

03

แบบจำลองถดถอยถ่วงน้ำหนักเชิงพื้นที่ และเวลา สำหรับการประมาณค่าฝุ่นละออง ขนาดเล็กไม่เกิน 2.5 ไมครอน (PM2.5) พื้นที่ประเทศไทย GEOGRAPHICALLY AND TEMPORALLY WEIGHTED REGRESSION MODELS FOR GROUND-LEVEL PM2.5 ESTIMATION IN THAILAND

ศรัณย์ ปัญจะเรือง และ พิชญ์นรี ลลิตาภรณ์ ✉
ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

Saran Panjaruang and Pichnaree Lalitaporn ✉
Department of Environmental Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University

✉ fengprla@ku.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาแบบจำลองถดถอยถ่วงน้ำหนักเชิงพื้นที่และเวลา (GTWR) สำหรับการประมาณค่าฝุ่นละอองขนาดเล็กไม่เกิน 2.5 ไมครอน ($PM_{2.5}$) พื้นที่ประเทศไทย โดยรวบรวมข้อมูลการศึกษาตั้งแต่เดือนพฤษภาคม 2557 ถึงเมษายน 2562 ผลการศึกษาพบว่าความลึกเชิงแสงของฝุ่นละออง (AOD) อุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ ความเร็วลม และความสูงชั้นผสม ที่ใช้เป็นตัวแปรอิสระในการพัฒนาแบบจำลอง GTWR ประมาณค่าความเข้มข้นของ $PM_{2.5}$ ที่ค่า R^2 เท่ากับ 0.71 โดยมีค่า RMSE และค่า MAE เท่ากับ 14.55 และ 10.04 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ตามลำดับ ซึ่งตัวแปรที่ส่งผลกระทบต่อเปลี่ยนแปลงของ $PM_{2.5}$ จากมากที่สุดไปอย่างน้อยที่สุด ได้แก่ AOD ความชื้นสัมพัทธ์ ความสูงชั้นผสม ความเร็วลม และอุณหภูมิ และจากการทดสอบแบบจำลอง GTWR สำหรับการประมาณค่า $PM_{2.5}$ ด้วยข้อมูลการตรวจวัดจริงพบว่าแบบจำลอง GTWR อธิบายความแปรปรวนของ $PM_{2.5}$ ในฤดูแล้ง (เดือนเมษายน 2562) ได้ดีกว่าฤดูฝน (เดือนตุลาคม 2561) โดยในฤดูแล้งแบบจำลอง GTWR สามารถประมาณค่าความเข้มข้นของ $PM_{2.5}$ ที่ค่า R^2 เท่ากับ 0.76 โดยมีค่า RMSE และค่า MAE เท่ากับ 18.32 และ 14.20 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ตามลำดับ

คำสำคัญ : ฝุ่นละอองขนาดเล็กไม่เกิน 2.5 ไมครอน ความลึกเชิงแสงของฝุ่นละออง แบบจำลองถดถอยถ่วงน้ำหนักเชิงพื้นที่และเวลา

Abstract

This study aims to develop a geographically and temporally weighted regression (GTWR) model estimation for ground-level $PM_{2.5}$ concentrations based on data from May 2014 to April 2019 in Thailand. The GTWR model was developed using aerosol optical depth (AOD) data, temperature (T), relative humidity (RH), wind speed (WS), and boundary layer height (BLH). The GTWR model can be defined by coefficient of determination (R^2) 0.71, and root mean square error (RMSE) and mean absolute error (MAE) of 14.55 and 10.04 $\mu g/m^3$, respectively, of the variability in ground-level $PM_{2.5}$ concentrations. The correlation analysis indicates that $PM_{2.5}$ has highest correlation with AOD and RH, followed by BLH, WS, and T, respectively. In addition, the GTWR test with measured data in dry season (April 2019), showed good performance more than wet season (October 2018) in model prediction with R^2 of 0.76, RMSE of 18.32 $\mu g/m^3$, and MAE of 14.20 $\mu g/m^3$.

Keywords : Ground-Level $PM_{2.5}$ concentrations, Aerosol Optical Depth, Geographically and Temporally Weighted Regression

บทนำ

ปัญหามลพิษทางอากาศเป็นปัญหาด้านสิ่งแวดล้อมที่สำคัญของประเทศไทย ส่งผลกระทบต่อเศรษฐกิจ สังคม สิ่งแวดล้อม และสุขภาพอนามัยของประชาชน (Chavanaves, Fantke, Limpaseni, Attavanich, Panyametheekul, Gheewala & Prapasongsa, 2021) จากรายงานสถานการณ์และการจัดการปัญหามลพิษทางอากาศและเสียงของประเทศไทย ปี 2563 โดยกรมควบคุมมลพิษ พบว่าสถานการณ์ของสารมลพิษทางอากาศที่ยังเกินค่ามาตรฐาน ได้แก่ ฝุ่นละอองขนาดเล็กไม่เกิน 2.5 ไมครอน ($PM_{2.5}$) ฝุ่นละอองขนาดเล็กไม่เกิน 10 ไมครอน ก๊าซโอโซน และสารอินทรีย์ระเหยง่าย สารมลพิษดังกล่าวหากได้รับหรือสัมผัสเป็นระยะเวลายาวนาน จะทำให้เกิดความเสี่ยงต่อสุขภาพด้วยโรคระบบทางเดินหายใจ โรคระบบหัวใจ และหลอดเลือด และโรคความดันโลหิตสูง (Li, Hu, Chen, Li, Huang, Zhu & Zhou, 2018) การศึกษาผลกระทบด้านสุขภาพของ $PM_{2.5}$ โดยทั่วไปจะใช้ข้อมูลจากสถานีตรวจวัดคุณภาพอากาศ แต่เครือข่ายการติดตามตรวจสอบคุณภาพอากาศของสถานีตรวจวัดคุณภาพอากาศยังไม่ครอบคลุมพื้นที่ทุกจังหวัด ซึ่งเป็นข้อจำกัดในการบริหารจัดการคุณภาพอากาศเชิงพื้นที่

ปัจจุบันการใช้ประโยชน์จากข้อมูลดาวเทียมเพื่อตรวจสอบความเข้มข้นของ $PM_{2.5}$ กำลังเป็นที่นิยมอย่างแพร่หลาย (Guo, Tang, Gong & Zhang, 2017; He & Huang, 2018) เนื่องจากครอบคลุมพื้นที่ในระดับภูมิภาคมากกว่าสถานีตรวจวัดคุณภาพอากาศ โดยเฉพาะการประมาณค่า $PM_{2.5}$ จากค่าความลึกเชิงแสงของฝุ่นละออง (Aerosol Optical Depth: AOD) ซึ่งเป็นค่าที่แสดงถึงความสามารถในการกระเจิงและดูดกลืนแสงในแนวที่รังสีดวงอาทิตย์เดินทางผ่านฝุ่นละออง และเป็นระหว่างสัดส่วนของฝุ่นละอองที่วัดได้เหนือพื้นดินในแนวตั้งขึ้นไปกับฝุ่นละอองที่วัดได้บริเวณจุดสังเกตภาคพื้นดิน (Janjai, 2014) โดยใช้แบบจำลองทางสถิติ เช่น แบบจำลองถดถอยเชิงพหุคูณ แบบจำลองกำลังสองน้อยที่สุด แบบจำลองผสมในรูปเชิงเส้น แบบจำลองถ่วงน้ำหนักเชิงภูมิศาสตร์ แบบจำลองถดถอยถ่วงน้ำหนักเชิงพื้นที่และเวลา (Geographically and Temporally Weighted Regression Model: GTWR) ในการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของ $PM_{2.5}$ กับ AOD ร่วมกับข้อมูลอุตุนิยมวิทยา (Bai, Wu, Qin, Zhang, Shen & Zhou, 2016, Wei, Li, Peng & Sun, 2019) ที่บ่งบอกถึงลักษณะอากาศและความสามารถในการกระจายตัวของฝุ่นละอองในบรรยากาศ เพื่อประมาณค่าความเข้มข้นของ $PM_{2.5}$ ที่ปกคลุมในแต่ละพื้นที่

งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาแบบจำลอง GTWR สำหรับการประมาณค่า $PM_{2.5}$ พื้นที่ประเทศไทย โดยใช้ข้อมูล AOD ระบบ MODIS จากดาวเทียม Terra และ Aqua ร่วมกับข้อมูลอุตุนิยมวิทยา ได้แก่ อุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ ความเร็วลม และความสูงชั้นผสม เป็นตัวแปรอิสระในการพัฒนาแบบจำลอง ซึ่งงานวิจัยนี้เป็นการนำเสนอการประมาณค่า $PM_{2.5}$ ด้วยรูปแบบของแบบจำลองเชิงพื้นที่และเวลาครั้งแรกในพื้นที่ประเทศไทย โดยทำการรวบรวมข้อมูลการศึกษาตั้งแต่เดือนพฤษภาคม 2557 ถึงเมษายน 2562 และดำเนินการตรวจสอบประสิทธิภาพแบบจำลอง GTWR โดยใช้สัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Coefficient of Determination: R^2) รากที่สองของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (Root Mean Square Error: RMSE) และความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์เฉลี่ย (Mean Absolute Error: MAE) เป็นค่าสถิติทดสอบสำหรับการอธิบายการตรวจสอบความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มข้นของ $PM_{2.5}$ จากการประมาณค่า กับค่าข้อมูลการตรวจวัดจริงของตัวแปรการศึกษา และในส่วนของสหสัมพันธ์ของตัวแปรการศึกษาจะอธิบายด้วยค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เพียร์สัน (Pearson's Correlation Coefficient: r)

อุปกรณ์และวิธีการศึกษา พื้นที่ศึกษา

พื้นที่ศึกษาในประเทศไทย ตั้งอยู่เหนือเส้นศูนย์สูตร ระหว่างละติจูด (Lat) ที่ 5.62-20.45 องศาเหนือ และลองจิจูด (Lon) ที่ 97.37-105.62 องศาตะวันออก โดยมีลักษณะภูมิอากาศอยู่ภายใต้อิทธิพลของมรสุมตะวันตกเฉียงใต้ (ข้อมูลฤดูฝน เดือนพฤษภาคมถึงตุลาคม) และมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือ (ข้อมูลฤดูแล้ง เดือนพฤศจิกายนถึงเมษายน) และมีพื้นที่ทั้งหมดประมาณ 513,115 ตารางกิโลเมตร (Thai Meteorological Department, 2021)

การรวบรวมข้อมูลการศึกษา

งานวิจัยนี้รวบรวมข้อมูลการศึกษาตั้งแต่เดือนพฤษภาคม 2557 ถึงเมษายน 2562 รวมระยะเวลา 5 ปี ประกอบด้วย

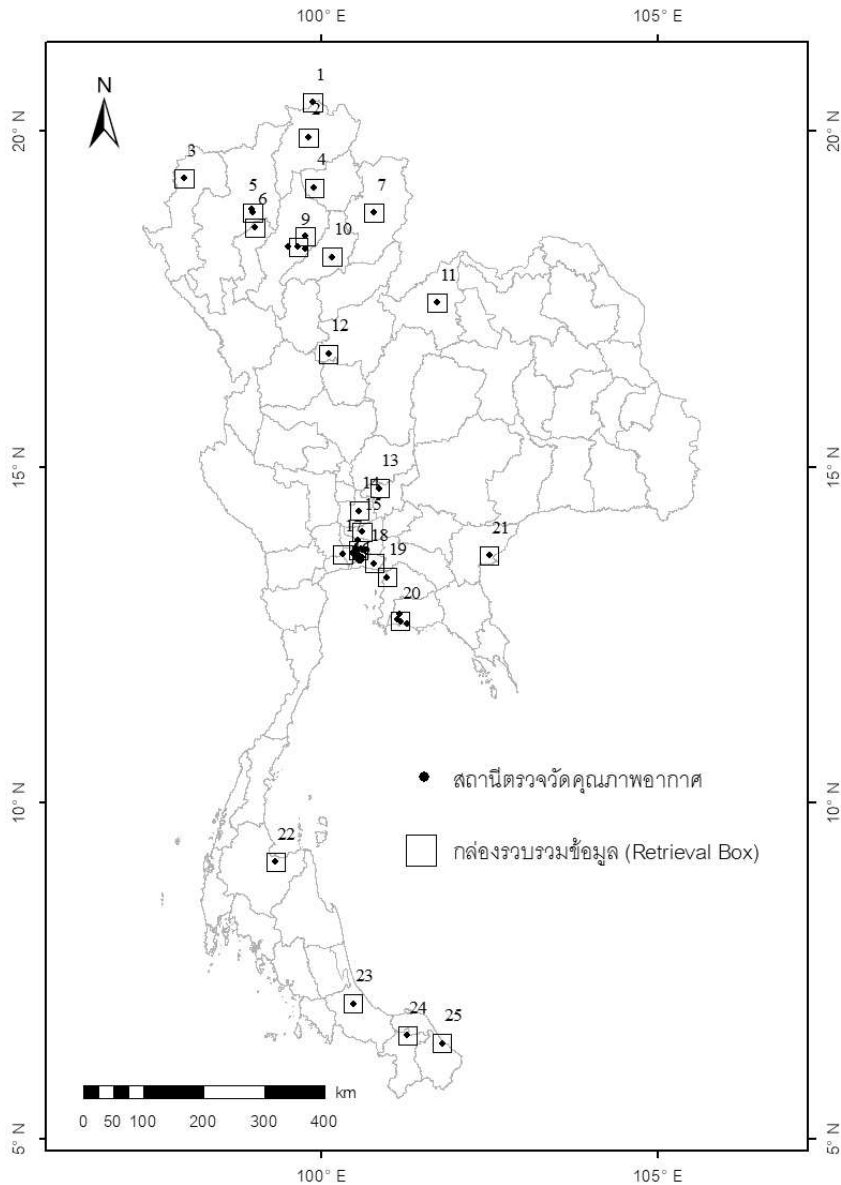
1) ข้อมูล $PM_{2.5}$ เฉลี่ยรายวัน (ไม่โครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร: $\mu g/m^3$) ได้จากการตรวจวัดของสถานีตรวจวัดคุณภาพอากาศ กรมควบคุมมลพิษ จำนวนทั้งหมด 47 สถานี เป็นข้อมูลฝุ่นละอองภาคพื้นดินที่ใช้หลัก การตรวจวัดด้วยวิธีเบต้า เร แอทเทนนูเอชัน และวิธีเทปเปอ อิลเมนต์ ออสซิเลติง ไมโครบาลานซ์ (Pollution Control Department, 2022)

2) ข้อมูล AOD ได้จากการเฉลี่ยค่า AOD ของผลิตภัณฑ์ MOD04_3K จากดาวเทียม Terra กับ ผลิตภัณฑ์ MYD04_3K จากดาวเทียม Aqua ให้เป็นข้อมูล AOD เฉลี่ยรายวัน เป็นข้อมูลดาวเทียมระบบ Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) collection 6.1 อัลกอริทึม dark target ที่มีความละเอียดเชิงพื้นที่ 3 กิโลเมตร และความยาวคลื่น 550 นาโนเมตร (Guo et al., 2017) โดยงานวิจัยนี้ ทำการดาวน์โหลดข้อมูล AOD รูปแบบ Hierarchical Data Format (hdf) จากเว็บไซต์โครงการ LAADS DAAC ขององค์การ NASA กำหนดการตั้งค่าช่วงเวลาข้อมูลตั้งแต่เดือนพฤษภาคม 2557 ถึงเมษายน 2562 ขอบเขต ของพิกัดภูมิศาสตร์ 21.0, 96.5, 5.5, 106.0 และ Scientific Dataset Optical_Depth_Land_And_Ocean จากนั้นทำการแปลงข้อมูล AOD รูปแบบ hdf ให้เป็นค่า AOD รูปแบบ Comma Delimited (csv) ด้วย โปรแกรม IPython โดยการแก้ไขซอร์สโค้ดของไพทอนสคริปต์ที่กำหนดพิกัดภูมิศาสตร์ตามกล่องรวบรวมข้อมูล (Retrieval Box) ดังตารางที่ 1 เพื่อสร้างขอบเขตการตั้งค่าการสะท้อนของจุดภาพของข้อมูล AOD ในโปรแกรม IDLE-Python แล้วนำไพทอนสคริปต์ดังกล่าวไปรันบนโปรแกรม IPython เพื่อให้ประมวลผลออกมาเป็นค่า AOD รูปแบบ csv ในแต่ละสถานีรวบรวมข้อมูล

3) ข้อมูลอุตุนิยมวิทยาภาคพื้นดิน ได้แก่ อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส: $^{\circ}C$) ความชื้นสัมพัทธ์ (ร้อยละ: %) และความเร็วลม (กิโลเมตรต่อชั่วโมง: km/hr) เฉลี่ยรายวัน ได้จากการตรวจวัดของสถานีตรวจวัดคุณภาพอากาศ กรมควบคุมมลพิษ ถูกคัดเลือกให้เป็นตัวแปรอิสระเพื่อใช้อธิบายถึงลักษณะอากาศที่เกิดขึ้นบริเวณ สถานีตรวจวัดคุณภาพอากาศ

4) ข้อมูลอุตุนิยมวิทยาจากแบบจำลองภูมิอากาศ ได้แก่ ความสูงชั้นผสม (กิโลเมตร: km) เป็นข้อมูล อุตุนิยมวิทยาจากแบบจำลองภูมิอากาศของศูนย์พยากรณ์อากาศระยะปานกลางแห่งยุโรป (European Centre for Medium Range Weather Forecasts) ราย 3 ชั่วโมง ที่มีความละเอียดเชิงพื้นที่ 12.5 กิโลเมตร โดยทำการ ดาวน์โหลดข้อมูล BLH (ERA-Interim Reanalysis) เวลา 03.00 และ 06.00 ตามช่วงเวลากำหนดของดาวเทียม Terra (10.00 น.) และดาวเทียม Aqua (13.00 น.) ที่เวลาสากลเชิงพิกัด UTC+7 ของประเทศไทย แล้วทำการ เฉลี่ยค่าความสูงชั้นผสมเวลา 03.00 และ 06.00 ให้เป็นตัวแทนของข้อมูลความสูงชั้นผสมเฉลี่ยรายวัน ถูกคัด เลือกให้เป็นตัวแปรอิสระอีกตัวแปรหนึ่ง เพื่อบ่งบอกถึงความสามารถในการกระจายตัวของฝุ่นละอองในบรรยากาศ

โดยที่การเตรียมข้อมูลการศึกษาจะนำเข้าพิกัดภูมิศาสตร์ของสถานีตรวจวัดคุณภาพอากาศจำนวน 47 สถานี (ตารางที่ 1) ในโปรแกรม ArcMap 10.8 เพื่อสร้างบัพเพอร์กล่องรวบรวมข้อมูลขนาด 15x15 ตารางกิโลเมตร (Remer, et al., 2013; Gupta et al., 2018) แล้วคัดเลือกบัพเพอร์ที่มีขอบเขตพื้นที่ซ้อนทับกันน้อยที่สุดให้เป็นกล่องรวบรวมข้อมูล จำนวน 25 กล่อง ดังภาพที่ 1 ที่ซึ่งข้อมูลการศึกษาของสถานีตรวจวัดคุณภาพอากาศที่กระจายอยู่ภายในขอบเขตของกล่องรวบรวมข้อมูลที่ 5 9 16 และ 20 จะถูกเฉลี่ยรวมให้เป็นข้อมูลเฉลี่ยรายวันของแต่ละกล่องรวบรวมข้อมูล



ภาพที่ 1: สถานีตรวจวัดคุณภาพอากาศ และกล่องรวบรวมข้อมูล พื้นที่ประเทศไทย

ตารางที่ 1: พิกัดภูมิศาสตร์ของสถานีตรวจวัดคุณภาพอากาศ และกล่องรวบรวมข้อมูล พื้นที่ประเทศไทย

Retrieval Box	สถานี	ชื่อสถานี	จังหวัด	พิกัดภูมิศาสตร์	
				Lat ¹	Lon ²
1	73T	สำนักงานสาธารณสุขสูงอำเภอแม่สาย	เชียงราย	20.43	99.88
2	57T	กสจ. เชียงราย	เชียงราย	19.91	99.82
3	58T	กสจ. แม่ฮ่องสอน	แม่ฮ่องสอน	19.30	97.97
4	70T	สนามกีฬาจังหวัดพะเยา	พะเยา	19.16	99.9
5	36T	โรงเรียนยุพราชวิทยาลัย	เชียงใหม่	18.79	98.99
	35T	ศาลากลางจังหวัดเชียงใหม่	เชียงใหม่	18.84	98.97
6	68T	สถานีอุตุนิยมวิทยาจังหวัดลำพูน	ลำพูน	18.57	99.01
7	67T	สำนักงานเทศบาลเมืองน่าน	น่าน	18.79	100.78
8	39T	รพ.สต.บ้านท่าสี่	ลำปาง	18.44	99.77
9	40T	สำนักงานการประปาส่วนภูมิภาคแม่เมาะ	ลำปาง	18.28	99.66
	37T	สถานีอุตุนิยมวิทยาลำปาง	ลำปาง	18.28	99.51
	38T	รพ.สต.บ้านสบป่าด	ลำปาง	18.25	99.77
10	69T	อุตุนิยมวิทยาแพร่	แพร่	18.13	100.16
11	72T	สำนักงานสาธารณสุขจังหวัดเลย	เลย	17.45	101.73
12	41T	โครงการชลประทานนครสวรรค์	นครสวรรค์	16.69	100.11
13	24T	สถานีตำรวจภูธรตำบลหน้าพระลาน	สระบุรี	14.69	100.87
14	21T	โรงเรียนอยุธยาวิทยาลัย	พระนครศรีอยุธยา	14.35	100.57
15	20T	มหาวิทยาลัยกรุงเทพ วิทยาเขตรังสิต	ปทุมธานี	14.04	100.61

Retrieval Box	สถานี	ชื่อสถานี	จังหวัด	พิกัดภูมิศาสตร์	
				Lat ¹	Lon ²
16	54R	การเคหะชุมชนดินแดง	กรุงเทพฯ	13.76	100.55
	22T	มหาวิทยาลัยสุโขทัยธรรมมาธิราช	นนทบุรี	13.91	100.54
	13T	การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย	นนทบุรี	13.81	100.51
	59T	กรมประชาสัมพันธ์	กรุงเทพฯ	13.78	100.54
	11T	สนามกีฬาการเคหะชุมชนห้วยขวาง	กรุงเทพฯ	13.78	100.57
	53R	สถานีตำรวจนครบาลโชคชัย	กรุงเทพฯ	13.79	100.60
	61T	โรงเรียนบดินทรเดชา (สิงห์ สิงหเสนี)	กรุงเทพฯ	13.77	100.61
	10T	สำนักงานการเคหะชุมชนคลองจั่น	กรุงเทพฯ	13.78	100.65
	52R	สถานีการไฟฟ้าอยุธยาธนบุรี	กรุงเทพฯ	13.73	100.47
	02T	มหาวิทยาลัยราชภัฏบ้านสมเด็จเจ้าพระยา	กรุงเทพฯ	13.73	100.49
	12T	โรงเรียนนนทรีวิทยา	กรุงเทพฯ	13.71	100.55
	03T	หมวดการทางบางขุนเทียนที่ 2	กรุงเทพฯ	13.67	100.51
	05T	กรมอุตุนิยมวิทยาบางนา	กรุงเทพฯ	13.67	100.61
	08T	ศูนย์ฟื้นฟูอาชีพคนพิการและทุพพลภาพ	สมุทรปราการ	13.66	100.54
	16T	โรงไฟฟ้าพระนครใต้	สมุทรปราการ	13.62	100.56
	17T	กรมอุตสาหกรรมพื้นฐานและการเหมืองแร่	สมุทรปราการ	13.65	100.53
	18T	ศาลากลางจังหวัดสมุทรปราการ	สมุทรปราการ	13.61	100.6
17	14T	แขวงการทางสมุทรสาคร	สมุทรสาคร	13.71	100.32
18	19T	การเคหะชุมชนบางพลี	สมุทรปราการ	13.57	100.79
19	34T	สำนักงานสิ่งแวดล้อมภาคที่ 13	ชลบุรี	13.36	100.98
20	74T	ศูนย์ราชการจังหวัดระยอง	ระยอง	12.71	101.18
	29T	รพ.สต.มาตาพุด	ระยอง	12.81	101.17
	30T	สถานีสำนักงานเกษตรจังหวัดระยอง	ระยอง	12.67	101.28
	31T	ศูนย์วิจัยพืชไร่ระยอง	ระยอง	12.74	101.14
21	71T	โรงเรียนอนุบาลศรีอยุธยาวิทย	สระแก้ว	13.69	102.50
22	42T	สำนักงานสิ่งแวดล้อมภาคที่ 14	สุราษฎร์ธานี	9.13	99.32
23	44T	สำนักงานเทศบาลนครหาดใหญ่	สงขลา	7.02	100.48
24	63T	สนามโรงพิธีช้างเผือก	ยะลา	6.55	101.28
25	62T	ศาลากลางจังหวัดนราธิวาส	นราธิวาส	6.43	101.80

หมายเหตุ¹ Lat คือ ละติจูด (Latitude) องศาเหนือ, ² Lon คือ ลองจิจูด (Longitude) องศาตะวันออก

แบบจำลองถดถอยถ่วงน้ำหนักเชิงพื้นที่และเวลา สำหรับการประมาณค่าฝุ่นละอองขนาดเล็กไม่เกิน 2.5 ไมครอน (PM2.5) พื้นที่ประเทศไทย

แบบจำลองถดถอยถ่วงน้ำหนักเชิงพื้นที่และเวลา

แบบจำลองถดถอยถ่วงน้ำหนักเชิงพื้นที่และเวลา (GTWR) เป็นแบบจำลองเชิงพื้นที่และเวลา (Spatio-Temporal Modeling) ใช้หลักการของการถดถอยเชิงพหุในการวิเคราะห์ข้อมูลเชิงพื้นที่ที่ข้อมูลมีลักษณะไม่ต่อเนื่อง (Non-Stationarity Data) กล่าวคือข้อมูลมีค่าเฉลี่ยและความแปรปรวนเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลา (Huang, Wu & Barry, 2010) ได้รับการพัฒนามาจากรูปแบบของแบบจำลองถดถอยถ่วงน้ำหนักเชิงภูมิศาสตร์ (Geographically Weighted Regression) ในการหาความสัมพันธ์เชิงพื้นที่ย่อย (Local Modeling) ระหว่างตัวแปรตามกับตัวแปรอิสระ ซึ่งผลการวิเคราะห์แบบจำลอง GTWR จะได้ผลลัพธ์ออกมาในรูปแบบของการประมาณค่าหรือการทำนายในแต่ละพื้นที่ย่อย (Fotheringham et al., 2002) โดยมีโครงสร้างของระบบสมการ ดังสมการที่ 1

$$Y_i = \beta_0(u_i, v_i, t_i) + \sum_{k=1} \beta_k(u_i, v_i, t_i) X_k + \varepsilon_i \quad (1)$$

โดยที่ (u_i, v_i, t_i) คือ พิกัดภูมิศาสตร์ (u_i, v_i) และเวลา (t_i) , β_0 คือ ค่าส่วนตัดบนแกน Y (Intercept), β_k คือ ค่าสัมประสิทธิ์ความถดถอยของตัวแปรอิสระ k , และ ε_i คือ ค่าความคลาดเคลื่อน ซึ่งวิธีการถ่วงน้ำหนักเชิงพื้นที่และเวลา และการกำหนดแบนด์วิดท์ (Bandwidth) สำหรับการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ด้วยแบบจำลอง GTWR สามารถดูคำอธิบายประกอบเพิ่มเติมที่ Huang et al. (2010) และ Bai et al. (2016)

วิธีดำเนินการศึกษา

การตรวจสอบข้อมูลของตัวแปรการศึกษา

งานวิจัยนี้พัฒนาแบบจำลอง GTWR สำหรับการประมาณค่า $PM_{2.5}$ โดยกำหนดตัวแปรตาม ได้แก่ $PM_{2.5}$ และตัวแปรอิสระ ได้แก่ AOD อุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ ความเร็วลม และความสูงชั้นผสม โดยใช้ตัวแปรการศึกษาเฉลี่ยรายวันเฉพาะวันที่มีข้อมูลครบทุกตัวแปร (Effective Days) จากนั้นทำการวิเคราะห์สหสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรตามกับตัวแปรอิสระว่ามีความสัมพันธ์ของตัวแปรมากน้อยเพียงใด และตรวจสอบระดับความสัมพันธ์กันเอง (multicollinearity) ของตัวแปรอิสระที่อาจเกิดปัญหา multicollinearity ซึ่งจะมีอิทธิพลต่อค่าความแปรปรวนของ $PM_{2.5}$ ในระบบสมการ ด้วยการวิเคราะห์ความถดถอยเชิงพหุ วิเคราะห์ตัวแปรเข้าทั้งหมด แล้วพิจารณาความเหมาะสมของตัวแปรอิสระจากค่า Variance Inflation Factor (VIF) ที่น้อยกว่าหรือเท่ากับ 2 (Guo et al., 2017) หากตัวแปรอิสระใดเกิดปัญหา multicollinearity สามารถตัดตัวแปรนั้นออกจากระบบสมการก่อนนำเข้าสู่ขั้นตอนการพัฒนาแบบจำลอง

การเตรียมข้อมูลนำเข้าแบบจำลอง

นำตัวแปรการศึกษามาจัดเรียงข้อมูลนำเข้าในโปรแกรม Microsoft Excel ตามรูปแบบของแบบจำลอง GTWR โดยที่แต่ละแถวของข้อมูลจะกำกับพิกัดภูมิศาสตร์ (u_i, v_i) ของกล่องรวบรวมข้อมูล และกำกับวันที่ทำการตรวจวัด (Timestamp) รูปแบบการแสดงผลตัวเลข (Number Formatting) ของข้อมูลในแต่ละวัน (t_i) แล้วบันทึกข้อมูลนำเข้าในรูปแบบ csv

การพัฒนาแบบจำลอง GTWR สำหรับการประมาณค่า PM_{2.5}

นำเข้าข้อมูลตัวแปรการศึกษาที่ผ่านการจัดเรียงลงในโปรแกรม ArcMap 10.8 ตั้งค่าระบบพิกัดภูมิศาสตร์ WGS 1984 แล้วทำการพัฒนาแบบจำลอง GTWR สำหรับการประมาณค่า PM_{2.5} โดยใช้เครื่องมือ GTWR_Beta.esriAddIn (Huang et al., 2010) ที่กำหนดตัวแปรตาม ได้แก่ PM_{2.5} และตัวแปรอิสระ ได้แก่ AOD อุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ ความเร็วลม และความสูงชั้นผสม ตามลำดับ จากนั้นทำการตั้งค่าการถ่วงน้ำหนักเชิงพื้นที่และเวลาของแบบจำลอง GTWR ด้วย Bandwidth Method: AICc และ Kernel Type: Fixed (ฟังก์ชันเกาส์เซียน)

เมื่อเครื่องมือ GTWR_Beta.esriAddIn ทำการประมวลผลเสร็จสิ้น จะได้ผลการประมาณค่า PM_{2.5} ออกมาเป็นตารางสถิติผลการวิเคราะห์ และตารางความสัมพันธ์เชิงพื้นที่ย่อย (Local Modeling) ที่ประกอบด้วย ค่าความเข้มข้นของ PM_{2.5} จากการประมาณค่า (predicted) ค่า Intercept (β_0) ค่าสัมประสิทธิ์ความถดถอยของ AOD อุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ ความเร็วลม และความสูงชั้นผสม ($\beta_1 - \beta_5$) ตามลำดับ และค่าความคลาดเคลื่อน (ε_i) ในแต่ละ Timestamp ซึ่งการตรวจสอบประสิทธิภาพแบบจำลอง (Model Fitting) ในด้านความแม่นยำและความคลาดเคลื่อนของแบบจำลองจะใช้สถิติทดสอบ ได้แก่ ค่า R² ค่า RMSE และค่า MAE ที่คำนวณจากค่า ε_i ขั้นตอนสุดท้ายจะนำค่าเฉลี่ยของตัวแปร β_0 และ $\beta_1 - \beta_5$ จากตารางความสัมพันธ์เชิงพื้นที่ย่อยมาสร้างแบบจำลองการประมาณค่า PM_{2.5} พื้นที่ประเทศไทย ที่มีโครงสร้างของระบบสมการ GTWR ดังสมการที่ 2

$$PM_{2.5i} = \beta_0(u_i, v_i, t_i) + \beta_1(u_i, v_i, t_i) AOD_i + \beta_2(u_i, v_i, t_i) T_i + \beta_3(u_i, v_i, t_i) PM_{2.5i} + \beta_4(u_i, v_i, t_i) PM_i + \beta_5(u_i, v_i, t_i) BLH_i \quad (2)$$

โดยที่ $PM_{2.5i}$ คือ ค่าความเข้มข้นของ PM_{2.5} จากการประมาณค่า, β_0 คือ ค่า Intercept, $\beta_1 - \beta_5$ คือ ค่าสัมประสิทธิ์ความถดถอยของ AOD อุณหภูมิ (T) ความชื้นสัมพัทธ์ (RH) ความเร็วลม (WS) และความสูงชั้นผสม (BLH) ตามลำดับ

การทดสอบแบบจำลอง GTWR สำหรับการประมาณค่า PM_{2.5}

งานวิจัยนี้ใช้ตัวแปรการศึกษาทั้งหมด 6,407 ข้อมูล สำหรับการวิเคราะห์สถิติเชิงพรรณนา และสหสัมพันธ์ของตัวแปรการศึกษา รวมไปถึงการวิเคราะห์ระดับความสัมพันธ์กันเองของตัวแปรอิสระ ส่วนขั้นตอนการพัฒนาแบบจำลอง GTWR สำหรับการประมาณค่า PM_{2.5} งานวิจัยนี้จะแบ่งตัวแปรการศึกษาทั้งหมด (n = 6,407) ออกเป็น 2 กลุ่ม ได้แก่ ตัวแปรนำเข้าสู่สำหรับสร้างแบบจำลอง (Training Folds) จำนวน 5,704 ข้อมูล (รวมตัวแปรฤดูฝน n = 1,031 และฤดูแล้ง n = 4,673) และตัวแปรสำหรับทดสอบแบบจำลอง (Testing Folds) จำนวน 703 ข้อมูล แบ่งเป็นในเดือนตุลาคม 2561 (n = 229) เป็นตัวแทนข้อมูลฤดูฝน และในเดือนเมษายน 2562 (n = 447) เป็นตัวแทนข้อมูลฤดูแล้ง สำหรับใช้เป็นตัวแปรทดสอบและวิเคราะห์แบบจำลองการประมาณค่า PM_{2.5} ที่ได้จากแบบจำลอง GTWR พื้นที่ประเทศไทย ด้วยข้อมูลการตรวจวัดจริงที่เฉพาะเจาะจงในแต่ละช่วงเวลาของฤดูกาล

ทั้งนี้ จำนวนข้อมูลการศึกษาเริ่มต้นตั้งแต่เดือนพฤษภาคม 2557 ถึงเมษายน 2562 รวมระยะเวลา 5 ปี โดยอ้างอิงจากพิทักษ์ภูมิศาสตร์ของสถานีวิจัยวัดคุณภาพอากาศทั้งหมด 47 สถานี มีจำนวนทั้งหมด 60,258 ข้อมูล ซึ่งจำนวนวันที่มีข้อมูลครบทุกตัวแปรและใช้ในการพัฒนาแบบจำลองมี 6,407 ข้อมูล คิดเป็น 10.63% ของจำนวนข้อมูลการศึกษาเริ่มต้น ซึ่งข้อมูลที่ขาดหายไปส่วนใหญ่มาจากการตรวจวัดที่ขาดหายไปหรือไม่พบข้อมูลจากแหล่งที่มา ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงได้ดำเนินการตรวจสอบความถูกต้องของข้อมูล โดยใช้ตัวแปร เป็นฐานของการอ้างอิง ซึ่งจากรายงานคุณภาพอากาศของกรมควบคุมมลพิษ ปี 2562 ที่รายงานค่าเฉลี่ย $PM_{2.5}$ รายปี อยู่ในช่วง $10.00-41.00 \mu g/m^3$ ขณะที่ตัวแปรการศึกษา $PM_{2.5}$ ตามงานวิจัยนี้ (ตารางที่ 2) มีค่าเฉลี่ยอยู่ในช่วง $20.45-41.71 \mu g/m^3$ จึงเป็นการยืนยันได้ว่าค่าเฉลี่ยรายวันของตัวแปรการศึกษาต่างๆ มาจากแหล่งที่มาโดยตรง โดยที่งานวิจัยนี้ไม่ได้ปรับแต่งหรือแก้ไขตัวเลข เพื่อเพิ่มความแม่นยำให้แบบจำลองแต่อย่างใด

ผลการศึกษาและการอภิปรายผล

สถิติเชิงพรรณนาของตัวแปรการศึกษา

ตารางที่ 2 แสดงสถิติเชิงพรรณนาของตัวแปรการศึกษาในการพัฒนาแบบจำลอง GTWR จากการเตรียมตัวแปรเฉลี่ยรายวันเฉพาะวันที่มีข้อมูลครบทุกตัวแปรทั้งหมด ($n = 6,407$) พบว่าตามช่วงเวลาการศึกษา พื้นที่ประเทศไทยมีค่าเฉลี่ย $PM_{2.5}$ เท่ากับ $37.53 \mu g/m^3$ ค่าเฉลี่ย AOD เท่ากับ 0.48 ค่าเฉลี่ยอุณหภูมิเท่ากับ 27.54 องศาเซลเซียส ค่าเฉลี่ยความชื้นสัมพัทธ์ เท่ากับ 65.65 % ค่าเฉลี่ยความเร็วลม เท่ากับ 1.04 กิโลเมตรต่อชั่วโมง และค่าเฉลี่ยความสูงชั้นผสม เท่ากับ 1.42 กิโลเมตร เมื่อพิจารณาค่าเฉลี่ย $PM_{2.5}$ ตามช่วงเวลาของฤดูกาล โดยเมื่อนำค่าเฉลี่ย $PM_{2.5}$ เปรียบเทียบกับค่ามาตรฐานคุณภาพอากาศประเทศไทย พบว่าค่าเฉลี่ย $PM_{2.5}$ ตามช่วงเวลาการศึกษา ($37.53 \mu g/m^3$) มีค่าสูงกว่าค่ามัธยฐานเลขคณิต (Arithmetic Mean) ในเวลา 1 ปี ที่ไม่เกิน $25 \mu g/m^3$ และเมื่อพิจารณารายฤดูกาล พบว่าค่าเฉลี่ย $PM_{2.5}$ ฤดูแล้ง จะมีค่าสูงกว่าค่าเฉลี่ย $PM_{2.5}$ ฤดูฝน เนื่องจากในฤดูแล้งของประเทศไทยมักประสบปัญหาด้านมลพิษทางอากาศ มีการเผาเศษวัสดุการเกษตรอย่างกว้างขวาง ฝุ่นละอองข้ามแดนจากประเทศเพื่อนบ้าน ประกอบกับปัจจัยเสริมด้านอุตุนิยมวิทยา เช่น ความกดอากาศสูง ปรากฏการณ์อุณหภูมิผกผันกลับในชั้นบรรยากาศ และลมสงบ (Pollution Control Department, 2019) ที่ส่งผลกระทบต่อฝุ่นละอองขนาดเล็กไม่สามารถแพร่กระจายได้ แต่จะแขวนลอยอยู่ในบรรยากาศเป็นเวลายาวนาน จึงทำให้ในช่วงฤดูแล้งของทุกปีเกิดการสะสมของ $PM_{2.5}$ ที่เพิ่มขึ้นในทุกพื้นที่ของประเทศไทย

ตารางที่ 2: สถิติเชิงพรรณนาของตัวแปรการศึกษา

ช่วงเวลา	n	ค่าเฉลี่ยตัวแปรการศึกษา					
		PM _{2.5} (µg/m ³)	AOD	T (°C)	RH (%)	WS (km/hr)	BLH (km)
ทั้งหมด	6,407	37.53	0.48	27.54	65.65	1.04	1.42
ฤดูฝน (พฤษภาคม-ตุลาคม)	1,260	20.45	0.38	28.77	72.67	1.06	1.07
ฤดูแล้ง (พฤศจิกายน-เมษายน)	5,147	41.71	0.50	27.24	63.93	1.03	1.51

สหสัมพันธ์ของตัวแปรการศึกษา

สหสัมพันธ์ของตัวแปรอิสระกับ PM_{2.5} ตามช่วงเวลาการศึกษา พบว่า AOD และความชื้นสัมพัทธ์ มีความสัมพันธ์กับ PM_{2.5} มากที่สุด ที่ค่า r เท่ากับ 0.56 และ -0.56 ตามลำดับ ตามมาด้วยความสูงชั้นผสม ความเร็วลม และอุณหภูมิ ที่ค่า r เท่ากับ 0.37 -0.09 และ 0.05 ตามลำดับ ดังตารางที่ 3 โดยสหสัมพันธ์ตามช่วงเวลาการศึกษาของ PM_{2.5} ที่มีความสัมพันธ์ในทิศทางตรงกันข้ามกับความชื้นสัมพัทธ์และความเร็วลม หมายความว่าหากปริมาณความชื้นสัมพัทธ์และความเร็วลมมีค่าสูง จะทำให้ปริมาณ PM_{2.5} ในบรรยากาศมีค่าลดลง ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Kwanma, Pukngam & Arunpraparut (2019) ที่พบว่าความชื้นสัมพัทธ์ ความเร็วลม และปริมาณน้ำฝน แปรผกผันกับปริมาณของฝุ่นละอองในบรรยากาศ อย่างไรก็ตามงานวิจัยของ Kanabkaew (2013) ได้เปิดเผยว่าการตรวจวัดฝุ่นละอองภาคพื้นดินยังถูกจำกัดด้วยชั้นบรรยากาศที่มีแรงเสียดทาน (Planetary Boundary Layer) หรือความสูงชั้นผสม ค่า AOD ที่ตรวจวัดได้ต่ำกว่าชั้นความสูงชั้นผสม จึงมีความเหมาะสมที่จะนำมาใช้เป็นตัวแทนของฝุ่นละออง รวมไปถึงปัจจัยทางอุตุนิยมวิทยาที่ ได้แก่ อุณหภูมิ และความชื้นสัมพัทธ์ ก็เป็นตัวแปรสำคัญและมีอิทธิพลอย่างมากต่อความสัมพันธ์ของ AOD และฝุ่นละออง

ตารางที่ 3: สหสัมพันธ์ของตัวแปรอิสระกับ PM_{2.5}

ช่วงเวลา	n	สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เพียร์สัน (r) **				
		AOD	T	RH	WS	BLH
ทั้งหมด	6,407	0.56	0.05	-0.56	-0.09	0.37
ฤดูฝน (พฤษภาคม-ตุลาคม)	1,260	0.36	0.32	-0.48	0.17	0.33
ฤดูแล้ง (พฤศจิกายน-เมษายน)	5,147	0.56	0.10	-0.53	-0.12	0.31

หมายเหตุ ** มีระดับความมีนัยสำคัญทางสถิติที่ 0.01 (2-tailed)

ระดับความสัมพันธ์กันเองของตัวแปรอิสระ

ผลการวิเคราะห์ระดับความสัมพันธ์กันเองของตัวแปรอิสระ ได้แก่ AOD อุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ ความเร็วลม และความสูงชั้นผสม ในการพัฒนาแบบจำลอง GTWR สำหรับการประมาณค่า $PM_{2.5}$ พบว่าค่า VIF ได้จากการวิเคราะห์ความถดถอยเชิงพหุ หรือนำตัวแปรเข้าทั้งหมด อยู่ในช่วง 1.16-1.51 ซึ่งทั้งหมดมีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับ 2 จึงไม่เกิดปัญหา Multicollinearity ในระบบสมการ ดังตารางที่ 4 ดังนั้น สามารถใช้เป็นตัวแปรอิสระสำหรับการประมาณค่า $PM_{2.5}$ ได้อย่างเหมาะสม

ตารางที่ 4: ผลการวิเคราะห์ระดับความสัมพันธ์กันเองของตัวแปรอิสระ พื้นที่ประเทศไทย

แบบจำลอง	ตัวแปรตาม	R^2	Variance Inflation Factor (VIF) ของตัวแปรอิสระ				
			AOD	T	RH	WS	BLH
GTWR	$PM_{2.5}$	0.60	1.23	1.40	1.22	1.16	1.51

แบบจำลอง GTWR สำหรับการประมาณค่า $PM_{2.5}$

ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์เชิงพื้นที่ย่อยของการประมาณค่า $PM_{2.5}$ จากแบบจำลอง GTWR ($n = 5,704$) พบว่า Model Fitting จากแบบจำลอง GTWR สำหรับการประมาณค่า $PM_{2.5}$ พื้นที่ประเทศไทย มีค่า R^2 เท่ากับ 0.71 ค่า RMSE เท่ากับ $14.55 \mu g/m^3$ และค่า MAE เท่ากับ $10.04 \mu g/m^3$ ดังตารางที่ 5 ซึ่งหมายความว่า AOD อุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ ความเร็วลม และความสูงชั้นผสม สามารถอธิบายความแปรปรวนของ $PM_{2.5}$ ด้วยแบบจำลอง GTWR ได้ประมาณร้อยละ 71.0 ทั้งนี้ สัดส่วนร้อยละของความแปรปรวนที่เหลือเป็นอิทธิพลอันเนื่องมาจากตัวแปรหรือปัจจัยอื่นๆ นอกเหนือจากงานวิจัยนี้ที่ยังไม่ได้ศึกษาความสัมพันธ์ (He et al., 2018)

ตารางที่ 5: ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์เชิงพื้นที่ย่อยของการประมาณค่า $PM_{2.5}$ พื้นที่ประเทศไทย จากแบบจำลอง GTWR

แบบจำลอง	ตัวแปร	ค่าเฉลี่ยความสัมพันธ์เชิงพื้นที่ย่อย			Model Fitting
		ทั้งหมด	ฤดูฝน	ฤดูแล้ง	
GTWR	Intercept (β_0)	138.42	149.17	136.05	Bandwidth = 0.11 AICc = 46,868.10 $R^2 = 0.71$ R^2 Adjusted = 0.71 RMSE = 14.55 MAE = 10.04
	AOD (β_1)	33.81	29.72	34.71	
	T (β_2)	-1.82	-1.98	-1.78	
	RH (β_3)	-0.97	-1.03	-0.96	
	WS (β_4)	-9.45	-8.98	-9.56	
	BLH (β_5)	4.43	3.83	4.56	

โดยเมื่อนำค่าเฉลี่ยความสัมพันธ์เชิงพื้นที่ย่อยของตัวแปร β_0 และ $\beta_1 - \beta_5$ จากตารางที่ 5 มาสร้างแบบจำลองการประมาณค่า $PM_{2.5}$ จะได้โครงสร้างของระบบสมการ GTWR สำหรับการประมาณค่า $PM_{2.5}$ พื้นที่ประเทศไทย ดังตารางที่ 6

ตารางที่ 6: แบบจำลองการประมาณค่า $PM_{2.5}$ พื้นที่ประเทศไทย

ช่วงเวลา	แบบจำลองการประมาณค่า $PM_{2.5}$ พื้นที่ประเทศไทย
ทั้งหมด	$PM_{2.5} = 138.42 + 33.81(AOD) - 1.82(T) - 0.97(RH) - 9.45(WS) + 4.43(BLH)$
ฤดูฝน (พฤษภาคม-ตุลาคม)	$PM_{2.5} = 149.17 + 29.72(AOD) - 1.98(T) - 1.03(RH) - 8.98(WS) + 3.83(BLH)$
ฤดูแล้ง (พฤศจิกายน-เมษายน)	$PM_{2.5} = 136.05 + 34.71(AOD) - 1.78(T) - 0.96(RH) - 9.56(WS) + 4.56(BLH)$

การทดสอบแบบจำลองการประมาณค่า $PM_{2.5}$ พื้นที่ประเทศไทย ตามช่วงเวลาของฤดูกาล

ตารางที่ 7 แสดงสถิติเชิงพรรณนาของตัวแปรทดสอบแบบจำลองการประมาณค่า $PM_{2.5}$ พื้นที่ประเทศไทย ตามช่วงเวลาของฤดูกาล พบว่าความผันแปรของค่าเฉลี่ย AOD อุณหภูมิ ความเร็วลม และความสูงชั้นผสม ในข้อมูลฤดูแล้งจะมีค่าเฉลี่ยสูงกว่าข้อมูลฤดูฝน ส่วนความชันสัมพันธ์มีความผันแปรของค่าเฉลี่ยในทางตรงกันข้ามกับตัวแปรอิสระตัวอื่นๆ

ตารางที่ 7: สถิติเชิงพรรณนาของตัวแปรทดสอบแบบจำลองการประมาณค่า $PM_{2.5}$ พื้นที่ประเทศไทย

ช่วงเวลา	n	ค่าเฉลี่ยตัวแปรทดสอบ				
		AOD	T (°C)	RH (%)	WS (km/hr)	BLH (km)
ฤดูฝน (ตุลาคม 2561)	229	0.35	27.75	76.18	0.73	0.93
ฤดูแล้ง (เมษายน 2562)	447	0.75	30.91	57.59	1.10	2.59

ผลการทดสอบแบบจำลองการประมาณค่า $PM_{2.5}$ พื้นที่ประเทศไทย (ตารางที่ 6) ตามช่วงเวลาของฤดูกาล พบว่าแบบจำลองการประมาณค่า $PM_{2.5}$ สำหรับฤดูฝน (ตุลาคม 2561) Model Fitting มีค่า R^2 เท่ากับ 0.34 ค่า RMSE เท่ากับ $8.74 \mu g/m^3$ และค่า MAE เท่ากับ $7.33 \mu g/m^3$ ส่วนแบบจำลองการประมาณค่า $PM_{2.5}$ สำหรับฤดูแล้ง (เมษายน 2562) มีค่า R^2 เท่ากับ 0.76 ค่า RMSE เท่ากับ $18.32 \mu g/m^3$ และค่า MAE เท่ากับ $14.20 \mu g/m^3$ ดังตารางที่ 8 ดังนั้น การประมาณค่าความเข้มข้นของ $PM_{2.5}$ ด้วยแบบจำลองการประมาณค่า $PM_{2.5}$ พื้นที่ประเทศไทย โดยใช้ข้อมูลการตรวจวัดจริงของข้อมูล AOD อุณหภูมิ ความเร็วลม และความสูงชั้นผสม สำหรับฤดูแล้งจึงมีความแม่นยำมากกว่าฤดูฝน ด้วยค่า R^2 ที่สูงกว่า และมีค่าใกล้เคียงกับผลการวิเคราะห์จากแบบจำลอง GTWR ($R^2 = 0.71$) ซึ่งผลการศึกษาดังกล่าวยังแสดงให้เห็นอีกว่าสัดส่วนของจำนวนข้อมูลนำเข้าแบบจำลอง GTWR ($n = 5,704$) เมื่อพิจารณาแยกตามฤดูกาล พบว่าสัดส่วนของข้อมูลนำเข้าฤดูฝน ($n = 1,031$) มีจำนวนน้อยกว่าข้อมูลนำเข้าฤดูแล้ง ($n = 4,673$) ประมาณ 4 เท่า ซึ่งรูปแบบของแบบจำลอง GTWR ที่อาศัยการถ่วงน้ำหนักเชิงพื้นที่และเวลาในการวิเคราะห์การถดถอยของข้อมูล ส่งผลทำให้สัดส่วนการถ่วงน้ำหนักเชิงพื้นที่และเวลาในการประมาณค่า β_0 และค่า $\beta_1 - \beta_5$ ให้ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์เชิงพื้นที่

ย่อยแตกต่างกันออกไปตามฤดูกาล เมื่อนำแบบจำลองมาสร้างสมการ GTWR เพื่อการประมาณค่า $PM_{2.5}$ ในฤดูแล้งจึงมีความเหมาะสมมากกว่าฤดูฝน ด้วยค่า R^2 ที่สูงกว่า ในขณะที่เดียวกันค่า RMSE และค่า MAE ก็จะมีขนาดใหญ่เพิ่มขึ้นตามไปด้วย (Park et al., 2019) เนื่องจากความแปรปรวนของจำนวนข้อมูลนำเข้าฤดูแล้งที่มีมากกว่าข้อมูลฤดูฝน ดังนั้น งานวิจัยในอนาคตจึงควรมีความระมัดระวังในการใช้แบบจำลอง GTWR สำหรับการประมาณค่า $PM_{2.5}$ ในพื้นที่ที่มีกระจายตัวของสถานีตรวจวัดคุณภาพอากาศยังไม่ครอบคลุมการตรวจวัด (Ma et al., 2014) ที่อาจส่งผลกระทบต่อจำนวนข้อมูลหรือตัวแปรการศึกษาที่ไม่สมมาเสมอ และคำนึงถึงปัจจัยทางอุตุนิยมวิทยาที่เปลี่ยนแปลงไปตามฤดูกาล ซึ่งจะทำให้ค่าความเข้มข้นของ $PM_{2.5}$ ที่ได้จากการประมาณด้วยแบบจำลองมีความแม่นยำลดลง และมีค่าความคลาดเคลื่อนที่เพิ่มสูงขึ้น

ตารางที่ 8: ผลการทดสอบแบบจำลอง GTWR สำหรับการประมาณค่า $PM_{2.5}$

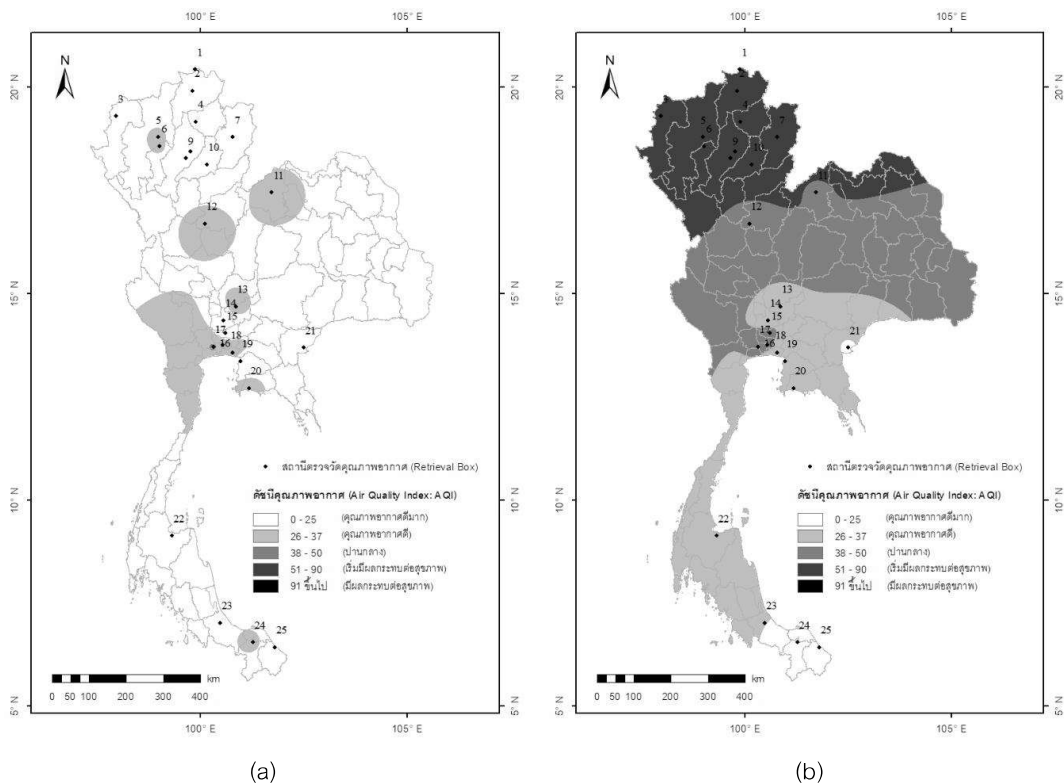
ช่วงเวลา	n	Model Fitting			
		R^2	r	RMSE ($\mu g/m^3$)	MAE ($\mu g/m^3$)
ฤดูฝน (ตุลาคม 2561)	229	0.34	0.58	8.74	7.33
ฤดูแล้ง (เมษายน 2562)	474	0.76	0.87	18.32	14.20

สรุปผลการศึกษา

ประเทศไทยประสบปัญหาด้านสถานการณ์การวิกฤตของฝุ่นละอองเป็นประจำทุกปี ซึ่งกิจกรรมของแหล่งกำเนิดมลพิษจะเปลี่ยนแปลงไปตามฤดูกาล ก่อให้เกิดการสะสมของฝุ่นละอองในบรรยากาศเพิ่มสูงขึ้น ในหลายพื้นที่ของประเทศไทย งานวิจัยนี้ได้พัฒนาแบบจำลอง GTWR สำหรับการประมาณค่า $PM_{2.5}$ โดยใช้ข้อมูล AOD ร่วมกับข้อมูลอุตุนิยมวิทยา ได้แก่ อุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ ความเร็วลม และความสูงชั้นผสม ผลสหสัมพันธ์ของตัวแปรการศึกษา พบว่า AOD และความชื้นสัมพัทธ์ เป็นปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อเปลี่ยนแปลงของ $PM_{2.5}$ มากที่สุด ($r = 0.56$ และ -0.56) ตามมาด้วยความสูงชั้นผสม ($r = 0.37$) ความเร็วลม ($r = -0.09$) และอุณหภูมิ ($r = 0.05$) ตามลำดับ โดยผลการศึกษาแบบจำลอง GTWR สำหรับการประมาณค่า $PM_{2.5}$ พื้นที่ประเทศไทย พบว่า AOD อุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ ความเร็วลม และความสูงชั้นผสม ที่ใช้เป็นตัวแปรอิสระในการพัฒนาแบบจำลอง สามารถอธิบายความแปรปรวนของ $PM_{2.5}$ ได้ประมาณร้อยละ 71.0 ที่ค่า RMSE และค่า MAE เท่ากับ $14.55 \mu g/m^3$ และ $10.04 \mu g/m^3$ ตามลำดับ

ผลการศึกษาแบบจำลอง GTWR สำหรับการประมาณค่า $PM_{2.5}$ ที่ได้รับการพัฒนา ยังได้ถูกทำการทดสอบการประมาณค่าความเข้มข้นของ $PM_{2.5}$ จากข้อมูลการตรวจวัดจริงเดือนตุลาคม 2561 สำหรับตัวแทนข้อมูลฤดูฝน และเดือนเมษายน 2562 สำหรับตัวแทนข้อมูลฤดูแล้ง ผลการทดสอบพบว่าแบบจำลองการประมาณค่า พื้นที่ประเทศไทย สามารถประมาณค่าความเข้มข้นของ $PM_{2.5}$ ในฤดูแล้ง ($R^2 = 0.76$) แม่นยำสูงกว่าฤดูฝน ($R^2 = 0.34$) แต่จะมีความคลาดเคลื่อนจากค่า RMSE และค่า MAE ที่มีขนาดใหญ่กว่าตามไปด้วย ดังนั้น การประมาณค่า $PM_{2.5}$ โดยใช้ AOD อุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ ความเร็วลม และความสูงชั้นผสม ด้วยแบบจำลอง GTWR จึงมีความเหมาะสมการประมาณค่าความเข้มข้นของ $PM_{2.5}$ ในช่วงฤดูแล้ง (พฤษภาคม-เมษายน) มากกว่าการประมาณค่าในช่วงฤดูฝน (พฤษภาคม-ตุลาคม) นอกจากนี้ ผลการศึกษายังสามารถประยุกต์ใช้โดยการนำเสนอในรูปแบบของแผนที่การกระจายเชิงพื้นที่ของ $PM_{2.5}$ ภาคพื้นดินในประเทศไทย เทียบเท่ากับค่าดัชนีคุณภาพอากาศ (Air Quality Index) ดังภาพที่ 2 โดยใช้ค่าเฉลี่ยความเข้มข้นของ $PM_{2.5}$

รายเดือนตุลาคม 2561 และเดือนเมษายน 2562 ที่ได้จากการประมาณค่าด้วยแบบจำลอง ผ่านกระบวนการประมาณค่าในช่วง วิธี Inverse Distance Weighted (IDW) ในโปรแกรม ArcMap ซึ่งสหสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มข้นของ $PM_{2.5}$ จากแผนที่การกระจายเชิงพื้นที่ (predicted) กับค่าข้อมูลการตรวจวัดจริงของสถานีตรวจวัดคุณภาพอากาศ (measured) เดือนตุลาคม 2561 และเดือนเมษายน 2562 มีความสัมพันธ์ไปในทิศทางเดียวกัน ที่ค่า r เท่ากับ 0.58 และ 0.96 ตามลำดับ ดังนั้น ผลการศึกษาดังกล่าวจะมีส่วนช่วยเป็นข้อมูลเฝ้าระวังติดตามและตรวจสอบคุณภาพอากาศค่าความเข้มข้นของ $PM_{2.5}$ ในพื้นที่ของประเทศไทย และใช้เป็นข้อมูลในการวางแผนบริหารจัดการเชิงพื้นที่ เพื่อกำหนดมาตรการป้องกันของปัญหามลพิษทางอากาศที่เกิดขึ้นจากฝุ่นละอองในระยะยาว โดยเฉพาะอย่างยิ่งในช่วงฤดูแล้ง (ภาพที่ 2 (b)) ของประเทศไทยที่มีมักจะประสบปัญหามลพิษทางอากาศจากฝุ่นละอองเป็นประจำทุกปี



ภาพที่ 2: แผนที่การกระจายเชิงพื้นที่ของ $PM_{2.5}$ ภาคพื้นดินในประเทศไทย
(a) เดือนตุลาคม 2561 และ (b) เดือนเมษายน 2562 เทียบเท่ากับดัชนีคุณภาพอากาศ

เอกสารอ้างอิง

- Bai, Y., Wu, L., Qin, K., Zhang, Y., Shen, Y., Zhou, Y. (2016). A geographically and temporally weighted regression model for ground-level $PM_{2.5}$ estimation from satellite-derived 500 m resolution AOD. *Remote Sensing*, 8(3), 262.
- Chavanaves, S., Fantke, P., Limpaseni, S., Attavanich, W., Panyametheekul, S., Gheewala, S. H., Prapasongsa, T. (2021). Health impacts and costs of fine particulate matter formation from road transport in Bangkok Metropolitan Region. *Atmospheric Pollution Research*, 12(10), 101191.
- Fotheringham, A. S., Brunsdon, C., Charlton, M. (2002). *Geographically Weighted Regression: The Analysis of Spatially Varying Relationships*. New York.
- Guo, Y., Tang, Q., Gong, D. Y., Zhang, Z. (2017). Estimating ground-level $PM_{2.5}$ concentrations in Beijing using a satellite-based geographically and temporally weighted regression model. *Remote Sensing of Environment*, 198, 140-149.
- Gupta, P., Remer, L. A., Levy, R. C., Mattoo, S. (2018). Validation of MODIS 3 km land aerosol optical depth from NASA's EOS Terra and Aqua missions. *Atmospheric Measurement Techniques*, 11, 3145-3159.
- He, Q., Haung, B. (2018). Satellite-based high-resolution $PM_{2.5}$ estimation over the Beijing-Tianjin-Hebei region of China using an improved geographically and temporally weighted regression model. *Environmental Pollution*, 236, 1027-1037.
- Huang, B., Wu, B., Barry, M. (2010). Geographically and temporally weighted regression for modeling spatio-temporal variation in house prices. *International Journal of Geographical Information Science*, 24(3), 383-401.
- Janjai, S. (2014). *Solar Radiation* [In Thai]. Nakhon Pathom: Phetkasem Printing Group.
- Kanabkaew, T. (2013). Prediction of Hourly Particulate Matter Concentrations in Chiangmai, Thailand Using MODIS Aerosol Optical Depth and Ground-Based Meteorological Data. *EnvironmentAsia*, 6(2), 65-70.
- Kwanma, P., Pukngam, S., Arunpraparut, W. (2019). Meteorological factors affecting concentration of PM_{10} at Na Phra Lan Sub-district, Chaloem Phra Kiat District, Saraburi Province [In Thai]. *PSRU journal of Science and Technology*, 4(2), 85-94.
- Li, T., Hu, R., Chen, Z., Li, Q., Huang, S., Zhu, Z., Zhou, L. F. (2018). Fine particulate matter ($PM_{2.5}$): The culprit for chronic lung diseases in China. *Chronic Diseases and Translational Medicine*, 4(3), 176-186.
- Ma, Z., Hu, X., Huang, L., Bi, J., Liu, Y. (2014). Estimating ground-level $PM_{2.5}$ in China using satellite remote sensing. *Environmental Science & Technology*, 48, 7436-7444.
- Park, S., M. Shin, J. Im, C. K. Song, M. Choi, J. Kim, S. Lee, R. Park, J. Kim, D. W. Lee, S. K. Kim. (2019). Estimation of ground-level particulate matter concentrations through the synergistic use of satellite observations and process-based models over South Korea. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 19, 1097-1113.

- Pollution Control Department. (2019). *Booklet on Thailand State of Pollution 2018*. Bangkok: S.Mongkon Press Limited Partnership.
- Pollution Control Department. (2022). National Ambient Air Quality Standards [In Thai]. Retrieved January 1, 2022, from <http://air4thai.pcd.go.th/webV3/#/Download>.
- Remer, L. A., Mattoo, S., Levy, R. C., Munchak, L. A. (2013). MODIS 3 km aerosol product: algorithm and global perspective. *Atmospheric Measurement Techniques*, 6(7), 1829-1844.
- Thai Meteorological Department. (2021). *Thailand Weather* [In Thai]. Retrieved October 10, 2021, from <https://www.tmd.go.th/info/info.php?FileID=22>.
- Wei, J., Li, Z., Peng, Y., Sun, L. (2019). MODIS collection 6.1 aerosol optical depth products over land and ocean: validation and comparison. *Atmospheric Environment*, 201, 428-440.
- You, W., Zang, Z., Zhang, L., Li, Y., Pan, X., Wang, W. (2016). National-scale estimates of ground-level $PM_{2.5}$ concentration in china using geographically weighted regression based on 3 km resolution MODIS AOD. *Remote Sensing*, 8(3), 184.

