

การทำนายปริมาณฝุ่นละอองขนาดเล็ก 2.5 ไมครอนจากข้อมูลความลึกเชิงแสงของอนุภาคแขวนลอยในอากาศและข้อมูล
อุตุนิยมวิทยาในพื้นที่กรุงเทพมหานครและปริมณฑล

PREDICTION OF PM_{2.5} CONCENTRATION USING AEROSOL OPTICAL DEPTH AND METEOROLOGICAL DATA IN
BANGKOK

ชฎานนท์ เทพแสงพราว^{1,*}, ธงทิศ ฉายากุล¹, ศิริมา ปัญญาเมธิกุล²

¹ ภาควิชาวิศวกรรมสำรวจ, คณะวิศวกรรมศาสตร์, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ, ประเทศไทย

² ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม, คณะวิศวกรรมศาสตร์, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ, ประเทศไทย

*Corresponding author address: t.chayanonth@hotmail.com

บทคัดย่อ

ในพื้นที่กรุงเทพมหานครและปริมณฑลฝุ่นละอองขนาดเล็กผ่านศูนย์กลางไม่เกิน 2.5 ไมครอน (PM_{2.5}) เกินค่ามาตรฐานนั้นเป็นปัญหาที่เกิดขึ้นต่อเนื่องทุกปีโดย PM_{2.5} นั้นมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงภูมิอากาศ เศรษฐกิจและเป็นอันตรายต่อสุขภาพอย่างมาก การตรวจวัดโดยสถานีตรวจวัดคุณภาพอากาศมีข้อจำกัดที่จากผลการตรวจวัดนั้นมีความสัมพันธ์กับพื้นที่โดยรอบในรัศมีไม่มากและด้วยข้อจำกัดด้านจำนวนสถานี ทำให้การวัดปริมาณความเข้มข้น PM_{2.5} มีความน่าเชื่อถือที่ลดลงและไม่สอดคล้องกับสถานการณ์ที่เกิดขึ้นจริง ในงานวิจัยนี้จึงมุ่งประเด็นไปที่การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อหาปริมาณความเข้มข้นของ PM_{2.5} ด้วยการใช้ค่าความลึกเชิงแสงของอนุภาคแขวนลอยในอากาศที่ได้จากข้อมูลดาวเทียมเซนเซอร์ Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) อัลกอริทึม Multi-Angle Implementation of Atmospheric Correction (MAIAC) ความละเอียดเชิงพื้นที่ 1 กิโลเมตรร่วมกับข้อมูลอุตุนิยมวิทยาที่ได้จากสถานีตรวจวัดคุณภาพอากาศได้แก่ อุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ ความเร็วลมจากกรมควบคุมมลพิษในพื้นที่จังหวัดกรุงเทพมหานครและปริมณฑล โดยใช้ข้อมูลในช่วงเดือน พฤศจิกายน ถึง เดือนมีนาคม ในปี 2560-2563 ซึ่งผลลัพธ์ที่ออกมาในแต่ละสถานีนั้นมีค่าสัมประสิทธิ์ตัวกำหนด (R²) อยู่ที่ 0.377-0.671 และค่า RMSE อยู่ที่ 9.216-16.116 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร โดยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่สร้างขึ้นจะเป็นประโยชน์ในการหาปริมาณ PM_{2.5} ในพื้นที่ที่ไม่มีสถานีตรวจวัดคุณภาพอากาศภาคพื้นดิน ช่วยลดความผิดพลาดในการแจ้งเตือนปริมาณ PM_{2.5} และสามารถใช้ในการบริหารจัดการมลพิษทางอากาศในระยะยาวได้

คำสำคัญ: ฝุ่นละอองขนาดเล็กผ่านศูนย์กลางไม่เกิน 2.5 ไมครอน, ค่าความลึกเชิงแสงของอนุภาคแขวนลอยในอากาศ,แบบจำลองทางคณิตศาสตร์, MODIS, MAIAC

Abstract

The high level of fine particulate matter, of which its diameter is less than 2.5 microns or PM_{2.5}, in Bangkok metropolis and vicinity has been the major health problem for many years. This issue is going to create a more crucial problem if left untouched. PM_{2.5} affects on climate change, economic losses, and human health. Traditionally, air quality monitoring stations are limited by the number of stations, their location, and their effective range. Thus, the measured level of PM_{2.5} from those stations are less reliable and cannot be used in further analysis or prediction. Our objective is to create a mathematical model for estimated PM_{2.5} concentration using satellite measurements of aerosol optical depth (AOD) received from Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) sensor, algorithm Multi-Angle Implementation of Atmospheric Correction (MAIAC) high-spatial resolution 1 km combined with meteorological data, which are temperature, wind speed and relative humidity from the Pollution Control Department in Bangkok metropolis and vicinity area for 2017-2020 (November-March). Our mathematical model in each station shows coefficient of determination (R²) between 0.377-0.671 and root mean square error (RMSE) 9.216-16.116 microgram/m³. The mathematical model would be beneficial in areas without air quality monitoring stations, which can reduce false warning and benefit long-term pollution management.

Keywords: Particulate matters with diameter less than 2.5 micron, Aerosol optical depth, Mathematical model, MODIS, MAIAC

1. บทนำ

ในพื้นที่จังหวัดกรุงเทพมหานครและปริมณฑลปริมาณฝุ่นละอองขนาดเล็กผ่านศูนย์กลางไม่เกิน 2.5 ไมครอน (Particulate Matters with diameter less than 2.5 micron; PM_{2.5}) เกินค่ามาตรฐานนั้นเป็นปัญหาที่เกิดขึ้นต่อเนื่องทุกปีโดยมีการตรวจพบปริมาณฝุ่นละออง PM_{2.5} เกินค่ามาตรฐานประมาณ 40-50 วันต่อปี ในช่วงเดือนเดือนมกราคมถึงเดือนมีนาคม ซึ่งค่ามาตรฐานเฉลี่ย 24 ชั่วโมงต้องไม่เกิน 50 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร [1] โดย PM_{2.5} นั้นมีอันตรายต่อสุขภาพอย่างมากเนื่องจากคนจมูกไม่สามารถกรองได้และยังสามารถทะลุเข้าไปในถุงลมปอดและเข้าสู่ระบบไหลเวียนเลือดได้ [2] รวมทั้งการป้องกันยังจำเป็นต้องใช้หน้ากากกรองอากาศชนิด N95 ซึ่งเหตุผลเหล่านี้ส่งผลกระทบต่อการดำเนินชีวิตของประชาชนในพื้นที่ทั้งในแง่สุขภาพระบบทางเดินหายใจ ค่าใช้จ่ายในการจัดหาอุปกรณ์ป้องกัน การดำเนินกิจกรรมกลางแจ้ง การท่องเที่ยว การเดินทางและการขนส่ง

โดยวิธีการตรวจวัดของประเทศไทยโดยกรมควบคุมมลพิษจะทำการตรวจโดยสถานีตรวจวัดคุณภาพอากาศภาคพื้นดินซึ่งผลการตรวจวัดนั้นมีความสัมพันธ์กับพื้นที่โดยรอบในรัศมีไม่มากด้วยข้อจำกัดระยะห่างระหว่างสถานีและจำนวนสถานี [3] ซึ่งในบางจังหวัดมีสถานีเพียงหนึ่งสถานีหรือในบางจังหวัดไม่มีสถานีตรวจวัดคุณภาพอากาศเลย เมื่อนำผลลัพธ์ของปริมาณ PM_{2.5} ที่วัดได้ไปใช้ในการเตือนภัยหรือวางแผนการจัดการคุณภาพอากาศอาจทำให้ได้ผลลัพธ์ที่ไม่สอดคล้องกับสถานการณ์ที่เกิดขึ้นจริง [4]

ในปัจจุบันมีผลิตภัณฑ์ที่ได้จากเทคนิคการสำรวจระยะไกลโดยใช้ดาวเทียมที่ได้ข้อมูลครอบคลุมพื้นที่ที่มากกว่าสถานีตรวจวัดคุณภาพอากาศภาคพื้นดิน ตัวอย่างเช่น ผลิตภัณฑ์จากเซนเซอร์ MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) ซึ่งจะให้ความลึกเชิงแสงของอนุภาคแขวนลอยในอากาศ (Aerosol Optical Depth; AOD) [5] ซึ่งค่าดังกล่าวมีผลต่อละอองลอยในชั้นบรรยากาศและมีความสำคัญในการหาปริมาณความเข้มข้นของ PM_{2.5} [6] โดยมีอัลกอริทึม Multi-Angle Implementation of Atmospheric Correction (MAIAC) ซึ่งถูกพัฒนาขึ้นโดยใช้เซนเซอร์ MODIS โดยมีความละเอียดเชิงพื้นที่ที่ 1 กิโลเมตร อัลกอริทึมดังกล่าวแสดงให้เห็นถึงความสามารถในการบอกปริมาณของละอองลอยในชั้นบรรยากาศที่ละเอียดมากขึ้น ทำให้ส่งผลต่อการประมาณค่า PM_{2.5} ได้แม่นยำกว่าผลิตภัณฑ์จาก MODIS เดิมที่มีความละเอียดเชิงพื้นที่ที่ 3 กม. และ 10 กม. [7] ซึ่งเราสามารถนำข้อมูล AOD ไปใช้ในการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อใช้ในการหาปริมาณความเข้มข้นของ PM_{2.5} ได้นอกจากนั้นยังมีการใช้ข้อมูลอุตุนิยมวิทยา ตัวอย่างเช่น อุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ ความเร็วลม ซึ่งเป็นตัวแปรอิสระที่เข้าร่วมกับข้อมูล AOD ในการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อใช้ในการหา

ปริมาณความเข้มข้นของ PM_{2.5} จากข้อมูลดาวเทียมซึ่งพารามิเตอร์ทางด้านอุตุนิยมวิทยาเหล่านั้นล้วนมีผลต่อปริมาณละอองลอยในอากาศ [8] และถูกใช้ในการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อใช้ในการหาปริมาณความเข้มข้นของ PM_{2.5} มาก่อนหน้านั้นแล้ว ดังนั้นจึงมีความสำคัญอย่างมากที่จะใช้ข้อมูลทางอุตุนิยมวิทยา มาวิเคราะห์ร่วมกับข้อมูล AOD เพื่อใช้ในการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อใช้ในการหาปริมาณความเข้มข้นของ PM_{2.5} [9]

โดยในงานวิจัยนี้จะมุ่งประเด็นไปที่การศึกษาที่จะนำผลิตภัณฑ์ที่ได้จากเซนเซอร์ MODIS โดยการนำค่า AOD ที่ได้จากอัลกอริทึม MAIAC ซึ่งมีความละเอียดสูงที่ 1 กิโลเมตรมาเข้าร่วมกับข้อมูลทางอุตุนิยมวิทยา ได้แก่ อุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ ความเร็วลม ที่ได้จากสถานีตรวจวัดคุณภาพอากาศภาคพื้นดินในพื้นที่จังหวัดกรุงเทพมหานครและปริมณฑล ซึ่งจะนำข้อมูลในช่วงเดือนพฤศจิกายนถึงเดือนมีนาคม ในปี ค.ศ. 2017 ถึง 2020 มาสร้างสมการทางคณิตศาสตร์เพื่อใช้ในการหาปริมาณความเข้มข้นของ PM_{2.5} ด้วยวิธี การวิเคราะห์การถดถอยเชิงพหุคูณ (Multiple Linear Regression; MLR) แล้วนำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้มาคำนวณหาปริมาณความเข้มข้นของ PM_{2.5} ซึ่งสมการทางคณิตศาสตร์ที่ได้จะตรวจสอบความถูกต้องโดยทำการเปรียบเทียบกับข้อมูลจากสถานีตรวจวัดคุณภาพอากาศภาคพื้นดินด้วยค่าสัมประสิทธิ์ตัวกำหนด (coefficient of determination; R²) กับค่า RMSE (Root Mean Square Error; RMSE)

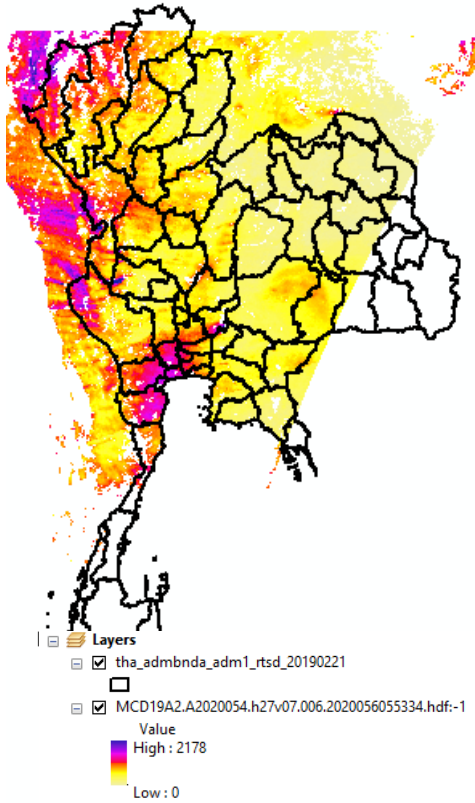
2. พื้นที่และข้อมูลที่ใช้ในการศึกษา

2.1. พื้นที่ศึกษา

พื้นที่การศึกษาอยู่ในจังหวัดกรุงเทพมหานครและจังหวัดปริมณฑล ได้แก่ สมุทรปราการ นนทบุรี ปทุมธานี นครปฐมและสมุทรสาคร โดยมีขนาดพื้นที่ประมาณ 7700 ตร.กม. มีขอบเขตที่ละติจูด 13.42521 ถึง 14.27595 °N ลองจิจูด 99.81410 ถึง 100.96388 °E

2.2. ข้อมูลดาวเทียม

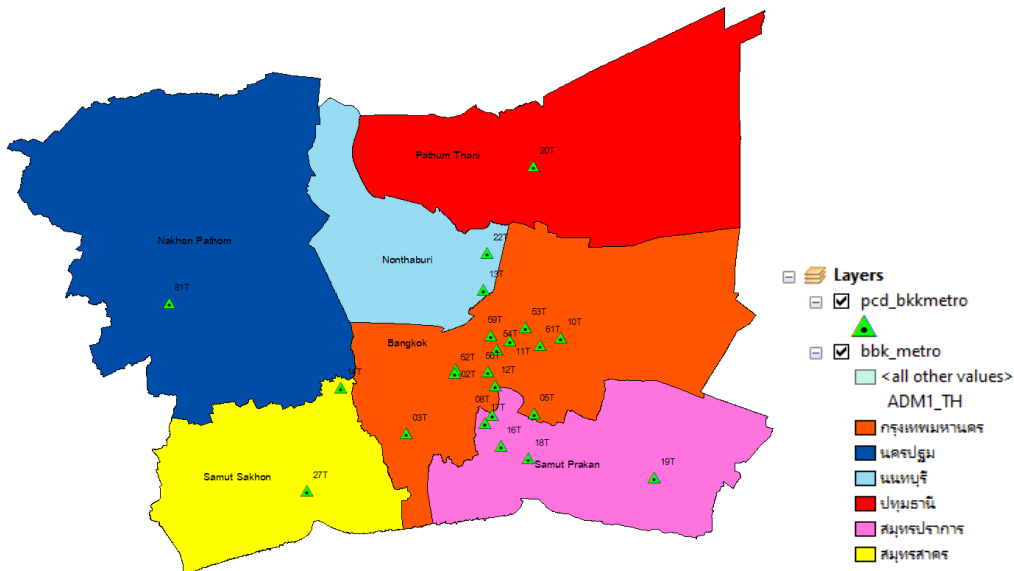
ข้อมูลดาวเทียมจากเซนเซอร์ MODIS โดยอัลกอริทึม MAIAC ความละเอียดเชิงพื้นที่ 1 กิโลเมตรจาก Platform : Combine Aqua Terra โดยผลิตภัณฑ์ที่ใช้คือ MCD19A2 ซึ่งประมวลผลโดย NASA โดยใช้ข้อมูลรายวันในช่วงเดือนพฤศจิกายนถึงเดือนมีนาคม ในปี ค.ศ. 2017-2020 เพื่อหาค่าความลึกเชิงแสงของอนุภาคแขวนลอยในอากาศ (AOD) ที่ความยาวคลื่น 550 นาโนเมตร ซึ่งข้อมูลจะอยู่ในรูปแบบ Hierarchical Data Format (HDF4) ประกอบด้วย Scientific data sets (SDS's) จำนวนมากและสามารถดาวน์โหลดข้อมูลได้จาก NASA's LAADS website โดยจะแสดงตัวอย่างข้อมูลดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 ข้อมูลดาวเทียมจากผลิตภัณฑ์ MCD19A2 แสดงผลค่าความลึกเชิงแสงของอนุภาคแขวนลอยในอากาศบริเวณประเทศไทย วันที่ 23 กุมภาพันธ์ ค.ศ. 2020

2.3. ข้อมูลปริมาณ PM_{2.5} และข้อมูลอุตุนิยมวิทยา

ข้อมูลปริมาณความเข้มข้นของ PM_{2.5} และข้อมูลอุตุนิยมวิทยา ได้แก่ อุณหภูมิ ความเร็วลม และความชื้นสัมพัทธ์โดยใช้ข้อมูลในช่วงเดือนพฤศจิกายนถึงเดือนมีนาคมในปี ค.ศ. 2017-2020 ซึ่งข้อมูลจะอยู่ในรูปแบบรายชั่วโมง โดยข้อมูลจะได้รับจากสถานีตรวจวัดคุณภาพอากาศภาคพื้นดินที่ดูแลโดยกรมควบคุมมลพิษจำนวน 23 สถานีในพื้นที่จังหวัดกรุงเทพมหานครได้แก่สถานี 02T:มหาวิทยาลัยราชภัฏบ้านสมเด็จเจ้าพระยา 03T:ริมถนนกาญจนาภิเษก 05T:กรมอุตุนิยมวิทยา 10T:เคหะชุมชนคลองจั่น 11T:สนามกีฬาเคหะชุมชนห้วยขวาง 12T:โรงเรียนนันทริวิทย์วิทยา 50T:โรงพยาบาลจุฬาลงกรณ์ 52T:สถานีไฟฟ้าอโยธยาบุรี 53T:สถานีตำรวจนครบาลโชคชัย 54T:เคหะชุมชนดินแดง 59T:กรมประชาสัมพันธ์ 61T:โรงเรียนบดินทรเดชา พื้นที่จังหวัดสมุทรปราการได้แก่ 08T:ศูนย์ฟื้นฟูอาชีพคนพิการและทุพพลภาพพระประแดง 16T:โรงไฟฟ้าพระนครใต้ 17T:บ้านพักกรมอุตสาหกรรมพื้นฐานและเหมืองแร่ 18T:ศาลากลางจังหวัดสมุทรปราการ 19T:การเคหะชุมชนเมืองใหม่บางพลี พื้นที่จังหวัดนครปฐมได้แก่ 81T:อ่างเก็บน้ำนครปฐม พื้นที่จังหวัดปทุมธานีได้แก่ 20T:มหาวิทยาลัยกรุงเทพ(วิทยาเขตรังสิต) พื้นที่จังหวัดนนทบุรีได้แก่ 13T:การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย 22T:มหาวิทยาลัยสุโขทัยธรรมาธิราช พื้นที่จังหวัดสมุทรสาครได้แก่ 14T:แขวงทางหลวงสมุทรสาคร 27T:โรงเรียนสมุทรสาครวิทยาลัยโดยตำแหน่งสถานีในพื้นที่ศึกษาแสดงดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 ตำแหน่งของสถานีตรวจวัดคุณภาพโดยกรมควบคุมมลพิษในพื้นที่จังหวัดกรุงเทพมหานครและปริมณฑลจำนวน 23 สถานี

3. วิธีการศึกษา

3.1. การประมวลผลข้อมูลดาวเทียม

การประมวลผลข้อมูลดาวเทียมเซนเซอร์ MODIS จากองค์การ NASA มีขั้นตอนดังนี้ 1) ดาวเทียมโพลิตผลิตภัณฑ์ MCD19A2 ได้จากเว็บไซต์ <https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov> โดยระบุช่วงเวลาตั้งแต่เดือนพฤศจิกายนถึงเดือนมีนาคม ปี ค.ศ. 2017-2020 และระบุขอบเขตของจังหวัดกรุงเทพมหานครและปริมณฑล ที่ละติจูด 13.42521 ° N ถึง 14.27595 ° N ลองจิจูด 99.81410 ° E ถึง 100.96388 ° E เมื่อดาวเทียมโพลิตผลิตภัณฑ์เสร็จเรียบร้อยขั้นตอนที่ 2) หาค่าความลึกเชิงแสงของอนุภาคแขวนลอยในอากาศ (AOD) รายวันจากข้อมูลที่อยู่ในรูปแบบ HDF ไฟล์โดยใช้การเขียนโค้ดในโปรแกรม Python ขึ้นมาเพื่ออ่านไฟล์ HDF โดยอาศัย Module pyhdf ทำการระบุ Scientific data sets เป็น "Optical_Depth_055" ซึ่งจะให้ค่า Green band aerosol optical depth ที่ความยาวคลื่น 0.55 ไมโครเมตรที่มีความละเอียดเชิงพื้นที่ 1 กิโลเมตร [9] ในทุกกริดเซลล์ในระบบพิกัด sinusoidal projection และทำการแปลงพิกัดเหล่านั้นให้อยู่ในระบบ WGS-84 เพื่อนำไปใช้ในการคำนวณหาค่า AOD ณ ตำแหน่งสถานีตรวจวัดคุณภาพอากาศภาคพื้นดิน โดยใช้ haversine formula ดังที่แสดงในสมการที่ (1)

$$\begin{aligned} a &= \sin^2\left(\frac{\Delta\varphi}{2}\right) + \cos\varphi_1 \cdot \cos\varphi_2 \cdot \sin^2\left(\frac{\Delta\lambda}{2}\right) \\ c &= 2 \cdot \arctan(\sqrt{a}/\sqrt{1-a}) \\ d &= R \cdot c \end{aligned} \quad (1)$$

โดยที่ φ คือ ละติจูด, λ คือ ลองจิจูด, R คือ รัศมีโลก (6371 กิโลเมตร)

เพื่อทำการคำนวณระยะทางระหว่างพิกัดของสถานีตรวจวัดคุณภาพอากาศกับพิกัดของแต่ละกริดเซลล์ในไฟล์และเลือกค่าจากกริดเซลล์ที่มีระยะทางที่สั้นที่สุดจากสถานีไปคูณกับ Scale factor ขนาด 0.001 จาก attribute ของไฟล์ข้อมูลจะทำให้ได้ค่า AOD ของแต่ละสถานีออกมาแล้วทำการบันทึกค่า AOD วันที่ และ พิกัดสถานีสถานีตรวจวัดคุณภาพอากาศลงในโปรแกรม Excel

3.2. การประมวลผลข้อมูลอุตุนิยมวิทยาและข้อมูล PM_{2.5}

ข้อมูลอุตุนิยมวิทยาและข้อมูล PM_{2.5} เป็นข้อมูลที่ได้จากกรมควบคุมมลพิษที่จะอยู่ในรูปแบบ Microsoft Excel Worksheet โดยข้อมูลอุตุนิยมวิทยาที่จะใช้ในงานวิจัยฉบับนี้ได้แก่ ได้แก่ อุณหภูมิในหน่วยองศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ในหน่วยเปอร์เซ็นต์ และ ความเร็วลมในหน่วยเมตรต่อวินาที ข้อมูล PM_{2.5} ในหน่วยไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร โดยนำข้อมูลดังกล่าวไปทำ Data cleaning ก่อนนำข้อมูลไปมาเฉลี่ยจากข้อมูลรายชั่วโมงให้

กลายเป็นข้อมูลรายวันโดยใช้การเขียนโค้ดในโปรแกรม Python โดยการเฉลี่ยตาม Index (วัน เดือน ปี) ของข้อมูลและทำการบันทึกข้อมูลลงในโปรแกรม Excel เพื่อใช้ประมวลผลในขั้นตอนถัดไป

3.3. การวิเคราะห์การถดถอยด้วยวิธี

MULTIPLE LINEAR REGRESSION (MLR)

สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อหาปริมาณ PM_{2.5} ของแต่ละสถานีในพื้นที่กรุงเทพมหานครและปริมณฑลจากข้อมูล AOD และจากข้อมูลอุตุนิยมวิทยาได้แก่ อุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ ความเร็วลมและข้อมูล PM_{2.5} จากสถานีตรวจวัดคุณภาพอากาศภาคพื้นดินโดยข้อมูลที่ใส่จะใส่ข้อมูลในช่วงเดือนพฤศจิกายนถึงเดือนมีนาคม ปี ค.ศ. 2017-2019 ซึ่งข้อมูลดังกล่าวได้จากขั้นตอนที่ 3.1 และ 3.2 โดยการเขียนโค้ดผ่านโปรแกรม MATLAB โดยมีแบบจำลองแสดงในสมการที่ (2)

$$PM_{2.5} = a_0 + (a_1 \times AOD) + (a_2 \times T) + (a_3 \times WS) + (a_4 \times RH) \quad (2)$$

โดยที่

PM_{2.5} คือ ฝุ่นละอองขนาดไม่เกิน 2.5 ไมครอน (ไมโครกรัม/ลบ.ม.)

AOD คือ Aerosol Optical Depth

T คือ อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)

WS คือ ความเร็วลม (เมตรต่อวินาที)

RH คือ ความชื้นสัมพัทธ์ (เปอร์เซ็นต์)

a₀ คือ y-intercept

a₁, a₂, a₃, a₄ คือ สัมประสิทธิ์การถดถอยของตัวแปรอิสระ

โดยข้อมูลที่นำไปใช้ในการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะเลือกเฉพาะวันที่มีตัวแปรครบทั้งหมดตามสมการเพื่อคำนวณหาสัมประสิทธิ์การถดถอยของตัวแปรอิสระ (a₁, a₂, a₃, a₄) และ y-intercept (a₀) ของแต่ละสถานีออกมาแล้วนำไปใช้ในการหาปริมาณความเข้มข้นของ PM_{2.5}

3.4. การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง

ในการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์นั้นทำได้โดยการหาปริมาณความเข้มข้นของ PM_{2.5} จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่สร้างขึ้นโดยอาศัยสัมประสิทธิ์การถดถอยของตัวแปรอิสระ (a₁, a₂, a₃, a₄) และ y-intercept (a₀) ของแต่ละสถานีที่ได้จากขั้นตอนที่ 3.3 โดยตัวแปรอิสระ ได้แก่ AOD ความชื้นสัมพัทธ์ อุณหภูมิ และ ความเร็วลม จะใช้ข้อมูลช่วงวันที่ 1 พฤศจิกายน 2019 ถึง วันที่ 31 มีนาคม 2020 เป็นข้อมูลที่ใช้ในการตรวจสอบโดยการเขียนโค้ดผ่านโปรแกรม MATLAB เมื่อได้ปริมาณความเข้มข้นของ PM_{2.5} จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่สร้างขึ้นมาแล้วนำไปเปรียบเทียบกับปริมาณความเข้มข้นของ PM_{2.5} จากสถานีตรวจวัดคุณภาพอากาศภาคพื้นดินโดยใช้ค่าสถิติได้แก่ค่าสัมประสิทธิ์ตัวกำหนด (R²) และ ค่า Root Mean Square Error

(RMSE) โดยเมื่อคำนวณค่าสถิติทั้ง 2 แล้วจึงทำการสร้าง Scatter Plot diagram และ Line chart เข้ากับข้อมูลในแต่ละสถานีเพื่อพิจารณาว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่สร้างขึ้นเมื่อนำไปใช้งานจริงผลลัพธ์ที่ได้มีความถูกต้องแม่นยำอย่างไร

4. ผลการศึกษา

4.1. ค่าความลึกเชิงแสงของอนุภาคแขวนลอยในอากาศ

ผลลัพธ์จากการประมวลผลข้อมูลดาวเทียมเพื่อหาค่า AOD จากข้อมูลดาวเทียมรายวัน ณ ตำแหน่งสถานีตรวจวัดคุณภาพอากาศภาคพื้นดินโดยใช้โค้ดที่เขียนในโปรแกรม Python โดยผลลัพธ์หลังจากการประมวลผลแล้วจะแสดงค่า AOD ของแต่ละสถานีและในตำแหน่งที่ไม่มีข้อมูลจะแสดงผลเป็น -28672 โดยมีตัวอย่างผลลัพธ์ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ตัวอย่างผลลัพธ์ค่า AOD ณ ตำแหน่งสถานีตรวจวัดคุณภาพอากาศภาคพื้นดิน

ชื่อสถานี	Year-Julian day	AOD
กรมประชาสัมพันธ์	A2019308	0.416
ม.ราชภัฏบ้านสมเด็จเจ้าพระยา	A2019308	0.418
กรมอุตุนิยมวิทยา	A2019308	0.614
ริมถนนกาญจนาภิเษก	A2019308	-28672
เคหะชุมชนคลองจั่น	A2019308	-28672
โรงเรียนบดินทรเดชา	A2019308	-28672
สนามกีฬาเคหะชุมชนห้วยขวาง	A2019308	0.42
โรงพยาบาลจุฬาลงกรณ์	A2019308	0.447
สถานีตำรวจนครบาลโชคชัย	A2019308	-28672
สถานีไฟฟ้าย่อยธนบุรี	A2019308	0.42
เคหะชุมชนดินแดง	A2019308	0.662
โรงเรียนนนทรีวิทยา	A2019308	0.567

4.2. ข้อมูลอุตุนิยมวิทยาและข้อมูล PM_{2.5}

ผลลัพธ์จากการประมวลผลข้อมูลอุตุนิยมวิทยาและข้อมูลฝุ่นละอองขนาดไม่เกิน 2.5 ไมครอน โดยการคำนวณค่าเฉลี่ยรายชั่วโมงให้เป็นค่าเฉลี่ยรายวัน เพื่อให้สอดคล้องกับผลลัพธ์ AOD โดยใช้โค้ดที่เขียนในโปรแกรม Python โดยตัวอย่างผลลัพธ์ของแต่ละสถานีได้ผลลัพธ์ดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ตัวอย่างค่าเฉลี่ยรายวันของข้อมูลอุตุนิยมวิทยาและ PM_{2.5}

Y-M-D	WS	T	RH	PM _{2.5}
170101	0.8208	26.2375	59.6667	21.3333
170102	0.7833	26.9833	62.8333	18.9583
170103	0.7375	26.9500	62.5417	19.1250
170104	0.6542	27.2750	60.6250	21.2500
170105	0.9083	27.2750	60.5833	29.2500

4.3. ผลลัพธ์การวิเคราะห์การถดถอยด้วยวิธี

MULTIPLE LINEAR REGRESSION (MLR)

ผลลัพธ์จากการวิเคราะห์การถดถอยรายสถานี ทำให้ได้สัมประสิทธิ์การถดถอยของตัวแปรอิสระ (a_1, a_2, a_3, a_4) และ y-intercept (a_0) ตามสมการที่ (2) ซึ่งผลลัพธ์ของแต่ละสถานีแสดงดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 แสดงแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จากการวิเคราะห์การถดถอยด้วยวิธี Multiple linear regression

รหัสสถานี	Equation	จำนวนข้อมูล
59T	$PM_{2.5} = 38.61209(AOD) - 0.88493(RH) + 0.95152(T) - 32.54258(WS) + 67.06592$	82
05T	$PM_{2.5} = 33.63137(AOD) - 0.72032(RH) - 0.70160(T) - 19.03625(WS) + 119.0095$	107
11T	$PM_{2.5} = 44.58185(AOD) - 1.25942(RH) + 1.33583(T) - 10.96762(WS) + 55.83599$	44
53T	$PM_{2.5} = 49.57963(AOD) - 1.72138(RH) + 2.89978(T) - 17.87886(WS) + 42.94268$	74
52T	$PM_{2.5} = 48.516(AOD) - 0.82359(RH) + 0.07740(T) - 18.14137(WS) + 83.57194$	101
54T	$PM_{2.5} = 58.18709(AOD) - 1.68915(RH) + 2.47042(T) - 23.61803(WS) + 55.75808$	40
08T	$PM_{2.5} = 47.06717(AOD) - 0.71386(RH) - 2.31952(T) - 27.89116(WS) + 168.6816$	83
18T	$PM_{2.5} = 49.6089(AOD) - 0.72269(RH) - 2.95136(T) - 21.40167(WS) + 184.5579$	28
19T	$PM_{2.5} = 33.38618(AOD) - 0.70181(RH) - 1.73508(T) - 18.76407(WS) + 149.364$	80
20T	$PM_{2.5} = 26.10923(AOD) - 0.47774(RH) - 5.69488(T) - 25.54388(WS) + 265.7107$	53
14T	$PM_{2.5} = 32.53939(AOD) - 1.76736(RH) + 1.47510(T) - 36.12179(WS) + 113.9607$	41
13T	$PM_{2.5} = 35.53367(AOD) - 0.39548(RH) + 3.91525(T) - 32.82475(WS) - 39.2383$	22

จากตารางที่ 3 พบว่ามี 12 สถานีสามารถสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ข้อมูล AOD ร่วมกับข้อมูลอุตุนิยมวิทยาเพื่อนำไปหาปริมาณ PM_{2.5} ได้ส่วนอีก 11 สถานีที่ไม่สามารถสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ได้ซึ่งเกิดจาก 2 สาเหตุคือ 1. ข้อมูลอุตุนิยมไม่ครบ 3 ค่า ได้แก่สถานี 03T 10T 27T 50T และ 61T 2. ไม่มีข้อมูล PM_{2.5} ได้แก่สถานี 02T 12T 16T 17T 22T และ 81T

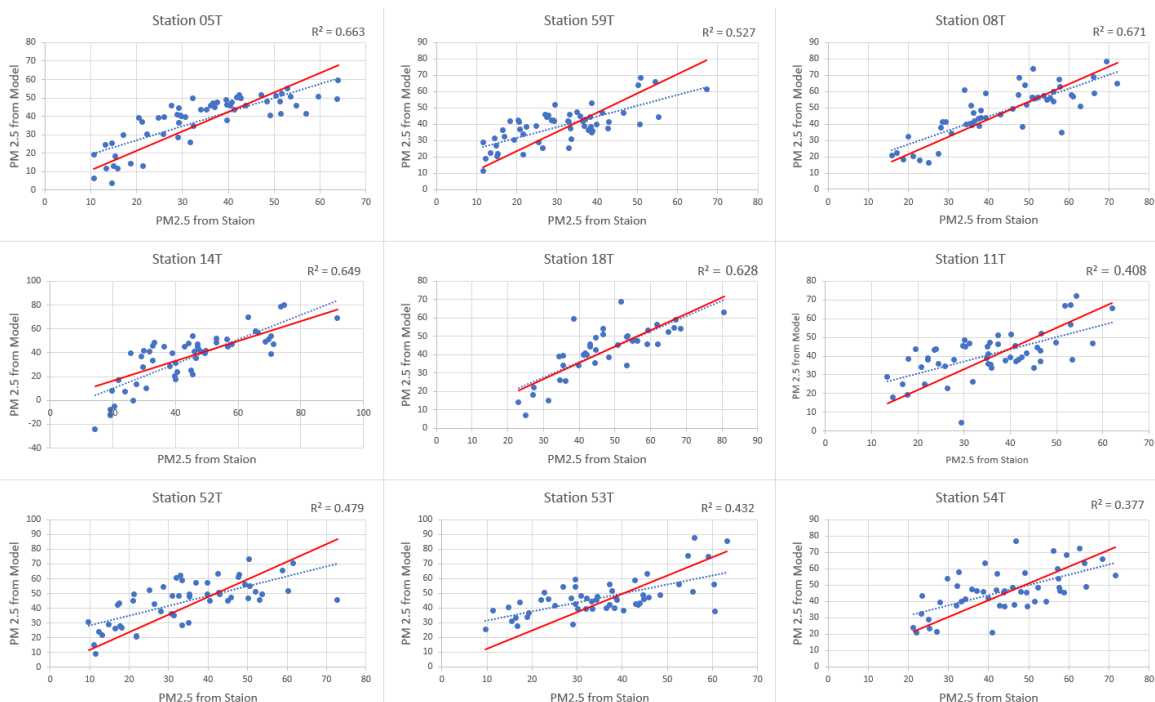
4.4. ผลลัพธ์การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

ผลลัพธ์จากการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยการเปรียบเทียบผลลัพธ์ระหว่าง $PM_{2.5}$ ที่คำนวณได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่สร้างขึ้นในแต่ละสถานีเปรียบเทียบกับปริมาณความเข้มข้นของ $PM_{2.5}$ จากสถานีตรวจวัดคุณภาพอากาศภาคพื้นดินในช่วงวันที่ 1 พฤศจิกายน 2019 ถึงวันที่ 31 มีนาคม 2020 ซึ่งผลลัพธ์ของค่าทางสถิติในแต่ละสถานีแสดงดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 ผลการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์รายสถานี

รหัสสถานี	จังหวัด	N	R ²	RMSE
59T	กรุงเทพฯ	57	0.527	11.946
05T	กรุงเทพฯ	59	0.663	9.216
11T	กรุงเทพฯ	52	0.408	11.651
53T	กรุงเทพฯ	52	0.432	16.116
52T	กรุงเทพฯ	52	0.479	15.351
54T	กรุงเทพฯ	48	0.377	11.936
08T	สมุทรปราการ	51	0.671	9.934
18T	สมุทรปราการ	40	0.628	10.030
19T	สมุทรปราการ	37	0.112	20.482
20T	ปทุมธานี	55	0.201	26.783
14T	สมุทรสาคร	55	0.649	15.986
13T	นนทบุรี	50	0.119	26.985

จากผลลัพธ์ในตารางที่ 4 ผลลัพธ์ของระดับความสัมพันธ์ $PM_{2.5}$ ที่คำนวณจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์กับ $PM_{2.5}$ ที่ได้จากสถานีตรวจวัดคุณภาพอากาศสามารถแบ่งระดับความสัมพันธ์ออกได้เป็น 3 ระดับได้แก่ 1. ระดับความสัมพันธ์ต่ำได้แก่สถานี 13T 19T และ 20T โดยค่า R² อยู่ในช่วง 0.112-0.201 และ ค่า RMSE อยู่ที่ 20.482-26.985 ไมโครกรัมต่อลบ.ม. ซึ่งสาเหตุอาจมาจากจำนวนข้อมูลที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์น้อยเกินไปในสถานีที่ 13T ส่วนสถานีที่ 19T กับ 20T คาดว่าเกิดจากตำแหน่งสถานีที่อยู่ห่างจากกลุ่มของสถานีตรวจวัดอื่นๆ (รูปที่ 2) ทำให้สภาพแวดล้อมและปัจจัยที่มีผลต่อปริมาณ $PM_{2.5}$ มีความแตกต่างกันออกไปตัวแปรอิสระที่เลือกใช้อาจไม่ครอบคลุมมากเพียงพอจึงส่งผลให้ผลลัพธ์ออกมาอยู่ในระดับความสัมพันธ์ที่ต่ำที่สุดเมื่อเทียบกับสถานีตรวจวัดอื่นๆ ในงานวิจัยฉบับนี้ 2. ระดับความสัมพันธ์ปานกลางได้แก่สถานี 11T 52T 53T และ 54T โดยค่า R² อยู่ในช่วง 0.377-0.479 และ ค่า RMSE อยู่ที่ 11.651-16.116 ไมโครกรัมต่อลบ.ม. โดยในกลุ่มของระดับความสัมพันธ์ปานกลางนั้นจะเป็นกลุ่มของสถานีที่ติดกับถนนหลักมีการจราจรหนาแน่นซึ่งในกลุ่มนี้สถานีทั้งหมดจะเป็นแบบ Roadside ยกเว้นที่สถานี 11T ที่สถานีเป็นแบบ Ambient แต่ค่า R² ของสถานี 11T อยู่ในกลุ่มของระดับความสัมพันธ์ปานกลางและเมื่อพิจารณาจากภาพถ่ายตำแหน่งสถานีพบว่ามีความถี่ที่ติดถนนหลักที่มีการจราจรหนาแน่นจึงคาดว่าที่สถานีดังกล่าวได้รับผลกระทบจากสภาพแวดล้อมที่มีลักษณะคล้ายสถานีแบบ Roadside ซึ่งในกลุ่มสถานีที่มีระดับความสัมพันธ์ปานกลางนี้อาจต้องอาศัยข้อมูลด้านความหนาแน่นการจราจรเป็นตัวแปรอิสระเพิ่มเติมให้ครอบคลุมปัจจัยที่ส่งผลต่อปริมาณ $PM_{2.5}$ โดยผลลัพธ์แสดงในรูปที่ 3 และ 4



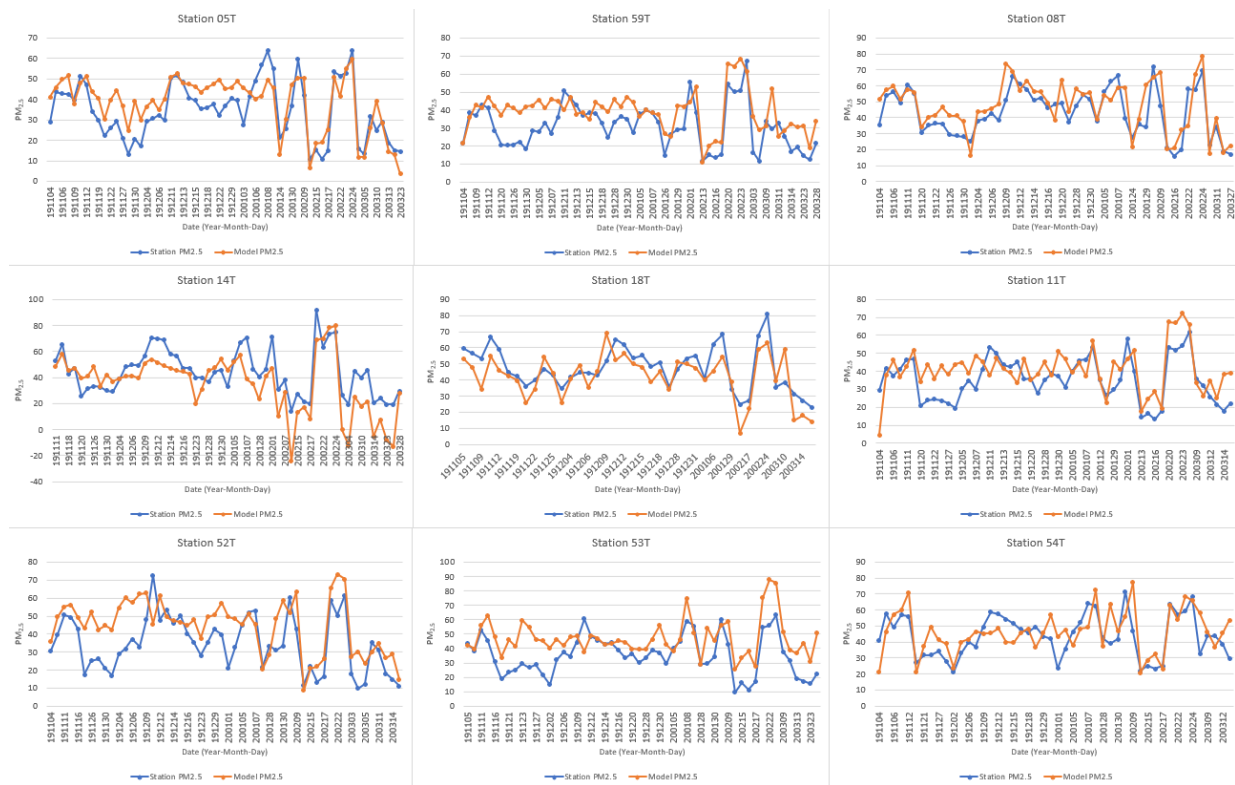
รูปที่ 3 Scatter Plot ของ $PM_{2.5}$ จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์กับ $PM_{2.5}$ จากสถานีตรวจวัดคุณภาพอากาศรายสถานี

3. ระดับความสัมพันธ์สูงได้แก่ สถานี 05T 08T 14T 18T และ 59T โดยจะมีค่า R^2 อยู่ในช่วง 0.527-0.671 และค่า RMSE อยู่ที่ 9.216-15.986 ไมโครกรัมต่อลบ.ม. โดยในกลุ่มของระดับความสัมพันธ์สูงนั้นจะเป็นกลุ่มของสถานีที่เป็นแบบ Ambient โดยผลลัพธ์ที่ได้ในสถานีที่มีระดับความสัมพันธ์สูงนั้นจะมีผลลัพธ์ที่สอดคล้องกับงานวิจัยในประเทศแต่จะมีความแตกต่างกันบางในแง่ของตัวแปรอิสระที่ใช้ การทำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ข้อมูลทั้งพื้นที่หรือใช้รายสถานีในการสร้างทั้งนี้ขึ้นอยู่กับข้อจำกัดทางด้านข้อมูลและสภาพแวดล้อมของแต่ละพื้นที่การศึกษาโดยมีตัวอย่างเช่นงานวิจัยใน Mexico City ที่พบผลลัพธ์ของค่า R^2 ในแต่ละสถานีจะอยู่ในช่วง 0.57-0.84 [10] ซึ่งมีระดับความสัมพันธ์ที่ใกล้เคียงกันกับงานวิจัยฉบับนี้ งานวิจัยในพื้นที่ภาคกลางของประเทศไทยที่มีค่า R^2 อยู่ในช่วงเดียวกับกับงานวิจัยฉบับนี้ที่ 0.59 แต่จะมีการใช้ตัวแปรอิสระที่เพิ่มเติมจากงานวิจัยนี้เช่น HPBL Elevation เป็นต้น [9] หรืองานวิจัยในรัฐเท็กซัสที่ใช้ข้อมูลแบบ Mixed-effects ที่ประกอบไปด้วยข้อมูลอุตุนิยมวิทยาและข้อมูลประกอบอื่น อาทิ ความหนาแน่นการจราจร ความสูงต่ำของพื้นที่ โดยมีแบ่งพื้นที่การศึกษาออกเป็น 3 โซนและเมื่อทำการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองพบว่าค่า R^2 นั้นอยู่ในช่วง 0.57-0.63 [11] ซึ่งความสัมพันธ์ที่ได้ก็มีความสอดคล้องกับงานวิจัยฉบับนี้ โดยผลลัพธ์แสดงในรูปที่ 3 และ 4

5. สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ

5.1. สรุปผลการศึกษา

การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อหาปริมาณความเข้มข้นของ $PM_{2.5}$ ด้วยการวิเคราะห์การถดถอยเชิงพหุคูณด้วยการใช้ข้อมูล AOD ที่ได้จากดาวเทียมเซนเซอร์ MODIS อัลกอริทึม MAIAC ความละเอียดเชิงพื้นที่ 1 กิโลเมตรร่วมกับข้อมูลอุตุนิยมวิทยาได้แก่ อุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ และความเร็วลม ในพื้นที่กรุงเทพมหานครและปริมณฑล ผลลัพธ์ที่ได้เมื่อนำไปคำนวณหาปริมาณ $PM_{2.5}$ ในแต่ละสถานีและนำไปวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ของ $PM_{2.5}$ จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์กับ $PM_{2.5}$ ที่ได้จากสถานีตรวจวัดคุณภาพอากาศรายสถานีซึ่งสามารถแบ่งระดับความสัมพันธ์ออกได้เป็น 3 ระดับโดย ระดับความสัมพันธ์ต่ำนั้นค่าความมากจากตำแหน่งสถานีที่อยู่ห่างจากกลุ่มของสถานีตรวจวัดอื่นซึ่งสภาพแวดล้อมและปัจจัยทางอุตุนิยมวิทยาแตกต่างกันทำให้ตัวแปรอิสระที่นำมาสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์นั้นไม่ครอบคลุมปัจจัยที่ส่งผลต่อปริมาณ $PM_{2.5}$ ในส่วนของระดับความสัมพันธ์ปานกลางนั้นจะเป็นในกลุ่มของสถานีที่มีลักษณะเป็น Roadside อาจจะต้องเพิ่มปัจจัยทางด้านความหนาแน่นการจราจรเข้าไปในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อให้ครอบคลุมปัจจัยที่ส่งผลต่อปริมาณความเข้มข้นของ $PM_{2.5}$ และในส่วนของระดับความสัมพันธ์ที่สูงนั้นจะเป็นกลุ่มของสถานีที่มีลักษณะเป็น Ambient ซึ่งตำแหน่งของสถานีจะไม่ติดกับถนนหลักที่มีการจราจรหนาแน่น ทำให้ตัวแปรอิสระที่ใช้มีความครอบคลุมที่มากพอ โดย



รูปที่ 4 แสดง Line chart ของ $PM_{2.5}$ จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์กับ $PM_{2.5}$ จากสถานีตรวจวัดคุณภาพอากาศรายสถานี

จากการวิเคราะห์ทางสถิติคาดว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่สร้างขึ้นจากข้อมูล AOD ที่ได้จากดาวเทียมและข้อมูลอุตุนิยมวิทยา ในกลุ่มสถานีที่มีระดับความสัมพันธ์สูงนั้นมีความสัมพันธ์กับปริมาณความเข้มข้น PM_{2.5} สามารถนำไปประยุกต์ใช้ร่วมกับข้อมูลสถานีตรวจวัดคุณภาพอากาศภาคพื้นดินได้เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพและความแม่นยำในการแจ้งเตือนประชาชน ประยุกต์ใช้ในพื้นที่ที่สถานีตรวจวัดคุณภาพอากาศไม่เพียงพอ และใช้ในการวางแผนระยะยาวเพื่อใช้ในการบริหารจัดการ PM_{2.5} ในอนาคตต่อไป

5.2. ข้อเสนอแนะ

เพิ่มตัวแปรอิสระที่ส่งปริมาณความเข้มข้นของ PM_{2.5} เช่น ปัจจัยด้านการจราจร การใช้ประโยชน์ที่ดิน เพื่อพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ให้สอดคล้องกับสถานการณ์ความเป็นจริงมากขึ้น

เลือกใช้ข้อมูล AOD จากเซนเซอร์ชนิดอื่น อาทิ MISR เพื่อเพิ่มปริมาณข้อมูล AOD ให้มากขึ้นซึ่งจะส่งผลต่อความน่าเชื่อถือของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณ ดร. ธงทิศ ฉายากุล ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และ รศ. ดร. ศิริมา ปัญญาเมธีกุล ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ที่กรุณาให้คำแนะนำงานกระทั่งวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เสร็จสมบูรณ์และขอขอบคุณหน่วยงานที่เกี่ยวข้องที่ให้ความอนุเคราะห์ข้อมูลในงานวิจัยฉบับนี้

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] กรมควบคุมมลพิษ. (2017). สถานการณ์และการจัดการปัญหาหมอกพิษทางอากาศและเสียงของประเทศไทยปี 2560. Retrieved September 4, 2020 From http://air4thai.pcd.go.th/webV2/download_book.php?bookid=33
- [2] กรมควบคุมมลพิษ. (2019). แผนปฏิบัติการขับเคลื่อนวาระแห่งชาติ "การแก้ไขปัญหามลพิษด้านฝุ่นละออง". Retrieved September 4, 2020 From http://air4thai.pcd.go.th/webV2/download_book.php?bookid=35
- [3] Lee, M., Kloog, I., Chudnovsky, A., Lyapustin, A., Wang, Y., Melly, S., . . . Schwartz, J. (2016). Spatiotemporal prediction of fine particulate matter using high-resolution satellite images in the Southeastern US 2003-2011. *J Expo Sci Environ Epidemiol*, 26(4), 377-384. doi:10.1038/jes.2015.41
- [4] ศูนย์วิศวกรรมสารสนเทศภูมิศาสตร์และนวัตกรรม. (2016). โครงการติดตามตรวจสอบและเฝ้าระวังคุณภาพอากาศ. Retrieved September 4, 2020 From <http://oic.go.th/FILEWEB/CABINFCENTER3/%0bDRAWER056/GENER AL/DATA0000/00000726.PDF>
- [5] Kloog, I., Sorek-Hamer, M., Lyapustin, A., Coull, B., Wang, Y., Just, A. C., . . . Broday, D. M. (2015). Estimating daily PM_{2.5} and PM₁₀ across the complex geo-climate region of Israel using MAIAC satellite-based AOD data. *Atmos Environ* (1994), 122, 409-416. doi:10.1016/j.atmosenv.2015.10.004
- [6] van Donkelaar, A., Martin, R. V., Brauer, M., Kahn, R., Levy, R., Verduzco, C., & Villeneuve, P. J. (2010). Global estimates of ambient fine particulate matter concentrations from satellite-based aerosol optical depth: development and application. *Environ Health Perspect*, 118(6), 847-855. doi:10.1289/ehp.0901623
- [7] Liu, N., Zou, B., Feng, H., Wang, W., Tang, Y., & Liang, Y. (2019). Evaluation and comparison of multiangle implementation of the atmospheric correction algorithm, Dark Target, and Deep Blue aerosol products over China. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 19(12), 8243-8268. doi:10.5194/acp-19-8243-2019
- [8] He, Q., & Huang, B. (2018). Satellite-based mapping of daily high-resolution ground PM_{2.5} in China via space-time regression modeling. *Remote Sensing of Environment*, 206, 72-83. doi:10.1016/j.rse.2017.12.018
- [9] He, Q., Gu, Y., & Zhang, M. (2020). Spatiotemporal trends of PM_{2.5} concentrations in central China from 2003 to 2018 based on MAIAC-derived high-resolution data. *Environ Int*, 137, 105536. doi:10.1016/j.envint.2020.105536
- [10] Just, A.C., et al., Using High-Resolution Satellite Aerosol Optical Depth To Estimate Daily PM_{2.5} Geographical Distribution in Mexico City. *Environ Sci Technol*, 2015. 49(14): p. 8576-84. doi:10.1021/acs.est.5b00859
- [11] Zhang, X., et al., Predicting daily PM_{2.5} concentrations in Texas using high-resolution satellite aerosol optical depth. *Sci Total Environ*, 2018. 631-632: p. 904-911. doi: 10.1016/j.scitotenv.2018.02.255