษ มีความเข้มข้นของ PM2.5 ที่สูงเกินค่ามาตรฐานไปมาก เช่น ที่ อำเภอแม่สอด จังหวัดตาก มีค่าความเข้มข้นของ PM2.5 อยู่ที่ 116 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ที่ อำเภอศรีภูมิ จังหวัดเชียงใหม่ ตรวจวัดได้ 114 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร โดยขณะที่ข้อเสนอแนะของ องค์กรอนามัยโลก ค่ามาตรฐาน PM2.5 ไม่ควรเกิน 25 ไมโครกรัมต่อ ลูกบาศก์เมตร สะท้อนให้เห็น ว่า ความเข้มข้นของ PM2.5 ในพื้นที่ต่างๆ ยังอยู่ในระดับที่น่าเป็นห่วง ซึ่งมีผลกระทบต่อ สุขภาพและ สวัสดิภาพของประชาชน

แนวทางการแก้ไขปัญหาดังกล่าวยังพึ่งพิงกับข้อมูลจากดาวเทียมโดยเป็นการตรวจจับจุด ความร้อนหรือ Hotspot ถึงแม้ข้อมูลจากดาวเทียมจะสามารถแสดงพิกัดของจุดความร้อนบนตำแหน่ง ละติจูดและลองจิจูด ได้แต่พิกัดนั้นยังครอบคลุม พื้นที่ในวงกว้างจึงเป็นที่ยากต่อการระบุตำแหน่งของ การเกิดไฟฟ้าซึ่งเป็นต้นกำเนิดของฝุ่นละอองขนาดเล็กได้ อย่างไรก็ตาม ข้อมูลดังกล่าวยังมีข้อจำกัดอยู่ มาก เนื่องจากช่วงเวลา ดาวเทียมพาดผ่านประเทศไทยนั้นมีกรอบเวลาที่จำกัด ทำให้ไม่สามารถแสดง ข้อมูลที่เป็นลักษณะเรียลไทม์ได้ ดังนั้น เพื่อแก้ไขปัญหาดังกล่าวได้เฉพาะจงเจาะมากขึ้น อีกแนวทาง การแก้ปัญหา หนึ่งคือการติดตั้งสถานีตรวจสอบคุณภาพอากาศ (Air Quality Monitoring Station หรือ AQM) ที่สามารถตรวจวัดค่า มลภาวะทางอากาศในหลากหลายมิติที่มีความเที่ยงตรงสูง เช่น ค่า ปริมาณฝุ่นพิษขนาดเล็ก (PM2.5), ปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) และ คาร์บอนไดออกไซด์

(CO2), อุณหภูมิ และความชื้นสัมพัทธ์ โดยในประเทศไทยได้มีหน่วยงาน กรมควบคุมมลพิษที่เป็นผู้รับผิดชอบติดตั้งสถานีในพื้นที่ต่างๆ ทั่วประเทศ¹ แต่อย่างไรก็ตาม สถานีเหล่านี้มีราคาที่สูงมากทั้งตัวอุปกรณ์ ค่าบริการติดตั้งและการบำรุงรักษา จึงมีความจำเป็นที่ต้องพึ่งพาการนำเข้าอุปกรณ์และบริการจากต่างประเทศจึงทำให้มีต้นทุนค่าใช้จ่ายสูงส่งผลให้จำนวนสถานีนั้นยังไม่ครอบคลุม ยกตัวอย่างเช่น ในเขตพื้นที่ ภาคเหนือตอนล่างมีการติดตั้งเพียงหนึ่งสถานี ที่ อำเภอ แม่สอด จังหวัดตาก ทั้งๆที่เป็นพื้นที่ที่มีปริมาณฝุ่นละอองขนาดเล็ก สูงมากจากหมอกควัน หรือ อย่างเช่น ในเขต พื้นที่จังหวัด เชียงราย และ แม่ฮ่องสอน ซึ่งเป็นพื้นที่ที่มีปัญหาหมอกควันจากไฟป่า อย่างหนักหน่วงในทุกๆปี ได้มีการติดตั้งสถานีตรวจวัดเพียงหนึ่งถึงสองสถานีเท่านั้น ซึ่งจากการขาดแคลนสถานีฐานดังกล่าว ประกอบกับข้อมูลจากดาวเทียมที่มีข้อจำกัดในเรื่องของเวลานั้นทำให้หน่วยงานที่เกี่ยวข้อง เช่น หน่วยงานพิทักษ์ไฟป่า หรือ ประชาชน ทั่วไปขาดการรับรู้ข่าวสารและการระวังภัยพิบัติที่เกิดจากปัญหาหมอกควัน

ในทางกลับกันเทคโนโลยีการพัฒนาอุปกรณ์เซ็นเซอร์ขนาดเล็ก (Microsensor) มีความก้าวหน้าไปมาก โดยอุปกรณ์เซ็นเซอร์เหล่านี้สามารถตรวจจับปริมาณฝุ่นละอองขนาดเล็ก (PM 1 / 2.5 /10) และ มลพิษอื่นๆ เช่น ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์, ก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์, ไนโตรเจนไดออกไซด์ ประสานกับเทคโนโลยี LoRa ที่ทำให้อุปกรณ์เซ็นเซอร์ขนาดเล็กเหล่านี้ส่งข้อมูลได้ในระยะไกลมายังเกตเวย์เพื่อเชื่อมต่อไปยัง เซิร์ฟเวอร์ที่อยู่บนอินเทอร์เน็ตจึงสามารถรายงานสถานการณ์การตรวจวัดปริมาณมลพิษทางอากาศได้แบบเรียลไทม์ อย่างไรก็ตามการให้บริการโครงข่าย LoRa ในประเทศไทยยังถูกจำกัดอยู่ในเฉพาะเมืองใหญ่ๆ ในพื้นที่เสี่ยงภัยที่อยู่ห่างไกลในจังหวัดภาคเหนือยังคงไม่มีสัญญาณหรือโครงข่าย LoRa ให้ บริการ ดังนั้นการพัฒนาแพลตฟอร์มและโครงข่ายไอโอทีที่ใช้เทคโนโลยี LoRa ร่วมกับอุปกรณ์เซ็นเซอร์ขนาดเล็ก จึงเป็นสิ่งจำเป็นที่จะช่วยบรรเทาผลกระทบจากปัญหาหมอกควันซึ่งทวีความรุนแรงขึ้นในทุกๆปี คณะวิจัยจึงมีแนวคิดในการพัฒนา แพลตฟอร์มไอโอทีสำหรับการเฝ้าระวังไฟป่าและมลพิษทางอากาศด้วยเทคโนโลยีโลล่าโดยวัตถุประสงค์และข้อเสนอโครงการประกอบดังนี้

1.2 วัตถุประสงค์ และขอบเขตของโครงการ

- 1 เพื่อพัฒนาระบบอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง (Internet of Things) สำหรับการตรวจเฝ้าระวังภัยพิบัติหมอกควัน ในพื้นที่เสี่ยงภัย

¹ (<http://air4thai.pcd.go.th/webV2/>)

2. เพื่อประยุกต์ใช้คลื่นความถี่สาธารณะกับเทคโนโลยี LoRa ในภารกิจป้องกันและบรรเทาสาธารณภัย
3. ออกแบบและพัฒนาโครงข่ายไร้เลสเซ็นเซอร์เน็ตเวิร์คด้วยโปรโตคอล LoRaWAN
4. เพื่อแยกแยะสาเหตุและชนิดของกลุ่มหมอกควัน โดยมุ่งเป้าไปที่กลุ่มหมอกควันที่เกิดจากไฟป่าและรายงานไปยังหน่วยงานที่เกี่ยวข้องเพื่อยับยั้งภัยพิบัติได้ทันที่
5. เพื่อรายงานข้อมูลคุณภาพอากาศที่น่าเชื่อถือได้และทันที่ในพื้นที่ที่ได้รับผลกระทบจากปัญหามลพิษทางอากาศและวิกฤตการณ์หมอกควัน

1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

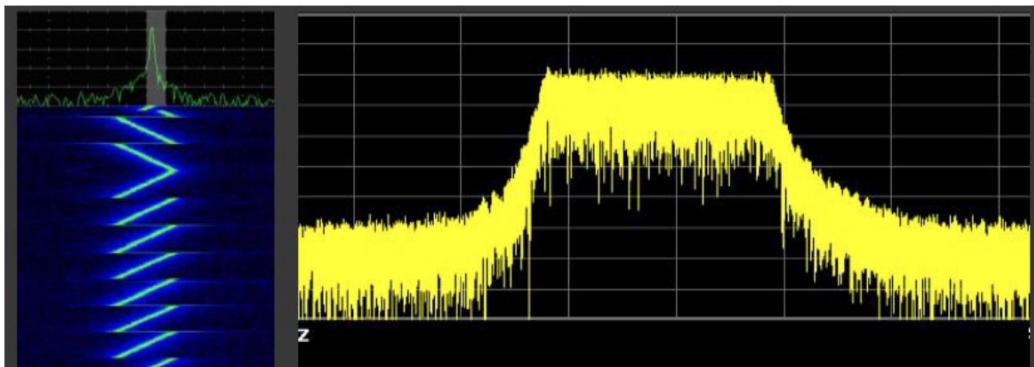
1. มีระบบโครงข่ายไร้เลสเซ็นเซอร์เน็ตเวิร์คที่ทำงานบนเทคโนโลยี LoRaWAN
2. มีระบบโครงข่ายเฝ้าระวังภัยพิบัติจากปัญหาหมอกควันและไฟป่าด้วยเทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง (Internet of Things)
3. สามารถนำคลื่นความถี่สาธารณะในกิจการโทรคมนาคมมาใช้ประโยชน์ได้อย่างเต็มความสามารถทั้งนี้ทำให้ ทรัพยากรคลื่นความถี่ถูกใช้งานได้อย่างเกิดประสิทธิภาพสูงสุด
4. มีแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่สามารถคาดการณ์พฤติกรรมและการเคลื่อนที่ของหมอกควันได้

บทที่ 2

ทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

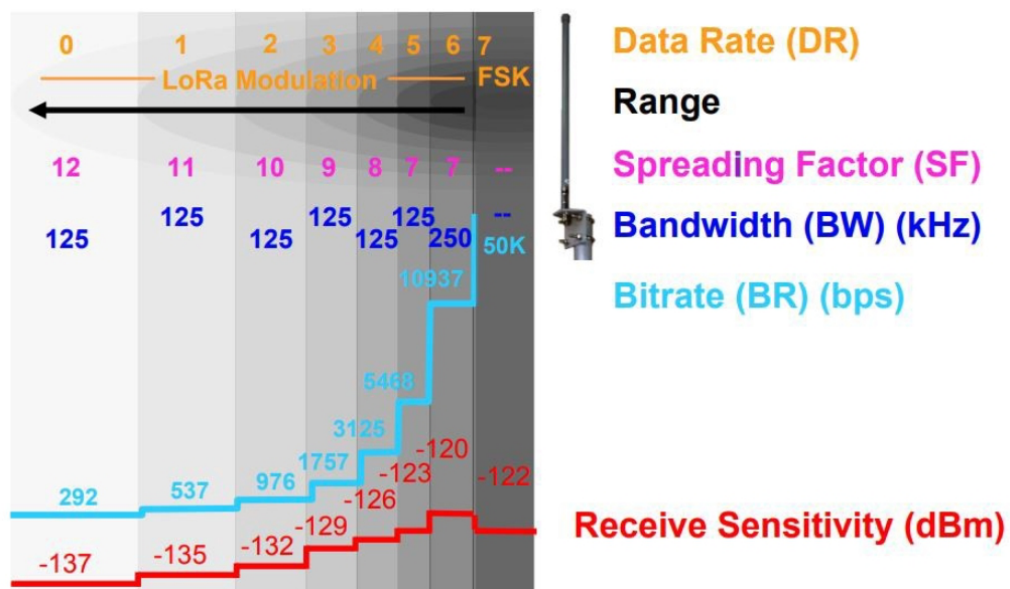
2.1 เทคโนโลยี LoRa และ LoRaWAN

LoRa ทำงานบนย่านความถี่สาธารณะ ที่ไม่ต้องใช้ใบอนุญาต (unlicensed sub-GHz ISM band) ในประเทศสหรัฐอเมริกา ใช้ย่านความถี่ 900 MHz ในยุโรปจะใช้ในย่าน 860 MHz โดยในประเทศไทยได้รับอนุญาตให้ใช้งานในย่านความถี่ 920 - 925 MHz โดยจะมีแบนด์วิธให้เลือกใช้คือ 125KHz, 250KHz และ 500KHz ขนาดของเฟลทโทลด์หรือพื้นที่สำหรับข้อมูลจะถูกจำกัดอยู่ที่ 250 Bytes และสามารถส่งข้อมูลได้ไกลถึงระยะ 5-15 กิโลเมตร โดยอุปกรณ์สามารถมีอายุการใช้งานยาวนานถึง 5-10 ปี เนื่องจากมีการบริโภคพลังงานที่ต่ำ [3] โดยทั่วไปแล้ว LoRa ถูกกำหนดให้ทำงานในฟิสิคอลลเอเยอร์ (Physical Layer) และ LoRaWAN จะถูกกำหนดให้ทำงานบนแมค (Mac) และเน็ตเวิร์ค (Network) เลเยอร์ ในโปรโตคอลของ ฟิสิคอลลเอเยอร์ของ LoRa เทคโนโลยีใช้เทคนิค Chirp Spread Spectrum (CSS) ซึ่งเป็นสัญญาณที่ความถี่ผันเปลี่ยนไปในเชิงเส้นตรงกับเวลาในช่วงแบนด์วิธที่กำหนดดังแสดงใน รูปที่ 1 ซึ่งการกระจายสัญญาณในลักษณะนี้จะทำให้สัญญาณของ LoRa มีความยืดหยุ่นต่อสัญญาณรบกวน, การเกิดเฟดดิ้ง และการแทรกสอด ในการมอดูเลตสัญญาณ LoRa นั้น จะถูกกำหนดด้วยค่า Spreading Factor (SF) ตั้งแต่ 7-12 แพ็คเก็ตที่เข้ารหัสด้วยค่า SF ที่สูงจะใช้เวลาเคลื่อนที่ในอากาศ (air time) สูงกว่า และมีค่า ดาต้าเรทที่ต่ำ แต่จะมี ประสิทธิภาพในการทนต่อสัญญาณรบกวนได้ดีกว่าค่า SF ที่ ต่ำดังแสดงใน รูปที่ 1 ค่าเซนซิวิตีวิตี้ของสัญญาณ LoRa จะมีค่าต่ำซึ่งหมายถึงมีความทนทานต่อสัญญาณรบกวนได้ดี เมื่อมอดูเลตด้วย SF ที่สูงแต่จะมีค่าบิตเรทในการรับส่งข้อมูลที่ต่ำ [1]



รูปที่ 1 ลักษณะสัญญาณ LoRa

ในส่วนของ LoRaWAN จะหมายถึง โปรโตคอลที่ทำงานเสมือนแมคเลเยอร์ [4] โดยที่ จะมีเกตเวย์ในการส่งต่อข้อมูลที่รับคำสั่งจากเซิร์ฟเวอร์ โดยที่การกำหนดค่าต่างๆ เช่น ดาต้าเรท, การควบคุมสัญญาณตอบรับ (Acknowledgement) จะถูกกำหนดมาจากเซิร์ฟเวอร์ โดย LoRaWAN สามารถทำงานได้ในสองโหมดเพื่อที่จะควบคุมเวลาเคลื่อนที่ในอากาศของ LoRaWAN แพ็คเก็ต (air time) และการชนกันของข้อมูล โดยโหมดแรกคือ ALOHA MAC ที่สามารถให้อุปกรณ์ end-node สามารถส่งข้อมูลได้ทันทีหลังจากอุปกรณ์ทำงานและจะใช้เวลาเว้นว่างแบบ เอ็กซ์โปเนนเชียล (Exponential back-off) เมื่อเกิดการชนกันของข้อมูล ส่วนโหมดที่สองจะใช้เทคนิค TDMA scheduler โดยที่เน็ตเวิร์คเซิร์ฟเวอร์จะเป็นคนกำหนดช่องสัญญาณ ให้กับ end-node ในการรับส่งข้อมูล



รูปที่ 2 การมอดดูเลชั่นของสัญญาณ LoRa ด้วยค่า SF ที่แตกต่างกัน

2.2 คุณสมบัติของสัญญาณ LoRa

LoRa มีคุณสมบัติเด่นหลายประการ ที่เหมาะสม แก่การนำมาพัฒนาแพลตฟอร์มไอโอที สำหรับการเฝ้าระวังไฟฟ้า และมลพิษทางอากาศ ได้แก่ 1) การสื่อสารระยะไกล 2) อุปกรณ์มีราคาถูก และสามารถพัฒนาต่อยอดได้ง่าย 3) อุปกรณ์มีอายุการใช้งานที่ยาวนาน 4) เกตเวย์มีความสามารถในการรับข้อมูลจากหลายโหนดได้พร้อมกัน 5) มีความยืดหยุ่นและทนทานต่อการลดทอนสัญญาณ โดยได้มีการศึกษาและทดสอบในรายงานวิชาการมาแล้ว [5]

2.2.1 การสื่อสารระยะไกล

เทคโนโลยี LoRa สามารถทำให้การรับส่งข้อมูลได้ในระยะที่ไกลมาก โดยสภาพแวดล้อมที่ไม่มีสิ่งกีดขวางบดบัง สัญญาณ (Line-Of-Sight) ด้วยการมอดูเลตด้วย SF โค้ด 12 สามารถทำการส่งข้อมูลได้สูงสุดถึง 9 กิโลเมตร ด้วยอัตราการรับข้อมูลสำเร็จ Packet Reception Ratio (PRR) มากกว่า 70% และด้วยค่าน้อยที่สุดของ SF โค้ด 7 สามารถส่งข้อมูลได้ในระยะสูงสุด 5 กิโลเมตร ด้วย PRR มากกว่า 70% เช่นกัน [6][7] ในทางกลับกันในสภาพที่มีสิ่งกีดขวาง (Non-Line-of-Sight) โดยมีสิ่งกีดขวางสัญญาณ อุปกรณ์ LoRa สามารถส่งข้อมูลได้สูงสุด 2 กิโลเมตร [8] ได้มีการศึกษาทดลองการรับส่งข้อมูลด้วยเทคโนโลยีโล่ล่ากับ สภาพแวดล้อมที่มีต้นไม้สูงปกคลุมโดยพบว่าคลื่นโลล่ามีการลดทอนที่ต่ำสามารถใช้งานในพื้นที่ที่มีต้นไม้สูง [9] อย่างไรก็ตามระยะของการติดต่อสื่อสารยังคงมีผลกระทบมากจากการตั้งค่าแบนด์วิธ, ค่า SF , กำลังในการส่ง และค่า coding rate [10]

2.2.2 อุปกรณ์อายุการใช้งานที่ยาวนาน

อุปกรณ์ LoRa (end-node) มีอัตราการสิ้นเปลืองพลังงานอยู่ที่ ประมาณ 120-150 mW ระหว่างการส่งข้อมูล และใช้พลังงานอยู่ที่ 10-15 mW สำหรับส่วน MCU (Micro Controller Unit) ที่ปฏิบัติการในส่วนของการใช้งานคลื่นความถี่และการประมวลผลของแพคเกจจอร์ ด้วยระดับพลังงานที่ต่ำนี้สามารถยืดอายุการใช้งานได้ถึง 2-5 ปี โดยมีค่าเบี่ยงเบนตั้งแต่ 0.1% ถึง 10% [5]

2.2.3 เกตเวย์มีความสามารถในการรับข้อมูลจากหลายโหนดได้พร้อมกัน (Point to Multipoint Communication)

LoRa เกตเวย์สามารถรองรับการรับส่งข้อมูลได้ถึง 8 ช่องสัญญาณพร้อมๆกัน ถึงแม้ end-node จะใช้ SF โค้ดเดียวกัน อุปกรณ์เกตเวย์สามารถรับข้อมูลได้หากใช้ช่องสัญญาณต่างกัน ค่า SF โค้ดที่แตกต่างกัน (SF7 - SF12) มีคุณสมบัติออร์โธโกนอล และสามารถรับส่งข้อมูลในช่องสัญญาณเดียวกันได้ [2]

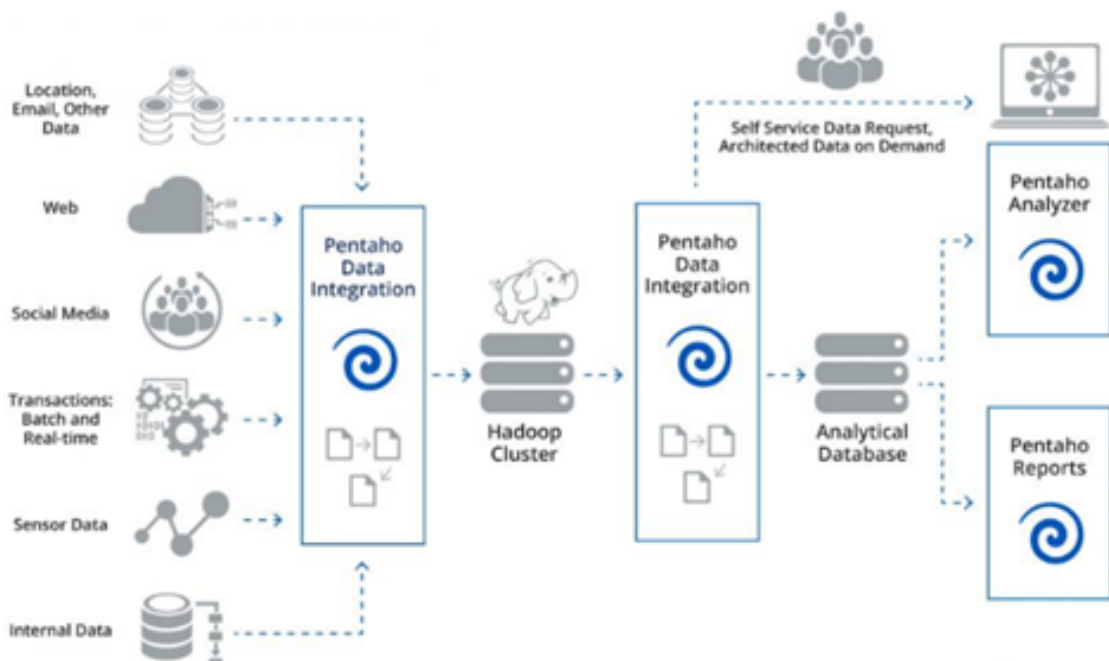
2.2.4 มีความยืดหยุ่นและทนทานต่อการลดทอนสัญญาณ

Liando et al. [5] พิสูจน์แล้วว่า สัญญาณ LoRa มีความทนทานต่อปฏิกิริยาตรีโอบเปลอร์ อุปกรณ์ LoRa (end-node) ที่เป็นโมบายที่วิ่งด้วยความเร็วคงที่สามารถรับข้อมูลสำเร็จด้วย PRR ที่มากกว่า 85% [10]

2.3 การวิเคราะห์ข้อมูล Big Data

จากการพัฒนาด้านอินเทอร์เน็ตและคอมพิวเตอร์ในปัจจุบัน ทำให้เกิดปัญหาประติษฐ์ (Artificial Intelligence) สมาร์ทโฟน และ IoT (Internet of Things) ส่งผลให้เกิดรูปแบบข้อมูลใหม่ๆ ที่มีความหลากหลาย การวิเคราะห์ข้อมูล Big Data (Big Data Analytics) จึงจำเป็นต้องใช้วิธีหรือเทคนิคการวิเคราะห์ข้อมูลขั้นสูงที่สามารถจัดการกับข้อมูลที่มีความหลากหลายทั้งทางด้านแหล่งกำเนิดที่มา รูปแบบ และโครงสร้างข้อมูล รวมถึงขนาดที่มหาศาลของข้อมูล การวิเคราะห์ Big Data ด้วยเทคนิคที่เหมาะสมจะให้นักวิเคราะห์ นักวิจัย หรือนักธุรกิจ สามารถมีข้อมูลสำหรับการตัดสินใจอย่างรวดเร็วซึ่งไม่สามารถกระทำได้หากใช้ระบบการจัดการข้อมูลแบบดั้งเดิม ได้แก่ ระบบการจัดการฐานข้อมูลเชิงสัมพันธ์ ดังนั้นการใช้เทคนิควิเคราะห์ขั้นสูง อาทิ การเรียนรู้ของเครื่องจักร (Machine Learning) การวิเคราะห์คาดการณ์ (Predictive Analytics) การทำเหมืองข้อมูล (Data Mining) และสถิติ (Statistics) จะเป็นประโยชน์ในการรับรู้ข้อมูลเชิงลึกเพื่อการตัดสินใจที่รวดเร็วและถูกต้อง

เมื่อประยุกต์เทคนิควิเคราะห์ขั้นสูงสำหรับ Big Data การวิเคราะห์จะเน้นไปที่แนวโน้มของการนำไปใช้ควบคู่กับระบบ IoT ดังนั้นการวิเคราะห์จึงเน้นไปในลักษณะ Pipeline Data Analytics ที่มีความต่อเนื่องของข้อมูลไหลเข้า จัดเก็บ วิเคราะห์ คาดการณ์ และผลลัพธ์ที่ได้ ดังแสดงใน รูปที่ 3



รูปที่ 3 การวิเคราะห์ข้อมูลแบบ Pipeline Data Analytics [12]

หนึ่งในซอฟต์แวร์ที่เป็นที่นิยมสำหรับการวิเคราะห์ข้อมูลจะเป็นซอฟต์แวร์โอเพนซอร์ส (Open Source Software – OSS) คือซอฟต์แวร์ลิขสิทธิ์ที่มีไลเซนส์ แบบโอเพนซอร์สซึ่งมีลักษณะต่างจากไลเซนส์ของซอฟต์แวร์ทั่วไปคือผู้พัฒนาเจ้าของซอฟต์แวร์จะอนุญาตให้ผู้ใช้ติดตั้งและใช้งานได้อย่างไม่จำกัดทั้งจำนวนและรูปแบบการใช้งานไม่ว่าจะเป็นการใช้งานส่วนตัวในเชิงการค้าหรือในองค์กร นอกจากนี้ยังอนุญาตและสนับสนุนให้เรียนรู้ทำความเข้าใจ การทำงานของ ซอฟต์แวร์โดยการเผยแพร่ต้นฉบับ (Source Code) ของซอฟต์แวร์ออกมาและอนุญาตให้แก้ไขโค้ดปรับปรุงให้ตรงตาม ต้องการได้จาก รูปที่ 3 ซอฟต์แวร์ดังกล่าวประกอบด้วย Pentaho Data Integration สำหรับการจัดการข้อมูลให้อยู่ในรูปแบบที่ต้องการเพื่อนำไปวิเคราะห์ในขั้นตอนต่อไป Hadoop Cluster สำหรับจัดเก็บและเรียกใช้ข้อมูลและ Analytical Software ได้แก่ R-package ซึ่งเป็นซอฟต์แวร์ทางด้านสถิติเพื่อวิเคราะห์และคาดการณ์ข้อมูลนำไปสู่การตัดสินใจที่หรือการวางแผนงานที่เหมาะสมต่อไป [11]

2.3.1 การประยุกต์ใช้ Big Data กับงานวิจัย

ในปัจจุบันพบว่าหลากหลายหน่วยงานด้านสิ่งแวดล้อมระดับชาติและนานาชาติรวมถึงมหาวิทยาลัยต่างๆ ได้ประยุกต์ Big Data มาใช้ในงานวิจัยและการวิเคราะห์ข้อมูลเพื่อสนับสนุนการตัดสินใจที่เกี่ยวข้อง ดังตัวอย่างที่กำลังจะกล่าวถึงในหัวข้อย่อยถัดไปที่เน้นผลสำเร็จของการประยุกต์ Big Data

Big Data กับงานวิจัยด้านสิ่งแวดล้อม

องค์กรพิทักษ์สิ่งแวดล้อมและการสาธารณสุขแห่งสหรัฐอเมริกา (USEPA and Public Health) ได้ประยุกต์ใช้ Big Data ในงานด้านสิ่งแวดล้อมที่เน้นในเรื่อง อนามัยสิ่งแวดล้อมและสาธารณสุขโดยการปรับปรุงระบบวิเคราะห์การตรวจวัดสารเคมีและผลกระทบทางพิษวิทยาของสารเคมีต่างๆ ที่ถูกนำมาใช้ในอุตสาหกรรมโดยปกติการตรวจวัดดังกล่าวจะดำเนินการโดยเก็บตัวอย่างในพื้นที่ต่างๆ แล้ววิเคราะห์ข้อมูลในพื้นที่นั้นๆ แต่ด้วยการพัฒนาทางด้าน Big Data Analytics การวิเคราะห์ข้อมูลสามารถดำเนินการ ได้ครอบคลุมพื้นที่และช่วงเวลาที่กว้างขึ้น (ในภาพรวมของประเทศ) ทำให้เห็นการเปลี่ยนแปลงของข้อมูลและนำไปสู่การคาดการณ์ผลในอนาคตเพื่อเตรียมกำหนดมาตรการในการรองรับเพื่อลดผลกระทบดังกล่าวได้ทัน่วงที และสามารถเติมข้อมูลที่ขาดหายไปในพื้นที่โดยใช้การคาดการณ์ได้ ในปัจจุบัน USEPA อยู่ระหว่างการพัฒนา ระบบวิเคราะห์เพื่อเพิ่มความถูกต้องสำหรับการคาดการณ์

Big Data กับงานทางด้านภูมิศาสตร์ (Geographic Data)

แผนที่ที่มีความละเอียดและถูกต้องแม่นยำเป็นเครื่องมือสำคัญในงานด้านสิ่งแวดล้อมหรืองานที่เกี่ยวข้อง ตั้งแต่ การเดินทาง การสำรวจทางภูมิศาสตร์ จนถึงฐานข้อมูลสารสนเทศภูมิศาสตร์

(GIS) งานต่างๆ เหล่านี้ มีจำนวนข้อมูลมหาศาลเพื่อนำมาแปลงและสร้างเป็นฐานข้อมูลดิจิทัลเพื่อนำไปสู่การวิเคราะห์เชิงพื้นที่และประยุกต์กับงานด้านอื่นๆ อาทิ การจัดทำแผนผังการใช้ประโยชน์ที่ดิน การวางผังเมือง การเกษตร หนึ่งในตัวอย่างที่เห็นได้ชัดคือการบรรเทาเหตุอุทกภัยและพิบัติภัย ข้อมูลการวิเคราะห์ที่แม่นยำและนำมาใช้ได้ทัน่วงทีสามารถนำแบกไซหรือบรรเทาปัญหาด้านพิบัติภัยที่เกิดขึ้น ซึ่งพิบัติภัยที่พบได้บ่อย ได้แก่ น้ำท่วม แผ่นดินไหว และไฟฟ้า

Big Data กับงานวิจัยด้านการเปลี่ยนแปลงภูมิอากาศและการสำรวจโลก (Climate Change and Planetary Monitoring)

สหราชอาณาจักรได้มีการจัดตั้งโครงการสำรวจการเปลี่ยนแปลงภูมิอากาศและการสำรวจโลก โดยจัดเก็บข้อมูลต่างๆ จากทั่วโลก ทำให้มีข้อมูลจำนวนมากในระบบฐานข้อมูลที่สร้างขึ้น เพื่อนำมาวิเคราะห์ข้อมูลทางด้านสิ่งแวดล้อม และผลลัพธ์ที่ได้ จากการนำ Big Data เข้ามาใช้ทำให้สามารถลดค่าใช้จ่ายสำหรับเตรียมพื้นที่ในการจัดเก็บข้อมูลด้วยการจัดทำระบบประมวลผลที่สามารถเชื่อมต่อและดึงข้อมูลจากหน่วยงานหรือองค์กรที่เกี่ยวข้องในประเทศต่างๆ ทำให้ลดความซ้ำซ้อนของการจัดเก็บ โดยยังมีประสิทธิภาพในการวิเคราะห์เท่าเดิม นอกจากนี้ข้อมูลดังกล่าวยังถูกถ่ายทอดไปสู่องค์กรหรือหน่วยงานวิจัยอื่นๆ เพื่อทำงานวิจัยร่วมกันก่อให้เกิดผลสัมฤทธิ์ที่เพิ่มมากขึ้น และเป็นประโยชน์ต่อองค์กรหรือหน่วยงานขนาดเล็ก

ประโยชน์ที่ได้รับจาก Big Data ในงานด้านสิ่งแวดล้อม

- ความรวดเร็วในการเรียกใช้และวิเคราะห์ข้อมูลเป็นจุดเด่นที่สำคัญของ Big Data การจัดเก็บข้อมูลในปัจจุบันสามารถดำเนินการได้โดยใช้ระบบคลัสเตอร์ของคอมพิวเตอร์ ทำให้มีค่าใช้จ่ายที่ต่ำลง และไม่มี ความจำเป็นต้องใช้ระบบการจัดเก็บที่มีค่าใช้จ่ายในการลงทุนสูง เช่น Super Computer หรือ Server
- ความคลาดเคลื่อนในที่นี่ให้ความสำคัญไปที่ขนาดของข้อมูลตัวอย่าง (Sample Size) การวิเคราะห์ข้อมูลโดยทั่วไปที่ใช้กลุ่มตัวอย่างในการวิเคราะห์ข้อมูลส่งผลให้เกิดความคลาดเคลื่อนได้ ในทางตรงข้ามการวิเคราะห์ข้อมูลที่ใช้ข้อมูลทั้งหมดในระบบ Big Data ด้วยจำนวนข้อมูลที่มีความคลาดเคลื่อนจากการวิเคราะห์ก็จะลดน้อยลง
- การประยุกต์ Big Data กับงานด้านสิ่งแวดล้อม อาทิ การลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก หรือคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) ในบรรยากาศ เนื่องจาก CO₂ ที่ถูกปล่อยสู่ชั้นบรรยากาศมีที่มาจากหลากหลายแหล่งกำเนิด การวิเคราะห์ข้อมูลที่รวดเร็วสามารถนำไปสู่การเข้าใจและรู้ที่มาของแหล่งกำเนิดนั้นๆ นำไปสู่นโยบายที่เหมาะสมสำหรับการลดการปล่อย CO₂

ตัวอย่างเช่น เมือง Portland ในรัฐ Oregon ใช้การวิเคราะห์ข้อมูล Big Data เพื่อสั่งการเปิดปิดหลอดไฟฟ้าที่บริเวณสี่แยกการจราจรของทั้งเมืองให้เหมาะสมกับการใช้งาน การปรับเปลี่ยน ดังกล่าว ทำให้ลดการใช้พลังงานและลดการปล่อย CO2 ไปได้ 157,000 ตัน/ปี

- การวิเคราะห์ข้อมูล Big Data และการแสดงผลที่รวดเร็วนำไปสู่การตัดสินใจที่ถูกต้องและรวดเร็วขึ้น ท้นต่อสถานการณ์สิ่งแวดล้อมที่มีการเปลี่ยนแปลงสูง เช่น การจัดการพิบัติภัย พายุ น้ำท่วม เป็นต้น

2.4 สถานการณ์ไฟฟ้าและหมอกควันของไทย

ปัญหาหมอกควันทางอากาศจากไฟป่าโดยปรกติเกิดขึ้นทางภาคเหนือของประเทศไทยช่วงฤดูหนาว ต่อเนื่องฤดูแล้ง ตั้งแต่ปลายเดือนมกราคมถึงเมษายน โดยคุณภาพอากาศที่แย่ที่สุดเนื่องจากหมอกควันจากไฟ (ไฟป่าและการเผาในที่โล่ง) ส่วนใหญ่จะเกิดช่วงเดือนมีนาคม เหตุเพราะอากาศในช่วงเวลานั้นมักจะเกิดสภาวะอากาศปิดลงนิ่ง ส่งผลให้หมอกควันไม่สามารถลอยตัวออกจากพื้นที่ได้ โดยที่ผ่านมาจะเน้นปัญหาเพียง 9 จังหวัดภาคเหนือ คือ เชียงใหม่ เชียงราย แม่ฮ่องสอน ลำพูน น่าน ลำปาง แพร่ ตาก พะเยา แต่ในปี พ.ศ. 2564 มีการขยายเพิ่มเติมอีก 8 จังหวัด คือ กำแพงเพชร พิจิตร พิษณุโลก สุโขทัย อุตรดิตถ์ นครสวรรค์ เพชรบูรณ์ และอุทัยธานี รวมเป็น 17 จังหวัดภาคเหนือ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าผู้ร่วมแก้ไขปัญหามีความตระหนักถึงการเคลื่อนตัวของหมอกควันซึ่งมิใช่เข้ามาจากต่างประเทศเท่านั้นแต่ยังเข้ามาจากจังหวัดข้างเคียงด้วย โดยในปีพ.ศ. 2565 มีฝนตกช่วงหน้าแล้งหรือหน้าไฟอย่างผิดปกติเหมือนปีพ.ศ. 2564 โดยถือว่าเป็นปีลานินญา ส่งผลให้มีผลกระทบเรื่องหมอกควันน้อยลงเป็นเงาตามตัวไปด้วย ทั้งนี้ต้องตระหนักด้วยว่าเมื่อมีไฟน้อยนั้นหมายถึงการสะสมของเชื้อเพลิงบนพื้นป่ามีมากขึ้น และจะเป็นเชื้อไฟในอนาคตเมื่อความแห้งแล้งกลับมาอยู่ในสภาวะปกติหรือมีสภาวะแห้งแล้งผิดปกติโดยคลื่นความร้อนที่เกิดสลับกันไปมาทั่วโลกในปีพ.ศ. 2565 นี้ ซึ่งอยู่เหนือการควบคุมของมนุษย์

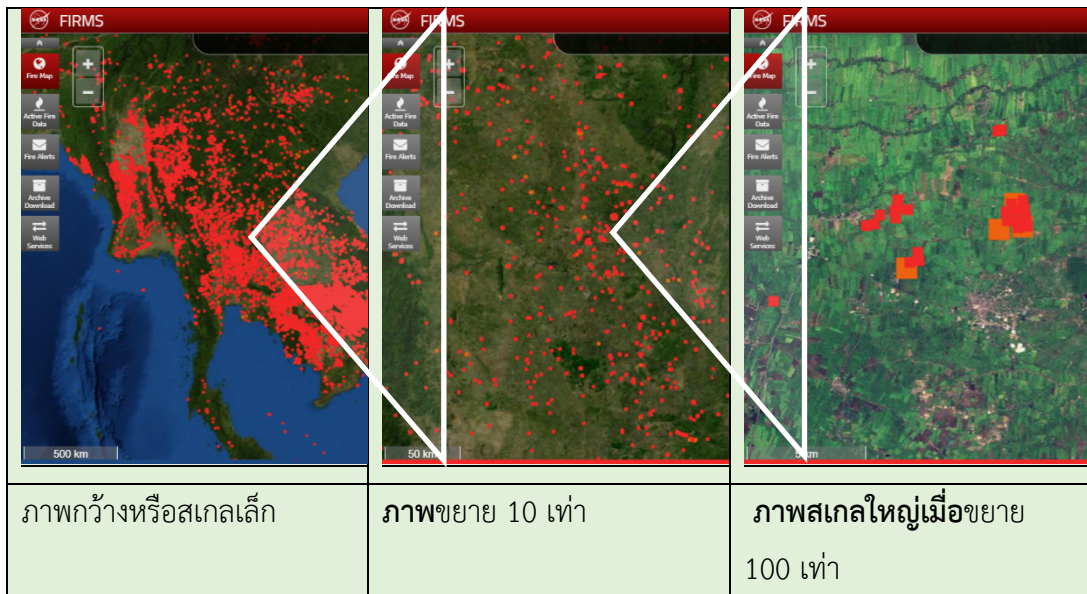
การเกิดไฟป่าของประเทศไทยนั้นเกิดจากหลายสาเหตุแต่เป็นการจงใจจุดโดยคนร้อยละ 99.9999% หรือสามารถอนุมานได้ว่าแทบทั้งหมด เนื่องจากการเกิดไฟนั้น องค์ประกอบสามอย่าง อ็อกซิเจน เชื้อเพลิง และความร้อน ต้องมีลักษณะและคุณสมบัติที่สมบูรณ์พร้อมพอดีไฟถึงจะเกิด โดยส่วนใหญ่ไฟจะไม่เกิดถ้าความร้อนไม่ถึงจุดเริ่มการเผาไหม้ ซึ่งเชื้อเพลิงแต่ละชนิดก็มีจุดความร้อนที่แตกต่างกันไป บวกกับขนาดและการเรียงตัวของเชื้อเพลิงที่แน่นหรือแม้แต่ความแห้งยังไม่พอ “คน” จึงเป็นปัจจัยหลักในการที่จะทำให้ความร้อนถึงจุดการเกิดไฟของเชื้อเพลิงลักษณะและขนาดต่างๆ โดยสาเหตุที่พบคือ มีการลักลอบกลั่นแกล้งเผาป่า ถึงกับในบางกรณีมีการบอกกล่าวให้มีการจ้างกันมาเผาก็มี ซึ่งรากฐานของสาเหตุเกิดมาจากความขัดแย้งความไม่พอใจในเรื่องต่างๆนานาสาระพัด แม้แต่

เรื่องส่วนตัว รวมไปถึงนโยบายของรัฐหรือการเมืองทั้งระดับท้องถิ่นถึงระดับชาติ ความขัดแย้งทางการเมือง เรื่องยาเสพติด การลักลอบข้ามเขตการปกครองหรือเขตประเทศ รวมไปถึงสาเหตุ เช่น การหาของป่า การล่าสัตว์ การเลี้ยงสัตว์ การเกษตรกรรม การขยายพื้นที่ทำกิน การทำให้พื้นที่เสื่อมโทรม เพื่อดำเนินการครอบครองต่อไป การลักลอบตัดไม้ ความคึกคะนอง ความประมาทเลินเล่อ ส่วนเรื่องเกษตรกรรมนั้นปัจจุบันได้เริ่มจัดให้มีแบ่งการเผาเตรียมพื้นที่การเกษตรกรรมให้ชัดเจนมากยิ่งขึ้น

ทั้งนี้ไฟต่างๆทั้งในและนอกพื้นที่ป่าอนุรักษ์และป่าสงวนที่ดาวเทียมสำรวจทรัพยากรและภูมิอากาศขององค์การอวกาศนาซ่าประเทศอเมริกาตรวจเจอในประเทศไทยมีน้อยกว่าประเทศข้างเคียงมากในรอบ 20 ปีที่ผ่านมา เหตุเพราะประเทศไทยคือประเทศเดียวในภูมิภาคอาเซียนตอนบน (ไทย ลาว พม่า กัมพูชา และเวียดนาม) ที่มีการจัดการและควบคุมไฟป่าอย่างเป็นระบบโดยหน่วยงานของรัฐ ซึ่งได้เริ่มต้นดำเนินการมาตั้งแต่ปีพ.ศ. 2523 เนื่องจากมีปัญหาหมอกควันบริเวณดอยสุเทพที่ส่งผลกระทบต่อตัวเมืองเชียงใหม่ แต่เพราะเหตุอันใดสี่สิบกว่าปีที่ผ่านมาไฟป่าและหมอกควันยังส่งผลกระทบเรื่อยมา เป็นสิ่งที่ต้องทำความเข้าใจเพิ่มเติมบริบทต่างๆให้มากขึ้นเพื่อเข้าถึงรากฐานของปัญหาอย่างแท้จริง ทั้งนี้มีการบ่นอยู่ตลอดเวลาถึงปัญหา แล้วบางส่วนก็โยนความผิดให้ประเทศข้างเคียง เช่นทางภาคเหนือก็โทษประเทศพม่าและลาว แต่ส่วนใหญ่จะเป็นพม่า ถึงแม้ว่าประเทศลาวมีไฟไหม้มากเหมือนกัน ส่วนทางกรุงเทพมหานคร ก็มีการกล่าวโทษไปยังประเทศกัมพูชา เหตุเพราะมีการตั้งจุดสนใจกับจำนวนฮอตสปอตที่ดาวเทียมตรวจพบเป็นสารระลอกมากเกินไป อันที่จริงการที่มีจำนวนฮอตสปอตมากอาจจะหมายถึงมีแหล่งกำเนิดควันมาก แต่ยังไม่ทราบแน่ชัดว่าพิกัดที่ดาวเทียมตรวจเจอนั้นมีพื้นที่ไฟไหม้ขนาดกว้างใหญ่ขนาดไหน เชื้อเพลิงที่ไหม้เป็นประเภทไหนและมีลักษณะเป็นอย่างไร อีกทั้งลักษณะภูมิประเทศเอื้ออำนวยขนาดไหน และลักษณะภูมิอากาศขณะที่ไหม้เป็นอย่างไร เพร้าเหล่านั้นคือองค์ประกอบของการเกิดควันจากไฟว่าจะเกิดมากหรือเกิดน้อยขนาดไหน ยังมีเรื่องทิศทางและความแรงของลมที่พัดที่แต่ละระดับความสูงต่างๆก็พัดในทิศและความเร็วความแรงที่แตกต่างไม่เหมือนกัน

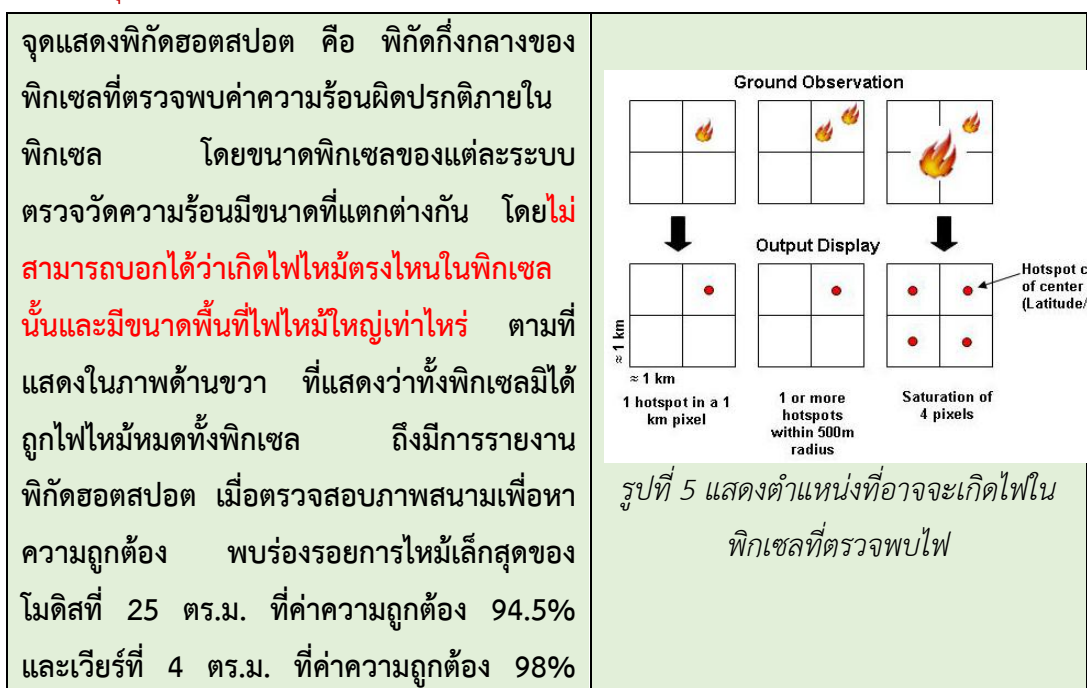
ก่อนอื่นเราต้องทำความเข้าใจให้ตรงกันเสียก่อนว่าข้อมูลฮอตสปอตที่ดาวเทียมตรวจพบ คืออะไร ฮอตสปอต Hotspot หรือ Active Fire Product จากการนำเสนอข้อมูลสู่สาธารณะโดยองค์การบริหารการบินและอวกาศแห่งชาติ (National Aeronautics and Space Administration, NASA) - ระบบ Fire Information for Resource Management System (FIRMS) ประเทศอเมริกา ที่เรานำมาใช้กันกันอย่างกว้างขวาง ก็ยังใช้กันผิดความหมายและเกินขอบเขตคุณสมบัติของตัวข้อมูล โดยมิได้พยายามทำความเข้าใจว่าข้อมูลที่นำมาใช้ในการบริหารจัดการนั้นมีคุณสมบัติครอบคลุมขนาดไหน สัญลักษณ์แสดงพิกัดหรือจุดฮอตสปอต**มิได้แสดงขนาดของพื้นที่ไฟไหม้แต่อย่างใด** ขนาดของจุดเหล่านั้นจะปรับเปลี่ยนไปตามมาตราส่วนของแผนที่ที่แสดง เช่น ภาพซ้ายเป็นภาพมุมกว้างที่ครอบคลุมพื้นที่ได้มาก จึงดูเหมือนว่ามีไฟไหม้เยอะทั่วประเทศไทย แต่เมื่อขยายภาพเข้าไป (กลาง และ

ขวา) จะเห็นว่าจุดเหล่านั้นห่างออกจากกัน ดังแสดงตามภาพที่ 1 ทั้งนี้ตามนิยามของจุดบนแผนที่ ไม่ใช่ใช้สัญลักษณ์ใดเป็นตัวแทนจุด สัญลักษณ์นั้นจะมีได้เป็นตัวแทนขนาดของพื้นที่ ดังนั้นสัญลักษณ์จุดจะมีได้แสดง**ความกว้างของพื้นที่แต่อย่างใด** ข้อเท็จจริงที่สำคัญมากอีกอย่าง คือ ตำแหน่งดังกล่าวแสดงแค่**พิกัดกึ่งกลางของพิกเซล**ที่คาดว่ามီးไฟอยู่ภายในแต่ไม่ทราบว่าตำแหน่งอยู่ที่ใดและจำนวนไฟที่ตรวจพบภายในพิกเซลนั้นๆ ดังแสดงใน รูปที่ 4



รูปที่ 4 เปรียบเทียบการแสดงผลจุดฮอตสปอตที่ตรวจพบด้วยดาวเทียมบนแผนที่ของระบบ NASA FIRMS ที่มีมาตราส่วนแตกต่างกัน ภาพซ้าย 1:500, กลาง 1:50 และ ขวา 1:5 กิโลเมตร ตามลำดับ

พิกัดหรือจุดฮอตสปอต ไม่สามารถบอกได้ว่าเกิดไฟไหม้เป็นพื้นที่เท่าใดและที่ตำแหน่งไหนในพิกเซล



<p>เพราะความร้อนที่ตรวจพบขึ้นอยู่กับประเภท และคุณลักษณะของเชื้อเพลิงและสิ่งแวดล้อม แหล่งข้อมูล: https://earthdata.nasa.gov/faq</p>	
---	--

โดยข้อเท็จจริง ข้อมูลจากดาวเทียม ทั้งจาก เซ็นเซอร์ Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS โมดิส) - บนดาวเทียม Terra-เช้า /Aqua-บ่าย และ เซ็นเซอร์ Visible Infrared Imaging Radiometer Suite (VIIRS เวียร์) - บนดาวเทียม Suomi-NPP/NOAA-20-บ่าย ที่ประเทศลาวแถวจังหวัดหลวงพระบาง ช่วงเดือนมีนาคมมีการเผาเยอะกว่าทางฝั่งพม่ามาก ทำให้ค่า PM_{2.5} ที่ตรวจพบโดย European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF) - Copernicus Atmosphere Monitoring Service (CAMS) - Global Fire Assimilation System (GFAS) มีค่ามากกว่า 1,000 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร (μ/m^3) แต่เนื่องจากประชาชนและอีกวิชาการยังไม่เข้าใจพฤติกรรมควันจริงๆ ว่าที่ความสูงจากระดับน้ำทะเลเท่าไรที่ควันจะถูกลมพัดไปและพัดมาได้ แล้วมีการเกิดการ Mixing ผสมผสานอากาศอย่างไร ในแอ่งกระทะควันลอยเข้าจากภายนอกหรือไม่ และมีลักษณะการเสริมส่งกันแบบไหนอย่างไร เช่น ถ้าบอกว่ามีควันจากนอกพื้นที่เข้ามาในแอ่งกระทะในช่วงเวลากลางคืนเข้ามาผสมได้ แล้วทำไมควันถึงได้ลอยลงมาผสมกับควันด้านในได้ แต่ควันด้านในกลับไม่ลอยออกไปด้านนอกของ Mixing Height อะไรกีดกันควันเหล่านั้นไว้ภายในแอ่งกระทะ แล้วทำไมค่าที่เครื่องวัดคุณภาพอากาศที่อยู่ระดับพื้นผิวโลกสามารถวัดค่า PM_{2.5} และ PM₁₀ ได้น้อยลงในเวลากลางคืน ทั้ง ๆ ที่มีควันไฟจากด้านนอกเข้ามาผสมกับควันด้านใน ทั้งๆ ที่ค่าที่วัดได้ก็ควรที่จะเบาบางลง ซึ่งข้อมูลแลดูขัดแย้งในตัวเองอยู่ เพราะถ้ามีการเข้ามาผสมเช่นนั้นจริง มันต้องส่งผลให้คุณภาพอากาศที่แยกลง มิใช่ดีขึ้นอย่างข้อมูลที่ได้เก็บได้ ซึ่งยังไม่สามารถระบุสาเหตุได้แน่ชัด หรือเพราะ Boundary Layer ชั้นบรรยากาศที่กีดกันขยายตัวเพิ่มขึ้นส่งผลให้พื้นที่ที่ควันสามารถลอยอยู่ขยายตัวเพิ่มพื้นที่มากขึ้น ส่งผลให้ถึงแม้ว่ามีควันข้างนอกเข้ามาผสมจริง แต่ในบางครั้งค่าความเข้มข้นของควันที่ผสมอยู่ในอากาศบริเวณพื้นดินที่เครื่องวัดคุณภาพอากาศกลับเจือจางลดลง แล้ว Boundary Layer ดังกล่าวก็ค่อยๆ ลดลงจนถึงระดับเพิ่มความเข้มข้นของควันจนค่าที่วัดได้จากเครื่องวัดคุณภาพอากาศด้านในวัดค่าได้เพิ่มขึ้น หรือเกิดจากลักษณะและคุณสมบัติทางธรรมชาติอื่นๆ ซึ่งคำอธิบายจากหลายฝ่ายผู้ที่บอกว่ารู้ทั้งหลายจนถึงบัดนี้ก็ยังไม่สามารถอธิบายให้ความชัดเจนอย่างง่ายๆ ได้ ดังนั้นเราต้องค้นหาความกระจ่างเรื่องนี้ให้สิ้นข้อสงสัยกันเสียที อย่าพยายามดำเนินการแก้ไขปัญหาไปเรื่อยๆ โดยไม่ทำความเข้าใจ Dynamic หรือพลวัตของหมอกควัน กันต่อไปเลย ว่าเหตุเพราะ

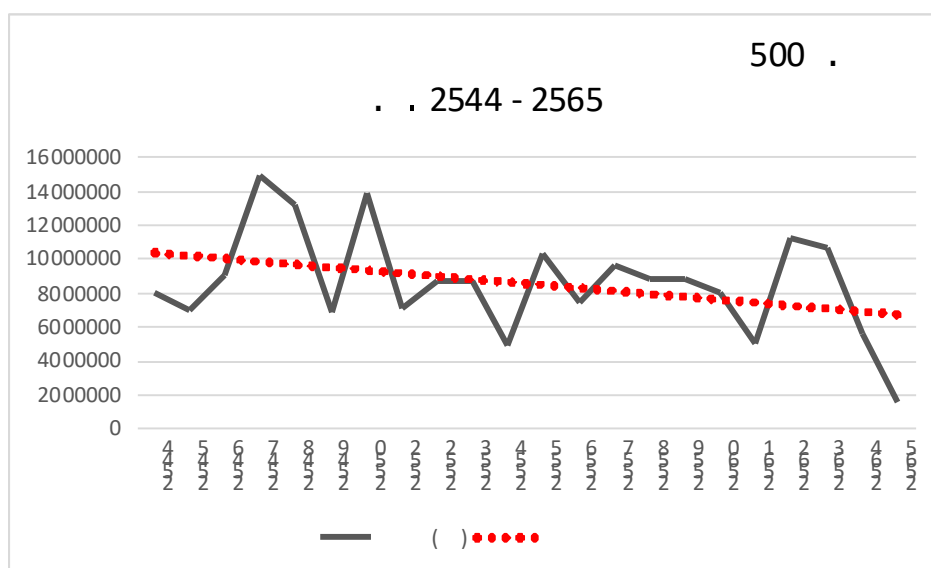
อะไรวันด้านในที่เป็นตัวปัญหาจึงไม่ลอยออกไปด้านนอกอื่นๆ ที่อากาศเปิดให้มีการผสมโดยควันจากด้านนอก ซึ่งจะส่งผลให้คุณภาพอากาศดีขึ้น แต่กลับบร้อให้ควันภายนอกลอยเข้ามาผสมเพิ่มเติมโดยที่ตัวเองไม่ลอยไปไหน หรือมีคำอธิบายอื่นๆ แต่ทั้งนี้ยังไม่มีใครที่สามารถอธิบายปรากฏการณ์นี้ให้กระจ่าง ชัดเจนและเข้าใจง่าย เราเลยหาทางออก โดยการกล่าวโทษประเทศเพื่อนบ้าน เพื่อความเข้าใจที่ตรงกันจำเป็นที่จะต้องมีการอธิบายที่เป็นวิทยาศาสตร์และต้องเข้าใจง่ายมาอธิบายให้กระจ่าง ชัดเจนมากกว่าที่พยายามอธิบายกันอยู่ เพราะแหล่งกำเนิดควันที่ทำให้เกิดปัญหาส่วนใหญ่อาจจะมีตำแหน่งการเกิดมาจากภายในพื้นที่ใกล้เคียงบริเวณที่มีปัญหาคุณภาพอากาศเสียมากกว่า การแก้ไขปัญหาก็จะได้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น

หรือเหตุเพราะปรากฏการณ์ผลกระทบทางธรรมชาติของหุบเขา Valley Effect ถึงแม้ว่าควันจะมีปริมาณน้อย แต่แหล่งกำเนิดอยู่ในแอ่งกระทะเองนั่นแหละ จึงส่งผลให้มีปริมาณควันสะสมเพิ่มขึ้น เพราะควันเก่าไม่ได้ลอยออกไปจากพื้นที่แอ่งกระทะแต่อย่างใด เรายังขาดความรู้ความเข้าใจเรื่องการเคลื่อนตัวของมวลอากาศในบริเวณแอ่งกระทะแบบเชียงใหม่-ลำพูน-เชียงใหม่ที่มีการแลกเปลี่ยนมวลอากาศกัน โดยการรันโมเดลคุณภาพอากาศ เช่น Weather Research and Forecasting model coupled to Chemistry (WRF-Chem) ในปัจจุบันของประเทศไทยไม่มีความละเอียดพอที่จะเห็นหรืออธิบายการถ่ายเทมวลอากาศดังกล่าว อีกทั้งขาดการปรับแต่งเปรียบเทียบ Calibrate และตรวจสอบความถูกต้องภาคสนาม Validation จึงยังไม่มีคำอธิบายที่แน่ชัดถึงการเกิดปัญหาอากาศไม่สะอาด ส่งผลให้มีคำอธิบายตามความเข้าใจของแต่ละบุคคลซึ่งแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับองค์ความรู้และประสบการณ์ ทั้งนี้เมื่อเกิด Subsidence Inversion หรือ Thermal Inversion บวกกับระดับ Mixing Height ที่ลดต่ำลง ส่งผลให้พื้นที่สำหรับให้ควันกระจายตัวมีน้อยลงเหตุเพราะชั้นบรรยากาศถูกกดทับต่ำลงทำให้การสะสมและความเข้มข้นของควันเพิ่มขึ้น ลักษณะของควันเปรียบได้เหมือนการเป่าควันเข้าขวด ฉนั้นใดก็ฉนั้นนั้น โดยควันจากภายนอกมีเข้ามาผสมรวมกันน้อยมากเพราะอากาศปิด ซึ่งยังไม่มีคำอธิบายอย่างเป็นวิทยาศาสตร์ที่ชัดเจน ต้องช่วยกันศึกษาทำความเข้าใจหาคำอธิบายให้ชัดเจน เพื่อการบริหารจัดการปัญหาหมอกควันที่มีประสิทธิภาพและประสิทธิผลมากยิ่งขึ้น อีกทั้งสามารถดำเนินการประชาสัมพันธ์ปรับความเข้าใจกับทุกภาคส่วนให้เข้าใจปัญหาตรงกัน เพื่อการร่วมกันแก้ไขปัญหาที่ตรงจุดมากยิ่งขึ้น

การมี Dispersion หรือ Ventilation Index ก็สามารถช่วยอธิบายได้ แต่การที่เรารันโมเดลของฝรั่ง อ่านคู่มือหรือไปฝึกอบรมการรันโมเดล แล้วนำมาใช้โดยตรงย่อมไม่ถูกต้องอย่างแน่นอน เพราะลักษณะภูมิอากาศทั้งขนาดเล็กและขนาดใหญ่ของแต่ละพื้นที่ย่อมแตกต่างกันไป จึงจำเป็นที่จะต้องทำการศึกษาปรับแต่ง (Calibrate) แก่ค่าช่วง (Threshold Values) และตรวจสอบความถูกต้องภาคสนาม (Validate) ของระบบให้เหมาะสมตามสภาพภูมิประเทศและภูมิอากาศทางภาคเหนือ หรือถ้าให้ดีต้องเฉพาะลักษณะภูมิประเทศและภูมิอากาศ (Air Basin) ของแต่ละลักษณะพื้นที่หรือจังหวัด

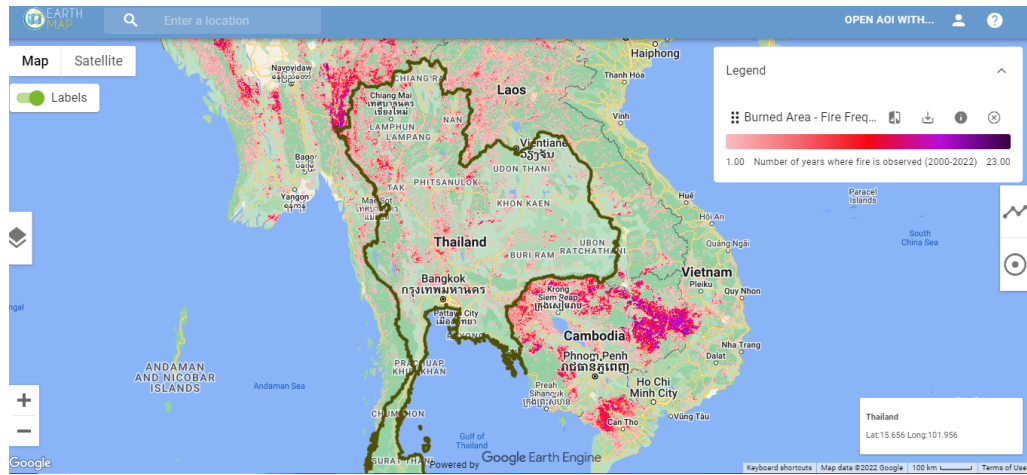
เสียก่อนที่นำไปใช้ในการปฏิบัติงานจริง จึงจะสามารถนำมาใช้สะท้อนลักษณะภูมิอากาศตามสภาพที่แท้จริงได้อย่างเหมาะสม แล้วถึงจะนำมาใช้งานได้ตามสภาพความเป็นจริงต่อไป ถ้ายังมีได้ดำเนินการปรังแต่ง ถึงนำมาใช้ก็จะมี ความถูกต้องต่ำกว่าสภาพความเป็นจริง ซึ่งจะส่งผลให้การนำมาใช้บริหารจัดการไฟป่าและหมอกควันไม่ได้ประสิทธิภาพตามต้องการและอาจจะสร้างความเสียหายเพิ่มขึ้นกว่าเดิมก็ได้ เพราะภูมิอากาศและภูมิประเทศเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลกระทบต่อคุณภาพอากาศ

ทั้งนี้พื้นที่ไฟไหม้ที่สามารถตรวจพบโดยเซ็นเซอร์โมดิสที่ความละเอียด 500 เมตร ในรอบ 21 ปีของประเทศไทย (ยังมีได้ดำเนินการ ตรวจสอบความถูกต้องภาคสนาม จึงไม่ทราบเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องของผลิตภัณฑ์) ตั้งแต่ปีพ.ศ. 2544 ถึงสิ้นสุดหน้าไฟสิ้นเดือนเมษายนปีพ.ศ. 2565 มีแนวโน้มตรวจพบพื้นที่ที่ถูกไฟไหม้ที่เซ็นเซอร์โมดิสลดลง ดังแสดงใน รูปที่ 6 และตารางที่ 1 โดย รูปที่ 7 แสดงให้เห็นว่า เมื่อนำข้อมูลพื้นที่ไฟไหม้ที่ตรวจพบโดยเซ็นเซอร์โมดิสที่รายละเอียด 500 เมตร จำนวน 21 ปี มาซ้อนทับกัน สามารถบ่งชี้บริเวณที่มีไฟไหม้ซ้ำซากได้ชัดเจน ซึ่งจะเป็นข้อมูลที่จะช่วยในการวางแผนดำเนินการในพื้นที่ที่มีปัญหาของประเทศไทยได้ดียิ่งขึ้น



รูปที่ 6 แสดงค่าพื้นที่ไฟไหม้จากเซ็นเซอร์โมดิส ที่รายละเอียด 500ม. ตั้งแต่ปีพ.ศ. 2544 – 2565ที่มา

<https://earthmap.org/> และ <https://modis.gsfc.nasa.gov/data/dataproduct/mod45.php>



รูปที่ 7 พื้นที่ไฟไหม้ที่ตรวจเจอโดยเซ็นเซอร์โมดิสซ้อนทับตั้งแต่ปีพ.ศ. 2543 ถึง 2565 บริเวณภูมิภาค

อาเซียนตอนบน ที่มา <https://earthmap.org/> และ

<https://modis.gsfc.nasa.gov/data/dataproduct/mod45.php>

ตารางที่ 1 แสดงค่าพื้นที่ไฟไหม้จากเซ็นเซอร์โมดิส ที่รายละเอียด 500 ม. ตั้งแต่ปีพ.ศ. 2544 –

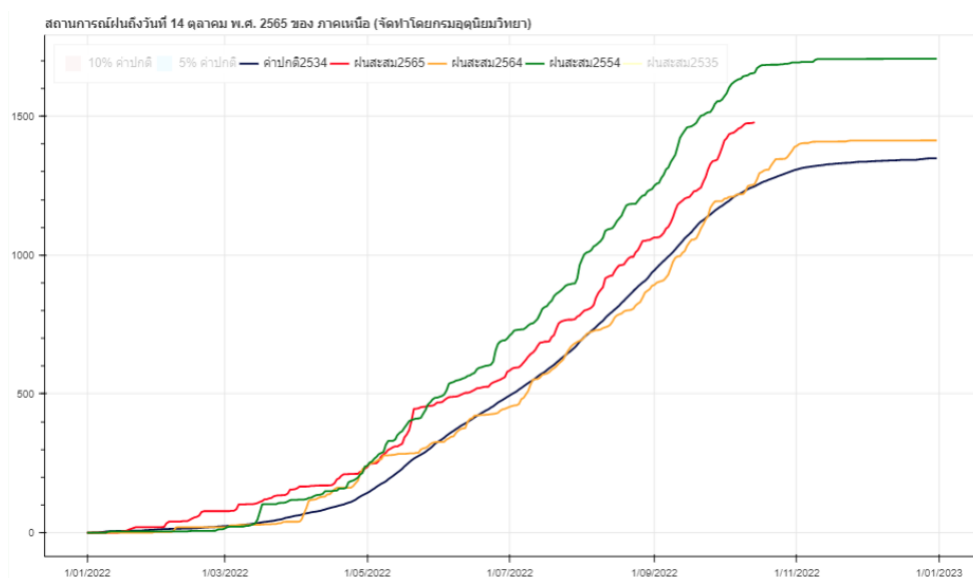
2565 ที่มา <https://earthmap.org/> และ

<https://modis.gsfc.nasa.gov/data/dataproduct/mod45.php>

พ.ศ.	พื้นที่ (ไร่)
2544	8,024,569
2545	6,889,442
2546	8,970,736
2547	14,856,086
2548	13,167,355
2549	6,789,214
2550	13,875,411
2551	7,010,221
2552	8,655,519
2553	8,618,446
2554	4,879,150
2555	10,298,895
2556	7,357,786
2557	9,606,802
2558	8,840,752
2559	8,745,520
2560	7,960,966
2561	4,968,983
2562	11,256,807
2563	10,620,433
2564	5,598,667
2565	1,552,505

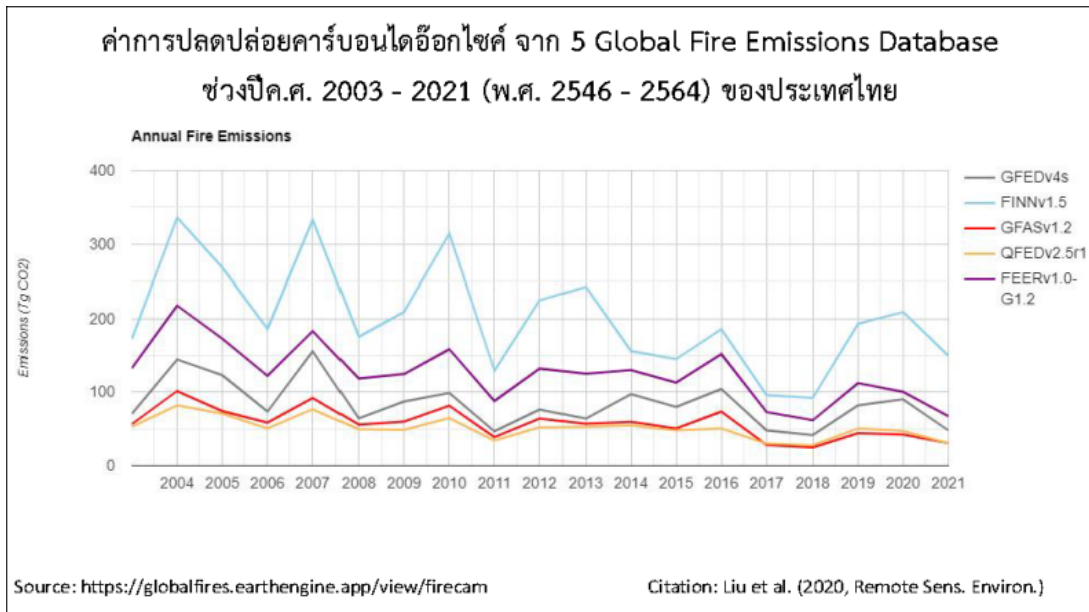
การเกิดไฟไหม้ป่าหากเทียบประเทศไทยกับต่างประเทศ เช่น ประเทศสหรัฐอเมริกา ออสเตรเลีย ทางฝั่งยุโรป หรือแม้กระทั่งบริเวณใกล้ขั้วโลกเหนือในเขตประเทศรัสเซียพบว่ามีไฟไหม้ป่าเกิดขึ้นรุนแรงและยาวนานขึ้นทุกปีเนื่องจากอุณหภูมิโลกร้อนเพิ่มขึ้นเชื้อเพลิงจึงแห้งกว่าปรกติหรือน้ำแข็งละลายปลดปล่อยก๊าซมีเทนออกมา เมื่อติดไฟจึงลุกลามได้ง่าย ส่วนในประเทศไทยถึงแม้ไฟยังไม่รุนแรงเท่าที่อื่นของโลกเพราะชนิดของเชื้อเพลิง สภาพภูมิประเทศและภูมิอากาศแตกต่างกันและไม่เอื้ออำนวยให้เกิดไฟรุนแรง เช่นไฟเรือนยอด แต่ถึงกระนั้นในช่วงสองฤดูไฟที่ผ่านมาจะสังเกตได้ว่าไฟที่เกิดขึ้นเริ่มมีความรุนแรงขึ้นเรื่อยๆจนบางครั้งกลายเป็นไฟเรือนยอด เช่น ที่พรุควนเคิ่งช่วงปีพ.ศ. 2562 ต่อมา ในปีพ.ศ. 2563 บริเวณอช.ภูกระดึง อช.เขาใหญ่ บริเวณอช.ดอยสุเทพและดอยอินทนนท์มีการเผาไหม้ที่รุนแรงขึ้นจนถึงบริเวณป่าดิบแล้ง จึงเป็นสัญญาณเตือนภัยให้ประเทศไทยต้องมีการเตรียมการป้องกันและควบคุมไฟป่าให้พร้อมอยู่เสมอ ส่วนฤดูกาลไฟปีพ.ศ. 2564 จะมีไฟเกิดน้อย

และไม่รุนแรง เนื่องจากมีฝนตกผิดปกติในพื้นที่ภาคเหนือในช่วงเดือนมีนาคมและเมษายนมากกว่าปรกติ สำหรับหน้าไฟปีพ.ศ. 2565 นั้น มีการเกิดไฟน้อยมากลงไปอีก เพราะมีฝนตกผิดปกติช่วงหน้าแล้งมากกว่าปีพ.ศ. 2554 ตอนเกิดน้ำท่วมใหญ่ในประเทศไทยเสียอีก (รูปที่ 8) ส่งผลให้พื้นที่ที่ถูกไฟไหม้ลดน้อยลงมากกว่าปีพ.ศ. 2554 ถึงกว่าสามเท่าตัว ดังแสดงใน รูปที่ 6 และ ตารางที่1



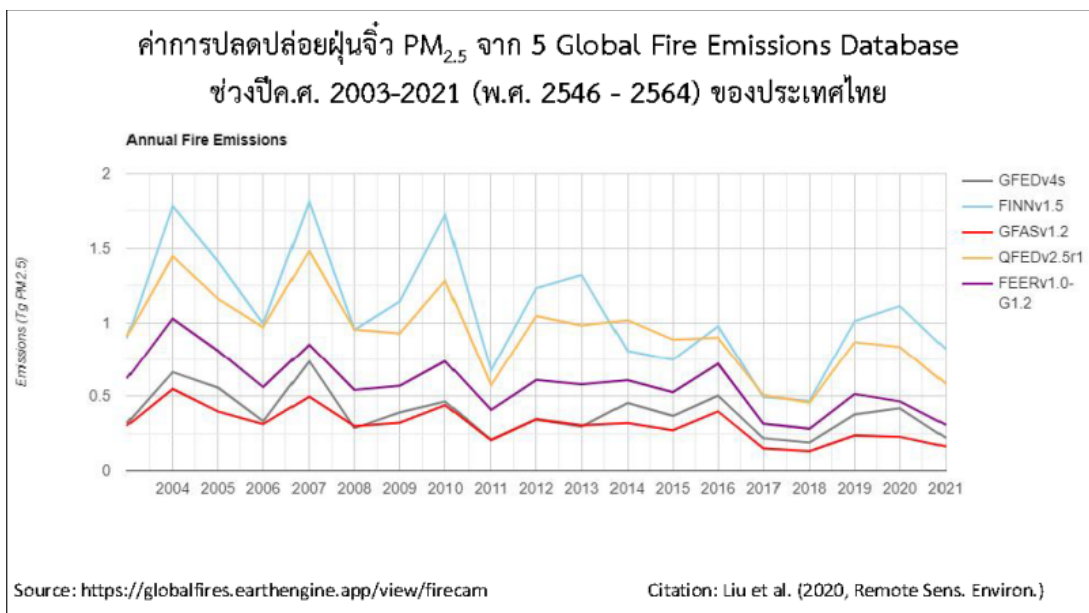
รูปที่ 8 แสดงค่าฝนสะสมของภาคเหนือ ถึงวันที่ 14 ตุลาคม พ.ศ. 2565 ที่มา กรมอุตุนิยมวิทยา
<http://climate.tmd.go.th/gge/water/normalrain2564.html>

ทั้งนี้ถ้ามอ้ยอนค่าคาร์บอนไดออกไซด์ และ PM_{2.5} จากการคำนวณโดยโมเดลค่าการปลดปล่อยจากไฟและข้อมูลตรวจวัดเสริม Fire Radiative Power (FRP) จากดาวเทียม ช่วง พ.ศ. 2558-2564 แสดงให้เห็นว่าค่าการปลดปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์ และ ฝุ่นจิ๋ว PM_{2.5} จาก ไฟ Global fire emissions inventories ที่มีการใช้เป็นการทั่วไป คือ (1) Global Fire Emissions Database (GFED) [13], (2) Fire Inventory from NCAR (FINN)[14], (3) Global Fire Assimilation System (GFAS) [15], (4) Quick Fire Emissions Dataset (QFED)[16], and (5) Fire Energetics and Emissions Research (FEER) [17] ของประเทศไทยมีแนวโน้มลดลง ดังแสดงในรูปที่ 9 และ รูปที่ 10 ทั้งนี้การวิเคราะห์ประกอบหลายๆปัจจัยที่เกี่ยวข้องสำคัญมาก โดยเฉพาะพฤติกรรมคว้น ภูมิอากาศไฟ ลักษณะเชื้อเพลิง พฤติกรรมคนจุด นโยบายภาครัฐ และอื่นๆ จึงมีความจำเป็นที่จะต้องมีการศึกษาเพิ่มเติมร่วมกันจากสาขาวิชาต่างๆในอนาคต



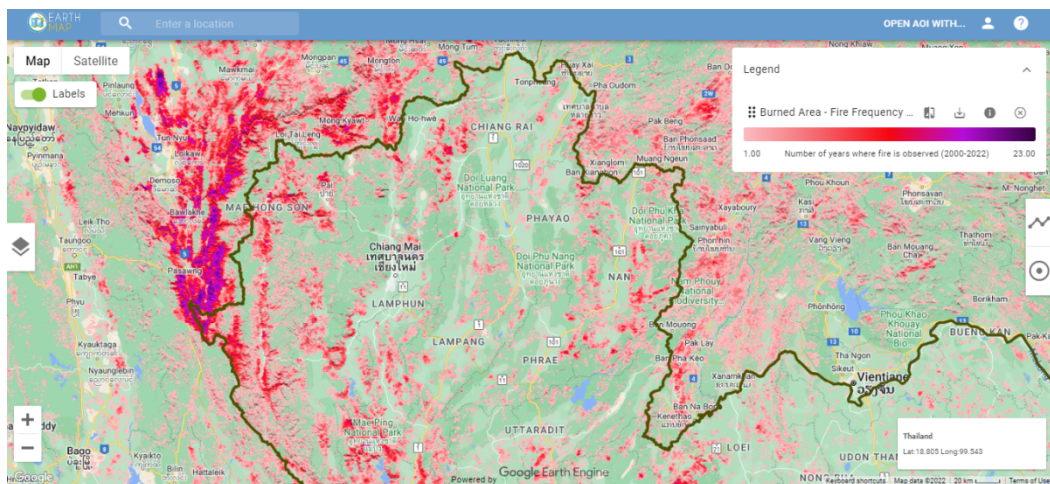
รูปที่ 9 ค่าการปลดปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์ จาก ห้า Global fire emissions inventories ที่มีการใช้เป็นการทั่วไป. ตั้งแต่ปีพ.ศ. 2546 - 2564 ที่มา

<https://globalfires.earthengine.app/view/firecam> และ Liu et al. 2020 [18]



รูปที่ 10 ค่าฝุ่นจิ๋ว PM_{2.5} จาก ห้า Global fire emissions inventories ที่มีการใช้เป็นการทั่วไป. ตั้งแต่ปีพ.ศ. 2546 - 2564 ที่มา <https://globalfires.earthengine.app/view/firecam> และ Liu et al. 2020 [18]

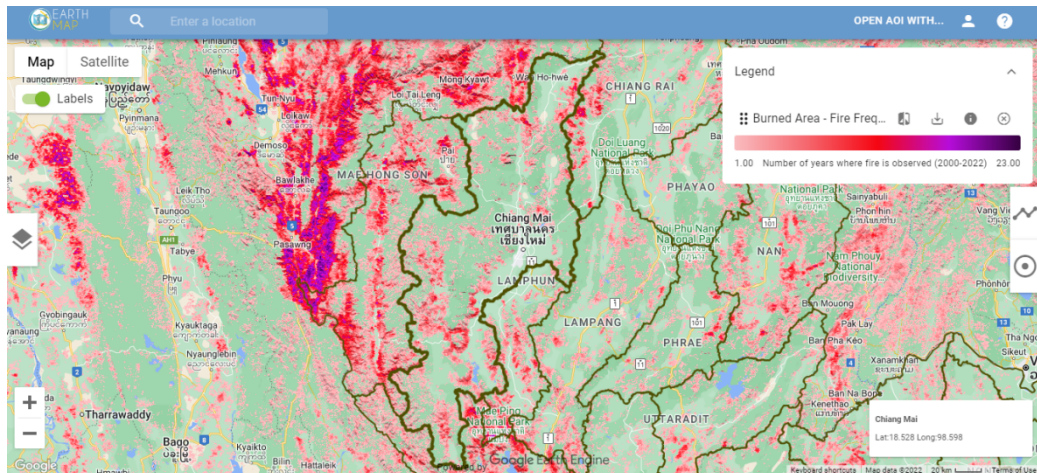
นอกจากนั้นการที่ FAO's Open Foris นำข้อมูลย้อนหลังตั้งแต่ปีพ.ศ. 2543 ถึง 2563 ของพื้นที่ที่ถูกไฟไหม้ที่สามารถตรวจเจอได้โดยเซ็นเซอร์โมดิสที่ความละเอียดพิเซล 500 เมตร ซึ่งจะไม่สามารถตรวจพบพื้นที่ไฟไหม้ที่น้อยกว่า 156 ไร่ (ทั้งนี้ด้วย burned detection algorithm ที่พัฒนามามากกว่า 20 ปี ปัจจุบันสมการตรวจจับพื้นที่ไฟไหม้โดยเซ็นเซอร์โมดิสที่ใช้ในระบบ อาจจะสามารถตรวจเจอพื้นที่ไฟไหม้ที่เล็กลงกว่าเดิมก็อาจจะเป็นไปได้ แต่ไม่ทราบว่าได้ว่าพื้นที่เล็กที่สุดมีขนาดเท่าไร ต้องตรวจสอบ สอบถามกับทางนาซ่าเพื่อยืนยันข้อสันนิษฐานนี้²) มาแสดงในระบบ EarthMap.Org รูปที่ 11 ถึง รูปที่ 20 โดยการสนับสนุนของรัฐบาลเยอรมันภายใต้ The International Climate Initiative (IKI) บนพื้นฐานและขับเคลื่อนระบบโดย Google Earth Engine โดยพื้นที่สีม่วงเข้มคือบริเวณพื้นที่ที่มีการซ้อนทับของพื้นที่ที่ตรวจพบพื้นที่ไฟไหม้ซ้ำซากมากที่สุด



รูปที่ 11 พื้นที่ไฟไหม้ที่ตรวจเจอโดยเซ็นเซอร์โมดิสซ้อนทับตั้งแต่ปีพ.ศ. 2543 ถึง 2565 บริเวณภาคเหนือของประเทศไทย แหล่งข้อมูล <https://earthmap.org/> และ <https://modis.gsfc.nasa.gov/data/dataproduct/mod45.php>

เมื่อพิจารณาเป็นรายจังหวัดสามารถดูรายละเอียดว่าพื้นที่ไหนควรเฝ้าระวังมากกว่าและดำเนินการบริหารจัดการอย่างเข้มข้นยิ่งขึ้นกว่าพื้นที่อื่นได้ที่ รูปที่ 12 ถึง รูปที่ 20

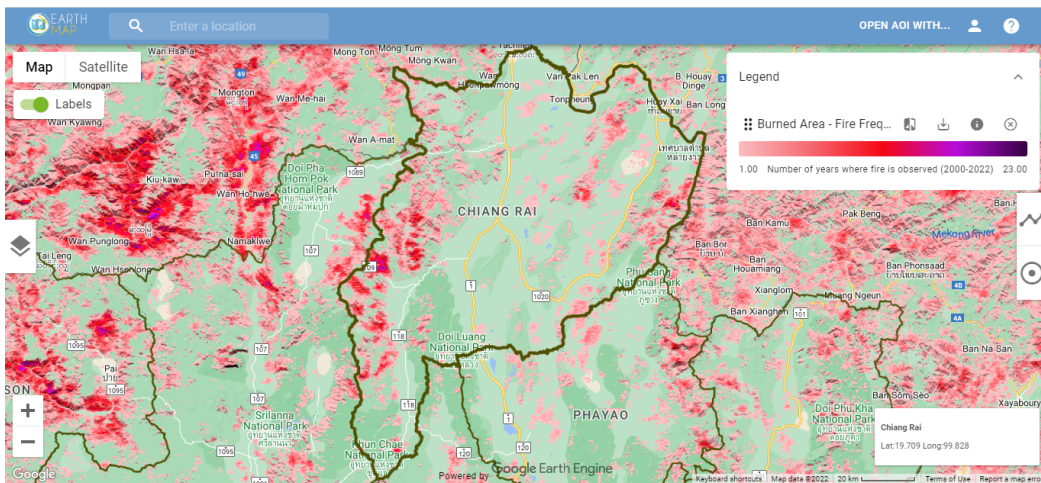
² <https://modis.gsfc.nasa.gov/data/dataproduct/mod45.php>



รูปที่ 12 พื้นที่ไฟไหม้ที่ตรวจเจอโดยเซ็นเซอร์โมดิสซ้อนทับตั้งแต่ปีพ.ศ. 2543 ถึง 2565 บริเวณจ.

เชียงใหม่ แหล่งข้อมูล <https://earthmap.org/> และ

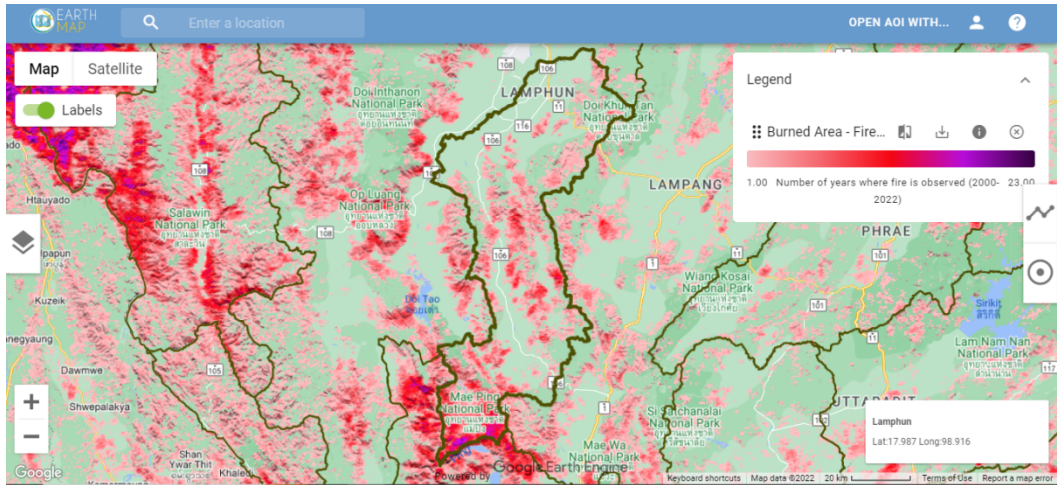
<https://modis.gsfc.nasa.gov/data/dataproduct/mod45.php>



รูปที่ 13 พื้นที่ไฟไหม้ที่ตรวจเจอโดยเซ็นเซอร์โมดิสซ้อนทับตั้งแต่ปีพ.ศ. 2543 ถึง 2565 บริเวณจ.

เชียงราย แหล่งข้อมูล <https://earthmap.org/> และ

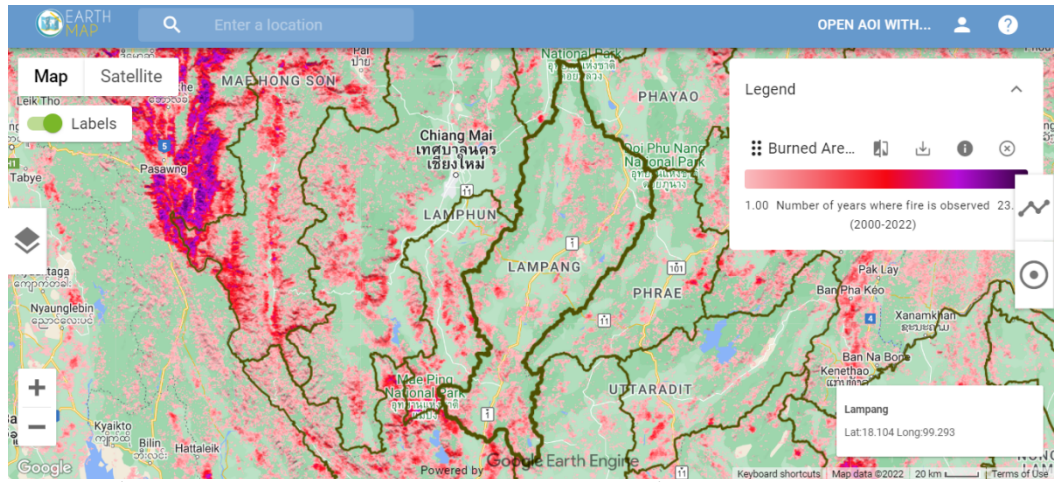
<https://modis.gsfc.nasa.gov/data/dataproduct/mod45.php>



รูปที่ 14 พื้นที่ไฟไหม้ที่ตรวจเจอโดยเซ็นเซอร์โมดิสซ้อนทับตั้งแต่ปีพ.ศ. 2543 ถึง 2565 บริเวณจ.

ลำพูน แหล่งข้อมูล <https://earthmap.org/> และ

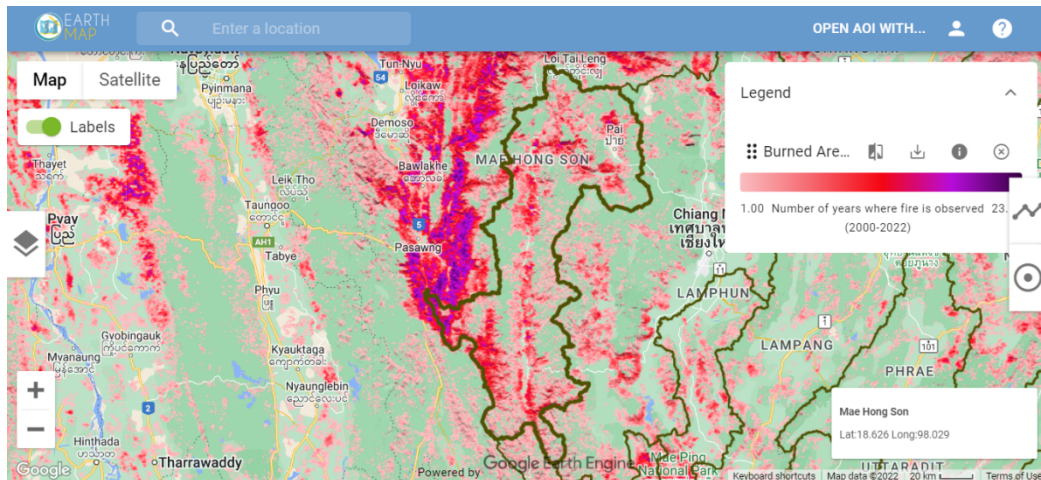
<https://modis.gsfc.nasa.gov/data/dataproduct/mod45.php>



รูปที่ 15 พื้นที่ไฟไหม้ที่ตรวจเจอโดยเซ็นเซอร์โมดิสซ้อนทับตั้งแต่ปีพ.ศ. 2543 ถึง 2565 บริเวณจ.

ลำปาง แหล่งข้อมูล <https://earthmap.org/> และ

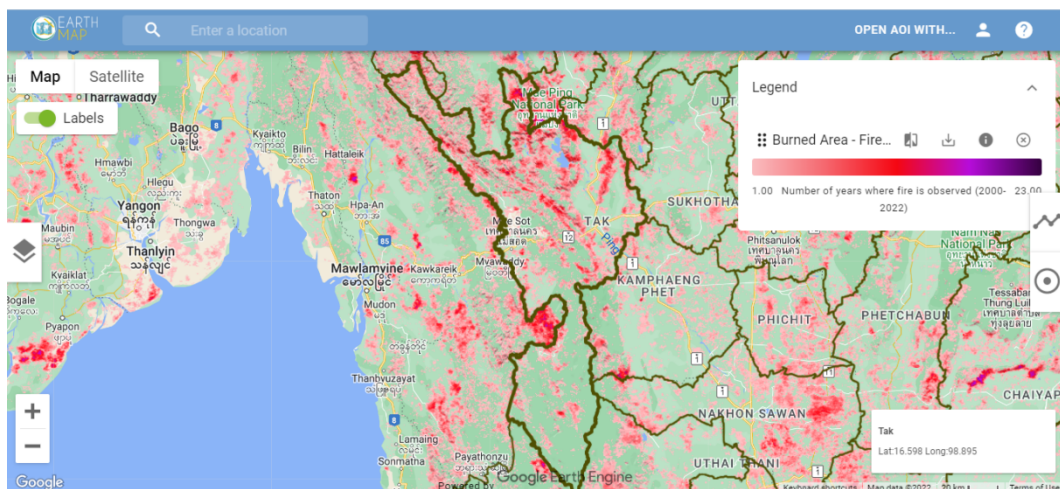
<https://modis.gsfc.nasa.gov/data/dataproduct/mod45.php>



รูปที่ 16 พื้นที่ไฟไหม้ที่ตรวจเจอโดยเซ็นเซอร์โมดิสซ้อนทับตั้งแต่ปีพ.ศ.2543 ถึง 2565 จ.บริเวณ

แม่ฮ่องสอน แหล่งข้อมูล <https://earthmap.org/> และ

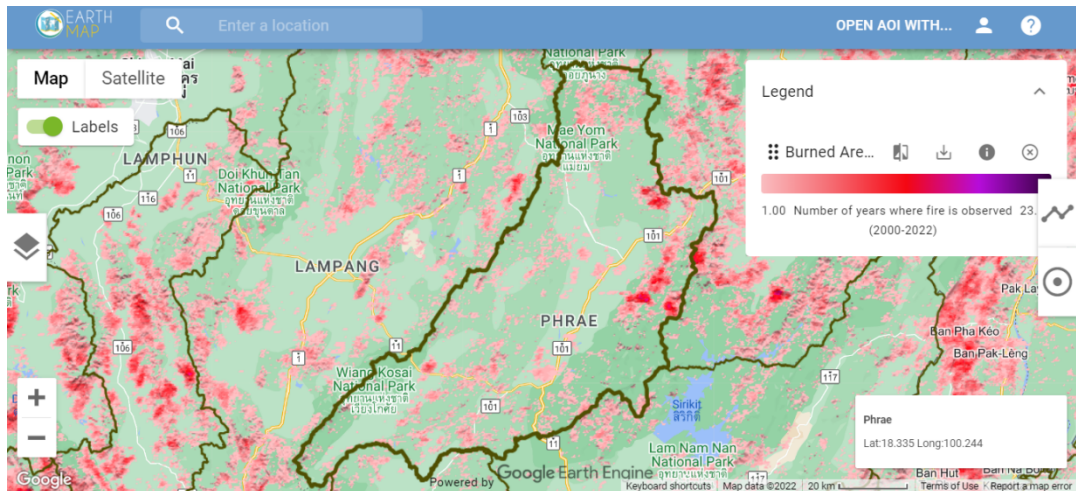
<https://modis.gsfc.nasa.gov/data/dataproduct/mod45.php>



รูปที่ 17 พื้นที่ไฟไหม้ที่ตรวจเจอโดยเซ็นเซอร์โมดิสซ้อนทับตั้งแต่ปีพ.ศ. 2543 ถึง 2565 บริเวณ

จังหวัดตาก แหล่งข้อมูล <https://earthmap.org/> และ

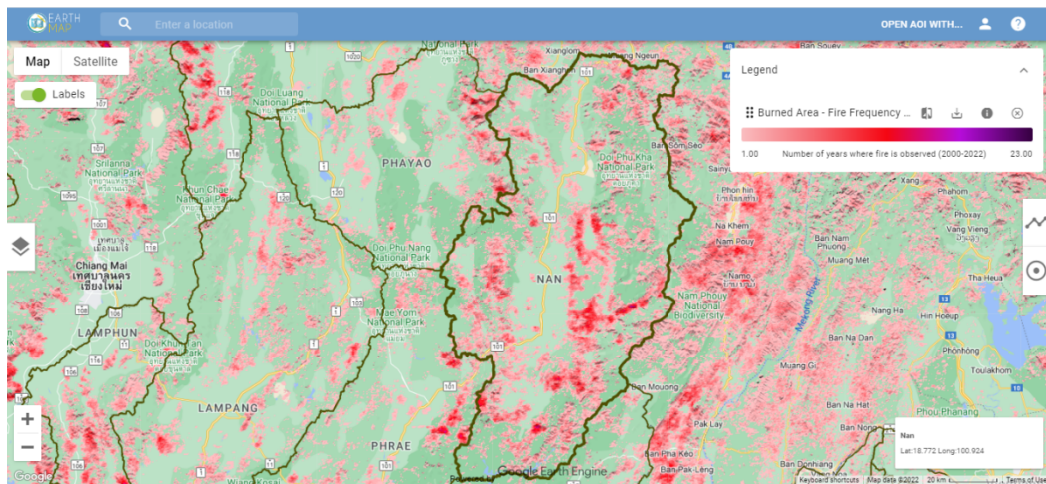
<https://modis.gsfc.nasa.gov/data/dataproduct/mod45.php>



รูปที่ 18 พื้นที่ไฟไหม้ที่ตรวจเจอโดยเซ็นเซอร์โมดิสซ้อนทับตั้งแต่ปีพ.ศ. 2543 ถึง 2565 บริเวณ

จังหวัดแพร่ แหล่งข้อมูล <https://earthmap.org/> และ

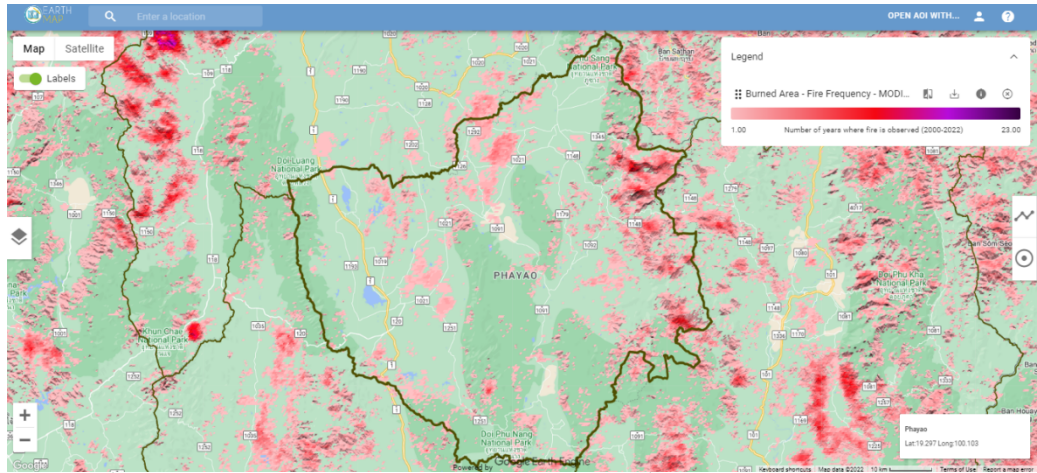
<https://modis.gsfc.nasa.gov/data/dataproduct/mod45.php>



รูปที่ 19 พื้นที่ไฟไหม้ที่ตรวจเจอโดยเซ็นเซอร์โมดิสซ้อนทับตั้งแต่ปีพ.ศ. 2543 ถึง 2565 บริเวณ

จังหวัดน่าน แหล่งข้อมูล <https://earthmap.org/> และ

<https://modis.gsfc.nasa.gov/data/dataproduct/mod45.php>



รูปที่ 20 พื้นที่ไฟไหม้ที่ตรวจเจอโดยเซ็นเซอร์โมดิสซ้อนทับตั้งแต่ปีพ.ศ. 2543 ถึง 2565 บริเวณจ.

พะเยา แหล่งข้อมูล <https://earthmap.org/> และ

<https://modis.gsfc.nasa.gov/data/dataproduct/mod45.php>

บทที่ 3

วิธีการดำเนินการวิจัย

3.1 บทนำ

ในบทนี้จะกล่าวถึงวิธีการและขั้นตอนการดำเนินการวิจัยโดยจะให้รายละเอียดเกี่ยวกับแผนการดำเนินงานและขอบเขตการดำเนินงานวิจัยของโครงการ ซึ่งประกอบด้วย การทดสอบคุณภาพของอุปกรณ์เซ็นเซอร์ก่อนที่จะนำไปติดตั้งและเก็บข้อมูล, แผนการพัฒนาโครงข่ายโล่ล่าเน็ตเวิร์ค ทั้งในส่วนของฮาร์ดแวร์และซอฟต์แวร์ รวมถึงการทดสอบการรับส่งข้อมูลทั้งภายในสถาบันและสถานที่จริง แผนการติดตั้งอุปกรณ์โครงข่ายโล่ล่าและอุปกรณ์เซ็นเซอร์ในพื้นที่เป้าหมาย รวมไปถึงแนวทางการวิเคราะห์ข้อมูลเพื่อพัฒนาโมเดลตรวจจับไฟป่า ทั้งนี้เพื่อให้เห็นภาพรวมทั้งหมด ของวิธีการดำเนินการวิจัยในโครงการนี้

3.2 วิธีการ/ขั้นตอนการดำเนินการวิจัยและพัฒนา

เพื่อการดำเนินการวิจัยและพัฒนาแพลตฟอร์มไอโอทีสำหรับการเฝ้าระวังไฟป่าและมลพิษทางอากาศด้วยเทคโนโลยีโล่ล่า ให้เป็นไปตามวัตถุประสงค์ที่ โครงการวิจัยจึงเสนอแผนการดำเนินงาน (Work Package) ออกเป็น 4 แผนงาน ดังรายละเอียดต่อไปนี้

แผนการดำเนินงาน ชุดที่ 1 (Work Package 1): การปรับจูนการค่าข้อมูลของเซ็นเซอร์ (Sensor Calibration)

กระบวนการปรับจูนค่าการวัดของเซ็นเซอร์หรือที่เรียกว่า เซ็นเซอร์คาลิเบรชันเป็นวิธีการในการเพิ่มประสิทธิภาพของ เซ็นเซอร์ด้วยการกำจัดค่า Structural error จากเอาต์พุตของเซ็นเซอร์เอง ซึ่งเป็นค่าความคลาดเคลื่อนระหว่าง ค่าที่ถูกต้องและค่าที่วัดได้จริงจากการวัด ซึ่งค่าความแตกต่างนี้จะแสดงผล ออกมาอย่างต่อเนื่องในลักษณะความสัมพันธ์เชิงลิเนียร์อย่างต่อเนื่องที่มีการวัดเกิดขึ้น ค่าคลาดเคลื่อนนี้จะเกิดขึ้นซ้ำๆ และสามารถกำจัดออกไปได้ โดยการคำนวณค่าชดเชยระหว่างการวัดที่เกิดขึ้นในลักษณะเรียลไทม์โดยใช้สมการทางคณิตศาสตร์ที่มีความสัมพันธ์เชิงลิเนียร์ซึ่งสามารถคำนวณหาได้จากกระบวนการปรับจูนค่า การปรับจูนค่าข้อมูลของเซ็นเซอร์ (Sensor calibration)

ในแผนงานนี้จะมุ่งเน้นในการปรับจูนประสิทธิภาพของการอ่านค่าของเซ็นเซอร์ ด้วยวิธีการที่รองรับด้วยมาตรฐานสากล โดยจะแบ่งการทำคาลิเบรชัน เป็นสองส่วน ในส่วนแรกจะทำการนำอุปกรณ์เซ็นเซอร์ (device under test) ไว้ในระบบ ปิดในห้องทดลองและปฏิบัติการ (Laboratory testing) ที่ทราบและสามารถควบคุมปริมาณความเข้มข้นของก๊าซมลพิษได้ เช่น CO, CO₂ โดยจะทำ

การเปรียบเทียบค่าที่วัดได้จากเซ็นเซอร์กับอุปกรณ์มาตรฐานเพื่อหาความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่างค่าที่วัดได้จากเซ็นเซอร์และค่าความคลาดเคลื่อน โดยใช้โมเดลทางคณิตศาสตร์ Linear Regression Model

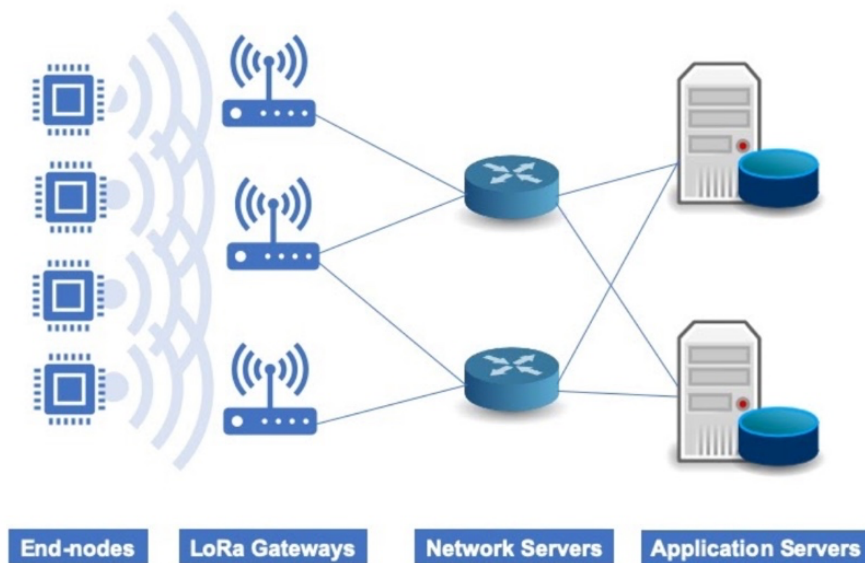
หลังจากทำโมเดลฟิตติ้งเสร็จแล้ว เซ็นเซอร์ทุกตัวจะถูกปรับจูนสมการลิเนียร์ แปลงค่าจากสัญญาณอนาล็อกที่อ่านค่าได้เป็นค่าดิจิทัล และจะทำการตรวจสอบคุณภาพจากการผลิตและประกอบ โดยผ่านการทดสอบขั้นที่สามที่เรียกว่า แบตชิงเทส (Batching test) โดยจะนำเซ็นเซอร์มาทำการตรวจวัดในระบบเปิดที่มีอนุภาคฝุ่นและมลพิษจริง เช่น ตามท้องถนน หรือ บริเวณ ชุมชนที่ได้รับผลกระทบจากปัญหาหมอกควันจากไฟป่า โดยในการทดสอบนี้จะทำการเปรียบเทียบทดสอบวัดค่าจาก เซ็นเซอร์หลายๆตัว ณ สถานที่ และเวลาเดียวกันเพื่อเปรียบเทียบค่าความแตกต่างของเซ็นเซอร์แต่ละตัว

แผนการดำเนินงาน ชุดที่ 2 (Work Package 2): การพัฒนาระบบโครงข่ายไวร์เลสเซ็นเซอร์เน็ตเวิร์คด้วย โพรโตคอล LoRaWAN

ในส่วนของแผนการดำเนินงาน ชุดที่ 2 นี้ จะมุ่งเน้นไปที่การสร้างโครงข่ายไวร์เลสเซ็นเซอร์เน็ตเวิร์ค โดยใช้โปรโตคอล LoRaWAN โดยส่วนประกอบของโครงข่ายนี้ได้แสดงไว้ใน รูปที่ 21 ซึ่งประกอบด้วยอุปกรณ์ end-node ที่รองรับการรับส่ง ข้อมูลแบบใช้พลังงานต่ำ (low-power communication device) ซึ่งในโครงการนี้เราจะใช้ชุดเซ็นเซอร์ตรวจวัดมลภาวะทางอากาศ ที่พัฒนาจากผลงานวิจัยจากห้องปฏิบัติการ intERLab เป็นตัวส่งข้อมูลของการวัดมายัง อุปกรณ์เกตเวย์ที่ติดตั้ง สายอากาศที่สามารถรับข้อมูลบรอดแคสต์ จากอุปกรณ์ end-node และส่งข้อมูลตอบกลับไปยัง อุปกรณ์ end-node นั้นๆ ได้ โดยในเบื้องต้นจะมีการทดสอบการรับส่งข้อมูลระยะไกล ในพื้นที่บริเวณสถาบันเทคโนโลยีแห่งเอเชียและบริเวณโดยรอบ ซึ่งลักษณะของพื้นที่จะปกคลุมไปด้วยต้นไม้สูงคล้ายคลึงกับสภาพภูมิประเทศของสถานที่ที่จะไปติดตั้งเซ็นเซอร์ในการทดสอบจะมีการปรับจูนค่าพารามิเตอร์ ต่างๆ เช่น spreading factor, data rate, coding rate, ความสูงของเสาสัญญาณ รวมถึงกำลังส่งของอุปกรณ์ เกตเวย์ และ เซ็นเซอร์ เพื่อทำการศึกษาทดลองหาค่าที่เหมาะสมกับสภาพแวดล้อมที่จะนำอุปกรณ์ไปติดตั้งจริง โดยการปรับจูนพารามิเตอร์เหล่านี้จะมีความสัมพันธ์กับค่าความแรงของสัญญาณ (RSSI), คุณภาพของสัญญาณ (Signal to Noise Ratio หรือ SNR) รวมทั้งค่าเซนซิวิตี หรือ ความสามารถที่จะตรวจจับสัญญาณในระดับความแรงที่ต่ำ ซึ่งจะช่วยให้สามารถรับ-ส่งสัญญาณ ได้ไกลขึ้น และ ทนต่อการลดทอนของสัญญาณเมื่อเดินทางผ่านสิ่งกีดขวาง

ส่วนถัดมาจะเป็นส่วนของ เน็ตเวิร์ค เซิร์ฟเวอร์ (Network Server) ที่ทำหน้าที่คัดกรองและส่งข้อมูลจาก end-node ที่เรียกว่า message ไปยังแอปพลิเคชันที่ถูกต้อง ในส่วนตัวแอปพลิเคชันนั้นจะเป็นชุดโปรแกรมที่ทำงานอยู่ในเซิร์ฟเวอร์เพื่อทำการประมวลผลข้อมูลที่ได้รับจากเน็ตเวิร์คเซิร์ฟเวอร์

และจะเป็นส่วนติดต่อกับผู้ใช้งานโดยตรง โดยจะมีการพัฒนาเว็บ แอปพลิเคชันนำเสนอข้อมูลปริมาณมลภาวะทางอากาศแบบเรียลไทม์ให้มีลักษณะที่ใช้งานและทำความเข้าใจได้ง่าย (user friendly) ในส่วนของการรายงานผลจะนำเสนอสภาพมลภาวะทางอากาศแบบเรียลไทม์บนเว็บไซต์ เช่น ปริมาณความหนาแน่นฝุ่นควัน, ค่าอุณหภูมิ, ปริมาณ CO, CO2 จะเป็นเพียงการให้ข้อมูลของการตรวจวัดข้อมูล โดยจะมีทีมงานผู้พัฒนาคอยตรวจสอบข้อมูลเทียบเคียงกับข้อมูลที่นำเชื่อถือ เช่น สถานีตรวจวัดของกรมควบคุมมลพิษ รวมทั้งเทียบเคียงกับค่าเซ็นเซอร์ที่ติดตั้งอยู่บริเวณข้างเคียง ถ้าหากเกิดความคลาดเคลื่อนของการอ่านค่าซึ่งเป็นผลมาจากการทำงานบกพร่องของอุปกรณ์ ระบบสามารถที่จะคัดกรองข้อมูลที่เก็บค่ามาจากเซ็นเซอร์ที่ทำงานบกพร่องออกไปได้อย่างทันทีและจะทำการประสานงานหน่วยงานในพื้นที่ที่ดูแลอุปกรณ์เซ็นเซอร์ เช่น เจ้าหน้าที่ส่วนควบคุมไฟฟ้าหรือชุมชนอาสาที่จะมาเข้าร่วมกับโครงการทำการเก็บและนำส่งอุปกรณ์ที่มีปัญหามาให้ห้องปฏิบัติการซ่อมบำรุงให้ใช้งานได้ปกติก่อนที่จะนำไปติดตั้งใหม่อีกครั้งหนึ่ง



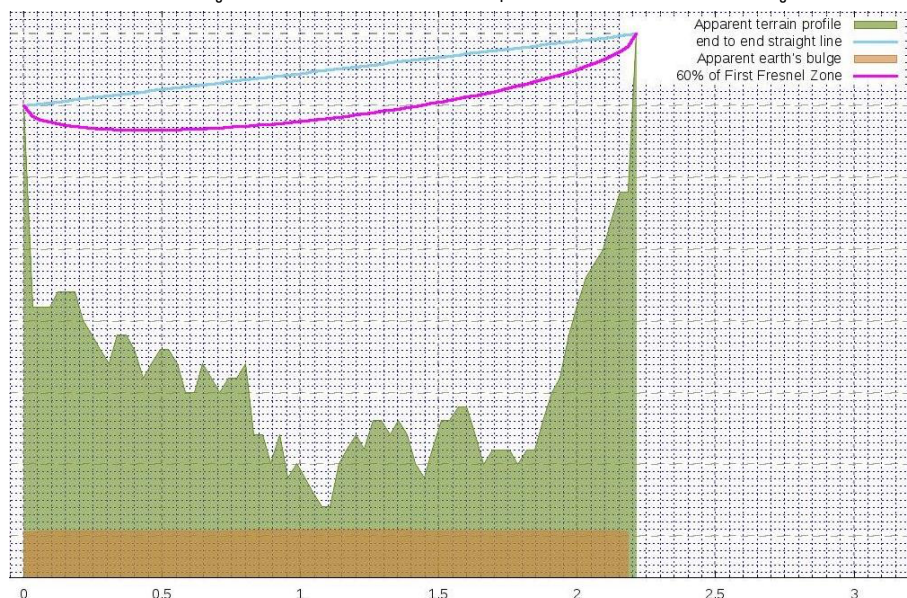
รูปที่ 21 แผนภาพ แสดงโครงสร้างของระบบ โครงข่ายไร้เลสเซ็นเซอร์ เน็ตเวิร์คด้วยโปรโตคอล LoRaWAN

แผนการดำเนินงาน ชุดที่ 3 (Work Package 3): การติดตั้งเซ็นเซอร์ในพื้นที่เป้าหมาย

ในการติดตั้งเซ็นเซอร์ของโครงการทางคณะผู้วิจัยเลือกที่จะทำการติดตั้งเซ็นเซอร์และโครงข่ายไร้เลสเซ็นเซอร์ เน็ตเวิร์ค ที่จังหวัดเชียงราย เป็นกลุ่มเป้าหมายหลัก โดยมีเหตุผลดังนี้ 1) เนื่องจาก พื้นที่จังหวัดเชียงราย เป็นพื้นที่ที่ประสบปัญหาหมอกควันจากภัยพิบัติไฟป่าที่มีความรุนแรงมากในทุกๆปี ประชาชนที่อาศัยอยู่ในพื้นที่ดังกล่าวยังขาดการเข้าถึง ข้อมูลข่าวสารและความรุนแรงของอนุภาคฝุ่นขนาดเล็กอยู่ 2) สถานีตรวจวัดสภาพอากาศที่ติดตั้งของกรมควบคุมมลพิษเอง

ยังมีจำนวนไม่เพียงพอ โดยในพื้นที่ จังหวัดเชียงรายเอง มีสถานีเพียง 3 จุด เท่านั้น 3) หน่วยงาน บรรเทาสาธารณภัยขาดแคลน ข้อมูลข่าวสาร และระบบแจ้งเตือนการเกิดจุดความร้อนในพื้นที่ไฟป่า หรือ hot spot ทำให้การเข้าถึงพื้นที่เพื่อระงับภัยพิบัติ ยิ่งล่าช้าอยู่มาก

โดยในโครงการนี้ทางคณะผู้วิจัยได้ร่วมมือกับหน่วยวิจัยเชี่ยวชาญเฉพาะทางด้านไฟฟ้า ภูมิภาคอาเซียนตอนบน, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์และสวนควบคุมไฟป่า สำนักป้องกันปราบปราม และควบคุมไฟป่า, กรมอุทยานแห่งชาติสัตว์ป่าและพันธุ์พืช ในการสำรวจและวางแผนติดตั้งเซ็นเซอร์ ในจุดพื้นที่เสี่ยงภัยและจุดยุทธศาสตร์ที่จะเป็นแนวระวางป้องกันไฟป่าโดยในแผนงานเบื้องต้นทาง โครงการได้กำหนดพื้นที่เป้าหมายในการติดตั้งโครงข่ายโลล่าและเซ็นเซอร์ตรวจวัดสภาพอากาศไว้ใน สามจังหวัดได้แก่ จังหวัดเชียงราย, ตาก และ ลำพูน ซึ่งเป็นพื้นที่ที่ได้รับความเสียหายจากไฟป่าอย่าง หนักในทุกๆปี นอกจากนี้ทางโครงการจะทำการขยายการติดตั้งเซ็นเซอร์ไปยังจังหวัดอื่นๆ ในพื้นที่ ภาคเหนือที่ประสบปัญหาหมอกควันจากภัยพิบัติไฟป่าโดยจะเน้นการติดตั้งไปในพื้นที่บริเวณใกล้เคียง กับ สถานีควบคุมไฟป่าในจังหวัดนั้นๆ โดยในการติดตั้งอุปกรณ์ เช่น เซ็นเซอร์และ เกตเวย์ จะมีการทำ สำรวจพื้นที่ก่อนที่จะติดตั้งจริงโดยจะอาศัยความได้เปรียบเชิงภูมิศาสตร์ ติดตั้ง เกตเวย์ในพื้นที่สูงเช่น เนินเขา หรือพื้นที่อยู่เหนือระดับทะเล และทำการติดตั้งอุปกรณ์เซ็นเซอร์ในพื้นที่ที่ ต่ำกว่า เพื่อที่จะให้ พื้นที่ Fresnel Zone ไม่ถูกลดทอนจากสิ่งกีดขวางโดยจะมีการนำโปรแกรม RFbot [19] เข้ามาช่วย การทำสำรวจพื้นที่ (radio link planning) และคำนวณรูปแบบการแพร่กระจายของคลื่นโดยอาศัย ข้อมูลทางระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์ของพื้นที่ระหว่างอุปกรณ์รับส่ง ดังแสดงใน รูปที่ 22



รูปที่ 22 แสดงตัวอย่างการใช้งานโปรแกรม RFbot สำหรับรูปแบบการแพร่กระจายของคลื่น (Radio Wave Propagation) ระหว่างอุปกรณ์ เกตเวย์ และ อุปกรณ์ เซ็นเซอร์

แผนการดำเนินงาน ชุดที่ 4 (Work Package 4): การวิเคราะห์ข้อมูลขั้นสูง (Data Analytic) เพื่อศึกษา พฤติกรรมการเคลื่อนที่ของหมอกควัน และสรุปผลการดำเนินโครงการ

หลังจากทำการติดตั้งเซ็นเซอร์ในแผนการดำเนินงานที่ 3 แล้วทางคณะผู้วิจัยจะทำการดึงข้อมูลที่อยู่ในคลาวด์มาวิเคราะห์หาพฤติกรรมของหมอกควันจากไฟฟ้าที่ส่งผลกระทบต่อปริมณฑล โดยจะใช้ข้อมูลในหลากหลายมิติประกอบกัน ซึ่งประกอบไปด้วย ข้อมูลมลพิษทางอากาศ ได้แก่ ค่าความเข้มข้นของฝุ่นละอองขนาดเล็ก (PM2.5) ค่าความเข้มข้นของปริมาณ ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) และ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO2) ที่เกิดจากการเผาไหม้ ของไฟฟ้า และข้อมูลอุตุนิยมวิทยา ได้แก่ ข้อมูลทิศทางและความเร็วลม, อุณหภูมิ, ความชื้นสัมพัทธ์, และความกดอากาศมาวิเคราะห์อย่างละเอียดด้วยโมเดลทางคณิตศาสตร์และสถิติขั้นสูง เพื่อที่จะทำการคาดการณ์รูปแบบและการเคลื่อนที่ของหมอกควันและแจ้งเตือนข้อมูลไปยังหน่วยบรรเทาสาธารณภัยเพื่อที่จะได้รับแจ้งจุดความร้อนก่อนที่จะลุกลามไปยังพื้นที่ชุมชน ดังนั้นในการศึกษาค้นคว้าครั้งนี้จะดำเนินการประยุกต์เทคนิคและวิธีการวิเคราะห์ข้อมูลต่างๆ เพื่อศึกษารูปแบบการเปลี่ยนแปลงเชิงเวลาและเชิงพื้นที่ของมลพิษหลักที่มาจาก การเผาไหม้ของไฟฟ้า รวมถึงศึกษาพฤติกรรมก่อตัวและการ สลายตัวของมลพิษเหล่านั้นในพื้นที่ศึกษา และผลของอุตุนิยมวิทยาต่อการเปลี่ยนแปลงมลพิษผ่านเทคนิคการวิเคราะห์ทาง สถิติโดยการใช้เมทริกซ์สหสัมพันธ์ (Correlation Matrix) และในขั้นตอนสุดท้ายของงานวิจัย แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับคาดการณ์รูปแบบของมลพิษที่แสดงถึงลักษณะแหล่งกำเนิดจากไฟฟ้าจะได้รับการพัฒนาขึ้น โดยข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับการบ่งชี้จุดที่เกิดไฟฟ้าจะเป็นเพียงข้อมูลที่คาดคะเนซึ่งอาจจะเกิดความคลาดเคลื่อนได้ดังนั้นระบบเฝ้าระวังไฟฟ้าทำการส่งข้อมูลในส่วนนี้ให้แก่หน่วยงานที่เกี่ยวข้อง เช่น ส่วนควบคุมไฟฟ้า ซึ่งจะเป็รูปแบบของการแจ้งเตือนเพื่อที่จะให้เจ้าหน้าที่เข้าไปตรวจสอบก่อนที่จะยืนยันผลมายังระบบ โดยข้อมูลส่วนนี้จะไม่ถูกเปิดเผยต่อสาธารณชน

3.3 แผนการดำเนินงานวิจัย

แผนการดำเนินการวิจัยแบ่งออกเป็นกิจกรรมดังต่อไปนี้

ตารางที่ 2 แผนการดำเนินงานวิจัยแบ่งตามรายละเอียดกิจกรรม

ลำดับ	กิจกรรมที่สำคัญ	ระยะเวลาการดำเนินกิจกรรม								
		ประจำปี 2564				ประจำปี 2565				น้ำหนัก (%)
		Q1	Q2	Q3	Q4	Q1	Q2	Q3	Q4	
1	สรุปรูปแบบการใช้ของระบบ (user scenario) โครจข่ายไอโอ									5%

ลำดับ	กิจกรรมที่สำคัญ	ระยะเวลาการดำเนินงานกิจกรรม								น้ำหนัก (%)
		ประจำปี 2564				ประจำปี 2565				
		Q1	Q2	Q3	Q4	Q1	Q2	Q3	Q4	
	ทีและไวร์เลสเซ็นเซอร์เน็ตเวิร์คที่ใช้เทคโนโลยีโลล่า									
2	สรุปความต้องการของระบบและการเชื่อมต่อ (system & network requirement) ของแพลตฟอร์มโครงข่ายไอโอทีและไวร์เลสเซ็นเซอร์เน็ตเวิร์คที่ใช้เทคโนโลยีโลล่า									5%
3	สรุปคุณสมบัติอุปกรณ์เซ็นเซอร์ที่ใช้ในการตรวจวัดมลพิษทางอากาศ									2.5%
4	การออกแบบอุปกรณ์ DIY (Do It Yourself) LoRa เกตเวย์									2.5%
5	ออกแบบแพลตฟอร์มโครงข่ายไอโอทีและไวร์เลสเซ็นเซอร์เน็ตเวิร์คที่ใช้เทคโนโลยีโลล่า									5%
6	พัฒนาแพลตฟอร์มโครงข่ายไอโอทีและไวร์เลสเซ็นเซอร์เน็ตเวิร์คที่ใช้เทคโนโลยีโลล่า									20%
7	พัฒนาอุปกรณ์ DIY (Do It Yourself) LoRa เกตเวย์									10%
8	ทำการทดสอบวัดความถูกต้องของการอ่านค่าข้อมูลเซ็นเซอร์									10%

ลำดับ	กิจกรรมที่สำคัญ	ระยะเวลาการดำเนินงานกิจกรรม								น้ำหนัก (%)
		ประจำปี 2564				ประจำปี 2565				
		Q1	Q2	Q3	Q4	Q1	Q2	Q3	Q4	
9	ทำการทดสอบระบบไวร์เลสเซ็นเซอร์ด้วยโปรโตคอล LoRaWAN									10%
10	ทำการสำรวจและติดตั้งอุปกรณ์และโครงข่าย ไวร์เลสเซ็นเซอร์เน็ตเวิร์คในพื้นที่เป้าหมาย									10%
11	ทำการเก็บรวบรวมข้อมูลของเซ็นเซอร์									10%
12	วิเคราะห์ข้อมูลเชิงลึกและศึกษาพฤติกรรมการก่อตัวและการสลายตัวของมลพิษในพื้นที่เป้าหมาย									10%

3.4 รูปแบบการใช้งานของระบบ (user scenario) โครงข่ายไอโอทีและไวร์เลสเซ็นเซอร์เน็ตเวิร์คที่ใช้เทคโนโลยีโลล่า

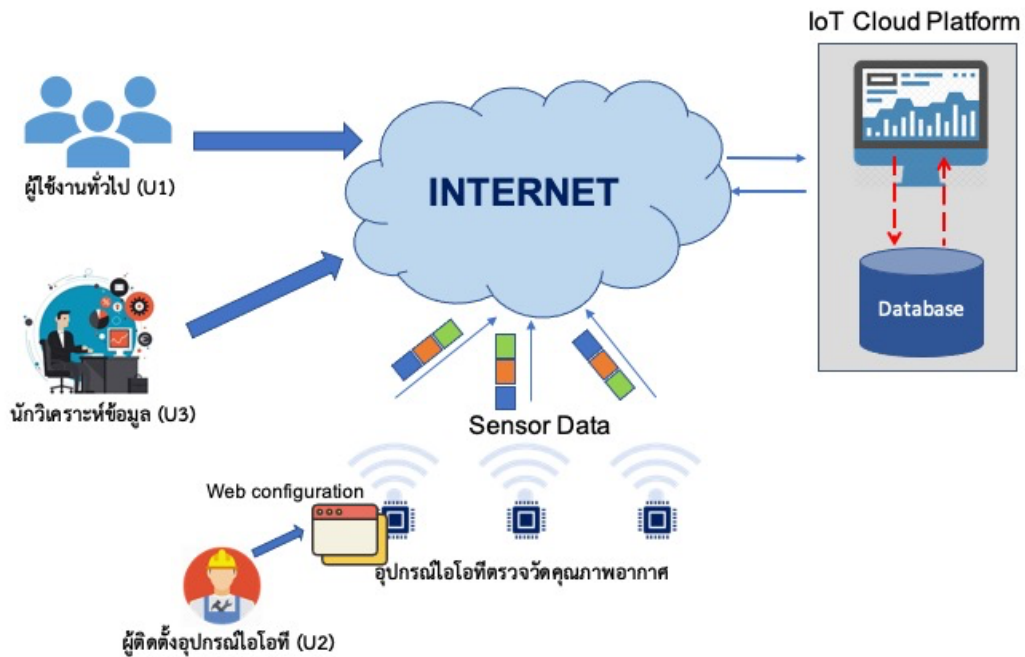
ก่อนที่จะทำการพัฒนาแพลตฟอร์มนั้นจำเป็นต้องมีการกำหนด รูปแบบการใช้งานเสียก่อนโดยคณะวิจัยฯ ได้กำหนดรูปแบบการใช้งานของระบบตามประเภทของผู้ใช้งานหลัก โดยลักษณะการใช้งานของระบบจะแบ่งออกเป็น 3 ประเภทได้แก่ 1) ผู้ใช้งานทั่วไปที่ต้องการตรวจสอบคุณภาพอากาศแบบเรียลไทม์ (U1) , 2) ผู้ที่นำอุปกรณ์ไอโอทีไปติดตั้งและใช้งานในพื้นที่ (U2) และ 3) นักวิเคราะห์ข้อมูลทางด้านสิ่งแวดล้อมและนักวิทยาศาสตร์ข้อมูล รูปที่ 23 แสดงแผนภาพรูปแบบการใช้งานของระบบโครงข่ายไอโอทีและไวร์เลสเซ็นเซอร์เน็ตเวิร์ค โดยสามารถสรุปความต้องการของผู้ใช้งานทั้งสามประเภทได้ดังต่อไปนี้

1) **ผู้ใช้งานทั่วไปที่ต้องการตรวจสอบคุณภาพอากาศแบบเรียลไทม์ (U1):** จะเป็นผู้ใช้งานหลักของระบบโดยจะสามารถตรวจสอบข้อมูลตรวจวัดสภาพอากาศแบบเรียลไทม์ได้จากเว็บไซต์ที่จัดทำขึ้น การแสดงข้อมูลสามารถแสดงเฉลี่ย เป็นรายชั่วโมง หรือ ระบุช่วงเวลาได้ ทั้งนี้ระบบจะแสดงค่าเฉลี่ยแสดงถึงอันตรายของของค่ามลพิษในจุดต่างๆได้โดยระบบทำงานอยู่บนคลาวด์และสามารถเข้าถึงได้ผ่านการเชื่อมต่ออินเทอร์เน็ต

2) **ผู้ที่นำอุปกรณ์ไอโอทีไปติดตั้งและใช้งานในพื้นที่ (U2):** เนื่องจากโครงการนี้มีเป้าหมายที่จะติดตั้งอุปกรณ์ไอโอทีตรวจวัดคุณภาพอากาศจำนวนมาก (ประมาณ 150 ตัว) ซึ่งคณะผู้วิจัยไม่สามารถที่จะไปติดตั้งอุปกรณ์ด้วยตัวเองทั้งหมดจึงต้องอาศัยความร่วมมือจากหลายภาคส่วนทั้งจากส่วนควบคุมไฟฟ้าและชุมชนท้องถิ่นในพื้นที่เป้าหมาย ดังนั้นจึงจะมีการจัดทำคู่มือในการติดตั้งอุปกรณ์ที่สามารถเข้าใจได้ง่ายแก่ผู้ใช้งานประเภท U2 หลังจากพัฒนาระบบเสร็จสิ้น โดยในการติดตั้งอุปกรณ์ทางคณะวิจัยจะต้องออกแบบและพัฒนาเว็บเพจที่ทำงานอยู่ในตัวอุปกรณ์ไอโอทีตรวจวัดคุณภาพอากาศซึ่งสามารถให้ผู้ใช้งานเข้ามาทำการกำหนดค่าติดตั้งอุปกรณ์ให้เชื่อมต่อกับระบบโครงข่ายไร้สายได้

3) **นักวิเคราะห์ข้อมูลทางด้านสิ่งแวดล้อมและนักวิทยาศาสตร์ข้อมูล (U3):** ผู้ใช้งานประเภท U3 นี้หมายถึงผู้ใช้งานที่ต้องการนำข้อมูลจากโครงข่ายไปวิเคราะห์ข้อมูลสำหรับงานในด้านต่างๆ ดังนั้นระบบจะมีช่องทางในการดาวน์โหลดข้อมูลในรูปแบบมาตรฐาน เช่น CSV เป็นต้น เพื่อที่จะได้นำไปใช้วิเคราะห์ข้อมูลขั้นสูง เช่น Big Data ได้

ทั้งนี้ผู้ใช้งานสามารถเข้าใช้งานแพลตฟอร์มผ่านส่วนต่อเชื่อมประสาน (User Interface) ซึ่งจะถูกพัฒนาในลักษณะแอปพลิเคชันเว็บ ที่อาศัยหลักการ Responsive Web Design ที่สามารถทำงานข้ามแพลตฟอร์มได้ ทั้ง เว็บเบราว์เซอร์ บนเครื่อง PC หรือ laptop และ เว็บเบราว์เซอร์บนสมาร์ทโฟน โดยเว็บไซต์จะปรับเปลี่ยนฟอร์แมตให้เหมาะสมกับอุปกรณ์ได้อย่างอัตโนมัติ แพลตฟอร์มมีเป้าหมายให้ผู้ใช้งาน U1 และ U2 ใช้งานแพลตฟอร์มผ่านสมาร์ทโฟน และ U3 จะเน้นการใช้งานที่สลับซับซ้อนรวมถึงทำการวิเคราะห์ข้อมูลเชิงลึก การใช้งานผ่าน PC หรือ laptop จึงมีความเหมาะสมมากกว่า



รูปที่ 23 ภาพรวมการใช้งานโครงข่ายไอโอทีเพื่อตรวจวัดคุณภาพอากาศแบบเรียลไทม์

3.5 ความต้องการของระบบและการเชื่อมต่อ (system & network requirement) ของแพลตฟอร์มโครงข่ายไอโอทีและไวร์เลสเซ็นเซอร์เน็ตเวิร์คที่ใช้เทคโนโลยีโลล่า

ในการสรุปความต้องการของระบบและการเชื่อมต่อของอุปกรณ์ไอโอทีตรวจวัดคุณภาพอากาศ จะกำหนดความต้องการจากพื้นที่เป้าหมายที่แตกต่างกัน โดยสามารถแบ่งประเภทออกเป็น 3 พื้นที่ ได้แก่ พื้นที่ห่างไกล (remote area), พื้นที่ในเขตชุมชนชนบท (rural area) และ พื้นที่ชุมชนเมือง (urban area) โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1) พื้นที่ห่างไกล (Remote area): หมายถึงพื้นที่ที่ลึกเข้าไปในเขตป่ามีภูเขาสูงที่มีต้นไม้ปกคลุมหนาแน่น รวมไปถึง พื้นที่การเกษตรที่ห่างไกลจากเขตชุมชน ซึ่งลักษณะการเกิดหมอกควันและฝุ่นละอองจะเกิดจากการเผาแปลงเกษตรเป็นบริเวณกว้างรวมถึงต้นตอของการเกิดไฟฟ้า ก่อให้เกิดมลพิษที่เกิดจากการเผาไหม้ เช่น ฝุ่นละออง PM2.5, ก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์ เป็นต้น ทำให้เกิดกลุ่มก้อนของหมอกควันขนาดใหญ่ ซึ่งอาจพัดผ่านไปยังพื้นที่อื่นได้จากกระแสลม ซึ่งในพื้นที่ดังกล่าวโดยทั่วไปแล้วจะไม่มีระบบโครงข่ายโทรคมนาคมเข้าถึงและไม่สามารถเชื่อมต่อกับระบบคลาวด์ที่ทำงานอยู่บนอินเทอร์เน็ตได้ ดังนั้นจึงต้องมีการคัดเลือกเทคโนโลยีที่เหมาะสมเพื่อในการติดต่อสื่อสารกับอุปกรณ์ไอโอที โดยความต้องการของระบบและการเชื่อมต่อในพื้นที่ดังกล่าว สามารถกำหนดได้ดังต่อไปนี้

- a. อุปกรณ์ไอโอทีที่ตรวจวัดคุณภาพอากาศอาจจะไม่มีการเชื่อมต่อที่มีอินเทอร์เน็ตที่มีเสถียรภาพเพื่อส่งข้อมูลไปยังระบบคลาวด์
- b. อุปกรณ์ไอโอทีที่ตรวจวัดคุณภาพอากาศอาจจะถูกติดตั้งในระยะมากกว่า 1 กิโลเมตรห่างจากจุดเชื่อมต่ออินเทอร์เน็ต (Internet Gateway)
- c. สถานที่ติดตั้งอุปกรณ์อาจจะไม่มีจุดจ่ายกระแสไฟฟ้า
- d. อุปกรณ์ไอโอทีที่ตรวจวัดคุณภาพอากาศต้องมีหน่วยความจำสำรองภายในเพื่อเก็บข้อมูลในช่วงที่ไม่มีการเชื่อมต่ออินเทอร์เน็ตและไม่มีกระแสไฟฟ้า
- e. การส่งสัญญาณการสื่อสารระหว่างอุปกรณ์ไอโอทีที่ตรวจวัดคุณภาพอากาศกับจุดเชื่อมต่ออินเทอร์เน็ต (Internet Gateway) อาจมีสิ่งกีดขวางระหว่างระยะทางการส่งได้ สัญญาณที่ได้รับจะมาจากหลายทิศทางคือ รอดผ่านสิ่งกีดขวาง (Absorption) อ้อมผ่านสิ่งกีดขวาง (Diffraction) และสัญญาณสะท้อน (Reflection) โดยสัญญาณที่มาจากคนละทิศทางจะมีคุณสมบัติทางกายภาพที่แตกต่างกันซึ่งเรียกลักษณะการสื่อสารแบบนี้ว่า Non Line of Sight (NLOS)
- f. อุปกรณ์ไอโอทีที่ตรวจวัดคุณภาพอากาศต้องใช้แบตเตอรี่ที่ต่ำในการส่งข้อมูลและใช้พลังงานน้อย

2) พื้นที่ในเขตชุมชนชนบท (Rural area): เป็นพื้นที่บริเวณโดยล้อมหรือใกล้กับพื้นที่ป่าซึ่งได้รับผลกระทบจากการเคลื่อนตัวของกลุ่มควันไฟและหมอกควันนอกจากนี้ในตัวพื้นที่เองนี้ยังสามารถเป็นแหล่งกำเนิดของกลุ่มควันหรือฝุ่นได้อีกด้วยโดยลักษณะการเกิดจะเป็นในรูปแบบของการเผาไหม้ในที่โล่งแจ้ง เช่น การเผาขยะ, การหุงหาอาหาร และ การเผาแปลงเกษตรขนาดเล็ก เป็นต้น โดยในพื้นที่เขตชุมชนชนบทนี้ อาจจะมีการเชื่อมต่ออินเทอร์เน็ตที่ค่อนข้างจำกัด ทั้งในด้านสัญญาณที่ไม่เสถียร และแบตเตอรี่ในการรับส่งข้อมูลที่จำกัด รวมถึงกระแสไฟฟ้าอาจจะไม่เสถียร ความต้องการของระบบจึงสามารถสรุปได้ดังนี้

- a. อุปกรณ์ไอโอทีที่ตรวจวัดคุณภาพอากาศอาจจะไม่มีการเชื่อมต่อที่มีอินเทอร์เน็ตที่มีเสถียรภาพเพื่อส่งข้อมูลไปยังระบบคลาวด์
- b. อุปกรณ์ไอโอทีที่ตรวจวัดคุณภาพอากาศต้องใช้แบตเตอรี่ที่ต่ำในการส่งข้อมูล
- c. อุปกรณ์ไอโอทีที่ตรวจวัดคุณภาพอากาศอาจจะถูกติดตั้งอยู่ในระยะ 100 - 250 เมตรจาก อุปกรณ์แอคเซสพอยต์ไร้สายที่ใกล้ที่สุด
- d. สถานที่ติดตั้งอุปกรณ์อาจจะมีจุดจ่ายกระแสไฟฟ้าที่ไม่คงที่
- e. อุปกรณ์ไอโอทีที่ตรวจวัดคุณภาพอากาศต้องมีหน่วยความจำสำรองภายในเพื่อเก็บข้อมูลในช่วงที่ไม่มีการเชื่อมต่ออินเทอร์เน็ตและไม่มีกระแสไฟฟ้า

3) พื้นที่ชุมชนเมือง (Urban Area) หมายถึงพื้นที่ห่างออกไปจากจุดศูนย์กลางการเกิดไฟป่าหรือกลุ่มหมอกควันขนาดใหญ่แต่อาจจะได้รับผลกระทบจากการพัดพาของกระแสลมและมี

แหล่งกำเนิดคลื่นที่มีอยู่ในพื้นที่อยู่แล้วเช่นการสะสมของกลุ่มคว้นหรือหมอกคว้นและฝุ่นละอองขนาดเล็กที่เกิดจากเกิดจากการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ของรถยนต์และกิจการการก่อสร้าง เป็นต้น

- a. อุปกรณ์ไอโอทีที่ตรวจวัดคุณภาพอากาศต้องมีการเชื่อมต่อที่มีอินเทอร์เน็ตที่มีเสถียรภาพสูงเพื่อส่งข้อมูลไปยังระบบคลาวด์
- b. อุปกรณ์ไอโอทีที่ตรวจวัดคุณภาพอากาศจะต้องติดตั้งอยู่ในระยะ 50 – 100 เมตร จากอุปกรณ์แอคเซสพอยต์ไร้สายที่ใกล้ที่สุด

c. สถานที่ติดตั้งอุปกรณ์ต้องมีจุดจ่ายกระแสไฟฟ้าที่คงที่

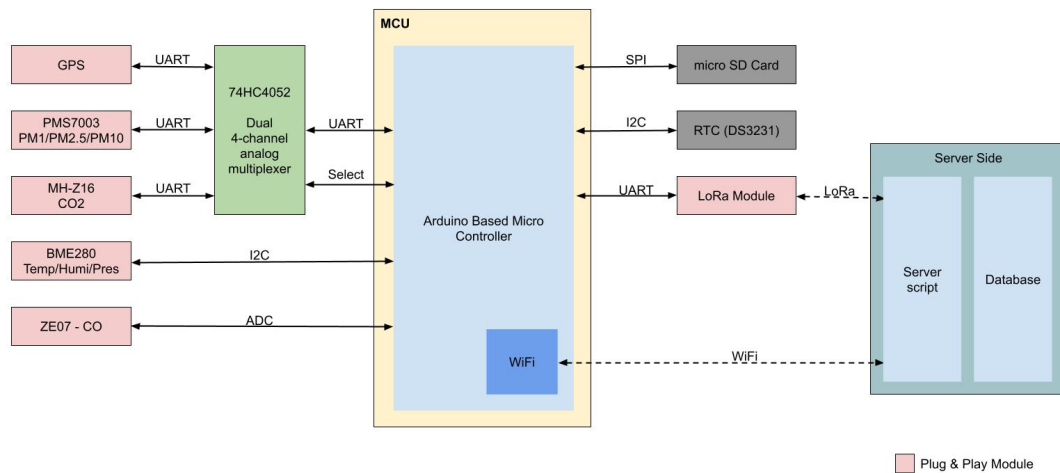
จากการกำหนดพื้นที่เป้าหมายดังกล่าวพบว่าการติดตั้งอุปกรณ์ไอโอทีที่ตรวจวัดคุณภาพอากาศเหมาะสมกับการสื่อสารแบบไร้สายหรือที่เรียกว่าไวร์เลสเซ็นเซอร์เน็ตเวิร์คเนื่องจากมีความสะดวกในเรื่องของการเชื่อมต่อกับระบบคลาวด์และอินเทอร์เน็ตมากกว่าการใช้สายสื่อสาร อีกทั้งยังสามารถรองรับการสื่อสารระยะไกลและการรับส่งข้อมูลแบบ NLOS ในพื้นที่ห่างไกลได้ด้วย แต่เนื่องจากความแตกต่างของพื้นที่ทำให้ลักษณะของการเชื่อมต่อกับระบบคลาวด์และอินเทอร์เน็ตอาจจะแตกต่างกันไป เช่นในพื้นที่ชุมชนเมือง และ พื้นที่เขตชุมชนในชนบท การติดตั้งอุปกรณ์สามารถเชื่อมต่อไปกับอุปกรณ์แอคเซสพอยต์ไร้สาย (WiFi access point) ตามอาคารบ้านเรือนในพื้นที่เป้าหมายเนื่องจากไม่จำเป็นต้องติดตั้งอุปกรณ์เพิ่มเติมในการเชื่อมต่อ เพียงแต่ใช้ทรัพยากรที่มีอยู่แล้ว ซึ่งมีระยะทำการอยู่ในพื้นที่รัศมีประมาณ 50-250 เมตร แต่ในพื้นที่ห่างไกล (Remote area) ที่ไม่มีโครงข่ายโทรคมนาคมรองรับ เช่น พื้นที่ลึกเข้าไปในเขตป่า โดยทางคณะผู้วิจัยได้เลือกพื้นที่เป้าหมายไว้ใน จังหวัดเชียงราย โดยได้รับความร่วมมือจาก ส่วนควบคุมและปฏิบัติการไฟฟ้า สำนักบริหารพื้นที่อนุรักษ์ที่ 15 (เชียงราย) โดยได้เลือก สถานีควบคุมไฟฟ้าพื้นที่ทรงงานดอยตุง อันเนื่องมาจากพระราชดำริ เป็นศูนย์กลางของโครงข่ายในพื้นที่ห่างไกล และจะติดตั้งอุปกรณ์ไอโอทีที่ตรวจวัดคุณภาพอากาศลึกเข้าไปในเขตป่าใกล้กับแหล่งกำเนิดของไฟฟ้าและกลุ่มหมอกคว้นดังแสดงใน รูปที่ 24 ซึ่งสัญญาณ WiFi ไม่สามารถเข้าถึงได้ ทางคณะจึงจะต้องพัฒนาระบบโครงข่ายสื่อสารระยะไกลด้วยเทคโนโลยีโลลา ในการนำข้อมูลจากอุปกรณ์ตรวจวัดเข้าสู่ระบบ คลาวด์ ทั้งนี้ในแต่ละพื้นที่การติดตั้งจะมีการตั้งกลุ่มไลน์เพื่อติดตามสถานการณ์ทำงานของเซ็นเซอร์, การแจ้งเตือนปัญหาหมอกคว้น รวมไปถึง ร่วมกันวิเคราะห์ข้อมูลหมอกคว้นในเชิงพื้นที่ด้วย ทั้งนี้การตั้งกลุ่มไลน์จะรวบรวมสมาชิกในบริเวณชุมชนเดียวเข้ามาอยู่ด้วยกัน ทั้ง ในพื้นที่ ห่างไกล, ชุมชนชนบท และ ชุมชนเมือง ทั้งนี้ทางคณะวิจัยจะนำข้อมูลของแต่ละกลุ่มมาเปรียบเทียบกับโมเดลทางคณิตศาสตร์ ที่ใช้ในการตรวจจับไฟฟ้าด้วย ยกตัวอย่างเช่น รายงานการตรวจจับไฟฟ้าของสถานีควบคุมไฟฟ้าในพื้นที่เป้าหมายซึ่งสามารถประเมินความถูกต้องของโมเดลได้



รูปที่ 24 พื้นที่โดยรอบสถานีควบคุมไฟป่าดอยตุ่ง

3.6 การกำหนดคุณสมบัติอุปกรณ์เซ็นเซอร์ที่ใช้ในการตรวจวัดมลพิษทางอากาศ

อุปกรณ์เซ็นเซอร์ที่จะนำมาใช้ในโครงการ คือ อุปกรณ์เซ็นเซอร์ที่ชื่อว่า Canarin (คานาริน) ที่พัฒนาโดยห้องปฏิบัติการอินเทอร์เน็ตเพื่อการศึกษาและวิจัย (intERLab) สถาบันเทคโนโลยีแห่งเอเชีย โดยอุปกรณ์ Canarin นั้นมุ่งเน้นผลกระทบของคุณภาพอากาศที่เกิดจากไฟป่าและการเผาในที่โล่งแจ้ง ซึ่งจะเป็นการเผาไหม้ในลักษณะที่ไม่สมบูรณ์ ซึ่งจะมีส่วนประกอบของ ฝุ่นละอองขนาดเล็ก, คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) และ คาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) เป็นหลัก โดยอุปกรณ์ Canarin สามารถส่งข้อมูลการตรวจวัดคุณภาพอากาศแบบ เรียลไทม์ ผ่านการสื่อสารแบบไร้สายที่สามารถรองรับ ได้ทั้ง โปรโตคอล WiFi และ LoRaWAN ข้อมูลจะถูกจัดเก็บบน คลาวด์เซิร์ฟเวอร์ ที่เชื่อมต่ออยู่กับ อินเทอร์เน็ต โดยโครงสร้างของอุปกรณ์ Canarin ได้แสดงไว้ใน รูปที่ 25



รูปที่ 25 โครงสร้างอุปกรณ์เซ็นเซอร์ตรวจวัดคุณภาพอากาศ Canarin

ส่วนประมวลผลกลาง (Main Control Unit หรือ MCU) และ อุปกรณ์เซ็นเซอร์: เป็นส่วนที่เป็นหัวใจของ อุปกรณ์เซ็นเซอร์ Canarin ที่มีหน่วยประมวลผลติดตั้งอยู่ โดยรองรับกับระบบปฏิบัติการ arduino ที่สามารถเขียนโค้ด ในการรับส่งข้อมูลจากอุปกรณ์ เซ็นเซอร์ ผ่านมาตรฐานการรับส่งข้อมูล เช่น SPI, I2S, UART และ I2C โดยเซ็นเซอร์ที่ติดตั้งมากับอุปกรณ์ Canarin นั้นประกอบไปด้วย เซ็นเซอร์ตรวจจับค่าฝุ่นละอองขนาดเล็ก (PMS 7003)[20] ที่สามารถตรวจจับฝุ่นละอองขนาด 1, 2.5 และ 10 ไมครอนได้, เซ็นเซอร์ตรวจจับ อุณหภูมิ, ความกดอากาศ, ความชื้นสัมพัทธ์ (BME 280)[21], เซ็นเซอร์ตรวจจับก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ หรือ CO (ZE07)[22], เซ็นเซอร์ตรวจจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ หรือ CO₂ (MH-Z16)[23] นอกจากนี้ อุปกรณ์ Canarin ยังถูกติดตั้ง เซ็นเซอร์ GPS มาด้วยเพื่อแสดงพิกัดของตำแหน่งอุปกรณ์ โดย เซ็นเซอร์ที่ใช้ คือ Ublox NEO-M8N GPS Sensor ข้อมูลที่อ่านค่าได้จาก เซ็นเซอร์จะถูกจัดเก็บไว้ใน หน่วยความจำ micro SD-Card ผ่าน อินเทอร์เฟซ SPI โดยจะมี โมดูล RTC (Real Time Clock) ที่คอยทำหน้าที่ synchronize เวลาการบันทึกค่า ของอุปกรณ์เซ็นเซอร์ โดยคุณสมบัติของ เซ็นเซอร์ที่ติดตั้งอยู่บน อุปกรณ์ Canarin สามารถสรุปได้ดังนี้

เซ็นเซอร์ตรวจจับค่าฝุ่นละอองขนาดเล็ก (PM Sensor): ทางคณะวิจัยได้เลือกใช้เซ็นเซอร์ PMS7003 ที่พัฒนาโดย บริษัท Plantower technology ซึ่งสามารถตรวจจับฝุ่นละอองขนาดเล็ก ขนาด 1, 2.5 และ 10 ไมครอน ในอากาศได้ โดยใช้หลักการกระเจิงของแสง Light Scattering ในการคำนวณหาจำนวนอนุภาคที่กระจายอยู่บนลำแสงเลเซอร์ โดย MCU ของ Canarin จะทำการติดต่อรับส่งข้อมูลกับ PMS7003 ด้วยอินเทอร์เฟซ UART คุณสมบัติของเซ็นเซอร์ PMS7003 สามารถสรุปไว้ใน ตารางที่ 10 ในภาคผนวก ก.

เซ็นเซอร์ตรวจวัดอุณหภูมิ, ความกดอากาศ และ ความชื้นสัมพัทธ์ (BME 280): ทางคณะได้เลือกเซ็นเซอร์ BME280 ที่พัฒนาโดยบริษัท Bosch ซึ่งมีประสิทธิภาพสูงเป็นที่ยอมรับในวงกว้างจากผลการทดสอบ BME280 จะถูกติดตั้ง เซ็นเซอร์ตรวจจับความชื้นสัมพัทธ์, เซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิ และ เซ็นเซอร์ตรวจวัดความกดอากาศ มาด้วย โดยจะส่งค่าที่อ่านได้มายัง MCU ของ Canarin ด้วยอินเทอร์เฟซ I2C คุณสมบัติของเซ็นเซอร์ BME280 ได้สรุปไว้ใน ตารางที่ 11 ในภาคผนวก ก.

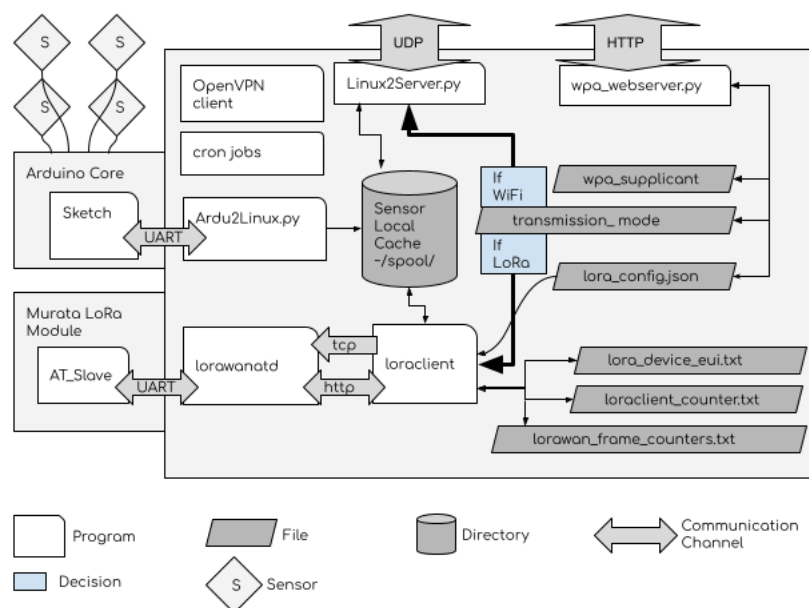
เซ็นเซอร์ตรวจจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (MH-Z16): MH-Z16 ได้รับการพัฒนาโดย บริษัท Winsen เทคโนโลยี โดยตัวเซ็นเซอร์ได้ใช้ เทคนิค non-dispersive infrared (NDIR) ในการตรวจจับ CO₂ ซึ่งเป็นเทคนิคเดียวกับเซ็นเซอร์ที่ใช้กับสถานีตรวจวัดคุณภาพอากาศที่ได้รับมาตรฐานการตรวจวัด ซึ่งจากผลการทดสอบจาก datasheet พบว่าตัวเซ็นเซอร์สามารถตอบสนองต่อความเข้มข้นของ CO₂ ได้ดี โดยการเชื่อมต่อกับ MCU ของ Canarin นั้นจะทำการส่งข้อมูลผ่านอินเทอร์เฟซ UART คุณสมบัติของ MH-Z16 สามารถสรุปไว้ใน ตารางที่ 12 ในภาคผนวก ก.

เซ็นเซอร์ตรวจจับก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์ (ZE07-CO): ZE07-CO ถูกพัฒนาโดย บริษัท Winsen เทคโนโลยี โดยได้ใช้หลักการ อิเล็กโทรเคมีคอล เข้ามาใช้ในการวัดความเข้มข้นของ CO ณ ปัจจุบัน เทคโนโลยีที่ใช้ในการตรวจจับ ก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์ ที่เป็นมาตรฐานนั้นได้ใช้หลักการ NDIR เป็นหลักซึ่งยังมีราคาแพงและใช้กับสถานีตรวจวัดขนาดใหญ่เป็นหลัก การใช้หลักการ อิเล็กโทรเคมีคอล จึงเป็นการวัด CO ที่สามารถนำมาเทียบเคียงหรือตรวจวัดแนวโน้มของการเกิดกลุ่มควันพิษของ CO ได้ โดยคุณสมบัติของ ZE07-CO ได้สรุปไว้ใน ตารางที่ 13 ในภาคผนวก ก. อุปกรณ์เซ็นเซอร์ จะทำการตรวจวัดคุณภาพอากาศเป็นระยะ เช่น ทุกๆ 5 นาที ซึ่งสามารถกำหนดค่าได้จากโปรแกรมที่ทำงานบน MCU และจะส่งค่าที่วัดได้ผ่านมายัง อินเทอร์เฟซการสื่อสารข้อมูลแบบต่างๆ เช่น SPI, I2S, UART และ I2C โดย MCU จะคอยทำหน้าที่จัดเก็บข้อมูลเหล่านั้นลงบน หน่วยความจำไมโครเอสดีการ์ด ก่อนที่จะนำส่งข้อมูลขึ้นสู่เซิร์ฟเวอร์ที่ติดตั้งอยู่บนคลาวด์ โดยอุปกรณ์ Canarin

ส่วนเชื่อมต่อการสื่อสาร (Communication Module): เป็นตัวควบคุมการติดต่อสื่อสารของอุปกรณ์เซ็นเซอร์กับอินเทอร์เน็ต โดยในตัวอุปกรณ์ สามารถรองรับการสื่อสารแบบไร้สาย ด้วยมาตรฐาน WiFi และ LoRaWAN ซึ่งผู้ใช้งานสามารถตั้งค่าการใช้งานได้ ในการออกแบบนั้น บอร์ด MCU ของ Canarin ได้มีการติดตั้งโมดูล WiFi มาแล้วซึ่งสามารถใช้งานการสื่อสารแบบ WiFi ได้ทันที แต่ในส่วนของ LoRaWAN นั้น จำเป็นต้องติดตั้ง LoRa โมดูลเพิ่มเติมโดยจะทำการสื่อสารกับ MCU ด้วยอินเทอร์เฟซ UART โดยในส่วนของ LoRa โมดูลนั้น อุปกรณ์ Canarin ได้เลือกใช้ โมดูล ABZ

ของ Murata [24] ซึ่งเป็นโมดูลการสื่อสารระยะไกลและใช้พลังงานต่ำ ที่เรียกว่า low power wide area network (LPWAN) ซึ่งรองรับการทำงานของ โพรโทคอล LoRaWAN ภายในโมดูล ABZ นั้น ประกอบไปด้วย ชิพเซ็ต Semtech SX1276 และ StM32L0 ไมโครคอนโทรลเลอร์ ซึ่งทำหน้าที่มอดูเลตข้อมูลเซ็นเซอร์กับสัญญาณ LoRa ซึ่งสามารถทำงานอยู่บนย่านความถี่ 920 – 925 MHz ซึ่งจัดเป็นช่องสัญญาณความถี่สาธารณะ (ISM Bands) ที่สามารถใช้งานได้ในประเทศไทย โดยโมดูล LoRa จะติดต่อสื่อสารกับ MCU ของอุปกรณ์ Canarin ผ่านอินเทอร์เฟซ UART โดยคุณสมบัติของ LoRa โมดูล ได้สรุปไว้ใน ตารางที่ 14 ในภาคผนวก ก.

อุปกรณ์ Canarin สามารถเลือกโหมดการสื่อสารได้ทั้ง WiFi และ LoRa แล้วแต่การติดตั้งและการนำไปใช้งานในพื้นที่ โดยผู้ใช้งานสามารถเลือกโหมดการทำงานจากเว็บที่ติดตั้ง ไว้ในตัวอุปกรณ์เอง (wpa_webserver.py) ในการใช้งานในโหมด LoRa นั้นจะมีการตั้งค่าพารามิเตอร์ผ่าน เว็บอินเทอร์เฟซนี้ โดยจะถูกจัดเก็บ ไว้ในไฟล์ lora_configuration.json การทำงานในโหมด LoRa จะถูกแบ่งออกเป็นสองกระบวนการได้แก่ loraclient และ lorawanatd โดย loraclient จะทำหน้าที่ส่งผ่านพารามิเตอร์ในการขอใช้งานโครงข่าย LoRa จากไฟล์ lora_configuration.json รวมทั้งทำหน้าที่อ่านค่าที่ได้จากเซ็นเซอร์ ในส่วนของ Lorawanatd นั้นจะทำหน้าที่ประสานงานกับ LoRa โมดูลผ่านอินเทอร์เฟซ UART โดยใช้มาตรฐาน AT command ในการรับส่งข้อมูล โดยจะรับข้อมูลเซ็นเซอร์จาก loraclient ผ่าน HTTP request และ จะใช้ TCP socket ในการยืนยันว่าแพ็คเก็ตได้ส่งถึงเซิร์ฟเวอร์ปลายทางแล้ว (Acknowledgement) โดยสถาปัตยกรรมของอุปกรณ์ Canarin ได้แสดงไว้ใน รูปที่ 26

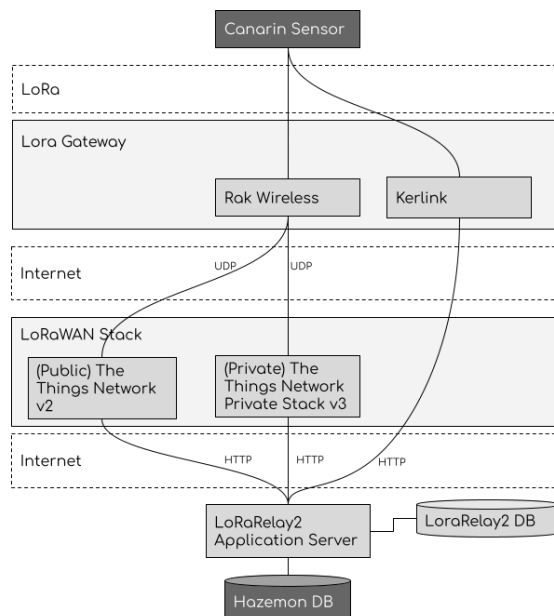


รูปที่ 26 สถาปัตยกรรมของส่วนสื่อสารของเซ็นเซอร์ Canarin

3.7 การออกแบบแพลตฟอร์มโครงข่ายไอโอทีและไวร์เลสเซ็นเซอร์เน็ตเวิร์คที่ใช้เทคโนโลยีโลล่า

เทคโนโลยีโลล่า มีคุณลักษณะสำคัญในเรื่องของการสื่อสารระยะไกลและใช้พลังงานที่ต่ำหรือที่เรียกว่า cost-effective solution ซึ่งเหมาะแก่การติดตั้งอุปกรณ์เซ็นเซอร์ในพื้นที่ระยะไกลและยังสามารถส่งข้อมูลกลับมาที่เซิร์ฟเวอร์ส่วนกลางได้ เน็ตเวิร์คโพรโตคอลที่ควบคุมการสื่อสารในเทคโนโลยีโลล่าคือ LoRaWAN [25] ซึ่งถูกพัฒนาโดย LoRa Alliance โพรโตคอลของ LoRaWAN ได้ถูกกำหนดเป็นมาตรฐานให้กับผู้ผลิตอุปกรณ์ LoRa ต่างๆ เพื่อที่จะให้สามารถรับส่งสัญญาณในช่องความถี่ที่กำหนดไว้ในโพรโตคอลของ LoRaWAN ในส่วนของอุปกรณ์ Canarin นั้นสามารถรองรับการส่งสัญญาณได้ทั้ง WiFi และ LoRa ซึ่งจะสามารถตั้งค่าการใช้งานได้ผ่าน เว็บเพจที่ถูกติดตั้งอยู่บนอุปกรณ์ Canarin อยู่แล้ว โดยโหมดการทำงานสามารถสลับไปมาระหว่าง WiFi และ LoRa ได้

เนื่องด้วยอุปกรณ์โลล่าเกตเวย์ที่ใช้ในโครงการนั้นมีอยู่สองประเภทคือ 1)เกตเวย์ประสิทธิภาพสูง ซึ่งทางโครงการได้เลือกใช้ อุปกรณ์ของ Kerlink [26] รุ่น Wirnet station ซึ่ง มีประสิทธิภาพสูง และถูกใช้งานมาแล้วในหลายประเทศซึ่งอุปกรณ์นี้ ได้พัฒนา LoRaWAN stack ที่เป็นโพรโตคอลสื่อสาร เป็นของตัวเองผ่านส่วนเชื่อมต่อประสานที่เรียกว่า Kerlink SPI communicates 2) อุปกรณ์ DIY LoRa เกตเวย์ ซึ่งใช้ LoRaWAN stack ของ The The Things Network [27] ดังนั้นการออกแบบแพลตฟอร์มโลล่าจึงเป็นลักษณะไฮบริดเพื่อที่จะสามารถรองรับการรับส่งข้อมูลกับเกตเวย์ทั้งสองแบบได้ ซึ่งสถาปัตยกรรมของแพลตฟอร์มไฮบริดโลล่าได้แสดงไว้ใน รูปที่ 27



รูปที่ 27 สถาปัตยกรรมของแพลตฟอร์มไฮบริดโลล่า

เพื่อที่จะสามารถส่งข้อมูลผ่านโครงข่ายโลล่า, อุปกรณ์ Canarin ได้ใช้ชิปเซ็ตของ Murata Electronic (CMWX1ZZABZ- 091) [24] โดยทำการแฟลชเฟิร์มแวร์ด้วยไลบรารี I-CUBE-LRWAN [28] อุปกรณ์ Canarin สามารถรองรับการรับส่งข้อมูล ผ่านเกตเวย์ DIY (Rak Wireless) ผ่าน Semtech UDP โพรโตคอล [29] ไปที่ LoRaWAN Stack ผ่านเครือข่าย the Things Network โดยในอุปกรณ์ Canarin จะถูกกำหนดค่า หมายเลขไอพี (IP address) ของเซิร์ฟเวอร์ ไว้ที่ ไฟล์ packet-forwarder configuration ในรูปแบบ json เพื่อที่จะส่งต่อ UDP แพ็กเก็ต ไปยัง ฐานข้อมูล (Hazemon DB)

โครงข่าย The Things Network [27] เป็นแพลตฟอร์ม LoRaWAN network ที่เปิดให้ใช้งานได้ฟรี ในลักษณะ crowdsourcing network ที่ผู้ใช้งานบนอินเทอร์เน็ตนำทรัพยากรมาแบ่งปัน เช่น ระบบเครือข่าย หรือ เกตเวย์โลล่า โดยโพรโตคอลที่ควบคุมการสื่อสาร คือ The Things Stack V2 [30] เนื่องด้วยเป็นบริการที่ฟรีทำให้ ทำให้การรับส่งข้อมูลบน The Things Network จึงเป็นในลักษณะ Best Effort ที่ไม่สามารถรับประกันเสถียรภาพของอัตราการรับส่งได้เมื่อมีการส่งข้อมูลในปริมาณที่สูง ดังนั้น ทางโครงการจึงได้ติดตั้งระบบ The Thing Private Stack V3 ส่วนตัวบนเซิร์ฟเวอร์ เพื่อเพิ่มเสถียรภาพในการรับส่งข้อมูล โดย เกตเวย์โลล่าที่ใช้ในโครงการนี้สามารถเชื่อมต่อได้ทั้ง The Things Stack V2 ที่เป็น Public และ The Thing Private Stack V3

3.8 สรุป

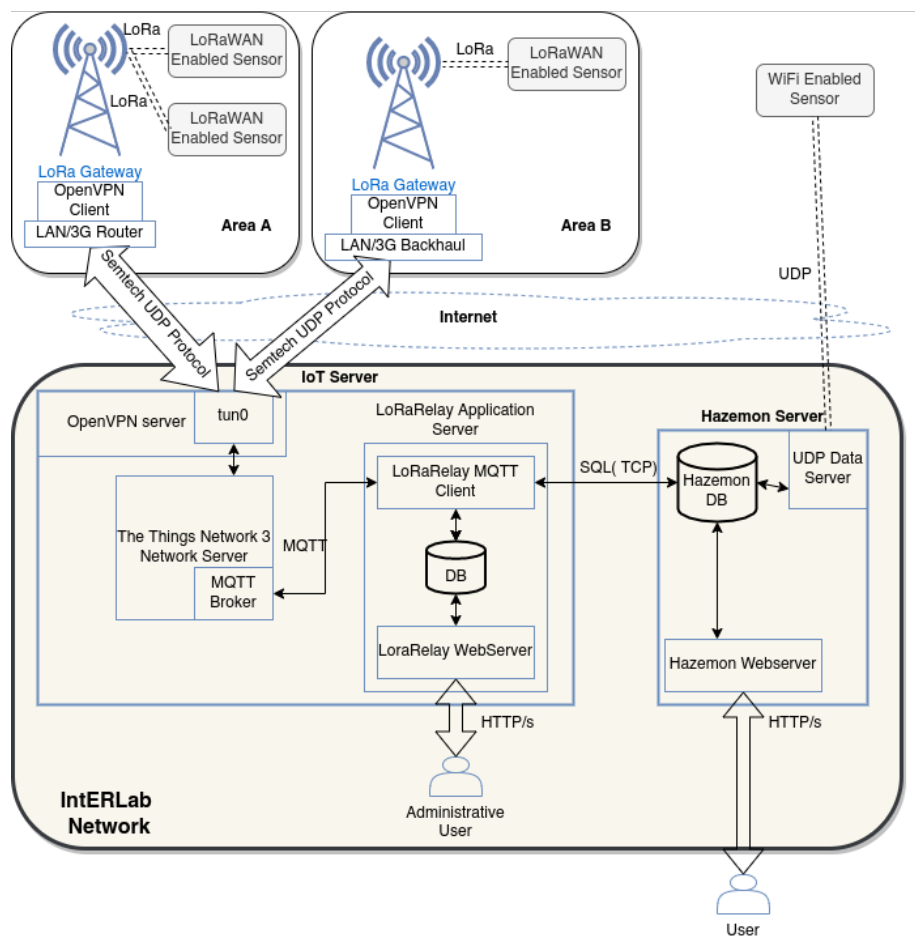
ในบทนี้ได้กล่าวถึง วิธีดำเนินการวิจัยของโครงการศึกษาเพื่อพัฒนาแพลตฟอร์มไอโอทีสำหรับการเฝ้าระวังไฟฟ้าและมลพิษทางอากาศด้วยเทคโนโลยีโลล่าโดยได้ให้รายละเอียดเกี่ยวกับแผนกดำเนินงาน และขอบเขตการดำเนินงานวิจัยของโครงการ ตลอดจนการกำหนดรูปแบบการใช้งานแพลตฟอร์มแบ่งตามประเภทของผู้ใช้งาน (User Requirement) และ ความต้องของระบบที่จะต้องคำนึงต่อการพัฒนาและการเชื่อมต่อโครงข่าย (System and Network Requirement) นอกจากนี้ได้ทำการกำหนดคุณสมบัติของอุปกรณ์เซ็นเซอร์ที่จะใช้ในการตรวจวัดมลพิษทางอากาศและหมอกควันจากไฟฟ้า และการออกแบบแพลตฟอร์มไฮบริดโลล่า ทั้งนี้แนวทางในการพัฒนาแพลตฟอร์มที่นำเสนอในบทนี้นั้น ได้ถูกนำไปประยุกต์ใช้ในการดำเนินงานวิจัยของโครงการ ดังปรากฏผลการวิจัยที่แสดงให้เห็นถึงความสำเร็จในการดำเนินงานวิจัยที่นำเสนอในบทถัดไป

บทที่ 4

ผลการวิจัย และการวิจารณ์ผล

4.1 การพัฒนาแพลตฟอร์มโครงข่ายไอโอทีและไวร์เลสเซ็นเซอร์เน็ตเวิร์คที่ใช้เทคโนโลยีโลล่า

แพลตฟอร์มโครงข่ายโลล่าสำหรับการเฝ้าระวังไฟฟ้า ได้ใช้โปรโตคอลสื่อสาร LoRaWAN ซึ่งเป็นไปตามมาตรฐานที่กำหนดโดย LoRa Alliance [31] และได้ใช้ชื่อแพลตฟอร์มว่า LoRaIoT ดังแสดงใน รูปที่ 28 โดยมีส่วนประกอบสำคัญ อุปกรณ์โลล่าเกตเวย์ ที่รับข้อมูลมาจากอุปกรณ์ Canarin เซ็นเซอร์ และส่งผ่านข้อมูลไปยัง Network Server และ Application Server ที่ทำงานอยู่บนระบบคลาวด์ ที่ติดตั้งไว้ที่ สถาบันเทคโนโลยีแห่งเอเชีย (intERLab network) ด้วยโปรโตคอล UDP โดยมีเป้าหมายเพื่อที่จะนำข้อมูลของอุปกรณ์เซ็นเซอร์ ไปแสดงผลที่เว็บ server แบบเรียลไทม์



รูปที่ 28 สถาปัตยกรรมของโครงข่ายโลล่าไอโอที

4.1.1 อุปกรณ์ โลล่า เกตเวย์

อุปกรณ์โลล่าเกตเวย์ ถูกแบ่งเป็นสองประเภท คือ Professional LoRa gateway ที่ได้เลือกใช้ เกตเวย์ ประสิทธิภาพสูงคือ Kerlink Wimet iStation [26] และ DIY LoRa gateway ที่พัฒนาจากราสเบอร์รี่พายซึ่งมีราคาถูก โดยเกตเวย์ ทั้งสองแบบ ได้ถูกตั้งค่าการทำงานให้เป็นตามมาตรฐาน LoRaWAN และ ข้อกำหนดคลื่นความถี่ในประเทศไทย ซึ่งอยู่ในช่วง 920 – 925 MHz [32] ซึ่งสามารถกำหนดค่าพารามิเตอร์ต่าง ให้อยู่ในรูปแบบมาตรฐาน JSON ซึ่งมีตัวอย่างดังแสดงใน รูปที่ 29 ซึ่งแบ่งออกเป็นหลายช่องสัญญาณ ที่มีแบนด์วิธ อยู่ที่ 125 KHz และใช้ช่วงคลื่นความถี่ ไว้ที่ 923.20 MHz – 925.00 MHz

```
{
  "SX1301_conf": {
    "lorawan_public": true,
    "antenna_gain": 6,
    "antenna_gain_desc": "Antenna gain, in dBi",
    "insertion_loss": 0.5,
    "insertion_loss_desc": "Insertion loss, in dB",
    "radio_0": {
      "enable": true,
      "freq": 923600000,
      "tx_enable": true,
      "tx_freq_min": 923200000,
      "tx_freq_max": 925000000
    },
    "radio_1": {
      "enable": true,
      "freq": 924600000,
      "tx_enable": false
    },
    "chan_multiSF_0": {
      "desc": "LoRa, 125 kHz, SF 7-12, 923.2 MHz",
      "enable": true,
      "radio": 0,
      "if": -400000
    },
    "chan_multiSF_1": {
      "desc": "LoRa, 125 kHz, SF 7-12, 923.4 MHz",
      "enable": true,
      "radio": 0,
      "if": -200000
    },
    "chan_multiSF_2": {
      "desc": "LoRa, 125 kHz, SF 7-12, 923.6 MHz",
      "enable": true,
      "radio": 0,
      "if": 0
    }
  }
}
```

รูปที่ 29 การตั้งค่าความถี่บนอุปกรณ์ โลล่า เกตเวย์

นอกจากนี้อุปกรณ์ โลล่าเกตเวย์ ยังมีหน้าที่เป็น

1. Packet Forwarder: เพื่อทำหน้าที่ส่งผ่าน โลล่า packet ไปยัง Network Server โดยในโครงการนี้ได้ใช้ ซอฟต์แวร์ TTN3 ซึ่งเป็นซอฟต์แวร์แบบเปิด (Open Source) ติดตั้งไว้ที่ Network Server ซึ่งใช้โปรโตคอล Semtech UDP ในการสื่อสารซึ่งมีการเข้ารหัสที่ โลล่า packet ที่มีการตรวจสอบ LoRa application key และ network key รูปที่ 30 แสดงการทำงานของ Packet Forwarder ใน Kerlink Wirnet iStation โลล่าเกตเวย์ ที่รับข้อมูลมาจากอุปกรณ์ เช่น เซอร์
2. OpenVPN client: เพื่อใช้เป็นช่องทางการควบคุมอุปกรณ์จากระยะไกล โดยผู้ดูแลระบบสามารถเข้ามาตรวจสอบและควบคุมการทำงานของอุปกรณ์ เกตเวย์ ได้ผ่านอินเทอร์เน็ต

```
(fcnt=23506)
Jan 9 19:04:42 Wirnet local1.notice spf: JSON up: {"rxpk":{"tmst":3037959980,"time":"2022-01-09T19:04:42Z","chan":5,"rfch":1,"freq":924.200000,"stat":1,"modu":"LORA","datr":"SF10BW125","codr":"4/5","lsnr":-11.0,"rssi":-119,"size":20,"data":"QMkEoQAA0lsVw5dibmmWKhbX/9Q="}
Jan 9 19:04:42 Wirnet local1.notice spf: INFO: [up] PUSH_ACK received in 52 ms
Jan 9 19:04:42 Wirnet local1.notice spf: INFO: [down] PULL_ACK received in 46.39 ms
Jan 9 19:04:42 Wirnet local1.notice spf: INFO: Received pkt from mote: 01D82263 (fcnt=6957)
Jan 9 19:04:42 Wirnet local1.notice spf: JSON up: {"rxpk":{"tmst":3038327956,"time":"2022-01-09T19:04:42Z","chan":3,"rfch":0,"freq":923.800000,"stat":1,"modu":"LORA","datr":"SF10BW125","codr":"4/5","lsnr":4.8,"rssi":-110,"size":20,"data":"QM12AEALRsVg0+9J7vkDsv1164="}
Jan 9 19:04:43 Wirnet local1.notice spf: INFO: [up] PUSH_ACK received in 55 ms
Jan 9 19:04:46 Wirnet local1.notice spf: INFO: Received pkt from mote: 01C960AE (fcnt=24629)
Jan 9 19:04:46 Wirnet local1.notice spf: JSON up: {"rxpk":{"tmst":3041710740,"time":"2022-01-09T19:04:46Z","chan":5,"rfch":1,"freq":924.200000,"stat":1,"modu":"LORA","datr":"SF10BW125","codr":"4/5","lsnr":-12.2,"rssi":-119,"size":20,"data":"QK5gyQEANWAVUkb0zJc0Ib1BgnE="}
Jan 9 19:04:46 Wirnet local1.notice spf: INFO: [up] PUSH_ACK received in 57 ms
Jan 9 19:04:46 Wirnet local1.notice spf: INFO: Received pkt from mote: 0035CFDC (fcnt=64992)
Jan 9 19:04:46 Wirnet local1.notice spf: JSON up: {"rxpk":{"tmst":3042094076,"time":"2022-01-09T19:04:46Z","chan":3,"rfch":0,"freq":923.800000,"stat":1,"modu":"LORA","datr":"SF10BW125","codr":"4/5","lsnr":5.2,"rssi":-109,"size":21,"data":"QNzPNQAA4P0Vg8vIvRyN1MgRACxi"}
Jan 9 19:04:46 Wirnet local1.notice spf: INFO: [up] PUSH_ACK received in 52 ms
Jan 9 19:04:46 Wirnet local1.notice spf: INFO: [down] PULL_RESP received - token[27:168] :)
Jan 9 19:04:46 Wirnet local1.notice spf: JSON down: {"txpk":{"imme":false,"tmst":3042959980,"freq":924.2,"rfch":0,"pove":13,"modu":"LORA","datr":"SF10BW125","codr":"4/5","ipol":true,"size":17,"ncrc":true,"data":"YMKoEQCBVhQGfCQ69KvUu2k="}
Jan 9 19:04:47 Wirnet local1.notice spf: INFO: [down] PULL_RESP received - token[27:169] :)
Jan 9 19:04:47 Wirnet local1.notice spf: JSON down: {"txpk":{"imme":false,"tmst":3043327956,"freq":923.8,"rfch":0,"pove":13,"modu":"LORA","datr":"SF10BW125","codr":"4/5","ipol":true,"size":16,"ncrc":true,"data":"VGMi2AGAK+gV7KLITuw0bg="}
Jan 9 19:04:50 Wirnet local1.notice spf: INFO: [down] PULL_RESP received - token[27:170] :)
Jan 9 19:04:50 Wirnet local1.notice spf: INFO: [down] PULL_RESP received - token[27:170] :)
```

รูปที่ 30 แสดง Log ของ Packet forwarder ใน Kerlink Wirnet iStation

4.1.2 การออกแบบและพัฒนาอุปกรณ์ DIY (Do It Yourself) โลล่า เกตเวย์

อุปกรณ์ DIY โลล่า เกตเวย์ จะมาช่วยขยายพื้นที่การติดตั้งและใช้ในพื้นที่ที่ อุปกรณ์ LoRa เกตเวย์ ประสิทธิภาพสูงไม่สามารถเข้าถึงได้ โดย อุปกรณ์ DIY LoRa เกตเวย์ จะถูกพัฒนาจากอุปกรณ์ single board computer เช่น ราสเบอร์รี่พาย โดยจะต้องอาศัยแผ่นวงจรหรือโมดูลที่รองรับโปรโตคอล LoRaWAN โดยทางคณะ ได้เลือกใช้ LoRa โมดูล RAK 2245 ของบริษัท RakWireless [29] ที่ออกแบบมาเพื่อให้ทำงานบนอุปกรณ์ ราสเบอร์รี่พาย 3 โมเดล B+ และ ราสเบอร์รี่พาย 4 โดยโมดูล RAK 2245 ได้ใช้ชิปเซ็ตของ SEMTECH SX1301 ซึ่งรองรับการสื่อสารของ LoRaWAN

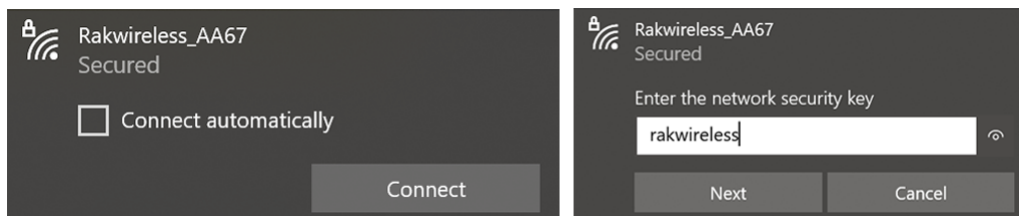
โพรโตคอล โดยจะต้องทำงานร่วมกับ LoRaWAN Stack ของ The Things Networks โดยทาง RAK Wireless ได้จัดทำ ซอฟต์แวร์แบบเปิด ที่ต้องติดตั้งบนรหัสเบอรี่พาย เพื่อให้ทำงานเป็น LoRa เกตเวย์ โดยจะรองรับการสื่อสารทั้งหมด 8 ช่องสัญญาณ โดยมีกำลังส่งสูงสุดอยู่ที่ 27 dBm และค่า RX Sensitivity อยู่ที่ -139 dBm โดยอุปกรณ์จะทำงานอยู่บนช่องสัญญาณ AS920 (920 – 925 MHz) ซึ่งเป็นช่องสัญญาณ ISM ที่สามารถใช้งานได้ ทั้งนี้ โมดูล RAK 2245 ยังประกอบด้วย GPS โมดูล (Ublox MAX-7Q GPS Module) เพื่อแสดงพิกัดของ เกตเวย์ โดยอัตโนมัติ โดยอุปกรณ์ ที่ใช้ในการพัฒนา DIY LoRa เกตเวย์ ได้แสดงไว้ใน รูปที่ 31 และ รูปที่ 32



รูปที่ 31 LoRa โมดูล RAK 2245 สำหรับการ
พัฒนา LoRa เกตเวย์

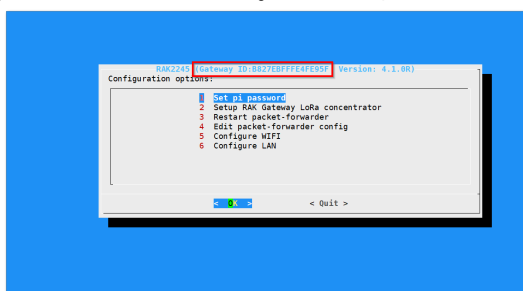
รูปที่ 32 อุปกรณ์ single board computer
รหัสเบอรี่พาย 3 โมเดล B+

ทางผู้พัฒนาโมดูล RAK2245 ได้เปิดให้ใช้ เฟิร์มแวร์ที่เป็น open source ซึ่งสามารถดาวน์โหลดและติดตั้งบนอุปกรณ์ รหัสเบอรี่พายได้ เมื่อติดตั้งเฟิร์มแวร์เสร็จสิ้นแล้ว เกตเวย์จะทำงานอยู่ในโหมด AP (Access Point) ที่อนุญาตให้ใช้คอมพิวเตอร์เชื่อมต่อผ่าน WiFi แบบ Local เพื่อเข้าไปทำการปรับแต่งค่าการทำงานได้ของอุปกรณ์ เกตเวย์ได้ (รูปที่ 33)

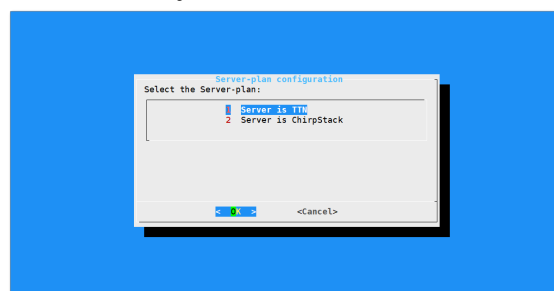


รูปที่ 33 DIY LoRa Gateway AP Mode

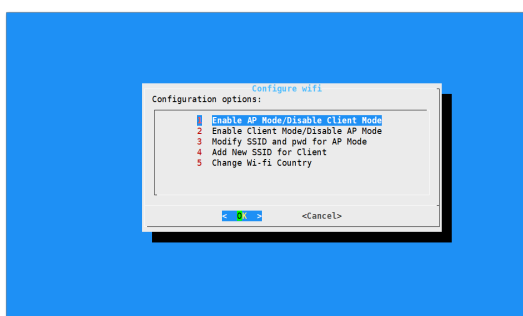
ภายในเฟิร์มแวร์ของ RAK จะมีเมนูช่วยเหลือให้ผู้ใช้งานปรับแต่งค่าพารามิเตอร์ต่างๆ โดยขั้นตอนแรกจะต้องทำการปรับเปลี่ยนพาสเวิร์ดของอุปกรณ์เพื่อความปลอดภัย หลังจากนั้นจะต้องทำการเชื่อมต่ออุปกรณ์เกตเวย์เข้ากับ Internet โดยสามารถเลือกการเชื่อมต่อได้สองแบบ คือ การเชื่อมต่อแบบ WiFi และ แบบ LAN ทั้งนี้เมื่อเลือกการเชื่อมต่อแบบ WiFi จะต้องทำการรีเซ็ตอุปกรณ์เพื่อเปลี่ยน โหมดการทำงานแบบ WiFi AP ให้เป็น WiFi Client แทน เพื่อเชื่อมต่อกับ Network Server จะต้องทำการเลือกประเภทของโปรโตคอลในการเชื่อมต่อ ที่เมนู “Setup RAK Gateway LoRa Concentrator” ซึ่งปัจจุบันสามารถรองรับ Server ที่ใช้ TTN Stack และ Chirp Stack ซึ่งจะต้องมีการกำหนด IP address ของ Server ไว้ที่อุปกรณ์ อีกส่วนที่สำคัญคือจะต้องมีการเลือกประเทศเพื่อให้เกตเวย์สามารถเลือกใช้ย่านความถี่ที่ถูกต้อง (Frequency Planning) โดยสำหรับประเทศไทย นั้น ย่านความถี่ที่ใช้คือ AS_923 ที่ทำงานอยู่บนย่านความถี่ 923MHz – 925MHz แสดงรูปที่ 34 ตัวอย่างการเมนูการตั้งค่าอุปกรณ์ LoRa เกตเวย์ ที่ใช้โมดูล RAK2245



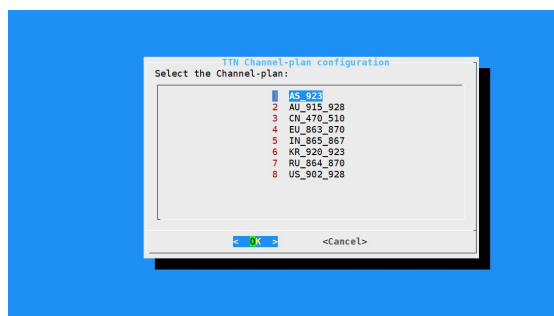
a. เมนูตั้งค่าอุปกรณ์ RAK Gateway



b. เลือกการเชื่อมต่อกับ TTN Server



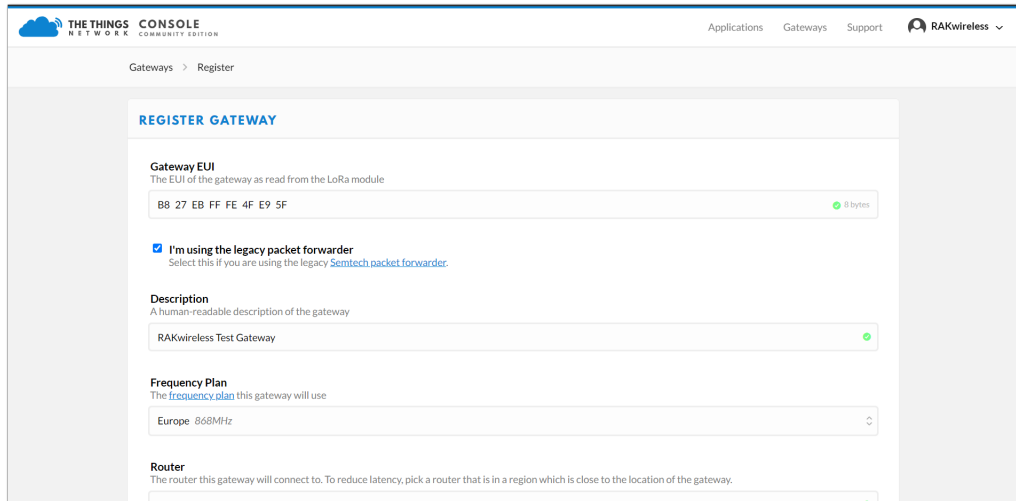
c. เมนูปรับเปลี่ยน โหมด WiFi AP และ WiFi Client



d. เมนูเลือกย่านความถี่

รูปที่ 34 แสดงเมนูการติดตั้งอุปกรณ์ DIY LoRa Gateway สำหรับ โมดูล RAK2245

ที่ Network Server จะต้องลงทะเบียนโลล่าเกตเวย์ โดยใช้ Gateway EUI ซึ่งเป็น หมายเลขเฉพาะ (Unique ID) แสดงการลงทะเบียน DIY LoRa เกตเวย์ ที่ Network Server (รูปที่ 35)



รูปที่ 35 ลงทะเบียน DIY LoRa เกตเวย์ ที่ Network Server

4.1.3 การพัฒนา IoT Server บนระบบคลาวด์

IoT server ถูกพัฒนาไว้ที่คลาวด์ โดยมีวัตถุประสงค์เป็นศูนย์กลางในการรวบรวมข้อมูลจากอุปกรณ์เซ็นเซอร์ และแสดงผล โดยมีส่วนประกอบ 4 ส่วนหลักดังนี้

1. **OpenVPN server:** ทำหน้าที่สร้าง Virtual Private Network ระหว่าง IoT server กับ LoRa เกตเวย์ และ Canarin sensor ซึ่งสามารถควบคุมอุปกรณ์ทั้งหมดผ่านระบบ VPN ได้ (รูปที่ 36)

Common Name	Real Address	Virtual Address	Virtual IPv6 Address	Bytes Received	Bytes Sent	Connected Since	Connected Since (time...)	Username	Client ID	Peer ID
kerlink-station-1	203.159.31.175:39341	10.8.0.14		1029339	6440564	Fri Jan 7 19:42:54 2022	1641530574	UNDEF	1	1
kerlink-station-1	48.237.32.141:52760	10.8.0.18		1609250	1468208	Sun Jan 9 22:53:02 2022	1641743582	UNDEF	33	3
loro-router-1	48.237.32.141:9001	10.8.0.6		161360	160286	Sun Jan 9 16:50:32 2022	1641721852	UNDEF	31	2

รูปที่ 36 ระบบ VPN เชื่อมต่อ อุปกรณ์ LoRa กับ IoT server

2. **LoRaWAN Network Server:** ทางคณะวิจัยได้เลือกใช้ The Things Stack version 3 (TTN3) ซึ่งเป็นซอฟต์แวร์ Open Source และรองรับมาตรฐานจาก LoRa Alliance โดยได้ทำการติดตั้งในรูปแบบ Docker Container โดยการติดตั้งจะต้องทำการสร้าง MQTT Broker ขึ้นเพื่อทำหน้าที่ส่งผ่านข้อมูลเซ็นเซอร์ไปยัง Application server ในการติดตั้ง Network Server ด้วย TTN3 มีขั้นตอนดังนี้ 1) ลงทะเบียน LoRa เกตเวย์ กับ TTN3, 2) สร้าง TTN3 แอปพลิเคชัน ซึ่งระบบจะสร้าง แอปพลิเคชันคีย์ที่มีไม่ซ้ำกับใคร (unique number) , 3) ลงทะเบียน อุปกรณ์ LoRa (Canarin sensor) ไว้กับ TTN3 application โดยใช้ เน็ตเวิร์ค

และ แอปพลิเคชัน คีย์ ในการลงทะเบียน เมื่ออุปกรณ์ลงทะเบียนสำเร็จจะปรากฏอยู่บน แผงควบคุม (dashboard) ของ TTN3 ดังแสดงไว้ใน รูปที่ 37 และ รูปที่ 38

ID	Name	Gateway EUI	Status
dragino-indoor-1	Dragino Indoor 1	A8 40 41 1F AF 2...	Disconnected
gemtech-1	Gemtech-1	00 00 1C 49 7B C...	Disconnected
kerlink-istation-1	Kerlink iStation 1	70 76 FF 00 54 0...	Connected
kerlink-station-1	Kerlink Station 1	72 76 FF 00 0B 0...	Connected
rak-1	RakWireless 1	B8 27 EB FF FE 6...	Disconnected
rak-5	RakWireless 5	B8 27 EB FF FE 1...	Disconnected
rak-wfm	Rakwireless WFM	B8 27 EB FF FE 1...	Disconnected

รูปที่ 37 แสดงรายชื่อ อุปกรณ์ LoRa เกตเวย์ ที่ลงทะเบียนไว้กับ TTN3 Private Server

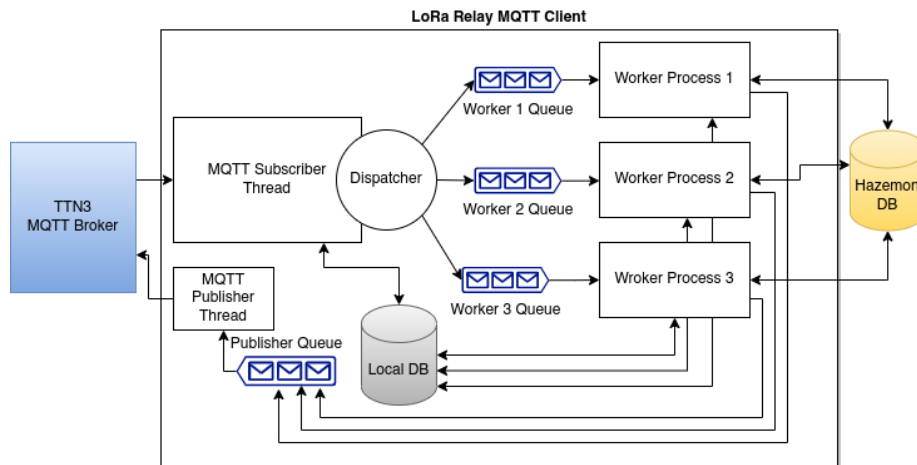
Time	Type	Data preview
02:34:25	Send downlink message	Gtw EUI: 72 76 FF 00 08 03 1F 82 Rxl Delay: 5 Rxl Data Rate Index: 2 Rxl Frequency: 924600000 Rx2 F...
02:34:24	Receive uplink message	DevAddr: 00 35 CF DC FCnt: 65045 FPort: 21 Data rate: SF100W125 SNR: 5 RSSI: -108
02:34:20	Send downlink message	Gtw EUI: 72 76 FF 00 08 03 1F 82 Rxl Delay: 5 Rxl Data Rate Index: 2 Rxl Frequency: 924600000 Rx2 F...
02:34:20	Receive uplink message	DevAddr: 01 08 22 63 FCnt: 7018 FPort: 21 Data rate: SF100W125 SNR: 4.2 RSSI: -113
02:34:14	Send downlink message	Gtw EUI: 72 76 FF 00 08 03 1F 82 Rxl Delay: 5 Rxl Data Rate Index: 2 Rxl Frequency: 924600000 Rx2 F...
02:34:13	Receive uplink message	DevAddr: 00 35 CF DC FCnt: 65044 FPort: 21 Data rate: SF100W125 SNR: 5.2 RSSI: -109
02:34:09	Send downlink message	Gtw EUI: 72 76 FF 00 08 03 1F 82 Rxl Delay: 5 Rxl Data Rate Index: 2 Rxl Frequency: 924600000 Rx2 F...
02:34:09	Receive uplink message	DevAddr: 01 08 22 63 FCnt: 7017 FPort: 21 Data rate: SF100W125 SNR: 4 RSSI: -110
02:34:08	Receive gateway status	Metrics: { ack: 100, rxfw: 10, rxin: 10, rxok: 10, txin: 11, txok: 10 } Versions: { ttn-lw-gateway-s...
02:34:06	Send downlink message	Gtw EUI: 72 76 FF 00 08 03 1F 82 Rxl Delay: 5 Rxl Data Rate Index: 2 Rxl Frequency: 924200000 Rx2 F...
02:34:05	Receive uplink message	DevAddr: 01 C9 60 AE FCnt: 24781 FPort: 21 Data rate: SF100W125 SNR: -11.8 RSSI: -119
02:34:05	Send downlink message	Gtw EUI: 72 76 FF 00 08 03 1F 82 Rxl Delay: 5 Rxl Data Rate Index: 2 Rxl Frequency: 924200000 Rx2 F...
02:34:04	Receive uplink message	DevAddr: 00 A1 04 C9 FCnt: 23666 FPort: 21 Data rate: SF100W125 SNR: -10.2 RSSI: -120
02:34:03	Send downlink message	Gtw EUI: 72 76 FF 00 08 03 1F 82 Rxl Delay: 5 Rxl Data Rate Index: 2 Rxl Frequency: 923600000 Rx2 F...
02:34:02	Receive uplink message	DevAddr: 00 35 CF DC FCnt: 65043 FPort: 21 Data rate: SF100W125 SNR: 4.5 RSSI: -106
02:33:58	Send downlink message	Gtw EUI: 72 76 FF 00 08 03 1F 82 Rxl Delay: 5 Rxl Data Rate Index: 2 Rxl Frequency: 923600000 Rx2 F...

รูปที่ 38 แสดง ข้อมูล Canarin sensor ที่ส่งข้อมูลมายัง Kerlink Winet iStation ด้วยเทคโนโลยีโลล่า

3. **Application Server (LoRa Relay):** ถูกพัฒนาจาก Python Django เฟรมเวิร์ค ซึ่งติดตั้ง MySQL database ไว้ในตัว โดยทำงานอยู่ในรูปแบบ Docker Container เช่นเดียวกับ Network Server ซึ่งมีหน้าที่ดังต่อไปนี้

- ตรวจสอบความถูกต้องของข้อมูล (Data Integrity) โดยทำการตรวจสอบรหัส Network and Application คีย์ที่ฝังตัวอยู่ใน ข้อมูลโลล่า
- จำแนกข้อมูลเซ็นเซอร์ (Decode) จาก โลล่าแพ็คเก็ต ของอุปกรณ์ Canarin ซึ่งสามารถจำแนกข้อมูล เป็นประเภทต่างๆ เช่น PM2.5, PM10, PM1, CO, CO2, อุณหภูมิ ตำแหน่ง พิกัด GPS เป็นต้น เพื่อที่จะเตรียมความพร้อมของข้อมูลก่อนนำส่งข้อมูลที่ประมวลผลแล้ว ไปยัง Web Server เพื่อแสดงผลข้อมูลและจัดเก็บในฐานข้อมูล
- ทำการส่ง Acknowledge Message กลับไปยังอุปกรณ์ Canarin เพื่อยืนยันว่าข้อมูลได้ส่งถึงเซิร์ฟเวอร์แล้ว
- บริหารจัดการข้อมูลที่ซ้ำซ้อน (Duplicate Packet) เนื่องจากการรับส่งข้อมูลบนระบบโลล่า จะเป็นแบบ Broadcast อุปกรณ์โลล่าสามารถส่งข้อมูลไปที่ เกตเวย์หลายตัวในเวลาพร้อมๆกันได้ ซึ่งถูกส่งต่อมาที่ LoRa Relay เพื่อประมวลผลจึงได้มีการคัดกรองข้อมูลที่ซ้ำซ้อนออกไป โดยส่งข้อมูลเพียงข้อมูลเดียวไปจัดเก็บที่ฐานข้อมูลหลัก (Hazemon Database) นอกจากนี้ กระบวนการ retransmission บนอุปกรณ์ Canarin เซ็นเซอร์สามารถส่งข้อมูลที่ซ้ำซ้อนมาที่ LoRa Relay server เช่นกัน จึงต้องมีกระบวนการคัดกรองเช่นกัน โดยสามารถตรวจสอบความซ้ำซ้อนได้จาก Packet ID จะถูกบันทึกจาก ID ของอุปกรณ์และเวลาอ่านค่าข้อมูล (timestamp)

LoRa Relay server เป็นหัวใจสำคัญของแพลตฟอร์มโลล่า ซึ่งจะต้องรองรับการเชื่อมต่อกับอุปกรณ์มากมาย และมีปริมาณข้อมูลไหลเข้ามาอยู่ตลอดเวลา (Data Streaming) มีความจำเป็นที่จะต้องมีการบริหารจัดการข้อมูลที่ดีให้สามารถรองรับการทำงานแบบ multithread ได้ ซึ่งทางคณะวิจัยได้พัฒนา Queue management ไว้ที่ MQTT client โดยใช้ชุดคำสั่งของ multiprocessing Django Management ซึ่งสามารถนำระบบ Queue มารองรับการรับส่งข้อมูลมาจาก TTN3 MQTT ก่อนที่ประมวลผลและนำเข้าฐานข้อมูลหลัก (Hazemon Database) ดังแสดงใน รูปที่ 39



รูปที่ 39 สถาปัตยกรรมภายในของ LoRaRelay MQTT client

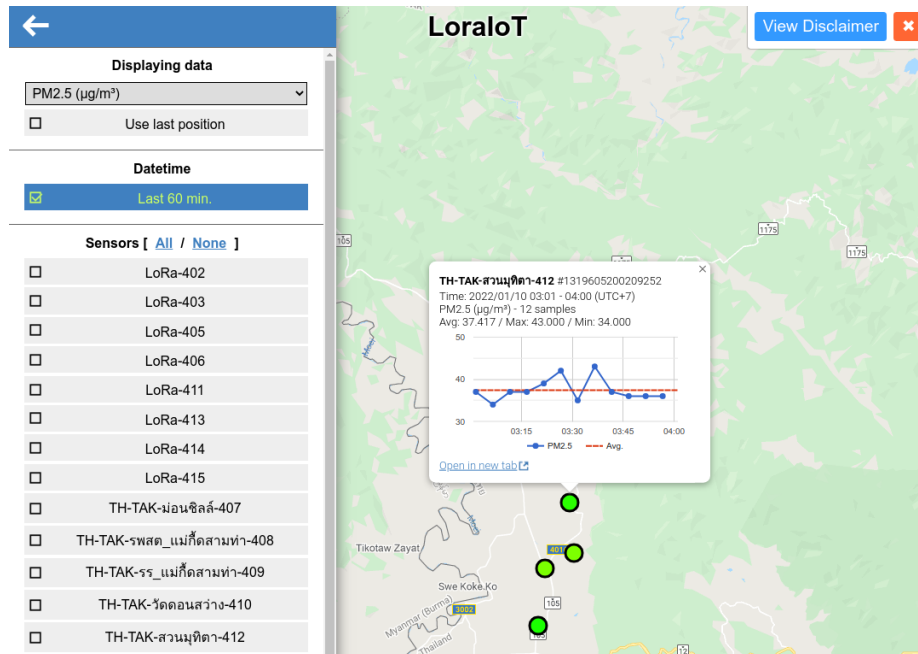
ภายใน LoRa Relay server ได้มีการติดตั้งแผงควบคุม (Dashboard) สำหรับตรวจสอบสถานะของ อุปกรณ์เซ็นเซอร์ โดยสถานะ (Online/Offline) จะถูกอัปเดตเมื่อ LoRa Relay ได้ข้อมูลจากอุปกรณ์ ดังแสดงใน รูปที่ 40

Canarin LoRa Relay		3937363250307B0A Online	393736326E306FOA Offline
Home		Hazemon name TH-TAK-????????-407 Last seen Today at 3:58 AM Last GPS Lat:16.846110667, Lng:98.9163998, Alt:2416 Hazemon id 1319605201183752 Hazemon project loraiot Last data rate 2 Sensor data count 52093 Last radio properties snr:-5.5, rssi:-110 Gateway type the-things-network3 Gateway id hello	Hazemon name TH-TAK-????-????????-408 Last seen Yesterday at 5:27 PM Last GPS Lat:16.844691832, Lng:98.588739667, Alt:1976 Hazemon id 1319605200485552 Hazemon project loraiot Last data rate 2 Sensor data count 27789 Last radio properties snr:-16.8, rssi:-119 Gateway type the-things-network3 Gateway id hello
Node Status		Hazemon name TH-TAK-??-????????-409 Last seen Today at 3:58 AM Last GPS Lat:16.834131, Lng:98.593045, Alt:186.4 Hazemon id 1319605201194282 Hazemon project loraiot Last data rate 2 Sensor data count 54852 Last radio properties snr:-9.5, rssi:-119 Gateway type the-things-network3 Gateway id hello	Hazemon name TH-TAK-????????-410 Last seen Today at 3:58 AM Last GPS Lat:16.79015333, Lng:98.588107833, Alt:224.5 Hazemon id 131960520177092 Hazemon project loraiot Last data rate 2 Sensor data count 59271 Last radio properties snr:4.5, rssi:-112 Gateway type the-things-network3 Gateway id hello

รูปที่ 40 LoRa Relay Dashboard เพื่อตรวจสอบสถานะของอุปกรณ์ เซ็นเซอร์

4. Web Application Server (Hazemon Server): เป็นส่วนเชื่อมต่อประสานกับผู้ใช้งานระบบ (User Interface) หรือ Web Front End ซึ่งถูกพัฒนาด้วยภาษา PHP และ Python ข้อมูลที่ถูกประมวลผลจาก LoRa Relay จะถูกส่งเข้ามาจัดเก็บไว้ที่ฐานข้อมูลหลัก

(Hazemon Database) และจะถูกแสดงผลไปที่ Web Front End ซึ่งแสดงสถานะข้อมูลของอุปกรณ์ Canarin เซ็นเซอร์ พร้อมกับ พิกัดที่ติดตั้ง ดังแสดงใน รูปที่ 41



รูปที่ 41 แสดง Web Application ของแพลตฟอร์ม LoRaloT (<https://hazemon.in.th/loraiot>)

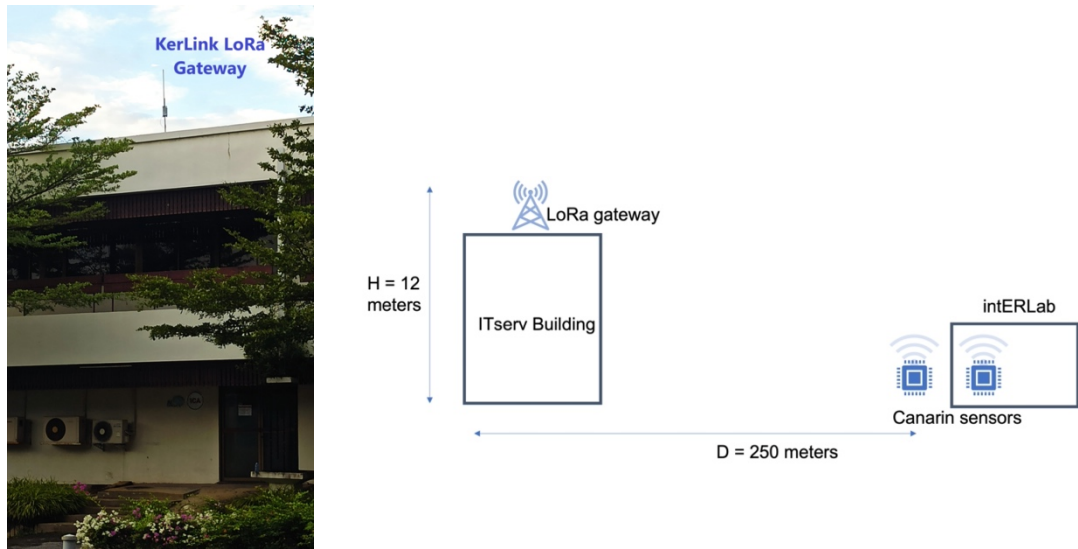
4.2 การทดสอบระบบไวร์เลสเซ็นเซอร์ด้วยโปรโตคอล LoRaWAN

การทดสอบระบบมีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินประสิทธิภาพของการรับส่งข้อมูลด้วยโลล่า โดยแบ่งเป็นการทดสอบภายในบริเวณสถาบันเทคโนโลยีแห่งเอเชีย ซึ่งมีสภาพแวดล้อมเป็นลักษณะเป็นพื้นที่ชุมชนเมือง และการทดสอบภาคสนามที่มีลักษณะพื้นที่ผสมระหว่างเขตชุมชนชนบท และ พื้นที่ห่างไกล

4.2.1 การทดสอบระบบในพื้นที่ชุมชนเมือง

การทดสอบระบบได้ดำเนินการภายในบริเวณ สถาบันเทคโนโลยีแห่งเอเชียโดยมีวัตถุประสงค์เพื่อทดสอบการทำงานของ โปรโตคอล LoRaWAN ในทุกองค์ประกอบ และ ทดสอบประสิทธิภาพของการใช้เทคโนโลยีโลล่าและผลกระทบของการตั้งค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ในการทดสอบได้มีการติดตั้ง โลล่าเกตเวย์ Kirlink Wirnet Station ที่ติดตั้งพร้อมสายอากาศแบบทั่วทิศทาง (Omnidirectional antenna) ซึ่งมีกำลังขยายสัญญาณที่ 6 dBi โดยอุปกรณ์มีกำลังส่งอยู่ที่ 27 dBm (0.5 Watts) ซึ่งโดยรวมมีค่า EIRP อยู่ที่ 33 dBm อุปกรณ์เกตเวย์ได้ถูกติดตั้งไว้บนอาคาร ITServ ภายในสถาบันฯ โดยความสูงจากพื้นดินประมาณ 12 เมตร ดังแสดงในรูปที่ 42 ในการทดสอบได้มีการวางอุปกรณ์ Canarin เซ็นเซอร์ 2 ชุด ไว้ภายนอกและภายในอาคารห้องปฏิบัติการ interLab ซึ่งมีระยะห่างออกไปประมาณ

250 เมตร โดยวางอุปกรณ์ไว้ที่ความสูงประมาณ 1 เมตร ในการทดสอบได้มีการตั้งค่า แบนด์วิธคงที่ไว้ที่ 125 KHz และ ปรับค่าพารามิเตอร์ Spreading Factor (SF) ซึ่งมีผลต่อระยะทางในการรับส่งข้อมูล โดยจะมีการทดสอบส่งข้อมูลจากอุปกรณ์เซ็นเซอร์ไปยังเกตเวย์และทำการวัดค่ากำลังสัญญาณ (RSSI) ที่อุปกรณ์เกตเวย์ (Uplink) และ อุปกรณ์เซ็นเซอร์ (Downlink)



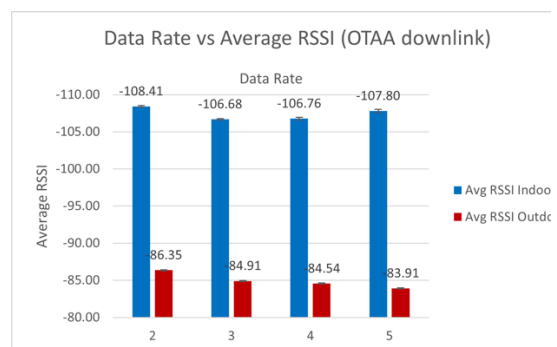
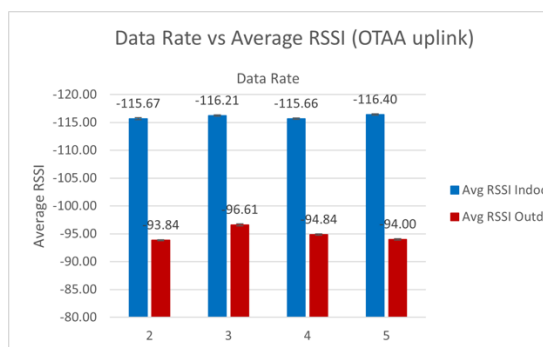
รูปที่ 42 แสดงการติดตั้งอุปกรณ์โลล่า ภายในสถาบัน AIT เพื่อการทดสอบ

เนื่องด้วย อุปกรณ์ Canarin ไม่สามารถปรับค่า Spreading Factor (SF) ได้โดยตรงแต่จะสามารถปรับค่า Data Rate (DR) เป็นการทดแทนได้ โดยอุปกรณ์ สามารถปรับค่า DR ได้ในช่วง 2 – 5 ซึ่งมีค่าเท่ากับ ค่า SF10, 9, 8 และ 7 ตามลำดับ โดยค่า SF จะสามารถส่งข้อมูลได้ในระยะไกล แต่จะมีอัตราการส่งข้อมูลที่ต่ำ (Bit rate) เช่น SF10 ซึ่งมีค่า DR เท่ากับ 2 ค่า Bit rate จะถูกจำกัดไว้ที่ 980 บิตต่อวินาที ตารางที่ 3 แสดงการเปรียบเทียบค่า SF และ Data Rate บนอุปกรณ์โลล่า

ตารางที่ 3 ตารางเปรียบเทียบ ค่า Data Rate และ Spreading Factor (SF) [33]

Data Rate	Configuration	Indicative physical bit rate [bit/s]
0	LoRa: SF12 / 125 kHz	250
1	LoRa: SF11 / 125 kHz	440
2	LoRa: SF10 / 125 kHz	980
3	LoRa: SF9 / 125 kHz	1760
4	LoRa: SF8 / 125 kHz	3125
5	LoRa: SF7 / 125 kHz	5470
6	LoRa: SF7 / 250 kHz	11000
7	FSK: 50 kbps	50000
8..14	RFU	
15	Defined in [TS001] ⁴⁴	

รูปที่ 43 แสดงค่าเฉลี่ย RSSI ในเส้นทาง Uplink โดยมีการปรับค่า Data Rate ตั้งแต่ 2 – 5 ที่อุปกรณ์เซ็นเซอร์ จากผลการทดลองพบว่าค่า Data Rate ไม่มีผลกับระดับสัญญาณ (RSSI) ทั้งกับอุปกรณ์ที่ไว้ภายในอาคารและภายนอกอาคาร นอกจากนี้ยังพบว่าความแตกต่างระหว่างค่า RSSI ของเซ็นเซอร์ที่วางไว้ภายนอกและภายในอาคาร ซึ่งมีผนังคอนกรีตกันเพียงหนึ่งชั้น มีการลดทอนสัญญาณโดยเฉลี่ยอยู่ที่ 20% ซึ่งสรุปได้ว่าสัญญาณโล่ล่าถูกลดทอนอย่างชัดเจนเมื่อมีสิ่งกีดขวางเป็นอาคาร หรือคอนกรีต เช่นเดียวกับผลการทดลองของเส้นทาง Downlink ใน รูปที่ 44 ค่า RSSI ถูกลดทอนลงไปด้วยเฉลี่ยที่ 20% เช่นกัน และ Data Rate ไม่ได้มีผลกระทบต่อค่า RSSI แต่พบวาระดับสัญญาณของ Downlink จะมีค่าต่ำกว่า Uplink เนื่องจากทางฝั่ง Uplink จะมีอุปกรณ์เกตเวย์เป็นตัวรับสัญญาณซึ่งมีสายอากาศและอุปกรณ์วิทยุที่กำลังสูงกว่า อุปกรณ์เซ็นเซอร์ในฝั่ง Downlink



รูปที่ 43 ค่าเฉลี่ย RSSI เปรียบเทียบกับค่า Data Rate ในการส่งข้อมูลแบบ Uplink

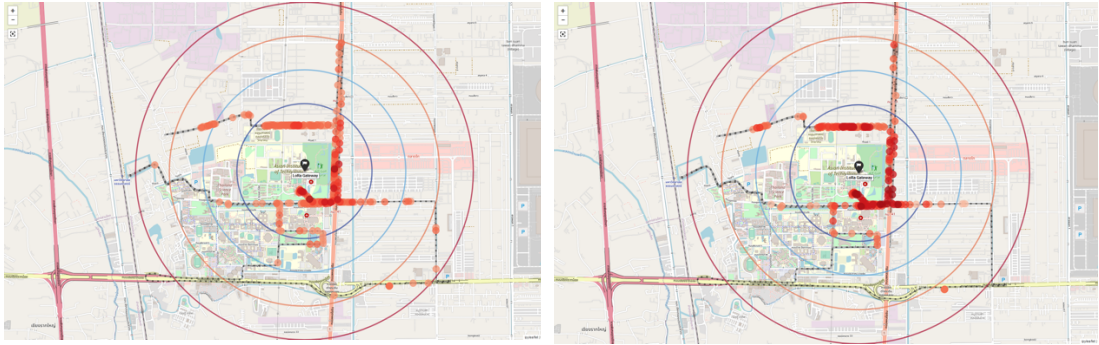
รูปที่ 44 ค่าเฉลี่ย RSSI เปรียบเทียบกับค่า Data Rate ในการส่งข้อมูลแบบ Downlink

จากผลการทดสอบวัดระดับสัญญาณโลล่าภายในและภายนอกอาคารที่ระยะ 250 เมตร พบว่า ระดับ RSSI ต่ำสุดอยู่ที่ประมาณ -116.21 ซึ่งด้วยคุณสมบัติของโลล่าที่มีค่า RX Sensitivity ที่ต่ำอยู่ที่ระดับ -137 dBm ซึ่งจากการทดลองพบว่ายังมีค่า link budget อีกมาก ที่สามารถเข้ามาชดเชยการลดทอนสัญญาณเมื่อมีสิ่งกีดขวางเข้ามาใกล้กัน รวมไปถึงการส่งสัญญาณได้ไกลขึ้นด้วย



รูปที่ 45 อุปกรณ์ Canarin ที่ติดตั้งอยู่บนรถยนต์สำหรับการทดสอบ Mobility Drive Test

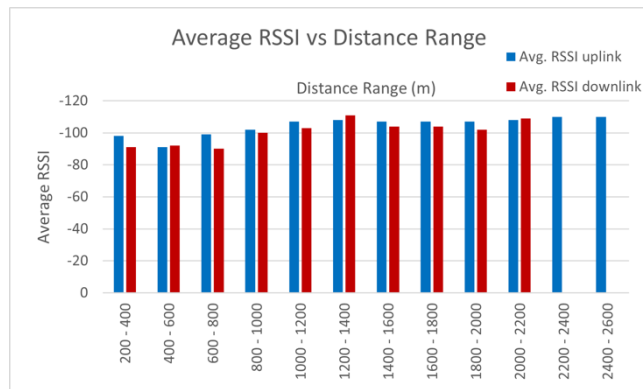
การทดสอบถัดมาเป็นการทดสอบโดยให้อุปกรณ์ Canarin เซ็นเซอร์เคลื่อนที่ไปด้วย (Mobility Drive Test) โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อทดสอบประสิทธิภาพการของ อุปกรณ์โลล่า ในพื้นที่โดยรอบของสถาบันเทคโนโลยีแห่งเอเชีย ซึ่งมีสภาพแวดล้อมปะปนกันระหว่างชุมชนเมืองและชุมชนชนบท โดยมีอาคารบ้านเรือนและต้นไม้สูงสลับกัน โดยการทดลองได้ใช้โลล่าเกตเวย์ตัวเดิมจากทดลองที่แล้วที่ติดตั้งอยู่บนอาคาร ITserv และ อุปกรณ์ Canarin ที่ติดตั้งอยู่บนรถยนต์ ดังแสดงใน รูปที่ 45 การทดสอบจะเป็นการบันทึกระดับสัญญาณของโลล่าระหว่าง เกตเวย์มาที่อุปกรณ์ Canarin (downlink) และ ระหว่างอุปกรณ์ Canarin ไปที่เกตเวย์ (uplink) พร้อมกับตำแหน่ง GPS รูปที่ 46 และ รูปที่ 47 แสดงระดับสัญญาณโลล่า uplink และ downlink บริเวณโดยรอบสถาบันเทคโนโลยีแห่งเอเชีย โดยความเข้มของสีจะแสดงถึงระดับสัญญาณ RSSI ที่สูง โดยมีค่าตั้งแต่ -85 dBM จนถึง -120 dBM จากผลการทดลองพบว่าสัญญาณโลล่าสามารถครอบคลุมพื้นที่รอบๆ สถาบันเนื่องจากไม่ค่อยมีอาคารปลูกสร้างมากนัก แต่จะมีสภาพแวดล้อมที่มีต้นไม้สูงหนาแน่นซึ่งสัญญาณโลล่าสามารถส่งผ่านได้ดี แต่เมื่อรถยนต์ขับไกลออกไปเกิน รัศมี 1.5 กิโลเมตร ซึ่งจะมีอาคารตึกสูงมากก็คขวางสัญญาณทำให้ไม่สามารถรับสัญญาณโลล่าจากเกตเวย์ได้ ซึ่งจุดสัญญาณก็จะขาดหายไป โดยระยะไกลสุดที่สามารถรับส่งสัญญาณโลล่า อยู่ที่ประมาณ 2.5 กิโลเมตร



รูปที่ 46 ระดับสัญญาณโลล่า uplink บริเวณ
โดยรอบสถาบันฯ

รูปที่ 47 ระดับสัญญาณโลล่า downlink
บริเวณโดยรอบสถาบันฯ

รูปที่ 48 แสดงค่าเฉลี่ย RSSI จาก Mobility Drive Test โดยนำค่า RSSI จากจุดต่างๆ โดยกำหนดช่วงระยะทางเป็น 200 เมตร ซึ่งสามารถแบ่งกลุ่มจากผลการทดลองที่ได้ ออกเป็น 12 กลุ่ม คือกลุ่มระยะทาง 200-400 เมตร ไปจนถึง 2400-2600 เมตร ผลการทดลองเป็นไปตามคาดหมายคือเมื่อระยะทางเพิ่มขึ้น ระดับสัญญาณ RSSI จะลดลงโดยในระยะ 200-400 เมตร ค่า RSSI เฉลี่ยจะอยู่ที่ -90 dBm สำหรับ downlink และ -98 dBm สำหรับ uplink แต่เมื่อระยะทางเพิ่มขึ้นพบว่า ค่า RSSI เฉลี่ยของ uplink ลดลงต่ำกว่า -110 dBm และไม่สามารถวัดสัญญาณ downlink ได้เลย ซึ่งหมายถึงอุปกรณ์ Canarin เซ็นเซอร์ไม่สามารถรับสัญญาณจากเกตเวย์



รูปที่ 48 ค่าเฉลี่ย RSSI เปรียบเทียบกับ ระยะห่างจากเกตเวย์โลล่า

จากการทดลองสรุปได้ว่า แพลตฟอร์มโลล่าที่พัฒนาขึ้นโดยคณะวิจัย สามารถทำงานได้ตามที่ได้ออกแบบไว้ โดยสามารถรับส่งข้อมูลจาก Canarin เซ็นเซอร์ ผ่านเทคโนโลยีโลล่า และนำมาแสดงผลบน Web Application ได้ ในส่วนการทดสอบประสิทธิภาพของเทคโนโลยีโลล่าในสภาพแวดล้อมที่ปะปนระหว่าง พื้นที่เมือง (Urban Area) กับ พื้นที่ชนบท (Rural Area) โดยใช้พื้นที่รอบๆ สถาบันเทคโนโลยีแห่งเอเชียเป็นสถานที่ทดสอบ ซึ่งผลการทดสอบสรุปผลได้ว่า สิ่งกีดขวางที่เป็นอาคารมีผลต่อการลดทอนสัญญาณอย่างมาก โดยระยะทางสูงสุดที่สามารถรับสัญญาณจากโลล่า

เกตเวย์ อยู่ที่ระยะทาง 2.5 กิโลเมตรโดยประมาณ ทั้งนี้ส่วนหนึ่งเป็นผลมาจากข้อจำกัดในการติดตั้งอุปกรณ์เกตเวย์ ซึ่งติดตั้งอยู่ในระดับความสูงที่ไม่มากพอ (ความสูง 12 เมตร) ซึ่งจะถูกลบดบังจากอาคารและต้นไม้โดยรอบสถาบันฯ ทำให้ไม่สามารถส่งสัญญาณไปได้ไกลตามที่คาดหวัง ทั้งนี้ในการติดตั้งอุปกรณ์และวางโครงข่ายโล่ล่าในพื้นที่เป้าหมายจำเป็นต้องทำการติดตั้งอุปกรณ์เกตเวย์ให้สูงขึ้น ซึ่งจะสามารถ ปรากฏเส้นทางที่ปราศจากสิ่งกีดขวาง (Line of Sight) ได้ซึ่งคณะวิจัยจะใช้ผลการทดลองที่ได้นี้ไปปรับใช้ต่อไป

4.2.2 การทดสอบระบบในพื้นที่ชุมชนชนบทและพื้นที่ห่างไกล

ทางคณะวิจัยได้ทำการทดสอบภาคสนามเพื่อประเมินประสิทธิภาพของการรับส่งข้อมูลผ่านโครงข่ายโล่ล่า โดยได้ทำการทดลองในพื้นที่อำเภอแม่สอด จังหวัดตาก โดยวัตถุประสงค์ของการทดลอง เพื่อศึกษาการทำงานและทดสอบประสิทธิภาพของโปรโตคอลโล่ล่าแวน ซึ่งมี ค่า Spreading Factor เป็นตัวแปรสำคัญ ในการกำหนดระยะทางของการรับส่งข้อมูลและอัตราความเร็วในการส่งข้อมูล (bit rate) ค่า Spreading factor มีให้เลือกปรับตั้งแต่ SF7 ถึง SF12 ดังแสดงใน ตารางที่ 3 แต่เนื่องด้วยมาตรฐานของ TTN ได้แนะนำให้ค่า dwell time หรือเรียกอีกชื่อหนึ่งว่า time on air ให้มีค่าต่ำกว่า 400 มิลลิวินาที จึงทำให้ไม่สามารถใช้ค่า SF11 และ SF12 ได้ ดังนั้นในการทดลองนี้ จะมีการทดสอบเพียงค่า SF7-SF10 เท่านั้น โดยจะทำการวัด ค่า RSSI (ระดับความแรงของสัญญาณ), SNR (ค่าคุณภาพของสัญญาณเปรียบเทียบกับสัญญาณรบกวนหรือที่เรียกว่า Signal to Noise Ratio), time on air (ระยะเวลาที่ใช้ในการส่งข้อมูลบนอากาศ) และ success rate (อัตราความสำเร็จในการรับส่งข้อมูล) ระหว่างการรับส่งข้อมูลระหว่างโล่ล่าเกตเวย์ ที่ติดตั้งอยู่ที่โรงเรียนแม่กีดหลวงกัญชัช และเซ็นเซอร์ทั้ง 6 โหนด ที่ติดตั้งอยู่รอบบริเวณชุมชนไทยสามัคคี ซึ่งมีระยะห่างจาก เกตเวย์ ดังนี้

โหนด	ตำแหน่งติดตั้ง	ระยะห่างจากเกตเวย์
410	วัดดอนสว่าง	1.8 กิโลเมตร
407	รร. แม่กีดสามท่า	3.6 กิโลเมตร
408	รพสต. แม่กีดสามท่า	5 กิโลเมตร
413	ร้านอาหารม่อนซิลล์	5.28 กิโลเมตร
412	สวนมุกิตา	9.28 กิโลเมตร
416	รร.แม่กีดหลวงกัญชัช	0.02 กิโลเมตร

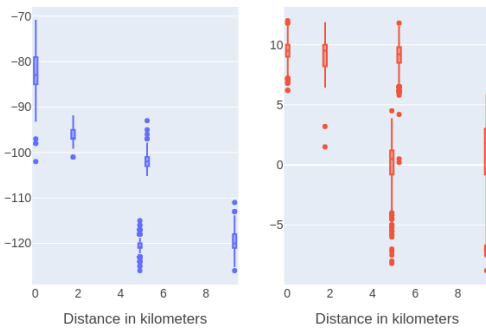
ข้อมูลที่ใช้ในการทดสอบจะเป็นค่าที่อ่านได้จากอุปกรณ์เซ็นเซอร์ (payload) ซึ่งมีขนาดระหว่าง 7-10 bytes โดย โปรโตคอลโล่ล่าแวน นั้นได้กำหนดขนาดของเฮดเดอร์ (header) ไว้สูงสุดอยู่ที่ 13 bytes ดังนั้นขนาดของแพ็คเก็ต ที่ใช้ในการทดสอบนี้จึงมีขนาดอยู่ที่ 20-23 bytes โดยได้แบ่งการ

ทดลองออกเป็น 4 กรณี ตามการตั้งค่า Spreading Factor ได้แก่ SF7, SF8, SF9 และ SF10 โดยทำการทดลองส่งข้อมูลจากเซ็นเซอร์เป็นเวลา 30 นาที และทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้งในแต่ละกรณี

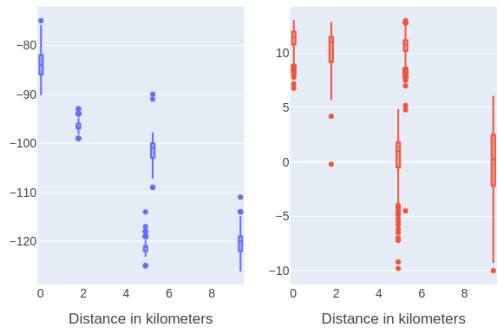
ผลการทดลองผลกระทบของ Spreading Factor ต่อ RSSI และ SNR ที่ระยะทางที่แตกต่างกัน

ผลการทดลองวัดค่า RSSI และ SNR เปรียบเทียบกับค่า Spreading Factor แสดงใน รูปที่ 49 โดยทั่วไป ค่า RSSI และ SNR จะลดลงตามระยะทางที่เพิ่มขึ้น โดยที่โหนด 412 จะมีค่าต่ำสุด เนื่องจากมีระยะห่างจาก เกตเวย์ถึง มากที่สุด ซึ่งมีระยะทาง 9.28 กม. ทั้งนี้พบว่า การทดลอง SF10 จะได้ผลลัพธ์ ของ RSSI และ SNR ดีกว่าการทดลองที่มีค่า SF ต่ำกว่าเพียงเล็กน้อย ยกตัวอย่างเช่น ค่า RSSI ของ โหนด 412 (ที่ระยะ 9.28 กม.) มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ -118 dBm ซึ่งสูงกว่าการทดลอง SF7 ที่ RSSI ของ โหนด 412 มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ -120 dBm ในส่วนของค่าเฉลี่ย SNR ทั้งสองการทดลองมีค่าที่ใกล้เคียงกัน จุดที่น่าสังเกตก็คือค่า SNR ของการทดลอง SF10 มีค่าผิดปกติของข้อมูล (outlier) สูงกว่าการทดลอง SF7 ทั้งนี้เป็นเพราะการตั้งค่า SF ไว้สูง จะเป็นการลดอัตราการส่งข้อมูลลง (bit rate) โดยค่าระยะเวลาในการส่งข้อมูลที่อยู่บนอากาศจะนานขึ้น (time on air) โดยในทางทฤษฎีสัญญาณ จะเสถียรมากกว่าแต่ในทางปฏิบัติพบว่าระยะเวลาที่เพิ่มขึ้นจะเพิ่มความเสี่ยงในการถูกรบกวนจาก สัญญาณอื่นมากขึ้น (interference) ทำให้ค่า SNR ของ โหนดที่อยู่ระยะทางไกลมีโอกาสลดต่ำลง

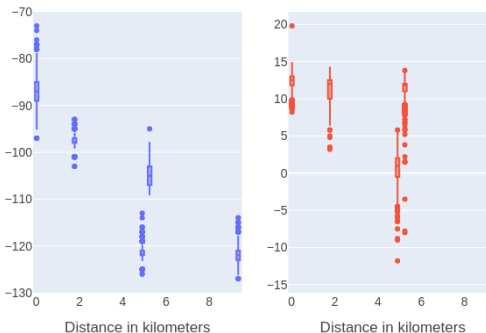
Spread Factor 7



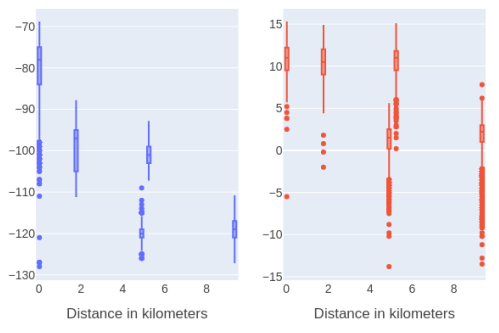
Spread Factor 8



Spread Factor 9



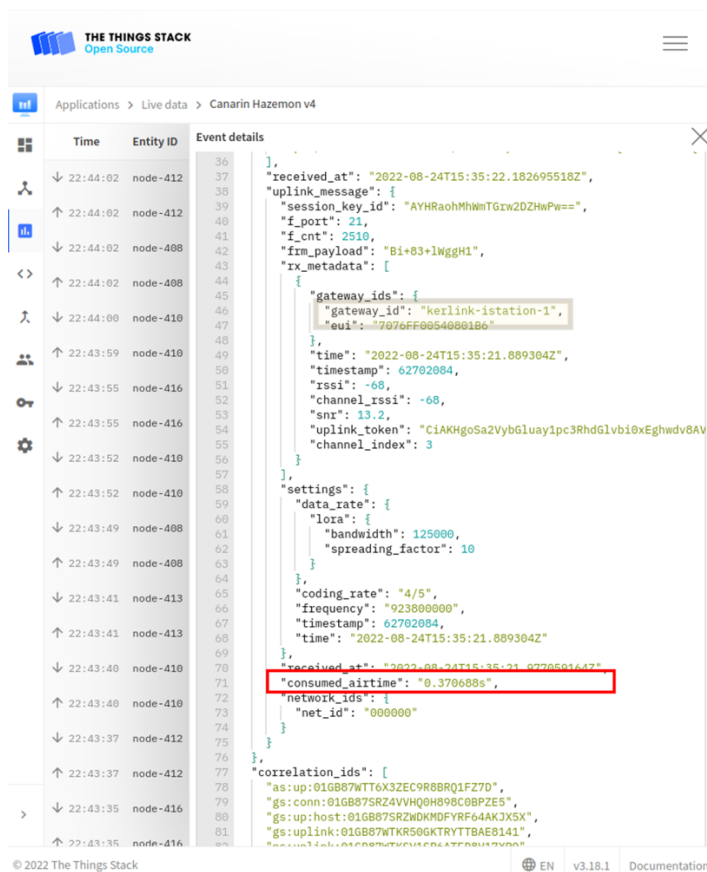
Spread Factor 10



รูปที่ 49 ค่า RSSI และ SNR ที่ระยะทางแตกต่างกันเปรียบเทียบกับค่า Spreading Factor

ผลกระทบของ Spreading Factor ต่อ ค่าระยะเวลาในการส่งข้อมูล (time on air) ที่ระยะทางที่แตกต่างกัน

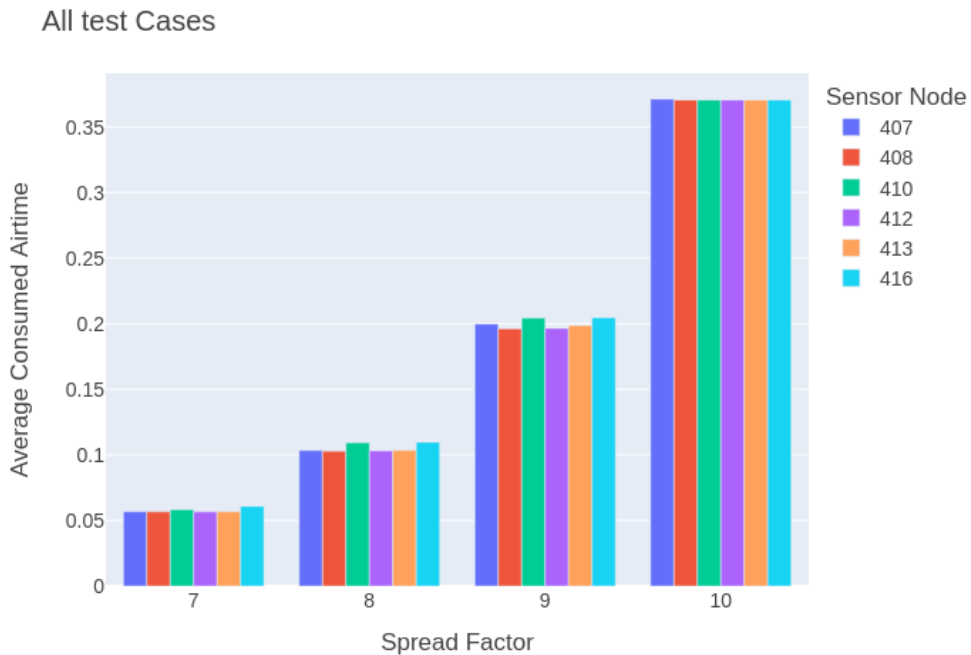
การทดลองเป็นการปรับค่า SF และวัดค่า time on air ซึ่งสามารถอ่านค่าได้จาก โล่ล่าแพ็คเก็ต ที่ส่งเข้ามาที่ TTN เซิร์ฟเวอร์ โดยข้อมูลจะถูกบันทึกไว้ที่พารามิเตอร์ consumed air time ดังแสดงไว้ใน รูปที่ 50 โดยผลการทดลองได้แสดงไว้ใน รูปที่ 51 ซึ่งเป็นไปตามทฤษฎีเมื่อ ค่า SF สูงขึ้น จะใช้ระยะเวลาในการส่งข้อมูลที่ยาวขึ้นเนื่องจากช่องสัญญาณจะถูกแบ่งปันให้กับอุปกรณ์ตัวอื่นส่งผลให้ อัตราการส่งข้อมูล (bit rate) จะลดลงไปด้วย โดยค่า SF10 จะมีค่า Time on air เฉลี่ยอยู่ที่ 0.38 วินาที ส่วน SF7 มีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 0.05 วินาที ทั้งนี้จากการทดลองพบว่าระยะทางไม่มีผลต่อค่า time on air มากนัก โดยโหนดที่ติดตั้งอยู่ที่ระยะทางที่ต่างกันมีค่า time on air ที่ไม่แตกต่างกัน



The screenshot displays the 'Event details' for a message received at 2022-08-24T15:35:21.82695518Z. The 'consumed_airtime' field is highlighted in red, indicating a value of 0.376688s. The event details include the following JSON structure:

```
{
  "received_at": "2022-08-24T15:35:21.82695518Z",
  "uplink_message": {
    "session_key_id": "AYHRaohMhWmTGrw20ZHWpW==",
    "f_port": 21,
    "f_cnt": 2510,
    "frm_payload": "Bi+83+lWggH1",
    "rx_metadata": [
      {
        "gateway_ids": {
          "gateway_id": "kerlink-istation-1",
          "eui": "7876FF0054868186"
        },
        "time": "2022-08-24T15:35:21.889304Z",
        "timestamp": 62702084,
        "rssi": -68,
        "channel_rssi": -68,
        "snr": 13.2,
        "uplink_token": "CIAKGoSa2VybGluay1pc3RhdGlvbi0xEGhwdv8wV",
        "channel_index": 3
      }
    ]
  },
  "settings": {
    "data_rate": {
      "loira": {
        "bandwidth": 125000,
        "spreading_factor": 10
      }
    },
    "coding_rate": "4/5",
    "frequency": "923800000",
    "timestamp": 62702084,
    "time": "2022-08-24T15:35:21.889304Z"
  },
  "received_at": "2022-08-24T15:35:21.82695518Z",
  "consumed_airtime": "0.376688s",
  "network_ids": {
    "net_id": "000000"
  },
  "correlation_ids": [
    {
      "as": "up:016B87WTT6X3ZEC9R8BRQ1FZ70",
      "gs": "conn:016B87SRZ4VH0QH898C0BPZE5",
      "gs": "up:host:016B87SRZ4VH0QH898C0BPZE5",
      "gs": "uplink:016B87WTKR50GKTRVTTBAE8141",
      "gs": "up:016B87WTKR50GKTRVTTBAE8141"
    }
  ]
}
```

รูปที่ 50 การอ่านค่าพารามิเตอร์จาก โล่ล่าแพ็คเก็ต บน TTN server

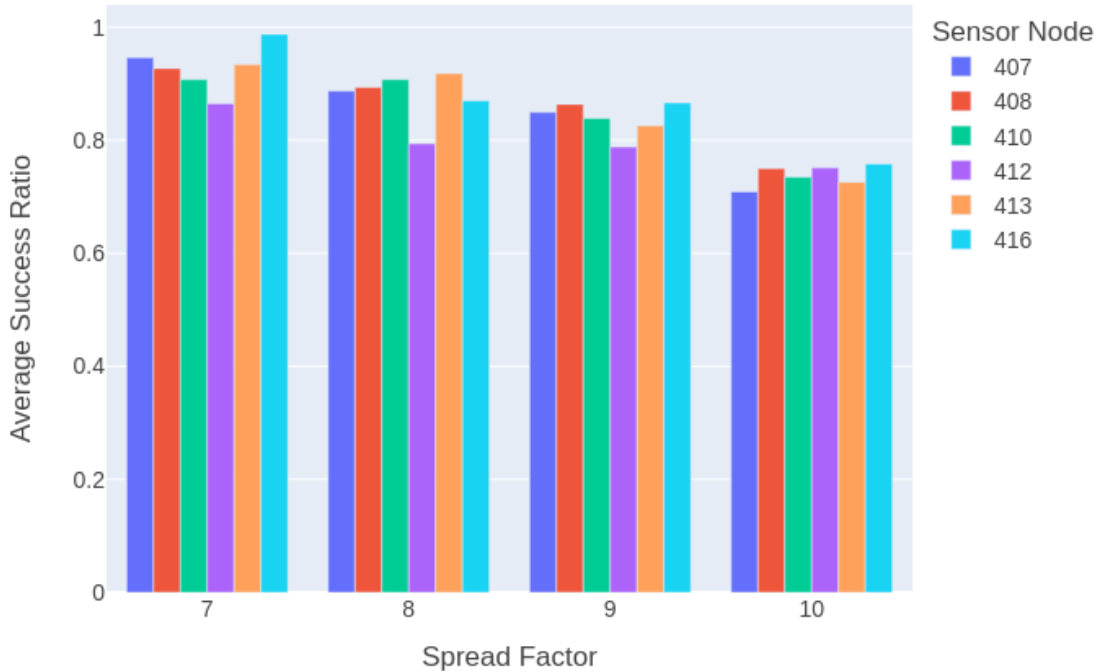


รูปที่ 51 ค่า Time on air ที่ระยะทางแตกต่างกันเปรียบเทียบกับค่า Spreading Factor

ผลกระทบของ Spreading Factor ต่ออัตราการส่งข้อมูลสำเร็จ (Success Ratio)

อัตราการส่งข้อมูลสำเร็จ (Success Ratio) คำนวณจากค่าอัตราส่วนของจำนวนแพ็คเก็ตที่เกตเวย์ได้รับ เปรียบเทียบกับจำนวนแพ็คเก็ตที่ส่งมาจากโหนดเซ็นเซอร์ โดยแต่ละแพ็คเก็ตจะถูกบันทึกด้วยเลขเฟรมเคาน์เตอร์ซึ่งจะถูกเพิ่มขึ้นครั้งละหนึ่งเมื่อแพ็คเก็ตถูกส่งออกไป ซึ่งทางฝั่งเกตเวย์สามารถตรวจสอบเลขเฟรมเคาน์เตอร์ที่ขาดหายไปและคำนวณออกมาเป็นอัตราส่งข้อมูลสำเร็จได้ ผลการทดลองได้แสดงไว้ใน รูปที่ 52 จากผลการทดลองพบว่าค่าเฉลี่ยอัตราส่งข้อมูลสำเร็จ ลดลงเมื่อ ค่า SF เพิ่มขึ้น โดยค่า SF7 มีค่าอัตราส่งข้อมูลสำเร็จ สูงกว่า 85% จากทุกโหนด ในทางกลับกัน ในการทดลองที่ตั้งค่า SF10 ค่าอัตราส่งข้อมูลสำเร็จ ลดต่ำลงกว่า 80% ทั้งนี้เนื่องจาก SNR ที่ไม่เสถียรของ SF10 เป็นเหตุให้สัญญาณอาจเกิดการรบกวน และแพ็คเก็ตบางส่วนสูญหายระหว่างทางก่อนไปถึงเกตเวย์

All test Cases



รูปที่ 52 ค่าอัตราการส่งข้อมูลสำเร็จ เปรียบเทียบกับค่า Spreading Factor

สรุปผลการทดลองภาคสนาม

จากการทดลองภาคสนามพบว่า ค่า RSSI และ SNR ของสัญญาณโลล่า ได้รับอิทธิพลอย่างยิ่งจากตำแหน่งที่ตั้งของอุปกรณ์ โดยต้องพิจารณาจากปัจจัย Line of sight และ ระยะทางจากเกตเวย์ ซึ่งจากการสำรวจพื้นที่ จะต้องใช้เครื่องมือตรวจสอบสภาพพื้นผิวเพื่อหาตำแหน่ง Line of sight ระหว่างอุปกรณ์เกตเวย์และอุปกรณ์เซ็นเซอร์ ซึ่งจากการทดลองพบว่า สัญญาณโลล่าสามารถส่งผ่านสิ่งกีดขวางจำพวกต้นไม้ได้ดี แต่จะไม่สามารถทะลุผ่านสิ่งกีดขวางที่เป็นเนินเขาหรืออาคารที่สร้างจากวัสดุคอนกรีต อีกหนึ่งปัจจัยในการลดทอนสัญญาณคือ ระยะทาง จากการทดลองพบว่าระยะทางที่เพิ่มขึ้นมีผลกระทบต่ออัตราการลดทอนของสัญญาณ ยกตัวอย่างเช่น โหนด 412 ซึ่งติดตั้งอยู่ที่ระยะห่าง 9.28 กม. จะมีค่าคุณภาพของสัญญาณที่ต่ำกว่าจุดอื่น และโหนด 408 ซึ่งติดตั้งอยู่ที่ระยะทางเพียงประมาณ 5 กม. ที่ปกคลุมไปด้วยสิ่งกีดขวางบดบังการรับส่งสัญญาณ ทำให้ค่า RSSI และ SNR มีการแกว่งสั่นได้จาก ค่า outlier ที่แตกต่างจากค่าเฉลี่ยเป็นอย่างมาก ซึ่งในการติดตั้งอุปกรณ์โลล่าต้องอาศัยการวัดสัญญาณโดยละเอียด แต่เมื่อเทียบกับเทคโนโลยีไร้สายอื่น เช่น WiFi เทคโนโลยีโลล่ามีประสิทธิภาพที่สูงกว่ามากในด้านของระยะทางและการลดทอนสัญญาณจากสิ่งกีดขวางเนื่องมาจากเทคนิคมอดูเลชันของโลล่านั้นออกแบบมาให้มีค่า RX sensitivity ที่ต่ำการรับส่งข้อมูลสามารถทำได้ในระดับ RSSI ที่ต่ำจากการทดลองพบว่า แพ็คเก็ตโลล่า สามารถส่งไปถึงเกตเวย์ได้ด้วย RSSI -130 dBm ซึ่งสำหรับ

เทคโนโลยี WiFi การรับส่งข้อมูลข้อมูลโดยทั่วไปจะต้องมีค่า RSSI ที่สูงกว่า -80 dBm จากคุณสมบัตินี้ ทำให้โลล่าสามารถรับส่งข้อมูลได้ไกลถึง 9.28 กม.

อีกหนึ่งปัจจัยสำคัญต่อการติดตั้งโครงข่ายโลล่า คือการตั้งค่า Spreading Factor ซึ่งในทางทฤษฎี ค่า SF ที่สูง (SF10) ควรจะสามารถรับส่งข้อมูลได้ที่ระยะไกลมากกว่า เนื่องจากการมอดูเลตสัญญาณจะมีความเสถียรมากกว่า แต่จากผลการทดลองภาคสนามพบว่า ค่า SF10 มีประสิทธิภาพที่แย่กว่า SF7 ทั้งนี้พบว่า ค่า Time on air ที่เพิ่มขึ้นของ SF10 มีนัยยะสำคัญต่อคุณภาพของสัญญาณ เนื่องจากค่า RSSI และ SNR มีการกระโดดจากค่าเฉลี่ยไปมาก ซึ่งสามารถอธิบายเหตุการณ์นี้ได้จากเวลาที่แพ็คเก็ตถูกส่งอยู่ในอากาศนั้นมีมากซึ่งถ้าในสภาพแวดล้อมนั้นมีการกวนกันของสัญญาณ (interference) ก็จะมีโอกาสสูงที่ค่า SNR และ RSSI จะลดต่ำลง ซึ่งในบางกรณีได้ส่งผลกระทบของการสูญหายของข้อมูลดังจะเห็นได้จาก อัตราการส่งข้อมูลสำเร็จ (Success Ratio) ที่ลดลง

4.3 การทดสอบอุปกรณ์เซ็นเซอร์ตรวจวัดคุณภาพอากาศ

กระบวนการปรับจูนค่าการวัดของเซ็นเซอร์หรือที่เรียกว่า เซ็นเซอร์คาลิเบรชันเป็นวิธีการในการเพิ่มประสิทธิภาพของ เซ็นเซอร์ด้วยการกำจัดค่า Structural error จากเอาท์พุทของเซ็นเซอร์เอง โดยค่า Structural error นี้เป็นค่าความคลาดเคลื่อนระหว่าง ค่าที่ถูกต้องและค่าที่วัดได้จริงจากการวัด ซึ่งค่าความแตกต่างนี้จะแสดงผล ออกมาอย่างต่อเนื่องใน ลักษณะความสัมพันธ์เชิงลิเนียร์อย่างต่อเนื่องที่มีการวัดเกิดขึ้น ค่าคลาดเคลื่อนนี้จะเกิดขึ้นซ้ำๆ และสามารถกำจัดออกไปได้ โดยการคำนวณหาค่าชดเชยระหว่างการวัดที่เกิดขึ้นในลักษณะเรียลไทม์โดยใช้สมการทางคณิตศาสตร์ที่มีความสัมพันธ์เชิงลิเนียร์ ซึ่งสามารถคำนวณได้จากกระบวนการปรับจูนค่าข้อมูลของเซ็นเซอร์ (Sensor calibration) ในกิจกรรมนี้จะมุ่งเน้นในการปรับจูนประสิทธิภาพของการอ่านค่าของเซ็นเซอร์ ด้วยวิธีการที่รองรับด้วยมาตรฐานสากล โดยจะแบ่งการทำคาลิเบรชัน ออกเป็นสองส่วนใน ส่วนแรกจะทำการนำอุปกรณ์เซ็นเซอร์ (device under test) ไว้ในระบบปิดในห้องทดลองและปฏิบัติการ (Laboratory testing) ที่ทราบและสามารถควบคุมปริมาณความเข้มข้นของก๊าซมลพิษได้ เช่น CO, CO₂ โดยจะทำการเปรียบเทียบค่าที่วัดได้จากเซ็นเซอร์กับอุปกรณ์มาตรฐานเพื่อหาความสัมพันธ์เชิงลิเนียร์ระหว่าง ค่าที่วัดได้จากเซ็นเซอร์และค่าความคลาดเคลื่อน โดยใช้โมเดลทางคณิตศาสตร์ Linear Regression Model ในส่วนที่สองจะเป็นการทำคาลิเบรชันแบบโคโลเคชัน (co-location testing) โดยจะสุ่มนำเซ็นเซอร์ที่ผ่านการทดสอบใน laboratory testing มาทดสอบในระบบเปิดโดยติดตั้งเทียบวัดค่ากับสถานีตรวจวัดมลพิษของกรมควบคุมมลพิษหลังจากนั้นจะนำข้อมูลทั้งสองชุดจากตัวเซ็นเซอร์และสถานีตรวจวัดมาทำโมเดลฟิตติ้งเพื่อให้ค่าที่อ่านได้จากเซ็นเซอร์มี

คุณภาพและใกล้เคียงกับค่าที่อ่านได้จากสถานีตรวจวัดรูปแบบการทดสอบอุปกรณ์เซ็นเซอร์ (device under test)

การทดสอบอุปกรณ์ Canarin เซ็นเซอร์ ในระบบปิดในห้องทดลองและปฏิบัติการ (Laboratory Testing)

อุปกรณ์ต้นแบบของ Canarin เซ็นเซอร์ ได้ถูกนำไปทดสอบในห้องทดลองและปฏิบัติการแบบระบบปิด (Closed Laboratory Testing) ควบคุมการไหลของอากาศ ขนาด 30 ลูกบาศก์เมตร สร้างด้วยวัสดุสแตนเลสสตีลตามมาตรฐานสากลที่มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี โดยเก็บข้อมูล PM2.5 ด้วยเครื่องตรวจสอบฝุ่น Met One BT-645 laser optical sensor ที่มีช่วงวัดระดับฝุ่น 0-100000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ และเก็บข้อมูล CO, CO2 ด้วยอุปกรณ์มาตรฐาน ยี่ห้อ DELTA OHM รุ่น HD37AB1347 เพื่อเปรียบเทียบกับ Canarin เซ็นเซอร์แบบ Default ที่ติดตั้งค่าจากบริษัทผลิตและ Canarin เซ็นเซอร์แบบ Equation ที่ติดตั้งค่าสมการที่ได้จากการปรับจูนค่าข้อมูลของเซ็นเซอร์ (Sensor calibration) ดังแสดงใน รูปที่ 53



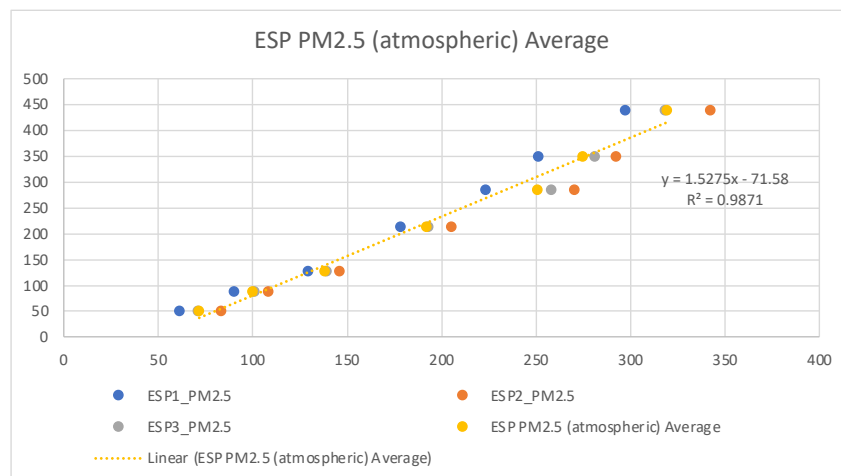
รูปที่ 53 การทดสอบเซ็นเซอร์ในห้องทดลองและปฏิบัติการแบบระบบปิด

ในห้องทดลองและปฏิบัติการแบบระบบปิด (Closed Laboratory Testing) เป็นการเก็บข้อมูล PM2.5, CO, CO2 ด้วยอุปกรณ์มาตรฐาน เซ็นเซอร์แบบ Default และเซ็นเซอร์แบบ Equation โดยการทดสอบจะทำการปล่อยมลภาวะจำลองที่มีความเข้มข้น PM2.5 500 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, CO 500 ppm และ CO2 5000 ppm เข้าไปในห้องทดลองแล้วเก็บข้อมูลต่อเนื่องจนกว่าระดับความเข้มข้นเท่ากับ 0 ซึ่งแผนการเก็บข้อมูลแสดงใน ตารางที่ 4

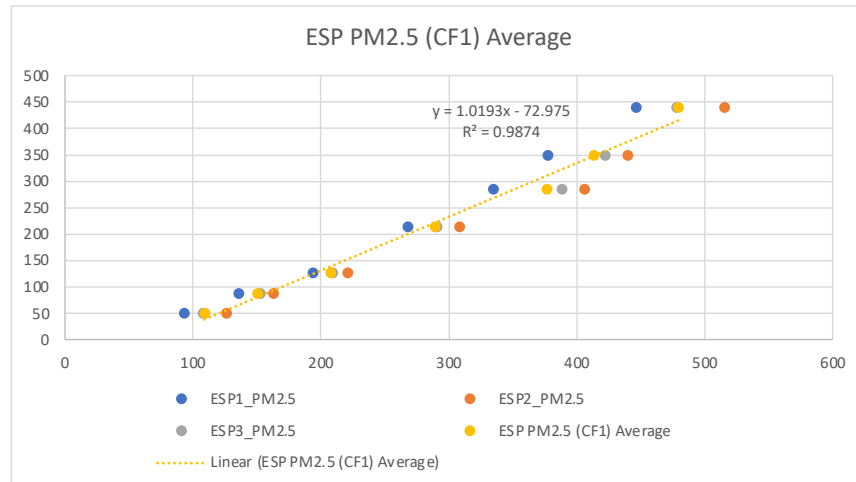
ตารางที่ 4 แบบแผนการเก็บข้อมูล PM2.5, CO, CO2 ในห้องทดลองและปฏิบัติการแบบระบบปิด

Scenario	Parameters			Reference	Default	Equation	Conc. Level	Unit
	PM2.5	CO	CO2					
1	●			x	x	x	0-500	µg/m3
2		●		x	x	x	0-500	ppm
3			●	x	x	x	0-5000	ppm

ผลการปรับจูนค่าการวัดของเซ็นเซอร์ PM2.5 คือมีค่าสัมประสิทธิ์แสดงการตัดสินใจ (Coefficient of Determination) หรือค่า R-Squared เท่ากับ 0.9871 (PM2.5 Atmospheric ซึ่งเป็นค่าแสดงผล PM2.5 ในบรรยากาศ (Atmospheric condition)) และ 0.9874 (PM2.5 CF1 ซึ่งเป็นค่าแสดงผลเปรียบเทียบกับในห้องทดลอง (Laboratory use)) ตามลำดับ ซึ่งค่า PM2.5 ที่อ่านได้จากเซ็นเซอร์หมายเลข 1, 2, 3 จะแสดงด้วยค่า ESP1_PM2.5, ESP2_PM2.5, ESP3_PM2.5 ตามลำดับ หลังจากนั้นนำค่า PM2.5 ในแต่ละช่วงการเก็บข้อมูลของเซ็นเซอร์หมายเลข 1, 2, 3 มาหาค่าเฉลี่ยซึ่งแสดงด้วยค่า ESP_PM2.5 Average แล้วนำค่าเฉลี่ยนี้ไปหาค่า R-Squared ดัง รูปที่ 54 และ รูปที่ 55

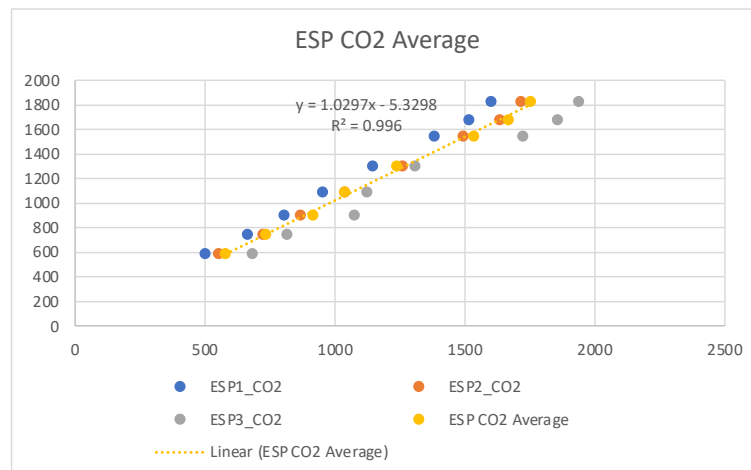


รูปที่ 54 ค่า R-Square เปรียบเทียบระหว่าง ค่า PM2.5 ที่วัดได้จากเซ็นเซอร์ Canarin ในโหมด Atmospheric กับ อุปกรณ์มาตรฐาน



รูปที่ 55 ค่า R-Square เปรียบ เทียบระหว่าง ค่า PM2.5 ที่วัดได้จากเซ็นเซอร์ Canarin ในโหมด CF1 กับ อุปกรณ์มาตรฐาน

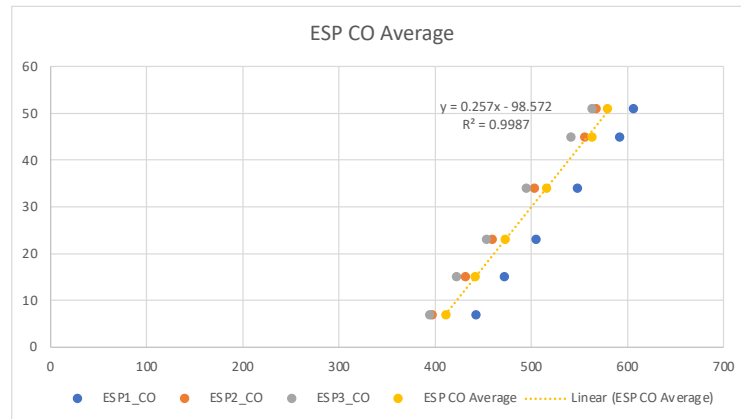
ผลการปรับจูนค่าการวัดของเซ็นเซอร์ CO₂ คือมีค่าสัมประสิทธิ์แสดงการตัดสินใจ (Coefficient of Determination) หรือค่า R-Squared เท่ากับ 0.9960 ซึ่งค่า CO₂ ที่อ่านได้จากเซ็นเซอร์หมายเลข 1, 2, 3 จะแสดงด้วยค่า ESP1_CO₂, ESP2_CO₂, ESP3_CO₂ ตามลำดับ หลังจากนั้นนำค่า CO₂ ในแต่ละช่วงการเก็บข้อมูลของเซ็นเซอร์หมายเลข 1, 2, 3 มาหาค่าเฉลี่ยซึ่งแสดงด้วยค่า ESP_CO₂ Average แล้วนำค่าเฉลี่ยนี้ไปหาค่า R-Squared ดังแสดงใน รูปที่ 56



รูปที่ 56 ค่า R-Square เปรียบ เทียบระหว่าง ค่า CO2 ที่วัดได้จากเซ็นเซอร์ Canarin กับ อุปกรณ์มาตรฐาน

ผลการปรับจูนค่าการวัดของเซ็นเซอร์ CO คือมีค่าสัมประสิทธิ์แสดงการตัดสินใจ (Coefficient of Determination) หรือค่า R-Squared เท่ากับ 0.9987 (CO) ซึ่งค่า CO ที่อ่านได้จากเซ็นเซอร์หมายเลข 1, 2, 3 จะแสดงด้วยค่า ESP1_CO, ESP2_CO, ESP3_CO ตามลำดับ หลังจากนั้นนำค่า

CO ในแต่ละช่วงการเก็บข้อมูลของเซ็นเซอร์หมายเลข 1, 2, 3 มาหาค่าเฉลี่ยซึ่งแสดงด้วยค่า ESP_CO Average แล้วนำค่าเฉลี่ยนี้ไปหาค่า R-Squared ดังแสดงใน รูปที่ 57



รูปที่ 57 R-Square เปรียบ เทียบระหว่าง ค่า CO ที่วัดได้จากเซ็นเซอร์ Canarin กับ อุปกรณ์มาตรฐาน

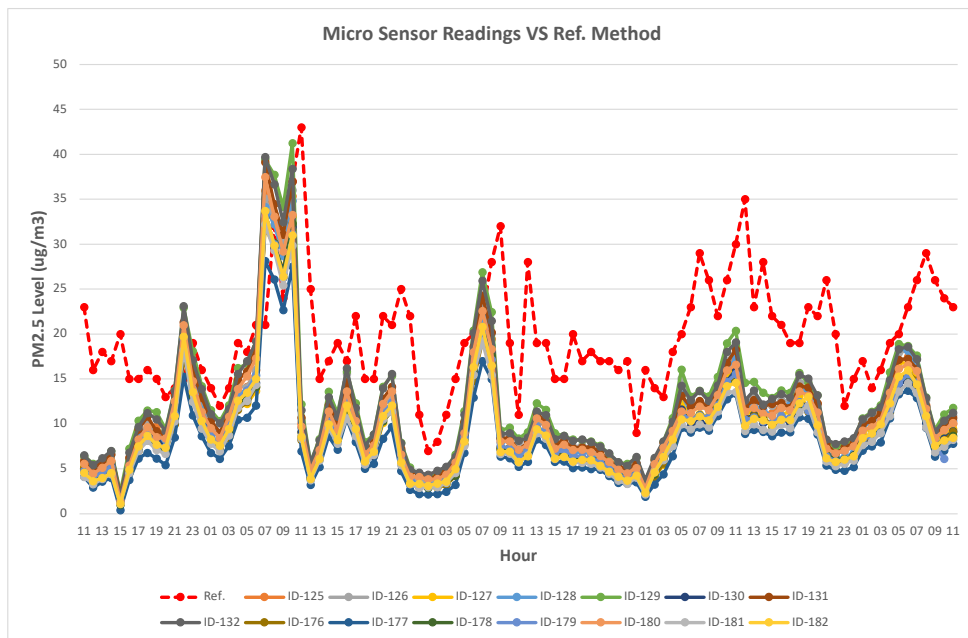
จากผลการทดสอบวัดค่าความถูกต้องของการอ่านค่าข้อมูลเซ็นเซอร์เปรียบเทียบกับอุปกรณ์มาตรฐาน พบว่าเซ็นเซอร์มีความถูกต้องในการตรวจวัดมากกว่าร้อยละ 95

การทดสอบอุปกรณ์ Canarin เซ็นเซอร์ แบบ Co-location

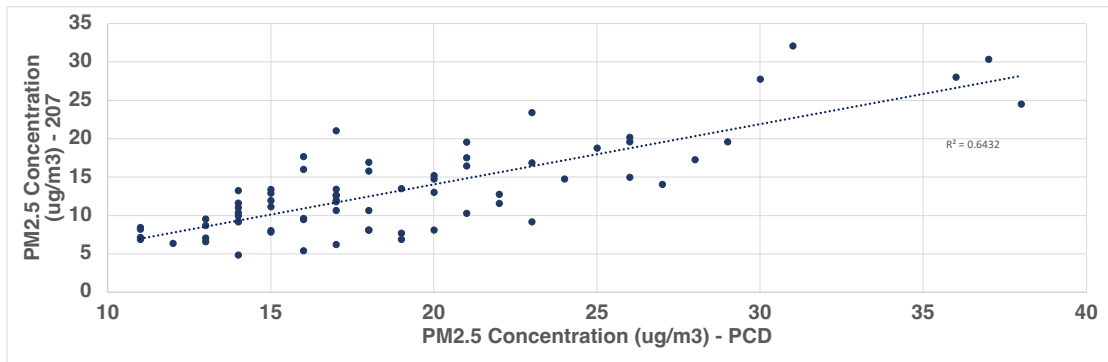
อุปกรณ์ Canarin เซ็นเซอร์ได้ถูกนำไปทดสอบแบบ co-location โดยทำการวัดค่าฝุ่นละออง PM2.5 เปรียบเทียบกับเครื่องวัดมาตรฐานของกรมควบคุมมลพิษที่บริเวณสถานีโรงพยาบาลจุฬาฯ (รูปที่ 58) โดยแบ่งการทดสอบออกเป็น Batch ครั้งละ 16 ตัวเนื่องจากข้อจำกัดเรื่องพื้นที่ ผลการทดสอบพบว่า การรายงานผลของอุปกรณ์ Canarin เป็นไปในทิศทางเดียวกันกับเครื่องวัดมาตรฐาน โดยเครื่องวัดมาตรฐาน จะอ่านค่าได้สูงกว่าอุปกรณ์ Canarin เล็กน้อย ซึ่งแตกต่างกันประมาณ 5-15% เนื่องจากมีการติดตั้งหลังคา กันฝนให้กับอุปกรณ์ Canarin ซึ่งลดพื้นที่การรับอากาศลงไป รูปที่ 59 แสดง Time Series Plot ระหว่างค่าเฉลี่ย PM2.5 รายชั่วโมงที่อ่านได้จาก Canarin เซ็นเซอร์ เปรียบเทียบกับค่าที่อ่านได้จากสถานีตรวจวัด [34] รูปที่ 60 แสดง Scatter Plot เปรียบเทียบค่า PM2.5 ซึ่งสามารถคำนวณความสัมพันธ์เชิงเส้นตรง มีค่า R² อยู่ที่ 0.65



รูปที่ 58 การทดสอบ Canarin เซ็นเซอร์ กับเครื่องวัดมาตรฐานของกรมควบคุมมลพิษ บริเวณสถานี
โรงพยาบาลจุฬาฯ



รูปที่ 59 Time Series Plot เปรียบเทียบการอ่านค่า PM2.5 ระหว่าง Canarin เซ็นเซอร์ กับ
เครื่องวัดมาตรฐานที่สถานี โรงพยาบาลจุฬาฯ



รูปที่ 60 Scatter Plot เปรียบเทียบค่า PM2.5 จาก Canarin เซ็นเซอร์และ เครื่องวัดมาตรฐาน

4.4 การสำรวจและติดตั้งอุปกรณ์โครงข่ายและเซ็นเซอร์

ในหัวข้อนี้จะรายงานผลงานการสำรวจและติดตั้งอุปกรณ์เซ็นเซอร์ โดยได้มีการกำหนดพื้นที่เป้าหมาย และ แผนงานการติดตั้งอุปกรณ์ รวมไปถึงการพัฒนาชุดโซลาเซลล์ สำหรับพื้นที่ที่ไม่มีไฟฟ้าเข้าถึง

4.4.1 พื้นที่เป้าหมายสำหรับการติดตั้งอุปกรณ์เซ็นเซอร์และโครงข่าย

พื้นที่การสำรวจและติดตั้งแบ่งออกเป็น สามพื้นที่หลัก ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1) จังหวัดเชียงราย

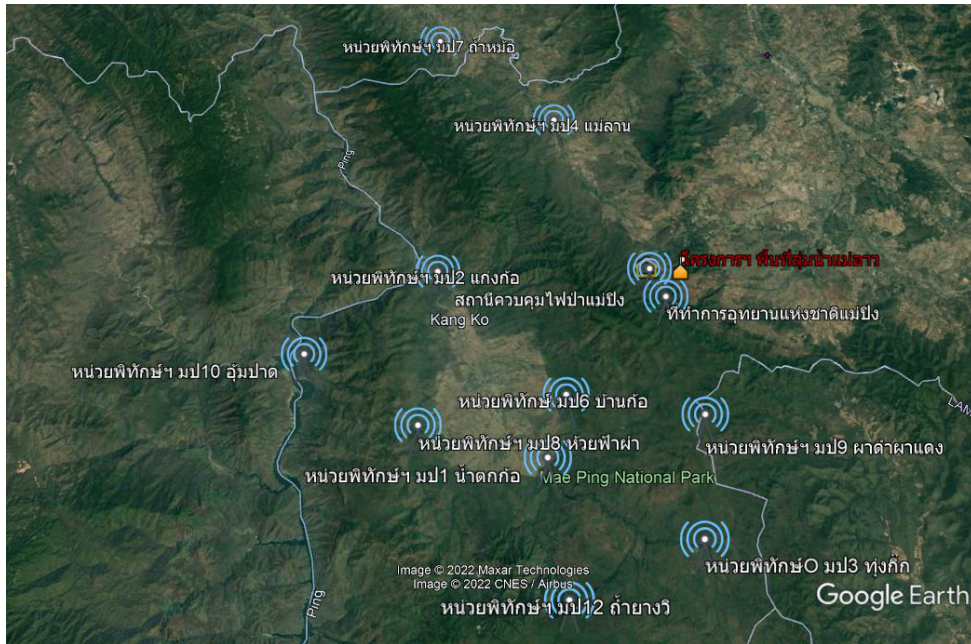
ไฟฟ้าในพื้นที่จังหวัดเชียงรายนั้น สภาพพื้นที่และวิถีการใช้ชีวิตของผู้คนถือเป็น 2 ปัจจัยสำคัญที่ ด้วยภูมิศาสตร์ของภาคเหนือส่วนใหญ่เป็นภูเขาสูงและมีที่ราบคล้ายแอ่งกระทะ ลักษณะของป่าแตกต่างจากพื้นที่อื่นๆ และเมื่อเข้าสู่ฤดูร้อน ไร่ไม่แห้งจะกลายเป็นเชื้อเพลิงอย่างดี เมื่อเกิดไฟป่า การพัดพาของลมจะทำให้ไฟลุกลามได้ง่ายและไกลขึ้น และด้วยสภาพอากาศที่ไม่ถ่ายเท ยิ่งทำให้ฝุ่นควันมีเพิ่มมากขึ้น รวมถึงชาวบ้านที่อาศัยในพื้นที่สูงในภาคเหนือส่วนใหญ่ทำเกษตรเชิงเดี่ยว จะเผาป่าเพื่อเริ่มทำการเกษตรครั้งใหม่หรือพืชบางชนิดอาจต้องใช้ไฟเพื่อช่วยในการเจริญเติบโตหรือผลัดเปลี่ยนเมื่อมีต้นไม้และหญ้าขึ้นคลุมผิวดินมากๆ พืชบางชนิดจะไม่สามารถขึ้นได้และยากต่อการหา จึงทำให้ชาวบ้านมีความเชื่อว่าเมื่อเผาป่าจะหาของป่าได้ง่ายขึ้น นอกจากนี้ในพื้นที่จังหวัดเชียงราย ยังมีพื้นที่ติดกับประเทศเพื่อนบ้านทั้ง พม่า และ ลาว ซึ่งมักจะมีข้อโต้แย้งกันในเรื่องการพัดพากลุ่มหมอกควันจากประเทศเพื่อนบ้านซึ่งยังไม่มีการศึกษาวิจัยเป็นที่ยอมรับ ดังนั้นการติดตั้งอุปกรณ์เซ็นเซอร์ในแถบชายของที่ติดกับประเทศเพื่อนบ้านก็ช่วยให้มีข้อมูลเชิงประจักษ์มากขึ้น รูปที่ 61 แสดงพิกัดของหน่วยงานที่ทางโครงการกำลังประสานงานเพื่อวิเคราะห์หาตำแหน่งที่เหมาะสมสำหรับติดตั้งเซ็นเซอร์และอุปกรณ์เกตเวย์ โดยมี ส่วนควบคุมและปฏิบัติการไฟฟ้าสำนักบริหารพื้นที่อนุรักษ์ที่ 15 จังหวัดเชียงราย เป็นหน่วยงานที่ให้ความอนุเคราะห์และให้การสนับสนุนข้อมูลเชิงพื้นที่



รูปที่ 61 พื้นที่โครงการพัฒนาออยตุง จังหวัดเชียงราย

2) จังหวัดลำพูน

มลพิษอากาศฝุ่นควัน PM2.5 ในพื้นที่จังหวัดลำพูน มีสาเหตุสำคัญมาจากไฟป่าในพื้นที่และอีกส่วนได้รับผลพวงจากวิกฤตมลพิษของจังหวัดเชียงใหม่ เพราะทั้งสองจังหวัดมีลักษณะทางภูมิศาสตร์อยู่ในแอ่งเดียวกัน คือแอ่งเชียงใหม่-ลำพูน ทำให้ระดับมลพิษส่งผลถึงกัน การเผาพื้นที่โล่ง แหล่งกำเนิดไฟจากกิจกรรมปลูกเกษตรและพื้นที่ป่าจังหวัดลำพูน เฉลี่ยอยู่ 2000 กว่าจุด ในทุกๆปี และคาดการณ์ว่าปี 65 จะมีจำนวนเท่าเดิม ช่วงปลายเดือนมกราคม กุมภาพันธ์ และมีนาคม ในเบื้องต้นทางโครงการได้เลือกตำแหน่งติดตั้งเซ็นเซอร์ตามตำแหน่งที่ได้รับการแนะนำจากหน่วยงานในพื้นที่ เช่น อุทยานแห่งชาติ, หน่วยพิทักษ์อุทยานแห่งชาติ และ สถานีควบคุมไฟป่า เป็นต้น โดยตำแหน่งติดตั้งอุปกรณ์เป็นพื้นที่ที่ได้รับผลกระทบจากไฟป่าและเป็นตำแหน่งที่สามารถส่งสัญญาณเซ็นเซอร์ได้รวมถึงมีอุปกรณ์พื้นฐานเหมาะสมสำหรับการติดตั้งเซ็นเซอร์และอุปกรณ์เกตเวย์ เช่น มีเสาสูงรองรับการติดตั้งหรือ มีกระแสไฟฟ้าเข้าถึง เป็นต้น ส่วนจำนวนเซ็นเซอร์ที่ติดตั้งในพื้นที่ ทางโครงการได้กระจายติดตั้งตามตำแหน่งที่เหมาะสมและครอบคลุมพื้นที่เป้าหมาย ซึ่งได้มีการประสานงานกับเจ้าหน้าที่อุทยานแห่งชาติแม่ปิง และ หน่วยพิทักษ์ไฟป่า เพื่อสำรวจพื้นที่และติดตั้งไว้แล้ว รูปที่ 62 แสดงพื้นที่เป้าหมายที่จะทำการติดตั้งอุปกรณ์ Canarin เซ็นเซอร์ และ อุปกรณ์เกตเวย์ นอกจากนี้ยังได้มีการวางแผนติดตั้งไปที่บริเวณดอยช้างป่าแป๋ ซึ่งเป็นแนวเขารอยต่อระหว่างเชียงใหม่และลำพูน ซึ่งพบการไหม้ของไฟป่าอย่างมาก



รูปที่ 62 แสดงตำแหน่งหน่วยพิทักษ์ไฟป่า บริเวณอุทยานแห่งชาติแม่ปิง จังหวัดลำพูน

3) จังหวัดตาก

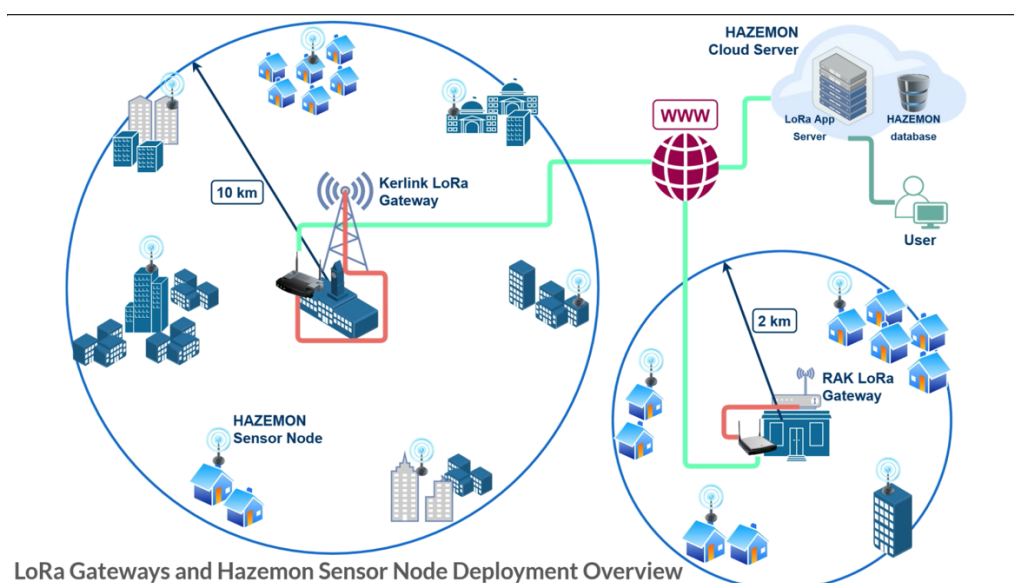
จังหวัดตากมีสภาพพื้นที่ส่วนใหญ่เป็นป่าไม้และมีภูเขาสูงชันอีกทั้งยังมีอาณาเขตติดต่อกับประเทศเพื่อนบ้านจึงทำให้ประสบปัญหาความรุนแรงด้านหมอกควันและไฟป่าซึ่งจากสภาพภูมิประเทศที่มีลักษณะพื้นที่เป็นราบลุ่มล้อมรอบด้วยภูเขาสภาพคล้ายแอ่งกระทะเมื่อความกดอากาศสูงจากประเทศจีนแผ่ปกคลุมเข้ามาในระหว่างเดือนธันวาคมถึงเดือนเมษายน ส่งผลให้อากาศเคลื่อนตัวช้าไม่ถ่ายเท ประกอบกับในช่วงเดือนกุมภาพันธ์ถึงเดือนเมษายน เกิดหมอกควันที่มาจากการเผาในพื้นที่โล่ง ได้แก่ การเผาป่าเพื่อหาของป่า การเผาขยะ เผาเศษวัสดุทางการเกษตรในการเตรียมการเพาะปลูกรอบปีถัดไป สภาพอากาศที่แห้งและนิ่งทำให้ฝุ่นละอองที่เกิดขึ้นสามารถแขวนลอยอยู่ในอากาศได้นาน ในรอบหลายปีที่ผ่านมาได้ประสบปัญหาหมอกควันจากไฟป่าปกคลุมพื้นที่อย่างรุนแรง โดยตรวจพบแนวโน้มของปริมาณฝุ่นขนาดเล็ก (PM10 และ PM2.5) เพิ่มสูงขึ้น ตั้งแต่เดือนกุมภาพันธ์ ถึงเมษายน ของทุกปี ประกอบกับในช่วงเวลาดังกล่าวมีอากาศเย็น สภาพอากาศแห้งและนิ่ง ทำให้ฝุ่นละอองแขวนลอยอยู่ได้นาน ไม่สามารถกระจายออกไปและตกลงพื้น รวมถึงสถานการณ์ด้านหมอกควันไฟป่าในพื้นที่จังหวัดตาก มีแนวโน้มของสถานการณ์ไปสู่ขั้นวิกฤติที่อาจส่งผลกระทบต่อภาวะสุขภาพของประชาชนส่วนใหญ่

ทางคณะวิจัยได้เลือกติดตั้งเซ็นเซอร์ตามตำแหน่งที่ได้รับการแนะนำจากประชาชนและชุมชนในพื้นที่ซึ่งเป็นกลุ่มเสี่ยง เช่น โรงเรียน, โรงพยาบาลส่งเสริมสุขภาพตำบล, ศูนย์พัฒนาเด็กเล็ก, วัด เป็นต้น โดยตำแหน่งติดตั้งอุปกรณ์เป็นพื้นที่ที่ประสบปัญหาความรุนแรงด้านหมอกควันที่มาจากการเผาในพื้นที่โล่ง ได้แก่ การเผาขยะ เผาเศษวัสดุทางการเกษตรในการเตรียมการเพาะปลูกรอบปีถัดไป

รวมถึงผลกระทบจากไฟฟ้าเนื่องจากเป็นพื้นที่กิ่งเมืองที่ติดกับพื้นที่ป่า ตำแหน่งที่ถูกเลือกสำหรับติดตั้งเซ็นเซอร์ต้องสามารถส่งสัญญาณเซ็นเซอร์ได้รวมถึงมีอุปกรณ์พื้นฐานเหมาะสมสำหรับการติดตั้งเซ็นเซอร์ เช่น เสาสูง กระแสไฟฟ้า เป็นต้น โดยโรงเรียนบ้านแม่กั๊ดหลวงกัญชัยเป็นศูนย์กลางของเครือข่ายโลล่าเพื่อกระจายสัญญาณระยะไกล เนื่องจากโรงเรียนมีเสาโทรคมนาคมสูง 24 เมตร ซึ่งเหมาะสมสำหรับการติดตั้งอุปกรณ์เกตเวย์ที่ใช้ในการกระจายสัญญาณ

4.4.2 โครงสร้างเครือข่ายโลล่าสำหรับการติดตั้งในพื้นที่เป้าหมาย

จากการสำรวจพื้นที่และสอบถามข้อมูลจากผู้ประสานงานในพื้นที่ ทางคณะวิจัยจึงได้มีการปรับปรุงสถาปัตยกรรมเครือข่ายโลล่า ให้มีความเหมาะสมมากขึ้นตามสภาพพื้นที่เป้าหมาย ดังแสดงใน รูปที่ 63 ซึ่งจะมี อุปกรณ์โลล่าเกตเวย์ประสิทธิภาพสูง (Kerlink LoRa Gateway) เป็นจุดศูนย์กลางในการรับข้อมูลจากอุปกรณ์เซ็นเซอร์ที่กระจายติดตั้งในพื้นที่โดยรอบโดยมีเป้าหมายพิกตอยู่รัศมี 10 กิโลเมตร โดยจะนำส่งข้อมูลผ่านอินเทอร์เน็ตด้วย LoRaWAN โพรโตคอล มาที่ Network Server (Hazemon Cloud Server) เนื่องจากสถานที่ติดตั้งอาจจะไม่มียุคเชื่อมต่ออินเทอร์เน็ต ในสถาปัตยกรรมจึงต้องมีการเชื่อมต่อกับอุปกรณ์ 4G เราท์เตอร์ เพื่อเชื่อมต่ออินเทอร์เน็ตผ่านเครือข่าย 3G/4G สำหรับในบางพื้นที่ที่ สัญญาณโลล่าจาก เกตเวย์ไม่สามารถครอบคลุม จะมีการนำอุปกรณ์ DIY โลล่าเกตเวย์ (RAK LoRa Gateway) เข้ามาช่วยกระจายสัญญาณให้ครอบคลุมพื้นที่ให้มากขึ้น โดยมีเป้าหมายพิกตอยู่รัศมี 2 กิโลเมตร โดยอุปกรณ์ทุกตั้งจะมีการติดตั้ง OpenVPN client เอาไว้เพื่อใช้ในการควบคุมระยะไกลจาก Network Server



LoRa Gateways and Hazemon Sensor Node Deployment Overview

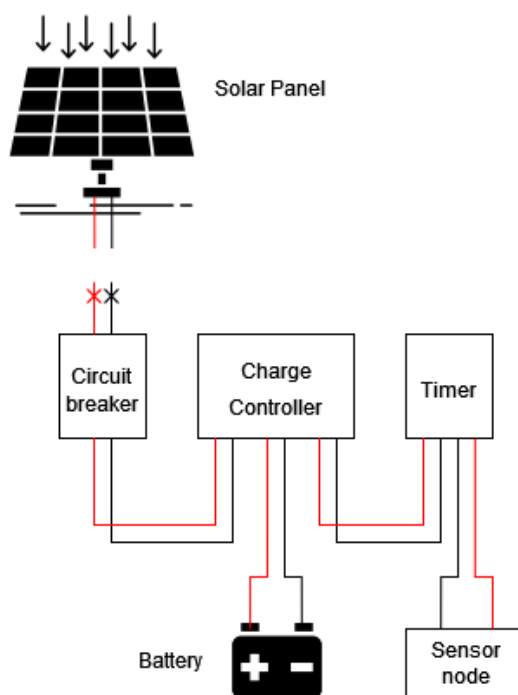
รูปที่ 63 โครงข่ายโลล่าที่จะทำการติดตั้งในพื้นที่เป้าหมาย

4.4.3 การพัฒนาชุดอุปกรณ์ตรวจวัดคุณภาพอากาศด้วยระบบพลังงานแสงอาทิตย์

เนื่องด้วยในแผนงานการติดตั้งอุปกรณ์เซ็นเซอร์ ได้กำหนดพื้นที่เป้าหมายบางส่วน ในพื้นที่ป่า ที่ซึ่งไม่มีไฟฟ้าเข้าถึง ดังนั้นทางคณะผู้วิจัยจึงได้ ออกแบบและพัฒนาระบบพลังงานแสงอาทิตย์ขึ้นมา เพื่อใช้กับอุปกรณ์โหนดเซ็นเซอร์ และ อุปกรณ์เครือข่าย ระบบพลังงานแสงอาทิตย์ ใช้เทคโนโลยีเซลล์แสงอาทิตย์ (Solar Cell) หรือ เซลล์โฟโตโวลตาอิก (Photovoltaic cell) คือ อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ที่ทำจากสารกึ่งตัวนำชนิดพิเศษ ที่มีคุณสมบัติในการเปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์ ให้เป็นพลังงานไฟฟ้า โดยกระแสไฟฟ้า ที่ผลิตได้จากเซลล์แสงอาทิตย์นั้น จะเป็น ไฟฟ้ากระแสตรง (Direct Current) ซึ่งสามารถนำมาจ่ายพลังงานให้แก่อุปกรณ์ได้ทันที และ กักเก็บไว้ในแบตเตอรี่เพื่อใช้งานภายหลังได้

องค์ประกอบของชุดอุปกรณ์ตรวจวัดคุณภาพอากาศที่ทำงานด้วยระบบพลังงานแสงอาทิตย์

ส่วนประกอบของระบบพลังงานแสงอาทิตย์ ประกอบด้วย 5 ส่วน ดังแสดงใน รูปที่ 64



รูปที่ 64 ชุดอุปกรณ์เซ็นเซอร์ทำงานด้วยระบบพลังงานแสงอาทิตย์

- 1) แผงเซลล์แสงอาทิตย์ (Solar Panel) เป็นส่วนประกอบสำคัญของระบบที่แปลงพลังงานแสงอาทิตย์เป็นไฟฟ้ากระแสตรง
- 2) เครื่องควบคุมพลังงานแสงอาทิตย์ (Charge Controller) เป็นตัวควบคุมแรงดัน ไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ชาร์จแบตเตอรี่ ป้องกันแบตเตอรี่จากการชาร์จไฟเกิน และยังคงควบคุมการปล่อยประจุ

- 3) อุปกรณ์ตัดวงจรไฟฟ้าแบบอัตโนมัติ (Circuit breaker) เป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่ในการตัดวงจรไฟฟ้า เมื่อเกิดความผิดปกติของแรงดันและกระแสไฟฟ้าไฟ หรือไฟฟ้าลัดวงจร เพื่อเป็นการป้องกันความเสียหายที่จะเกิดขึ้นกับระบบ รวมถึงป้องกันอุปกรณ์ไฟฟ้าจากความเสียหายที่เกิดจากฟ้าผ่าด้วย
- 4) อุปกรณ์ควบคุมเวลาทำงานของอุปกรณ์ (Digital Timer) ทำหน้าที่ควบคุมเวลาเปิดปิดการทำงานของอุปกรณ์ เนื่องด้วยอุปกรณ์เซ็นเซอร์จะต้องมีการรีเซ็ตระบบในทุกๆวัน เพื่อเป็นการรักษาเสถียรภาพของการทำงานของโปรแกรมและอุปกรณ์ จึงได้มีการตั้งเวลารีเซ็ตระบบไว้ที่ เวลา 24 นาฬิกา ของทุกวัน โดยอุปกรณ์ควบคุมเวลาจะทำการตัดต่อไฟโดยอัตโนมัติ
- 5) แบตเตอรี่ (Battery) เป็นตัวเก็บกระแสไฟฟ้าที่ผลิตจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์

การคำนวณอัตราการสิ้นเปลืองพลังงานของอุปกรณ์

ในการคำนวณได้นำอุปกรณ์เซ็นเซอร์ตรวจวัดคุณภาพอากาศ (ดังแสดงใน รูปที่ 66) เชื่อมต่อกับ มัลติมิเตอร์ (DMM) ในแบบวงจรอนุกรม ซึ่งได้จ่ายไฟฟ้าที่มีแรงดัน 12 โวลต์ และกำหนดกระแสไฟฟ้าสูงสุดอยู่ที่ 1 แอมแปร์ โดยอุปกรณ์เซ็นเซอร์มีอัตราการบริโภคกระแสไฟฟ้าสูงสุดอยู่ที่ 190 มิลลิแอมแปร์ (ดังแสดงใน รูปที่ 65) อัตราการสิ้นเปลืองกำลังไฟฟ้า (P) มีค่าอยู่ที่ $12 * 0.19 = 2.28$ วัตต์



รูปที่ 65 ปริมาณกระแสไฟฟ้าที่วัดได้จากมัลติมิเตอร์



รูปที่ 66 อุปกรณ์เซ็นเซอร์ตรวจวัด
คุณภาพอากาศ

นอกจากอุปกรณ์เซ็นเซอร์แล้ว ชุดอุปกรณ์พลังงานแสงอาทิตย์ยังประกอบไปด้วย ชุดอุปกรณ์ควบคุมเวลาทำงานของอุปกรณ์ และ เครื่องควบคุมพลังงานแสงอาทิตย์ ซึ่งมีอัตราการสิ้นเปลืองพลังงานดังแสดงใน ตารางที่ 5 ซึ่งเป็นอัตราการบริโภคพลังงานสูงสุด โดยในโหมดการทำงานปกติจะมีอัตราการบริโภคโดยเฉลี่ยที่ต่ำกว่า

ตารางที่ 5 อัตราการบริโภคพลังงานของอุปกรณ์

อุปกรณ์	แรงดันไฟฟ้า (โวลต์)	กระแสไฟฟ้า (มิลลิ แอมป์)	กำลังไฟฟ้า (วัตต์)
เซ็นเซอร์ (Sensor Node)	12	190	2.28
เครื่องควบคุมพลังงาน แสงอาทิตย์ (Charge Controller)	12	10	0.12
ชุดอุปกรณ์ควบคุมเวลาทำงาน ของอุปกรณ์ (Digital Timer)	12	166.66	2
รวม		366.66	4.4

การคำนวณขนาดของแบตเตอรี่

ทางคณะวิจัยได้เลือกใช้แบตเตอรี่ ชนิด deep cycle แบบ AGM (Absorbed Glass Mat) ที่มีการนำเอาตาข่ายไฟเบอร์กลาสใส่ลงไปในการกั้นแต่ละเซลล์ เพื่อเพิ่มพื้นที่สำหรับเก็บสารละลายให้มากขึ้น เพราะตาข่ายไฟเบอร์กลาสมีความสามารถในการดูดซับสารละลายได้ดี ทำให้สารละลายมีปริมาณมากขึ้น ซึ่งทำให้มีอายุการใช้งานที่ยาวนาน และเนื่องด้วย แบตเตอรี่ชนิดนี้มีวาล์วปรับแรงดันภายใน VRLA และเป็นระบบปิด หรือ sealed ที่ไม่ต้องมีการบำรุงรักษามากนักซึ่งเหมาะกับสภาพแวดล้อมของอุปกรณ์ที่ต้องติดตั้งในพื้นที่ห่างไกล

กระบวนการทำงานแบบ deep cycle นั้นมีความเหมาะสมกับระบบพลังงานแสงอาทิตย์อย่างมาก เนื่องจากเป็นแหล่งพลังงานที่ไม่เสถียรไม่สามารถผลิตพลังงานได้เต็มประสิทธิภาพในทุกๆ วัน ในวันที่ฝนตกหรือมีเมฆหมอกปกคลุมจะไม่สามารถชาร์จแบตเตอรี่ได้เต็มที่ แต่ แบตเตอรี่แบบ deep cycle นั้น สามารถที่จะคายประจุได้สูงถึง 45%-75% หรือที่เรียกว่า Dept of Discharge (DoD) ของพลังงานที่เก็บสะสมอยู่ ซึ่งลึกกว่าแบตเตอรี่ทั่วไป กล่าวโดยสรุปก็คือ แบตเตอรี่ deep cycle สามารถแจกจ่ายพลังงานให้แก่อุปกรณ์ได้โดยไม่ได้รับความเสียหาย แม้จะมีความจุจะลดต่ำลง

ในการคำนวณขนาดของแบตเตอรี่นั้น ทางคณะวิจัย ได้กำหนดเป้าหมายไว้ว่าแบตเตอรี่จะต้องสามารถจ่ายพลังงานให้แก่อุปกรณ์ได้เป็นเวลาอย่างน้อย 3 วัน หรือ 72 ชั่วโมง โดยที่ไม่มีการชาร์จประจุเลย ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการด้านล่างนี้

$$Capacity = \frac{Current \times Discharge Time}{DoD} \times 100$$

จากโหนดของอุปกรณ์ใน ตารางที่ 5 เป็นค่าบริโภคพลังงานในโหมดสูงสุด เมื่อได้ทำการทดสอบแล้วพบว่าอัตราการบริโภคกระแสไฟฟ้าเฉลี่ย (Current) ของอุปกรณ์มีค่าอยู่ที่ประมาณ 20 มิลลิแอมป์ ส่วนค่า Discharge Time คือระยะเวลาที่แบตเตอรี่ทำงานโดยไม่มีการชาร์จซึ่งได้กำหนดไว้ที่ 72 ชั่วโมง DoD จากคุณสมบัติแบตเตอรี่ที่เลือกใช้มีการระบุไว้ที่ 70% ดังนั้นความจุของแบตเตอรี่จึงสามารถคำนวณได้ดังนี้

$$Capacity = \frac{0.2 \times 72}{70} \times 100 = 20.5714 \text{ Ah}$$

จากการคำนวณข้างต้นขนาดของแบตเตอรี่จะอยู่ที่ 20 Ah ซึ่งเป็นขนาดที่จะใช้ในการติดตั้งอุปกรณ์ในพื้นที่เป้าหมายต่อไป

การคำนวณขนาดของแผงโซลาร์เซลล์

เนื่องจากแสงแดดในพื้นที่เป้าหมายมีปริมาณไม่สม่ำเสมอตลอดทั้งวันทางคณะจึงได้ประมาณการจำนวนชั่วโมงในการรับแสงอาทิตย์ไว้อย่างน้อย 5 ชั่วโมง (Time) ต่อวัน ซึ่งจะเป็นเวลาที่ใช้ในการชาร์จแบตเตอรี่ในแต่ละวัน จากขนาดแบตเตอรี่ที่ได้เลือกไว้ คือ 20 Ah (Capacity) สามารถคำนวณหาขนาดของโซลาร์เซลล์ได้ดังนี้

$$Time = \frac{Battery \ Voltage \times \ Capacity}{Solar \ Power \times \ Battery_{Eff} \times \ Device_{Eff}}$$

โดย $Battery_{Eff}$ คือประสิทธิภาพของแบตเตอรี่ ซึ่งถูกกำหนดไว้ที่ 80% และ $Device_{Eff}$ คือ ค่าประสิทธิภาพของอุปกรณ์ต่างๆที่บริโภคกระแสไฟฟ้าจากแบตเตอรี่ โดยกำหนดไว้ที่ 80% เช่นกัน จากการแทนค่าตัวแปรทั้งหมดในสมการแล้ว ขนาดของแผงโซลาร์เซลล์ (Solar Power) จะมีขนาดอยู่ที่ 80 วัตต์

ทางคณะวิจัยได้ทำการประกอบอุปกรณ์ทั้งหมด ดังแสดงใน รูปที่ 68 โดยทำการทดลองในบริเวณภายนอกของห้องปฏิบัติการดังแสดงใน รูปที่ 67 ซึ่งทำการทดสอบ ในช่วงเดือน กรกฎาคม พ.ศ. 2565 ซึ่งสภาพอากาศโดยทั่วไปมีฝนตกและมีเมฆปกคลุมปะปนกับและมีสภาพอากาศแบบเปิด โดยแผงโซลาร์เซลล์ ใช้เวลาประมาณ 3-5 ชั่วโมง ต่อการชาร์จแบตเตอรี่ให้เต็ม และเมื่อแบตเตอรี่ชาร์จเต็มแล้วได้มีการทดสอบตัดแผงวงจรของโซลาร์เซลล์ออกให้อุปกรณ์ได้รับพลังงานจากแบตเตอรี่

อุปกรณ์สามารถทำงานอยู่ที่ประมาณ 80 ชั่วโมง ซึ่งคาดว่าจะเพียงพอต่อสภาพแวดล้อมในพื้นที่ป่าที่อาจจะมีต้นไม้บดบังแสงแดดรวมถึงการใช้งานในฤดูฝน



รูปที่ 67 การทดสอบอุปกรณ์เซ็นเซอร์กับระบบพลังงานแสงอาทิตย์



รูปที่ 68 ส่วนประกอบของชุดเซ็นเซอร์และระบบพลังงานแสงอาทิตย์

4.4.4 การติดตั้งโครงข่ายโลล่าและอุปกรณ์เซ็นเซอร์ในพื้นที่เป้าหมาย

ดังที่ได้รายงานไว้ในหัวข้อ 4.4.1 พื้นที่เป้าหมายหลักได้แบ่งเป็น 3 พื้นที่ได้แก่ 1) โครงการพัฒนาออยตุง จังหวัดเชียงราย, 2) อุทยานแห่งชาติแม่ปิง และ บริเวณออยช้างป่าแป๋ จังหวัดลำพูน และ 3) อำเภอแม่สอด จังหวัดตาก ซึ่งมีผลการติดตั้งดังรายละเอียดดังต่อไปนี้

การติดตั้งโครงข่ายโลล่าและอุปกรณ์เซ็นเซอร์ ในพื้นที่ จังหวัด ตาก

ทางคณะวิจัยจากสถาบันเทคโนโลยีแห่งเอเชีย ได้ทำการสำรวจพื้นที่เป้าหมายในอำเภอแม่สอด จังหวัดตาก ระหว่างวันที่ 17 -20 ธันวาคม 2564 โดยมีเป้าหมายที่จะหาพื้นที่ที่เหมาะสมในการติดตั้งอุปกรณ์ Canarin เซ็นเซอร์เพื่อตรวจวัดคุณภาพอากาศและนำข้อมูลมาวิเคราะห์หาสาเหตุและศึกษาพฤติกรรมของหมอกควันในพื้นที่ โดยได้ทางคณะได้รับความร่วมมือจาก โรงเรียนแม่ก๊กหลวง กัญชัย หมู่ 1 ตำบลแม่กาษา อำเภอแม่สอด จังหวัด ตาก ในการใช้เสาสัญญาณวิทยุ เพื่อการติดตั้งอุปกรณ์โลล่าเกตเวย์ ซึ่งถูกติดตั้ง อยู่ที่ ความสูง 21 เมตรจากพื้นดิน ดังแสดงใน รูปที่ 69 และได้ทำ

การวัดสัญญาณโดยรอบโดยใช้เครื่องวัดสัญญาณ Spectrum Analyser ซึ่งตรวจพบสัญญาณโลล่าที่ใช้คลื่นความถี่ สัญญาณโลล่าที่ 923 MHz และมีระดับสัญญาณอยู่ที่ -80 dBM ดังแสดงใน รูปที่ 70

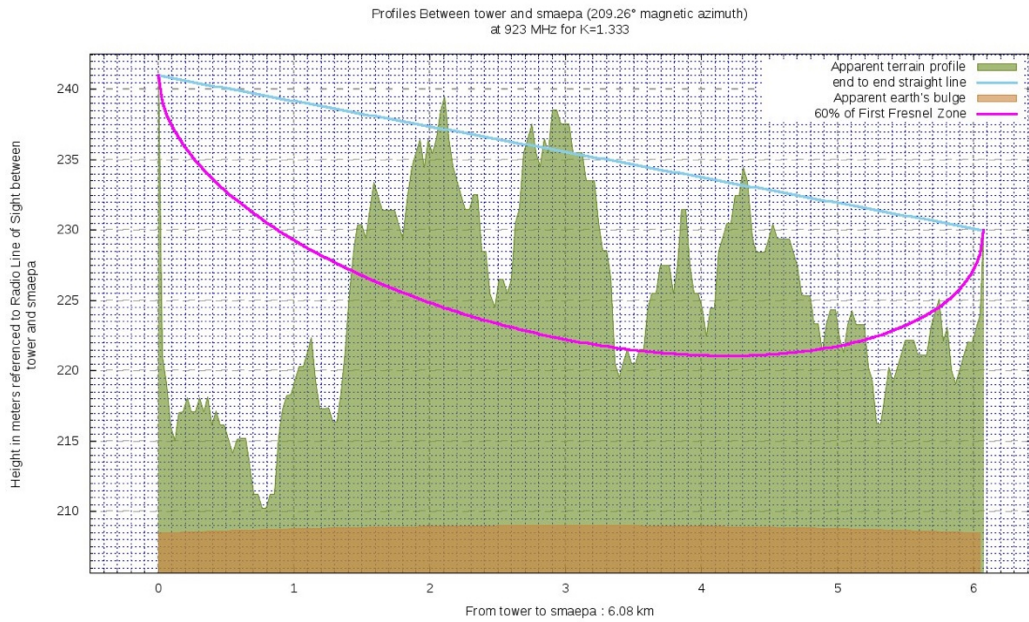


รูปที่ 69 การติดตั้งอุปกรณ์โลล่าเกตเวย์ ที่
อำเภอแม่สอด จังหวัดตาก



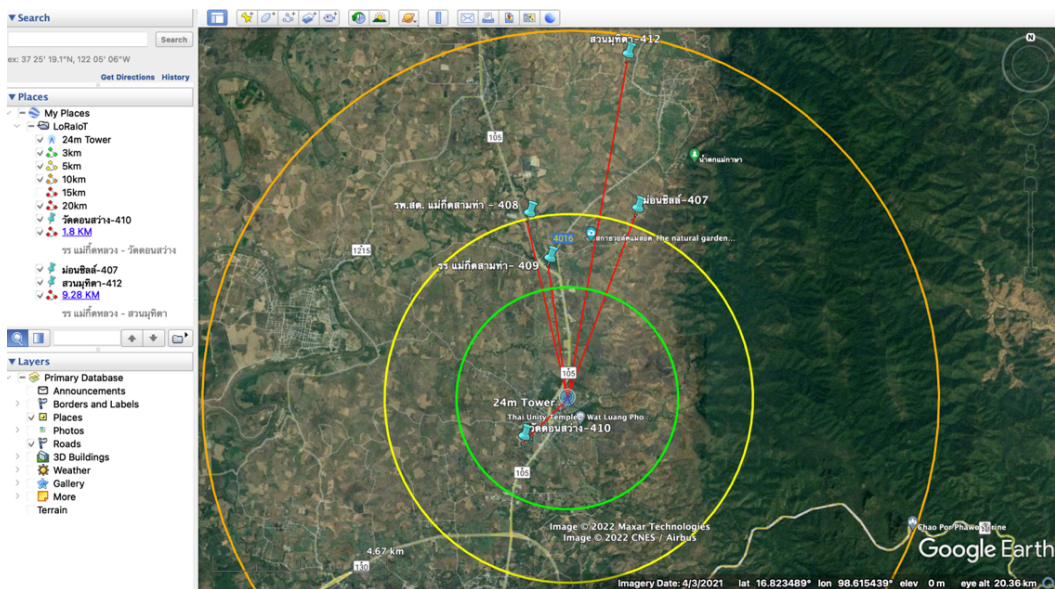
รูปที่ 70 สัญญาณโลล่าในบริเวณที่ติดตั้งเกตเวย์

หลังจากติดตั้งเกตเวย์โลล่าเป็นที่เรียบร้อยแล้วจึงได้เริ่มทำการตรวจวัดสัญญาณตามพิกัดเป้าหมายที่ได้วางแผน ซึ่งพบว่าหลายจุดไม่สามารถรับสัญญาณจากโลล่าเกตเวย์ได้ เนื่องจากพื้นที่ของอำเภอแม่สอดเป็นลักษณะเนินเขาสลับกับที่ราบ ทำให้มีเนินเขาและสันเขาบดบังสัญญาณโลล่า โดยทางคณะวิจัยได้ใช้โปรแกรม RFBot ที่พัฒนาโดย ICT4D lab, International Centre for Theoretical Physics (ICTP) ประเทศอิตาลี ซึ่งเป็น Open source ทำงานบนโปรแกรม telegram [18] โดยโปรแกรมสามารถวิเคราะห์โมเดลของการกระจายสัญญาณ (Signal propagation) เปรียบเทียบกับข้อมูลเชิงภูมิศาสตร์ได้ ดังแสดงใน รูปที่ 71 ที่แสดงแบบจำลองการส่งสัญญาณจากโลล่าเกตเวย์ ที่โรงเรียนแม่ก๊กหลวงกาญจนาภิเษก ที่ระดับความสูง 21 เมตร ไปยังโรงเรียนแม่ปะใต้ พิกัดที่คาดว่า จะทำการติดตั้งอุปกรณ์เซ็นเซอร์ที่ระดับความสูง 5 เมตร ซึ่งมีระยะห่างกันประมาณ 6 กิโลเมตร (แนวแกน X) พื้นที่สีเขียวในภาพแสดงถึงพื้นที่สูงต่ำตามสภาพภูมิศาสตร์ โดยแนวแกน Y จะแสดงระดับความสูงจากระดับน้ำทะเล เส้นสีฟ้าแสดงถึงเส้น Line of Sight ระหว่างสองจุด และ เส้นสีชมพูแสดงพื้นที่ Primary Fresnel Zone ซึ่งพบว่าสัญญาณโลล่าไม่สามารถรับส่งถึงกันได้ เพราะพื้นที่จะถูกบดบังด้วยเนินเขาสูง ดังนั้นในการสำรวจพื้นที่จึงต้องมีปรับเปลี่ยนพิกัดให้เหมาะสม



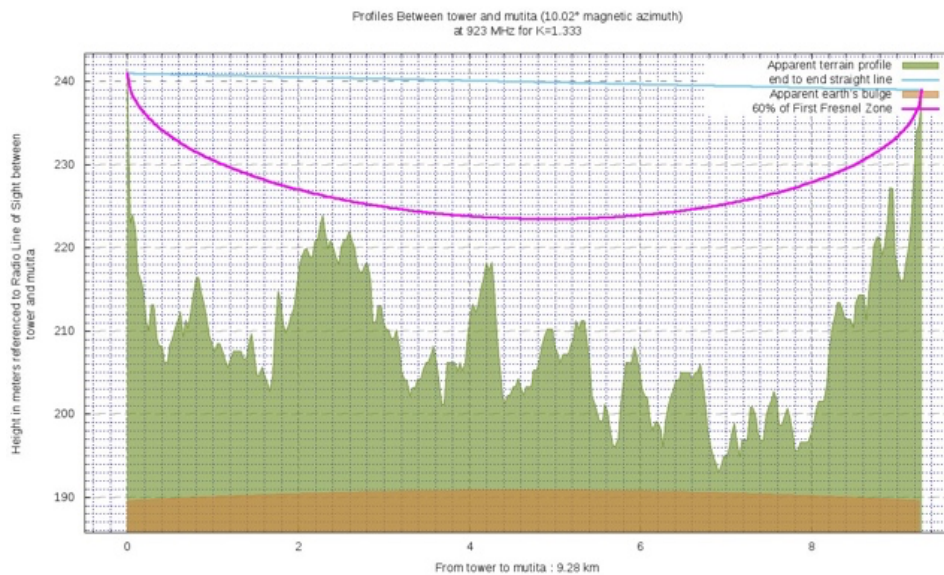
รูปที่ 71 โมเดลจำลองการส่งสัญญาณโลล่า (923MHz) จากโลล่าเกตเวย์ที่ความสูง 24 เมตร กับพิกัดโรงเรียนแม่ปะใต้

รูปที่ 72 แสดงตำแหน่งติดตั้งอุปกรณ์เซ็นเซอร์ Canarin และ อุปกรณ์โลล่าเกตเวย์ โดย อุปกรณ์ ได้ถูกติดตั้งกระจายออกไปในระยรัศมี 3, 5 และ 10 กิโลเมตร โดยระยะทางไกลสุดอยู่ที่สวนมูทิตา ซึ่งมีระยะ 9.28 กิโลเมตร ห่างจากอุปกรณ์เกตเวย์โลล่า



รูปที่ 72 แผนที่แสดงตำแหน่งการติดตั้งอุปกรณ์เซ็นเซอร์และเกตเวย์โลล่า

รูปที่ 73 แสดงแบบจำลองของการกระจายสัญญาณ (Signal propagation) ด้วย โปรแกรม Rfbot จาก โรงเรียนแม่ก๊กหลวงกัญชัย ที่ระดับความสูง 21 เมตร ไปยังสวนมูทิตาที่ทำการติดตั้งอุปกรณ์ เซ็นเซอร์ที่ระดับความสูง 5 เมตร ซึ่งมีระยะห่างกันประมาณ 9.28 กิโลเมตร ซึ่งจะพบตำแหน่งของ สวนมูทิตาตั้งอยู่บนเชิงเขาจึงทำให้สามารถเกิด Line of Sight กับเสาวิทยุที่ โรงเรียนแม่ก๊กหลวงกัญชัย และสามารถส่งสัญญาณโล่ล่าไปถึงได้ ซึ่งในการติดตั้งอุปกรณ์จำเป็นต้องใช้ความได้เปรียบในเชิงพื้นที่นี้เพื่อให้ สามารถส่งข้อมูลไปยัง เกตเวย์โล่ล่าได้ รูปที่ 74 แสดงภาพตัวอย่างของตำแหน่งจุดติดตั้ง อุปกรณ์ เซ็นเซอร์



รูปที่ 73 โมเดลจำลองการส่งสัญญาณโล่ล่า (923MHz) จากโล่ล่าเกตเวย์ที่ความสูง 24 เมตร กับพิกัดสวนมูทิตา



a. จุดติดตั้งที่ รพสต. แม่ก๊กสามท่า



b. จุดติดตั้งที่ รร. แม่ก๊กสามท่า



ค. จุดติดตั้งที่ สวนมุกิตตา



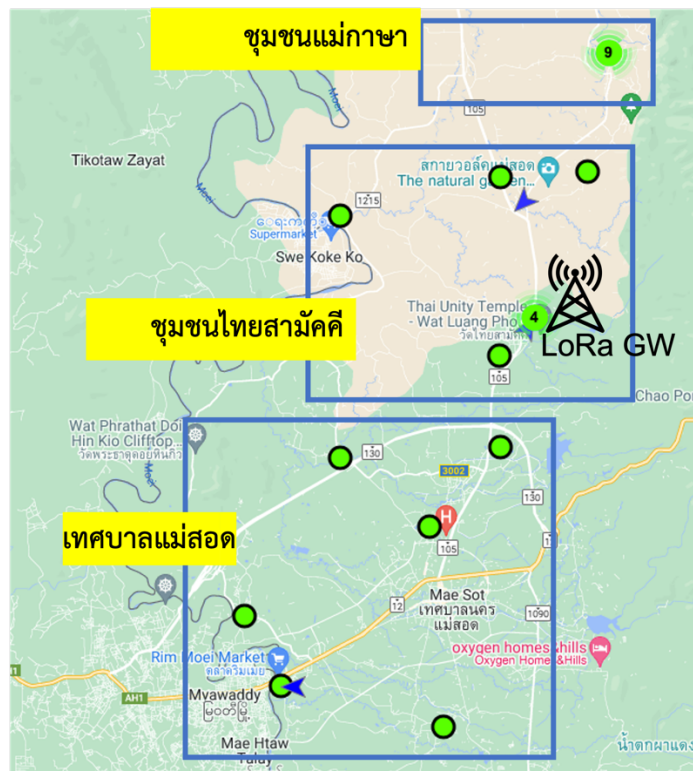
ง) จุดติดตั้งที่ ชุมชนไทยสามัคคี

รูปที่ 74 แสดงพื้นที่บริเวณของจุดติดตั้งอุปกรณ์ Canarin เซ็นเซอร์ ที่ อ.แม่สอด จ.ตาก

นอกจากพื้นที่ชุมชน ไทยสามัคคี แล้ว ได้มีการติดตั้งอุปกรณ์เซ็นเซอร์เพิ่มเติม ในอีกสองพื้นที่ได้แก่

ชุมชนแม่กาษา และในเทศบาลแม่สอด ดังแสดงใน

รูปที่ 75 แต่เนื่องจากสัญญาณโล่่าจากเกตเวย์ที่ติดตั้งไว้ที่ ร.ร.แม่กั๊ดหลวงกัญไชย นั้นส่งไปไม่ถึง อุปกรณ์เซ็นเซอร์จึงต้องทำการส่งข้อมูลด้วยสัญญาณ WiFi



รูปที่ 75 การติดตั้งอุปกรณ์เซ็นเซอร์ ในพื้นที่ อำเภอแม่สอด จังหวัดตาก

การติดตั้งโครงข่ายโลล่าและอุปกรณ์เซ็นเซอร์ ในพื้นที่ จังหวัด ลำพูน

การติดตั้งโครงข่ายโลล่าและอุปกรณ์เซ็นเซอร์ ในจังหวัดลำพูน แบ่งออกเป็น สองพื้นที่ย่อย คือ บริเวณอุทยานแห่งชาติแม่ปิง และบริเวณดอยช้างป่าแป๋ ในส่วนของพื้นที่อุทยานแห่งชาติแม่ปิง ทางคณะวิจัยได้ประสานงานกับสถานีตำรวจภูธร (สภ.) บ้านก้อ, อุทยานแห่งชาติแม่ปิง ในการขอความอนุเคราะห์ติดตั้งอุปกรณ์โครงข่ายโลล่าและอุปกรณ์เซ็นเซอร์ในพื้นที่ และได้มีการกำหนดจุดติดตั้งอุปกรณ์ ดังแสดงใน รูปที่ 76 ที่จุด สภ.ก้อ จะทำการติดตั้งอุปกรณ์โลล่าเกตเวย์ (Kerlink) บนเสาวิทยุสูง 30 เมตร เพื่อเป็นศูนย์กลางการรับส่งข้อมูล จากอุปกรณ์ ตรวจวัดคุณภาพอากาศขนาดเล็ก ที่ติดตั้ง ในบริเวณโดยรอบ ทั้งนี้จะทำการติดตั้งอุปกรณ์เซ็นเซอร์พร้อมด้วยระบบพลังงานแสงอาทิตย์ อีกสองจุด ที่หน่วยพิทักษ์ไฟฟ้า มป.2 แก่งก้อ (PL6) และ หน่วยพิทักษ์ไฟฟ้า มป.8 ห้วยฟ้าผ่า (Ker1) โดยทั้งสองจุดนี้ ไม่มีไฟฟ้าเข้าถึง ในส่วนทางด้านตะวันออกของพื้นที่ นั้นมีแนวเขาสูงที่เกิดขวางสัญญาณโลล่าจาก สภ.ก้อ อยู่ จึงจำเป็นต้องมีการติดตั้ง อุปกรณ์ Rak เกตเวย์ ที่สถานีควบคุมไฟฟ้าแม่ปิง เพื่อขยายสัญญาณ ให้ครอบคลุมไปถึงพื้นที่ของอุทยานแห่งชาติแม่ปิงและบริเวณโดยรอบ



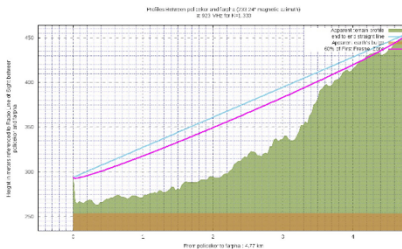
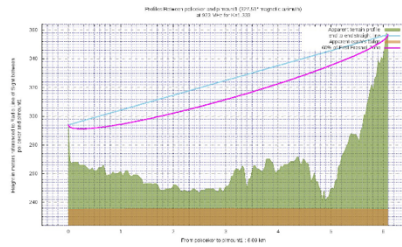
รูปที่ 76 แผนผังการติดตั้งอุปกรณ์โครงข่ายโลล่า และ อุปกรณ์เซ็นเซอร์

อุปกรณ์ โลล่าเกตเวย์ (Kerlink iStation) ได้ติดตั้งไว้ที่เสาวิทยุของ สภ.ก้อ ซึ่งมีความสูงประมาณ 24 เมตร สามารถครอบคลุมสัญญาณบริเวณแก่งก้อโดยรอบ ดังแสดงใน รูปที่ 77 จุดติดตั้งเซ็นเซอร์ บริเวณแก่งก้อ และ ห้วยฟ้าผ่า ซึ่งมีระยะห่างออกไป 6 และ 5 กิโลเมตร ตามลำดับสามารถรับสัญญาณโลล่าได้ดี

Kor Police Station



Altitude: ~290 m



Kang Kor



Altitude: ~360 Distance: 6 km

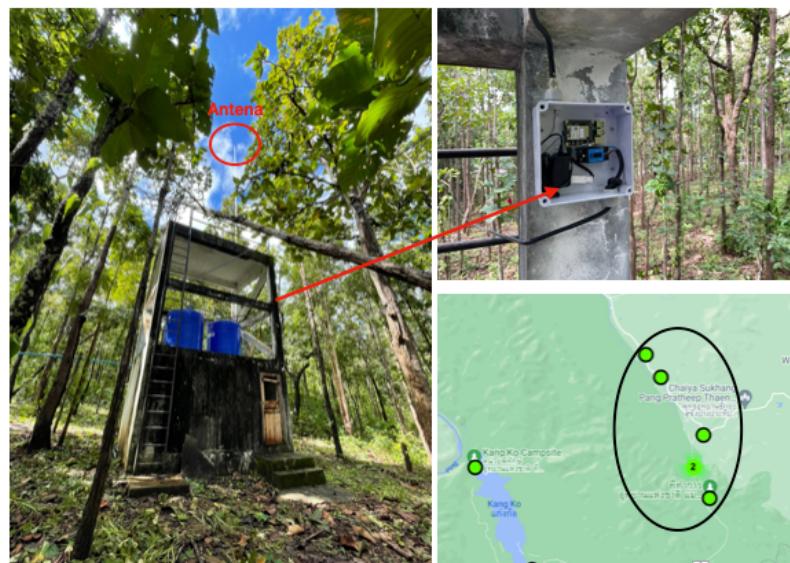
Huay Far Pah



Altitude: ~460 Distance: 5 km

รูปที่ 77 การติดตั้งโลล่าเกตเวย์ ที่ สภ.ก้อ และ อุปกรณ์เซ็นเซอร์พร้อมด้วยระบบโซลาเซลล์ ที่จุดแก่ง ก้อ และ ห้วยฟ้าผ่า

บริเวณฝั่งตะวันออกของพื้นที่นั้นมีสันเขากั้นทำให้สัญญาณโลล่าไม่สามารถส่งไปถึง จึงต้องมีการติดตั้ง Rak โลล่าเกตเวย์ เพื่อขยายสัญญาณที่บริเวณ สถานีควบคุมไฟฟ้าแม่ปิง ดังแสดงใน รูปที่ 78



รูปที่ 78 การติดตั้ง DIY โลล่าเกตเวย์ ที่สถานีควบคุมไฟฟ้าแม่ปิง

ในส่วนของพื้นที่ดอยช้างป่าแป๋ ทางคณะวิจัยได้ประสานงานกับ ชาวบ้านกะเหรี่ยงป่าแป๋ ต.ป่าพลู อ. บ้านโฮ้ง จ.ลำพูน ในการติดตั้งอุปกรณ์เซ็นเซอร์ ในบริเวณดอยช้างป่าแป๋ (กะซอไซ่) เป็นยอดดอยที่สูงที่สุดของจังหวัดลำพูน เป็นยอดดอยที่มีเอกลักษณ์ที่โดดเด่นถ้ามองจากในหมู่บ้านจะเห็นเป็นรูปช้างหมอบ ชาวบ้านดอยช้างป่าแป๋เป็นชาติพันธุ์ปกากะญอหรือกะเหรี่ยงสะกอ เนื่องจากยังมีการระบาดของไวรัส COVID19 อยู่ ทำให้คณะวิจัยไม่สามารถลงพื้นที่ไปถ่ายทอองค์ความรู้เกี่ยวกับการติดตั้ง

ระบบ ได้จึงใช้แอปพลิเคชัน Line และ คลิปวิดีโอ เข้ามาประยุกต์ใช้ โดยการส่งอุปกรณ์ทั้งหมดไปที่พื้นที่วิจัยและสอนวิธีการติดตั้ง ทั้งนี้ก่อนที่จะทำการติดตั้งระบบ ได้มีการสำรวจสภาพภูมิประเทศที่จะใช้ติดตั้งโหนดเซ็นเซอร์ คณะผู้วิจัยได้ ประสานงานกับชาวบ้านในพื้นที่และหน่วยงานที่รับผิดชอบในท้องถิ่น และขออนุญาตจากผู้นำชุมชนแห่งนั้น ก่อนที่จะดำเนินการ เพื่อให้เกิดความมีส่วนร่วมของชุมชนและได้สื่อสารกับชุมชนเพื่ออธิบายประโยชน์ที่จะได้รับหลังการติดตั้งโหนดเซ็นเซอร์

โดยสามารถนำข้อมูลมาทำการวิเคราะห์ปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับไฟฟ้าเพื่อเฝ้าระวังและแจ้งเตือนเมื่อเกิดไฟฟ้า ระบบที่จะติดตั้งสามารถที่จะปกป้องทรัพยากรธรรมชาติ และความเป็นอยู่ ของชาวบ้านได้ เนื่องจากในพื้นที่ดอยช้างป่าแป๋ ยังไม่มีไฟฟ้าเข้าถึง การติดตั้งอุปกรณ์เซ็นเซอร์ จึงจำเป็นต้องใช้ระบบพลังงานแสงอาทิตย์ เพื่อจ่ายไฟให้แก่อุปกรณ์ ด้วยการประสานงานจากชาวบ้านกะเหรี่ยงป่าแป๋ ได้มีการติดตั้งอุปกรณ์เซ็นเซอร์ทั้งหมด 5 จุด ได้แก่ จุดบวคควายตองตึง, จุดจอมปลวกทำบุญ, จุดตาเดโด้, จุดภูห้วยปู, และ จุดม่อนหวาย รูปที่ 79 การติดตั้งอุปกรณ์เซ็นเซอร์ที่ได้รับการประสานงานจากชาวบ้านดอยช้างป่าแป๋

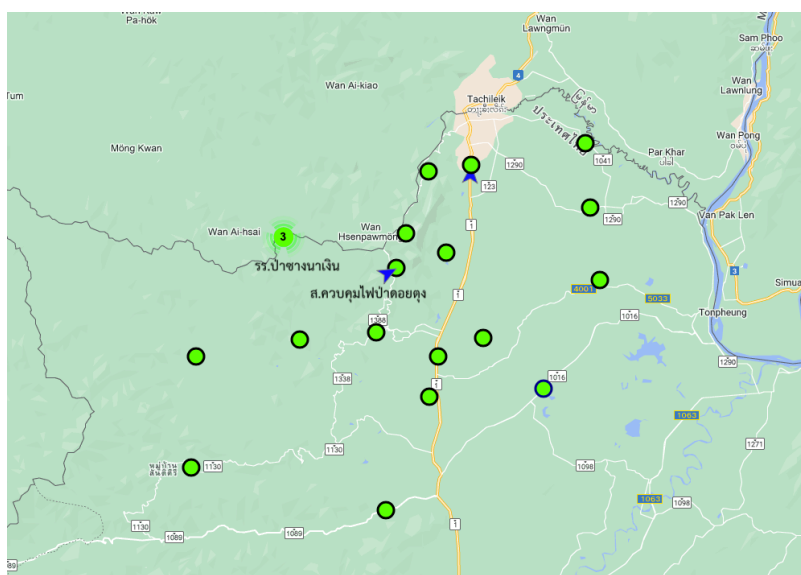


รูปที่ 79 การติดตั้งอุปกรณ์เซ็นเซอร์โดยชาวบ้านดอยช้างป่าแป๋

การติดตั้งโครงข่ายโล่และอุปกรณ์เซ็นเซอร์ ในพื้นที่ จังหวัด เชียงราย

ทางคณะวิจัยได้มีการประสานงานกับสถานีควบคุมไฟฟ้าในดอยตุง ตำบลห้วยไคร้ อำเภอแม่สาย จังหวัดเชียงราย ในการช่วยติดตั้งอุปกรณ์ในบริเวณโดยรอบ เพื่อให้สามารถเก็บข้อมูลมลพิษก่อนฤดูไฟป่า โดยทางคณะวิจัยได้จัดส่งอุปกรณ์เซ็นเซอร์ พร้อมทั้งวิดีโอสาธิตการติดตั้งอุปกรณ์ รวมทั้งติดต่อสื่อสารผ่านแอปพลิเคชันไลน์ เพื่อที่จะถ่ายทอดวิธีการติดตั้งอุปกรณ์เซ็นเซอร์ เนื่องจากทางคณะวิจัยยังไม่สามารถเดินทางเข้าพื้นที่ได้ การติดตั้งอุปกรณ์เซ็นเซอร์จะเป็นในรูปแบบการส่งข้อมูลด้วย WiFi ซึ่งเจ้าหน้าที่ในพื้นที่สามารถติดตั้งได้เอง วิธีการไม่ยุ่งยาก โดยในการติดตั้งครั้งนี้ได้รับความอนุเคราะห์จากเจ้าหน้าที่จากสถานีควบคุมไฟฟ้าดอยตุง ในการขยายการติดตั้งอุปกรณ์เซ็นเซอร์ โดยครอบคลุมบริเวณ พื้นที่ดอยตุง ที่อยู่บนพื้นที่สูงและใกล้กับแนวการเกิดไฟป่า นอกจากนี้ยังมีการขยายการติดตั้งอุปกรณ์เซ็นเซอร์ ไปในบริเวณ อำเภอแม่ฟ้าหลวง และ อำเภอแม่สาย ดังแสดงใน รูปที่ 80 ซึ่งเป็นพื้นที่ที่ได้รับผลกระทบโดยตรงจากมลพิษที่เกิดจากไฟป่า นอกจากนี้ยังมีการติดตั้งโล่แก๊สเวย์ ที่โรงเรียนป่าซางนาเงิน เพื่อรับส่งข้อมูลจากอุปกรณ์เซ็นเซอร์ที่ติดตั้งอยู่ที่ ฐานปฏิบัติการแม่น้ำปิง และ ฐานปฏิบัติการป่าซางนาเงิน ซึ่งเป็นชายขอบของประเทศไทย ซึ่งสามารถตรวจวัดหมอกควันข้ามแดนได้ ดังแสดงใน รูปที่ 81

แสดงตำแหน่งการติดตั้งอุปกรณ์เซ็นเซอร์ ในพื้นที่อำเภอแม่สาย จังหวัด เชียงราย โดยจุดติดตั้ง จะแบ่งเป็นส่วนที่อยู่พื้นที่ป่า เช่น สถานีควบคุมไฟฟ้าดอยตุง, โรงเรียน ตชด. ศรีสมวงศ์, อบต. แม่ฟ้าหลวง ซึ่งตั้งอยู่บนยอดดอยใกล้กับบริเวณที่เกิดไฟป่า และ จุดเซ็นเซอร์ในพื้นที่ชุมชน เช่น โรงเรียนวัดถ้ำปลา, เทศบาลเวียงพางคำ, เทศบาลตำบลแม่ไร่, เทศบาลแม่คำ และ อบต. ห้วยไคร้ เป็นต้น



รูปที่ 80 ตำแหน่งการติดตั้งอุปกรณ์เซ็นเซอร์ ในจังหวัดเชียงราย



ก. อุปกรณ์โลล่าเกตเวย์ติดตั้งไว้ที่ รร.ป่า
ชางนาเงิน



ข. อุปกรณ์เซ็นเซอร์พร้อมด้วยแผงโซลาร์
เซลล์ ติดตั้งไว้ที่ฐานปฏิบัติการน้ำปิง

รูปที่ 81 โลล่าเกตเวย์ติดตั้งอยู่ที่ โรงเรียนป่าชางนาเงิน และ จุดเซ็นเซอร์ที่ฐานปฏิบัติการน้ำปิง
บริเวณสุโขขอบประเทศไทย

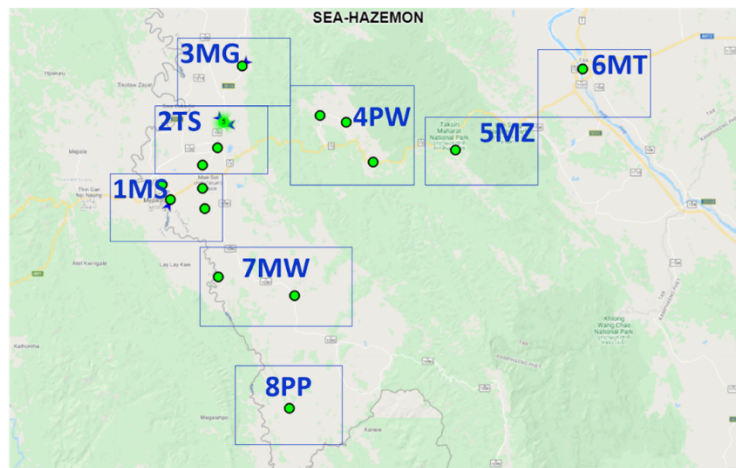
4.5 การวิเคราะห์ข้อมูลจากอุปกรณ์เซ็นเซอร์

ในหัวข้อนี้จะเป็นการวิเคราะห์ข้อมูลจากอุปกรณ์เซ็นเซอร์ที่ติดตั้งในพื้นที่เป้าหมายโดยการวิเคราะห์เริ่มจากพื้นที่ในจังหวัดตาก เพื่อทำการพัฒนาโมเดลตรวจจับไฟป่า รวมถึงวิเคราะห์การเคลื่อนที่ของ PM_{2.5} ที่ได้รับอิทธิพลจากลมและหมอกควันจากพื้นที่ที่เกิดไฟป่าในบริเวณข้างเคียง นอกจากนี้ได้มีการนำโมเดลตรวจจับไฟป่าไปใช้งานในพื้นที่จังหวัดลำพูน เพื่อวิเคราะห์หาเปอร์เซ็นต์ความถูกต้อง

4.5.1 การพัฒนาโมเดลตรวจจับการเกิดไฟป่า

ไฟป่าเป็นแหล่งกำเนิดมลพิษทางอากาศหลายประเภท ได้แก่ ฝุ่นละออง (PM_{2.5} และ PM₁₀) คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ไนโตรเจนไดออกไซด์ (NO₂) ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO₂) และไฮโดรคาร์บอน (HC) [35] ในบรรดามลพิษเหล่านี้ พบว่า PM_{2.5} และ CO มีความสัมพันธ์อย่างมากกับการเกิดไฟป่าและสามารถใช้เป็นดัชนีบ่งชี้สำหรับการตรวจจับไฟป่าที่เกิดขึ้นได้ [36] ทางคณะได้เลือกวิเคราะห์ในพื้นที่จังหวัดตากก่อนเป็นอันดับแรก เนื่องจาก สามารถติดตั้งอุปกรณ์เซ็นเซอร์ได้

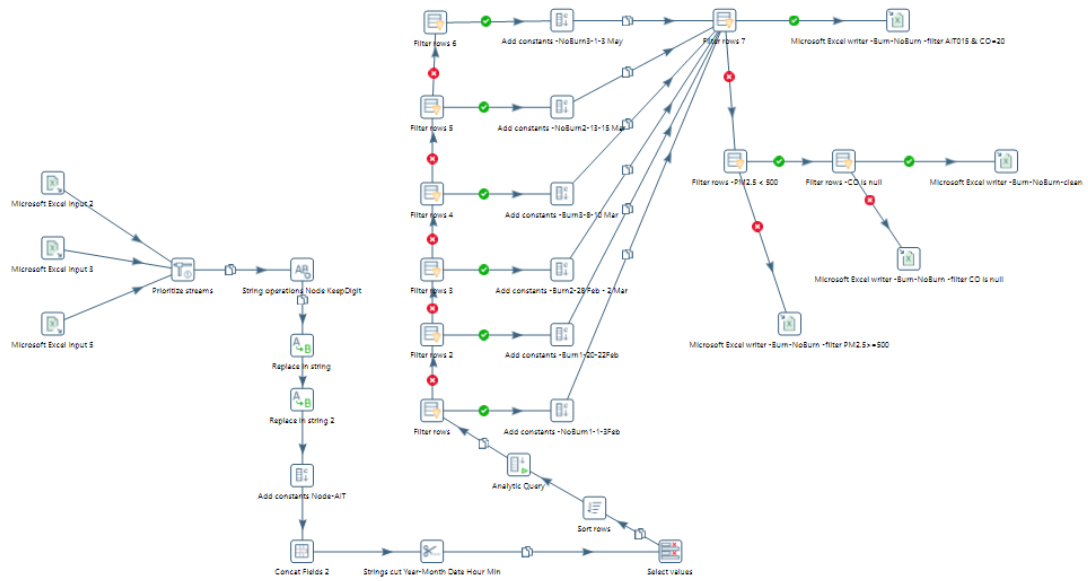
หลายตัวก่อนฤดูไฟป่า โดยใช้ข้อมูลจากเซ็นเซอร์ ทั้งหมด 25 โหนด ซึ่งถูกจัดกลุ่มเป็น 8 โซนตามลักษณะพื้นที่ชุมชน (รูปที่ 82) ทั้งนี้ได้ใช้ข้อมูลตรวจวัดความเร็วลม (WS) และทิศทางลม (WD) จากเซ็นเซอร์ตรวจวัดอากาศ ที่ติดตั้งไว้แล้ว 3 ตำแหน่ง เพื่อประกอบการวิเคราะห์ด้วย



- 1MS = Mae Sot
- 2TS = Thai Samakkhi
- 3MG = Mae Gasa
- 4PW = Pa Wor
- 5MZ = Moo Zer
- 6MT = Muang Tak
- 7MW = Mahawan
- 8PP = Pop Pra

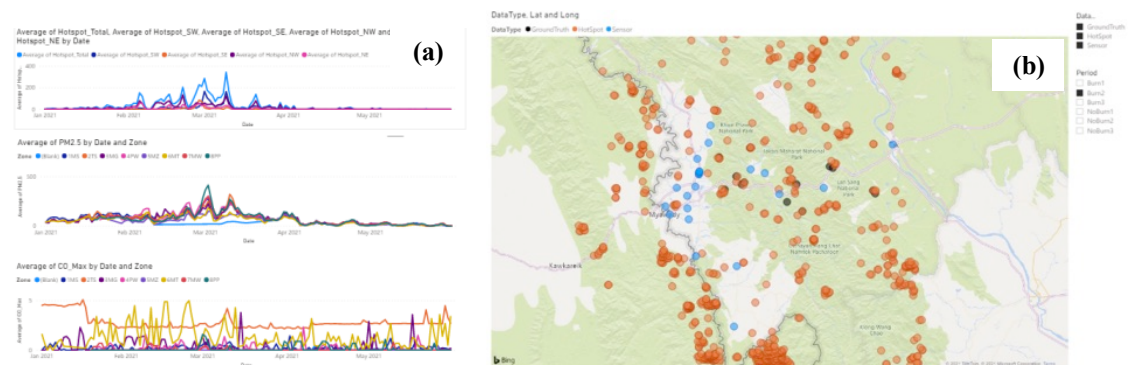
รูปที่ 82 ตำแหน่งและโซนการติดตั้งเซ็นเซอร์ ในพื้นที่ จังหวัดตาก ที่ใช้ในการวิเคราะห์โมเดลตรวจจับไฟป่า

ข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับคุณภาพอากาศ ได้แก่ $PM_{2.5}$ และ CO ของจังหวัดตาก ถูกรวบรวมจากโหนดทั้งหมดผ่านแพลตฟอร์ม ตั้งแต่วันที่ 1 มกราคม 2564 – 31 พฤษภาคม 2564 โดยมีความถี่ของการบันทึกข้อมูลทุกๆ 2 นาทีโดยประมาณ นอกจากนี้ยังได้รวบรวมข้อมูลไฟป่าจากการสำรวจภาคพื้นดิน (Ground Observation) ของส่วนควบคุมและปฏิบัติการไฟป่า จังหวัดตาก และข้อมูลรายวันของจุดความร้อน (Hotspot) จากดาวเทียม VIIRS (<https://firms.modaps.eosdis.nasa.gov/map/>) ในช่วง ในช่วงเวลาเดียวกัน ข้อมูลมาที่ได้นำมาผ่านกระบวนการสกัด แปลง และโหลด (Extract, Transform and Load) ด้วยการหาค่าเฉลี่ยทุกๆ 15 นาที ซึ่งพบว่าเป็นค่าเฉลี่ยที่เหมาะสมสำหรับการวิเคราะห์ [37] ขั้นตอนการสกัด แปลง และโหลด ข้อมูลดำเนินการด้วย Pentaho Data Integration (PDI) (รูปที่ 83)



รูปที่ 83 ขั้นตอนการสกัด แปลง และโหลดข้อมูลด้วย Pentaho (PDI)

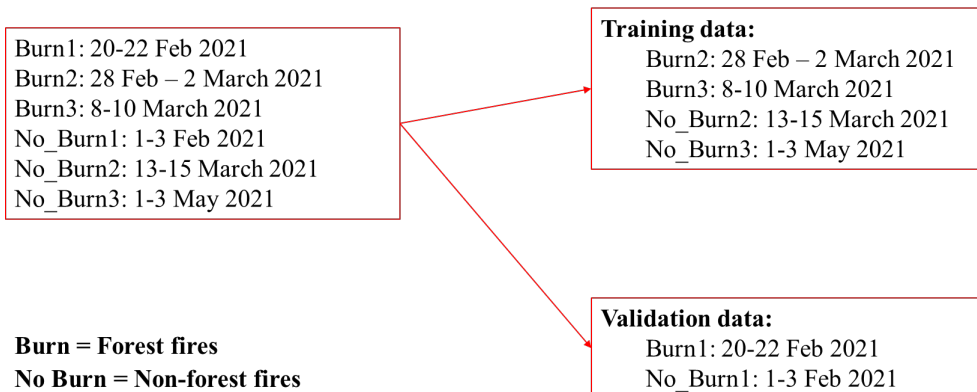
ข้อมูลที่แปลงแล้วจะนำมาแสดงผลด้วย Microsoft Power BI เพื่อพิจารณาการกระจายของจุดความร้อน การเปลี่ยนแปลงตามเวลา และการกระจายเชิงพื้นที่ เพื่อระบุช่วงเวลาของการเกิดไฟป่าและช่วงเวลาที่ไม่เกิดไฟป่า (รูปที่ 84)



รูปที่ 84 การเปลี่ยนแปลงเชิงเวลาของ PM_{2.5} CO และจุดความร้อน (a) และการกระจายเชิงพื้นที่ของจุดความร้อนและข้อมูลการสำรวจไฟป่าภาคพื้นดิน (b)

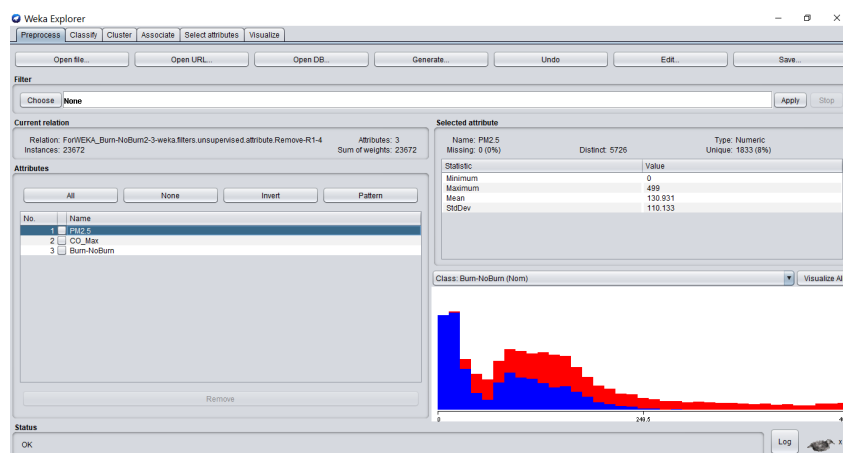
ในการวิเคราะห์ที่ได้ดำเนินการพิจารณากำหนดช่วง **Burn (ช่วงที่เกิดไฟป่า)** และ **No Burn (ช่วงที่ไม่เกิดไฟป่า)** จากข้อมูลที่รวบรวมระหว่างวันที่ 1 มกราคม พ.ศ. 2564 ถึง 31 พฤษภาคม พ.ศ. 2564 ทั้งนี้จากการสำรวจและพิจารณาข้อมูล PM_{2.5} CO_Max, ข้อมูลไฟป่าจากการสำรวจภาคพื้นดิน และข้อมูลจุดความร้อน (Hotspot) ด้วย power BI ได้จำแนกข้อมูลออกเป็นช่วงที่เกิดไฟป่า 3 ช่วงเวลา และช่วงที่ไม่เกิดไฟป่า 3 ช่วงเวลา โดยเฉพาะช่วงที่เกิดไฟป่า จะถูกระบุเมื่อพบ PM_{2.5} CO_Max และ

Hotspot และยืนยันด้วยข้อมูลสำรวจภาคพื้นดิน สำหรับช่วงที่ไม่เกิดไฟป่า ส่วนใหญ่จะเป็นช่วงเวลาที่มีค่าต่ำ และ Hotspot ในพื้นที่ มีค่าต่ำ นอกจากนี้ในการระบุช่วงเวลาได้ดำเนินการยืนยันอีกครั้งด้วยการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่าง $PM_{2.5}$ และ CO_Max โดยใช้โปรแกรม R หลังจากนั้นจึงได้ดำเนินการวิเคราะห์ข้อมูลในขั้นตอนต่อไปด้วย โปรแกรม WEKA เพื่อค้นหารูปแบบในการตรวจจับไฟป่า ในการศึกษาครั้งนี้ ได้ใช้ Tree Model Classification (J48) ใน WEKA และกำหนด MinNum Object ที่ 100 ทั้งนี้ข้อมูลที่นำมาวิเคราะห์แบ่งเป็น 2 ชุด ที่ประกอบด้วยข้อมูลช่วงที่เกิดไฟป่าและข้อมูลช่วงที่ไม่เกิดไฟป่า เท่าๆ กัน คือ Training Set จะเป็นช่วงเวลาของ Burn 2-3 และ No Burn 2-3 และ Vastation Set จะเป็นช่วงเวลาของ Burn 1 และ No Burn 1 ดังแสดงใน รูปที่ 85



รูปที่ 85 Training Set และ Validation Set พร้อมรายละเอียดของ Burn (ช่วงที่เกิดไฟป่า) และ No Burn (ช่วงที่ไม่เกิดไฟป่า)

ตัวอย่างของการวิเคราะห์ WEKA อยู่ใน รูปที่ 86 โดยข้อมูลจะนำเข้าสู่โปรแกรมเพื่อสร้างแบบจำลอง Tree Model Classification สำหรับตรวจจับไฟป่าในพื้นที่



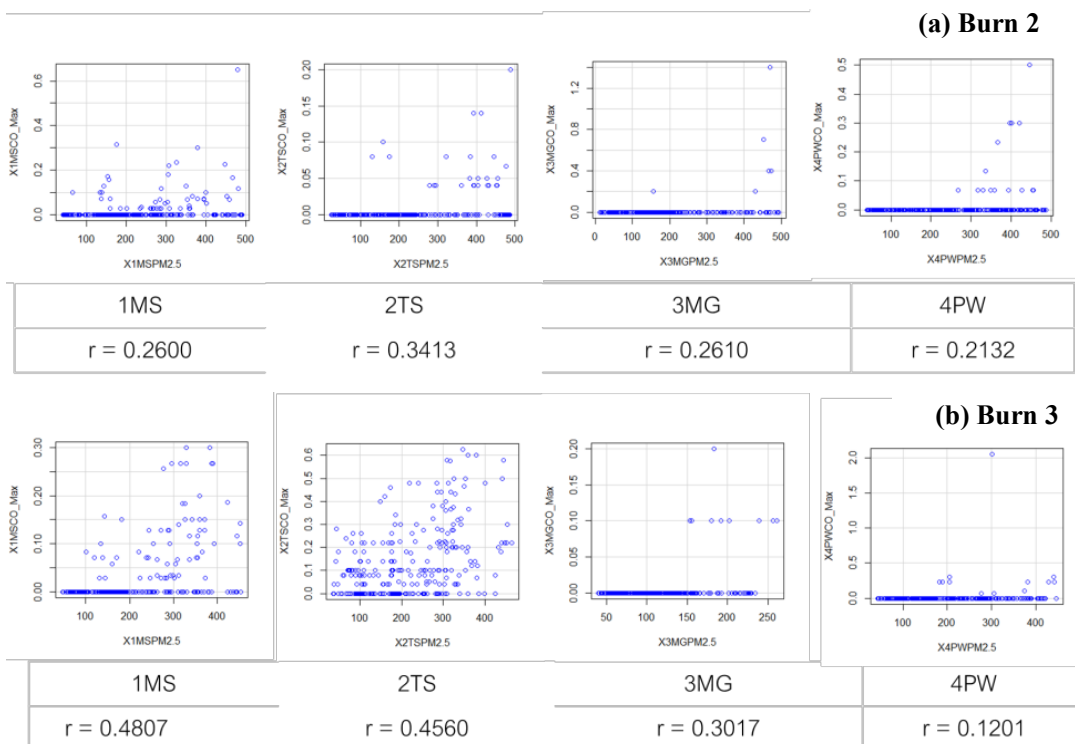
รูปที่ 86 การวิเคราะห์ข้อมูลโดยใช้ WEKA

ผลการทดลองและวิจารณ์ผล

ก) การระบุช่วงที่เกิดไฟป่า (Burn) และช่วงที่ไม่เกิดไฟป่า (No Burn)

ดังที่ได้กล่าวไว้ก่อนหน้านี้ ช่วงเวลาไฟป่าถูกระบุจากค่า PM2.5 CO_Max และ Hotspot จากนั้น ยืนยันข้อมูลตรวจวัดภาคพื้นดิน และค่าสหสัมพันธ์ระหว่าง PM2.5 และ CO_Max ระหว่าง Burn 2 และ Burn 3 (Training Set) พบว่ามีค่าสหสัมพันธ์อย่างมีนัยสำคัญสำหรับโซน: 1MS 2TS 3MG และ 4PW (รูปที่ 87) ในขณะที่โซนอื่นๆ เช่น 5MZ 7MW และ 8PP ไม่มีการตรวจพบ CO ที่อาจ เนื่องจาก โหนดเซ็นเซอร์ที่ใช้งานในโซนเหล่านั้นน้อยนอกจากนี้พบว่า แม้ว่าโซน 6MT สามารถ ตรวจจับ CO ได้ แต่อย่างไรก็ตาม เนื่องจาก 6MT เป็นพื้นที่เขตเมืองที่อาจได้รับอิทธิพลจากกิจกรรมการ ปลดปล่อยมลพิษอื่นๆ ดังนั้น ค่าสหสัมพันธ์ของ PM2.5 และ CO_Max ในโซน 6MT จึงเป็นความสัมพันธ์ เชิงลบ ซึ่งในอนาคตจำเป็นต้องวิเคราะห์เพิ่มเติม

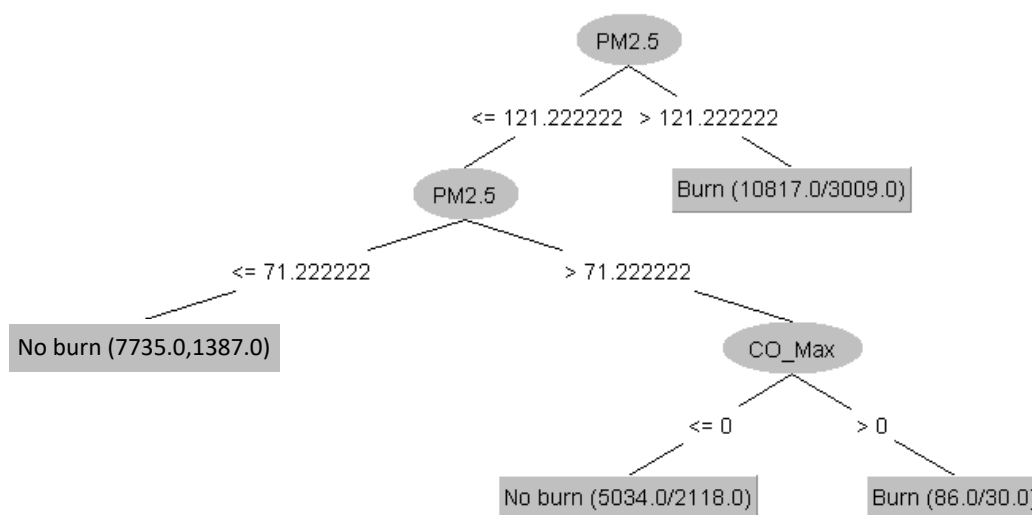
โดยสรุปพบว่าค่าสหสัมพันธ์ของ PM2.5 และ CO_Max ในบริเวณที่มีโหนดเซ็นเซอร์หนาแน่นแสดง ความสัมพันธ์ที่มีนัยสำคัญในช่วงการเกิดไฟป่า การค้นพบครั้งนี้สอดคล้องกับงานที่ทำในเมืองซีแอตเทิล สหรัฐอเมริกา (Lainig et al., 2017) ที่พบว่าค่าสหสัมพันธ์ของ PM2.5 และ CO ในช่วงที่เกิดไฟ ป่าอยู่ที่ 0.4336 - 0.7517



รูปที่ 87 ค่าสหสัมพันธ์ของ PM2.5 และ CO_Max ระหว่าง Burn 2 (a) และ Burn 3 (b)

ข) การตรวจจับไฟฟ้า

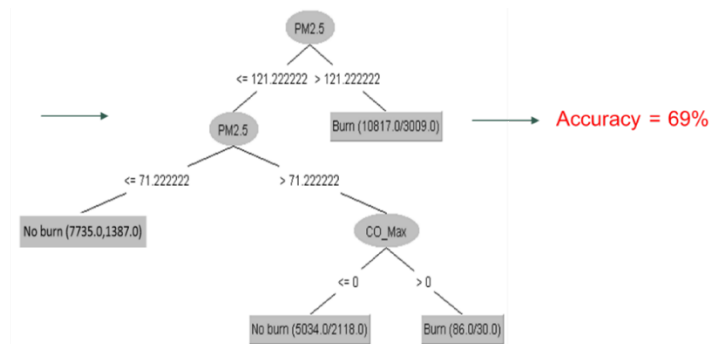
แบบจำลองการตรวจจับไฟฟ้าแสดงดังรูปที่ 88 พร้อมรายละเอียดข้อมูล Training Set (Burn 2-3 และ No Burn 2-3) แบบจำลอง Tree Model Classification สามารถใช้ตรวจสอบการเกิดไฟฟ้าในพื้นที่ศึกษาของจังหวัดตาก ได้ วิธีการแปลผลแบบจำลองสามารถดำเนินการได้ ดังตัวอย่าง เช่น หาก PM2.5 สูงกว่า 121.22 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ สถานการณ์จะถูกระบุเป็น Burn (เกิดไฟฟ้า) จากทั้งหมด 10,817 กรณี ทำนายผิด 3,009 กรณี ที่เหลือ (7,808) ทำนายถูก หาก PM2.5 อยู่ระหว่าง 71.22 ถึง 121.22 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ การทำนายสามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ หาก CO_Max สูงกว่า 0 ppm จะคาดการณ์เป็น Burn (ผิด 30 กรณี จากทั้งหมด 86 กรณี) และหาก CO_Max เท่ากับ 0 ppm จะคาดการณ์ว่า No Burn (ผิด 2,118 กรณี จากทั้งหมด 5,034 กรณี) สุดท้าย หาก PM2.5 ต่ำกว่า 71.22 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ จะคาดการณ์ว่าไม่เกิดไฟฟ้า (ผิด 1,387 กรณี จากทั้งหมด 7,735 กรณี)



รูปที่ 88 แบบจำลอง Tree Model Classification สำหรับการตรวจจับไฟฟ้า

สำหรับประสิทธิภาพของการคาดการณ์ด้วย Tree Model Classification พบว่า Accuracy ในการคาดการณ์ เท่ากับ 72% ในขณะที่ Precision และ Recall อยู่ที่ 72% และ 69% ตามลำดับ ทั้งนี้ Precision คือ ร้อยละของการคาดการณ์ที่ถูกต้อง (การเผาไหม้ที่คาดการณ์และที่เกิดขึ้นจริง) ต่อการเผาไหม้ที่คาดการณ์ไว้ทั้งหมด ในขณะที่ Recall คำนวณ ร้อยละของการคาดการณ์ที่ถูกต้อง (การเผาไหม้ที่คาดการณ์และที่เกิดขึ้นจริง) ต่อการเผาไหม้ที่เกิดขึ้นจริงทั้งหมด แบบจำลองที่ได้ตาม รูปที่ 88 ถูกนำไปใช้ทดสอบกับข้อมูล Validating Set (Burn 1 และ No Burn 1) (รูปที่ 89) พบว่าผลการตรวจไฟฟ้ามี Accuracy เท่ากับ 69%

Validation data:
 Burn1: 20-22 Feb 2021
 No_Burn1: 1-3 Feb 2021



รูปที่ 89 การทดสอบแบบจำลองสำหรับตรวจจับไฟป่าด้วย Validating Set

สรุปผล

ในการศึกษาครั้งนี้ได้ใช้เทคนิคการวิเคราะห์ข้อมูลหลายวิธี เช่น การแปลงข้อมูล การแสดงผล และการวิเคราะห์สหสัมพันธ์และการวิเคราะห์เหมือนข้อมูล เพื่อค้นหาความสัมพันธ์ระหว่าง PM_{2.5} และ CO_Max และสร้างแบบจำลองสำหรับการตรวจจับไฟป่า การใช้เหมือนข้อมูล WEKA กับ Training Set (Burn 2-3 และ No Burn 2-3) พบว่าแบบจำลอง Tree Model Classification ที่ได้มีความแม่นยำ (Accuracy) ในการคาดการณ์ เท่ากับ 72% สำหรับการตรวจจับไฟป่า (Burn และ No Burn) จากนั้นเมื่อทดสอบแบบจำลองด้วย Validating Set (Burn 1 และ No Burn 1) พบว่า แบบจำลองมีความแม่นยำในการทำนายอยู่ที่ 69% นอกจากนี้ยังตั้งข้อสังเกตได้ว่าขณะที่ความแม่นยำในการคาดการณ์เท่ากับ 72% อีก 28% เป็นการคาดการณ์ที่ผิดพลาด ดังนั้นการวิเคราะห์ต่อไปควรเพิ่มเติมนการประเมินผลลัพธ์ที่คาดการณ์ผิดพลาดนี้ด้วย เพื่อให้เกิดความเข้าใจที่เพิ่มขึ้นถึงปัจจัยที่มีอิทธิพลและรูปแบบของการคาดการณ์ที่ผิดพลาด เพื่อนำไปสู่การปรับปรุงความแม่นยำของแบบจำลองในอนาคต

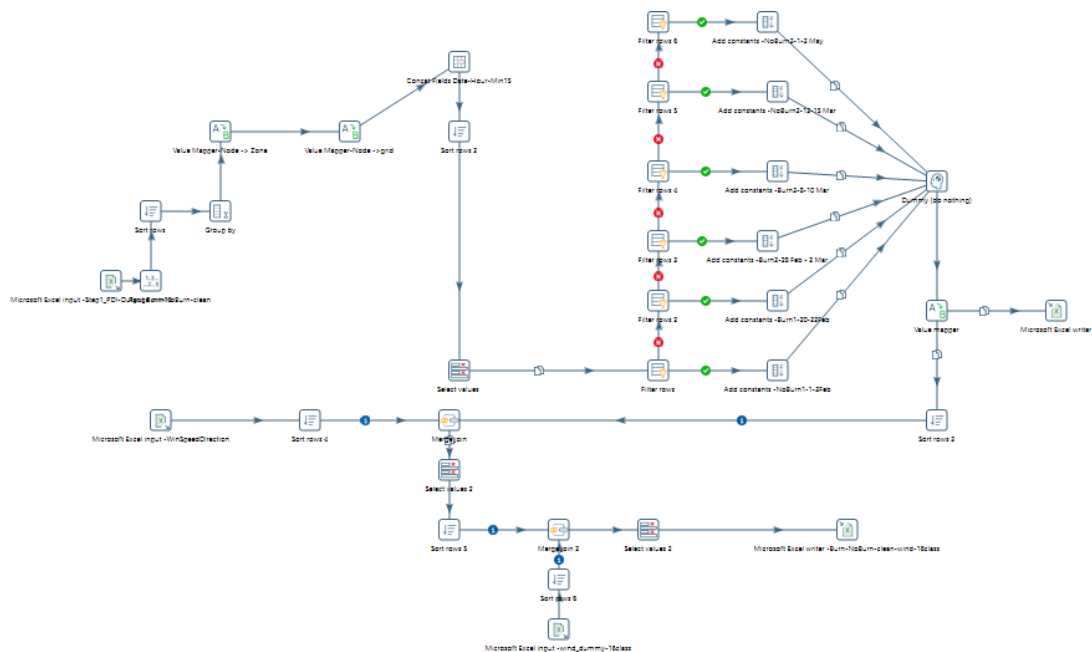
4.5.2 การวิเคราะห์การเคลื่อนที่ของกลุ่มควัน PM2.5 จากไฟป่า

จากการค้นคว้าพบว่างานวิจัยอื่นๆ ได้มีการประยุกต์ใช้การตรวจวัดและคาดการณ์คุณภาพอากาศด้วย IoT ในหลากหลายกรณี เช่น การคาดการณ์ PM2.5 ด้วยวิธี Exponential Smoothing ในได้หวัน [38] การพัฒนาระบบคาดการณ์ด้วยการรวม WRF-SMOKE-CMAQ การสำรวจระยะไกล และเซ็นเซอร์ต้นทุนต่ำในเวียดนาม [39] การใช้การเรียนรู้เชิงลึกแบบผสมผสานของ CNN-LSTM สำหรับการคาดการณ์ PM2.5 [40] และการคาดการณ์แบบผสมผสานโดยใช้อัลกอริธึมการเรียนรู้ของเครื่องที่หลากหลายสำหรับการคาดการณ์ PM2.5 [41]

การคาดการณ์การเคลื่อนที่กลุ่มควัน PM2.5 และความเข้มข้นของ PM2.5 จากโซนหนึ่งไปยังโซนอื่นๆ เมื่อตรวจพบไฟป่าในโซนโดยรอบเป็นสิ่งจำเป็นเพื่อให้สามารถลดผลกระทบที่เกิดขึ้นได้อย่างทันท่วงที ในการวิเคราะห์ครั้งนี้ข้อมูลความเร็วลม (Wind Speed; WS) และ ทิศทางลม (Wind Direction; WD) ถูกนำมาวิเคราะห์เพิ่มเติม ร่วมกับข้อมูลความเข้มข้นของ PM2.5 ในเวลาก่อนหน้าของแต่ละโซน แสดงด้วย Lag1, Lag2, Lag3 และ Lag4 สำหรับความเข้มข้นของเวลาก่อนหน้าที่ 15 30 45 และ 60 นาที ตามลำดับ และใช้เมทริกซ์สหสัมพันธ์และแบบจำลองการถดถอยสำหรับการทำนาย สำหรับโซนที่อยู่ใต้ลม

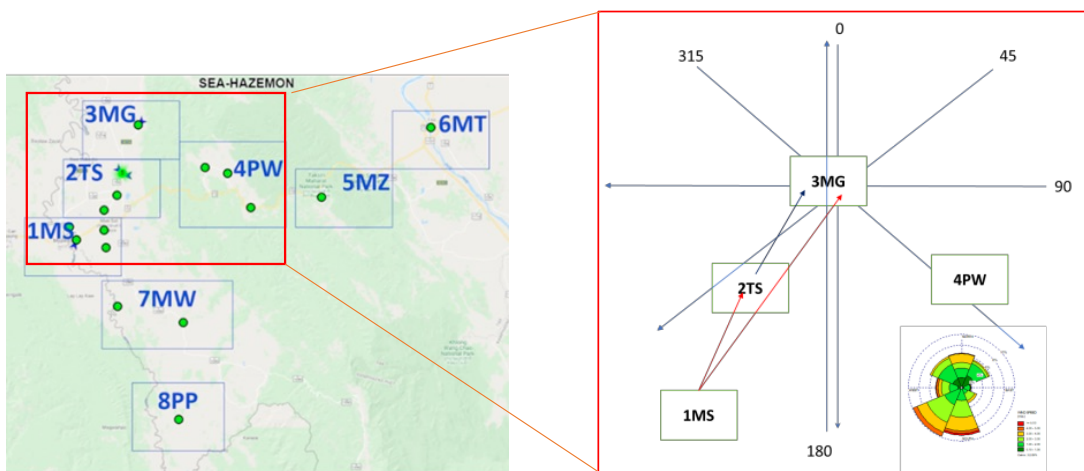
วิธีวิเคราะห์ข้อมูล

ข้อมูล PM2.5 ถูกรวบรวมจากโหนดทั้งหมด ในจังหวัดตาก ตั้งแต่วันที่ 1 มกราคม พ.ศ.2564 – 31 พฤษภาคม พ.ศ. 2564 นอกจากนี้ ยังรวบรวมข้อมูล WS และ WD จากโหนดเซ็นเซอร์ TH-Tak-W001-Weather ที่บริเวณริมแม่น้ำเมย ในช่วงเวลาเดียวกัน ข้อมูลจะถูกจัดกลุ่มด้วยการหาค่าเฉลี่ย ทุกๆ 15 นาที การแปลงข้อมูลดำเนินการด้วย PDI โดยมีขั้นตอนต่างๆ ได้แก่ การจัดกลุ่มช่วงเวลาโซน การสร้างความเข้มข้นของ Lag และการรวมข้อมูลเข้ากับข้อมูล WS และ WD (รูปที่ 90) ทั้งนี้ WD ถูกจัดกลุ่มตามค่า WS และ WS จะถูกเลือกจากค่าสูงสุดในช่วงเวลา 15 นาที



รูปที่ 90 การแปลงข้อมูลและการรวมเข้ากับ WS และ WD ด้วย PDI

ในการวิเคราะห์การเคลื่อนที่ของกลุ่มควัน PM2.5 จะใช้เฉพาะข้อมูลในช่วงระยะเวลาที่เกิดไฟฟ้า (Burn) ได้แก่ Burn 1 (20 - 22 กุมภาพันธ์ พ.ศ.2564) Burn 2 (28 กุมภาพันธ์ - 2 มีนาคม พ.ศ. 2564) และ Burn 3 (8 - 10 มีนาคม พ.ศ.2564) สำหรับข้อมูลลม จะแบ่ง WD ออกเป็น 16 ส่วนตามทิศทางลมจากทิศเหนือ เช่น 0, 22.5, 45, ..., 360 องศา ดังที่ด้วยผังลม (Wind Rose) ใน รูปที่ 91 ซึ่งจะเห็นว่าลมหลักในช่วงการที่เกิดไฟป่ามาจากทิศใต้ (180 องศา) และทิศตะวันตกเฉียงใต้ (225 องศา) จากนั้นจึงใช้โซนใต้ลมที่แม่กาษา (3MG) เป็นโซนสำหรับการคาดการณ์ PM2.5 โดยมีไทยสามัคคี (2TS) และแม่สอด (1MS) เป็นโซนต้นลม การคาดการณ์ PM2.5 ดำเนินการโดยใช้แบบจำลองการถดถอยผ่านโปรแกรม R



รูปที่ 91 โซนที่เลือก (1MS 2TS 3MG และ 4PW) สำหรับคาดการณ์ความเข้มข้นของ PM2.5 เนื่องจากการเคลื่อนตัวของกลุ่มควันไฟฟ้า

ผลการทดลองและวิจารณ์ผล

ก) สหสัมพันธ์ของข้อมูล

จากการวิเคราะห์สหสัมพันธ์ระหว่างข้อมูล PM2.5 และความเข้มข้นที่เวลาก่อนหน้า (Lag1 Lag2 Lag3 และ Lag4) ในโซน 1MS 2TS 3MG และ 4PW ดังแสดงใน ตารางที่ 15 โดยข้อมูลที่ใช้ในการวิเคราะห์มาจากข้อมูลตามทิศทางลม WD ของลมใต้ (180 องศา) และลมตะวันตกเฉียงใต้ (225 องศา) โดยพบว่าค่าสหสัมพันธ์ทั้งหมดมีนัยสำคัญที่ $p < 0.01$

สหสัมพันธ์ของ PM2.5 ที่ 3MG มีค่าสูงที่สุดโดยตามค่า Lag ที่ใกล้ที่สุดของตัวเองและค่อยๆ ลดลงคือ 0.9997534 0.9990753 0.997895 และ 0.9962907 ตามลำดับสำหรับ Lag1 Lag2 Lag3 และ Lag4 ซึ่งหมายความว่าค่าในอดีตของตัวเอง (เนื่องจากความเข้มข้นในเวลาก่อนหน้า) เป็นปัจจัยสำคัญที่จะใช้สำหรับสร้างแบบจำลองเพื่อคาดการณ์ความเข้มข้น ความสัมพันธ์ที่สูงเป็นอันดับสองของ PM2.5 ที่ 3MG มาจาก 1MS (Lag1; 0.8369007 Lag2; 0.8375488 Lag3; 0.8392348 และ Lag4;

0.8417948) ตามมาด้วย 2TS (Lag1; 0.7967878 Lag2; 0.8014606 Lag3; 0.8065 และ Lag 4; 0.8115496) และ 4PW (Lag1; 0.6298189 Lag2; 0.6284125 Lag3; 0.627444 และ Lag4; 0.6347963) ตามลำดับ ผลที่ได้สามารถอธิบายได้จากลมที่พัดปกคลุมในทิศใต้และทิศตะวันตกเฉียงใต้ซึ่งพัดพาความเข้มข้นของ PM2.5 จากต้นลม (1MS และ 2TS) ไปยังใต้ลม (3MG) ค่า PM2.5 จาก 4PW ที่ส่งผลถึง 3MG มีค่าน้อย เนื่องจาก WS และ WD ในทิศตะวันออกและทิศตะวันออกเฉียงใต้มีปริมาณน้อย

ในช่วงการเกิดไฟป่าที่เลือก (Burn 1-3) พบว่าความเข้มข้นของเวลาก่อนหน้ามีความสัมพันธ์อย่างมากกับ PM2.5 ของโซนนั้นๆ ในทุกโซนที่เลือก: 1MS (Lag1; 0.9998076 Lag2; 0.9994215 Lag3; 0.9987388 และ Lag4 ; 0.997855) 2TS (Lag1; 0.9997415 Lag2; 0.9989827 Lag3; 0.9977942 และ Lag4; 0.9961469) 3MG (Lag1; 0.9997534 Lag2; 0.9990753 Lag3; 0.997895 และ Lag4; 0.9962907) และ 4PW (Lag1; 0.99909 Lag2; 0.9976017 Lag3; 0.9951643 และ Lag4; 0.9930404)

ข) การคาดการณ์ PM2.5 ที่ 15 นาทีถัดไป (Next 15 minutes PM2.5 prediction)

การคาดการณ์ PM2.5 ที่ 15 นาทีถัดไปวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองการถดถอยโดยใช้ข้อมูล PM2.5 ตาม WD ของทิศใต้ (180 องศา) และทิศตะวันตกเฉียงใต้ (225 องศา) โดยผลการวิเคราะห์แสดงได้ดังนี้

$$3MGPM2.5 = 0.984575*3MGPM2.5lag1 + 0.008932*2TSPM2.5lag4,$$

(R2 = 0.9998; Residual standard error = 1.680)

$$2TSPM2.5 = 0.9957352*2TSPM2.5lag1$$

(R2 = 0.9998; Residual standard error = 1.957)

$$4PWPM2.5 = 0.994822*4PWPM2.5lag1$$

(R2 = 0.9995; Residual standard error = 3.395)

แบบจำลองการถดถอยสามารถอธิบายได้ว่าความเข้มข้นของ PM2.5 ในเวลา 15 นาทีก่อนหน้า ส่งผลเป็นอย่างมากสำหรับค่า PM2.5 ใน 15 นาทีถัดไป (Lag1) ของโซนนั้นๆ และเมื่อความเร็วลมเพิ่มขึ้นความเข้มข้นของ PM2.5 ในเวลาก่อนหน้า ที่โซนต้นลมจะส่งผลต่อเวลาถัดไปของโซนใต้ลม ดังเช่นกรณีของ 3MG ที่ได้รับอิทธิพลจาก 2TS

สรุปผล

การคาดการณ์ PM2.5 ที่เวลา 15 นาทีถัดที่โซนใต้ลม ได้แก่ 3MG 2TS และ 4PW ถูกสร้างขึ้นโดยใช้การวิเคราะห์การถดถอย ปัจจัยหลักในการทำนาย PM2.5 มาจากความเข้มข้นของค่า Lag1 ของโซนนั้นๆ ที่อธิบายแบบจำลองได้มากกว่า 90% ($R^2 > 0.9$) มีเพียงส่วนน้อยในการคาดการณ์ PM2.5 ที่มาจาก Lag อื่นๆ เช่น ที่ 3MG พบว่า ความเข้มข้นของ PM2.5 ส่วนน้อยมาจาก Lag4 ของ 2TS สำหรับการวิเคราะห์เพิ่มเติม ควรวิเคราะห์ข้อมูลตามทิศทางหลักอื่นๆ เช่น ตะวันตกเฉียงเหนือ เหนือ และตะวันออกเฉียงเหนือ เพื่อสร้างแบบจำลองการถดถอยสำหรับโซนใต้ลมที่เกี่ยวข้อง นอกจากนี้พบว่ากระบวนการวิเคราะห์และแบบจำลองการถดถอยที่ได้รับควรนำไปใช้ประยุกต์ในโหมดคอมพิวเตอร์ในพื้นที่ศึกษาเพื่อยืนยันและบันทึกความถูกต้องของแบบจำลอง เพื่อการปรับปรุงศักยภาพในการคาดการณ์ในอนาคต

4.5.3 การทดสอบโมเดลตรวจจับไฟฟ้า

ในการทดลองนี้มีเป้าหมายในการทดสอบความแม่นยำ (Accuracy) ของโมเดลตรวจจับไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้น โดยใช้พื้นที่ดอยช้างป่าแม่ จังหวัดลำพูน เป็นพื้นที่ทดสอบ โดยได้นำโมเดลตรวจจับไฟฟ้าจากพื้นที่จังหวัดตากมาใช้ โดยได้ทำการเปรียบเทียบกับข้อมูลจุดความร้อน (Hotspot) ที่ได้จากแพลตฟอร์ม FIRMS [42] ที่พัฒนาโดย NASA ที่แสดงจุดพิกัดความร้อนแบบรายวัน ประกอบกับรายงานบันทึกไฟฟ้า ที่ได้รับการอนุเคราะห์จาก สถานีไฟฟ้าบ้านโฮ้ง จังหวัดลำพูน และ สถานีไฟฟ้าจอมทอง จังหวัดเชียงใหม่ ดังแสดงใน รูปที่ 92 เป็นตัวอย่างรายงานตำแหน่งเกิดไฟฟ้า จากสถานีควบคุมไฟฟ้าบ้านโฮ้ง โดยระบุพิกัด GPS และเวลาที่ตรวจพบเจอไฟฟ้า ส่วนภาพด้านซ้ายแสดงแพลตฟอร์ม FIRMS ที่ให้บริการข้อมูลตำแหน่งจุดความร้อน โดยโมเดลตรวจจับไฟฟ้าได้ถูกโปรแกรมไว้ที่ระบบแจ้งเตือนภัยบนคลาวด์ของ แพลตฟอร์ม LoRaIoT ไว้แล้ว เมื่อค่าที่อ่านได้จากเซ็นเซอร์ มีค่าเกินกว่าค่ามาตรฐานก็จะทำการแจ้งเตือนไปที่ ไลน์กลุ่มของเจ้าหน้าที่ไฟฟ้าและอาสาสมัครที่เกี่ยวข้อง

Reference Data Sources

Fire reports and Hotspot Data

Acknowledgment: Sincerely Thanks to Dr. Veerachai Tanpiat, Ban Hong, and Jomthong Forest Fire Station

interERLab

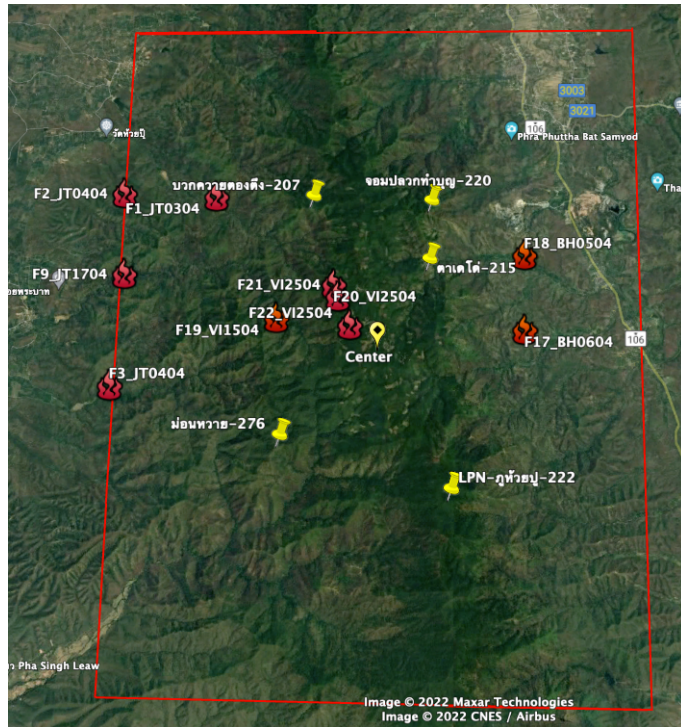
13

AIT

Source: <https://firms.modaps.eosdis.nasa.gov/download/>

รูปที่ 92 แสดงตัวอย่างรายงานไฟป่าจากสถานีควบคุมไฟป่าบ้านโฮ้ง และ ข้อมูลจุดความร้อนจาก NASA

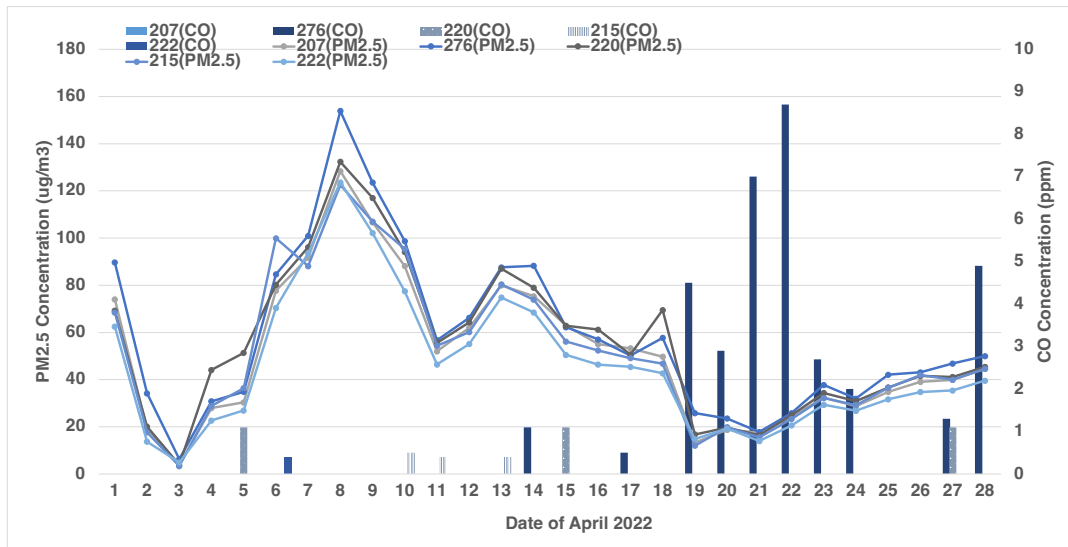
โดยการทดลองนี้ ได้ทำการทดสอบกับเซ็นเซอร์ 5 ตัว ที่ติดตั้งอยู่ในบริเวณดอยช้างป่าแป๋ ดังแสดงใน รูปที่ 93 โดยสัญลักษณ์พินสีเหลืองคือ ตำแหน่งของโหนด เซ็นเซอร์ ทั้ง 5 จุด ได้แก่ บวกควายตองตึง-207, จอมปลวกทำบุญ-220, ตาเดโต้-215, ม่อนหวาย-276 และ ภูห้วยปุ-222 ส่วนสัญลักษณ์ไฟสีแดงคือ ตำแหน่งจุดความร้อน (hotspot) และ พิกัดไฟป่าที่ตรวจพบโดยเจ้าหน้าที่ โดยพิกัดไฟป่าจะถูกกำหนดให้อยู่ในพื้นที่ทำการของเซ็นเซอร์ โดยกำหนดเป็นระยะ 5 กิโลเมตร จากโหนดที่อยู่ปลายขอบของแต่ละทิศ ในการวิเคราะห์ ได้กำหนดระยะเวลา ไว้ในช่วง วันที่ 1-28 เมษายน 2565 ซึ่งเป็นช่วงที่เกิด ไฟป่าสูงสุดของปี ซึ่งพบว่า มีรายงานการเกิดไฟป่าทั้งสิ้น 10 เหตุการณ์



รูปที่ 93 แสดงตำแหน่งเซ็นเซอร์ตรวจจับไฟป่า บริเวณดอยช้างป่าแป๋, ตำแหน่งจุดความร้อน (Hotspot) และ พิกัดไฟป่าที่ตรวจพบโดยเจ้าหน้าที่

ความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าฝุ่นละออง PM2.5 และ คาร์บอนมอนนอกไซด์ (CO)

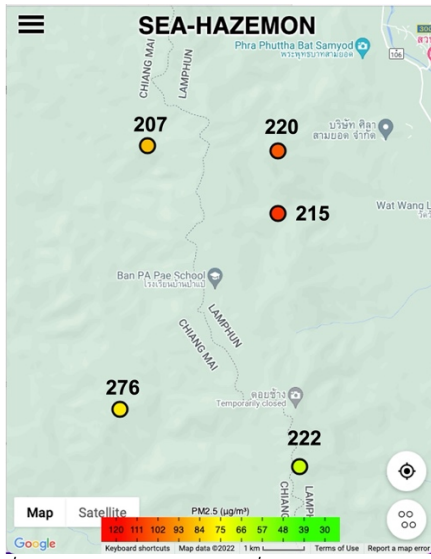
ค่าความเข้มข้นของฝุ่น PM2.5 และ ความเข้มข้น CO เป็นตัวแปรสำคัญในโมเดลตรวจจับไฟป่า ในหัวข้อนี้จึงทำการวิเคราะห์เปรียบเทียบความเข้มข้นเฉลี่ยรายวัน ของ PM2.5 และ ค่าความเข้มข้นสูงสุดของ CO มาเปรียบเทียบแบบอนุกรมรายวัน (Time Series plot) รูปที่ 94 แสดง ค่าเฉลี่ยรายวันของ PM2.5 ที่ตรวจวัดได้จากเซ็นเซอร์แต่ละตัว (แกน Y ด้านซ้าย) และ ค่าสูงสุดรายวันของ CO (แกน Y ด้านขวา) จากกราฟพบว่าค่าเฉลี่ยของ PM2.5 มีความผันแปรตลอดทั้งเดือน เมษายน โดยพบว่ามีจุดสูงสุดอยู่ที่ วันที่ 8 เมษายน ซึ่งมีค่าสูงถึง 153.9 ไมโครกรัม/ลบ.ม. และ มีค่าต่ำสุดต่ำกว่า 5 ไมโครกรัม/ลบ.ม. ในวันที่ 3 เมษายน สำหรับค่า CO นั้นมีค่าเบาบาง มีเพียงเซ็นเซอร์บางโหนดเท่านั้นที่ตรวจวัดได้ โดยค่าสูงสุดที่ตรวจจับได้ คือ 8.7 ppm ซึ่งพบในวันที่ 22 เมษายน แต่ค่าเฉลี่ย PM2.5 วัดได้เพียง 20 ไมโครกรัม/ลบ.ม. เท่านั้น



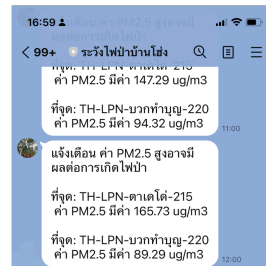
รูปที่ 94 ค่าเฉลี่ย PM2.5 รายวัน เปรียบเทียบกับค่าสูงสุดของ CO ที่ตรวจวัดได้จาก CO เซ็นเซอร์

การวิเคราะห์เหตุการณ์การแจ้งเตือนไฟฟ้า

ค่า PM2.5 และ CO จากอุปกรณ์เซ็นเซอร์จะถูกส่งมายัง ระบบคลาวด์แบบเรียลไทม์ ในทุกๆ 2 นาที ซึ่งจะต้องนำมาหาเฉลี่ยในระยะเวลา 15 นาที เมื่อตรวจพบเหตุการณ์ไฟฟ้า ระบบแจ้งเตือนจะส่งข้อความไปยังเจ้าหน้าที่แลอสาสมัครผ่านโปรแกรมไลน์และเทเลแกรม โดยมีเหตุการณ์สำคัญเกิดขึ้นในวันที่ 5 เมษายน ระบบได้ทำการแจ้งเตือนไปยังเจ้าหน้าที่ว่าตรวจจับไฟฟ้าได้ในบริเวณใกล้เคียง กับพิกัด ตาเดโต-215 และ จอมปลวกทำบุญ-220 หลังจากนั้นจึงเข้าทำการระงับไฟฟ้า ก่อนที่จะลุกลามเป็นวงกว้าง ได้ทันท่วงที รูปที่ 95 แสดงตำแหน่งเซ็นเซอร์ที่ตรวจจับไฟฟ้าได้บนเว็บแอปพลิเคชัน หลังจากนั้นจึงมีข้อความแจ้งเตือนถูกส่งไปยังเจ้าหน้าที่เพื่อทำการดับไฟฟ้างดังแสดงในรูปที่ 96 หลังจากการเข้าตรวจสอบของเจ้าหน้าที่พบว่ามีการเกิดอยู่ห่างจากจุดเซ็นเซอร์ 220 ประมาณ 3 กิโลเมตร



รูปที่ 95 แสดงพิกัดโหนดที่ตรวจจับไฟป่าได้ใน วันที่ 5 เมษายน 2565



รูปที่ 96 ข้อความแจ้งเตือนถูกส่งไปยังเจ้าหน้าที่ดับไฟป่า

จากช่วงระยะทดลอง 1-28 เมษายน 2565 พบว่าระบบเซ็นเซอร์สามารถตรวจจับไฟป่าได้ทั้งหมด 871 เหตุการณ์ จากเซ็นเซอร์ทั้งหมด 5 ตัว เนื่องจากช่วงเวลาในการตรวจจับไฟป่าจะกระทำทุกๆ 15 นาที ดังนั้นเมื่อเซ็นเซอร์ตรวจจับไฟป่าได้ตัวพร้อมกันในช่วงเวลาเดียวกันจะนับเหตุการณ์เพียงแค่ 1 เหตุการณ์ไฟป่าที่ตรวจจับได้ จึงลดลงเหลือ 367 เหตุการณ์ โดยเมื่อทดสอบกับข้อมูลอ้างอิง (Ground Truth) จาก พิกัด Hotspot และ รายงานไฟป่าแล้วพบว่า เหตุการณ์ที่ตรวจจับแบ่งเป็น True Positive 32 เหตุการณ์, False Positive 335 เหตุการณ์, False Negative 113 เหตุการณ์ และ True Negative 2303 เหตุการณ์ ดังแสดงใน ตารางที่ 6 ที่ได้เปรียบเทียบประสิทธิภาพของโมเดลตรวจจับไฟป่าด้วย Confusion Matrix

ตารางที่ 6 Confusion Matrix เปรียบประสิทธิภาพของโมเดลตรวจจับไฟป่า

Actual Event	Predicted Event	
	Detected Fire	Not Detected
Detected Fire	True Positive (32)	False Negative (113)
Not Detected	False Positive (335)	True Negative (2303)

ความแม่นยำของโมเดลสามารถวิเคราะห์ได้จาก ค่า Accuracy, Recall, Precision และ F1-Score ตามสมการดังต่อไปนี้

$$Recall = \frac{TP}{TP + FN}$$

$$Precision = \frac{TP}{TP + FP}$$

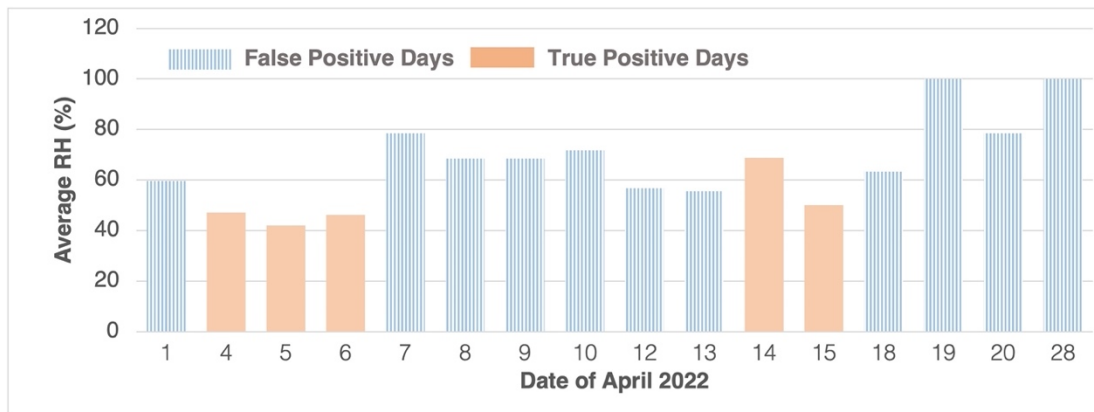
$$Accuracy = \frac{TP + TN}{TP + TN + FP + FN}$$

$$F1 - Score = 2 \times \frac{Precision \times Recall}{Precision + Recall}$$

โดยโมเดลมี ค่าความถูกต้องหรือ Accuracy สูงถึง 83.9% และ มี ค่า Recall, Precision และ F-1 Score เท่ากับ 8.71%, 22.07% และ 0.125 ตามลำดับ

ผลกระทบจากค่าความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศ

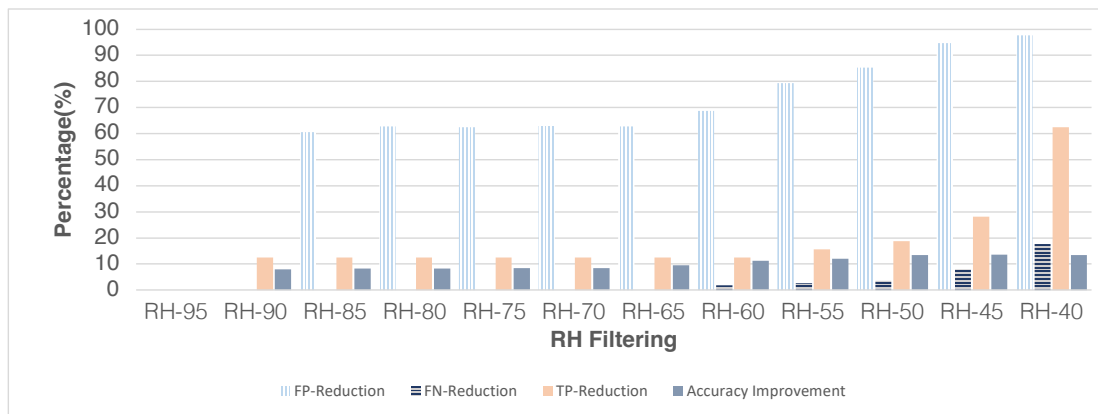
แม้ว่าค่าความถูกต้องของโมเดลตรวจจับไฟป่าจะสูงถึง 83.9% แต่ ค่า Recall และ Precision ยังอยู่ในเกณฑ์ที่ต่ำซึ่งพบว่ามีผลกระทบมาจากค่าความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศ เนื่องด้วยเซ็นเซอร์วัดฝุ่น PM นั้นใช้หลักการการกระเจิงของแสง (Light Scattering) [43] ในการคำนวณหาความเข้มข้น ซึ่งมีข้อจำกัดในสภาวะความชื้นสูง เนื่องจากไอน้ำที่เกาะอยู่ก็ทำให้เกิดการกระเจิงของแสงได้เช่นเดียวกับฝุ่น จึงทำให้ เกิดเหตุการณ์ False Positive ในอัตราที่สูงเพื่อที่จะวิเคราะห์ปรากฏการณ์นี้อย่างละเอียด ทางคณะวิจัยฯ ได้จัดกลุ่มเหตุการณ์ True Positive (TP) และ False Positive (FP) ในแต่ละวันโดยทำการเปรียบเทียบกับค่าความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ย ดังแสดงใน รูปที่ 97



รูปที่ 97 การเปรียบเทียบค่าความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ยรายวันเปรียบเทียบกับเหตุการณ์ False Positive และ True Positive

จากกราฟจะเห็นว่า ในวันที่เป็น False Positive ค่าเฉลี่ยความชื้นสัมพัทธ์มีค่าสูงเกินกว่า 55% ขณะที่วันที่เป็น True Positive จะมีค่าเฉลี่ยความชื้นสัมพัทธ์ต่ำกว่า 50% ยกเว้นวันที่ 14 เมษายน 2022 ที่ค่าเฉลี่ยความชื้นสัมพัทธ์มีค่าสูงเกินกว่า 68% ทั้งที่เป็นวันที่เป็น True Positive ซึ่งพบว่าผลการทดลองสอดคล้องกับงานวิจัยของ Hai-Ying และ คณะ [44] ที่พบว่าประสิทธิภาพของอุปกรณ์ low-cost เซ็นเซอร์ จะลดลงเมื่อ ค่าความชื้นสัมพัทธ์สูงเกินกว่า 80%

ทางคณะวิจัยฯ ได้ประยุกต์ใช้ ค่าเรซโซลต์ความชื้นสัมพัทธ์ (RHT) เพื่อกำจัดค่าผิดพลาดจากปัจจัยความชื้นสัมพัทธ์ออกก่อนที่จะทำการพยากรณ์ว่าจะเกิดเหตุการณ์ไฟป่าหรือไม่ โดยได้ปรับค่า RHT ตั้งแต่ 40-95% ดังแสดงใน รูปที่ 98 ซึ่งพบว่าโมเดลมีประสิทธิภาพมากขึ้น ดังจะเห็นได้จาก อัตราการลดลงของเหตุการณ์ False Positive (FP) ถึงมากกว่า 60% เมื่อค่า RHT ถูกตั้งไว้ที่ 85% และ ลดลงสูงสุดมากกว่า 97% เมื่อ RHT ถูกตั้งไว้ที่ 40% อย่างไรก็ตาม ค่า Accuracy มีค่าสูงขึ้นคงที่ อยู่ที่ประมาณ 10% ตั้งแต่ RHT ถูกตั้งไว้ที่ 90% จากผลการทดลองจึงสรุปได้ว่า ค่า RHT ที่เหมาะสมควรอยู่ในช่วง 75-85% เนื่องจากการลดลงของ False Positive (FP) อาจทำให้เหตุการณ์จริงถูกกำจัดออกไป



รูปที่ 98 เปรียบเทียบประสิทธิภาพของโมเดลตรวจจับไฟฟ้ากับ ค่าเพื่อที่จะเพิ่มประสิทธิภาพของโมเดลตรวจจับไฟฟ้ากับปัจจัยความชื้นสัมพัทธ์

ระบบแจ้งเตือนภัยไฟฟ้า

เพื่อเตือนภัยไฟฟ้าได้อย่างทันท่วงที ทางคณะวิจัยฯ ได้พัฒนาระบบแจ้งเตือนไฟฟ้าผ่านแอปพลิเคชันไลน์และ 텔레แกรม โดยเมื่อโมเดลตรวจจับไฟฟ้าที่ติดตั้งไว้ที่ระบบคลาวด์ พบว่ามีจุดเสี่ยงภัยที่อาจเกิดไฟฟ้างก็ทำการส่งข้อความแจ้งเตือนไปยังผู้ใช้งานผ่านแอปพลิเคชันไลน์ ซึ่งได้มีการตั้งกลุ่มไลน์ไว้เป็นกลุ่มตามพื้นที่ และได้เชิญผู้ใช้งานและหน่วยงานในท้องถิ่นที่เกี่ยวข้อง เช่น เจ้าหน้าที่ไฟฟ้า, อาสาสมัครชุมชน และ อบต. เป็นต้น เข้ามาในกลุ่ม โดยมีการแจ้งเตือนอยู่สองประเภท คือ 1) สถานการณ์ปกติ และ 2) สถานการณ์เสี่ยงเกิดไฟฟ้า โดยในสถานะปกติระบบจะส่งข้อมูลฝุ่นละออง PM2.5 เฉลี่ยรายชั่วโมง ในช่วงเวลา 7 และ 14 นาฬิกา ในทุกๆวัน และ ในสถานการณ์เสี่ยงเกิดไฟฟ้า ระบบจะส่งข้อความแจ้งเตือนทันทีเมื่อตรวจพบจุดเสี่ยงไฟฟ้า ทั้งนี้ข้อความแจ้งเตือนจะระบุพิกัดเซ็นเซอร์ พร้อมกับความเข้มข้นของปริมาณ PM2.5 และ ก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์ ทั้งนี้การแจ้งเตือนไฟฟ้าจากโมเดลจะต้องมีการตรวจสอบทานข้อมูลจากเจ้าหน้าที่ไฟฟ้าในท้องที่ก่อน โดยจะทำการตรวจสอบเทียบกับข้อมูลจุดความร้อนที่ได้รับจากดาวเทียม และรายงานสถานการณ์ในพื้นที่ นอกจากนี้ทางคณะวิจัยฯ จะคอยประสานงานด้านข้อมูลโดยตรวจสอบข้อมูลของหมอกควันจากระบบเซ็นเซอร์เพื่อดูข้อมูล 24 ชั่วโมงย้อนหลัง หลังจากตรวจสอบข้อมูลทุกส่วนแล้วเจ้าหน้าที่สถานีจะเป็นผู้ออกคำสั่งและจัดกำลังเพื่อสำรวจและออกปฏิบัติการดับไฟฟ้าต่อไป

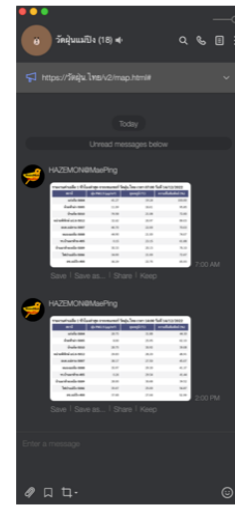
รายงานสถานะ ค่าฝุ่น ในพื้นที่ แม่ปิง

รายงานค่าเฉลี่ย 1 ชั่วโมงล่าสุด จากเซนเซอร์ วัดฝุ่น.ไทย เวลา 07:00 วันที่ 14/12/2022

สถานี	ฝุ่น PM2.5 (µg/m ³)	อุณหภูมิ (°C)	ความชื้นสัมพัทธ์ (%)
แก่งก้อ-5004	41.27	19.24	100.00
ห้วยฟ้าผ่า-5005	11.09	18.61	95.85
บ้านก้อ-5010	76.58	21.08	72.00
หน่วยพิทักษ์ มป.6-5012	32.42	20.97	89.03
อบต.แม่ลาน-5007	46.70	22.00	70.03
หนองมะลือ-5008	44.90	21.00	74.07
ร.บ้านผาด้าย-405	0.15	23.15	61.88
บ้านผาด้ายเหนือ-5009	30.33	20.13	76.10
ไฟฟ้าแม่ปิง-5006	34.00	21.00	72.67
อช.แม่ปิง-406	36.29	22.76	65.93

intERLab
Innovative Evaluation and Research Laboratory

7



AIT

รูปที่ 99 แสดงการแจ้งเตือนสถานการณ์มลพิษทางอากาศรายวันผ่านแอปพลิเคชันไลน์

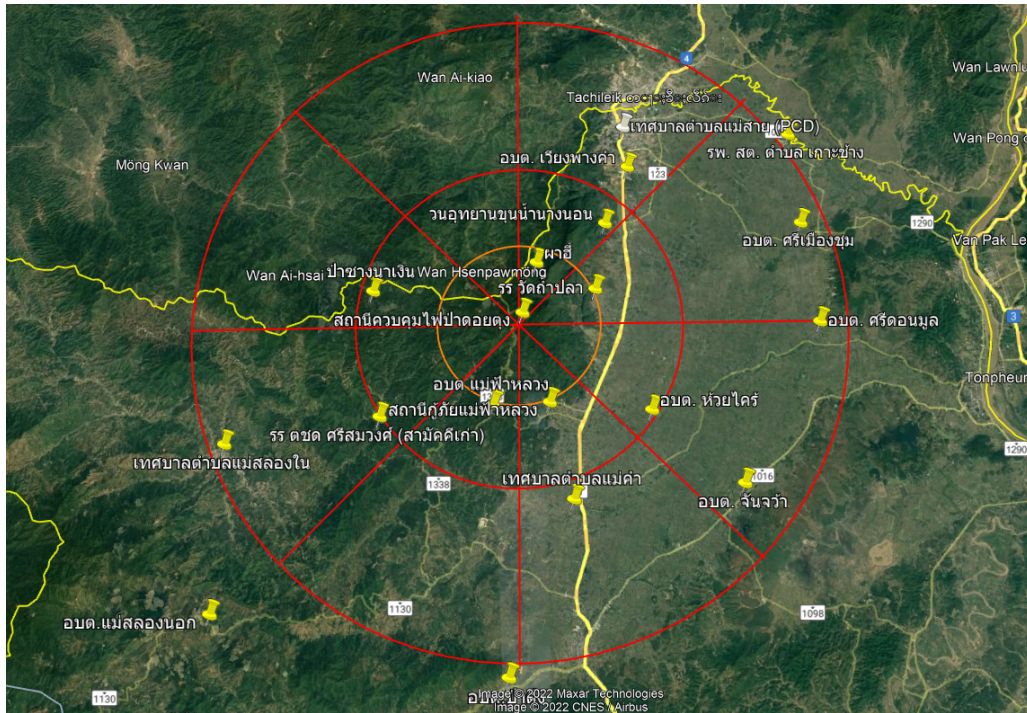
สรุปผล

โมเดลตรวจจับไฟฟ้าสามารถตรวจจับไฟฟ้าได้อย่างรวดเร็ว โดยสามารถส่งข้อความแจ้งเตือนไปยังส่วนควบคุมไฟฟ้าให้เข้าระบบเพลิงได้อย่างรวดเร็ว จากทดสอบเก็บข้อมูลในช่วงเดือน เมษายน 2565 พบว่า โมเดลมีค่า Accuracy ที่สูงมากกว่า 80% แต่มีค่า Precision และ Recall ค่อนข้างต่ำซึ่งพบเกิดจากปัจจัยด้านความชื้นในอากาศที่เซ็นเซอร์ไม่สามารถแยกแยะระหว่างอนุภาคฝุ่นกับไอน้ำได้ ทำให้เกิด False Positive ค่อนข้างมาก ซึ่งทางคณะวิจัยได้วิเคราะห์หาค่าเทรชโฮล (RHT) ที่เหมาะสมเพื่อที่จะปรับปรุงให้โมเดลมีประสิทธิภาพมากขึ้นต่อไป

4.5.4 การเคลื่อนที่ของกลุ่มควัน PM2.5 จากไฟฟ้าในพื้นที่ล้อมรอบด้วยภูเขาสูง

เนื่องจากการเคลื่อนที่ของกลุ่มควัน PM2.5 ในแต่ละพื้นที่ มีความแตกต่างกัน ดังนั้นด้วยลักษณะภูมิประเทศเฉพาะของพื้นที่จังหวัดเชียงราย ที่รายล้อมด้วยภูเขาสูง การเคลื่อนที่ของ PM2.5 จึงมีลักษณะเฉพาะ โดยเฉพาะการเคลื่อนที่ในแนวตั้งจากที่ราบสู่ยอดเขา หรือจากยอดเขาลงสู่ที่ราบ ดังนั้นในการวิเคราะห์จึงให้ความสำคัญไปที่การคาดการณ์การเคลื่อนที่กลุ่มควัน PM2.5 และความแตกต่างของความเข้มข้นของ PM2.5 ในแนวตั้ง ในการวิเคราะห์ครั้งนี้ได้ใช้ข้อมูลความเข้มข้นของ PM2.5 ในเวลาก่อนหน้าของแต่ละโซน แสดงด้วย Lag1, Lag2, Lag3 และ Lag4 สำหรับความเข้มข้นของเวลาก่อนหน้าที่ 15, 30, 45, และ 60 นาที ตามลำดับ และข้อมูลอื่นๆ ที่ตรวจวัดได้ ได้แก่ CO ความกดอากาศ (Pressure) และความชื้น (Humidity) อธิบายความสัมพันธ์และความแตกต่างที่เกิดขึ้นจากนั้นใช้เมทริกซ์สหสัมพันธ์สำหรับการทำนายอิทธิพลของโซนที่อยู่ในระดับความสูงที่แตกต่างกัน 2 ระดับ คือระดับสูง (High; มากกว่า 700 เมตร) และระดับพื้นราบ (Low; น้อยกว่า 700

เมตร) และ เมทริกซ์สหสัมพันธ์ของโซนต่างๆ ตามแนวราบ ข้อมูลโหนดเซ็นเซอร์ทั้งหมดในพื้นที่ จังหวัดเชียงรายแสดงดัง รูปที่ 100 โดยใช้ โหนดเซ็นเซอร์ ณ สถานีควบคุมไฟฟ้าดอยตุงเป็นศูนย์กลาง และจำแนกออกเป็น 16 โซน (ตารางที่ 7)



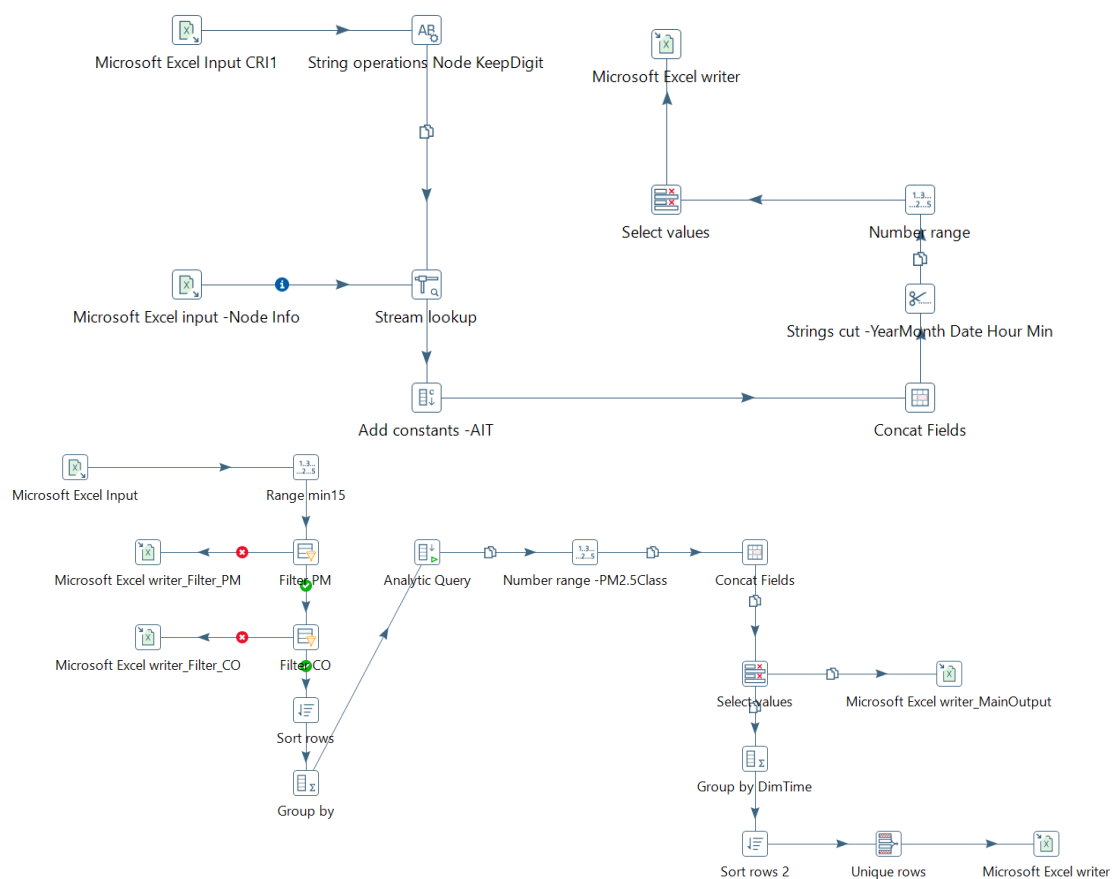
รูปที่ 100 พื้นที่ศึกษาจังหวัดเชียงราย ประเทศไทย

ตารางที่ 7 การจำแนกโซนตามกลุ่มรัศมีและทิศทางของโหนดเซ็นเซอร์

โซน	คำอธิบาย	โหนดเซ็นเซอร์
CRI-C	ศูนย์กลางพื้นที่	TH-CRI-ส.ควบคุมไฟฟ้าตอยตุง-111
CRI-E20	โซนทิศตะวันออกเฉียงใต้ออกภายในรัศมี 20 กิโลเมตร	TH-CRI-อบต.ศรีดอนมูล-166 TH-CRI-อบต.ศรีเมืองชุม-121
CRI-E5	โซนทิศตะวันออกเฉียงใต้ออกภายในรัศมี 5 กิโลเมตร	TH-CRI-รร.วัดถ้ำปลา-161
CRI-EX	โซนทิศตะวันออกเฉียงใต้ออกภายนอกรัศมี 20 กิโลเมตร	TH-CRI-ควบคุมไฟฟ้า เชียงแสน-163 TH-CRI-รักษาป่า ชร4 เชียงของ-162 TH-CRI-ศูนย์ฯไฟฟ้าเชียงราย-114 TH-CRI-ภูชี้ฟ้า-198
CRI-N5	โซนทิศเหนือภายในรัศมี 5 กิโลเมตร	TH-CRI-ผาฮี้-160
CRI-NE10	โซนทิศตะวันออกเฉียงเหนือภายในรัศมี 10 กิโลเมตร	Lab AIT164-ขุนน้ำนางนอน
CRI-NE20	โซนทิศตะวันออกเฉียงเหนือภายในรัศมี 20 กิโลเมตร	TH-CRI-รพสต.เกาะช้าง-122
CRI-NEU	โซนทิศตะวันออกเฉียงเหนือในพื้นที่เขตเมือง	TH-CRI-เทศบาลเวียงพางคำ-159
CRI-S10	โซนทิศใต้ภายในรัศมี 10 กิโลเมตร	TH-CRI-เทศบาลแม่คำ-167
CRI-S20	โซนทิศใต้ภายในรัศมี 20 กิโลเมตร	TH-CRI-อบต.ท่าสุด-172 TH-CRI-อบต.ป่าตึง-171
CRI-S5	โซนทิศใต้ภายในรัศมี 5 กิโลเมตร	Lab AIT112-อบต.แม่ฟ้าหลวง
CRI-SE10	โซนทิศตะวันออกเฉียงใต้ภายในรัศมี 10 กิโลเมตร	TH-CRI-อบต.ห้วยไคร้-124
CRI-SE20	โซนทิศตะวันออกเฉียงใต้ภายในรัศมี 20 กิโลเมตร	TH-CRI-อบต.จันจว้า-123
CRI-SW10	โซนทิศตะวันตกเฉียงใต้ภายในรัศมี 10 กิโลเมตร	TH-CRI-ตชด.ศรีสมวงศ์-113
CRI-SW20	โซนทิศตะวันตกเฉียงใต้ภายในรัศมี 20 กิโลเมตร	TH-CRI-อบต.แม่สลองนอก-170 TH-CRI-อบต.แม่สลองใน-128
CRI-W10	โซนทิศตะวันตกภายในรัศมี 10 กิโลเมตร	TH-CRI-รร.บ้านป่าขางนาเงิน-165

การวิเคราะห์ข้อมูล

ข้อมูล PM2.5, CO, Air Pressure และ Humidity ถูกรวบรวมจากโหนดทั้งหมดผ่านแพลตฟอร์ม Canarin ในจังหวัดเชียงราย ตั้งแต่วันที่ 1 ธันวาคม พ.ศ.2564 – 30 พฤษภาคม พ.ศ. 2565 ข้อมูลจะถูกจัดกลุ่มด้วยการหาค่าเฉลี่ย ทุกๆ 15 นาที การแปลงข้อมูลดำเนินการด้วย PDI โดยมีขั้นตอนต่างๆ ได้แก่ การทำความสะอาดข้อมูล (Data Cleaning) การจัดกลุ่มช่วงเวลา โหนด และการสร้างความเข้มข้นของ Lag (รูปที่ 101)



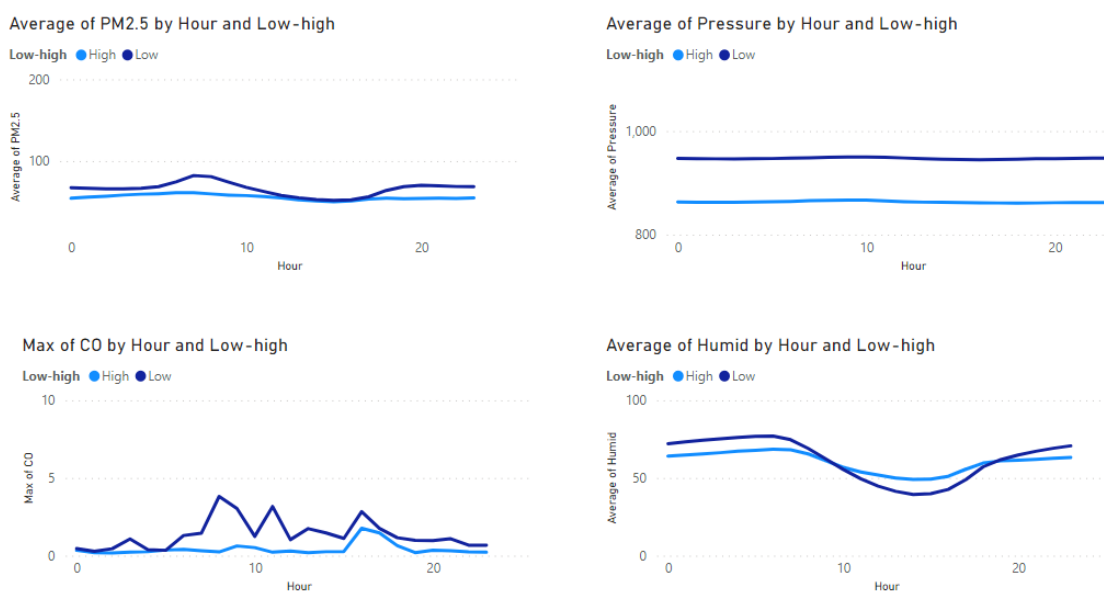
รูปที่ 101 ขั้นตอนการสกัด แปลง และโหลดข้อมูลเซ็นเซอร์จังหวัดเชียงราย ด้วย Pentaho (PDI)

ในการวิเคราะห์การเคลื่อนที่ของกลุ่มควัน PM2.5 และ CO และความแตกต่างของความเข้มข้นของกลุ่มควันดำเนินการโดยจำแนกข้อมูลออกเป็น 2 ชุดหลักๆ คือ กลุ่มโหนดเซ็นเซอร์ที่ระดับความสูงมากกว่า 700 เมตร (High) และกลุ่มโหนดเซ็นเซอร์ที่ระดับความสูงต่ำกว่า 700 เมตร (Low) จากนั้นแสดงผลการเปลี่ยนแปลงในรอบวันด้วยโปรแกรม Power BI และวิเคราะห์สหสัมพันธ์ด้วยโปรแกรม R

ผลและวิจารณ์ผล

ก) การเปลี่ยนแปลงในรอบวันของ PM2.5 และ CO

ผลการศึกษาที่ได้แสดงให้เห็นว่า PM2.5 และ CO ระหว่างระดับพื้นที่สูง (High) และ พื้นที่ราบ (Low) เมื่อวิเคราะห์จากการแสดงผลด้วยการเปลี่ยนแปลงเชิงเวลาในรอบวัน (Diurnal Profile) ของข้อมูล ระหว่างวันที่ 1 ธันวาคม พ.ศ.2564 – 30 พฤษภาคม พ.ศ.2565 (รูปที่ 102) และทดสอบด้วยสถิติ มีความแตกต่างกัน โดยพบว่าในพื้นที่ราบจะมีค่า PM2.5 และ CO สูงกว่าพื้นที่สูงอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.01$) และพบว่าข้อมูลอุตุนิยมหาวิทยาลัยที่ตรวจวัดได้ คือ ความกดอากาศและความชื้น สอดคล้องกับ ลักษณะความสูง กล่าวคือ พื้นที่ที่อยู่สูงขึ้นไปจะมีความกดอากาศและแนวโน้มของความชื้น ต่ำกว่าที่ ระดับผิวดิน [45]



รูปที่ 102 การเปลี่ยนแปลง PM2.5 และ CO เปรียบเทียบระหว่างพื้นที่สูง (High) และพื้นที่ราบ (Low) ระหว่างเดือนธันวาคม พ.ศ.2564 – เดือนพฤษภาคม พ.ศ.2565

นอกจากนี้จากวิเคราะห์ข้อมูลแยกกันระหว่างช่วงที่มีสถานการณ์ฝุ่นละออง (เดือนธันวาคม พ.ศ. 2564 - เดือนเมษายน พ.ศ.2565) และ ช่วงที่ไม่มีสถานการณ์ฝุ่นละออง (เดือนพฤษภาคม พ.ศ.2565) พบว่าลักษณะความแตกต่างที่พบของ PM2.5 CO ความกดอากาศ และความชื้น ตามระดับความสูง High และ Low ในสองช่วงเวลาดังกล่าวเป็นไปในทิศทางเดียวกันกับการวิเคราะห์ด้วยข้อมูลรวมกัน

ปริมาณความเข้มข้นที่สูงกว่าของ PM2.5 และ CO ในระดับพื้นที่ราบ (Low) เปรียบเทียบกับระดับพื้นที่สูง (High) สามารถอธิบายได้จากลักษณะของแหล่งกำเนิดมลพิษที่สันนิษฐานว่ามาจากระดับ

พื้นที่ราบเป็นส่วนใหญ่ โดยปกติฝุ่นละอองขนาดเล็ก เช่น PM2.5 จะมีความเข้มข้นลดลงตามความสูงที่เพิ่มขึ้นและโดยส่วนใหญ่ความเข้มข้นจะผสมและกระจายได้ดีในพื้นที่ที่มีระดับต่ำกว่า 400 เมตร ในเวลากลางคืน และเมื่อเคลื่อนตัวตามแนวดิ่งถึงระดับความสูงที่สูงขึ้น (~800 เมตร) ในเวลากลางวัน จะมีความเข้มข้นที่ลดลงเนื่องจากความปั่นป่วนของการพาความร้อนจากระดับพื้นที่ราบสู่ระดับพื้นที่สูง [46]

ข) สหสัมพันธ์ของข้อมูล

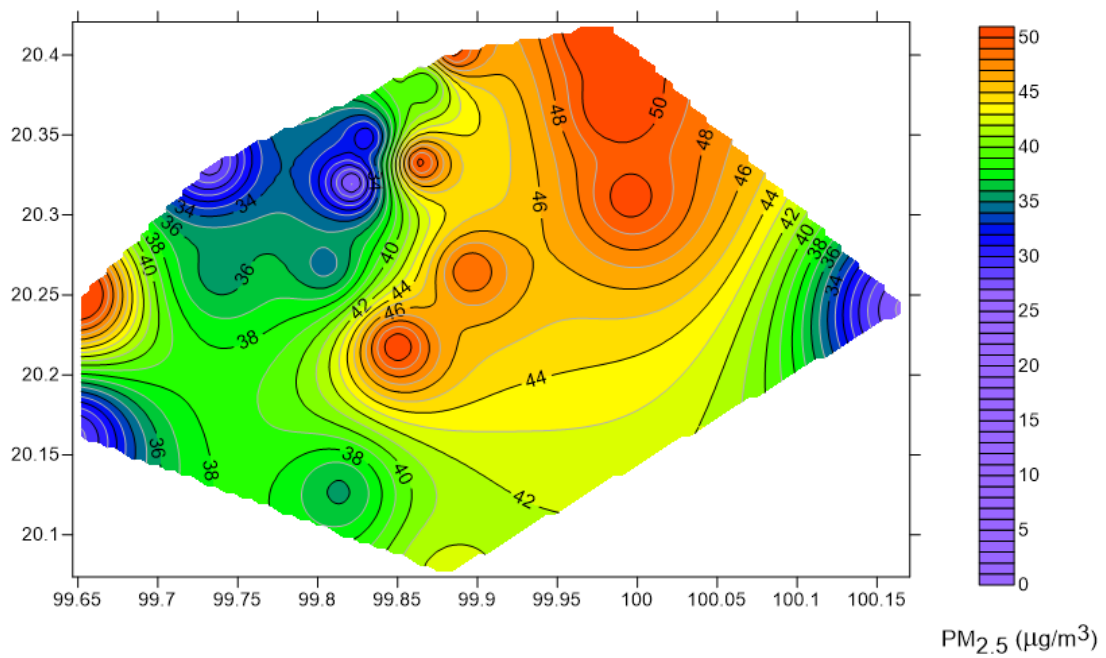
ค่าความเข้มข้นของ PM2.5 ในพื้นที่ติดตั้งโหนดเซ็นเซอร์ ตามโซนต่างๆ ในพื้นที่จังหวัดเชียงรายแสดงดัง ตารางที่ 8 โดย รูปที่ 103 และ รูปที่ 104 แสดงผลการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นเชิงพื้นที่ในโซนต่าง ด้วยเทคนิคการประมาณค่าระหว่างกลาง (Interpolation) จากค่าเฉลี่ยระหว่างเดือนธันวาคม พ.ศ.2564 – เดือนพฤษภาคม พ.ศ.2565 ของ PM2.5 และ CO ตามลำดับ

จากการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของ PM2.5 เชิงพื้นที่ จะพบความเข้มข้นสูงที่บริเวณใกล้กับศูนย์กลางของพื้นที่ และโซนบริเวณทางทิศเหนือและทิศตะวันออกเฉียงเหนือ และโซนบริเวณทางทิศใต้และตะวันตกเฉียงใต้ของศูนย์กลาง ซึ่งเมื่อพิจารณาพร้อมกับข้อมูลการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของ CO เชิงพื้นที่ บริเวณโดยรอบศูนย์กลางพบค่าความเข้มข้นของ CO ที่สูงกว่าโซนอื่นๆ อย่างไรก็ตามไม่พบว่า CO มีค่าสูงในโซนบริเวณทิศเหนือและทิศตะวันออกเฉียงเหนือ

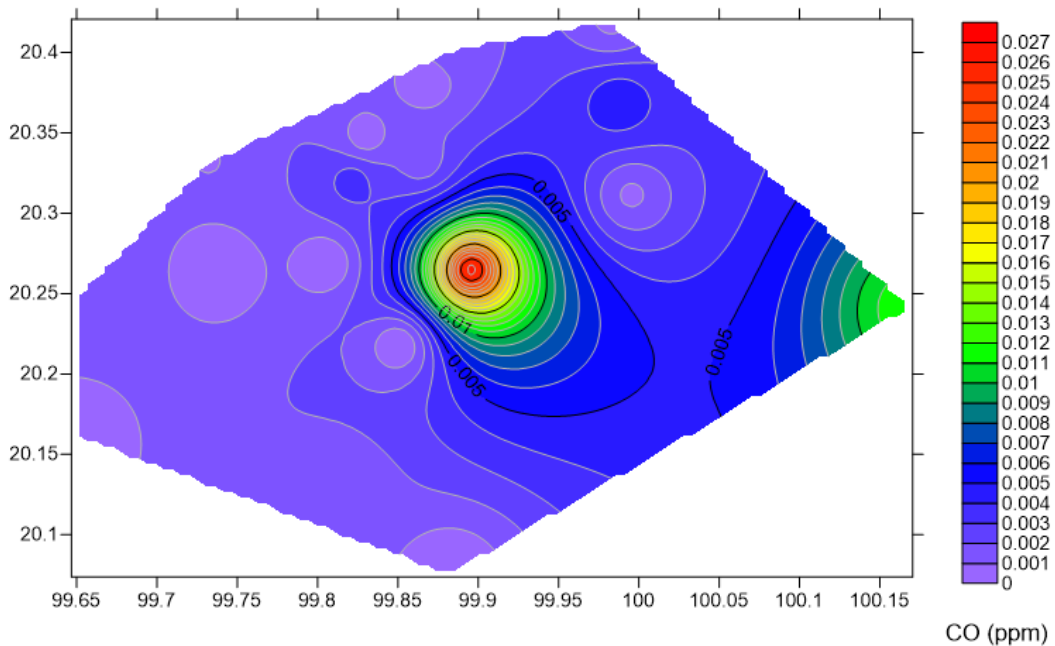
ตารางที่ 8 สรุปข้อมูลค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของ PM2.5 ในแต่ละโซน

โซน	ค่าเฉลี่ย PM2.5	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	จำนวนข้อมูล
CRI-C	26.9	15.6	2880
CRI-E20	51.1	28.5	5760
CRI-E5	50.3	26.9	2880
CRI-EX	26.7	13.5	2130
CRI-N5	31.3	18.3	2862
CRI-NE10	39.0	22.6	2880
CRI-NE20	53.9	33.7	2880
CRI-NEU	50.4	25.3	2880
CRI-S10	50.8	26.6	2880

โซน	ค่าเฉลี่ย PM2.5	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	จำนวนข้อมูล
CRI-S20	40.0	20.6	4445
CRI-S5	34.6	18.2	2871
CRI-SE10	48.9	24.4	2872
CRI-SE20	49.8	30.0	2109
CRI-SW10	35.6	20.4	2855
CRI-SW20	40.6	27.4	5697
CRI-W10	27.3	15.5	2855



รูปที่ 103 การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้น PM_{2.5} เชิงพื้นที่ในโซนต่าง ในพื้นที่จังหวัดเชียงราย



รูปที่ 104 การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้น CO เชิงพื้นที่ในโซนต่าง ในพื้นที่จังหวัดเชียงราย

เนื่องจากพบค่า PM2.5 ที่สูงในโซนบริเวณทิศเหนือและตะวันออกเฉียงเหนือ ศูนย์กลาง และโซนบริเวณทิศใต้และตะวันตกเฉียงใต้ ดังนั้นการวิเคราะห์การเคลื่อนที่ของกลุ่มควัน PM2.5 จึงเน้นไปที่โซนต่างๆ ดังนี้ โซนทิศเหนือ (CRI-N5) ตะวันออกเฉียงเหนือ (CRI-NE20 และ CRI-NE10) ศูนย์กลาง (CRI-C) โซนทิศใต้ (CRI-S20 CRI-S10 CRI-S5) และตะวันตกเฉียงใต้ (CRI-SW10 และ CRI-SW20)

ตารางที่ 9 ตัวอย่างเมทริกซ์สหสัมพันธ์ของ ความเข้มข้น PM2.5 ที่เวลาปัจจุบันและความเข้มข้นของเวลาก่อนหน้าใน โซนทิศเหนือ (CRI-N5) ตะวันออกเฉียงเหนือ (CRI-NE20 และ CRI-NE10) ศูนย์กลาง (CRI-C) โซนทิศใต้ (CRI-S20 CRI-S10 CRI-S5) และตะวันตกเฉียงใต้ (CRI-SE20 และ CRI-SE10)

	PM2.5CRI.C	PM2.5CRI.N5	PM2.5CRI.NE10	PM2.5CRI.S10	PM2.5CRI.SW10
PM2.5lag1CRI.C	0.9555	0.9029	0.6109	0.4963	0.5862
PM2.5lag1CRI.N5	0.9123	0.9785	0.592	0.4929	0.5921
PM2.5lag1CRI.NE10	0.6241	0.6068	0.9305	0.5544	0.5025
PM2.5lag1CRI.S10	0.5013	0.4921	0.5453	0.8645	0.5215
PM2.5lag1CRI.SW10	0.5821	0.587	0.523	0.5567	0.7865
PM2.5lag2CRI.C	0.9231	0.8887	0.6037	0.4956	0.5897
PM2.5lag2CRI.N5	0.9041	0.95	0.5838	0.4929	0.5969

	PM2.5CRI.C	PM2.5CRI.N5	PM2.5CRI.NE10	PM2.5CRI.S10	PM2.5CRI.SW10
PM2.5lag2CRI.NE10	0.6295	0.6147	0.8542	0.5487	0.4956
PM2.5lag2CRI.S10	0.5	0.4934	0.5494	0.7648	0.5071
PM2.5lag2CRI.SW10	0.5782	0.584	0.5366	0.5412	0.7172
PM2.5lag3CRI.C	0.9001	0.8723	0.596	0.4968	0.5934
PM2.5lag3CRI.N5	0.8921	0.9248	0.5758	0.4933	0.5999
PM2.5lag3CRI.NE10	0.6358	0.6233	0.7966	0.5426	0.4871
PM2.5lag3CRI.S10	0.4931	0.4921	0.553	0.6916	0.4905
PM2.5lag3CRI.SW10	0.5743	0.5842	0.542	0.529	0.691
PM2.5lag4CRI.C	0.8843	0.8541	0.5874	0.497	0.6011
PM2.5lag4CRI.N5	0.8781	0.9037	0.5702	0.4937	0.6006
PM2.5lag4CRI.NE10	0.6438	0.6305	0.7533	0.524	0.4841
PM2.5lag4CRI.S10	0.485	0.49	0.555	0.6297	0.477
PM2.5lag4CRI.SW10	0.576	0.5859	0.5423	0.5286	0.6622

จากตารางที่ 9 ผลของค่าสหสัมพันธ์ที่ได้ระหว่าง $PM_{2.5}$ กับ ค่าความเข้มข้นที่เวลาก่อนหน้า 15 30 45 และ 60 นาที แสดงด้วย Lag1 Lag2 Lag3 และ Lag4 ตามลำดับ ในพื้นที่จังหวัดเชียงราย สอดคล้องกับข้อมูลที่วิเคราะห์ได้ในพื้นที่ของจังหวัดตาก นั่นคือการเปลี่ยนแปลงของ $PM_{2.5}$ ได้รับอิทธิพลหลักมาจากความเข้มข้นเวลาก่อนหน้าของโซนนั้นๆ และโซนที่อยู่ต้นลม ดังนั้นการคาดการณ์การเคลื่อนที่ของกลุ่มควัน $PM_{2.5}$ สามารถอธิบายได้ด้วยแบบจำลองการถดถอยในลักษณะแบบเดียวกัน

สรุปผล

จากลักษณะพื้นที่ที่มีความแตกต่างกัน ทำให้เห็นได้ชัดว่าความเข้มข้นของ $PM_{2.5}$ และ CO ที่ระดับพื้นที่สูง (มากกว่า 700 เมตร) และที่ระดับพื้นที่ราบ (น้อยกว่า 700 เมตร) แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ซึ่งสามารถอธิบายได้จากแหล่งกำเนิดมลพิษที่สันนิษฐานว่าส่วนใหญ่เกิดขึ้นในระดับผิวดินมากกว่าบนภูเขา ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นที่พบความเข้มข้นน้อยกว่าในระดับพื้นที่สูงเกิดจากการเคลื่อนตัวตามแนวตั้งจะมีความเข้มข้นที่ลดลงเนื่องจากความปั่นป่วนของการพาความร้อนจากระดับพื้นที่ราบสู่ระดับพื้นที่สูง นอกจากนี้จากการวิเคราะห์ข้อมูลการเปลี่ยนแปลงเชิงพื้นที่พบว่า $PM_{2.5}$ มีค่าสูงตามทิศทางลมมรสุมหลักในช่วงเวลาดังกล่าว คือ ทิศตะวันออกเฉียงเหนือและทิศตะวันตกเฉียงใต้ ส่งผลให้ความเข้มข้นสูงของ $PM_{2.5}$ ที่ตรวจวัดเฉลี่ยในช่วงเวลาดังกล่าว (เดือนธันวาคม พ.ศ.2564 – เดือนพฤษภาคม พ.ศ. 2565) มีค่าสูงตามโซนในแนวลมมรสุม

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย

5.1 บทนำ

ในบทนี้ได้นำเสนอผลสรุปการศึกษาวิจัยและพัฒนาแพลตฟอร์มไอโอทีสำหรับการเฝ้าระวังไฟฟ้าและมลพิษทางอากาศด้วยเทคโนโลยีโลล่า จากนั้นจะกล่าวถึงปัญหาและอุปสรรคที่เกิดขึ้นระหว่างการดำเนินการศึกษาและวิจัย และ กล่าวถึงข้อแนวทางการบริหารแพลตฟอร์มอย่างยั่งยืน รวมไปถึงแนวทางการพัฒนาโครงการวิจัยในอนาคตเป็นส่วนสุดท้าย

5.2 สรุปผลการดำเนินงานวิจัย

5.2.1 การออกแบบและพัฒนาแพลตฟอร์มไอโอทีด้วยเทคโนโลยีโลล่า

คณะวิจัยฯ ได้พัฒนาแพลตฟอร์มด้วยโปรโตคอล LoRaWAN ซึ่งได้ถูกกำหนดเป็นมาตรฐานให้กับผู้ผลิตอุปกรณ์ LoRa ทำให้สามารถใช้งานร่วมกับอุปกรณ์ที่หลากหลาย และได้ใช้เฟิร์มแวร์ TTN3 ซึ่งเป็น Open Source ซึ่งรองรับกับโปรโตคอล LoRaWAN ได้เป็นอย่างดี สำหรับพัฒนา Network Server ที่ใช้สำหรับการบริหารจัดการอุปกรณ์โลล่าในโครงข่าย เช่น โลล่าเกตเวย์, โหนดเซ็นเซอร์ที่ติดตั้งในพื้นที่ รวมไปถึงทำหน้าที่ส่งผ่านข้อมูลไปที่ Application Server สำหรับการแสดงผลข้อมูลด้วย ทั้งนี้ทางคณะวิจัยฯ ได้พัฒนาแพลตฟอร์มไว้บนคลาวด์ ซึ่งมีส่วนต่อประสานกับผู้ใช้งานให้สามารถตรวจสอบคุณภาพอากาศจากเซ็นเซอร์ได้แบบเรียลไทม์ ผ่านโครงข่ายอินเทอร์เน็ต

5.2.2 ผลการทดสอบการรับส่งสัญญาณด้วยเทคโนโลยีโลล่า

อุปกรณ์โลล่าที่ใช้ในการวิจัยทำงานอยู่บนย่านความถี่ 920-925 MHz ที่ได้รับอนุญาตให้ใช้เป็นการทั่วไปตามประกาศ กสทช. ที่เกี่ยวข้องในปี พ.ศ. 2560 โดยเทคโนโลยีโลล่ามีคุณสมบัติที่เหมาะสมสามารถรับส่งข้อมูลได้ในระยะไกลเนื่องจากอุปกรณ์ภาครับมีความสามารถความสามารถสูงในการรับสัญญาณที่ต่ำ ด้วย sensitivity ต่ำสุดเท่ากับ -132 dBm ด้วยการตั้งค่า Spreading Factor ที่ 10 แต่จะถูกจำกัดด้วยแบนด์วิธที่ต่ำซึ่งมีความเหมาะสมอย่างมากกับการพัฒนาระบบที่ต้องการรับส่งข้อมูลหรือควบคุมอุปกรณ์ในระยะไกล

ทางคณะวิจัยได้ทำการทดสอบการใช้งานอุปกรณ์ด้วยการรับส่งข้อมูลผ่านโครงข่ายโลล่า โดยแบ่งออกเป็นสองพื้นที่คือ 1) ภายในบริเวณสถาบันเทคโนโลยีแห่งเอเชีย (AIT) ซึ่งมีลักษณะแบบพื้นที่ชุมชนเมือง (Urban Area) และ 2) บริเวณพื้นที่ภาคสนาม ซึ่งมีลักษณะแบบพื้นที่ชุมชนชนบท (Rural

Area) และพื้นที่ห่างไกล (Remote Area) ผลการทดสอบพบว่าอุปกรณ์เกตเวย์สามารถครอบคลุมพื้นที่ในเขตชุมชนเมือง ได้ในระยะ 2-3 กิโลเมตร แต่ในพื้นที่ชุมชนชนบทและพื้นที่ห่างไกล สามารถรับส่งข้อมูลได้ถึง 10 กิโลเมตร ทั้งนี้ปัจจัยสำคัญอยู่ที่สิ่งกีดขวางที่เข้ามาบดบังคลื่นความถี่ โดยพบว่าคลื่นความถี่สามารถส่งผ่านสิ่งกีดขวางประเภทต้นไม้ได้ดี แต่ระดับสัญญาณจะลดลงอย่างมากเมื่อผ่านวัสดุจำพวกคอนกรีต หรือ ผนังอาคาร จึงทำให้การใช้งานในเขตชุมชนเมืองจึงมีพื้นที่การครอบคลุมที่จำกัด ในส่วนของการทดสอบในพื้นที่ภาคสนามนั้นให้ผลที่แตกต่างไปโดยสัญญาณสามารถครอบคลุมพื้นที่ได้ดีกว่า เนื่องมาจากบริเวณที่ติดตั้งอุปกรณ์เป็นพื้นที่โล่งและมี Line of Sight ที่ดีแต่ในการติดตั้งในพื้นที่ป่า เช่น ในเขตอุทยานแห่งชาติแม่ปิง หรือ พื้นที่โครงการพัฒนาตอยตุง นั้นห้อมล้อมไปด้วยแนวเขาที่สลับซับซ้อนซึ่งคลื่นความถี่ไม่สามารถส่งผ่านได้ โดยการติดตั้งจำเป็นต้องทำการสำรวจอย่างละเอียดเพื่อหาพิกัดที่เหมาะสม และ ใช้การติดตั้ง DIY โลล่าเกตเวย์ ที่พัฒนาจากราสเบอร์รี่พาย เป็นส่วนต่อขยายสัญญาณออกไป จากผลการทดสอบประสิทธิภาพของโลล่า สภาพแวดล้อมในเมืองที่รายล้อมไปด้วยตึกสูงซึ่งทำให้คุณภาพของสัญญาณลดลง ถึงแม้การใช้งานในพื้นที่ต่างจังหวัดจะพบปัจจัยนี้มากนักแต่ก็ยังมีคามจำเป็นในการป้องกันการขาดหายของข้อมูล ซึ่งแนวทางป้องกันที่ทางคณะวิจัยได้ดำเนินการไว้คือ พัฒนาอุปกรณ์เซ็นเซอร์ให้สามารถจัดเก็บข้อมูลไว้ในหน่วยความจำ (SD card) และ การส่งข้อมูลซ้ำ (Retransmission) ซึ่งลดการสูญหายของข้อมูลได้

5.2.3 ผลการทดสอบอุปกรณ์เซ็นเซอร์

อุปกรณ์เซ็นเซอร์ผ่านการทดสอบภายในห้องปฏิบัติการโดยทำการเปรียบเทียบ ค่า PM2.5, CO และ CO2 กับเครื่องวัดมาตรฐาน เพื่อหาความสัมพันธ์เชิงเส้นตรง จากผลการทดสอบวัดค่าความถูกต้องของการอ่านค่าข้อมูลเซ็นเซอร์เปรียบเทียบกับอุปกรณ์มาตรฐาน พบว่าเซ็นเซอร์มีความถูกต้องในการตรวจวัดมากกว่าร้อยละ 95 หลังจากนั้นจึงนำเซ็นเซอร์ที่ผ่านการทดสอบแล้วไปทดสอบกับเครื่องวัดมาตรฐานของกรมควบคุมมลพิษ ที่สถานีโรงพยาบาลจุฬาฯ โดยสามารถเปรียบเทียบกับค่าฝุ่นละอองขนาดเล็ก (PM2.5) แบบรายชั่วโมง พบว่าเซ็นเซอร์มีความถูกต้องในการตรวจวัดมากกว่าร้อยละ 65

5.2.4 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลจากเซ็นเซอร์

คณะวิจัยฯได้พัฒนาโมเดลตรวจจับไฟป่าโดยใช้ชุดข้อมูลจากเซ็นเซอร์ที่ติดตั้งในพื้นที่ จังหวัดตาก เปรียบเทียบกับข้อมูลจุดความร้อน (hotspot) จากดาวเทียมซึ่งพบความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของ PM2.5 และ CO ระหว่างที่ตรวจพบไฟป่าจากจุดความร้อน จึงนำความสัมพันธ์ที่ได้ไปพัฒนาโมเดลตรวจจับไฟป่าด้วยเทคนิค supervised learning ด้วยแบบจำลอง Tree Model Classification (J48) โดยเมื่อได้ทดสอบกับชุดข้อมูลที่เป็น Training set และ Validating set มี

ความถูกต้องโดยเฉลี่ยอยู่ที่ 72% และ 69% ตามลำดับ โมเดลตรวจจับไฟฟ้าได้ถูกนำมาทดสอบกับโครงข่ายเซ็นเซอร์ ที่บริเวณคอยข้างป่าแป๋ บริเวณรอยต่อของจังหวัดลำพูน และ เชียงใหม่ ในช่วงเดือนเมษายน 2565 ซึ่งเป็นช่วงที่เกิดเหตุการณ์ไฟฟ้า โดยแพลตฟอร์มสามารถแจ้งเตือนผ่านโปรแกรมไลน์ ไปยังเจ้าหน้าที่ไฟฟ้าได้ทันก่อนที่ไฟฟ้าจะลุกลามไปในบริเวณกว้างโดยตรวจพบจุดไฟฟ้าห่างจากจุดเซ็นเซอร์ที่แจ้งเตือนประมาณ 3 กิโลเมตร ทั้งนี้จากการทดสอบความถูกต้องพบว่าโมเดลสามารถให้ค่าความถูกต้องที่สูงมากกว่า 80% แต่ว่ามีเหตุการณ์ False Positive จำนวนมาก ซึ่งอาจสร้างความสับสนให้แก่ผู้ใช้งานได้ ซึ่งทางคณะวิจัยฯ ได้นำเสนอให้ใช้ ค่าเทรชโฮลด์ (RHT) ในการกำจัดข้อมูลที่ผิดพลาดเนื่องมาจากความขึ้นออกไป ซึ่งสามารถเพิ่มประสิทธิภาพของโมเดลได้ประมาณ 12%

5.2.5 ระบบแจ้งเตือนไฟฟ้า Fire Notification System

ระบบคลาวด์ได้ทำการเชื่อมต่อกับโปรแกรมไลน์ และ เทลแกรม ซึ่งสามารถส่งข้อมูลข่าวสารแจ้งเตือนไปยังผู้ใช้งานได้ โดยทางคณะวิจัยฯ ได้สร้างโปรแกรมบอทในการอ่านค่าข้อมูลจากเซ็นเซอร์ รวมไปถึงส่งข้อความแจ้งเตือนไปยังผู้ใช้งานที่ลงทะเบียนไว้กับกลุ่มไลน์หรือเทลแกรม ซึ่งปัจจุบันกลุ่มได้ถูกแบ่งตามพื้นที่ของการติดตั้งเซ็นเซอร์ เช่น กลุ่ม วัดผืนแม่ปิง, วัดผืนแม่ฟ้าหลวง, วัดผืนบ้านโฮ้ง เป็นต้น เพื่อรับข้อมูลข่าวสารจากแพลตฟอร์มรวมถึงการเตือนภัยเมื่อเกิดไฟฟ้า

5.2.6 ประโยชน์จากการใช้งานแพลตฟอร์ม

ทางคณะวิจัยฯ ได้ติดตั้งเซ็นเซอร์ Canarin ที่สามารถตรวจวัดสภาพและมลพิษในอากาศไปแล้วมากกว่า 100 สถานี ดังแสดงใน ตารางที่ 16 รูปที่ 106 ในภาคผนวก ค. ซึ่งแบ่งเป็นพื้นที่เป้าหมายหลัก 3 แห่ง คือ จังหวัด เชียงราย, ตาก และ ลำพูน นอกจากนี้ยังมีการขยายการติดตั้งไปยังหลายจังหวัดในพื้นที่ ภาคเหนือ เช่น เชียงใหม่, ลำปาง พะเยา เป็นต้น โดยจุดติดตั้งส่วนใหญ่ จะอยู่ภายใต้การดูแลของสถานีควบคุมไฟฟ้า, องค์การบริหารส่วนตำบล (อบต.), โรงเรียน และ โรงพยาบาลส่งเสริมสุขภาพตำบล (รพสต.) ซึ่งเป็นผู้ใช้งานที่จะได้รับประโยชน์โดยตรงจากการรายงานสภาพอากาศแบบเรียลไทม์ นอกจากนี้เจ้าหน้าที่ไฟฟ้าและอาสาสมัครในชุมชน ยังสามารถใช้ประโยชน์จากแพลตฟอร์มด้วยโมเดลตรวจจับไฟฟ้าที่สามารถแจ้งพิกัดของเซ็นเซอร์ที่อาจเกิดเหตุการณ์ไฟฟ้าขึ้นจากโมเดลที่พยากรณ์ไว้ ซึ่งจะสามารถเข้าระงับไฟก่อนที่จะลุกลามไปในวงกว้าง นอกจากนี้แพลตฟอร์มยังเปิดให้บริการข้อมูลในรูปแบบ Open Data ผ่านเว็บไซต์ของโครงการ³ สำหรับนักวิจัยให้นำข้อมูลไปวิเคราะห์ได้

³ <https://hazemon.in.th/oraiot/map.html#>

5.3 ข้อเสนอแนะสำหรับแนวทางการเฝ้าระวังไฟป่า

แนวทางการเฝ้าระวังไฟป่าจำเป็นต้องอาศัยเครือข่ายชุมชน ร่วมกันกับหน่วยงานในพื้นที่ในการเฝ้าระวังไฟป่าร่วมกัน โดยใช้โครงข่ายเซ็นเซอร์เป็นเครื่องมือในการตรวจสอบ จากการติดตั้งโครงข่ายเซ็นเซอร์ในพื้นที่ที่เกิดไฟป่า เช่น พื้นที่ดอยช้างป่าแป๋, พื้นที่อุทยานแห่งชาติแมปิง, พื้นที่ดอยตุง สามารถใช้การรายงานจากข้อมูล เซ็นเซอร์ แจ้งเตือนไปยังอาสาสมัครหรือเจ้าหน้าที่ได้อย่างรวดเร็ว เมื่อตรวจเจอความเข้มข้นของปริมาณ PM2.5 และ การก่อกำเนิดอนุภาคนอกไซด์ ที่เกิดจากการเผาไหม้ ซึ่งสามารถให้เจ้าหน้าที่และอาสาสมัครชุมชนเข้าระงับไฟได้ แต่อย่างไรก็ตามในช่วงต้นปี 2566 นี้ ปัญหาไฟป่ายังคงหนักหน่วงและต่อเนื่องเป็นระยะเวลานาน โดยพบว่ามีบุคคลในพื้นที่ลักลอบเข้าไปจุดไฟเพื่อเก็บของป่า, เผาเพื่อเตรียมทำเกษตร รวมไปถึง การเผาพื้นที่ใกล้กับบริเวณป่า ซึ่งเจ้าหน้าที่หรืออาสาสมัครผู้เกี่ยวข้องไม่สามารถดูแลได้อย่างทั่วถึง ซึ่งทางคณะวิจัยฯ จึงใคร่ขอเสนอแนวทางป้องกันและเฝ้าระวังเพิ่มเติมดังต่อไปนี้

- การให้ความรู้แก่ชุมชนเรื่องผลกระทบจากการเผาโดยอ้างอิงจากข้อมูลฝุ่นละอองในพื้นที่ ที่ตรวจวัดได้ ซึ่งจะเห็นได้ชัดว่า ข้อมูลจากการตรวจวัดจากเซ็นเซอร์ มีค่า PM2.5 สูงมากกว่า 500 ug/m³ เป็นระยะเวลาต่อเนื่องหลายสัปดาห์ ซึ่งส่งผลกระทบต่อสุขภาพในระยะยาวต่อประชากรในชุมชน ทั้งนี้ควรมีความร่วมมือกับ ทางเกษตรจังหวัด และ หน่วยงานบริหารส่วนท้องถิ่นให้ความรู้การทำอาชีพทางเลือก หรือ แนะนำเกษตรแนวใหม่ที่สามารถหลีกเลี่ยงการเผาได้
- อีกแนวทางหนึ่ง ถ้าหากไม่สามารถหลีกเลี่ยงการเผาได้ ควรกำหนดเวลาการเผาที่ไม่ส่งผลกระทบต่อสภาพอากาศ โดยสามารถให้ชาวบ้านเข้ามาลงทะเบียนการเผา กับเจ้าหน้าที่ที่เกี่ยวข้องในพื้นที่ เพื่อกำหนด ตำแหน่งการเผา, ขนาดของพื้นที่ และ วันเวลาที่อากาศมีสภาพเปิด เช่น มีลมพัด หรือ ปริมาณมลพิษที่ตรวจวัดได้จากเซ็นเซอร์ อยู่ในเกณฑ์ดี
- กำหนดบทลงโทษทั้งทางกฎหมายและสังคม โดยในทางกฎหมายนั้นมิบทลงโทษที่ค่อนข้างชัดเจนอยู่แล้วในการลักลอบเผาป่า ในพื้นที่ต่างๆ เช่น เขตป่าไม้, เขตป่าสงวนแห่งชาติ, เขตรักษาพันธุ์สัตว์ป่า และ เขตอุทยานแห่งชาติ เป็นต้น ทั้งนี้ควรมีมาตรการทางสังคมควบคู่กันไป เมื่อชุมชนตระหนักถึงภัยที่เกิดจากการเผาแล้ว ก็จะช่วยกันรักษาพื้นที่ของตนหรือร่วมกันเฝ้าระวังพื้นที่ของตนเอง

5.4 ข้อเสนอแนะเชิงนโยบาย

จากผลการศึกษาทางคณะวิจัยฯ เห็นว่าเทคโนโลยีโล่ล่ามีประโยชน์อย่างมากต่อการเติบโตของอุตสาหกรรมไอโอทีของประเทศโดยมีความต้องการต่อการใช้คลื่นความถี่ในการเชื่อมต่ออุปกรณ์ต่างๆ ที่เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วโดยคณะวิจัยฯ ได้มีข้อเสนอเชิงนโยบายดังต่อไปนี้

5.4.1 การขยายคลื่นความถี่ 920-925 MHz

ปริมาณความต้องการการใช้งานคลื่นความถี่ 920-925 MHz ด้วยเทคโนโลยีโล่ล่า มีมากขึ้นจากการเติบโตของนวัตกรรม Internet of Things (IoT) ที่ถูกนำไปประยุกต์ใช้กับงานด้านต่างๆ เช่น โรงงานอุตสาหกรรม, การเกษตรอัจฉริยะ, การป้องกันภัยพิบัติ, เมืองอัจฉริยะ และ การสำรวจและเฝ้าระวังทรัพยากรทางธรรมชาติ เป็นต้น ซึ่งในอนาคตอันใกล้ คณะนักวิจัยฯ คาดว่าคลื่นความถี่ที่ได้รับอนุญาต ซึ่งมีแบนด์วิดท์ เพียง 5MHz อาจจะไม่เพียงพอต่อความต้องการในอนาคต จึงมีข้อเสนอเชิงนโยบายดังต่อไปนี้

1) ขยายคลื่นความถี่ไปiny่านความถี่ป้องกัน

คลื่นความถี่ 920-925 MHz ซึ่งเป็นความถี่ที่ถูกจัดสรรให้ใช้งานในลักษณะความถี่สาธารณะสำหรับอุตสาหกรรม วิทยาศาสตร์ และการแพทย์ (Industrial, Scientific and Medical frequency bands: ISM) โดยมีคลื่นความถี่ข้างเคียงด้านล่าง คือ คลื่นความถี่ย่าน 895-915 MHz ที่ถูกจัดสรรให้ใช้สำหรับการให้บริการโทรศัพท์เคลื่อนที่ (International Mobile Telecommunications: IMT) และ คลื่นความถี่ด้านบนย่าน 930-935 MHz ที่ถูกจัดสรรให้ใช้สำหรับสัญญาณของระบบขนส่งทางราง (GSM-Railway: GSM-R) โดยมีแถบความถี่ป้องกัน (Guard Band) คั่นระหว่าง คลื่นความถี่ 920-925 MHz ด้านละ 5MHz ดังแสดงในรูปที่ 105 ซึ่งทางคณะวิจัยฯ เห็นว่าเป็นการใช้ประโยชน์จากคลื่นความถี่ที่ไม่เต็มประสิทธิภาพ และสามารถขยายการใช้งานออกไปได้ โดยเสนอว่าถ้าหากขยายคลื่นความถี่ออกไปด้านละ 3 MHz เป็น 918 – 928 และคงความถี่ป้องกันไว้ด้านละ 2 MHz. จะสามารถรองรับปริมาณการใช้งานที่เพิ่มมากขึ้นในอนาคตและจัดสรรคลื่นความถี่ได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น สอดคล้องกับผลการศึกษาใน [47] พบว่าการขยายความถี่ออกด้านละ 3MHz ไม่ได้ก่อให้เกิดการรบกวนต่อการใช้งานของคลื่นความถี่ข้างเคียงเดิม



รูปที่ 105 ตารางคลื่นความถี่ ISM ที่จัดสรรให้ใช้งานด้าน IoT และความถี่ข้างเคียง

นอกจากนี้อุปกรณ์ในท้องตลาดจำนวนมากยังสามารถรองรับการใช้คลื่นความถี่เริ่มต้นที่ 918 MHz ณ ปัจจุบัน ผู้นำเข้าอุปกรณ์จะต้องปรับตัวรับส่งสัญญาณให้ใช้งานได้เฉพาะ 920-925 MHz ก่อนที่จะนำเข้ามาจัดจำหน่ายในประเทศไทยซึ่งทำให้ต้นทุนของอุปกรณ์สูงขึ้น ซึ่งถ้าหากลดขั้นตอนนี้ลงไปได้ อุปกรณ์เครื่องรับส่งจะมีต้นทุนที่ถูกลง อีกทั้งผู้บริโภคจะมีอุปกรณ์ให้เลือกใช้งานมากขึ้นซึ่งจะช่วยผลักดันการใช้ประโยชน์จากเทคโนโลยีโลล่าได้อย่างมีประสิทธิภาพ

2) ขยายคลื่นความถี่ไปย่านอื่น

กลุ่มประเทศในสหภาพยุโรป ซึ่งมีการใช้งานเทคโนโลยีโลล่าและ IoTs ที่ก้าวหน้าได้เลือกใช้สองย่านความถี่เพื่อรองรับการเจริญเติบโตของการใช้งาน โดยใช้ย่านความถี่ EU863-870 และ EU433 ซึ่งหากประเทศไทย สามารถขยายการใช้งานจากคลื่นความถี่ 920-925 MHz. ออกไปเพิ่มเติมก็จะช่วยลดปริมาณการใช้งานที่หนาแน่นในอนาคตได้ ซึ่งประเทศในแถบเอเชีย เช่น ฟิลิปปินส์ เองก็ได้มีการใช้งานในสองย่านความถี่เช่นกัน คือ EU863-870 และ EU433 เช่นกัน สำหรับประเทศไทย ถ้าหากสามารถจัดสรรความถี่เพิ่มเติมในย่าน EU433 ก็จะเป็นการรองรับการเติบโตในอนาคตได้เป็นอย่างดี อีกทั้งสามารถใช้งานร่วมกับอุปกรณ์ที่ใช้ในทวีปยุโรปได้อีกด้วย

5.4.2 การควบคุมอัตราการส่งข้อมูลเพื่อป้องกันการยึดครองช่องสัญญาณ

การใช้งานเทคโนโลยีโลล่าจะใช้ช่องสัญญาณร่วมกัน โดยอุปกรณ์โลล่าภาคพื้นดิน จะส่งข้อมูลในลักษณะบรอดคาสต์ ไปยังโลล่าเกตเวย์ ในเวลาพร้อมๆกันได้หลายอุปกรณ์ เพื่อลดการยึดครองของช่องสัญญาณและการชนกันของแพ็คเกจ (Packet Collision) มาตรฐาน LoRaWAN ได้กำหนดค่า Dwell Time หรือ Time on Air ไว้สูงสุดที่ 400 ms. โดยผู้ใช้งานจะต้องควบคุมการส่งข้อมูลให้เหมาะสมจากการตั้งค่า Spreading Factor โดยมีค่าตั้งแต่ SF7-12 และขนาดของข้อมูล (Payload) ต่อหนึ่งแพ็คเกจ ซึ่งถ้า SF และ ขนาดของข้อมูล ยังมีค่ามากจะทำให้ Dwell Time มีค่ามากตามขึ้นไป ด้วย อย่างไรก็ตาม ด้วยโปรโตคอลสื่อสาร LoRaWAN นั้นมีจำนวน Overhead ขึ้นต่ำอยู่ที่ 13 ไบต์ ทำให้สามารถตั้งค่า SF ได้เพียง SF7-SF10 โดย SF11 และ SF12 จะทำให้ค่า Dwell Time มีค่าเท่ากับ 659.5 ms และ 1,155.1 ms ตามลำดับ เมื่อตั้งค่าขนาดของข้อมูลไว้ที่ 1 ไบต์ เพื่อเป็นการป้องกันผู้ผลิตโมดูลรับส่งโลล่าบางส่วนจึงได้ทำการล็อคค่า SF ไม่ให้สามารถตั้งค่าที่ SF11 และ SF12 ได้

อย่างไรก็ตาม จากผลการทดสอบการรับส่งข้อมูลภาคสนาม คณะวิจัยพบว่า มีอุปกรณ์ที่ในพื้นที่มีการละเมิดค่า Dwell time สูงสุดอยู่ โดยใช้ SF11 ซึ่งอาจทำให้เกิดการชนกันของแพ็คเกจหากมีหลายอุปกรณ์ใช้ช่องสัญญาณร่วมกัน นอกจากนี้ อุปกรณ์โลล่ารุ่นใหม่ๆ ยังใช้เทคนิคการตรวจจับช่องสัญญาณก่อนส่งข้อมูล (Listen Before Talk) เพื่อป้องกันการชนกันของข้อมูล ซึ่งการละเมิดค่า Dwell Time ของบางอุปกรณ์อาจเกิดการครอบครองช่องสัญญาณแบบไม่เป็นธรรมได้ ดังนั้นทาง

คณะวิจัยฯ จึงขอเสนอให้มีการตรวจตราอุปกรณ์ในพื้นที่ไม่ให้ยึดครองช่องสัญญาณเป็นเวลานาน หรือ ออกข้อกำหนดของอุปกรณ์ที่ผลิตและนำเข้าไม่ให้นำเข้าได้ SF เกินกว่าที่กำหนดได้

5.4.3 ลดขั้นตอนการขออนุญาตนำเข้าอุปกรณ์

การนำเข้าอุปกรณ์ประเภทเครื่องรับส่งวิทยุ เช่น โลล่าเกตเวย์ ยังมีกระบวนการหลายขั้นตอน เช่น การขอรับรองมาตรฐาน, การขอใบอนุญาตนำเข้า, การตรวจสอบอุปกรณ์, การขออนุญาตใช้งาน หรือติดตั้ง รวมถึง ผู้นำเข้าเพื่อการค้าจะต้องรายงานหรือขึ้นบัญชีเครื่องวิทยุ เสียก่อน ซึ่งแต่ละขั้นตอน จะต้องยื่นเอกสารและใช้ระยะเวลาในการพิจารณาจากปัจจัยนี้เอง ทำให้อุปกรณ์โลล่าในท้องตลาดมีราคาแพงเนื่องจากผู้ประกอบการจะต้องผ่านกระบวนการหลายขั้นตอนก่อนที่อุปกรณ์จะได้นำเข้า อย่างถูกต้อง ทำให้ผู้ประกอบการใช้โอกาสนี้ในการตั้งราคาสินค้าที่สูงขึ้น ทั้งนี้พบว่าอุปกรณ์ที่นำเข้า และมีใบอนุญาตนั้นมีราคาสูงกว่า ราคาที่สั่งซื้อจากต่างประเทศถึง 2-3 เท่า นอกจากนี้ยังเกิดข้อจำกัดของอุปกรณ์โลล่า ที่ไม่มีความหลากหลายเนื่องจากการนำเข้าอุปกรณ์ถูกผูกขาด ผู้ประกอบการบางรายที่มีความพร้อมในการขึ้นบัญชีนำเข้าสินค้าทำให้การใช้งานโลล่าในประเทศไทย ทำให้การใช้งานโลล่ายังไม่แพร่หลายเท่าที่ควร เมื่อเทียบกับเทคโนโลยี WiFi ที่มีตัวเลือกและเสรีในการใช้งานอุปกรณ์มากกว่า นอกจากนี้ยังสามารถตั้งข้อสังเกตได้ว่า อาจมีการนำเข้าหรือลักลอบใช้งานอุปกรณ์อย่างไม่ถูกต้องมากขึ้นด้วยซึ่งจะทำให้การกำกับดูแลยากขึ้นในอนาคต

5.5 ปัญหาและอุปสรรคในการดำเนินงานวิจัย

เนื่องด้วยสถานการณ์โควิด-19 ในช่วงปี 2564-2565 ทำให้ไม่สามารถเดินทางข้ามพื้นที่ได้จึงทำให้เกิดการล่าช้าในการสำรวจและติดตั้งอุปกรณ์ อีกทั้งยังเกิดปัญหาการขาดแคลนอุปกรณ์ อิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งส่งผลกระทบต่อไปทั่วโลก ทำให้ขึ้นส่วนบางอย่างของอุปกรณ์เช่นเซอร์ไม่สามารถหาได้ในท้องตลาด จึงทำให้เกิดการล่าช้าในการรอส่งอุปกรณ์ และต้องมีการปรับเปลี่ยนการออกแบบแผนวงจรใหม่เพื่อที่จะสามารถใช้อุปกรณ์ทดแทนได้ ซึ่งสาเหตุนี้เองทำให้เกิดความล่าช้าในการผลิตและรวมไปถึงการติดตั้งอุปกรณ์เช่นเซอร์ ในพื้นที่เป้าหมายด้วย

เนื่องจากจุดติดตั้งหลายจุดไม่มีระบบไฟฟ้าเข้าถึงทำให้เกิดอุปสรรคในการติดตั้งเซ็นเซอร์ ซึ่งทางคณะวิจัยฯ ได้แก้ไขโดยการพัฒนาระบบไฟฟ้าโซลาเซลล์ซึ่งช่วยให้เซ็นเซอร์สามารถทำงานได้ แต่ในช่วงปี 2565 ที่ผ่านมามีพบว่าประเทศไทยมีฤดูฝนยาวนานและมีท้องฟ้าที่ปิดทำให้ระบบโซลาเซลล์ไม่สามารถสำรองจ่ายไฟให้เซ็นเซอร์ตลอดทั้งวัน ซึ่งทางคณะวิจัยฯ ได้ใช้วิธีแก้ไขโดยการปรับเพิ่ม cycle การอ่านค่าเซ็นเซอร์ให้นานขึ้นจาก 2 นาที เป็น 5 นาที และให้เซ็นเซอร์อยู่ในสถานะ standby เพื่อประหยัดพลังงาน

จากการติดตั้งอุปกรณ์ไปได้ซักระยะหนึ่งพบว่า อุปกรณ์ได้รับความเสียหาย เช่น อุปกรณ์โลล่าเกตเวย์ ที่ติดตั้งอยู่ที่ อำเภอแม่สอด จังหวัดตาก นั้นเสียหาย จากเหตุการณ์ฟ้าผ่าลงมาในบริเวณเสาส่งสัญญาณ ทำให้ต้องมีการเปลี่ยนอุปกรณ์ใหม่ รวมถึงอุปกรณ์เซ็นเซอร์ ที่ติดตั้งในพื้นที่ห่างไกล ก็ได้รับความเสียหายจากฟ้าผ่าและระบบไฟฟ้าที่ไม่เสถียร เช่นกัน ทำให้ต้องมีการเปลี่ยนอุปกรณ์เซ็นเซอร์ที่ชำรุดเสียหาย นอกจากนี้ยังพบว่าจุดติดตั้งหลายแห่งเช่น สถานีไฟฟ้า มีระบบไฟฟ้าที่ไม่เสถียร มีการติดตั้งบ่อยครั้งและกินระยะเวลานานหลายชั่วโมงทำให้ข้อมูลบันทึกจากเซ็นเซอร์ขาดหายไป

อุปสรรคในการติดตั้งอุปกรณ์เซ็นเซอร์ จากการสำรวจและการหารือจากเจ้าหน้าที่ไฟฟ้า ได้เลือกพิกัดที่จะติดตั้งเซ็นเซอร์ ที่เป็นจุดยุทธศาสตร์สำคัญในการเฝ้าระวังไฟฟ้า แต่ในพิกัดที่เลือกนั้นไม่มีระบบไฟฟ้า รวมถึงจุดเชื่อมต่ออินเทอร์เน็ตที่สามารถส่งข้อมูลออกมาได้ รวมไปถึงสัญญาณโลล่าจากเกตเวย์ที่ติดตั้งก็ไม่สามารถส่งไปถึงเนื่องจากมีแนวเขาและสิ่งกีดขวางอยู่จึงจำเป็นต้องมีการปรับเปลี่ยนแผนงานและเปลี่ยนจุดติดตั้งใหม่อยู่บ่อยครั้ง

5.6 แนวทางในการพัฒนาโครงการวิจัยในอนาคต

ทางคณะวิจัยมีแผนที่จะพัฒนาโมเดลตรวจจับไฟฟ้าและการคาดการณ์ค่าฝุ่นละอองในอนาคต ให้มีความถูกต้องมากขึ้น เนื่องด้วยข้อจำกัดของเวลาในการดำเนินโครงการและฤดูไฟฟ้าจะเกิดในช่วง เดือน มกราคม - เมษายน ทำให้ไม่สามารถใช้ข้อมูลทั้งหมดในการวิเคราะห์ได้ ดังนั้นทางคณะวิจัยฯ มีแผนงานที่จะดำเนินงานวิจัยต่อเนื่อง โดยจะใช้ข้อมูลจากเซ็นเซอร์ที่ติดตั้งไปแล้วกับ ฤดูไฟฟ้าที่จะเกิดขึ้น ในปี 2566 ซึ่งจะนำแนวทางในการวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้ดำเนินการไปแล้วในโครงการนี้มาพัฒนาต่อยอด

คณะวิจัยฯ มีแผนงานที่จะพัฒนาระบบสื่อสารแบบเมชด้วยเทคโนโลยีโลล่า (LoRa Mesh) ซึ่งสามารถขยายสัญญาณให้ครอบคลุมพื้นที่ให้มากขึ้น นอกจากจะสามารถขยายการติดตั้งเซ็นเซอร์ไปยังพื้นที่ห่างไกลได้แล้ว ทางคณะวิจัยฯ มีแผนการที่จะพัฒนาแอปพลิเคชันสำหรับการติดต่อสื่อสารในพื้นที่ป่า โดยใช้โครงข่ายของโลล่าที่ได้ติดตั้งไปแล้วร่วมกับ LoRa Mesh เพื่อที่จะให้ใช้ในการติดต่อสื่อสารระหว่างเจ้าหน้าที่ระหว่างปฏิบัติการดับไฟฟ้า

ทางคณะวิจัยฯ ได้วางแนวทางในการบริหารแพลตฟอร์มหลังสิ้นสุดโครงการ ไว้ดังนี้

- 1) ประสานงานกับหน่วยในพื้นที่ โดยมี สถานีควบคุมไฟฟ้าในแต่ละพื้นที่เป็นหน่วยงานหลัก ในการดูแลรักษาอุปกรณ์ที่ได้ดำเนินการติดตั้งไปแล้ว ทั้งนี้ได้มีการสร้างกลุ่มไลน์ในการติดตามสถานะของอุปกรณ์เซ็นเซอร์อยู่แล้วและมีแผนงานที่จะจัดประชุมอย่างน้อยปีละครั้งกับหน่วยงานที่เกี่ยวข้องเพื่อที่จะร่วมมือกันบำรุงรักษาแพลตฟอร์มให้ยั่งยืน
- 2) จัดทำคู่มือสำหรับการใช้งานแพลตฟอร์มและการบำรุงรักษาอุปกรณ์ให้อยู่ในสภาพดี

- 3) สร้าง community วัตถุประสงค์ ผ่าน แอปพลิเคชัน line ในพื้นที่ที่ติดตั้งเซ็นเซอร์ ซึ่งสมาชิกในกลุ่มจะได้รับข้อมูลข่าวสารและมีส่วนร่วมในการดูแลแพลตฟอร์ม
- 4) ทางห้องปฏิบัติการ intERLab AIT จะเป็นผู้ดูแลแพลตฟอร์มหลัก โดยมีหน้าที่บริหารจัดการระบบคลาวด์ให้ทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพรวมถึงทำหน้าที่ตรวจสอบแก้ไขอุปกรณ์เซ็นเซอร์ที่ได้รับความเสียหาย

บรรณานุกรม

- [1] J. P. S. Sundaram, W. Du and Z. Zhao, "A Survey on LoRa Networking: Research Problems, Current Solutions and Open Issues," in IEEE Communications Surveys & Tutorials. doi: 10.1109/COMST.2019.2949598
- [2] ปริมาณฝุ่นละอองในประเทศไทย, องค์กรกรีนพีซ
<https://www.greenpeace.org/thailand/publication/9099/city-ranking-first-half-2561/>
- [3] H. Wang and A. O. Fapojuwo, "A survey of enabling technologies of low power and long range machine-to-machine communications," IEEE Communications Surveys & Tutorials, vol. 19, no. 4, pp. 2621–2639, 2017.
- [4] A. Dongare, R. Narayanan, A. Gadre, A. Luong, A. Balanuta, S. Kumar, B. Iannucci, and A. Rowe, "Charm: Exploiting geographical diversity through coherent combining in low-power wide-area networks," in Proceedings of the International Conference on Information Processing in Sensor Networks, 2018, pp. 60–71.
- [5] J. C. Liando, A. Gamage, A. W. Tengourtius, and M. Li, "Known and unknown facts of lora: Experiences from a large-scale measurement study," ACM Transactions on Sensor Networks (TOSN), vol. 15, no. 2,
- [6] J. Peta ja ja rvi, K. Mikhaylov, R. Yasmin, M. Ha ma la inen, and J. linatti, "Evaluation of LoRa LPWAN technology for indoor remote health and wellbeing monitoring," International Journal of Wireless Information Networks, vol. 24, no. 2, pp. 153–165, 2017.
- [7] J. Haxhibeqiri, F. Van den Abeele, I. Moerman, and J. Hoebeke, "LoRa scalability: A simulation model based on interference measurements," Sensors, vol. 17, no. 6, p. 1193, 2017.
- [8] R. El Chall, S. Lahoud, and M. El Helou, "Loraicdcsnetwork: Radio propagation models and performance evaluation in various environments in lebanon," IEEE Internet of Things Journal, 2019.

- [9] D. Yim *et al.*, "An experimental LoRa performance evaluation in tree farm," *2018 IEEE Sensors Applications Symposium (SAS)*, Seoul, 2018, pp. 1-6, doi: 10.1109/SAS.2018.8336764.
- [10] L. Angrisani, P. Arpaia, F. Bonavolonta', M. Conti, and A. Liccardo, "LoRa protocol performance assessment in critical noise conditions," in *Proceedings of the International Forum on Research and Technologies for Society and Industry*, 2017, pp. 1–5.
- [11] สุณี รักษาเกียรติศักดิ์. Data Analytics of IoT-Sensors with R and Pentaho. กรุงเทพฯ: สมาคมศูนย์วิชาการ ไทย-ออสเตรเลีย; 2561.
- [12] Pentaho Cooperation. 2010. Getting Started with Pentaho Data Integration. Florida, US.
- [13] van der Werf, G. R., Randerson, J. T., Giglio, L., van Leeuwen, T. T., Chen, Y., Rogers, B. M., Mu, M., van Marle, M.J.E., Morton, D. C., Collatz, G. J., Yokelson, R. J. and Kasibhatla, R. S. 2017. Global fire emissions estimates during 1997–2016. *Open Access Earth System Science Data*, 9, 697–720. <https://doi.org/10.5194/essd-9-697-2017>
- [14] Wiedinmyer, C., Akagi, S.K., Yokelson, R.J., Emmons, L.K., Orlando, J.J., Soja, A.J., 2011. The Fire INventory from NCAR (FINN): a high resolution global model to estimate the emissions from open burning. *Geosci. Model Dev.* 4, 625–641. <https://doi.org/10.5194/gmd-4-625-2011>.
- [15] Kaiser, J. W., Heil, A., M. O. Andreae, M. O., Benedetti, A., Chubarova, N., Jones, L., Morcrette, J., Razinger, M., Schultz, M. G., Suttie, M., and van der Werf, G. R. 2002. Biomass burning emissions estimated with a global fire assimilation system based on observed fire radiative power. *Biogeosciences*, 9, 527–554. www.biogeosciences.net/9/527/2012/, doi:10.5194/bg-9-527-2012
- [16] Darmenov, A.S., da Silva, A., 2013. The Quick Fire Emissions Dataset (QFED) - Documentation of Versions 2.1, 2.2, and 2.4. 32 NASA Technical Report Series on Global Modeling and Data Assimilation.
- [17] Ichoku, C., Ellison, L., 2014. Global top-down smoke-aerosol emissions estimation using satellite fire radiative power measurements. *Atmos. Chem. Phys.* 14, 6643–6667. <https://doi.org/10.5194/acp-14-6643-2014>.

- [18] Liua, T., Mickleyb, L. J., Marlierc, M. E., DeFrieds, R. S. , Khane, M. F., Latiff, M. T., Karambelasg, A. 2020. Diagnosing spatial biases and uncertainties in global fire emissions inventories: Indonesia as regional case study. Remote Sensing of Environment 237 (2020) 111557.
- [19] Zennaro M., Rainone M., Pietrosemoli E. (2017) Radio Link Planning Made Easy with a Telegram Bot. In: Gaggi O., Manzoni P., Palazzi C., Bujari A., Marquez-Barja J. (eds) Smart Objects and Technologies for Social Good. GOODTECHS 2016. Lecture Notes of the Institute for Computer Sciences, Social Informatics and Telecommunications Engineering, vol 195. Springer, Cham
- [20] Digital universal particle concentration sensor, PMS7003 series data manual version 2.5 [ออนไลน์]. https://download.kamami.pl/p564008-PMS7003%20series%20data%20manua_English_V2.5.pdf [สืบค้นวันที่ 30 07 2564]
- [21] BME280 Combined humidity and pressure sensor BME-280 Data sheet, version 1.9, Nov 2020, [ออนไลน์]. <https://www.bosch-sensortec.com/media/boschsensortec/downloads/datasheets/bst-bme280-ds002.pdf> [สืบค้นวันที่ 30 07 2564]
- [22] Electrochemical CO Module (Model:ZE07-CO) User's Manual Zhengzhou Winsen Electronics Technology Co., Ltd , [ออนไลน์]. <https://www.winsen-sensor.com/d/files/PDF/Gas%20Sensor%20Module/CO%20Detection%20Module/ZE07%20CO%20Module%201.3V.pdf> [สืบค้นวันที่ 30 07 2564]
- [23] MH-Z16 Intelligent Infrared Gas Module User's Manual, Version 2.4, Date 2019.04.29, Zhengzhou Winsen Electronics Technology CO., LTD., [ออนไลน์]. <https://www.winsen-sensor.com/d/files/MH-Z16.pdf> [สืบค้นวันที่ 30 07 2564]
- [24] Sub-G Module Data Sheet CMWX1ZZABZ-TEMP, Murata (China) Investment Co., Ltd. [ออนไลน์]. https://wireless.murata.com/datasheet?/RFM/data/type_abz.pdf [สืบค้นวันที่ 30 07 2564]
- [25] LoRaWAN Specification v1.1 - LoRa Alliancea. [ออนไลน์]. url: https://loralliance.org/resource_hub/lorawan-specification-v1-1/ [สืบค้นวันที่ 30 07 2564]
- [26] Kerlink Wirnet iStation, [ออนไลน์] <https://www.kerlink.com/product/wirnet-istation/> [สืบค้นวันที่ 30 07 2564]

- [27] The Things Network. [ออนไลน์] : <https://www.thethingsnetwork.org/> [สืบค้นวันที่ 09 06 2564]
- [28] I-CUBE-LRWAN - LoRaWAN software expansion for STM32Cube (UM2073) - STMicro- electronics. url: <https://www.st.com/en/embedded-software/i-cube-lrwan.html> [สืบค้นวันที่ 09 06 2564]
- [29] RAK2245 Pi HAT WisLink LPWAN Concentrator Datasheet [ออนไลน์] <https://docs.rakwireless.com/api/render/?emulateScreenMedia=false&pdf.format=legal&url=https%3A%2F%2Fdocs.rakwireless.com%2FProduct-Categories%2FWisLink%2FRAK2245-Pi-HAT%2FDatasheet%2F> [สืบค้นวันที่ 30 07 2564]
- [30] The Things Stack for LoRaWAN. url: <https://www.thethingsindustries.com/docs/> [สืบค้นวันที่ 09 06 2564].
- [31] A technical overview of LoRa ® and LoRaWAN TM What is it? (2015). LoRa Alliance. (2015). A technical overview of LoRa ® and LoRaWAN TM What is it? <https://lora-alliance.org/wp-content/uploads/2020/11/what-is-lorawan.pdf>
- [32] ประกาศราชกิจจานุเบกษา เล่ม 134 ตอนพิเศษ 289, หน้า 51, เรื่อง มาตรฐานทางเทคนิคของ เครื่องโทรคมนาคมและอุปกรณ์ สำหรับเครื่องวิทยุคมนาคม ที่ไม่ใช่ประเภท Radio Frequency Identification: RFID ซึ่งใช้คลื่นความถี่ย่าน 920- 925 เมกะเฮิรตซ์, url: <http://www.ratchakitcha.soc.go.th/DATA/PDF/2560/E/289/51.PDF>, [สืบค้นวันที่ 11 มกราคม 2565]
- [33] LoRa Alliance (2021). RP2-1.0.3 LoRaWAN® Regional Parameters - LoRa Alliance®. Retrieved January 6, 2022. https://lora-alliance.org/resource_hub/rp2-1-0-3-lorawan-regional-parameters/
- [34] เว็บไซต์รายงานสถานการณ์และคุณภาพอากาศประเทศไทย จัดทำโดยกองจัดการคุณภาพอากาศ กรมควบคุม มลพิษ, <http://air4thai.pcd.go.th/webV2/>
- [35] Shrestha, R.M.; Kim Oanh, N.T.; Shrestha, R.P.; Rupakheti, M.; Rajbhandari, S.; Permadi, D.A.; Kanabkaew, T.; lyngararasan, M. Atmospheric Brown Cloud (ABC) Emission Inventory Manual; United Nations Environment Programme: Nairobi, Kenya, 2012.

- [36] Laing, J.R.; Jaffe, D.A.; Slavens, A.P.; Li, W.; Wang, W. Can $\Delta PM_{2.5}/\Delta CO$ and $\Delta NO_y/\Delta CO$ enhancement ratios be used to characterize the influence of wildfire smoke in urban areas? *Aerosol Air Qual. Res.* 2017, 17, 2413-2423.
- [37] Kanabkaew, T.; Mekbungwan, P.; Raksakietisak, S.; Kanchanasut, K. Detection of $PM_{2.5}$ plume movement from IoT ground level monitoring data. *Environ. Pollut.* 2019, 252, 543–552.
- [38] Mahajan, S.; Chen, L.-J.; Tsai, T.-C. Short-term $PM_{2.5}$ forecasting using exponential smoothing method: a comparative analysis. *Sensors.* 2018, 18, 3223
- [39] Phung, N.K.; Long, N.Q.; Tin, N.V.; Le, D.T.T. Development of a $PM_{2.5}$ forecasting system integrating low-cost sensors for Ho Chi Minh City, Vietnam. *Aerosol Air Qual. Res.* 2020, 20, 1454-1468.
- [40] Abirami, S.; Chitra, P.; Madhumitha, R.; Kesavan, S.R. Hybrid spatio-temporal deep learning framework for particulate matter ($PM_{2.5}$) concentration forecasting. *International Conference on Innovative Trends in Information Technology (ICITIIT)*. 2020, 1-6.
- [41] Moursi, A.S.; El-Fishawy, N.; Djahel, S.; Djahel, S.; Shouman, M.A. An IoT enabled system for enhanced air quality monitoring and prediction on the edge. *Complex Intell. Syst.* 2021.
- [42] NASA. 2022. Firms: Fire Information for Resource Management System. Retrieved August 18, 2022 from <https://firms.modaps.eosdis.nasa.gov>
- [43] Gabriele Ubert, Pierre Barritault, Maryse Fournier, Salim Boutami, Daphnée Jobert, Adrien Marchant, Julien Michelot, Paul Monsinjon, Pierre Lienhard, and Sergio Nicoletti. 2020. Miniature particulate matter counter and analyzer based on lens-free imaging of light scattering signatures with a holed image sensor. *Sensors and Actuators Reports* 2, 1 (2020), 100010. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2666053920300072>
- [44] Hai-Ying Liu, Philipp Schneider, Rolf Haugen, and Matthias Vogt. 2019. Performance Assessment of a Low-Cost $PM_{2.5}$ Sensor for a near Four-Month Period in Oslo, Norway. *Atmosphere* 10, 2 (2019). <https://www.mdpi.com/2073-4433/10/2/41>

- [45] Massaro, G.; Stiperski, I.; Pospichal, B.; Rotach, M.W. Accuracy of retrieving temperature and humidity profiles by ground-based microwave radiometry in truly complex terrain. *Atmospheric Measurement Techniques*. 2015, 8(8), 3355-3367.
- [46] Li, X.; Ma, Y.; Wang, Y.; Zhang, Y.; Liu, N.; Hong, Y.; Wei, W. Vertical distribution of particulate matter and its relationship with planetary boundary layer structure in Shenyang, Northeast China. *Aerosol and Air Quality Research*. 2019, 19(11), 2464-2476.
- [47] สำนักงาน กสทช., “รายงานผลการศึกษาความเป็นไปได้ในการขยายคลื่นความถี่ 920-925 MHz เพื่อรองรับเทคโนโลยีใหม่”, พ.ศ. 2563

ภาคผนวก ก
ตารางสรุปคุณสมบัติของอุปกรณ์เซ็นเซอร์

[เลขที่สัญญาฯรับทุน]

แบบ กทปส. ME-003

ตารางที่ 10 คุณสมบัติของเซ็นเซอร์ PM57003

พารามิเตอร์	ค่าวัด
Range of measurement	0.3~1.0 ; 1.0~2.5 ; 2.5~10 Micrometer (μm)
Counting Efficiency	50% @ 0.3 μm 98% @ $\geq 0.5 \mu\text{m}$
Effective Range (PM2.5 standard)	0~500 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
Maximum Range (PM2.5 standard)	$\geq 1000 \mu\text{g}/\text{m}^3$
Resolution	1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
Maximum Consistency Error (PM2.5 standard data)	$\pm 10\%$ @ 100~500 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ $\pm 10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ @ 0~100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
Standard Volume	0.1 Litre (L)
Single Response Time	< 1 Second (s)
Total Response Time	≤ 10 Second (s)
DC Power Supply	Typ:5.0 Min:4.5 Max: 5.5 Volt (v)
Active Current	≤ 100 Milliampere (mA)
Standby Current	≤ 200 Microampere (μA)
Interface Level	L < 0.8 @3.3 H > 2.7 @3.3 Volt (v)
Working Temperature Range	-10~+60 $^{\circ}\text{C}$
Working Humidity Range	0~99%
Storage Temperature Range	-40~+80 $^{\circ}\text{C}$
MTTF	≥ 3 Year (Y)
Physical Size	48x37x12 Millimeter (mm)

ตารางที่ 11 คุณสมบัติของเซ็นเซอร์ BME280

พารามิเตอร์	ค่าวัด
Operation range (full accuracy)	Pressure: 300...1100 hPa Temperature: -40...85°C
Supply voltage VDDIO	1.2 ... 3.6 V
Supply voltage VDD	1.71 ... 3.6 V
Interface	I ² C and SPI
Average current consumption (typ.) (1Hz data refresh rate)	1.8 μ A @ 1 Hz (H, T) 2.8 μ A @ 1 Hz (P, T) 3.6 μ A @ 1 Hz (H, P, T)
Average current consumption in sleep mode	0.1 μ A
Humidity sensor	
Response time ($\tau_{0-63\%}$)	1 s
Accuracy tolerance	$\pm 3\%$ relative humidity
Hysteresis	$\leq 2\%$ relative humidity
Pressure sensor	
RMS Noise	0.2Pa (equiv. to 1.7cm)
Sensitivity Error	$\pm 0.25\%$ (equiv. to 1m at 400m height change)
Temperature coefficient offset	$\pm 1.5\text{Pa/K}$ (equiv. to $\pm 12.6\text{cm}$ at 1 °C temperature change)

ตารางที่ 12 คุณสมบัติของเซ็นเซอร์ MH-Z16

พารามิเตอร์	ค่าวัด
Working voltage	4.5 V ~ 5.5V DC
Average current	<85mA
Interface level	3.3 V
Measuring range	0~5%vol
Output signal	UART
	PWM
	Analog output DAC (0.4~2V)
Preheat time	3mins
Response Time	T90< 30s
Working temperature	-10°C~ 50°C
Working humidity	0~95%RH(no condensation)
Size	97*20*17mm (L*W*H)
Weight	21 g
Lifespan	>5 years

ตารางที่ 13 คุณสมบัติ ZE07-CO

พารามิเตอร์	ค่าวัด
Working Voltage	5V~12V
Output Data	DAC (0.4~2V standard voltage output)
	UART Output (3V Electrical Level)
Warm up time	≤3 minutes
Response time	≤60 s
Resume time	≤60 s
Detection range	0~500 ppm
Resolution	0.1 ppm
Operating temperature	-10°C~55°C
Operating humidity	15% RH - 90% RH (No condensation)
Storage temperature	-10°C~55°C
Working life	3-5 years (in air)

ตารางที่ 14 คุณสมบัติโมดูล ABZ ของ Murata

พารามิเตอร์	ค่าวัด
Frequency	860-930MHz
Frequency MHz (min)	860MHz
Frequency MHz (max)	930MHz
Operating Temperature Range	-40 to +85
Chipset	Semtech (SX1276) + STM (STM32L)
Modulation	FSK, OOK and LoRa™ Modulation
Antenna	External
Sleep Clock	No
System Clock	Integrated 32MHz (TCXO, frequency error = ±2ppm); 32.768KHz (frequency error = ±20ppm)
Transmit Power	Up to +18.5dBm
Operating Temperature °C (min)	-40
Operating Temperature °C (max)	85
Supply Voltage (Vdc)	3.3 V dc
Supply Voltage min	2.2V for VDD_MCU, VDD_RF, VDD_TCXO
Supply Voltage max	3.6V for VDD_MCU, VDD_RF, VDD_TCXO
Receiver Sensitivity	-135.5dBm @ 1% PER, 125kHz BW, SF=12
Transmit Mode Current	128mA @ 20dBm setting
Receive Mode Current	21.5mA @ 125kHz BW
Technology	LPWA
Host Interface	I2C/ UART/ USB/ SPI
FCC/IC Certified	FCC/IC "Reference" Certified
RoHs Compliant	Yes
Certification	Compliant with RoHS directive; LoRaWAN Certified

ภาคผนวก ข
ตารางแสดงค่าเมทริกซ์สหสัมพันธ์ที่ใช้ในการวิเคราะห์การเคลื่อนที่ของ
กลุ่มหมอกควัน PM2.5

ตารางที่ 15 เมทริกซ์สหสัมพันธ์ของ ความเข้มข้น PM2.5 ที่เวลาปัจจุบันและความเข้มข้นของเวลาก่อน
หน้าใน 1MS 2TS 3MG และ 4PW

	1MSPM2.5	1MSPM2.5lag1	1MSPM2.5lag2	1MSPM2.5lag3	1MSPM2.5lag4
1MSPM2.5	1	0.9998076	0.9994215	0.9987388	0.997855
1MSPM2.5lag1	0.9998076	1	0.9997952	0.9993885	0.9987583
1MSPM2.5lag2	0.9994215	0.9997952	1	0.9998555	0.9994547
1MSPM2.5lag3	0.9987388	0.9993885	0.9998555	1	0.9998583
1MSPM2.5lag4	0.997855	0.9987583	0.9994547	0.9998583	1
2TSPM2.5	0.9194376	0.9192385	0.9184548	0.9179461	0.9176905
2TSPM2.5lag1	0.9199064	0.9197516	0.9189834	0.9185092	0.9183075
2TSPM2.5lag2	0.9202985	0.92021	0.9194877	0.9190788	0.9189495
2TSPM2.5lag3	0.9204556	0.9204295	0.9197474	0.9193978	0.9193374
2TSPM2.5lag4	0.9205055	0.9205563	0.919913	0.9196322	0.9196423
3MGPM2.5	0.8339462	0.8369007	0.8375488	0.8392348	0.8417948
3MGPM2.5lag1	0.8319469	0.8350079	0.8358215	0.8376558	0.8403589
3MGPM2.5lag2	0.8302198	0.8333971	0.8343706	0.8363615	0.8392143
3MGPM2.5lag3	0.8282983	0.8316041	0.8327497	0.8349093	0.8379276
3MGPM2.5lag4	0.826313	0.8297313	0.8310345	0.8333445	0.8365036
4PWPM2.5	0.7577134	0.7549396	0.7551686	0.7537055	0.7523822
4PWPM2.5lag1	0.7588357	0.7560704	0.7562526	0.7547551	0.7534448
4PWPM2.5lag2	0.7609253	0.7581611	0.7582831	0.7567483	0.7554147
4PWPM2.5lag3	0.7623591	0.759576	0.7596125	0.7580117	0.7566285
4PWPM2.5lag4	0.7698446	0.7670727	0.767001	0.7654059	0.7640073

ตารางที่ 11 (ต่อ)

	2TSPM2.5	2TSPM2.5lag1	2TSPM2.5lag2	2TSPM2.5lag3	2TSPM2.5lag4
1MSPM2.5	0.9194376	0.9199064	0.9202985	0.9204556	0.9205055
1MSPM2.5lag1	0.9192385	0.9197516	0.92021	0.9204295	0.9205563
1MSPM2.5lag2	0.9184548	0.9189834	0.9194877	0.9197474	0.919913
1MSPM2.5lag3	0.9179461	0.9185092	0.9190788	0.9193978	0.9196322
1MSPM2.5lag4	0.9176905	0.9183075	0.9189495	0.9193374	0.9196423
2TSPM2.5	1	0.9997415	0.9989827	0.9977942	0.9961469
2TSPM2.5lag1	0.9997415	1	0.9997383	0.9990144	0.9978093
2TSPM2.5lag2	0.9989827	0.9997383	1	0.9997554	0.999021
2TSPM2.5lag3	0.9977942	0.9990144	0.9997554	1	0.999747
2TSPM2.5lag4	0.9961469	0.9978093	0.999021	0.999747	1
3MGPM2.5	0.7918637	0.7967878	0.8014606	0.8065422	0.8115496
3MGPM2.5lag1	0.7882819	0.793221	0.7979206	0.8030403	0.8080899
3MGPM2.5lag2	0.7851465	0.7900761	0.7947886	0.7999336	0.8050189
3MGPM2.5lag3	0.7821459	0.7870734	0.7918136	0.7969884	0.8021085
3MGPM2.5lag4	0.7787463	0.7836751	0.7884522	0.7936648	0.7988291
4PWPM2.5	0.7162478	0.712015	0.7071401	0.7029458	0.6985222
4PWPM2.5lag1	0.7197242	0.7154295	0.7105277	0.7062592	0.7017525
4PWPM2.5lag2	0.7241229	0.7198714	0.7150132	0.7107294	0.7061827
4PWPM2.5lag3	0.727843	0.7236541	0.7188601	0.7145815	0.7100172
4PWPM2.5lag4	0.7377558	0.7336001	0.7288628	0.7246077	0.720058

ตารางที่ 11 (ต่อ)

	3MGPM2.5	3MGPM2.5lag1	3MGPM2.5lag2	3MGPM2.5lag3	3MGPM2.5lag4
1MSPM2.5	0.8339462	0.8319469	0.8302198	0.8282983	0.826313
1MSPM2.5lag1	0.8369007	0.8350079	0.8333971	0.8316041	0.8297313
1MSPM2.5lag2	0.8375488	0.8358215	0.8343706	0.8327497	0.8310345
1MSPM2.5lag3	0.8392348	0.8376558	0.8363615	0.8349093	0.8333445
1MSPM2.5lag4	0.8417948	0.8403589	0.8392143	0.8379276	0.8365036
2TSPM2.5	0.7918637	0.7882819	0.7851465	0.7821459	0.7787463
2TSPM2.5lag1	0.7967878	0.793221	0.7900761	0.7870734	0.7836751
2TSPM2.5lag2	0.8014606	0.7979206	0.7947886	0.7918136	0.7884522
2TSPM2.5lag3	0.8065422	0.8030403	0.7999336	0.7969884	0.7936648
2TSPM2.5lag4	0.8115496	0.8080899	0.8050189	0.8021085	0.7988291
3MGPM2.5	1	0.9997534	0.9990753	0.997895	0.9962907
3MGPM2.5lag1	0.9997534	1	0.9997618	0.9990061	0.9977758
3MGPM2.5lag2	0.9990753	0.9997618	1	0.9997243	0.9989244
3MGPM2.5lag3	0.997895	0.9990061	0.9997243	1	0.9997044
3MGPM2.5lag4	0.9962907	0.9977758	0.9989244	0.9997044	1
4PWPM2.5	0.6315485	0.6330009	0.6343341	0.6351226	0.6368378
4PWPM2.5lag1	0.6298189	0.6312391	0.6325489	0.6333202	0.6349638
4PWPM2.5lag2	0.6284125	0.629736	0.6309766	0.6316952	0.6332395
4PWPM2.5lag3	0.627444	0.6286374	0.6297635	0.6303894	0.6317666
4PWPM2.5lag4	0.6347963	0.6358687	0.6368959	0.6374811	0.6387408

ตารางที่ 11 (ต่อ)

	4PWPM2.5	4PWPM2.5lag1	4PWPM2.5lag2	4PWPM2.5lag3	4PWPM2.5lag4
1MSPM2.5	0.7577134	0.7588357	0.7609253	0.7623591	0.7698446
1MSPM2.5lag1	0.7549396	0.7560704	0.7581611	0.759576	0.7670727
1MSPM2.5lag2	0.7551686	0.7562526	0.7582831	0.7596125	0.767001
1MSPM2.5lag3	0.7537055	0.7547551	0.7567483	0.7580117	0.7654059
1MSPM2.5lag4	0.7523822	0.7534448	0.7554147	0.7566285	0.7640073
2TSPM2.5	0.7162478	0.7197242	0.7241229	0.727843	0.7377558
2TSPM2.5lag1	0.712015	0.7154295	0.7198714	0.7236541	0.7336001
2TSPM2.5lag2	0.7071401	0.7105277	0.7150132	0.7188601	0.7288628
2TSPM2.5lag3	0.7029458	0.7062592	0.7107294	0.7145815	0.7246077
2TSPM2.5lag4	0.6985222	0.7017525	0.7061827	0.7100172	0.720058
3MGPM2.5	0.6315485	0.6298189	0.6284125	0.627444	0.6347963
3MGPM2.5lag1	0.6330009	0.6312391	0.629736	0.6286374	0.6358687
3MGPM2.5lag2	0.6343341	0.6325489	0.6309766	0.6297635	0.6368959
3MGPM2.5lag3	0.6351226	0.6333202	0.6316952	0.6303894	0.6374811
3MGPM2.5lag4	0.6368378	0.6349638	0.6332395	0.6317666	0.6387408
4PWPM2.5	1	0.99909	0.9976017	0.9951643	0.9930404
4PWPM2.5lag1	0.99909	1	0.9994369	0.9979139	0.9952706
4PWPM2.5lag2	0.9976017	0.9994369	1	0.9994639	0.9969358
4PWPM2.5lag3	0.9951643	0.9979139	0.9994639	1	0.9977465
4PWPM2.5lag4	0.9930404	0.9952706	0.9969358	0.9977465	1

ภาคผนวก ค
ตารางแสดงจุดติดตั้งเซ็นเซอร์

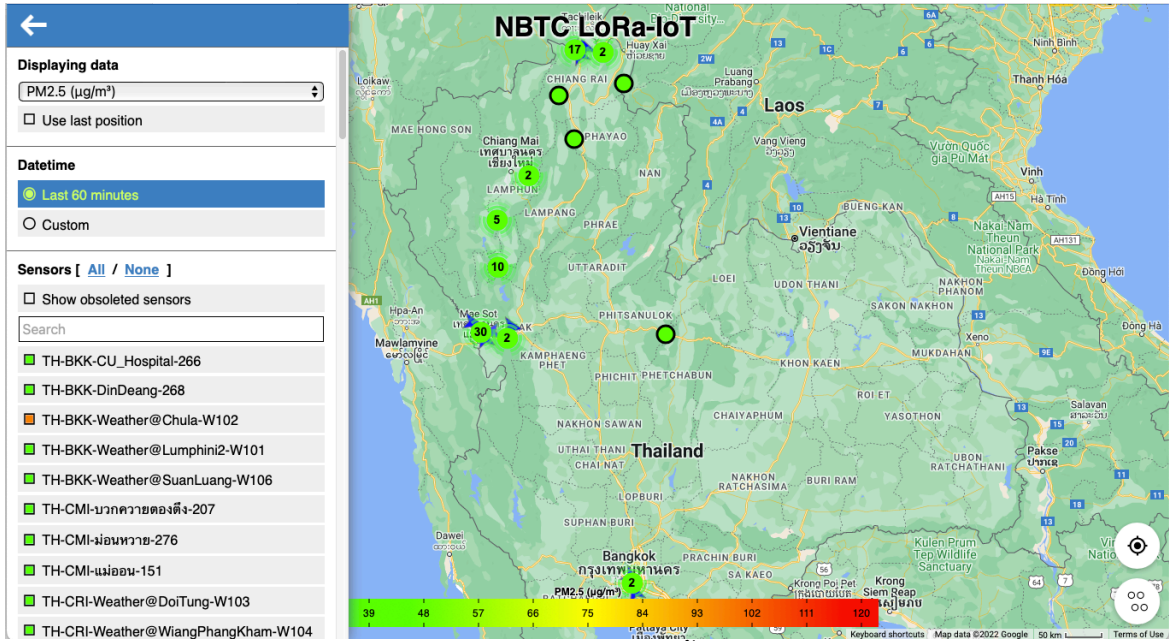
ตารางที่ 16 จุดติดตั้งอุปกรณ์เซ็นเซอร์

จังหวัด	สถานที่	ID
BKK	CU_Hospital	266
BKK	DinDeang	268
BKK	Weather@Chula	W102
BKK	Weather@Lumphini2	W101
BKK	Weather@SuanLuang	W106
CMI	บวกควายตองตึง	207
CMI	ม่อนหวาย	276
CMI	แม่ออน	151
CRI	Weather@DoiTung	W103
CRI	Weather@WiangPhangKham	W104
CRI	ขุนแจ	191
CRI	ควบคุมไฟฟ้า เชียงแสน	163
CRI	ฐานน้ำปิง	5014
CRI	ฐานบ้านป่าชางนาเงิน	5031
CRI	ตชด.ศรีสมวงศ์	113
CRI	ผาฮี้	160
CRI	ภูชี้ฟ้า	198
CRI	รพสต.เกาะช้าง	5018
CRI	รร.บ้านป่าชางนาเงิน	5015
CRI	รร.วัดถ้ำปลา	161
CRI	รักษาป่า ชร4 เชียงของ	162
CRI	ศ.เด็กเล็กบ้านผาหมี	5017
CRI	ศูนย์ฯไฟฟ้าเชียงราย	114
CRI	ส.ควบคุมไฟฟ้าดอยตุง	111
CRI	อบต.จันจว้า	123
CRI	อบต.ท่าสูด	172
CRI	อบต.ป่าตึง	171
CRI	อบต.ศรีดอนมูล	166
CRI	อบต.ศรีเมืองชุม	121

จังหวัด	สถานที่	ID
CRI	อบต.ห้วยไคร้	124
CRI	อบต.แม่ฟ้าหลวง	214
CRI	อบต.แม่สลองนอก	170
CRI	อบต.แม่สลองใน	128
CRI	เทศบาลตำบลแม่ไร่	254
CRI	เทศบาลเวียงพางคำ	159
CRI	เทศบาลแม่คำ	167
LPG	แม่ทะ	133
LPG	แม่พริก	134
LPN	จอมปลวกทำบุญ	220
LPN	ตาเดโต	215
LPN	บ้านก้อ	5010
LPN	บ้านผาด้ายเหนือ	5009
LPN	ป่าไม้ลำพูน	202
LPN	ภูห้วยปู	222
LPN	รร.บ้านผาด้าย	405
LPN	หน่วยพิทักษ์ มป.6	5012
LPN	หนองมะลือ	5008
LPN	ห้วยฟ้าผ่า	5005
LPN	อช.แม่ปิง	406
LPN	อบต.แม่ลาน	5007
LPN	เลวา	230
LPN	แก่งก้อ	5004
LPN	ไฟฟ้าแม่ปิง	5006
NAN	ทุ่งช้าง	135
PNB	ศ.ทุ่งแสงหลวง	109
PYO	สถานีควบคุมไฟฟ้าพะเยา	197
PYO	สถานีควบคุมไฟฟ้าแม่ปืม	193
TAK	Maesot	132
TAK	THNICA	251

จังหวัด	สถานที่	ID
TAK	Weather@BanKokKo	W107
TAK	Weather@MaeKaSa	W003
TAK	Weather@MaeKeudLuang	W111
TAK	Weather@MaeKuedSamTha	W109
TAK	Weather@RimMoei	W001
TAK	Weather@THNICA	W100
TAK	Weather@WatTumPhoThong	W108
TAK	คลองแม่กี้ดหลวง	5013
TAK	บ้านโกกโก่	196
TAK	ม่อนซิลส์	413
TAK	รพสต.แม่กี้ดสามท่า	5027
TAK	รร.ชุมชนบ้านพบพระ	246
TAK	รร.บ้านมูเซอ	262
TAK	รร.บ้านวังตะเคียน	238
TAK	รร.บ้านวังผา	256
TAK	รร.บ้านห้วยกระโหลก	236
TAK	รร.บ้านเจดีย์ไค้ะ	250
TAK	รร.บ้านแม่กี้ดหลวง	129
TAK	รร.บ้านแม่กี้ดหลวง(old)	10
TAK	รร.บ้านโกนเกน	247
TAK	รร.ปางล้าน	240
TAK	รร.แม่กี้ดสามท่า	409
TAK	รร.แม่กี้ดหลวงกัญไชย	416
TAK	รร.แม่ตาวกลาง	243
TAK	รร.แม่ปะวิทยาคม	180
TAK	รร.ไทยรัฐวิทยา61	245
TAK	ริมเมย	145
TAK	วัดดอนสว่าง	410
TAK	สวนมูทิตา	412
TAK	อบต.พะวอ	239

จังหวัด	สถานที่	ID
TAK	เทคนิคแม่สอด	241
TAK	แม่กาษา	118
TAK	แม่กาษา	130
TAK	แม่กาษา	131
TAK	แม่กาษา	146
TAK	แม่กาษา	169
TAK	แม่กาษา	173
TAK	แม่กาษา	174
TAK	แม่กาษา	177
TAK	แม่กาษา	181
TAK	แม่กาษา	183
TAK	แม่กาษา	186
TAK	แม่กาษา	188
TAK	แม่กาษา	242
TAK	แม่กาษา	260
TAK	แม่กาษา	267
TAK	แม่กี้ดหลวง	178
TAK	ไทยสามัคคี	179
TAK	ไทยสามัคคี(old)	15



รูปที่ 106 แสดงภาพรวมของอุปกรณ์เซ็นเซอร์ที่ติดตั้งไปแล้วบนแพลตฟอร์ม LoRaIoT



กองทุนวิจัยและพัฒนากิจการกระจายเสียง กิจการโทรทัศน์ และกิจการโทรคมนาคม เพื่อประโยชน์สาธารณะ
(สำนักงาน กสทช.)