



Srinakharinwirot University Journal of Sciences and Technology

Volume 18, Issue 1, January - June 2026, Pages 1 – 11 ISSN 2985-2641 (Online)



Research Article

การกระจายของฝุ่นละอองขนาดเล็กไม่เกิน 2.5 ไมครอน ในประเทศไทย

Distribution of PM_{2.5} in Thailand

ธนวรรธก์ ภูเหมื่อนบุตร^{1*}, เชษฐา งามจรัส²Thanawat Phumuanboot^{1*}, Chetta Ngamjarus²¹สาขาวิชาชีวสถิติ คณะสาธารณสุขศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น¹Biostatistics Program, Faculty of Public Health, Khon Kaen University.²สาขาวิชาวิทยาการระบาดและชีวสถิติ คณะสาธารณสุขศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น²Department of Epidemiology and Biostatistics, Faculty of Public Health, Khon Kaen University.

*Corresponding author, e-mail: thanawat.phum@kkumail.com

Received: 2 August 2025; Revised: 26 June 2026; Accepted: 26 June 2026

บทคัดย่อ

ฝุ่นละอองขนาดเล็กไม่เกิน 2.5 ไมครอน (Particulate Matter with Diameter of Less Than 2.5 Micron: PM_{2.5}) เป็นมลพิษทางอากาศที่ส่งผลต่อสุขภาพของคนไทย ดังนั้นการศึกษานี้จึงต้องการศึกษาการกระจายเชิงพื้นที่ของปริมาณฝุ่น PM_{2.5} ในประเทศไทย ผู้วิจัยได้ทำการดึงข้อมูลปริมาณฝุ่น PM_{2.5} ของประเทศไทยระหว่างปี ค.ศ. 2020 ถึง 2024 จากเว็บไซต์ของกรมควบคุมมลพิษ กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม ประเทศไทย ผู้วิจัยได้ทำการวิเคราะห์ข้อมูลดังกล่าวเพื่อสำรวจสหสัมพันธ์ในตัวเองเชิงพื้นที่ (Spatial Autocorrelation) โดยใช้สถิติทดสอบ Moran's I และ Local Indicator Spatial Autocorrelation (LISA) การศึกษานี้พบว่าปริมาณฝุ่น PM_{2.5} รายปีโดยเฉลี่ยเพิ่มขึ้นจากปี ค.ศ. 2022 ถึง 2024 ประมาณ 4.4 µg/m³ การกระจายของฝุ่น PM_{2.5} มีลักษณะเกาะกลุ่มมากที่สุดในปี ค.ศ. 2024 (Global Moran's I = 0.66, ช่วงความเชื่อมั่น-ร้อยละ 95 ตั้งแต่ 0.29 ถึง 0.99) เมื่อผู้วิจัยได้ทำการวิเคราะห์เชิงพื้นที่ในระดับจังหวัดพบว่าภาคเหนือมีปริมาณฝุ่น PM_{2.5} ในปริมาณสูงสุดและมีการกระจายเป็นจำนวนมากโดยเฉพาะปี ค.ศ. 2020, 2023 และ 2024 นอกจากนี้ยังพบว่าในช่วง 5 ปีที่ผ่านมา พื้นที่ส่วนใหญ่ในภาคใต้ประเทศไทยมีการกระจายของฝุ่นดังกล่าวโดยเฉลี่ยในปริมาณต่ำที่สุด เมื่อพิจารณาจากข้อมูลฝุ่นดังกล่าวรายเดือนผลการศึกษพบว่าปริมาณฝุ่นสูงสุดในช่วงเดือนมกราคมถึงเมษายนของทุกปี

คำสำคัญ: ฝุ่นละอองขนาดเล็กไม่เกิน 2.5 ไมครอน; การกระจาย; สหสัมพันธ์เชิงพื้นที่อัตโนมัติ; ประเทศไทย

Abstract

Particulate Matter with a diameter of less than 2.5 microns ($PM_{2.5}$) is an air pollution that affects the health of Thai people. Thus, this study aims to investigate the spatial distribution of $PM_{2.5}$ in Thailand. We retrieved $PM_{2.5}$ data during 2020 to 2024 from the website of Pollution Control Department, Ministry of Natural Resources and Environment, Thailand. We explored a spatial autocorrelation of the $PM_{2.5}$ by using Moran's I test and Local Indicator of Spatial Autocorrelation (LISA). The results indicated that the annual average of $PM_{2.5}$ concentration increased by approximately $4.4 \mu g/m^3$ between 2022 and 2024. The distribution of $PM_{2.5}$ in 2024 was strongest clustering pattern (Global Moran's I = 0.66, 95% confidence Interval: 0.29 to 0.99). When we conducted spatial analysis by using provincial data, our findings reveal that northern part of Thailand had the highest in both quantity and spread of $PM_{2.5}$ in 2020, 2023, and 2024. Additionally, we also found that the majority of southern region of Thailand had lowest of average $PM_{2.5}$ over the past five years. When monthly data of $PM_{2.5}$ was considered, the findings found that quantity of $PM_{2.5}$ was highest between January and April each year.

Keywords: $PM_{2.5}$; distribution; spatial autocorrelation; Thailand

บทนำ

ในช่วงไม่กี่ปีที่ผ่านมาพบปัญหามลพิษทางอากาศโดยเฉพาะฝุ่นละอองขนาดเล็กไม่เกิน 2.5 ไมครอน (Particulate Matter with Diameter of Less Than 2.5 Micron: $PM_{2.5}$) มีแนวโน้มทวีความรุนแรงเพิ่มขึ้นในหลายประเทศทั่วโลก รวมถึงประเทศไทย (World Health Organization, 2021) [1] เนื่องจากฝุ่น $PM_{2.5}$ เป็นมลพิษที่มีขนาดเล็ก สามารถแทรกซึมเข้าสู่ระบบทางเดินหายใจส่วนลึกและกระแสเลือดได้ส่งผลกระทบต่อสุขภาพทั้งในระยะสั้นและระยะยาว เช่น โรคระบบทางเดินหายใจ โรคหัวใจและหลอดเลือด รวมถึงเพิ่มความเสี่ยงต่อการเสียชีวิตก่อนวัยอันควร (Brook et al., 2010) [2], (Lelieveld et al., 2015) [3]

ในภูมิภาคเอเชียตะวันออกเฉียงใต้รวมถึงประเทศไทยปัญหาฝุ่น $PM_{2.5}$ มักเกิดขึ้นในพื้นที่เขตเมืองและอุตสาหกรรมที่มีการปล่อยมลพิษจากการคมนาคม การผลิตภาคอุตสาหกรรม และการใช้พลังงานเชื้อเพลิงฟอสซิล (Pope & Dockery, 2006) [4] นอกจากนี้หลายพื้นที่ของประเทศไทยยังพบค่าความเข้มข้นของ $PM_{2.5}$ สูงในช่วงฤดูแล้งและฤดูร้อน ซึ่งมีความสัมพันธ์กับการเผาในที่โล่ง การเผาเศษวัสดุทางการเกษตร และการเกิดไฟป่า (Vadrevu et al., 2019) [5] ขณะเดียวกัน ปัจจัยทางอุตุนิยมวิทยา เช่น อุณหภูมิ ความเร็วลม ทิศทางลม และความกดอากาศ มีบทบาทสำคัญต่อการสะสมและการกระจายตัวของฝุ่นละออง โดยเฉพาะในพื้นที่ที่มีลักษณะภูมิประเทศแบบแอ่งกระทะ ซึ่งเอื้อต่อการกักเก็บมลพิษทางอากาศและลดประสิทธิภาพในการระบายอากาศ (Zhao et al., 2013) [6]

องค์การอนามัยโลกได้กำหนดค่าเฉลี่ยรายปีของ $PM_{2.5}$ ไม่ควรเกิน 5 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร เพื่อป้องกันผลกระทบต่อสุขภาพของประชาชน (World Health Organization, 2021) [1] อย่างไรก็ตามหลายเมืองใหญ่ทั่วโลกยังคงมีค่าความเข้มข้นของ $PM_{2.5}$ สูงกว่าเกณฑ์มาตรฐานดังกล่าวหลายเท่า เช่น กรุงนิวเดลี ประเทศอินเดีย ซึ่งมีค่าเฉลี่ยรายปีของ $PM_{2.5}$ ประมาณ 83.2 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร หรือสูงกว่าค่ามาตรฐานของ WHO ประมาณ 16 เท่า (Pollution Control Department, 2023) [7] สำหรับประเทศไทยพบว่าหลายพื้นที่โดยเฉพาะกรุงเทพมหานครและภาคเหนือ มีปัญหาฝุ่น $PM_{2.5}$ รุนแรงในช่วงฤดูหนาวและฤดูแล้ง โดยบางช่วงในกรุงเทพมหานครมีค่าฝุ่น $PM_{2.5}$ สูงเกิน 100 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์

เมตร (Pollution Control Department, 2023) [7] ขณะที่การศึกษาในภาคเหนือของประเทศไทยในปี ค.ศ. 2020 รายงานว่าค่าฝุ่น $PM_{2.5}$ รายวันในช่วงเดือนมีนาคมถึงเมษายนมีค่าสูงถึง 150 ถึง 195 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ซึ่งสัมพันธ์กับการเกิดหมอกควันและไฟป่าในพื้นที่อย่างชัดเจน (Amnuaylojaroen et al., 2023) [8]

จากการทบทวนวรรณกรรมพบว่ามีการศึกษาการกระจายของฝุ่น $PM_{2.5}$ ในบางพื้นที่ของประเทศไทยโดยเฉพาะภาคเหนือหรือพื้นที่ที่มีประชากรหนาแน่น เช่น กรุงเทพมหานคร เป็นต้น ดังนั้นเพื่อให้ได้ผลการศึกษาที่ครอบคลุมทั่วทั้งประเทศและเป็นปัจจุบัน การศึกษานี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการกระจายเชิงพื้นที่ของฝุ่น $PM_{2.5}$ และแนวโน้มรายฤดูกาลในระดับจังหวัดครอบคลุมทุกภูมิภาคของประเทศไทย

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

เพื่อศึกษาการกระจายเชิงพื้นที่ของฝุ่น $PM_{2.5}$ และแนวโน้มรายฤดูกาลในระดับจังหวัดครอบคลุมทุกภูมิภาคของประเทศไทย

วิธีดำเนินการวิจัย

การศึกษานี้ได้ผ่านการรับรองจากคณะกรรมการจริยธรรมการวิจัยในมนุษย์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น โดยศึกษาการกระจายเชิงพื้นที่ของฝุ่น $PM_{2.5}$ ในประเทศไทย จากข้อมูลฝุ่น $PM_{2.5}$ ทุกสถานีในประเทศไทยจากกรมควบคุมมลพิษ กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม (Pollution Control Department, 2025) [9] ตั้งแต่วันที่ 1 มกราคม ค.ศ. 2020 ถึงวันที่ 31 ธันวาคม ค.ศ. 2024 และข้อมูลสำหรับสร้างแผนที่ประเทศไทยซึ่งเป็นข้อมูลทุติยภูมิจากเว็บไซต์ <https://data.humdata.org> (Humanitarian Data Exchange, 2022) [10]

ผู้วิจัยนำข้อมูลปริมาณฝุ่น $PM_{2.5}$ รายวันเข้าสู่โปรแกรม R (R Core Team, 2024) [11] และ RStudio (Posit Team, 2025) [12] เพื่อจัดการข้อมูลให้เป็นค่าเฉลี่ยรายเดือนและแยกตามจังหวัด หลังจากนั้นนำข้อมูลฝุ่นรายเดือนมาพรรณนาข้อมูลทั่วไปแยกรายปี ภูมิภาค ด้วยค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation: SD) และนำเสนอด้วยตารางและรูปภาพ

ผู้วิจัยทำการวิเคราะห์สหสัมพันธ์ในตัวเองเชิงพื้นที่ (Spatial Autocorrelation) โดยกำหนดน้ำหนักเชิงพื้นที่ (Spatial weights) ด้วยวิธี Queen contiguity (Bivand et al., 2013) [13] ซึ่งพิจารณาพื้นที่ที่มีขอบเขตหรือจุดมุมติดกันเป็นพื้นที่เพื่อนบ้าน (Neighboring Areas) เพื่อใช้ในการวิเคราะห์สหสัมพันธ์ในตัวเองเชิงพื้นที่ เพื่อวิเคราะห์การกระจายของข้อมูลฝุ่นใน 2 ระดับ คือ สหสัมพันธ์ในระดับครอบคลุม (Global Autocorrelation) สำหรับประเมินความสัมพันธ์เชิงพื้นที่ของ $PM_{2.5}$ ในภาพรวมของพื้นที่ศึกษาโดยใช้สถิติทดสอบ Moran's I โดยกำหนดระดับนัยสำคัญที่ 0.05 นำเสนอด้วยค่า Global Moran's I พร้อมช่วงความเชื่อมั่น (Confidence Interval: CI) ร้อยละ 95 และค่าพี (P-value) จำแนกตามปี และสหสัมพันธ์ในระดับเฉพาะที่ (Local Autocorrelation) โดยใช้สถิติ Local Indicator Spatial Autocorrelation (LISA) เพื่อระบุพื้นที่ที่มีการกระจุกตัวของค่าฝุ่น $PM_{2.5}$ และนำเสนอในรูปแบบแผนที่จำแนกตามปี สำหรับพื้นที่ใดที่ไม่สถานีเก็บข้อมูลฝุ่น $PM_{2.5}$ จะไม่ถูกนำมาวิเคราะห์ด้วยวิธีการดังกล่าวข้างต้น

ผลการวิจัย

ตารางที่ 1 พบว่าโดยภาพรวมของประเทศไทยมีค่าเฉลี่ยความเข้มข้นของ $PM_{2.5}$ รายปีอยู่ในช่วง 19.2 ถึง 25.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ โดยมีแนวโน้มลดลงในปี ค.ศ. 2022 (19.2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) และกลับมาสูงขึ้นอีกครั้งในปี ค.ศ. 2023 (25.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) ก่อนจะ

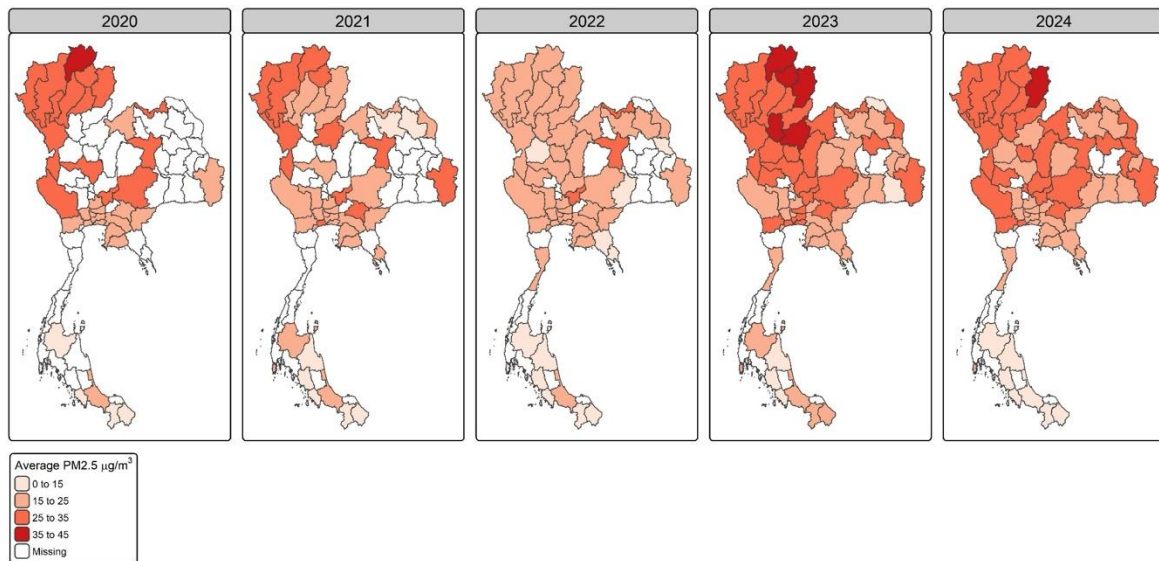
ลดลงเล็กน้อยในปี ค.ศ. 2024 ($23.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$) ภาคเหนือเป็นพื้นที่ที่มีการตรวจพบว่ามีปริมาณฝุ่น $\text{PM}_{2.5}$ โดยเฉลี่ยสูงที่สุดในทุกปี (ภาพที่ 1 และภาพที่ 2) โดยเฉพาะในปี ค.ศ. 2023 มีค่าเฉลี่ยปริมาณฝุ่น $\text{PM}_{2.5}$ เท่ากับ $34.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ขณะที่ภาคตะวันออกเฉียงเหนือพบว่ามีค่าฝุ่น $\text{PM}_{2.5}$ ค่อนข้างสูงมากในปี ค.ศ. 2020 คือ $25.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (SD. = 15.5) และมีแนวโน้มลดลงในปี ค.ศ. 2021 ถึง 2022 ในส่วนภาคกลางพบค่าฝุ่น $\text{PM}_{2.5}$ ทรงตัวในปี ค.ศ. 2020 ถึง 2021 ($22.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$) และลดลงในปี ค.ศ. 2022 และเพิ่มขึ้นชัดเจนในปี ค.ศ. 2023 เป็น $27.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (SD. = 16.6) ในส่วนภาคตะวันออกค่าฝุ่น $\text{PM}_{2.5}$ พบค่าฝุ่นที่สูงที่สุดในปี ค.ศ. 2023 เป็น $20.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (SD. = 9.9) และภาคใต้พบค่าฝุ่น $\text{PM}_{2.5}$ มีค่าต่ำที่สุดของประเทศอย่างต่อเนื่องอยู่ระหว่าง 13.2 (SD. = 2.7) ถึง $15.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (SD. = 4.1) ซึ่งต่ำกว่าค่าเฉลี่ยของประเทศในทุกปี (ตารางที่ 1)

ภาพที่ 2 แสดงค่าเฉลี่ยรายเดือนของความเข้มข้น $\text{PM}_{2.5}$ จำแนกตามภูมิภาคของประเทศไทยระหว่างปี ค.ศ. 2020 ถึง 2024 ซึ่งพบว่าปริมาณ $\text{PM}_{2.5}$ มีความแตกต่างกันตามช่วงเวลา คือ $\text{PM}_{2.5}$ มีปริมาณสูงในช่วงเดือนมกราคมถึงเมษายนของทุกปี ในขณะที่เดือนมิถุนายนถึงตุลาคมตลอดช่วงเวลาที่ทำการศึกษามีปริมาณ $\text{PM}_{2.5}$ ต่ำกว่าช่วงเวลาอื่น ๆ และมีลักษณะเดียวกันในทุกภูมิภาค เมื่อพิจารณารายภูมิภาคพบว่าภาคเหนือมีค่าความเข้มข้น $\text{PM}_{2.5}$ สูงที่สุดอย่างต่อเนื่องตลอดช่วงการศึกษา โดยพบค่าสูงสุดในช่วงเดือนมีนาคมถึงเมษายนของปี ค.ศ. 2020, 2021, 2023 และ 2024 ซึ่งบางช่วงมีค่าเฉลี่ยรายเดือนสูงกว่า $90 \mu\text{g}/\text{m}^3$ นอกจากนี้ ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ภาคกลาง และภาคตะวันตกยังมีแนวโน้มการเพิ่มขึ้นของ $\text{PM}_{2.5}$ ในช่วงเวลาเดียวกัน แต่มีระดับความเข้มข้นต่ำกว่าภาคเหนือ ขณะที่ภาคใต้มีค่าฝุ่น $\text{PM}_{2.5}$ ต่ำที่สุดและมีความผันผวนน้อยที่สุดตลอดช่วงการศึกษา

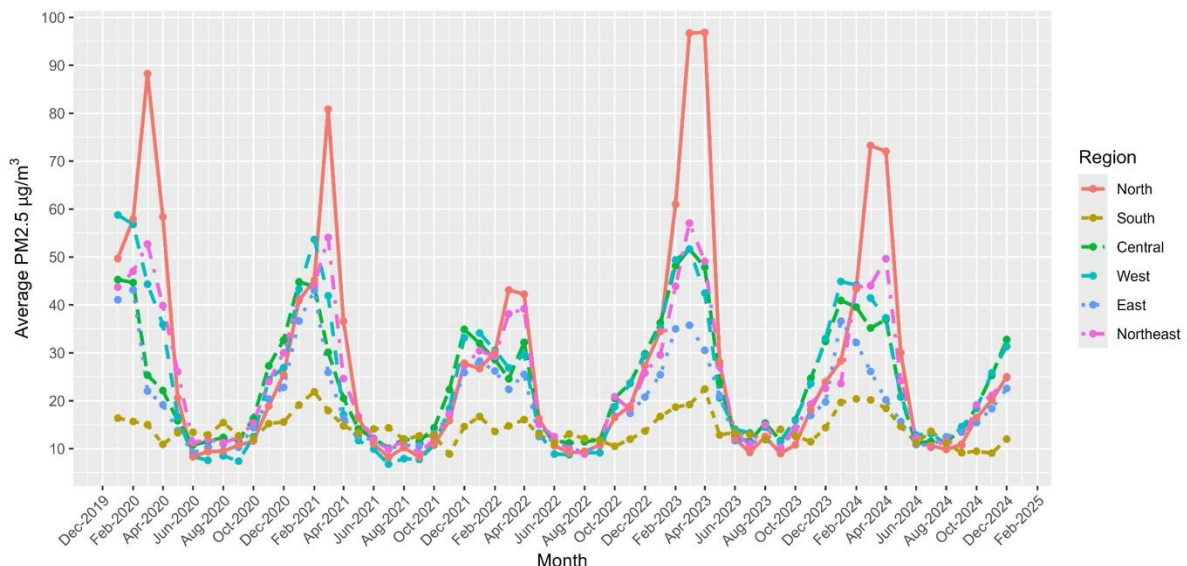
ตารางที่ 1 ความเข้มข้นของฝุ่น $\text{PM}_{2.5}$ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) รายปี

ตัวแปร	ปี (ค.ศ.)				
	2020	2021	2022	2023	2024
ประเทศไทย	23.3 (18)	21.1 (15.5)	19.2 (10)	25.5 (19.4)	23.6 (14.9)
ภูมิภาค					
ภาคเหนือ	30.7 (28.2)	25.1 (22.9)	21.8 (12.8)	34.4 (33.3)	29.3 (22.9)
ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ	25.8 (15.5)	21.8 (15.7)	21 (11.6)	25.1 (16.3)	24.6 (14.8)
ภาคกลาง	22.6 (12.4)	22.6 (13.1)	20.4 (8.9)	27.5 (16.6)	24.8 (12.8)
ภาคตะวันออก	19.8 (11.6)	19.5 (11.4)	17.4 (7.7)	20.3 (9.9)	19.5 (9.2)
ภาคตะวันตก	25.7 (19.5)	21.9 (17.5)	19.7 (10.7)	27.1 (16.6)	26.3 (14.7)
ภาคใต้	14.3 (4.2)	14.5 (4.6)	13.2 (2.7)	15 (4.1)	14.1 (4.8)

หมายเหตุ ค่าในตารางนำเสนอด้วยค่าเฉลี่ย (ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน) ; หน่วยเป็นไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)



ภาพที่ 1 ค่าเฉลี่ยความเข้มข้นของฝุ่น PM_{2.5} ในแต่ละจังหวัด



ภาพที่ 2 แนวโน้มค่าเฉลี่ยของฝุ่น PM_{2.5} ในแต่ละภูมิภาค

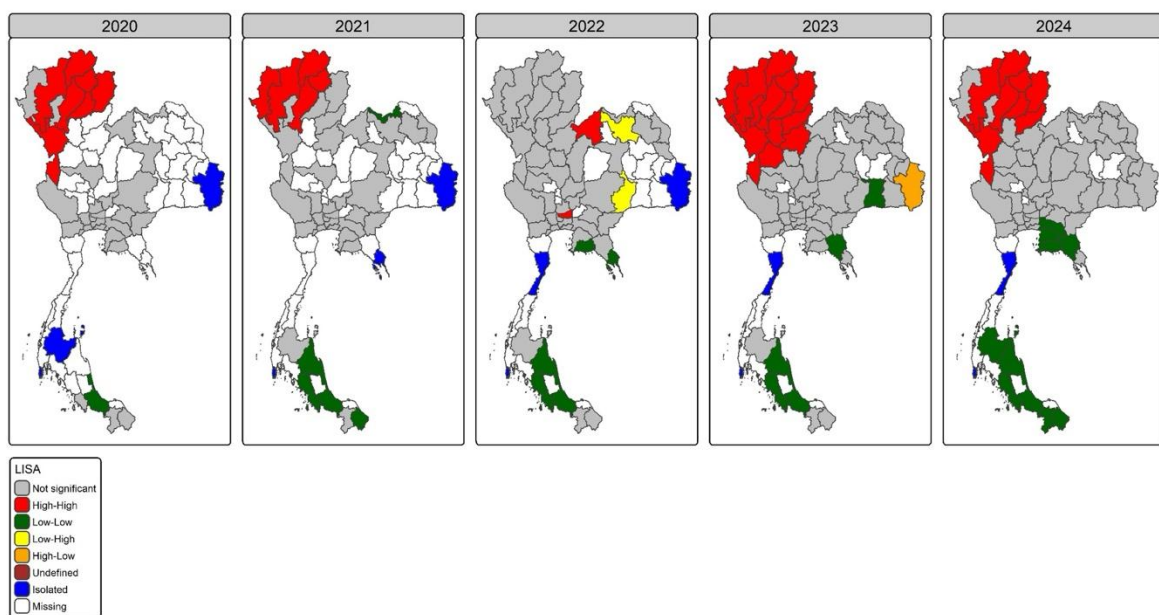
สำหรับการวิเคราะห์ความสัมพันธ์เชิงพื้นที่ของค่าฝุ่น PM_{2.5} พบว่าความเข้มข้นของฝุ่นมีลักษณะการกระจายแบบเกาะกลุ่ม (Spatial Clustering) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติในทุกปีของการศึกษาโดยปี ค.ศ. 2024 พบค่าการกระจุกตัวสูงที่สุด (Global Moran's I = 0.66, 95% CI: 0.29 ถึง 0.99; p-value < 0.001) รองลงมาคือปี ค.ศ. 2023 และ 2020 ซึ่งมีค่า Moran's I เท่ากับ 0.61 แสดงให้เห็นว่าจังหวัดที่มีค่าฝุ่น PM_{2.5} สูงมักตั้งอยู่ใกล้กับจังหวัดที่มีค่าฝุ่นสูงเช่นเดียวกัน ขณะที่จังหวัดที่มีค่าฝุ่นต่ำก็มักอยู่ใกล้กับพื้นที่ที่มีค่าฝุ่นต่ำ สะท้อนถึงอิทธิพลของทั้งแหล่งกำเนิดมลพิษและปัจจัยทางอุตุนิยมวิทยาที่ส่งผลต่อการแพร่กระจายของฝุ่นละอองในระดับภูมิภาค

ภาพที่ 3 แสดงผลการวิเคราะห์ Local Indicator Spatial Autocorrelation (LISA) ซึ่งพบว่าพื้นที่กลุ่ม High-High กระจุกตัวเด่นชัดในภาคเหนือโดยเฉพาะในปี ค.ศ. 2023 สะท้อนว่าหลายจังหวัดในภาคเหนือมีค่าความเข้มข้น PM_{2.5} สูงและมี

จังหวัดข้างเคียงที่มีค่าฝุ่นสูงเช่นเดียวกัน ซึ่งสัมพันธ์กับการเกิดไฟฟ้าและการเผาชีวมวลทางการเกษตรในช่วงฤดูแล้งประกอบกับลักษณะภูมิประเทศแบบแอ่งกระทะและแนวเทือกเขาสูงของภาคเหนือที่ส่งผลให้การระบายอากาศทำได้จำกัด โดยเฉพาะในช่วงที่บรรยากาศมีเสถียรภาพสูง ความเร็วลมต่ำ ทำให้ฝุ่นละอองสามารถสะสมตัวใกล้ผิวพื้นได้เป็นเวลานาน นอกจากนี้ยังได้รับอิทธิพลจากการพัดพาฝุ่นข้ามพรมแดนจากประเทศเพื่อนบ้านในภูมิภาคกลุ่มน้ำโขง ซึ่งส่งผลให้ค่าฝุ่น $PM_{2.5}$ ในช่วงเดือนมีนาคมถึงเมษายนเพิ่มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง

ในภาคตะวันออกเฉียงเหนือและภาคกลาง พบค่าความเข้มข้นของ $PM_{2.5}$ ต่ำกว่าภาคเหนือแต่ยังพบรูปแบบการเพิ่มขึ้นของค่าฝุ่นในช่วงเวลาเดียวกัน ซึ่งเกี่ยวข้องกับการเผาเศษวัสดุทางการเกษตร การคมนาคม และการสะสมของมลพิษภายใต้สภาพอากาศปิดในช่วงฤดูหนาว โดยเฉพาะภาคกลางที่ได้รับอิทธิพลจากกิจกรรมในเขตเมืองและอุตสาหกรรมขนาดใหญ่ร่วมด้วย ขณะที่ในช่วงเดือนมีนาคมถึงเมษายนอาจได้รับผลจากการพัดพาฝุ่นจากภาคเหนือร่วมกับการเผาในพื้นที่เกษตรกรรมภายในภูมิภาค ส่งผลให้เกิดการสะสมของ $PM_{2.5}$ เพิ่มขึ้นอีกระลอกหนึ่ง

ในทางตรงกันข้ามพื้นที่กลุ่ม Low-Low พบเด่นชัดในภาคใต้และบางจังหวัดในภาคตะวันออกเฉียงเหนือโดยเฉพาะในช่วง 3 ปีหลัง ซึ่งสะท้อนถึงระดับความเข้มข้น $PM_{2.5}$ ที่ต่ำและมีพื้นที่ข้างเคียงที่มีค่าฝุ่นต่ำเช่นเดียวกัน เนื่องมาจากอิทธิพลของลมมรสุมความชื้นสัมพัทธ์สูง และการอยู่ใกล้ทะเลที่ช่วยเพิ่มการระบายอากาศและลดการสะสมของฝุ่นละอองในบรรยากาศ รวมถึงมีแหล่งกำเนิดมลพิษจากการเผาชีวมวลและไฟป่าน้อยกว่าภูมิภาคอื่นของประเทศ ส่งผลให้รูปแบบการกระจายของ $PM_{2.5}$ ในภาคใต้มีความผันผวนน้อยและไม่เกิดการกระจุกตัวของฝุ่นในระดับสูงเหมือนภาคเหนือ



ภาพที่ 3 ความสัมพันธ์เชิงพื้นที่ของฝุ่น $PM_{2.5}$ ระหว่างพื้นที่จังหวัด

สรุปและอภิปรายผล

ในประเทศไทยในช่วงปี ค.ศ. 2020 ถึง 2024 พบว่าค่าเฉลี่ยรายปีของ $PM_{2.5}$ มีแนวโน้มลดลงในช่วงปี ค.ศ. 2020 ถึง 2022 จากนั้นเพิ่มขึ้นในปี ค.ศ. 2023 และ 2024 โดยมี ค.ศ. 2023 พบว่าประเทศไทยมีค่าเฉลี่ยรายปีของ $PM_{2.5}$ เท่ากับ $25.5 \mu g/m^3$ (SD. = 19.4) โดย $PM_{2.5}$ มีปริมาณสูงในช่วงเดือนมกราคมถึงเมษายนของทุกปี และเมื่อพิจารณาในระดับภูมิภาคในช่วง 5 ปีที่ผ่านมาพบว่าเกือบทุกจังหวัดในภาคเหนือมีความหนาแน่นของฝุ่น $PM_{2.5}$ สูง โดยเฉพาะช่วงเดือนมีนาคมถึง

เมษายน ค.ศ. 2023 ซึ่งอาจสัมพันธ์กับการเผาชีวมวล การเกิดไฟฟ้า (Wiriya et al., 2023) [14], (Pollution Control Department, 2023) [15] ประกอบกับลักษณะภูมิประเทศของภาคเหนือมีลักษณะเป็นภูเขาและแอ่งกระทะอาจส่งผลต่อการระบายของอากาศและอาจทำให้มีการสะสมของฝุ่นละอองในระดับสูง สำหรับภาคกลางในช่วงเดือนพฤศจิกายนถึงธันวาคม ค.ศ. 2023 อาจเกี่ยวข้องกับการสะสมของฝุ่น $PM_{2.5}$ จากสภาวะบรรยากาศปิดในช่วงฤดูหนาวซึ่งส่งผลให้การระบายอากาศลดลง ขณะที่ช่วงเดือนมีนาคมถึงเมษายนอาจได้รับอิทธิพลจากการเผาในพื้นที่เกษตรกรรมทั้งภายในภาคกลางและการพัดพาฝุ่นจากภาคเหนือส่งผลให้ค่าฝุ่น $PM_{2.5}$ เพิ่มสูงขึ้นอีกระลอกหนึ่ง นอกจากนี้ลักษณะพื้นที่เมืองและเขตอุตสาหกรรมขนาดใหญ่ในภาคกลางยังอาจเป็นแหล่งกำเนิดมลพิษสำคัญที่ส่งผลต่อรูปแบบการสะสมของ $PM_{2.5}$ ในภูมิภาคนี้ (Amnuaylojaroen et al., 2023) [8] ในขณะที่จังหวัดในภาคใต้ที่มีสถานีดตรวจวัดฝุ่น $PM_{2.5}$ พบว่ามีความหนาแน่นของฝุ่น $PM_{2.5}$ ต่ำและพื้นที่ข้างเคียงก็มีความหนาแน่นของฝุ่นดังกล่าวในระดับต่ำด้วยเช่นกัน

ผลการศึกษานี้พบว่า $PM_{2.5}$ สูงในปี ค.ศ. 2023 และ 2024 สอดคล้องกับข้อมูลจากเว็บไซต์ IQAir (IQAir, 2024) [16] ระบุว่าประเทศไทยมีปัญหามลพิษทางอากาศโดยเฉพาะ $PM_{2.5}$ ซึ่งมีค่าเฉลี่ยรายปีสูงกว่าค่ามาตรฐานที่องค์การอนามัยโลกกำหนด (Pollution Control Department, 2025) [9] ซึ่งสะท้อนถึงการเพิ่มขึ้นของเกิดมลพิษทางอากาศและการสะสมของฝุ่นละอองซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของเกวลิน อินลิวง และคณะ (2022) ที่รายงานว่าภาคเหนือตอนบนมีจำนวนจุดความร้อนสะสมสูงในช่วงเดือนมีนาคมถึงเมษายน ซึ่งเป็นช่วงวิกฤตของปัญหาหมอกควันและสัมพันธ์กับการเพิ่มขึ้นของค่าความเข้มข้น $PM_{2.5}$ ในระดับที่ส่งผลกระทบต่อสุขภาพ ($>55.5 \mu g/m^3$) อย่างต่อเนื่อง (IQAir, 2024) [16] นอกจากนี้การศึกษาดังกล่าวยังพบว่าความเร็วลมที่ลดลงและการขาดฝนมีความสัมพันธ์กับการสะสมของ $PM_{2.5}$ ขณะที่เมื่อมีปริมาณน้ำฝนเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้จำนวนจุดความร้อนและค่าความเข้มข้น $PM_{2.5}$ ลดลงอย่างชัดเจน (Inlaung et al., 2022) [17] และการศึกษาของกฤษฎาธร ทรัพย์อุไรรัตน์ และคณะ (2020) ที่ได้ทำการศึกษาในปี ค.ศ. 2014 ถึง 2018 พบว่าช่วงฤดูแล้งจะมีปริมาณฝุ่น $PM_{2.5}$ มากกว่าช่วงฤดูฝน ภาคเหนือพบค่า $PM_{2.5}$ ที่สูงที่สุด (Sapuirat et al., 2020) [18]

อย่างไรก็ตามจุดสำคัญของการศึกษานี้คือการวิเคราะห์ข้อมูล $PM_{2.5}$ ในระดับจังหวัดครอบคลุมทุกภูมิภาคของประเทศไทยอย่างต่อเนื่องตลอดระยะเวลา 5 ปี ร่วมกับการประยุกต์ใช้การวิเคราะห์เชิงพื้นที่ทั้งในระดับภาพรวมและระดับพื้นที่ โดยใช้สถิติ Moran's I และ LISA พิจารณาจังหวัดที่มีขอบเขตหรือจุดมุมติดกันเป็นพื้นที่เพื่อนบ้าน ส่งผลให้สามารถตรวจจับการกระจุกตัวของค่าฝุ่น $PM_{2.5}$ ระหว่างจังหวัดที่อยู่ใกล้เคียงกันช่วยให้สามารถระบุรูปแบบการกระจุกตัวของ $PM_{2.5}$ ได้อย่างชัดเจนมากขึ้น นอกจากนี้ยังสามารถแสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงของรูปแบบการกระจุกตัวของ $PM_{2.5}$ ในแต่ละปี ซึ่งเป็นข้อมูลสำคัญต่อการเฝ้าระวังและการจัดการมลพิษทางอากาศ

จากผลการวิเคราะห์สหสัมพันธ์ในตัวในการศึกษานี้พบว่าการกระจายของฝุ่น $PM_{2.5}$ ในระดับจังหวัดในปี ค.ศ. 2024 มีการกระจายแบบเกาะกลุ่มมากที่สุด (Global Moran's I = 0.66, 95% CI: 0.29, 0.99) สอดคล้องกับการศึกษาของ Wiriya และคณะ (2023) ซึ่งระบุว่าฝุ่น $PM_{2.5}$ ในพื้นที่ภาคเหนือของประเทศไทยเพิ่มสูงขึ้นในช่วงเดือนมกราคมถึงเมษายนของทุกปี เนื่องจากการเผาในที่โล่งการเผาเศษวัสดุทางการเกษตรและลักษณะภูมิประเทศแบบแอ่งกระทะที่ทำให้การกระจายตัวของมลพิษลดลง (Wiriya et al., 2023) [14] อย่างไรก็ตามผลการศึกษานี้ยังสอดคล้องกับการศึกษาของ Yawen Zhao (2025) ที่ประเมินการเปลี่ยนแปลงและปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อความเข้มข้นของฝุ่น $PM_{2.5}$ ในเขตเมืองกลุ่มปักกิ่ง-เทียนจิน-เหอเป่ย์ ในช่วงปี ค.ศ. 2014 ถึง 2024 ซึ่งพบว่าการกระจายตัวของฝุ่น $PM_{2.5}$ มีความสัมพันธ์เชิงพื้นที่สูงซึ่งหมายความว่าพื้นที่ที่มีค่ามลพิษสูงมักจะอยู่ใกล้กัน (ปี ค.ศ. 2024 Global Moran's I = 0.66) (Zhao, 2025) [19]

จากการศึกษานี้พบว่าภาคเหนือมีค่าฝุ่น $PM_{2.5}$ สูงสุด โดยเฉพาะในช่วงเดือนมกราคมถึงเมษายนของทุกปี ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาของ Wiriya และคณะ (2023) ที่รายงานว่าพื้นที่ภาคเหนือมีแนวโน้มเกิดกลุ่มฝุ่นสะสมสูงช่วงต้นปี เนื่องจากลักษณะภูมิประเทศแอ่งกระทะและอิทธิพลของมวลอากาศเย็นจากจีน (Wiriya et al., 2023) [14] และยังพบว่า

ระดับ $PM_{2.5}$ มีการเปลี่ยนแปลงตามฤดูกาลอย่างชัดเจนสอดคล้องกับการศึกษาของ Tuo Shi และคณะ (2024) ที่ศึกษา รูปแบบการกระจายเชิงพื้นที่ของ $PM_{2.5}$ ในเขตมหานครเส้นหยาง ประเทศจีน ปี ค.ศ. 2020 โดยพบความเข้มข้นของ $PM_{2.5}$ สูงสุดในฤดูหนาว (Shi et al., 2024) [20] จากรายงานสถานการณ์และการจัดการปัญหามลพิษทางอากาศและเสียงของกรมควบคุมมลพิษ กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม ประเทศไทย ระบุว่าฝุ่น $PM_{2.5}$ ในพื้นที่ภาคเหนือของประเทศไทยจะเกิดขึ้นเป็นประจำทุกปีในช่วงเดือนมกราคมถึงเมษายนของทุกปี และในปี ค.ศ. 2023 มีปัญหาจากไฟป่าและหมอกควันในตอนบนของประเทศไทย ในส่วนของภาคใต้พบว่ามีความผันผวนน้อยที่สุดตลอดช่วงการศึกษา ซึ่งเป็นผลมาจากลักษณะภูมิอากาศแบบมรสุมที่มีฝนตกค่อนข้างสม่ำเสมอ ความชื้นสัมพัทธ์สูง และการถ่ายเทอากาศจากอิทธิพลของลมทะเล ส่งผลให้ฝุ่นละอองมีปริมาณสะสมน้อยกว่าภูมิภาคอื่น สอดคล้องกับรายงานสถานการณ์และการจัดการปัญหามลพิษทางอากาศและเสียงของประเทศไทย ปี ค.ศ. 2023 ที่ระบุว่าภาคใต้มีคุณภาพอากาศอยู่ในเกณฑ์ดีอย่างต่อเนื่อง (Pollution Control Department, 2023) [7]

นอกจากนี้ภาคเหนือมีค่าฝุ่น $PM_{2.5}$ สูงที่สุดอย่างต่อเนื่องเป็นผลจากการเผาชีวมวล ไฟป่า และลักษณะภูมิประเทศแบบแอ่งกระทะที่เอื้อต่อการสะสมของมลพิษทางอากาศ (Wiriya et al., 2023) [14], (Inlaung et al., 2022) [17] ขณะที่ภาคกลางได้รับอิทธิพลจากการคมนาคม การขยายตัวของเมือง และกิจกรรมอุตสาหกรรมร่วมกับการเผาในภาคเกษตรกรรม ส่วนภาคใต้มีค่าฝุ่นต่ำที่สุด ซึ่งเป็นผลจากอิทธิพลของลมมรสุม ปริมาณฝนที่สูง และการถ่ายเทอากาศที่ดีจากการอยู่ใกล้ทะเล (Pollution Control Department, 2023) [7] แนวโน้มการเพิ่มขึ้นของ $PM_{2.5}$ ในปี ค.ศ. 2023 และ 2024 มีความสัมพันธ์กับอิทธิพลของปรากฏการณ์เอลนีโญ ซึ่งส่งผลให้หลายพื้นที่ของประเทศไทยมีปริมาณฝนลดลงและสภาพอากาศแห้งแล้งมากขึ้นเอื้อต่อการเกิดไฟป่าและการสะสมของฝุ่นละอองขณะที่ปี ค.ศ. 2022 ซึ่งมีค่าความเข้มข้น $PM_{2.5}$ ลดลงในหลายภูมิภาค สัมพันธ์กับอิทธิพลของปรากฏการณ์ลานีญา ที่ทำให้มีปริมาณฝนเพิ่มขึ้นและช่วยลดการสะสมของมลพิษทางอากาศในบรรยากาศได้มากขึ้น สอดคล้องกับรายงานขององค์การอุตุนิยมวิทยาโลก (World Meteorological Organization: WMO) ที่ระบุว่าช่วงปี ค.ศ. 2020 ถึง 2022 โลกอยู่ภายใต้อิทธิพลของลานีญาต่อเนื่องส่งผลให้หลายพื้นที่ในเอเชียตะวันออกเฉียงใต้มีปริมาณฝนสูงกว่าค่าเฉลี่ยขณะที่ในปี ค.ศ. 2023 ได้เกิดปรากฏการณ์เอลนีโญ ซึ่งส่งผลให้สภาพอากาศร้อนและแห้งแล้งมากขึ้นในหลายประเทศรวมถึงประเทศไทย (World Meteorological Organization, 2023) [21], (World Meteorological Organization, 2023) [22]

จากปัจจัยด้านอุตุนิยมวิทยาและลักษณะภูมิประเทศแล้ว ความแตกต่างของแหล่งกำเนิดมลพิษในแต่ละภูมิภาคยังเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อรูปแบบการกระจายของฝุ่น $PM_{2.5}$ ในประเทศไทย โดย $PM_{2.5}$ สามารถเกิดได้ทั้งจากแหล่งกำเนิดโดยตรง (Primary $PM_{2.5}$) และเกิดจากกระบวนการทางเคมีในบรรยากาศ (Secondary $PM_{2.5}$) (Brook et al., 2010) [2], (Pope & Dockery, 2006) [4]

สำหรับ $PM_{2.5}$ จากแหล่งกำเนิดโดยตรงส่วนใหญ่เกิดจากกระบวนการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวล การเผาเศษวัสดุทางการเกษตร ไฟป่า การคมนาคมขนส่ง และกิจกรรมอุตสาหกรรม ซึ่งเป็นแหล่งกำเนิดที่สำคัญของประเทศไทย โดยเฉพาะในภาคเหนือและภาคตะวันออกเฉียงเหนือที่มีการเผาในพื้นที่เกษตรกรรมและไฟป่าเป็นจำนวนมากในช่วงฤดูแล้ง ส่งผลให้เกิดอนุภาคคาร์บอนขนาดเล็ก (Black Carbon และ Organic Carbon) ในปริมาณสูง (Wiriya et al., 2023) [14], (Inlaung et al., 2022) [17] ในขณะที่ภาคกลางโดยเฉพาะพื้นที่เขตเมืองและอุตสาหกรรมขนาดใหญ่ เช่น กรุงเทพมหานครและปริมณฑล แหล่งกำเนิด $PM_{2.5}$ ที่สำคัญมักมาจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงฟอสซิลจากยานพาหนะ โรงงานอุตสาหกรรม และโรงไฟฟ้า ซึ่งปลดปล่อยทั้งฝุ่นละอองโดยตรงและก๊าซมลพิษ เช่น ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO_2) ไนโตรเจนออกไซด์ (NO_x) และแอมโมเนีย (NH_3) ที่สามารถเปลี่ยนแปลงทางเคมีในบรรยากาศกลายเป็นฝุ่นละอองทุติยภูมิ (Secondary $PM_{2.5}$) ได้ (Zhao, 2025) [19] นอกจากนี้ยังมีแหล่งกำเนิดเชิงกล (Mechanical Sources) เช่น ฝุ่นจากการก่อสร้าง การสึกหรอของผิวถนน การสีก่อร่อนของ

ยางรถยนต์ และการพังกระเจาของฝุ่นดินจากพื้นที่โล่ง ซึ่งแม้จะเป็นแหล่งกำเนิดหลักของฝุ่นหยาบ (PM_{10}) แต่สามารถก่อให้เกิดอนุภาคนาขนาดเล็กที่อยู่ในช่วง $PM_{2.5}$ ได้เช่นกัน โดยเฉพาะในพื้นที่เมืองที่มีความหนาแน่นของการจราจรสูง

ผลการศึกษาที่พบการกระจุกตัวของ $PM_{2.5}$ ในภาคเหนือและภาคกลางสะท้อนอิทธิพลร่วมกันของแหล่งกำเนิดหลายประเภท โดยภาคเหนือได้รับอิทธิพลจากการเผาชีวมวลและไฟป่าเป็นหลัก ขณะที่ภาคกลางได้รับอิทธิพลจากการคมนาคมและกิจกรรมอุตสาหกรรมร่วมกับการสะสมของมลพิษภายใต้สภาวะอากาศปิดในช่วงฤดูหนาว ส่งผลให้เกิดรูปแบบการกระจุกตัวเชิงพื้นที่ของ $PM_{2.5}$ อย่างชัดเจนในหลายจังหวัดที่มีลักษณะพื้นที่ใกล้เคียงกัน

ข้อจำกัดของการศึกษานี้คือการศึกษานี้มุ่งเน้นที่การพรรณนาปริมาณฝุ่น $PM_{2.5}$ การกระจายและความสัมพันธ์ของปริมาณฝุ่น $PM_{2.5}$ ระหว่างพื้นที่ระดับจังหวัดโดยไม่ได้นำปัจจัยอื่น ๆ เช่น ปัจจัยทางเศรษฐกิจ พื้นที่ทางการเกษตรหรือเขตอุตสาหกรรม เป็นต้น มาร่วมพิจารณาด้วย ผลจากการศึกษานี้อาจเป็นข้อมูลสนับสนุนในการวางแผนมาตรการควบคุมมลพิษทางอากาศ การเฝ้าระวังสุขภาพประชาชน และการกำหนดนโยบายด้านสิ่งแวดล้อมของประเทศไทยในอนาคตได้

ฝุ่น $PM_{2.5}$ ในประเทศไทยมีปริมาณสูงในช่วงเดือนมกราคมถึงเมษายนของทุกปี และยังพบว่ามีความเข้มข้นของฝุ่น $PM_{2.5}$ รายปีของประเทศไทยยังคงมีปริมาณที่สูง โดยเฉพาะพื้นที่ภาคเหนือมีความหนาแน่นของฝุ่น $PM_{2.5}$ สูงเกือบทุกจังหวัด ขณะที่ภาคใต้มีค่าฝุ่นโดยเฉลี่ยรายปีต่ำที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับภูมิภาคอื่น ๆ

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณกรมควบคุมมลพิษ กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อมสำหรับข้อมูลดำเนินการวิจัย

เอกสารอ้างอิง

- [1] World Health Organization. (2021). *WHO global air quality guidelines: Particulate matter ($PM_{2.5}$ and PM_{10}), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide*. World Health Organization. <https://www.who.int/publications/i/item/9789240034228>
- [2] Brook, R. D., Rajagopalan, S., Pope III, C. A., Brook, J. R., Bhatnagar, A., Diez-Roux, A. V., Holguin, F., Hong, Y., Luepker, R. V., Mittleman, M. A., Peters, A., Siscovick, D. S., Smith Jr., S. C., Whitset, L., and Kaufman, J. D. (2010). Particulate matter air pollution and cardiovascular disease: An update to the scientific statement from the American Heart Association. *Circulation*, 121(21), 2331-2378.
- [3] Lelieveld, J., Evans, J. S., Fnais, M., Giannadaki, D., and Pozzer, A. (2015). The contribution of outdoor air pollution sources to premature mortality on a global scale. *Nature*, 525(7569), 367-371. <https://doi.org/10.1038/nature15371>
- [4] Pope, C. A., 3rd, and Dockery, D. W. (2006). Health effects of fine particulate air pollution: lines that connect. *Journal of the Air and Waste Management Association*, 56(6), 709-742. <https://doi.org/10.1080/10473289.2006.10464485>
- [5] Vadrevu, K. P., Lasko, K., Giglio, L., Schroeder, W., and Biswas, S. (2019). Trends in vegetation fires in South and Southeast Asian countries. *Scientific Reports*, 9(1), Article 7422. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-43940-4>

- [6] Zhao, B., Wang, P., Ma, J. Z., Zhu, S., Pozzer, A., and Li, W. (2013). A high-resolution emission inventory of primary pollutants for the Huabei region, China. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 13(9), 4511-4527. <https://doi.org/10.5194/acp-13-4511-2013>
- [7] Pollution Control Department. (2023). *Air quality monitoring and forecasting in Thailand*. Pollution Control Department. Retrieved February 1, 2025, from <https://air4thai.pcd.go.th/>
- [8] Amnuaylojaroen, T., Kaewkanchanawong, P., and Panpeng, P. (2023). Distribution and meteorological control of PM_{2.5} and its effect on visibility in Northern Thailand. *Atmosphere*, 14(3), Article 538.
- [9] Pollution Control Department. (2025). Regional air quality reports. <http://air4thai.com/webV3/#/Home>
- [10] Humanitarian Data Exchange. (2022). *Thailand - Subnational administrative boundaries*. Humanitarian Data Exchange. Retrieved February 1, 2025, from <https://data.humdata.org/dataset/cod-ab-tha>
- [11] R Core Team. (2024). *R: A language and environment for statistical computing*. R Foundation for Statistical Computing. <https://www.r-project.org/>
- [12] Posit Team. (2025). *RStudio: Integrated development environment for R*. Posit Software, PBC. <https://posit.co/>
- [13] Bivand, R., and Wong, D. W. S. (2018). Comparing implementations of global and local indicators of spatial association. *TEST*, 27(3), 716-748.
- [14] Wiriya, W., Pani, S. D., Khamkaew, C., Chantara, C., Wangpakapattanawong, S., and Chantara, S. (2023). Characteristics and sources of PM_{2.5} in Northern Thailand during haze episodes. *Atmospheric Environment*, 301, Article 119679. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2023.119679>
- [15] Pollution Control Department. (2023). Thailand air and noise pollution situation and management report 2023. Ministry of Natural Resources and Environment.
- [16] IQAir. (2024). *Thailand air quality*. IQAir. Retrieved February 1, 2025, from <https://www.iqair.com/us/thailand>
- [17] Inlaung, K., Chotamonsak, C., Surapipith, V., and Macatangay, R. (2022). Relationship of fire hotspot, PM_{2.5} concentrations, and surrounding areas in upper northern Thailand: A case study of haze season in 2019. *Journal of King Mongkut's University of Technology North Bangkok*, 33(2). <http://ojs.kmutnb.ac.th/index.php/kjournal/article/view/4760>
- [18] Sapuairat, K., and Banchongsiri, K. (2020). Quantitative relationship of particulate matter less than 10 microns (PM₁₀) and particulate matter less than 2.5 microns (PM_{2.5}) across regions and seasons. *HCU Journal of Science and Technology*, 6(1), 94-103.
- [19] Zhao, Y. (2025). *PM_{2.5} prediction and its influencing factors in the Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration using spatial temporal graph convolutional networks*. Environmental Research Communications.
- [20] Shi, T., Zhang, Y., Yuan, X., Li, F., and Yan, S. (2024). Spatial patterns and determinants of PM_{2.5} concentrations: A land use regression analysis in Shenyang metropolitan area, China. *Sustainability*, 16(12), Article 5119. <https://doi.org/10.3390/su16125119>

[21] World Meteorological Organization. (2023). WMO update: Prepare for El Niño conditions.

<https://wmo.int/news/media-centre/wmo-update-prepare-el-nino>

[22] World Meteorological Organization. (2023). State of the global climate 2023.

<https://wmo.int/publication-series/state-of-global-climate-2023>