

การวิเคราะห์สารมลพิษที่เกี่ยวข้องและสร้างแบบจำลองสำหรับประมาณค่าความเข้มข้น ของฝุ่น $PM_{2.5}$ ด้วยข้อมูลภาพถ่ายเทียม ในภาคเหนือตอนบนของประเทศไทย

Analysis of Related Air Pollutants and Model for Estimating $PM_{2.5}$ Concentration

Using Satellite Images in The Upper Northern of Thailand

โชติ วีระกุล* และ อริศรา เจริญปัญญาเนตร

Chote Weerakul* and Arisara Charoenpanyanet

ภาควิชาภูมิศาสตร์ คณะสังคมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ประเทศไทย

Department of Geography, Faculty of Social Sciences, Chiang Mai University, Thailand

Received : 8 February 2025, Received in revised form : 17 March 2025, Accepted : 19 March 2025

Available online : 11 April 2025

บทคัดย่อ

วัตถุประสงค์และที่มา : มลพิษทางอากาศ เป็นภาวะที่อากาศมีการปนเปื้อนของสารหรือสิ่งปนเปื้อนปริมาณมาก ในระยะเวลาที่ยาวนานมากพอจนเกิดอันตรายต่อสิ่งมีชีวิต สิ่งปนเปื้อนเหล่านี้อาจอยู่ในรูปของแข็ง ของเหลว หรือก๊าซ สารมลพิษทางอากาศที่ส่งผลกระทบต่อสุขภาพอนามัยของมนุษย์มีหลายชนิด เช่น ฝุ่นละอองขนาดเล็ก (PM) ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์ (NO_2) ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO_2) สารตะกั่ว (Lead, Pb) ก๊าซโอโซน (O_3) และสารอินทรีย์ระเหยง่าย การอยู่ในสภาพแวดล้อมที่มีมลพิษทางอากาศทำให้เกิดความเสี่ยงในการเกิดโรคภัยเรื้อรังตามมา เช่น โรคระบบทางเดินหายใจ และโรคระบบหัวใจหลอดเลือด การตรวจวัดคุณภาพอากาศในระดับภาคพื้นดินของประเทศไทยยังคงมีข้อจำกัดหลายประการ เช่น จำนวนสถานีตรวจวัดที่มีจำกัดและความครอบคลุมที่ไม่ทั่วถึงในหลาย ๆ พื้นที่ โดยเฉพาะในพื้นที่ห่างไกลหรือชนบทที่ไม่มีการติดตั้งสถานีตรวจวัด อาจทำให้เกิดผลเสียต่อประชาชนกลุ่มเปราะบางในด้านการป้องกันสุขภาพ โดยลักษณะของอนุภาคฝุ่นละอองขนาดเล็ก คาร์บอน และมลพิษทางอากาศมีคุณสมบัติในการดูดกลืนและสะท้อนรังสีจากดวงอาทิตย์ และมีเพียงบางส่วนเท่านั้นที่สามารถเดินทางมาถึงพื้นโลกได้ จึงสามารถประยุกต์ใช้ค่าความลึกเชิงแสงของละอองลอย ในการตรวจสอบปริมาณรังสีที่มาจากดวงอาทิตย์ที่ได้รับผลกระทบจากอนุภาคแขวนลอยในอากาศก่อนจะเดินทางมายังโลก แสดงความสัมพันธ์ของสัดส่วนอนุภาคที่วัดได้เหนือพื้นดินในแนวตั้งกับค่าอนุภาคในบริเวณพื้นผิวดิน การศึกษาครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของฝุ่น $PM_{2.5}$ กับมลพิษทางอากาศที่เกี่ยวข้องในพื้นที่ภาคเหนือตอนบนของประเทศไทยและสร้างแบบจำลองสำหรับการประมาณค่าสารมลพิษทางอากาศโดยใช้ข้อมูลภาพถ่ายเทียมรายวัน ตั้งแต่ มกราคม พ.ศ.2557 ถึง ธันวาคม พ.ศ.2566 จำนวน 2,721 ภาพ และแบ่งผลการศึกษาเปรียบเทียบเป็นรายฤดูกาลเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพและความแม่นยำของแบบจำลอง การนำเทคโนโลยีรีโมทเซนซิงมาประยุกต์ใช้งานไม่เพียงช่วยเพิ่มความครอบคลุมในการตรวจวัดคุณภาพอากาศ แต่ยังเป็นการสนับสนุนการวางแผน

เชิงนโยบาย การวิจัย และการจัดการด้านสิ่งแวดล้อมในระยะยาว ทำให้สามารถรับมือกับปัญหามลพิษทางอากาศได้อย่างมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น

วิธีดำเนินการวิจัย : ข้อมูลที่ใช้ในการศึกษาประกอบด้วย 1) ข้อมูลค่าความลึกเชิงแสงของละอองลอย (AOD) จากผลิตภัณฑ์ MCD19A2v061 เป็นข้อมูลที่ได้จากเซนเซอร์ MODIS บนดาวเทียม Terra และ Aqua ใช้สำหรับวิเคราะห์ปริมาณละอองลอยในชั้นบรรยากาศ และ 2) ข้อมูลการตรวจวัดภาคพื้นดินของฝุ่น $PM_{2.5}$ และสารมลพิษทางอากาศที่เกี่ยวข้อง ได้แก่ ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์ (NO_2) และก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO_2) จากกองจัดการคุณภาพอากาศและเสียง กรมควบคุมมลพิษ ในส่วนของการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของฝุ่น $PM_{2.5}$ กับมลพิษทางอากาศที่เกี่ยวข้อง ใช้ข้อมูลการตรวจวัดภาคพื้นดินมาวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรที่ละคู่ด้วยสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เพียร์สัน (Pearson correlation) และการสร้างแบบจำลองใช้ข้อมูลการตรวจวัดภาคพื้นดินของฝุ่น $PM_{2.5}$ และสารมลพิษทางอากาศแต่ละชนิดมาวิเคราะห์ร่วมกับค่า AOD ด้วยแบบจำลองจากสมการถดถอย 6 แบบ ได้แก่ แบบเส้นตรง (Linear model) แบบลอการิทึม (Logarithmic model) แบบควอดราติกส์ (Quadratic model) แบบคิวบิก (Cubic model) แบบเลขยกกำลัง (Power model) และแบบเอ็กโปเนนเชียล (Exponential model) เพื่อหาสมการที่ดีที่สุด หลังจากนั้นดำเนินการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง (Validation) โดยนำค่าความเข้มข้นของฝุ่น $PM_{2.5}$ และสารมลพิษทางอากาศที่ประมาณค่าด้วยแบบจำลอง (Estimated) มาเปรียบเทียบกับค่าความเข้มข้นของฝุ่น $PM_{2.5}$ และสารมลพิษทางอากาศจากสถานีตรวจวัดภาคพื้นดิน (Observed)

ผลการวิจัย : ผลการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างฝุ่น $PM_{2.5}$ กับมลพิษทางอากาศที่เกี่ยวข้อง ได้แก่ ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์ (NO_2) และก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO_2) ด้วยการวิเคราะห์สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เพียร์สัน (Pearson correlation) แสดงให้เห็นความแตกต่างของความสัมพันธ์ตามช่วงฤดูกาล โดยความเข้มข้นของฝุ่น $PM_{2.5}$ กับก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์มีความสัมพันธ์สูงสุดในช่วงฤดูร้อน ($R^2 = 0.789$) ขณะที่ในช่วงฤดูหนาวมีความสัมพันธ์ปานกลาง ($R^2 = 0.560$) และในช่วงฤดูฝนมีความสัมพันธ์ต่ำที่สุด ($R^2 = 0.124$) สำหรับความเข้มข้นของฝุ่น $PM_{2.5}$ กับก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์และก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ พบความสัมพันธ์ปานกลางในช่วงฤดูหนาว ($R^2 = 0.501$ และ $R^2 = 0.395$ ตามลำดับ) ส่วนในช่วงฤดูร้อนและฤดูฝนพบความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของฝุ่น $PM_{2.5}$ กับก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์และก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ต่ำที่สุด ($R^2 = 0.103$, $R^2 = 0.018$ และ $R^2 = 0.002$, $R^2 = 0.001$ ตามลำดับ) ผลการสร้างแบบจำลองพบว่าข้อมูลการตรวจวัดภาคพื้นดินของฝุ่น $PM_{2.5}$ และก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์มีความสัมพันธ์แบบคิวบิก (Cubic model) กับค่า AOD โดยแบบจำลองในช่วงฤดูร้อนมีความเหมาะสมสูงที่สุดด้วยค่า $R^2 = 0.923$ และ $R^2 = 0.823$ ตามลำดับ การประเมินประสิทธิภาพของแบบจำลองสำหรับประมาณค่าความเข้มข้นของฝุ่น $PM_{2.5}$ มีความถูกต้องรวมร้อยละ 92.5 ส่วนการประมาณค่าความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์มีความถูกต้องรวมร้อยละ 80 เมื่อพิจารณาแนวโน้มความเข้มข้นรายเดือนระหว่างค่าที่ได้จากการประมาณด้วยแบบจำลองกับค่าจริงจากการตรวจวัดที่สถานี พบว่าค่าความเข้มข้นของทั้งสองชุดข้อมูลมีแนวโน้มใกล้เคียงกัน

สรุปผลการวิจัย : การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างฝุ่น $PM_{2.5}$ และก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์พบว่ามีความสัมพันธ์ระหว่างกันสูงที่สุดในช่วงฤดูร้อน เนื่องจากการเผาไหม้ในพื้นที่เกษตรกรรมหรือการเกิดไฟป่าที่เป็นสาเหตุหลักของการเกิดมลพิษทางอากาศที่มักเกิดในช่วงฤดูร้อนในพื้นที่ภาคเหนือตอนบนของประเทศไทย ในช่วงฤดูหนาวพบความสัมพันธ์ปานกลาง และในช่วงฤดูฝนพบความสัมพันธ์ต่ำที่สุด ส่วนค่าความเข้มข้นของฝุ่น $PM_{2.5}$ กับก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์ และค่าความเข้มข้นของฝุ่น $PM_{2.5}$ กับก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์พบว่ามีความสัมพันธ์ปานกลางในช่วงฤดูหนาว เนื่องจากอิทธิพลของปรากฏการณ์อุณหภูมิมรสที่กักเก็บมลพิษเอาไว้ ส่วนในช่วงฤดูร้อนและฤดูฝนพบว่ามีความสัมพันธ์ที่ต่ำมาก โดยเฉพาะในช่วงฤดูฝนที่มีปริมาณน้ำฝนช่วยลดความเข้มข้นของมลพิษทางอากาศผ่านกระบวนการชะล้างมลพิษ (Wet Deposition) พื้นที่ภาคเหนือตอนบนของประเทศไทยมักเผชิญปัญหามลพิษทางอากาศรุนแรง โดยเฉพาะค่าฝุ่น $PM_{2.5}$ ที่สูงเกินค่ามาตรฐานคุณภาพอากาศที่กำหนด โดยเฉพาะในช่วงเดือนกุมภาพันธ์ถึงพฤษภาคมมลพิษทางอากาศในช่วงเวลาดังกล่าวอยู่ในระดับที่เริ่มมีผลกระทบต่อสุขภาพถึงระดับที่มีผลกระทบต่อสุขภาพและอาจส่งผลกระทบต่อการศึกษาสุขภาพทั้งในระยะสั้นและระยะยาว ในการศึกษาครั้งนี้ได้พัฒนาแบบจำลองสำหรับประมาณค่าความเข้มข้นของฝุ่น $PM_{2.5}$ และมลพิษทางอากาศที่เกี่ยวข้อง โดยใช้ค่าความลึกเชิงแสงของละอองลอย (AOD) ร่วมกับข้อมูลการตรวจวัดคุณภาพอากาศจากสถานีตรวจวัดคุณภาพอากาศภาคพื้นดิน ผลการศึกษาพบว่าแบบจำลองที่ได้เมื่อนำมาวิเคราะห์ผ่านภาพถ่ายดาวเทียมมีความแม่นยำสูงสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับพื้นที่ที่ไม่มีสถานีตรวจวัดคุณภาพอากาศภาคพื้นดิน ซึ่งเป็นประโยชน์กับหน่วยงานที่เกี่ยวข้องสามารถดำเนินมาตรการป้องกันและแก้ไขปัญหามลพิษทางอากาศได้อย่างมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น

คำสำคัญ : ค่าความลึกเชิงแสงของละอองลอย ; ฝุ่น $PM_{2.5}$; สารมลพิษทางอากาศ ; ภาพดาวเทียม ; แบบจำลอง

Abstract

Background and Objectives : Air pollution is a condition in which the air is contaminated with pollutants or contaminants in large quantities over a prolonged period, posing a threat to living organisms. These contaminants can exist in solid, liquid, or gaseous forms. Various air pollutants adversely affect human health, including fine particulate matter (PM), carbon monoxide (CO), nitrogen dioxide (NO_2), sulfur dioxide (SO_2), lead (Pb), ozone (O_3), and volatile organic compounds (VOCs). Being in an environment with air pollution increases the risk of developing serious diseases, such as respiratory diseases and cardiovascular diseases. Ground-based air quality monitoring in Thailand still faces several limitations, such as a limited number of monitoring stations and insufficient coverage in many areas, particularly in remote or rural regions where no stations are installed. This lack of coverage may negatively impact vulnerable populations in terms of health protection. Due to the nature of fine particulate matter, smoke, and air pollutants, these particles have the ability to absorb and scatter solar radiation, allowing only a portion of the radiation to reach the Earth's surface. As a result, aerosol optical depth (AOD) can be applied to assess the amount of solar radiation affected by airborne particles before reaching the Earth. AOD represents the

relationship between the proportion of particles measured vertically above the ground and the concentration of particles at the surface level. This study aims to analyze the relationship between $PM_{2.5}$ concentrations and related air pollutants in the upper northern region of Thailand and to develop a model for estimating air pollutant concentrations using daily satellite imagery from January 2014 to December 2023, totaling 2,721 images. The study compares results across different seasons to enhance the model's efficiency and accuracy. The application of remote sensing technology not only improves air quality monitoring coverage but also supports policy planning, research, and long-term environmental management. This approach enables more effective responses to air pollution issues, contributing to better air quality management strategies.

Methodology : Data used in this study were; 1) Aerosol Optical Depth (AOD) data from the MCD19A2v061 product, obtained from the MODIS sensor onboard the Terra and Aqua satellites, which is used to analyze atmospheric aerosol levels; and 2) Ground-based measurements of $PM_{2.5}$ and associated air pollutants, including carbon monoxide (CO), nitrogen dioxide (NO_2), and sulfur dioxide (SO_2), sourced from the Air Quality and Noise Management Bureau, Pollution Control Department. The relationship between $PM_{2.5}$ concentrations and related air pollutants was examined using Pearson correlation analysis. Additionally, six regression models, including linear, logarithmic, quadratic, cubic, power, and exponential, were applied to determine the best-fit equation by incorporating AOD data with ground-based measurements of $PM_{2.5}$ and air pollutants. After that, model validation was conducted by comparing the estimated concentrations of $PM_{2.5}$ and air pollutants with the observed concentrations from ground-based monitoring stations.

Main Results : The study found seasonal variations in the correlation between $PM_{2.5}$ and air pollutants. $PM_{2.5}$ and CO had the highest correlation in summer ($R^2 = 0.789$), moderate correlation in winter ($R^2 = 0.560$), and the lowest correlation in the rainy season ($R^2 = 0.124$). The correlation between $PM_{2.5}$ and NO_2 , as well as SO_2 , was moderate in winter ($R^2 = 0.501$ and $R^2 = 0.395$, respectively), while the lowest correlations were observed in summer and the rainy season ($R^2 = 0.103$, $R^2 = 0.018$ for NO_2 ; $R^2 = 0.002$, $R^2 = 0.001$ for SO_2 , respectively). The model results indicated that $PM_{2.5}$ and CO ground-based measurements exhibited a cubic relationship with AOD data. The summer season model demonstrated the highest accuracy, with R^2 values of 0.923 for $PM_{2.5}$ and 0.823 for CO. The model's estimation of $PM_{2.5}$ concentration achieved an overall accuracy of 92.5%, while CO concentration estimation reached 80% accuracy. A comparison of the monthly concentration trends between the model estimates and ground station observations showed an agreement between the two datasets.

Conclusions : The study highlights the seasonal variation in the correlation between $PM_{2.5}$ and air pollutants, with the highest correlation between $PM_{2.5}$ and CO occurring in summer due to biomass burning and forest fires, which

are major sources of air pollution in northern Thailand. A moderate correlation was observed in winter, while the lowest correlation was found in the rainy season. The relationship between $PM_{2.5}$ and NO_2 , as well as SO_2 , was moderate in winter due to the influence of temperature inversion, which traps pollutants. However, in summer and the rainy season, the correlations were very low, especially during the rainy season, when precipitation helps reduce pollutant concentrations through wet deposition. Northern Thailand frequently experiences severe air pollution, particularly with $PM_{2.5}$ levels exceeding air quality standards from February to May. During this period, air pollution reaches levels that pose health risks, potentially causing both short-term and long-term health effects. This study developed a model to estimate $PM_{2.5}$ concentrations and associated air pollutants using aerosol optical depth (AOD) data combined with ground-based air quality monitoring data. The findings indicate that the model, when applied to satellite imagery, achieves high accuracy and can be used in areas lacking ground-based air quality monitoring stations. This provides valuable support for relevant agencies in implementing more effective air pollution prevention and mitigation measures.

Keywords : aerosol optical depth ; $PM_{2.5}$; air pollutant ; satellite image ; model

*Corresponding author. E-mail : chote_weerakul@cmu.ac.th

Introduction

มลพิษทางอากาศเกิดจากการปนเปื้อนของสารพิษที่ส่งผลกระทบต่อสุขภาพของมนุษย์ สารมลพิษทางอากาศมีหลายชนิด เช่น ฝุ่นละอองขนาดเล็ก (PM) ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์ (NO_2) ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO_2) สารตะกั่ว (Lead, Pb) ก๊าซโอโซน (O_3) และสารอินทรีย์ระเหยง่าย (Onivefu & Imarhiagbe, 2024) ในพื้นที่ภาคเหนือตอนบนของประเทศไทยมักจะเผชิญปัญหาไฟป่าและมลพิษทางอากาศอย่างรุนแรงทำให้เกิดความเสี่ยงในการเกิดโรคภัยเรื้อรังตามมา เช่น โรคระบบทางเดินหายใจ และโรคระบบหัวใจหลอดเลือด (Shahriyari *et al.*, 2022) สำหรับการตรวจวัดคุณภาพอากาศในระดับภาคพื้นดินของประเทศไทยยังคงมีข้อจำกัดหลายประการ เช่น จำนวนสถานีตรวจวัดที่มีจำกัดและความครอบคลุมที่ไม่ทั่วถึงในหลาย ๆ พื้นที่ โดยเฉพาะในพื้นที่ห่างไกลหรือชนบทที่ไม่มีการติดตั้งสถานีตรวจวัด อาจทำให้เกิดผลเสียต่อประชาชนกลุ่มเปราะบางในด้านการป้องกันสุขภาพ ปัจจุบันพัฒนาการด้านเทคโนโลยีรีโมทเซนซิงสามารถประยุกต์ใช้ค่าพารามิเตอร์ค่าความลึกเชิงแสงของละอองลอย (Aerosol Optical Depth: AOD) เพื่อติดตามและคาดการณ์ความเข้มข้นของฝุ่น $PM_{2.5}$ และสารมลพิษทางอากาศที่เกี่ยวข้อง โดยลักษณะของอนุภาคฝุ่นละอองขนาดเล็ก คาร์บอน และมลพิษทางอากาศมีคุณสมบัติในการดูดกลืนและสะท้อนรังสีจากดวงอาทิตย์ และมีเพียงบางส่วนเท่านั้นที่สามารถเดินทางมาถึงพื้นโลก (Satheesh & Moorthy, 2005) จึงสามารถใช้ค่าความลึกเชิงแสงของละอองลอย ในการตรวจสอบปริมาณรังสีที่มาจาก

ดวงอาทิตย์ที่ได้รับผลกระทบจากอนุภาคแขวนลอยในอากาศก่อนจะเดินทางมายังพื้นผิวโลก แสดงความสัมพันธ์ของสัดส่วนอนุภาคที่วัดได้เหนือพื้นดินในแนวตั้งกับค่าอนุภาคในบริเวณพื้นผิวดิน (Zhang & Li, 2015)

ปัจจุบันมีการศึกษาที่เกี่ยวข้องกับการสร้างแบบจำลองสำหรับประมาณค่าสารมลพิษทางอากาศ การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลฝุ่นละอองขนาดเล็กและสารมลพิษทางอากาศกับการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีอวกาศในหลาย ๆ การศึกษา เช่น Charoenpanyanet & Hemwan (2019) ได้ทำการศึกษการสร้างแบบจำลองที่เหมาะสมสำหรับประมาณค่าความเข้มข้นของฝุ่น $PM_{2.5}$ โดยใช้ค่าความลึกเชิงแสงของฝุ่นละอองในบรรยากาศและสถานีภาคพื้นดิน บริเวณพื้นที่ภาคเหนือตอนบนของประเทศไทย ครอบคลุมพื้นที่ 8 จังหวัด ผลการศึกษาพบว่าแบบจำลองคิวบิก (Cubic) มีค่าสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจ (R^2) สูงที่สุด คือ 0.770 และผลการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง คือ 83.33 เปอร์เซนต์ นอกจากนี้ได้มีการนำแบบจำลองไปประยุกต์ใช้ในพื้นที่ภาคกลางของประเทศไทย ผลการศึกษพบว่าการใช้ค่าความเข้มข้นของฝุ่น $PM_{2.5}$ จากภาพถ่ายดาวเทียมของแบบจำลองมีความสอดคล้องกันกับค่าที่ตรวจวัดได้จากสถานีภาคพื้นดิน Asadi *et al.* (2019) ได้ทำการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความลึกเชิงแสงของละอองลอยจากดาวเทียมเซนเซอร์ MODIS ข้อมูลอุณหภูมิจากดาวเทียม และข้อมูลความเข้มข้นของสารมลพิษทางอากาศจากสถานีตรวจวัดภาคพื้นดิน ผลการวิเคราะห์พบว่าแบบจำลองการถดถอยที่มีประสิทธิภาพดีที่สุด คือ แบบจำลองก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ในช่วงฤดูใบไม้ผลิ มีค่าสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจ (R^2) คือ 0.901 และแบบจำลองการถดถอยที่มีประสิทธิภาพต่ำที่สุด คือ แบบจำลองก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ในช่วงฤดูร้อน มีค่าสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจ (R^2) คือ 0.181 Srianan & Lalitaporn (2022) ได้ทำการศึกษการประมาณค่าความเข้มข้นของฝุ่นละอองด้วยข้อมูลดาวเทียมในภาคกลางของประเทศไทย โดยใช้ข้อมูลจากสถานีตรวจวัดของกรมควบคุมมลพิษกับข้อมูลค่าความลึกเชิงแสงของละอองลอยจากดาวเทียม S-NPP เซ็นเซอร์ VIIRS และดาวเทียม Aqua เซ็นเซอร์ MODIS ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์พบว่า ข้อมูล MODIS AOD และ VIIRS AOD มีความสัมพันธ์กับ $PM_{2.5}$ และ PM_{10} ให้ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R) ที่ใกล้เคียงกัน Buya *et al.* (2023) ได้ทำการศึกษการประมาณค่าความเข้มข้นของฝุ่น $PM_{2.5}$ รายวันของประเทศไทย ด้วยแบบจำลองการถดถอยเชิงเส้นแบบพหุคูณและแบบจำลองการเรียนรู้ของเครื่อง 3 แบบจำลอง พบว่าแบบจำลองป่าสุ่ม (Random Forest) มีประสิทธิภาพมากที่สุดสำหรับการประมาณค่าฝุ่น $PM_{2.5}$ ข้อมูลจากการประมาณค่าความเข้มข้นของฝุ่น $PM_{2.5}$ สามารถนำไปใช้วิเคราะห์ผลกระทบระยะสั้นและระยะยาวในด้านสุขภาพของประชากรและการตัดสินใจเชิงนโยบายของรัฐบาลต่อไปได้ การศึกษาที่ผ่านมาส่วนใหญ่เป็นการใช้ค่าความลึกเชิงแสงของละอองลอยจากดาวเทียม เพื่อประมาณค่าความเข้มข้นของสารมลพิษทางอากาศ แล้วนำมาหาความสัมพันธ์กับข้อมูลจากสถานีตรวจวัดคุณภาพอากาศระดับภาคพื้นดินโดยใช้สมการถดถอยรูปแบบต่าง ๆ เพื่อหาสมการสำหรับประมาณค่าสารมลพิษทางอากาศที่มีประสิทธิภาพมากที่สุด ในบางการศึกษาใช้เทคนิคการเรียนรู้ของเครื่อง (Machine learning) เพื่อสร้างแบบจำลองสำหรับทำนายค่าความเข้มข้นของสารมลพิษทางอากาศจากค่าความลึกเชิงแสงของละอองลอย โดยใช้ข้อมูลจากสถานีตรวจวัดคุณภาพอากาศระดับภาคพื้นดินเป็นข้อมูลสำหรับการเปรียบเทียบ การศึกษาเหล่านี้ยังคงมีข้อจำกัดในด้านระยะเวลาของข้อมูลที่ใช้ในการศึกษาและการพิจารณาผลกระทบของฤดูกาลที่แตกต่างกัน ในหลาย ๆ งานศึกษาใช้ข้อมูลเพียงไม่กี่ปี ซึ่งอาจจะไม่สะท้อนแนวโน้มระยะยาวของการเกิดปัญหามลพิษทางอากาศ รวมถึงการ

เปรียบเทียบผลลัพธ์ตามฤดูกาลที่ชัดเจน การศึกษาค้นคว้าครั้งนี้จึงเป็นการต่อยอดจากงานวิจัยก่อนหน้านี้ โดยเสริมความสมบูรณ์ของข้อมูล และปรับปรุงแนวทางการวิเคราะห์ให้สามารถสะท้อนสถานการณ์มลพิษทางอากาศในภูมิภาคได้อย่างครอบคลุมและแม่นยำยิ่งขึ้น โดยใช้ข้อมูลรายวันในช่วงระยะเวลา 10 ปี (พ.ศ.2557 - 2566) ช่วยให้เราสามารถสังเกตแนวโน้มความเข้มข้นของฝุ่น $PM_{2.5}$ กับมลพิษทางอากาศที่เกี่ยวข้องและการเปลี่ยนแปลงตามช่วงระยะเวลาได้อย่างแม่นยำ การวิเคราะห์โดยแบ่งข้อมูลตามฤดูกาลทำให้สามารถพิจารณาปัจจัยทางสภาพอากาศที่มีผลต่อความเข้มข้นของฝุ่น $PM_{2.5}$ กับมลพิษทางอากาศที่เกี่ยวข้องได้ดียิ่งขึ้น รวมทั้งสามารถนำแบบจำลองไปประยุกต์ใช้กับพื้นที่อื่นที่มีลักษณะภูมิอากาศและมลพิษทางอากาศคล้ายกัน

การศึกษาค้นคว้านี้มีวัตถุประสงค์เพื่อวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของฝุ่น $PM_{2.5}$ กับมลพิษทางอากาศที่เกี่ยวข้องในพื้นที่ภาคเหนือตอนบนของประเทศไทยและสร้างแบบจำลองสำหรับการประมาณค่าสารมลพิษทางอากาศโดยใช้ข้อมูลรายวัน ตั้งแต่ มกราคม พ.ศ.2557 ถึง ธันวาคม พ.ศ.2566 และแบ่งผลการศึกษาเปรียบเทียบเป็นรายฤดูกาลตามการจำแนกของกรมอุตุนิยมวิทยา คือ ฤดูร้อนเริ่มตั้งแต่เดือนกุมภาพันธ์ถึงเดือนพฤษภาคม ฤดูฝนเริ่มตั้งแต่เดือนมิถุนายนถึงเดือนกันยายน และฤดูหนาวเริ่มตั้งแต่เดือนตุลาคมถึงเดือนมกราคม เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพและความแม่นยำของแบบจำลองสำหรับการหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มข้นของฝุ่น $PM_{2.5}$ จากสถานีตรวจวัดภาคพื้นดินกับค่าความลึกเชิงแสงของละอองลอย (AOD) การนำเทคโนโลยีรีโมทเซนซิงมาประยุกต์ใช้งานไม่เพียงช่วยเพิ่มความครอบคลุมในการตรวจวัดคุณภาพอากาศ แต่ยังเป็นการสนับสนุนการวางแผนเชิงนโยบาย การวิจัย และการจัดการด้านสิ่งแวดล้อมในระยะยาว ทำให้สามารถรับมือกับปัญหามลพิษทางอากาศได้อย่างมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น

Methodology

พื้นที่ศึกษา

พื้นที่ศึกษาในพื้นที่ภาคเหนือตอนบนของประเทศไทย อยู่พิกัดเส้นแวงที่ 97 องศา 22 ลิปดา กับ 101 องศา 22 ลิปดา ตะวันออก และเส้นรุ้ง 20 องศา 25 ลิปดา กับ 17 องศาเหนือ มีพื้นที่รวมทั้งหมดประมาณ 85,800 ตารางกิโลเมตร ประกอบด้วย 8 จังหวัด ได้แก่ เชียงใหม่ เชียงราย แม่ฮ่องสอน พะเยา ลำพูน ลำปาง แพร่ และน่าน มีอาณาเขตติดต่อ ดังนี้ (Figure 1)

ทิศเหนือ	ติดต่อกับ	ประเทศเมียนมาและลาว มีเทือกเขาแดนลาว แม่น้ำสาย และแม่น้ำรวกเป็นแนวแบ่งพรมแดน
ทิศตะวันออก	ติดต่อกับ	จังหวัดสุโขทัย อุตรดิตถ์ และตาก
ทิศใต้	ติดต่อกับ	ประเทศลาว มีเทือกเขาหลวงพระบางและจังหวัดเพชรบูรณ์บางส่วนเป็นแนวแบ่งพรมแดน
ทิศตะวันตก	ติดต่อกับ	ประเทศเมียนมา มีแม่น้ำเมยและส่วนหนึ่งของแม่น้ำสาละวิน (แม่น้ำคง) เป็นแนวแบ่งพรมแดน

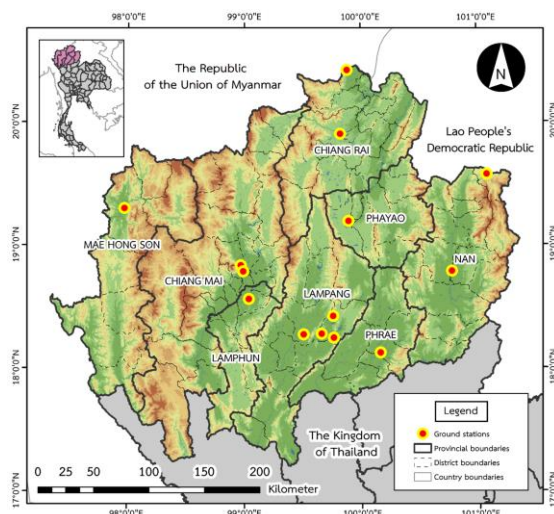


Figure 1 Study area

ข้อมูลที่ใช้ในการศึกษา

1) ข้อมูลค่าความลึกเชิงแสงของละอองลอย (AOD) จากผลิตภัณฑ์ MCD19A2v061 เป็นข้อมูลที่ได้จากเซนเซอร์ MODIS บนดาวเทียม Terra และ Aqua ประมวลผลโดยใช้ Atmospheric Correction (MAIAC) มีความละเอียดเชิงพื้นที่ 1 กิโลเมตร ใช้สำหรับวิเคราะห์ปริมาณละอองลอยในชั้นบรรยากาศ ใช้ข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียมรายวันในช่วง 10 ปีย้อนหลัง ตั้งแต่ปี พ.ศ.2557 ถึงปี พ.ศ. 2566 จำนวน 2,721 ภาพ โดยเป็นข้อมูลภาพที่มีความสมบูรณ์สามารถนำไปใช้วิเคราะห์ความสัมพันธ์ ตำแหน่งเดียวกันกับข้อมูลการตรวจวัดของสถานีตรวจวัดภาคพื้นดิน

2) ข้อมูลการตรวจวัดความเข้มข้นของฝุ่น $PM_{2.5}$ และสารมลพิษทางอากาศที่เกี่ยวข้อง ได้แก่ ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์ (NO_2) และก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO_2) ของสถานีตรวจวัดภาคพื้นดินในเขตพื้นที่ภาคเหนือตอนบนของประเทศไทยจำนวน 14 สถานี (Table 1) จากกองจัดการคุณภาพอากาศและเสียง กรมควบคุมมลพิษ ใช้ข้อมูลการตรวจวัดรายวันในช่วง 10 ปีย้อนหลัง ตั้งแต่ปี พ.ศ.2557 ถึงปี พ.ศ.2566 ในวันเดียวกันกับข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียม โดยใช้ข้อมูลการตรวจวัดความเข้มข้นของฝุ่น $PM_{2.5}$ และสารมลพิษทางอากาศที่เกี่ยวข้องแต่ละประเภทรวม 2,721 ชุดข้อมูล

การวิเคราะห์ข้อมูล

การศึกษาในครั้งนี้ใช้ข้อมูลค่าความลึกเชิงแสงของละอองลอย (AOD) และข้อมูลการตรวจวัดความเข้มข้นของฝุ่น $PM_{2.5}$ และสารมลพิษทางอากาศที่เกี่ยวข้องจากสถานีตรวจวัดภาคพื้นดิน โดยแบ่งการวิเคราะห์ข้อมูลออกเป็น 5 ขั้นตอน ได้แก่ 1. การรวบรวมข้อมูล 2. การเตรียมข้อมูล 3. การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของฝุ่น $PM_{2.5}$ กับมลพิษทางอากาศที่เกี่ยวข้อง 4. การสร้างแบบจำลองสำหรับประมาณค่าความเข้มข้นของฝุ่น $PM_{2.5}$ และสารมลพิษทางอากาศ และ 5. การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง มีรายละเอียดการวิเคราะห์ข้อมูล ดังนี้ (Figure 2)

Table 1 Ground-based air quality monitoring stations

No.	Station ID	Lat	Long	Area	Station name
1	35t	18.840732	98.96978	Chang Phueak, Meuang, Chiang Mai	City Hall, Chiangmai
2	36t	18.790933	98.99	Si Phum, Meuang, Chiang Mai	Yupparaj Wittayalai School
3	37t	18.278333	99.506467	Phra Bat, Meuang, Lampang	Meteorological stations, Lampang
4	38t	18.250817	99.76395	Sop Pat, Mae Mo, Lampang	Health Promotion Hospital Sob Pad, Lampang
5	39t	18.426783	99.757633	Ban Dong, Mae Mo, Lampang	Health Promotion Hospital Banthasri
6	40t	18.282633	99.659817	Mae Mo, Mae Mo, Lampang	Provincial Waterworks Authority Mae Moh
7	57t	19.909217	99.823467	Wiang, Meuang, Chiang Rai	Natural Resources and Environment Office, Chiangrai
8	58t	19.30455	97.97165	Chong Kham, Meuang, Mae Hong Son	Natural Resources and Environment Office, Mae Hongson
9	67t	18.788883	100.776317	Nai Wiang, Mueang, Nan	Municipality Office, Nan
10	68t	18.567194	99.038639	Ban Klang, Mueang, Lamphun	Meteorological Stations, Lamphun
11	69t	18.128367	100.162433	Na Chak, Meuang, Phrae	Meteorology Center, Phrae
12	70t	19.200226	99.893048	Bantom, Meuang, Phayao	Phayao Provincial, Phayao
13	73t	20.427325	99.883842	Wiang Phang Kham, Mae Sai, Chiang Rai	Maesai Health Office
14	75t	19.575967	101.081517	Huai Kon, Chaloei Phra Kiat, Nan	Chalermprakiet Hospital

1) การรวบรวมข้อมูลค่าความลึกเชิงแสงของละอองลอย (AOD) ดำเนินการผ่านแพลตฟอร์ม Google Earth Engine (GEE) โดยใช้ข้อมูลดาวเทียมเซนเซอร์ MODIS ที่เป็นข้อมูลรายวันจำนวน 2,721 ภาพ และตรงกันกับวันที่มีการตรวจวัดความเข้มข้นของฝุ่น $PM_{2.5}$ และสารมลพิษทางอากาศที่เกี่ยวข้อง ได้แก่ ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ก๊าซไนโตรเจน-

ไดออกไซด์ (NO_2) และก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO_2) ของสถานีตรวจวัดภาคพื้นดินในเขตพื้นที่ภาคเหนือตอนบนของประเทศไทยจำนวน 14 สถานี จากนั้นทำการดึงค่าความลึกเชิงแสงของละอองลอยลงในพิกัดของสถานีตรวจวัดภาคพื้นดินเพื่อนำข้อมูลไปใช้ในการวิเคราะห์และสร้างแบบจำลอง

2) การเตรียมข้อมูลค่าความลึกเชิงแสงของละอองลอยและข้อมูลการตรวจวัดจากสถานีภาคพื้นดินจำเป็นต้องคัดกรองข้อมูลเพื่อให้ได้ค่าที่มีความถูกต้องและแม่นยำสูงสุด เนื่องจากอาจเกิดความคลาดเคลื่อนของเซนเซอร์หรือสภาพอากาศที่รบกวนค่าการตรวจวัดจากสถานีภาคพื้นดิน โดยมีหลักเกณฑ์ในการคัดกรองข้อมูล คือ การกรองค่าของข้อมูลที่ผิดปกติมีค่าที่สูงหรือต่ำเกินไป การตรวจสอบข้อมูลที่ขาดหายไปของวันที่ไม่มีข้อมูลค่าความลึกเชิงแสงของละอองลอยและข้อมูลการตรวจวัดจากสถานีภาคพื้นดิน

3) การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของฝุ่น $\text{PM}_{2.5}$ กับมลพิษทางอากาศที่เกี่ยวข้องในพื้นที่ภาคเหนือตอนบนของประเทศไทยใช้ค่าความลึกเชิงแสงของละอองลอยจากภาพถ่ายดาวเทียมเซนเซอร์ MODIS และค่าการตรวจวัดการตรวจวัดความเข้มข้นของฝุ่น $\text{PM}_{2.5}$ และสารมลพิษทางอากาศที่เกี่ยวข้อง โดยวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของข้อมูลในเชิงพื้นที่และเวลา ค่าความลึกเชิงแสงของละอองลอยเป็นข้อมูลรายวันในตำแหน่งพิกัดเดียวกับสถานีตรวจวัดคุณภาพอากาศภาคพื้นดิน แบ่งข้อมูลสำหรับการวิเคราะห์ตามช่วงฤดูกาลตามการจำแนกของกรมอุตุนิยมวิทยา ได้แก่ ฤดูร้อนเริ่มตั้งแต่เดือนกุมภาพันธ์ถึงเดือนพฤษภาคม ฤดูฝนเริ่มตั้งแต่เดือนมิถุนายนถึงเดือนกันยายน และฤดูหนาวเริ่มตั้งแต่เดือนตุลาคมถึงเดือนมกราคม จากนั้นทำการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรค่าความลึกเชิงแสงของละอองลอยและค่าการตรวจวัดจากสถานีภาคพื้นดินทีละคู่ด้วยสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เพียร์สัน (Pearson correlation) ซึ่งเป็นค่าสถิติที่ใช้วัดความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่างสองตัวแปร โดยมีสมการ ดังนี้

$$r = \frac{\sum (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum (X_i - \bar{X})^2 \sum (Y_i - \bar{Y})^2}} \quad (1)$$

โดยที่ r คือ สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เพียร์สัน
 X_i คือ ค่าของตัวแปร X
 Y_i คือ ค่าของตัวแปร Y
 $\bar{X}$ และ $\bar{Y}$ คือ ค่าเฉลี่ยของตัวแปร X และตัวแปร Y

4) การสร้างแบบจำลองสำหรับประมาณค่าความเข้มข้นของฝุ่น $\text{PM}_{2.5}$ และสารมลพิษทางอากาศ ใช้ข้อมูลค่าความลึกเชิงแสงของละอองลอย จากภาพถ่ายดาวเทียม ณ ตำแหน่งสถานีตรวจวัดภาคพื้นดิน นำมาวิเคราะห์ความสัมพันธ์ด้วยแบบจำลองที่เหมาะสม จากสมการถดถอย 6 แบบ ได้แก่ แบบเส้นตรง (Linear model) แบบล็อกการิทึม (Logarithmic model) แบบควอดราติกส์ (Quadratic model) แบบคิวบิก (Cubic model) แบบเลขยกกำลัง (Power model) และแบบ

เอ็กโปเนนเชียล (Exponential model) เพื่อหาสมการที่ดีที่สุด โดยสมการถดถอยแต่ละแบบจำลองมีลักษณะการพยากรณ์ที่แตกต่างกัน มีรูปแบบสมการ ดังนี้

1. แบบเส้นตรง (Linear model)

$$\text{รูปแบบสมการ } Y = aX + b \quad (2)$$

2. แบบลอการิทึม (Logarithmic model)

$$\text{รูปแบบสมการ } Y = \ln(X) + b \quad (3)$$

3. แบบควอดราติกส์ (Quadratic model)

$$\text{รูปแบบสมการ } Y = aX^2 + bX + c \quad (4)$$

4. แบบคิวบิก (Cubic model)

$$\text{รูปแบบสมการ } Y = aX^3 + bX^2 + cX + d \quad (5)$$

5. แบบเลขยกกำลัง (Power model)

$$\text{รูปแบบสมการ } Y = aX^b \quad (6)$$

6. แบบเอ็กโปเนนเชียล (Exponential model)

$$\text{รูปแบบสมการ } Y = ab^X \quad (7)$$

โดยที่	Y	คือ ค่าความเข้มข้นของฝุ่น $PM_{2.5}$ กับมลพิษทางอากาศที่เกี่ยวข้อง
	X	คือ ค่าความลึกเชิงแสงของละอองลอย (AOD) ณ ตำแหน่งพิกัดของสถานีตรวจวัดคุณภาพอากาศของภาพดาวเทียม
	b	คือ ค่าคงที่

5) การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง (Model validation) เพื่อประเมินประสิทธิภาพของแบบจำลองที่ใช้สำหรับประมาณค่าความเข้มข้นของฝุ่น $PM_{2.5}$ และสารมลพิษทางอากาศที่เกี่ยวข้อง ทำการเปรียบเทียบค่าที่ได้จากแบบจำลองกับค่าจริงจากสถานีตรวจวัดภาคพื้นดินเพื่อวัดความแม่นยำและความน่าเชื่อถือของแบบจำลอง โดยทำการทดสอบ Cross-validation Test แบบแบ่งข้อมูลตามรายฤดูกาล 4 กลุ่ม ได้แก่ ฤดูร้อน ฤดูฝน ฤดูหนาว และทุกฤดูกาล จากนั้นสร้างชุดข้อมูลในแต่ละกลุ่มเป็น 10 ชุด ด้วยการสุ่มจากข้อมูลทั้งหมด โดยข้อมูลจะถูกแบ่งเป็นข้อมูลชุดฝึกสอน (Training set) และข้อมูลชุดทดสอบ (Validation set) แต่ละชุดข้อมูลได้รับการสุ่มเพื่อทดสอบความแม่นยำของแบบจำลองในระดับฤดูกาลเฉพาะและข้อมูลที่รวมกันทั้งหมด ซึ่งสามารถตรวจสอบความเสถียรและความแม่นยำของการประมาณค่าฝุ่น $PM_{2.5}$ และสารมลพิษทางอากาศในสภาวะแวดล้อมที่มีความผันผวนตามฤดูกาลได้อย่างครอบคลุม การประเมินความ

แม่นยำของค่าที่คำนวณกับค่าที่วัดได้จริงคำนวณจากค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยกำลังสอง (Root Mean Square Error: RMSE) สามารถคำนวณได้จากสูตร ดังนี้

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum (X - X_i)^2}{N}} \quad (8)$$

โดยที่ X คือ ค่าความเข้มข้นของฝุ่น $PM_{2.5}$ และสารมลพิษทางอากาศที่เกี่ยวข้องจากสถานีตรวจวัดคุณภาพอากาศภาคพื้นดิน

X_i คือ ค่าความเข้มข้นของฝุ่น $PM_{2.5}$ และสารมลพิษทางอากาศที่เกี่ยวข้องจากสมการ

N คือ จำนวนข้อมูลทั้งหมด

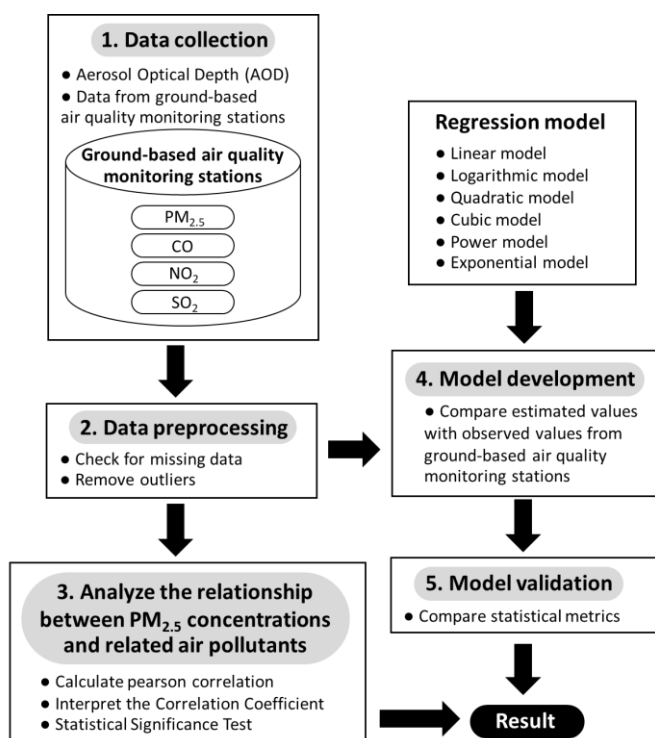


Figure 2 Work Process

Results

1. การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของฝุ่น $PM_{2.5}$ กับมลพิษทางอากาศที่เกี่ยวข้องในพื้นที่ภาคเหนือตอนบนของประเทศไทย

ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างฝุ่น $PM_{2.5}$ กับมลพิษทางอากาศที่เกี่ยวข้องในภาคเหนือตอนบนของประเทศไทยพบว่าฝุ่น $PM_{2.5}$ มีความสัมพันธ์สูงสุดกับก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ในช่วงฤดูร้อน ($R^2 = 0.789$) รองลงมาคือฤดูหนาว ($R^2 = 0.560$) และต่ำที่สุดในฤดูฝน ($R^2 = 0.124$) ความสัมพันธ์ระหว่างฝุ่น $PM_{2.5}$ กับก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์ (NO_2) และก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO_2) อยู่ในระดับปานกลางในช่วงฤดูหนาว ($R^2 = 0.501$ และ $R^2 = 0.395$ ตามลำดับ) โดยในช่วงฤดูร้อนและฤดูฝนความสัมพันธ์ระหว่างฝุ่น $PM_{2.5}$ กับก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์และก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์อยู่ในระดับต่ำมาก ($R^2 = 0.103, 0.018$ และ $R^2 = 0.002, 0.001$ ตามลำดับ) ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรที่ละคู่ด้วยสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เพียร์สัน มีดังนี้ (Table 2)

Table 2 Pearson correlation coefficient

		Summer		Rainy		Winter	
		$PM_{2.5}$	CO	$PM_{2.5}$	CO	$PM_{2.5}$	CO
$PM_{2.5}$	Pearson Correlation	1	0.789 **	1	0.124 **	1	0.560 **
	Sig. (2-tailed)		0.000		0.000		0.000
	N	1000	1000	1000	1000	1000	1000
		$PM_{2.5}$	NO_2	$PM_{2.5}$	NO_2	$PM_{2.5}$	NO_2
$PM_{2.5}$	Pearson Correlation	1	0.103 **	1	0.002 **	1	0.501 **
	Sig. (2-tailed)		0.000		0.000		0.000
	N	1000	1000	1000	1000	1000	1000
		$PM_{2.5}$	SO_2	$PM_{2.5}$	SO_2	$PM_{2.5}$	SO_2
$PM_{2.5}$	Pearson Correlation	1	0.018 **	1	0.001 **	1	0.395 **
	Sig. (2-tailed)		0.000		0.000		0.000
	N	1000	1000	1000	1000	1000	1000

** . Correlation is significant at the 0.01 level (2-tailed)

2. การสร้างแบบจำลองสำหรับประมาณค่าความเข้มข้นของฝุ่น $PM_{2.5}$ และสารมลพิษทางอากาศ

การหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มข้นของฝุ่น $PM_{2.5}$ และสารมลพิษทางอากาศ ใช้ข้อมูลค่าความลึกเชิงแสงของละอองลอย (AOD) และค่าการตรวจวัดจากสถานีตรวจวัดคุณภาพอากาศในพื้นที่ศึกษา นำมาวิเคราะห์ความสัมพันธ์ด้วยแบบจำลองที่เหมาะสม จากสมการถดถอย 6 แบบ ได้แก่ แบบเส้นตรง (Linear model) มีความเหมาะสมกับข้อมูลที่มีลักษณะแนวโน้มความสัมพันธ์เพิ่มขึ้นหรือลดลงในอัตราคงที่ในรูปแบบเชิงเส้นตรง แบบลอการิทึม (Logarithmic model) มีความเหมาะสมกับข้อมูลที่มีการเพิ่มขึ้นในช่วงเริ่มต้นสูง แต่มีแนวโน้มความสัมพันธ์ลดความชันลงหรือข้อมูลมีความอิ่มตัวเมื่อค่าของตัวแปรเพิ่มขึ้น แบบควอดราติกส์ (Quadratic model) มีความเหมาะสมกับข้อมูลที่มีความสัมพันธ์ไม่เป็นเชิงเส้น เช่น ค่าความเข้มข้นของฝุ่น $PM_{2.5}$ และสารมลพิษทางอากาศกับค่าการตรวจวัดจากสถานีตรวจวัดคุณภาพอากาศที่มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นในช่วงหนึ่งก่อนที่จะมีแนวโน้มความสัมพันธ์ลดลง แบบคิวบิก (Cubic model) มีความเหมาะสมกับข้อมูลที่มีความซับซ้อนและมีการเปลี่ยนแปลงแนวโน้มความสัมพันธ์เพิ่มขึ้นหรือลดลงของข้อมูลในหลายช่วง แบบเลขยกกำลัง (Power model) มีความเหมาะสมกับข้อมูลที่มีแนวโน้มการเพิ่มขึ้นของตัวแปรหนึ่งส่งผลเป็นอัตราส่วนกับอีกตัวแปรหนึ่ง และแบบเอ็กโปเนนเชียล (Exponential model) มีความเหมาะสมกับข้อมูลที่มีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงข้อมูลแบบทวีคูณ ผลการสร้างแบบจำลองสำหรับประมาณค่าความเข้มข้นของฝุ่น $PM_{2.5}$ และสารมลพิษทางอากาศพบว่าแบบจำลองคิวบิกมีความเหมาะสมมากที่สุด โดยการศึกษานี้มีลักษณะรูปแบบความสัมพันธ์ของข้อมูล ดังนี้ (Figure 3)

การประเมินประสิทธิภาพของแบบจำลองเบื้องต้นใช้ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Coefficient of Determination) เป็นตัวชี้วัดสำหรับการประเมินแบบจำลองที่สร้างขึ้นว่าสามารถอธิบายความแปรปรวนของข้อมูลได้ดีมากน้อยเพียงใด โดยค่าที่ได้จะแสดงให้เห็นสัดส่วนของความแปรปรวนของข้อมูลที่สามารถอธิบายได้โดยใช้แบบจำลองนั้น ๆ ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจมีค่าตั้งแต่ 0 ถึง 1 ค่าที่ใกล้เคียงกับ 1 แสดงให้เห็นว่าแบบจำลองมีความแม่นยำสูงในการประมาณค่าความเข้มข้นของฝุ่น $PM_{2.5}$ และสารมลพิษทางอากาศจากค่าความลึกเชิงแสงของละอองลอย ค่าที่ใกล้เคียงกับ 0 แสดงให้เห็นว่าแบบจำลองไม่สามารถอธิบายความแปรปรวนของข้อมูล หรือไม่สามารถทำนายค่าความเข้มข้นของฝุ่น $PM_{2.5}$ และสารมลพิษทางอากาศจากค่าความลึกเชิงแสงของละอองลอยได้ ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจของแต่ละแบบจำลอง มีดังนี้ (Table 3)

สมการที่มีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจมากกว่า 0.7 แสดงถึงความสัมพันธ์ในระดับสูงในการประมาณค่าความเข้มข้นของฝุ่น $PM_{2.5}$ และสารมลพิษทางอากาศจากค่าความลึกเชิงแสงของละอองลอย แบบจำลองสามารถอธิบายความแปรปรวนของข้อมูลได้มากกว่าร้อยละ 70 โดยสมการที่มีค่าความสัมพันธ์สูงสุดจะถูกนำไปใช้เป็นแบบจำลองที่เหมาะสมสำหรับการประมาณค่าความเข้มข้นของฝุ่น $PM_{2.5}$ และสารมลพิษทางอากาศในพื้นที่ศึกษาต่อไป ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์จากแบบจำลองกับข้อมูลที่ได้จากการตรวจวัดจริง พบว่ามีแบบจำลองสำหรับประมาณค่าความเข้มข้นของฝุ่น $PM_{2.5}$ และก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ที่มีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจเกิน 0.7 จำนวน 22 แบบจำลอง จำแนกตามฤดูกาล ได้แก่ ฤดูร้อน ฤดูฝน ฤดูหนาว และทุกฤดูกาล โดยผลการประเมินความแม่นยำของค่าที่คำนวณกับค่าที่วัดได้จริงคำนวณจากค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยกำลังสอง (Root Mean Square Error: RMSE) มีดังนี้ (Table 4)

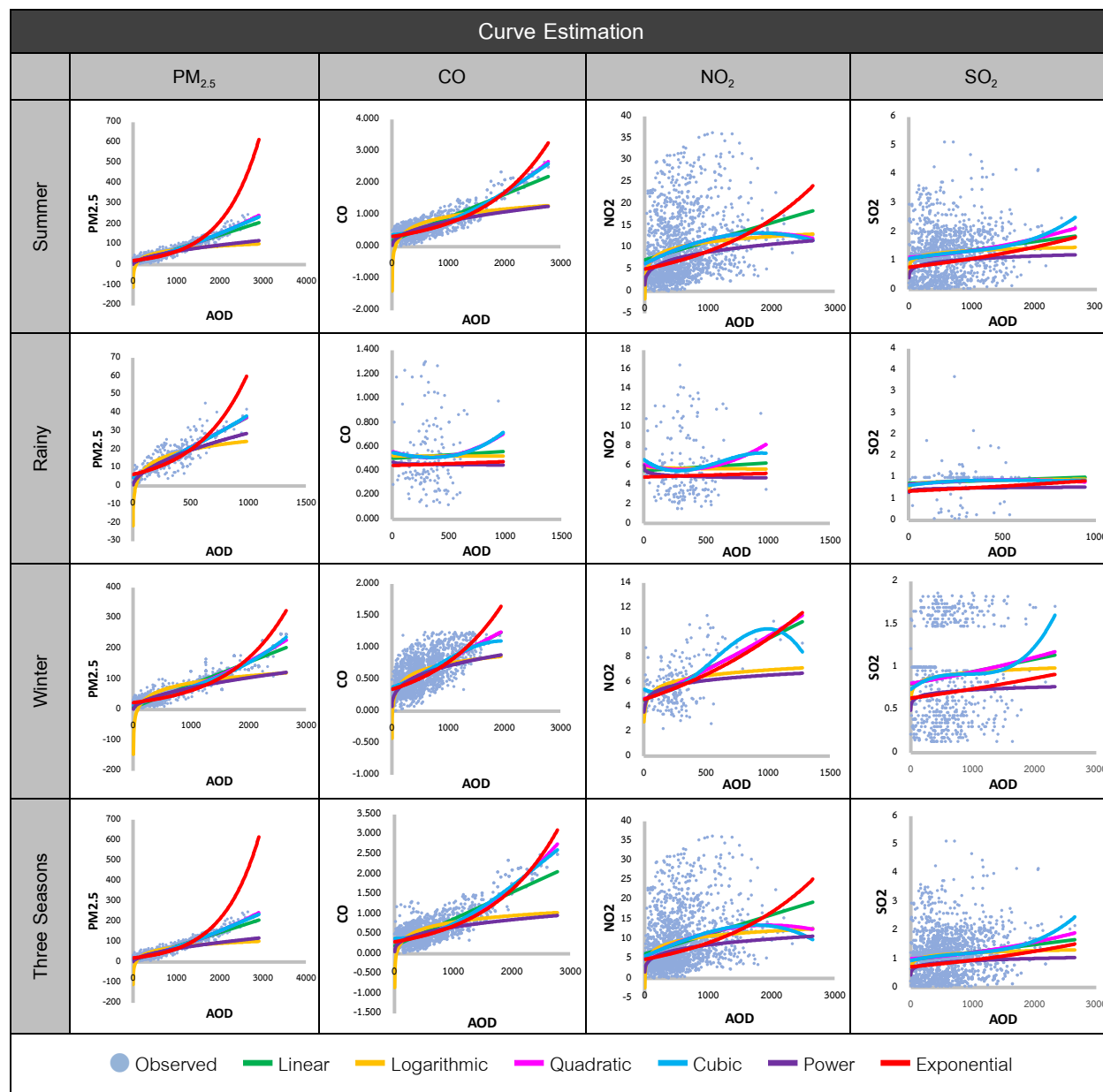


Figure 3 Graph of testing results

Table 3 Coefficient of Determination

Model R ²	Seasons	Coefficient of Determination			
		PM _{2.5}	CO	NO ₂	SO ₂
Linear	Summer	0.913*	0.784*	0.061	0.025
	Rainy	0.715*	0.001	0.002	0.003
	Winter	0.878*	0.393	0.268	0.024
	Three Seasons	0.885*	0.62	0.089	0.024
Logarithmic	Summer	0.565	0.455	0.059	0.019
	Rainy	0.531	0.001	0.001	0.005
	Winter	0.522	0.299	0.113	0.034
	Three Seasons	0.523	0.351	0.074	0.019
Quadratic	Summer	0.922*	0.822*	0.066	0.026
	Rainy	0.715*	0.007	0.008	0.004
	Winter	0.896*	0.392	0.269	0.065
	Three Seasons	0.898*	0.664	0.094	0.025
Cubic	Summer	0.923*	0.823*	0.066	0.027
	Rainy	0.715*	0.008	0.011	0.004
	Winter	0.898*	0.394	0.315	0.066
	Three Seasons	0.899*	0.665	0.095	0.026
Power	Summer	0.831*	0.657	0.064	0.021
	Rainy	0.69	0.001	0.001	0.005
	Winter	0.794*	0.354	0.134	0.032
	Three Seasons	0.813*	0.482	0.086	0.019
Exponential	Summer	0.781*	0.809*	0.052	0.026
	Rainy	0.642	0.002	0.002	0.003
	Winter	0.862*	0.378	0.265	0.026
	Three Seasons	0.802*	0.66	0.076	0.024

R² 1

0

Coefficient of Determination
 Above 0.7: Strong influence*
 0.3 to 0.5: Moderate influence
 0 to 0.3: Weak influence

Table 4 Testing model and coefficient determination (R^2)

Model	Seasons	Observed	Equation	N	R^2	RMSE
Linear	Summer	PM _{2.5}	$Y = 0.0684X + 8.1998$	2,120	0.913	10.214
		CO	$Z = 0.0007X + 0.1899$	1,050	0.784	0.225
	Rainy	PM _{2.5}	$Y = 0.0331X + 4.6571$	410	0.715	4.127
	Winter	PM _{2.5}	$Y = 0.0738X + 7.9235$	1,550	0.878	17.513
	Three Seasons	PM _{2.5}	$Y = 0.0729X + 5.2196$	4,080	0.885	10.747
Quadratic	Summer	PM _{2.5}	$Y = 1E-05X^2 + 0.0499X + 13.768$	2,120	0.922	9.647
		CO	$Z = 2E-07X^2 + 0.0002X + 0.3513$	1,050	0.822	0.216
	Rainy	PM _{2.5}	$Y = 1E-06X^2 + 0.0324X + 4.7735$	410	0.715	4.127
	Winter	PM _{2.5}	$Y = 1E-05X^2 + 0.0406X + 18.886$	1,550	0.896	18.078
	Three Seasons	PM _{2.5}	$Y = 1E-05X^2 + 0.0475X + 13.066$	4,080	0.899	10.193
Cubic	Summer	PM _{2.5}	$Y = -2E-09X^3 + 2E-05X^2 + 0.0443X + 14.791$	2,120	0.923*	8.820
		CO	$Z = -3E-11X^3 + 3E-07X^2 + 0.0001X + 0.3735$	1,050	0.823*	0.212
	Rainy	PM _{2.5}	$Y = 8E-09X^3 - 1E-05X^2 + 0.0363X + 4.4494$	410	0.715	4.125
	Winter	PM _{2.5}	$Y = 7E-09X^3 - 1E-05X^2 + 0.0646X + 14.395$	1,550	0.898	16.268
	Three Seasons	PM _{2.5}	$Y = 2E-09X^3 + 5E-06X^2 + 0.0534X + 11.987$	4,080	0.899	10.082
Power	Summer	PM _{2.5}	$Y = 1.5051X^{0.5467}$	2,120	0.831	15.924
	Winter	PM _{2.5}	$Y = 1.6758X^{0.5439}$	1,550	0.794	29.609
	Three Seasons	PM _{2.5}	$Y = 1.0467X^{0.5981}$	4,080	0.813	17.809
Exponential	Summer	PM _{2.5}	$Y = 20.026e^{0.0012x}$	2,120	0.781	27.299
		CO	$Z = 0.3183e^{0.0008x}$	1,050	0.809	0.218
	Winter	PM _{2.5}	$Y = 23.109e^{0.001x}$	1,550	0.862	23.084
	Three Seasons	PM _{2.5}	$Y = 18.397e^{0.0012x}$	4,080	0.802	24.282
When Y is PM _{2.5} Concentration (µg/m3) Z is CO Concentration (ppm) X is AOD Value						

ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มข้นของฝุ่น $PM_{2.5}$ และก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) จากค่าความลึกเชิงแสงของละอองลอยที่ได้จากแบบจำลองกับค่าความเข้มข้นของฝุ่น $PM_{2.5}$ และก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์จากสถานีตรวจวัดคุณภาพอากาศ พบว่าสมการที่มีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจมากกว่า 0.7 มีความแม่นยำของค่าที่คำนวณกับค่าที่วัดได้จริงคำนวณจากค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยกำลังสอง (RMSE) สำหรับฝุ่น $PM_{2.5}$ และก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์มีค่าอยู่ในช่วง 4.125 – 29.609 และ 0.212 – 0.225 ตามลำดับ การวิเคราะห์ค่าความเข้มข้นของฝุ่น $PM_{2.5}$ และก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ จากแบบจำลองที่เหมาะสมที่สุด พบว่าดัชนีคุณภาพอากาศมีการเปลี่ยนแปลงไปตามช่วงฤดูกาล ช่วงเดือนพฤศจิกายนถึงธันวาคมช่วงเวลานี้พบว่าค่าดัชนีคุณภาพอากาศอยู่ในระดับดีและระดับดีมากในบางพื้นที่ ช่วงเดือนกุมภาพันธ์ถึงพฤษภาคมช่วงเวลานี้พบว่าค่าดัชนีคุณภาพอากาศเริ่มเพิ่มขึ้นจนถึงระดับที่อาจมีผลกระทบต่อสุขภาพและมีผลต่อสุขภาพมนุษย์ โดยเฉพาะในกลุ่มประชากรที่มีความอ่อนไหว เช่น เด็ก ผู้สูงอายุ และผู้ที่มีโรคเกี่ยวกับทางเดินหายใจ ส่วนในช่วงเดือนมิถุนายนเป็นต้นไป ค่าดัชนีคุณภาพอากาศมีแนวโน้มดีขึ้นอย่างต่อเนื่อง สอดคล้องกับการลดลงของค่าความเข้มข้นของฝุ่น $PM_{2.5}$ และก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ ซึ่งอาจเป็นผลมาจากปัจจัยทางสภาพอากาศ เช่น ฤดูฝนที่ช่วยชะล้างฝุ่นในอากาศ และการลดลงของกิจกรรมที่ก่อให้เกิดมลพิษ ผลการวิเคราะห์ค่าความเข้มข้นเฉลี่ยรายเดือนและจำแนกตามค่าดัชนีคุณภาพอากาศของค่าความเข้มข้นของฝุ่น $PM_{2.5}$ ตลอดทั้งปี และก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ในช่วงฤดูร้อนตั้งแต่ มกราคม พ.ศ.2557 ถึง ธันวาคม พ.ศ.2566 มีดังนี้ (Figure 4)

การประเมินประสิทธิภาพของแบบจำลองใช้ค่าประมาณความเข้มข้นของฝุ่น $PM_{2.5}$ และสารมลพิษทางอากาศ นำมาเปรียบเทียบกับค่าความเข้มข้นของฝุ่น $PM_{2.5}$ และสารมลพิษทางอากาศจริงจากสถานีตรวจวัดคุณภาพอากาศในพื้นที่ศึกษา โดยแบ่งข้อมูลออกเป็น 4 กลุ่มตามฤดูกาล ได้แก่ ฤดูร้อน ฤดูฝน ฤดูหนาว และข้อมูลรวมทุกฤดูกาล ทำให้สามารถวิเคราะห์ความแม่นยำของแบบจำลองภายใต้สภาพแวดล้อมที่แตกต่างกัน ชุดข้อมูลในแต่ละกลุ่มจะถูกสุ่มสร้างชุดข้อมูลย่อย 10 ชุด แต่ละชุดจะถูกแบ่งออกเป็นชุดข้อมูลฝึกสอน (Training set) และชุดทดสอบ (Validation set) ซึ่งช่วยให้สามารถประเมินความเสถียรของแบบจำลองในบริบทที่หลากหลาย ผลการศึกษาพบว่าการประมาณค่าความเข้มข้นของฝุ่น $PM_{2.5}$ มีความถูกต้องรวมร้อยละ 92.5 ส่วนการประมาณค่าความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์มีความถูกต้องรวมร้อยละ 80 เมื่อพิจารณาแนวโน้มความเข้มข้นรายเดือนระหว่างค่าที่ได้จากการประมาณด้วยแบบจำลองกับค่าจริงจากการตรวจวัดที่สถานี พบว่าค่าความเข้มข้นของทั้งสองชุดข้อมูลมีแนวโน้มใกล้เคียงกัน สะท้อนถึงความสามารถในการพยากรณ์คุณภาพอากาศของแบบจำลองในการจำลองความผันแปรของคุณภาพอากาศตามช่วงเวลา ดังนี้ (Table 5)

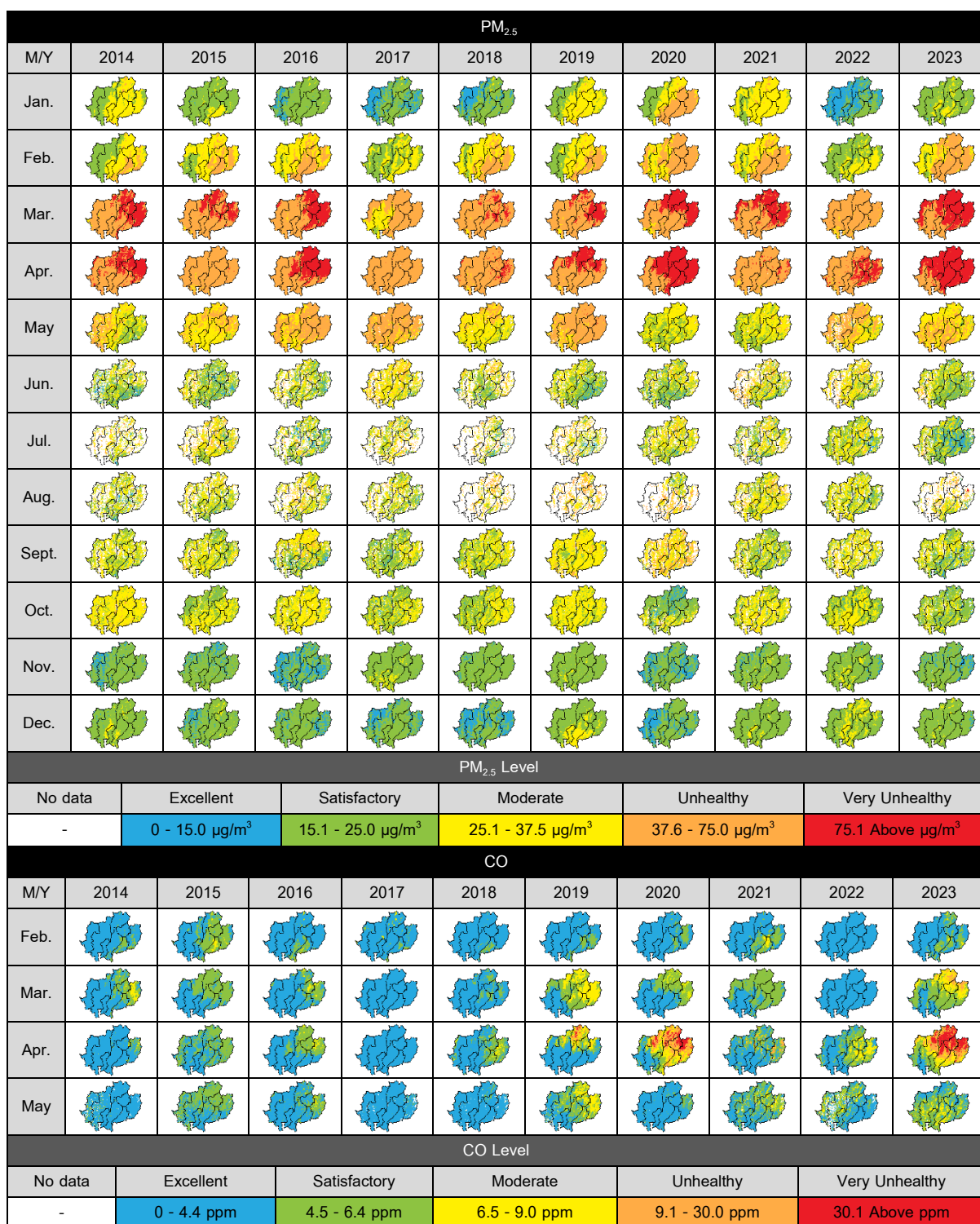


Figure 4 The map shows PM_{2.5} and CO monthly average concentrations based on daily analysis data

Table 5 Model validation

Model validation															
PM _{2.5} (µg/m ³)															
Summer				Rainy				Winter				Three Seasons			
Observed		Estimated		Observed		Estimated		Observed		Estimated		Observed		Estimated	
PM _{2.5}	Level	PM _{2.5}	Level	PM _{2.5}	Level	PM _{2.5}	Level	PM _{2.5}	Level	PM _{2.5}	Level	PM _{2.5}	Level	PM _{2.5}	Level
73.50	4	64.33	4	29.50	3	25.74	3	24.00	2	24.58	2	70.00	4	68.43	4
98.80	5	99.50	5	31.20	3	31.82	3	33.10	3	27.34	3	84.20	5	82.15	5
65.10	4	67.73	4	15.10	2	24.65	3	9.20	1	8.15	1	26.50	3	36.57	3
69.60	4	76.93	5	28.40	3	27.85	3	24.50	2	21.88	2	25.60	3	29.61	3
74.20	4	72.77	4	29.80	3	30.87	3	10.30	1	15.24	2	27.10	3	30.81	3
71.00	4	72.32	4	27.90	3	30.24	3	22.10	2	23.19	2	29.50	3	25.08	3
62.60	4	50.97	4	26.50	3	26.15	3	24.50	2	23.56	2	20.20	2	24.64	2
79.50	5	76.61	5	34.60	3	36.37	3	13.00	1	7.82	1	24.40	2	24.58	2
38.40	4	71.76	4	33.70	3	32.76	3	7.40	1	9.48	1	11.10	1	9.22	1
88.00	5	80.83	5	24.80	2	28.47	3	21.80	2	23.50	2	6.00	1	10.54	1

Model validation			
CO (ppm)			
Summer			
Observed		Estimated	
CO	Level	CO	Level
0.50	1	1.04	1
1.50	1	1.87	1
4.30	1	3.01	1
4.60	2	5.42	2
6.30	2	5.98	2
6.80	3	6.10	2
7.50	3	8.47	3
10.10	4	8.54	3
15.40	4	11.55	4
31.00	5	32.15	5

Compare the value between observed and predicted					
PM _{2.5}					
Level	PM _{2.5} (µg/m ³)	Meaning	Observed	Predicted	Accuracy (%)
1	0 - 15.0	Excellent	6	5	83.33
2	15.1 - 25.0	Satisfactory	9	8	88.89
3	25.1 - 37.5	Moderate	13	13	100.00
4	37.6 - 75.0	Unhealthy	8	7	87.50
5	75.1 Above	Very Unhealthy	4	4	100.00
Total			40	37	92.50
CO					
Level	CO (ppm)	Meaning	Observed	Predicted	Accuracy (%)
1	0 - 4.4	Excellent	3	3	100.00
2	4.5 - 6.4	Satisfactory	2	2	100.00
3	6.5 - 9.0	Moderate	2	1	50.00
4	9.1 - 30.0	Unhealthy	2	1	50.00
5	30.1 Above	Very Unhealthy	1	1	100.00
Total			10	8	80.00

Discussion

1. การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของฝุ่น $PM_{2.5}$ กับมลพิษทางอากาศที่เกี่ยวข้องในพื้นที่ภาคเหนือตอนบนของประเทศไทยพบว่าปัญหามลพิษทางอากาศในภาคเหนือตอนบนของประเทศไทยมีความรุนแรงที่สุดในช่วงเดือนกุมภาพันธ์ถึงต้นเดือนพฤษภาคมของทุกปี ซึ่งสอดคล้องกับสภาพอากาศอื่นและแห้งแล้งประกอบกับการเผาในที่โล่งจำนวนมากทั้งจากภายในประเทศและประเทศเพื่อนบ้าน โดยเฉพาะจากกิจกรรมทางการเกษตรและไฟฟ้า นอกจากนี้สภาพภูมิอากาศที่เอื้อต่อการสะสมตัวของฝุ่น $PM_{2.5}$ กับมลพิษทางอากาศที่เกี่ยวข้อง เช่น ปรากฏการณ์อุณหภูมิผกผัน (Temperature Inversion) ทำให้มลพิษไม่สามารถลอยตัวและกระจายออกไปได้ ส่งผลให้คุณภาพอากาศแย่ลงอย่างมาก ส่วนในช่วงเดือนอื่น ๆ เป็นช่วงที่คุณภาพอากาศมีแนวโน้มดีขึ้น เช่น มีฝนตกต่อเนื่องช่วยชะล้างฝุ่นละอองในอากาศ และการเผาในที่โล่งลดลง จึงทำให้คุณภาพอากาศในบางพื้นที่อยู่ในระดับปานกลางถึงดีมาก ผลการวิจัยนี้สอดคล้องกับงานศึกษาอื่น ๆ ที่ศึกษาเกี่ยวกับความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของฝุ่น $PM_{2.5}$ และสารมลพิษทางอากาศชนิดต่าง ๆ เช่น งานศึกษาของ Kawichai *et al.* (2024) พบว่าความเข้มข้นของฝุ่น $PM_{2.5}$ และก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์มีความสัมพันธ์กัน โดยเฉพาะอย่างยิ่งในช่วงฤดูร้อนที่มีการเผาไหม้ในพื้นที่โล่งและพื้นที่ป่าไม้ ซึ่งเป็นแหล่งกำเนิดหลักของฝุ่น $PM_{2.5}$ และก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ (Tao *et al.*, 2013 ; Lalchandani *et al.*, 2022) และยังสอดคล้องกับงานศึกษาของ Chairattawan & Patthirasinsiri (2020) ที่ได้ศึกษาแหล่งกำเนิดของการเกิดฝุ่นบริเวณภาคเหนือของประเทศไทย พบว่าแหล่งกำเนิดฝุ่น $PM_{2.5}$ ส่วนใหญ่เกิดจากการเผาในที่โล่ง นอกจากนี้ ปรากฏการณ์อุณหภูมิผกผันในช่วงฤดูหนาวยังส่งผลให้มลพิษสะสมใกล้พื้นดินมากขึ้น (Niedźwiedź *et al.*, 2021 ; Shao *et al.*, 2023) อย่างไรก็ตาม ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของฝุ่น $PM_{2.5}$ กับก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์ (NO_2) และก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO_2) ในงานวิจัยครั้งนี้มีความแตกต่างจากบางงานวิจัยก่อนหน้านี้ เช่น งานศึกษาของ Peng-in *et al.* (2022) ได้ทำการศึกษาคำนวณค่าฝุ่น $PM_{2.5}$ ระดับภาคพื้นดิน บริเวณกรุงเทพมหานครและปริมณฑลของประเทศไทย โดยใช้ค่าความลึกเชิงแสงของละอองลอยจากดาวเทียมเซนเซอร์ MODIS ผลการศึกษานในงานวิจัยนี้พบว่าก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์ (NO_2) และโอโซน (O_3) มีความสัมพันธ์กับค่าความเข้มข้นของฝุ่น $PM_{2.5}$ ซึ่งแตกต่างจากผลการศึกษาในพื้นที่ภาคเหนือตอนบนของประเทศไทยที่อาจเกิดจากความแตกต่างของพื้นที่ศึกษา สภาพภูมิอากาศ วัฒนธรรม นโยบายการปกครอง และแหล่งกำเนิดมลพิษที่มีความแตกต่างกัน

2. การสร้างแบบจำลองสำหรับประมาณค่าความเข้มข้นของฝุ่น $PM_{2.5}$ และสารมลพิษทางอากาศจากสมการถดถอย 6 แบบ ได้แก่ แบบเส้นตรง (Linear model) แบบลอการิทึม (Logarithmic model) แบบควอดราติกส์ (Quadratic model) แบบคิวบิก (Cubic model) แบบเลขยกกำลัง (Power model) และแบบเอ็กโปเนนเชียล (Exponential model) เพื่อหาสมการที่ดีที่สุด ผลการศึกษาพบว่าค่าความเข้มข้นของฝุ่นละอองขนาดเล็กไม่เกิน 2.5 ไมครอน และก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์มีความสัมพันธ์แบบคิวบิก (Cubic model) กับค่าความลึกเชิงแสงของละอองลอย มีค่าสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจ (R^2) คือ 0.923 โดยแบบจำลองในช่วงฤดูร้อนมีความเหมาะสมสูงสุด เช่นเดียวกับงานศึกษาของ Asadi *et al.* (2019) แบบจำลองของงานศึกษานี้ยังสอดคล้องกับผลการศึกษาของ Charoenpanyanet & Hemwan (2019) ที่ได้ทำการศึกษการสร้างแบบจำลองที่เหมาะสมสำหรับประมาณค่าความเข้มข้นของฝุ่น $PM_{2.5}$ โดยใช้ค่าความลึกเชิงแสงของฝุ่นละอองในบรรยากาศ

(AOT) และสถานีภาคพื้นดิน ผลการศึกษาพบว่าแบบจำลองคิวบิก มีค่าสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจ (R^2) สูงที่สุด คือ 0.770 และสอดคล้องกับผลการศึกษาของ Bao & Van (2021) ที่ทำการศึกษาในนครโฮจิมินห์ ประเทศเวียดนาม ผลการศึกษาพบว่าความเข้มข้นของฝุ่น $PM_{2.5}$ และค่าความลึกเชิงแสงของละอองลอยมีความสัมพันธ์แบบคิวบิกที่สูงที่สุด มีค่าสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจ (R^2) คือ 0.82 สำหรับก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์ (NO_2) และก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO_2) พบว่ามีความสัมพันธ์กับค่าความลึกเชิงแสงของละอองลอยในระดับต่ำจึงไม่สามารถนำมาใช้สร้างแบบจำลองได้

แนวทางการศึกษาต่อไป จากผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของฝุ่น $PM_{2.5}$ กับมลพิษทางอากาศที่เกี่ยวข้อง ค่าความเข้มข้นของฝุ่น $PM_{2.5}$ มีความสัมพันธ์สูงที่สุดกับก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ในช่วงฤดูร้อน แต่เมื่อพิจารณาในช่วงฤดูหนาว พบว่าค่าความเข้มข้นของ $PM_{2.5}$ มีความสัมพันธ์กับมลพิษทางอากาศทุกชนิดที่ตรวจวัด ในกรณีนี้การใช้แบบจำลองพหุคูณ (Multiple Regression) อาจช่วยให้การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างฝุ่น $PM_{2.5}$ กับสารมลพิษอื่น ๆ มีความแม่นยำมากยิ่งขึ้น โดยสามารถพิจารณาผลกระทบจากมลพิษหลายตัวแปรพร้อมกัน นอกจากนี้ การใช้ข้อมูลจากดาวเทียมที่มีความละเอียดเชิงพื้นที่สูงขึ้น เช่น ดาวเทียม Sentinel-5P (TROPOMI) ผลิตภัณฑ์ข้อมูลชุดเรดาร์โอมิเตอร์ถ่ายภาพอินฟราเรดที่มองเห็นได้ (Visible Infrared Imaging Radiometer Suite: VIIRS) หรือ ดาวเทียมอุตุนิยมวิทยา Himawari-8 เป็นประโยชน์ต่อการพัฒนาแบบจำลองในอนาคต นอกจากนี้ควรศึกษาผลกระทบความเข้มข้นของฝุ่น $PM_{2.5}$ และค่าความเข้มข้นของสารมลพิษทางอากาศอื่น ๆ ในด้านสุขภาพเชิงลึก โดยเฉพาะกลุ่มประชากรที่มีความเปราะบาง เช่น เด็ก ผู้สูงอายุ และผู้ป่วยเรื้อรัง สำหรับหน่วยงานที่เกี่ยวข้องควรให้ความสำคัญกับการลดมลพิษทางอากาศจากแหล่งกำเนิด เช่น การควบคุมการเผาในที่โล่ง การสร้างความตระหนักและการให้ความรู้แก่ประชาชน สำหรับประชาชนทั่วไปควรหลีกเลี่ยงกิจกรรมกลางแจ้งในช่วงที่มีค่าความเข้มข้นของมลพิษทางอากาศสูง รวมถึงใช้น้ำจากกอนามัยหรือเครื่องกรองอากาศในบ้าน สำหรับหน่วยงานที่เกี่ยวข้องควรเผยแพร่ข้อมูลคุณภาพอากาศอย่างต่อเนื่อง เพื่อให้ประชาชนรับทราบและป้องกันตนเองได้อย่างเหมาะสม

Conclusions

ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มข้นของฝุ่น $PM_{2.5}$ กับค่าความเข้มข้นของสารมลพิษทางอากาศที่เกี่ยวข้อง ได้แก่ ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์ (NO_2) และก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO_2) มีความสัมพันธ์ที่แตกต่างกันไปตามฤดูกาล โดยฝุ่น $PM_{2.5}$ และก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์พบว่ามีค่าความสัมพันธ์ระหว่างกันสูงที่สุดในช่วงฤดูร้อน เนื่องจากการเผาไหม้ในพื้นที่เกษตรกรรมหรือการเกิดไฟป่าที่เป็นสาเหตุหลักของการเกิดมลพิษทางอากาศที่มักเกิดในช่วงฤดูร้อนในพื้นที่ภาคเหนือตอนบนของประเทศไทย ในช่วงฤดูหนาวพบความสัมพันธ์ปานกลาง และในช่วงฤดูฝนพบความสัมพันธ์ต่ำที่สุด ส่วนค่าความเข้มข้นของฝุ่น $PM_{2.5}$ กับก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์ และค่าความเข้มข้นของฝุ่น $PM_{2.5}$ กับก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์พบว่ามีค่าความสัมพันธ์ปานกลางในช่วงฤดูหนาว เนื่องจากอิทธิพลของปรากฏการณ์อุณหภูมิมกผันที่กักเก็บมลพิษเอาไว้ ส่วนในช่วงฤดูร้อนและฤดูฝน พบว่ามีความสัมพันธ์ที่ต่ำมาก โดยเฉพาะในช่วงฤดูฝนที่มีปริมาณน้ำฝนช่วยลดความเข้มข้นของมลพิษทางอากาศผ่านกระบวนการชะล้างมลพิษ (Wet Deposition) พื้นที่ภาคเหนือ

ตอนบนของประเทศไทยมักเผชิญปัญหามลพิษทางอากาศรุนแรง โดยเฉพาะค่าฝุ่น $PM_{2.5}$ ที่สูงเกินค่ามาตรฐานคุณภาพอากาศที่กำหนด โดยเฉพาะในช่วงเดือนกุมภาพันธ์ถึงพฤษภาคมมลพิษทางอากาศในช่วงเวลาดังกล่าวอยู่ในระดับที่เริ่มมีผลกระทบต่อสุขภาพถึงระดับที่มีผลกระทบต่อสุขภาพและอาจส่งผลกระทบต่อการศึกษาในครั้งนี้นำมาค่าความเข้มข้นของฝุ่น $PM_{2.5}$ และก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์มีความสัมพันธ์แบบคิวบิก (Cubic model) กับค่าความลึกเชิงแสงของละอองลอย โดยแบบจำลองในช่วงฤดูร้อนมีความเหมาะสมสูงที่สุด แบบจำลองฝุ่น $PM_{2.5}$ มีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ 0.923 และแบบจำลองก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์ มีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ 0.823 การประเมินความถูกต้องของแบบจำลองพบว่ามีค่าแม่นยำสูง โดยค่าความถูกต้องของแบบจำลองฝุ่น $PM_{2.5}$ และแบบจำลองก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์ มีความถูกต้อง 92.5 เปอร์เซ็นต์ และ 80 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ การศึกษาในอนาคตสามารถพิจารณาผลกระทบจากมลพิษหลายตัวแปรพร้อมกันด้วยการใช้แบบจำลองพหุคูณ (Multiple Regression) และการใช้ข้อมูลจากดาวเทียมต่าง ๆ ที่มีความละเอียดเชิงพื้นที่สูงขึ้น

Acknowledgments

การวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนการศึกษาเพื่อทำหน้าที่ผู้ช่วยสอน/ผู้ช่วยวิจัย (TA/RA) จากมหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ผู้วิจัยขอขอบคุณอาจารย์ที่ปรึกษา ในเรื่องการให้คำปรึกษา การให้คำแนะนำในเรื่องต่าง ๆ ตลอดจนตรวจทานแก้ไขข้อบกพร่องด้วยความเอาใจใส่เป็นอย่างยิ่ง จนสำเร็จสมบูรณ์ลุล่วงได้ด้วยดี ขอขอบคุณกองจัดการคุณภาพอากาศและสิ่งแวดล้อมควบคุมมลพิษสำหรับการให้ความอนุเคราะห์ข้อมูลการตรวจวัดความเข้มข้นของฝุ่น $PM_{2.5}$ และมลพิษทางอากาศที่เกี่ยวข้องจากสถานีตรวจวัดภาคพื้นดินในเขตพื้นที่ภาคเหนือตอนบนของประเทศไทย และขอขอบคุณ Earthdata (NASA) สำหรับแหล่งดาวน์โหลดข้อมูลค่าความลึกเชิงแสงของละอองลอย (AOD) โดยในการศึกษานี้ได้เข้าถึงข้อมูล วิเคราะห์และประมวลผลด้วย Google Earth Engine

References

- Asadi, A., Goharnejad, H., & Niri, M. Z. (2019). Regression modelling of air quality based on meteorological parameters and satellite data. *Journal of Elementology*, 24(1).
- Bao, V. Q., & Van, T. T. (2021). An empirical relationship between $PM_{2.5}$ and aerosol optical depth from MODIS satellite images for spatial simulation over Ho Chi Minh city. *Vietnam Journal of Science, Technology and Engineering*, 63(4), 72-78.
- Buya, S., Usanavasin, S., Gokon, H., & Karnjana, J. (2023). An Estimation of daily $PM_{2.5}$ Concentration in Thailand using satellite Data at 1-kilometer resolution. *Sustainability*, 15(13), 10024.

- Chairattanawan, K., & Patthirasinsiri, N. (2020). Emission source impact and problem solving and management on PM2. 5 in the Northern part of Thailand. *J Assoc Res*, 25(1), 432-446.
- Charoenpanyanet, A., & Hemwan, P. (2019). Suitable Model for Estimation of PM2. 5 Concentration Using Aerosol Optical Thickness (AOT) and Ground based Station: Under the Dome in Upper Northern, Thailand. *International Journal of Geoinformatics*, 15(3).
- Kawichai, S., Prapamontol, T., Cao, F., Song, W., & Zhang, Y. L. (2024). Characteristics of Carbonaceous Species of PM2. 5 in Chiang Mai City, Thailand. *Aerosol and Air Quality Research*, 24(4), 230269.
- Lalchandani, V., Srivastava, D., Dave, J., Mishra, S., Tripathi, N., Shukla, A. K., Sahu, R., Thamban, N. M., Gaddamidi, S., Dixit, K., Ganguly, D., Tiwari, S., Srivastava, A. K., Sahu, L., Rastogi, N., Gargava, P., & Tripathi, S. N. (2022). Effect of biomass burning on PM2. 5 composition and secondary aerosol formation during post-monsoon and winter haze episodes in Delhi. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 127(1), e2021JD035232.
- Niedźwiedź, T., Łupikasza, E. B., Małarzewski, Ł., & Budzik, T. (2021). Surface-based nocturnal air temperature inversions in southern Poland and their influence on PM10 and PM2.5 concentrations in Upper Silesia. *Theoretical and Applied Climatology*, 146(3), 897-919.
- Onivefu, A. P., & Imarhiagbe, O. (2024). Types of Air Pollutants. *Air Pollutants in the Context of One Health: Fundamentals, Sources, and Impacts* (pp. 123-160). Cham: Springer Nature Switzerland.
- Peng-In, B., Sanitluea, P., Monjatturat, P., Boonkerd, P., & Phosri, A. (2022). Estimating ground-level PM2. 5 over Bangkok Metropolitan Region in Thailand using aerosol optical depth retrieved by MODIS. *Air Quality, Atmosphere & Health*, 15(11), 2091-2102.
- Satheesh, S. K., & Moorthy, K. K. (2005). Radiative effects of natural aerosols: A review. *Atmospheric Environment*, 39(11), 2089-2110.
- Shahriyari, H. A., Nikmanesh, Y., Jalali, S., Tahery, N., Zhiani Fard, A., Hatamzadeh, N., Zarea, K., Cheraghi, M., & Mohammadi, M. J. (2022). Air pollution and human health risks: mechanisms and clinical Manifestations of cardiovascular and respiratory diseases. *Toxin Reviews*, 41(2), 606-617.

- Shao, M., Xu, X., Lu, Y., & Dai, Q. (2023). Spatio-temporally differentiated impacts of temperature inversion on surface PM_{2.5} in eastern China. *Science of the Total Environment*, 855, 158785.
- Srianan, K., & Lalitaporn, P. (2022). Estimating particulate matter concentration by using satellite data over central Thailand. *Journal of Environmental and Sustainable Management*, 18(2), 4-25.
- Tao, J., Zhang, L., Engling, G., Zhang, R., Yang, Y., Cao, J., Zhu, C., Wang, Q., & Luo, L. (2013). Chemical composition of PM_{2.5} in an urban environment in Chengdu, China: Importance of springtime dust storms and biomass burning. *Atmospheric Research*, 122, 270-283.
- Zhang, Y., & Li, Z. (2015). Remote sensing of atmospheric fine particulate matter (PM_{2.5}) mass concentration near the ground from satellite observation. *Remote Sensing of Environment*, 160, 252-262.