

Research article

สถานการณ์และพฤติกรรมเชิงเวลาของมลภาวะทางอากาศ โดยแบบจำลอง ARIMA Model:

กรณีศึกษาจังหวัดเชียงใหม่

A Situation and Temporal Behaviors of Air Pollution by ARIMA Model:

A Case Study of Chiang Mai

นิกร มหาวาน¹ วันเพ็ญ เจริญตระกูลปิติ^{2*} ณัฏฐกิตติ นบโนบ³

Nikorn Mahawan¹ Wanpen Charoentrakulpeeti^{2*} Natthakit Knobnob³

Received: 25 January 2024 | Revised: 01 April 2024 | Accepted: 05 April 2024

<https://doi.org/10.55003/acaad.2024.268045>

บทคัดย่อ

ปัญหาหมอกควันที่เกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องได้กลายเป็นปัญหาใหญ่ในภูมิภาคต่าง ๆ ส่งผลกระทบต่อคุณภาพอากาศ สุขภาพของมนุษย์ และความเป็นอยู่ที่ดีของสิ่งแวดล้อมโดยรวม การศึกษานี้มุ่งเน้นไปที่กรณีของเมืองเชียงใหม่ที่เกิดปัญหาหมอกควันอย่างต่อเนื่อง งานวิจัยนี้พยายามที่จะได้พบทวนสถานการณ์และวิเคราะห์พฤติกรรมเชิงเวลาของมลภาวะทางอากาศเพื่อโอกาสในการแก้ไขปัญหาหมอกควันในจังหวัดเชียงใหม่อย่างมีประสิทธิภาพ โดยใช้เครื่องมือทางสถิติ ARIMA ในการวิเคราะห์ข้อมูลด้านมลภาวะทางอากาศ ซึ่งบันทึกในช่วงปี พ.ศ. 2539 - 2565 ณ สถานีตรวจวัดโรงเรียนยุพราชวิทยาลัย ของกรมควบคุมมลพิษ ผลการศึกษาพบว่า ค่าเฉลี่ยรายวันฝุ่นละออง (PM_{10} และ $PM_{2.5}$) มีการเคลื่อนไหวในปริมาณสูงในช่วงเดือนมกราคมถึงเดือนเมษายน ส่วนค่าเฉลี่ยรายวันก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ในช่วงเดือนมกราคมถึงเดือนเมษายนมีการเคลื่อนไหวในปริมาณน้อยลง ในขณะที่การพยากรณ์ในระยะสั้น สรุปได้ว่าค่ามลภาวะในพื้นที่ PM_{10} , $PM_{2.5}$, SO_2 , NO_2 , และ O_3 มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ในส่วนของพฤติกรรมเปลี่ยนแปลงของมลภาวะทางอากาศในพื้นที่ พบค่าเฉลี่ย CO ต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ที่ระดับ 0.01 โดยวันศุกร์มีการปล่อย CO โดยเฉลี่ยมากที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับวันทำงานอื่นและวันหยุด หากพิจารณาถึงช่วงเวลา พบว่า ปริมาณ CO สูงในช่วงเวลาเร่งด่วนโดยสูงสุดในช่วงเย็น รองลงมา คือเวลาช่วงเช้า และเวลาช่วงเที่ยง ตามลำดับ ลักษณะดังกล่าวบ่งชี้ถึงแนวทางมาตรการแก้ไขปัญหาควรให้ความสำคัญกับช่วงเวลาในการดำเนินงานที่

¹ สาขาวิชาการวางผังเมืองและสภาพแวดล้อม คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์และการออกแบบสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยแม่โจ้

Program in Environmental and Urban Planning, Faculty of Architecture and Environmental Design, Maejo University

² ภาควิชาภูมิศาสตร์ คณะสังคมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

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

³ สาขาวิชาการวางแผนชุมชนเมืองและสภาพแวดล้อม คณะสถาปัตยกรรม ศิลปะและการออกแบบ

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

Program in Urban and Environmental Planning, School of Architecture, Art, and Design,

King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang

*ผู้ติดต่อประสานงาน อีเมล: wanpen.c@cmu.ac.th

เหมาะสมกับช่วงเวลาเกิดของปัญหามลภาวะทางอากาศที่มีอิทธิพลต่อการลดและบรรเทาปริมาณมลภาวะทางอากาศได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด

คำสำคัญ: มลภาวะทางอากาศ สถานการณ์ปัญหาหมอกควัน พฤติกรรมเชิงเวลาของมลภาวะทางอากาศ

Abstract

The persistent issue of haze has become a paramount concern in various regions, impacting air quality, human health, and overall environmental well-being. This study focuses on the case of Chiang Mai, a city prone to recurrent haze times. This research reviews haze situation and its temporal behaviors to propose successive opportunities for effectively addressing the haze problem in Chiang Mai, encompassing both short-term mitigation measures and long-term sustainable strategies by applying haze data from 1996 to 2022 derived from Yupparaj school ground-based station recorded by Pollution Control Department (PCD) for analyzing the ARIMA statistics. According to the study's findings, the daily averages of PM_{10} and $PM_{2.5}$ move greatly from January to April. There is a minor change in the daily average carbon monoxide (CO) between January and April. Although short-term projections in light of the area's pollution levels, it may be indicated that PM_{10} , $PM_{2.5}$, SO_2 , NO_2 , and O_3 will likely increase, regarding the local pollution's changing behavior. When compared to other working days and weekends, it was discovered that the average CO values were significantly different at the 0.01 level, with Friday having the highest average CO emissions. Considering the timing, it was discovered that the CO_2 levels were at their highest during rush hour, peaking in the evening and then the morning and noon periods, respectively. These characteristics indicate that measures taken to address this problem should concentrate on operating at a time that is relevant to the time the air pollution arises as well as the influences reducing and mitigating the level of air pollution greatest efficiency.

Keywords: Air pollution, Haze problem situation, Temporal behavior of air pollution

1. บทนำ

ปัญหาหมอกควันในเชียงใหม่เริ่มตั้งแต่ปี พ.ศ. 2550 ที่พบค่า PM_{10} เฉลี่ย 24 ชั่วโมง สูงถึง 396.4 ไมโครกรัม/ลูกบาศก์เมตร (Kamton et al., 2019) และกลายเป็นปัญหาประจำฤดูกาลของจังหวัดเชียงใหม่ต่อเนื่องหลังจากนั้น โดยค่าดัชนีคุณภาพอากาศ (Air Quality Index: AQI) ในกรณีของประเทศไทยกำหนดค่าดัชนีคุณภาพอากาศออกเป็น 6 ระดับ ประกอบด้วย 1) 0-50 (คุณภาพดี) 2) 51-100 (คุณภาพปานกลาง) 3) 101-150 (มีผลกระทบต่อสุขภาพกลุ่มเสี่ยง) 4) 151-200 (มีผลต่อสุขภาพ) 5) 201-300 (มีผลต่อสุขภาพมาก) และ 6) 301 ขึ้นไป (อันตราย) จากรายงานของ Buathong, (2019) พบค่า AQI ในเมืองเชียงใหม่ที่สูงถึง 246 ซึ่งเป็นอันตรายต่อสุขภาพของประชากรที่อาศัยอยู่ในเมืองเชียงใหม่และแม้ว่าจะมีความพยายามแก้ไขปัญหามาจากภาครัฐอย่างต่อเนื่อง แต่สถานการณ์ยังคงไม่ดีขึ้นอย่างที่ควรจะเป็น (Buathong, 2019) ดังนั้นจึงมีความจำเป็นในการศึกษาทบทวนสถานการณ์และทำความเข้าใจต่อพฤติกรรมของการเกิดมลภาวะทางอากาศในเมืองเชียงใหม่ในภาพรวมที่จะนำไปสู่การแก้ไขปัญหาหมอกควันในพื้นที่เมืองเชียงใหม่ได้อย่างมีประสิทธิภาพต่อไป

จากข้อมูลที่ถูกบันทึกไว้ในวันที่ 29 มีนาคม 2563 ค่า $PM_{2.5}$ ของจังหวัดเชียงใหม่ อำเภอเชียงดาว มีค่าสูงถึง 360 ไมโครกรัม/ลูกบาศก์เมตร ติดอันดับ 1 ของโลก ขณะที่ในพื้นที่เมืองเชียงใหม่มีค่ามากกว่า 120 ไมโครกรัม/ลูกบาศก์เมตร (Siamrath online, 2020) และข้อมูลของกรมควบคุมมลพิษ ในสถานีตรวจวัดคุณภาพอากาศจังหวัดเชียงใหม่ ตำบลช้างเผือก อำเภอเมืองเชียงใหม่ ในวันที่ 6 เมษายน 2567 มีค่า $PM_{2.5}$ สูงถึง 131 156.5 ไมโครกรัม/ลูกบาศก์เมตร และที่ ตำบลศรีภูมิ อำเภอเมืองเชียงใหม่ วัดได้ถึง 163.9 114 ไมโครกรัม/ลูกบาศก์เมตร (Pollution Control Department, 2024) ค่า $PM_{2.5}$ ในเชียงใหม่พุ่งสูงเป็นอันดับหนึ่งของโลก หากพิจารณาถึงองค์ประกอบของมลภาวะทางอากาศ กล่าวได้ว่าเป็น องค์ประกอบที่หลากหลายที่มีความสัมพันธ์ระหว่างกัน และก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของสภาวะมลพิษในอากาศที่แตกต่างกัน ทั้งในรูปแบบและผลกระทบที่เกิดขึ้น Burrows (2018) ได้สรุปประสบการณ์ความพยายามแก้ไขปัญหามลภาวะทางอากาศ ของประเทศจีน ว่าการใช้กระบวนการแก้ไขปัญหามลพิษในอากาศด้วยวิธีการทางเคมีไม่สามารถทำได้สำเร็จตามเป้าหมาย เพราะในบรรยากาศประกอบด้วยหมอกและส่วนผสมหลักที่มีในหมอกประกอบด้วยไอโซน ในขณะที่ไอโซนกำเนิดขึ้นจากชุด ของปฏิกิริยาทางเคมีในบรรยากาศโดยเริ่มจากปฏิกิริยาการรวมตัวของออกซิเจนในสารระเหยอินทรีย์ (Volatile Organic Compounds: VOCs) กับสารชนิดอื่น ๆ เช่น SO_x หรือ NO_x ซึ่งออกไซด์ของ SO_x , NO_x และแสงอาทิตย์เป็นปัจจัยหลักในการขับเคลื่อนกระบวนการสร้างไอโซนที่พื้นผิวโลก ในขณะที่องค์ประกอบของมลพิษทางอากาศประกอบด้วยสารมลพิษหลัก จำนวน 6 ชนิด ได้แก่ ฝุ่นละออง (PM_{10}) สารตะกั่ว (Lead) ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO_2) ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ก๊าซ ไนโตรเจนไดออกไซด์ (NO_2) และ ก๊าซโอโซน (O_3) (United States Environmental Protection Agency: EPA, 2018) ดังนั้น การแก้ไขปัญหามลภาวะทางอากาศจำเป็นต้องเข้าใจในองค์ประกอบและแหล่งกำเนิดมลพิษ รวมถึงพฤติกรรม การเกิดขึ้นของมลภาวะอย่างชัดเจน ในขณะที่การแก้ไขปัญหามลภาวะทางอากาศต้องการมาตรการที่หลากหลายระดับในการ ดำเนินการร่วมกันจึงจะประสบความสำเร็จ

บทความนี้ได้ทบทวนสถานการณ์แนวโน้มภาวะมลภาวะทางอากาศที่เกิดขึ้นในเมืองเชียงใหม่ และการศึกษา พฤติกรรมเชิงเวลาของการเกิดปัญหามลภาวะทางอากาศในเมืองเชียงใหม่ เพื่อประกอบการอธิบายถึงความเป็นไปได้ในแนวทางการแก้ไขปัญหามลภาวะทางอากาศดังกล่าว อันจะนำไปสู่การแก้ปัญหาภาวะหมอกควันในเมืองเชียงใหม่ได้อย่างเป็น รูปธรรมมากยิ่งขึ้นต่อไป

2. วัตถุประสงค์การศึกษา

- 2.1 เพื่อทบทวนสถานการณ์แนวโน้มภาวะมลภาวะทางอากาศที่เกิดขึ้นในเมืองเชียงใหม่
- 2.2 เพื่อศึกษาพฤติกรรมเชิงเวลาของการเกิดปัญหามลภาวะทางอากาศในเมืองเชียงใหม่

3. แนวคิดและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

มลภาวะทางอากาศ เป็นการคุกคามทางสิ่งแวดล้อมที่รุนแรงต่อสุขภาพของทั่วโลก โดยองค์การควบคุมสิ่งแวดล้อม แห่งสหประชาชาติ (UNEP, 2023) ได้มีการประเมินว่ามีการตายก่อนวัยอันควรเกิดขึ้นถึง 7 ล้านคนทุกปี ทั้งนี้มลภาวะทาง อากาศมีความเชื่อมโยงกับการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศอย่างแยกไม่ออก เนื่องจากมลสารเป็นแหล่งที่มาของก๊าซเรือน กระจกเช่นเดียวกัน ในการปรับปรุงคุณภาพอากาศจะสร้างประโยชน์ต่อสภาพแวดล้อมและส่งเสริมสุขภาพ รวมถึงการพัฒนา มลพิษทางอากาศที่เป็นเรื่องข้ามพรมแดนให้ผู้มีส่วนได้ส่วนเสียทุกคนมีหน้าที่รับผิดชอบในการปกป้องชั้นบรรยากาศของโลก เพื่อรับประกันอากาศที่ดีต่อสุขภาพสำหรับทุกคน โดยความร่วมมือข้ามพรมแดนระหว่างภาคส่วนต่าง ๆ รวมถึงการ ดำเนินงาน ไม่ว่าจะเป็นหอดูดมลพิษทางอากาศ ยกระดับทางการเงินและการลงทุนไปสู่มาตรการและการแก้ปัญหาเพื่อสร้าง ผลดีต่อสุขภาพ (UNEP, 2024)

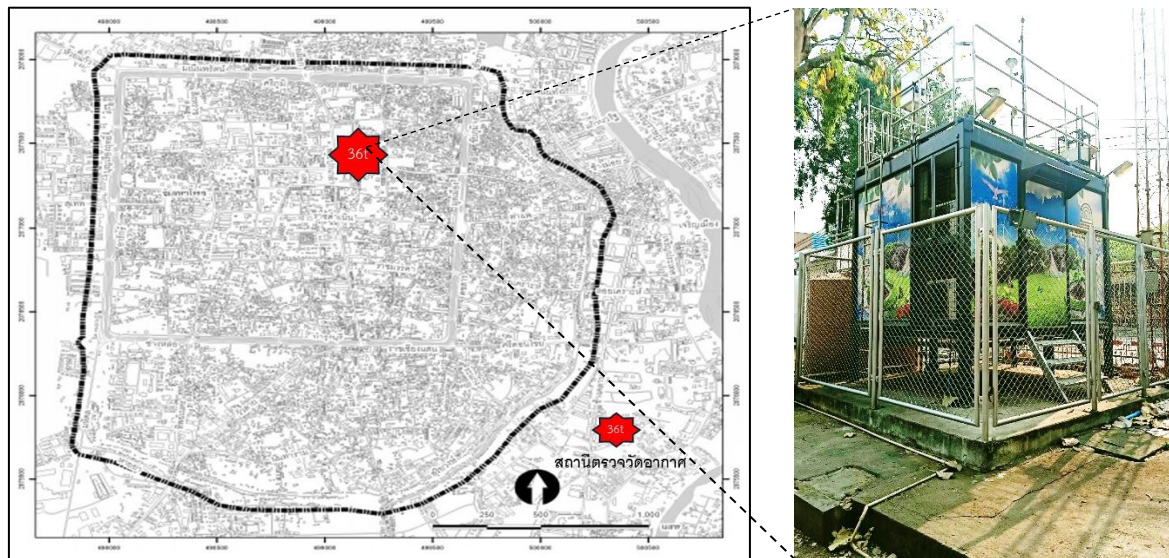
สาเหตุของมลภาวะทางอากาศเป็นผลจากการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกและอนุภาค รวมถึงปฏิกิริยาปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นในบรรยากาศตามธรรมชาติ อย่างไรก็ตาม ปัจจัยหลักที่เป็นสาเหตุของมลภาวะทางอากาศมีที่มาจากกิจกรรมของมนุษย์ ทั้งจากกิจกรรมเพื่อการอยู่อาศัย อุตสาหกรรม การขนส่ง การเกษตรกรรม และการจัดการของเสีย โดยพื้นที่เมืองซึ่งเป็นบริเวณที่มีผู้อยู่อาศัยหนาแน่นมากที่สุดเป็นพื้นที่สำคัญที่ส่งผลต่อการกระจายตัวของอนุภาคขนาดเล็ก (Wang et al., 2022) ในขณะที่มลภาวะทางอากาศมีความสัมพันธ์เชิงพื้นที่ โดยลักษณะการใช้ที่ดินเป็นปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อการกระจายตัวของอนุภาคขนาดเล็ก และมีความสัมพันธ์ระดับสูงต่อระดับคุณภาพของสิ่งแวดล้อมเมือง นอกจากนี้ ในการวางแผนการใช้ที่ดินจำเป็นต้องให้ความสำคัญต่อการอภิปรายปัจจัยด้านลักษณะภูมิประเทศ (Mun et al., 2022) หากพิจารณาถึงความอันตรายจากมลภาวะ กล่าวได้ว่าอนุภาคขนาดเล็ก ($PM_{2.5}$) และ โอโซนพื้นผิว สร้างผลกระทบอันตรายค่อนข้างสูง โดย อนุภาคขนาดเล็กสามารถทะลุปอดและปล่อยให้องค์ประกอบที่เป็นพิษเข้าสู่เส้นเลือด ในขณะที่ โอโซนพื้นผิว ทำความเสียหายต่อระบบนิเวศและสุขภาพของมนุษย์ การสัมผัสกับโอโซนพื้นผิวเป็นเหตุให้เกิดการตายก่อนวัยอันสมควรถึง 472,000 คนในทุกปี หากพิจารณาถึงผลกระทบทางเศรษฐกิจ จากมลภาวะทางอากาศต่อสุขภาพของโลกคิดเป็น 5.7 ล้านล้านเหรียญสหรัฐ หรือร้อยละ 4.8 ของ GDP โลก ซึ่งเป็นผลทางลบต่อสถานะทางเศรษฐกิจ ผลิตภาพ และการท่องเที่ยว (UNEP, N.D.)

หากพิจารณาถึงรูปแบบการกระจายตัวของมลภาวะในช่วง 24 ชั่วโมง พบว่ามีการเปลี่ยนแปลงในช่วงเวลาที่ต่างกัน โดยขึ้นอยู่กับแหล่งข้อมูล เช่น ไนโตรเจนออกไซด์ และโอโซนพื้นผิวจะมีจุดสูงสุดในช่วงเวลาเช้าและในช่วงเวลาเย็นในพื้นที่เมืองทั้งนี้สัมพันธ์กับปริมาณจราจรในช่วงเวลาเร่งด่วน (Bishop, 2023) รูปแบบดังกล่าวมีลักษณะในทิศทางเดียวกับการศึกษาในประเทศจีน จากข้อสรุปของ Kuerban et al. (2020) พบว่าความแปรผันของอนุภาคและก๊าซมลพิษรายวัน ($PM_{2.5}$, PM_{10} , SO_2 , CO , NO_2) ในประเทศจีน มี 2 รูปแบบ คือ พบจุดสูงสุดในช่วงเวลา 8.00-11.00 น. และ 21.00-24.00 น. ในขณะที่ Zhou, et al. (2022) พบว่ามีความสัมพันธ์ระดับสูงระหว่างการผลิตภาคอุตสาหกรรมกับระดับของมลภาวะทางอากาศ อย่างไรก็ตามแม้ว่าจะมีความพยายามควบคุมการผลิตภาคอุตสาหกรรมด้วยกฎหมายและระเบียบข้อบังคับที่หลากหลายแต่อนุภาคและก๊าซมลพิษยังคงมีค่าเฉลี่ยรายปีที่สูงกว่าค่ามาตรฐานที่กำหนด ดังนั้น การลดมลภาวะทางอากาศจึงต้องมีความพยายามอย่างสูงในการควบคุมการปล่อยก๊าซมลพิษจากทั้งภาคอุตสาหกรรมและการจราจรที่เกิดจากรถยนต์ส่วนตัวและรถบรรทุกหนัก

ในขณะที่การคาดการณ์แนวโน้มของชุดข้อมูลย้อนหลังที่เป็นพลวัตในระยะสั้นและระยะยาว เช่น ข้อมูลด้านอุตุนิยมวิทยา หรือสิ่งแวดล้อม กล่าวได้ว่าเป็นความท้าทาย วิธีการทางสถิติที่หลากหลาย โมเดลได้ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อการประมาณค่าแนวโน้มจากชุดข้อมูลอนุกรมเชิงเวลา ซึ่ง Autoregressive Integrated Moving Average (ARIMA Model) เป็นหนึ่งวิธีที่ได้รับความนิยมใช้ในการคาดการณ์ค่าในอนาคตของชุดข้อมูลอนุกรมเชิงเวลา (Jian Sun, 2021) ในขณะที่ โมเดลที่เสถียรและมีประสิทธิภาพ เช่น Long Short-Term Memory (LSTM), Convolutional LSTM (ConvLSTM), และ Multivariate Attention LSTM-FCN (MALSTM-FCN) ต้องการเวลาสำหรับประมวลผลเป็นเวลานานและไม่เหมาะกับการพยากรณ์ข้อมูลที่มีรูปแบบการเปลี่ยนแปลงเป็นระยะ ๆ (Wan et al., 2019) ARIMA จึงมีความเหมาะสมกับการคาดการณ์ข้อมูลเชิงเวลาที่มีการเปลี่ยนแปลงในระยะสั้นและสั้นปานกลางมากกว่า

4. ระเบียบวิธีการศึกษา

พื้นที่ศึกษา มุ่งเน้นพื้นที่ในย่านเมืองเก่าของเมืองเชียงใหม่ ตามประกาศคณะกรรมการอนุรักษ์และพัฒนากรุงรัตนโกสินทร์และเมืองเก่า เรื่อง ประกาศเขตพื้นที่เมืองเก่าเชียงใหม่ พ.ศ. 2553 ครอบคลุมพื้นที่ 5.5 ตารางกิโลเมตร (รูปที่ 1) ซึ่งเป็นศูนย์กลางการพัฒนาของเมืองเชียงใหม่มาตั้งแต่สถาปนาเมืองเชียงใหม่ในปี พ.ศ. 1839 ถึงปัจจุบัน และเป็นพื้นที่ที่มีการใช้ที่ดินประเภทที่พักอาศัยและพาณิชยกรรมที่มีความหนาแน่นสูง



รูปที่ 1 เขตพื้นที่เมืองเก่าเชียงใหม่และตำแหน่งสถานีตรวจวัดคุณภาพอากาศ

Figure 1 The boundary of Chiang Mai's old town and the location of air-monitoring station.

ที่มา: ประกาศคณะกรรมการอนุรักษ์และพัฒนากรุงรัตนโกสินทร์และเมืองเก่า เรื่องประกาศเขตพื้นที่เมืองเก่าเชียงใหม่ พ.ศ. 2553

Source: Announcement of the Rattanakosin and Old City Preservation and Development Committee regarding the Announcement of Chiang Mai Old City Area, B.E. 2553 (2010).

การวิเคราะห์ทางสถิติเป็นเครื่องมือพื้นฐานในการวิเคราะห์ชุดข้อมูลมลภาวะทางอากาศเชิงเวลา โดยในการศึกษานี้ ต้องการข้อมูลมลพิษทางอากาศที่มีการบันทึกย้อนหลังอย่างต่อเนื่องในช่วงปี พ.ศ. 2539 - 2565 ซึ่งพบว่าในพื้นที่เมืองเชียงใหม่มีสถานีตรวจอากาศเพียงแห่งเดียวของกรมควบคุมมลพิษ คือ สถานีที่ 36t โรงเรียนยุพราชวิทยาลัย ตั้งอยู่ที่ตำบลศรีภูมิ อำเภอเมือง จังหวัดเชียงใหม่ ได้ดำเนินการบันทึกข้อมูลด้วยเครื่องมือตรวจวัดคุณภาพอากาศและเครื่องมือตรวจวัดทางอุตุนิยมวิทยา ในรูปแบบ System Audit สถานีฯ สูงจากระดับพื้นผิว 6 เมตร อย่างไรก็ตาม การเข้าถึงข้อมูลมลภาวะทางอากาศยังมีข้อจำกัด โดยเฉพาะในประเทศที่มีรายได้ระดับต่ำ-กลาง (Cisse et al., 2023) ในการศึกษาครั้งนี้ จึงมีความจำเป็นต้องใช้ข้อมูลเพียงสถานีเดียว (รูปที่ 1) โดยการวิเคราะห์มีสาระสำคัญประกอบด้วย 2 ประเด็นหลัก ดังนี้

4.1) การนำเสนอสถานการณ์ภาวะหมอกควันในเมืองเชียงใหม่อธิบายด้วยการพยากรณ์ปริมาณมลพิษทางอากาศแต่ละชนิดที่คาดว่าใกล้เคียงกับข้อเท็จจริง ภายใต้ข้อสมมุติ สถานการณ์และสภาพแวดล้อมที่คล้ายกับช่วงเวลาเก็บข้อมูล มาคาดการณ์ล่วงหน้า 365 วัน จากค่าสังเกตสุดท้าย ด้วยเทคนิคทางสถิติ ARIMA (p,d,q) โดยวิธีการของบ็อกซ์และเจนกินส์ (Box-Jenkins) ซึ่งเป็นที่ยอมรับโดยทั่วไปว่าเป็นวิธีการให้ค่าทำนายระยะสั้นได้ดี เหมาะสมกับการพยากรณ์สภาวะทางด้านมลภาวะทางอากาศที่มีพลวัตตามปัจจัยเชิงพื้นที่และเชิงเวลาอย่างต่อเนื่อง ด้วยค่าประมาณพารามิเตอร์จากตัวแบบจำลอง

$$Y_t = c + \sum_{i=1}^p \alpha Y_{t-i} + \sum_{j=1}^q \theta E_{t-j} + \epsilon_t$$

Y_t	คือ ค่าสังเกตของอนุกรมเวลาที่ t
c	คือ ค่าคงที่
p	คือ อันดับของ autoregressive
q	คือ อันดับของ moving average
α	คือ พารามิเตอร์ของ autoregressive
θ	คือ พารามิเตอร์ของ moving average
ϵ_t	คือ ค่าความคลาดเคลื่อน ณ เวลา t
d	คือ ลำดับการหาผลต่างที่ทำให้อนุกรมเวลาคงที่

ขั้นตอนการสร้างแบบจำลองมี 3 ขั้นตอน คือ 1) กำหนดตัวแบบอนุกรมเวลาจากการวิเคราะห์สหสัมพันธ์ในตัวเอง (Autocorrelations: AC) และสหสัมพันธ์ในตัวเองบางส่วน (Partial Autocorrelations: PAC) 2) เลือกตัวแบบจำลองที่เหมาะสมและประมาณค่าสัมประสิทธิ์ และ 3) การตรวจสอบความถูกต้องแบบจำลองและพยากรณ์

4.2) การศึกษาพฤติกรรมเชิงเวลาของการเกิดปัญหามลภาวะทางอากาศในเมืองเชียงใหม่ ด้วยการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบสองทาง (Two-Way ANOVA) ตัวแปรตามคือ ค่าก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์ (CO) ตัวแปรอิสระเชิงกลุ่มประกอบด้วย (1) กลุ่มวัน (Day) (2) กลุ่มช่วงเวลารายชั่วโมง (Hour) ค่าสถิติ F บ่งชี้ถึงความแตกต่างระหว่างค่าเฉลี่ยของตัวแปรตามเนื่องจากปัจจัยต้นหรือตัวแปรอิสระเชิงกลุ่ม ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ในขณะที่ วิธี Tukey HSD ถูกเลือกใช้สำหรับการเปรียบเทียบความแตกต่างค่าเฉลี่ยระหว่างกลุ่มประชากรเป็นรายคู่ (Multiple Comparison)

5. ผลการศึกษา

5.1 สถานการณ์ภาวะมลภาวะทางอากาศของเมืองเชียงใหม่

5.1.1 สถานการณ์มลภาวะทางอากาศของเมืองเชียงใหม่

ในการประเมินคุณลักษณะมลพิษทางอากาศใช้องค์ประกอบของสารมลพิษจำนวน 6 ชนิด ได้แก่ ฝุ่นละอองขนาดเล็กไม่เกิน 10 ไมครอน (PM_{10}) ฝุ่นละอองขนาดเล็กไม่เกิน 2.5 ไมครอน ($PM_{2.5}$) ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO_2) ก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์ (CO) ก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์ (NO_2) และ ก๊าซโอโซน (O_3) ณ จุดตรวจวัดโรงเรียนยุพราชวิทยาลัย ของกรมควบคุมมลพิษ โดยใช้ข้อมูลอนุกรมเวลารายวันของมลพิษทางอากาศหมอกควัน จังหวัดเชียงใหม่ และกำหนดแบบจำลอง Autoregressive Integrated Moving Average (ARIMA) จากการตรวจสอบข้อมูลพบว่าข้อมูลมีค่าสูญหายในทุกชุดข้อมูล ผู้ศึกษาจึงเลือกช่วงข้อมูลที่มีค่าสูญหายจำนวนน้อยที่สุด โดยมีผลการศึกษา ดังนี้ (ตารางที่ 1)

ฝุ่นละอองขนาดเล็กไม่เกิน 10 ไมครอน (PM_{10}) ผลการศึกษาด้วยสถิติเชิงพรรณนาและกราฟการกระจายของฝุ่นละอองขนาดเล็กไม่เกิน 10 ไมครอน (PM_{10}) เฉลี่ยรายวันจำนวน 9,075 ตัวอย่าง ช่วงอนุกรมเวลาเดือนมกราคม พ.ศ. 2539 – เดือนมิถุนายน พ.ศ. 2565 ค่าเฉลี่ยรายวัน PM_{10} ในจังหวัดเชียงใหม่ มักมีการเคลื่อนไหวในปริมาณสูงช่วงเดือนมกราคมถึงเดือนเมษายน และเปลี่ยนแปลงค่าสัมพันธ์กับเวลาที่เกิดขึ้น ซึ่งมีความเป็นไปได้ในเชิงผันแปรตามฤดูกาล โดยทั่วไปค่าเฉลี่ยรายวันประมาณ $52.88 \mu g/m^3$ ปริมาณสูงสุด $396.4 \mu g/m^3$ และปริมาณต่ำสุด $5.3 \mu g/m^3$

ฝุ่นละอองขนาดไม่เกิน 2.5 ไมครอน ($PM_{2.5}$) เฉลี่ยรายวัน จำนวน 3,964 ตัวอย่าง ช่วงเดือนพฤษภาคม พ.ศ. 2554 – เดือนมิถุนายน พ.ศ.2565 เมืองเชียงใหม่ ค่าเฉลี่ยรายวันของ $PM_{2.5}$ ในเมืองเชียงใหม่มีการเคลื่อนไหวในปริมาณสูงในช่วงเดือนมกราคมถึงเดือนเมษายน และมีความเป็นไปได้ในเชิงผันแปรตามฤดูกาล โดยทั่วไป ค่าเฉลี่ยรายวันประมาณ $28.57 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ปริมาณสูงสุด $266.17 \mu\text{g}/\text{m}^3$ และปริมาณต่ำสุด $3.25 \mu\text{g}/\text{m}^3$

ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO_2) เฉลี่ยรายวัน จำนวน 8,956 ตัวอย่าง ช่วงเดือนมกราคม พ.ศ. 2539 – เดือนมิถุนายน พ.ศ. 2565 ค่าเฉลี่ยรายวัน SO_2 ของเมืองเชียงใหม่มีการเคลื่อนไหวในปริมาณสูงในช่วงเริ่มต้นและค่อย ๆ ลดลง ค่าเฉลี่ยรายวันประมาณ 1.53 ppb ปริมาณสูงสุด 25.67 ppb และปริมาณต่ำสุด 0 ppb

ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) เฉลี่ยรายวัน จำนวน 8,648 ตัวอย่าง ช่วงเดือนมกราคม พ.ศ. 2539 – เดือนมิถุนายน พ.ศ. 2565 ค่าเฉลี่ยรายวันของ CO ในเมืองเชียงใหม่มีการเคลื่อนไหวที่ค่อย ๆ ลดลง ค่าเฉลี่ยรายวันประมาณ 0.81 ppm ปริมาณสูงสุด 5.57 ppm และปริมาณต่ำสุด 0 ppm

ก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์ (NO_2) เฉลี่ยรายวัน จำนวน 7,036 ตัวอย่าง ช่วงเดือนมกราคม พ.ศ. 2543 – เดือนมีนาคม พ.ศ. 2563 ค่าเฉลี่ยรายวัน NO_2 เมืองเชียงใหม่มีความเป็นไปได้ในเชิงผันแปรตามฤดูกาล ค่าเฉลี่ยรายวันประมาณ 16.30 ppb ปริมาณสูงสุด 81.21 ppb และปริมาณต่ำสุด 0 ppb

ก๊าซโอโซน (O_3) เฉลี่ยรายวันจำนวน 5,114 ตัวอย่าง ช่วงเดือนมกราคม พ.ศ. 2543 - เดือนสิงหาคม พ.ศ. 2557 ค่าเฉลี่ยรายวัน O_3 เมืองเชียงใหม่ มีการเคลื่อนไหวสัมพันธ์กับเวลาและมีความเป็นไปได้ในเชิงผันแปรตามฤดูกาล ค่าเฉลี่ยรายวันประมาณ 16.68 ppb ปริมาณสูงสุด 59 ppb และปริมาณต่ำสุด 0 ppb

ตารางที่ 1 สถานการณ์ของมลภาวะทางอากาศของเมืองเชียงใหม่

Table 1 Situation of air pollution in Chaing Mai's urban area.

Pollutant (unit)	Example	Mean	S.D.	Minimum	Maximum
PM_{10} ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	9,075	52.88	38.72	5.30	397.40
$PM_{2.5}$ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	3,964	28.56	25.41	3.25	266.17
SO_2 (ppb)	8,956	1.53	1.43	0	25.67
CO (ppm)	8,648	0.82	0.41	0	5.57
NO_2 (ppb)	7,036	16.30	8.56	0	81.22
O_3 (ppb)	5,114	16.68	8.55	0	59.00

5.1.2 การพยากรณ์มลภาวะทางอากาศของเมืองเชียงใหม่

การอธิบายแบบจำลองที่เหมาะสมผลเป็นตัวแทน ARIMA ที่แสดงว่าค่าสังเกตในปัจจุบันเป็นทั้งฟังก์ชันของค่าสังเกตในอดีต p รายวันย้อนหลัง และตัวแปรสุ่มอิสระทั้งปัจจุบันและย้อนหลังในอดีต q วัน ผลของ Correlogram จากฟังก์ชันสหสัมพันธ์ในตัวเอง (AC) และฟังก์ชันสหสัมพันธ์ในตัวเองบางส่วน (PAC) คาดว่ากระบวนการออโตรีเกรสซีฟแอเวอเรจ ตัวแบบผสมอันดับใดมีความเหมาะสม พิจารณาจากเงื่อนไข Sigma SQ, Akaike Information Criterion (AIC) และ Bayesian Information Criterion (BIC) โดยเลือกตัวแบบที่ให้ค่าสถิติที่น้อยที่สุด ผลการพยากรณ์มลภาวะอากาศแต่ละชนิด ดังนี้ (รูปที่ 2)

ฝุ่นละอองขนาดไม่เกิน 10 ไมครอน (PM_{10}) ผลการทดสอบความนิ่ง (stationary) ของข้อมูลที่ใช้ทดสอบจากพบว่าชุดอนุกรมเวลาของข้อมูล PM_{10} ของกระบวนการที่มีค่าเฉลี่ยและความแปรปรวนคงที่หรือถูกอธิบายด้วยกระบวนการที่นิ่งหรืออยู่ในสภาวะสมดุลทางสถิติเชิงเส้นตามรูปแบบที่ผ่านมาในอดีตที่ผันผวนในอัตราคงที่รอบค่าเฉลี่ยของ PM_{10} แสดงตัว

แบบพยากรณ์ ARIMA (3,0,1) เปรียบเทียบกับข้อมูลค่าสังเกต PM_{10} และคาดการณ์อนุกรมล่วงหน้าในอนาคต 365 วันว่ามีแนวโน้มเพิ่มขึ้น (รูปที่ 2)

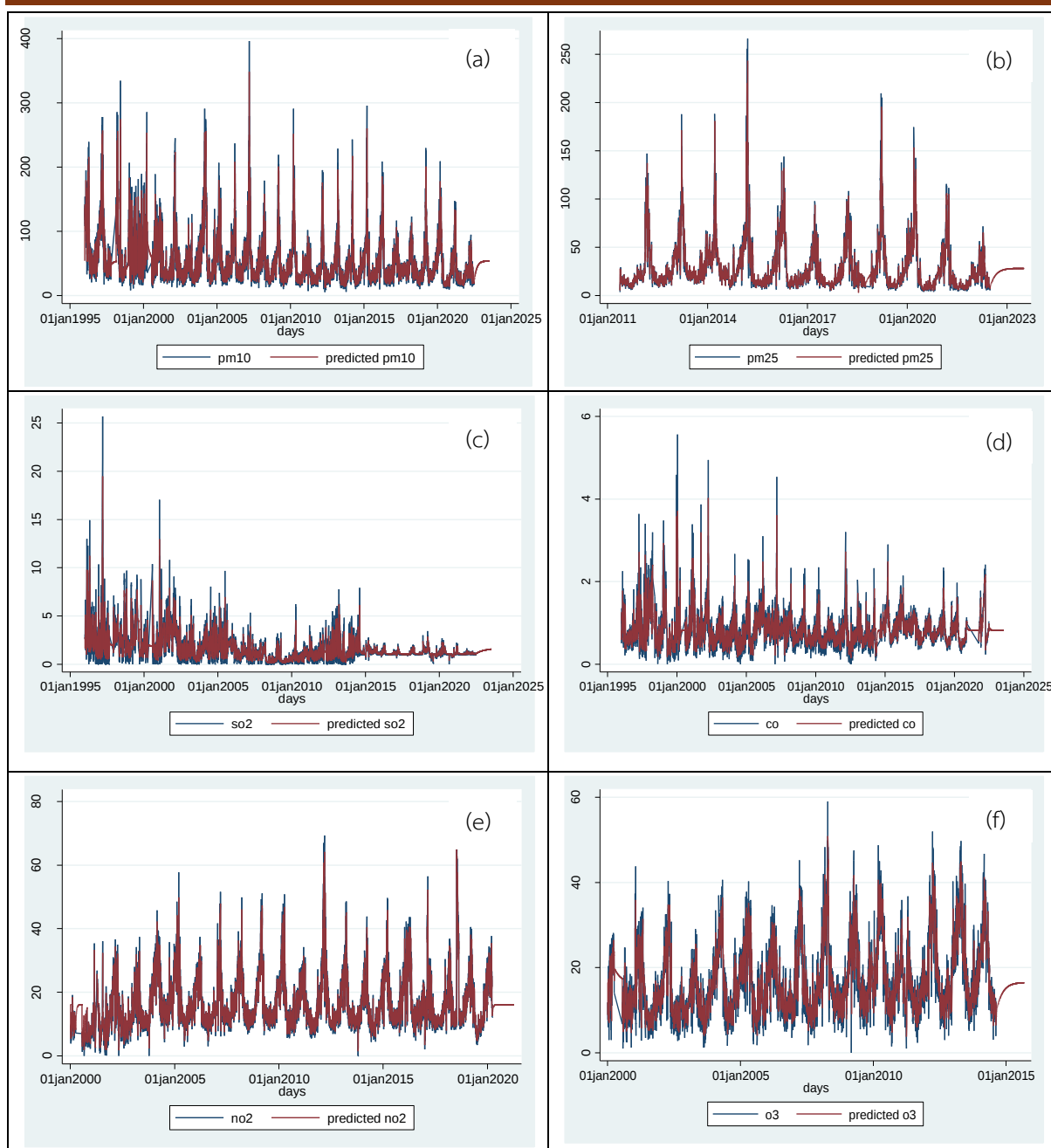
ฝุ่นละอองขนาดเล็กไม่เกิน 2.5 ไมครอน ($PM_{2.5}$) ผลการทดสอบความนิ่ง (stationary) ของข้อมูลที่ใช้ทดสอบพบว่า ชุดอนุกรมเวลาของข้อมูล $PM_{2.5}$ ของกระบวนการที่มีค่าเฉลี่ยและความแปรปรวนคงที่หรือถูกอธิบายด้วยกระบวนการที่สเตชันนารีและชุดข้อมูลไม่มีแนวโน้มเป็นส่วนประกอบของอนุกรมเวลา ผลการวิเคราะห์คือ ตัวแบบ ARIMA (2,0,1) ที่แสดงค่าสัมประสิทธิ์และค่าคงที่มีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 คือ ค่าคาดคะเน $PM_{2.5}$ ได้รับอิทธิพลจากค่าสังเกตในอดีตรายวันย้อนหลังและตัวแปรสุ่มอิสระ แบบจำลอง ARIMA (2,0,1) พยากรณ์อนุกรมในอนาคต 365 วันมีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้น (รูปที่ 2)

ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO_2) ผลการทดสอบความนิ่งของข้อมูลที่ใช้ทดสอบจากพบว่าชุดอนุกรมเวลาของข้อมูล SO_2 ของกระบวนการที่มีค่าเฉลี่ยและความแปรปรวนคงที่หรือถูกอธิบายด้วยกระบวนการที่สเตชันนารี ผลการวิเคราะห์ ARIMA (3,0,1) ที่ค่าสัมประสิทธิ์และค่าคงที่มีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 คือค่าคาดการณ์ SO_2 ได้รับอิทธิพลจากค่าสังเกตในอดีตรายวันย้อนหลังและตัวแปรสุ่มอิสระ กราฟแสดงค่าพยากรณ์ของแบบจำลอง ARIMA (3,0,1) ค่อย ๆ เพิ่มขึ้น (รูปที่ 2)

ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ผลการทดสอบความนิ่งของข้อมูลที่ใช้ทดสอบจากพบว่าชุดอนุกรมเวลาของข้อมูลมีกระบวนการที่มีค่าเฉลี่ยและความแปรปรวนคงที่หรือถูกอธิบายด้วยกระบวนการที่สเตชันนารี ค่าคาดการณ์ CO ได้รับอิทธิพลจากค่าสังเกตในอดีตรายวันย้อนหลังและตัวแปรสุ่มอิสระและกราฟให้ความแปรปรวนคงที่แสดงความเหมาะสมและความมีประสิทธิภาพของแบบจำลอง กราฟแสดงค่าพยากรณ์ของแบบจำลอง ARIMA (1,0,1) ในอนาคตอีกประมาณ 365 วันที่ลดลง (รูปที่ 2)

ก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์ (NO_2) ผลการทดสอบความนิ่งของข้อมูลที่ใช้ทดสอบจากพบว่าชุดอนุกรมเวลาของข้อมูลมีกระบวนการที่มีค่าเฉลี่ยและความแปรปรวนคงที่หรือถูกอธิบายด้วยกระบวนการที่สเตชันนารี ผลการวิเคราะห์ให้ตัวแบบ ARIMA (1,0,1) การวิเคราะห์ Residual พบลักษณะกระจายรอบค่าเฉลี่ยของค่าคลาดเคลื่อน (-.005) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติและกราฟให้ความแปรปรวนคงที่ แสดงความเหมาะสมและความมีประสิทธิภาพของแบบจำลอง กราฟแสดงค่าพยากรณ์ของแบบจำลอง ARIMA (1,0,1) ของ NO_2 เปรียบเทียบกับข้อมูลค่าสังเกตจริงและพยากรณ์อนุกรมในอนาคตประมาณ 365 วันจากค่าสังเกตสุดท้ายมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น (รูปที่ 2)

ก๊าซโอโซน (O_3) ผลการทดสอบความนิ่งของข้อมูลที่ใช้ทดสอบจากพบว่าชุดอนุกรมเวลาของข้อมูลมีกระบวนการที่มีค่าเฉลี่ยและความแปรปรวนคงที่หรือถูกอธิบายด้วยกระบวนการที่สเตชันนารี ผลการวิเคราะห์คือ ARIMA (3,0,1) กราฟให้ความแปรปรวนคงที่ แสดงความเหมาะสมและความมีประสิทธิภาพของแบบจำลอง กราฟแสดงค่าพยากรณ์ของแบบจำลอง ARIMA (3,0,1) ของ O_3 พยากรณ์อนุกรมในอนาคตประมาณ 365 วันมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น (รูปที่ 2)



รูปที่ 2 ชุดข้อมูลอนุกรมเวลารายวันของมลภาวะ ณ สถานี 36t โรงเรียนยุพราชวิทยาลัย

Figure 2 A data set of daily time series of pollution at station 36t Yupparaj Wittayalai School.

5.2 พฤติกรรมเชิงเวลาของมลภาวะทางอากาศในเมืองเชียงใหม่

จากข้อมูลที่มีการบันทึกอย่างครบถ้วนที่สามารถวิเคราะห์พฤติกรรมเชิงเวลาในพื้นที่ได้ มีเพียงข้อมูลก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ที่เกิดจากการเผาไหม้คาร์บอนที่ไม่สมบูรณ์จากกิจกรรมต่าง ๆ เช่น อุตสาหกรรมการผลิต ท่อไอเสียรถ และควันจากไฟไหม้ ในภาพรวมการศึกษาใช้ข้อมูลเฉลี่ยรายชั่วโมงระหว่างเดือนมกราคม พ.ศ. 2539 - มิถุนายน พ.ศ. 2565 พบว่าโดยเฉลี่ยรวมของค่า CO เท่ากับ 0.8134 ppm จากตารางที่ 2 และตารางที่ 3 ค่าสถิติเชิงพรรณนาอธิบายค่ากลางและการกระจายของปริมาณสารมลพิษ CO จำแนกชุดค่าสังเกตตามกลุ่มวันและช่วงเวลารายชั่วโมงตามลำดับ พบว่า

ค่าเฉลี่ยของ CO ตามกลุ่มวัน มีค่าสูงสุดในวันศุกร์ (Friday) เท่ากับ 0.83 ppm รองลงมาคือ วันธรรมดา (จันทร์ถึงพฤหัสบดี) มีค่าเท่ากับ 0.82 ppm และวันหยุดเสาร์และอาทิตย์ (Weekend) มีค่าเท่ากับ 0.77 ppm ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่า CO วันหยุดเสาร์และอาทิตย์มีความแตกต่างน้อยที่สุด (0.60 ppm) ภายในกลุ่มเมื่อเปรียบเทียบกับกลุ่มอื่น และค่า CO (Max) มีค่าต่ำสุดอยู่ที่ 9.19 ppm

ตารางที่ 2 ค่าสถิติเชิงพรรณนา ของก๊าซ CO ในช่วงวันทำงานและวันหยุด

Table 2 Descriptive statistic values of CO during weekday and weekend.

Variable: CO	Observations	Mean	S.D.	Minimum	Maximum
Friday	27,713	0.83	0.63	0	16.69
Weekday	110,700	0.82	0.64	0	10.70
Weekend	55,624	0.77	0.60	0	9.19

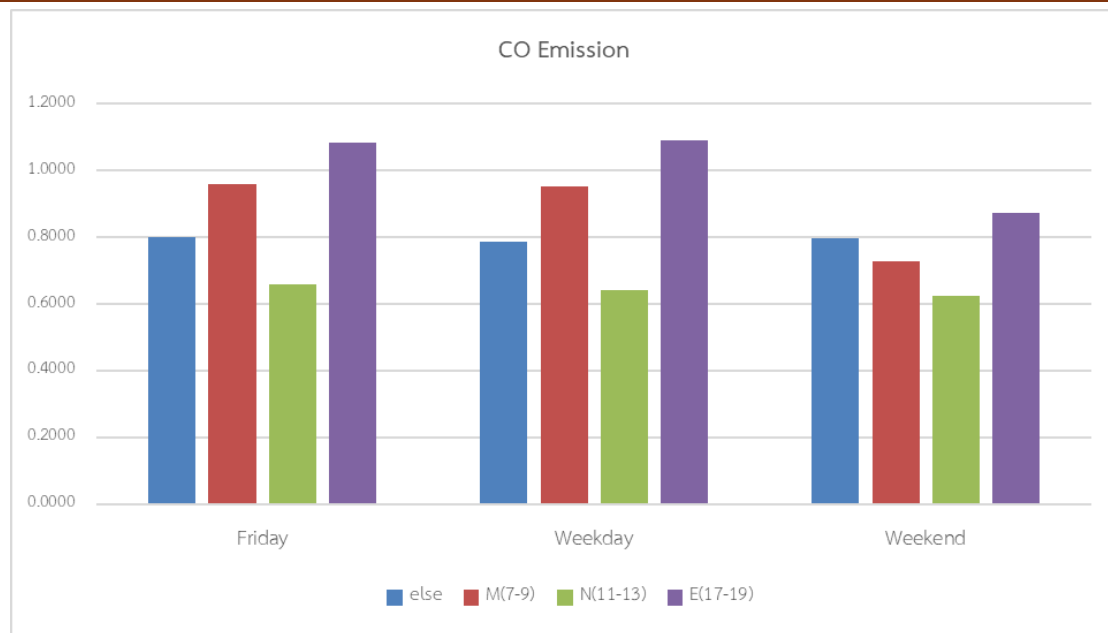
ค่าเฉลี่ยของ CO ในตารางที่ 3 จำแนกตามประเภทช่วงเวลา 4 กลุ่มดังนี้ 1) ช่วงเช้า (Morning: M) 2) ช่วงเที่ยง (Noon: N) 3) ช่วงเย็น (Evening: E) และ 4) ช่วงเวลาอื่นระหว่างวัน (else) พบว่าค่าก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ช่วงเย็นโดยเฉลี่ยสูงสุด 1.02 ppm รองลงมาคือ ค่าเฉลี่ยช่วงเช้า ช่วงเวลาอื่น และ ช่วงเที่ยง (0.88 ppm, 0.79 ppm และ 0.63 ppm) ตามลำดับ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่า CO ภายในกลุ่มช่วงเที่ยงมีความแตกต่างกันน้อยที่สุดคือ 0.40 ppm ช่วงเวลาอื่นระหว่างวันค่า CO กระจายแตกต่างกันมาก (0.67 ppm) และให้ค่า CO สูงสุดที่ 16.69 ppm

ตารางที่ 3 ค่าสถิติเชิงพรรณนา ของก๊าซ CO ตามช่วงเวลาของวัน

Table 3 Descriptive statistic values of CO during daily periods.

Variable: CO	Observations	Mean	S.D.	Minimum	Maximum
E (17-19)	24,274	1.02	0.61	0	7.90
M (7-9)	24,337	0.88	0.52	0	8.34
N (11-13)	23,839	0.63	0.40	0	9.19
else	121,587	0.79	0.67	0	16.69

รูปที่ 3 แสดงแผนภูมิก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ตามประเภทวันในแต่ละช่วงเวลา พบว่าค่าเฉลี่ยของ CO ช่วงเย็นสูงสุดทุกกลุ่มวันที่จำแนก โดยที่กลุ่มวันธรรมดาและวันศุกร์ใกล้เคียงกันและให้ค่าเฉลี่ยสูงลำดับถัดมาในช่วงเย็นเช่นเดียวกัน แต่ช่วงเวลาอื่นวันหยุดให้ค่าเฉลี่ยค่อนข้างสูง ขณะที่ค่าเฉลี่ย CO ช่วงเที่ยงน้อยที่สุด



รูปที่ 3 ค่าเฉลี่ย CO ตามช่วงวันทำงานและวันหยุด

Figure 3 Average values of CO during weekday and weekend.

ผลการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม R ดังตารางที่ 4 เพื่อทดสอบอิทธิพลตามช่วงวันและช่วงเวลามีผลต่อค่าเฉลี่ย CO หรือไม่ ทำการทดสอบโดยวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบสองทาง (Two-Way ANOVA) ตัวแปรตามคือ ค่าก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ตัวแปรอิสระเชิงกลุ่ม ประกอบด้วย 1) กลุ่มวัน (Day) 2) กลุ่มช่วงเวลารายชั่วโมง ค่าสถิติ F ในการทดสอบความแตกต่างระหว่างกลุ่ม พบว่ามีความแตกต่างการปล่อยค่า CO ทั้งกลุ่มปัจจัยหลักวัน ปัจจัยหลักเวลา และปัจจัยร่วม (interaction) ระหว่างวันและเวลา ที่ระดับนัยสำคัญ 0.01 ค่าสถิติทดสอบ F ของระดับปัจจัยเวลาค่อนข้างสูงแสดงว่าความผันแปรของค่า CO จะมาก เนื่องจากความแตกต่างของระดับช่วงเวลาเมื่อเปรียบเทียบกับระดับกลุ่มวันและระดับกลุ่มปฏิสัมพันธ์ (Interaction) สรุปได้ว่ากิจกรรมเชิงเศรษฐกิจ สังคม และสิ่งแวดล้อมที่เป็นแหล่งกำเนิด CO ในพื้นที่ศึกษาในแต่ละช่วงวันและเวลาที่ต่างกันจะส่งผลต่อภาวะหมอกควันในบริบทของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

ตารางที่ 4 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบสองทาง (Two-Way ANOVA)

Table 4 The results of Two-Way ANOVA analysis.

Source	df	Sum Square	Mean Square	F Value	Pr(>F)
Hour	3	2024	675	1761.0	<2e-16***
Day	2	116	58	151.5	<2e-16***
Hour: Day	6	375	63	163.2	<2e-16***
Residuals	194025	74335	0.4		
Total	194036	76850			

Remark: *Statistically significant at the 0.05 level

**Statistically significant at the 0.01 level

***Statistically significant at the 0.001 level

ตารางที่ 5 แสดงการเปรียบเทียบความแตกต่างค่าเฉลี่ย CO เชิงพหุคูณ (Multiple Comparison) เป็นรายคู่เปรียบเทียบตามระดับตัวแปรกลุ่มวันธรรมดา วันศุกร์และวันหยุด ด้วยวิธี Tukey HSD พบว่าทุกคู่ความแตกต่างของกลุ่มวันมีอิทธิพลต่อค่าเฉลี่ย CO ต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ที่ระดับ 0.05 แสดงว่าแต่ละกลุ่มวันมีความสัมพันธ์กับมลพิษทางอากาศคาร์บอนมอนอกไซด์ ปริมาณความแตกต่างของ CO ช่วงวันศุกร์กับวันหยุดมากที่สุด (0.0625 ppm) ขณะที่วันธรรมดาและวันศุกร์ค่า CO ค่อนข้างสูงแต่ไม่ค่อยต่างกัน (0.0114 ppm)

ตารางที่ 5 การเปรียบเทียบค่าเฉลี่ย CO เชิงพหุคูณระหว่างวันทำงานและวันหยุดด้วยวิธี Tukey HSD

Table 5 Multiple Comparison of mean CO levels during weekday and weekend with Tukey HSD.

Categorical Variable	Contrast	Estimate	Conf low	Conf high	P Value
Day	Weekday-Friday	-0.0114	-0.0213	-0.0015	0.0189**
Day	Weekend-Friday	-0.0625	-0.0733	-0.0517	0.0000***
Day	Weekend-Weekday	-0.0511	-0.0587	-0.0434	0.0000***

Remark: *Statistically significant at the 0.05 level

**Statistically significant at the 0.01 level

***Statistically significant at the 0.001 level

ตารางที่ 6 แสดงการเปรียบเทียบความแตกต่างค่าเฉลี่ย CO เชิงพหุคูณ (Multiple Comparison) เป็นรายคู่เปรียบเทียบตามระดับตัวแปรกลุ่มเวลาเช้า (M) เที่ยง (N) เย็น (E) และ อื่น ๆ (else) พบว่าทุกคู่ความแตกต่างของกลุ่มเวลาที่จำแนกมีอิทธิพลต่อค่าเฉลี่ย CO ต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ที่ระดับ 0.01 กล่าวคือ ระดับช่วงเวลามีความสัมพันธ์กับมลภาวะหมอกควันจากปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์ ปริมาณความแตกต่างของ CO ช่วงเย็นกับช่วงเที่ยงมากที่สุด (0.3872 ppm) ขณะที่ช่วงเที่ยงและช่วงอื่นโดยเฉลี่ยค่า CO จะระดับปานกลางแต่ไม่ค่อยต่างกัน (0.0974 ppm)

ตารางที่ 6 การเปรียบเทียบค่าเฉลี่ย CO ตามระดับกลุ่มเวลาเชิงพหุคูณด้วยวิธี Tukey HSD

Table 6 Multiple Comparison of mean CO levels during daily periods with Tukey HSD.

Categorical Variable	Contrast	Estimate	Conf low	Conf high	P Value
Hour	M-else	0.0974	0.0862	0.1086	0.0000***
Hour	N-else	-0.1514	-0.1627	-0.1401	0.0000***
Hour	E-else	0.2357	0.2245	0.2469	0.0000***
Hour	N-M	-0.2489	-0.2634	-0.2344	0.0000***
Hour	E-M	0.1383	0.1238	0.1527	0.0000***
Hour	E-N	0.3872	0.3727	0.4018	0.0000***

Remark: *Statistically significant at the 0.05 level

**Statistically significant at the 0.01 level

***Statistically significant at the 0.001 level

ตารางที่ 7 แสดงการเปรียบเทียบความแตกต่างค่าเฉลี่ย CO จากอิทธิพลร่วมหรือปฏิสัมพันธ์ตามกลุ่มวันและระดับเวลาเชิงพหุคูณ ที่ให้รายละเอียดยิ่งขึ้นกว่าทดสอบด้วยตัวแปรอิสระหลัก พบว่าทุกคู่ความแตกต่างของอิทธิพลร่วมของวันศุกร์ ซึ่งมีการปล่อย CO โดยเฉลี่ยมากที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับวันทำงาน (ธรรมดา) วันอื่น ๆ และวันหยุด ทุกช่วงเวลาที่ทดสอบมีผลปฏิสัมพันธ์ให้ค่าเฉลี่ย CO ต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ที่ระดับ 0.01 โดยที่วันศุกร์ปริมาณความแตกต่างของ CO ช่วงเย็นกับช่วงเที่ยงมากที่สุด (0.4238 ppm) และต่างกั้นน้อยสุดคือช่วงเช้าและเย็น ซึ่งค่า CO สูงในเวลาดังกล่าว สรุปได้ว่าช่วงวันและช่วงเวลามีผลร่วมกัน หรืออิทธิพลของเวลาต่อความแตกต่างของการแพร่กระจายปริมาณก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ตามกิจกรรมต่าง ๆ ที่มีความเสี่ยงต่อการสัมผัสที่จะกระทบต่อสุขภาพและมิติด้านอื่นที่เกี่ยวข้องในแต่ละประเภทของวัน

ตารางที่ 7 การเปรียบเทียบค่าเฉลี่ย CO ตามช่วงเวลาในวันศุกร์ด้วยวิธี Tukey HSD

Table 7 Comparison of mean CO during periods of time on Friday with Tukey HSD.

(Hour day)	Contrast	Estimate	SE	df	P Value
Friday	M-else	0.1580	0.0115	194025	<.0001**
Friday	N-else	- 0.1426	0.0116	194025	<.0001**
Friday	E-else	0.2812	0.0115	194025	<.0001**
Friday	N-M	- 0.3006	0.0149	194025	<.0001**
Friday	E-M	0.1232	0.0148	194025	<.0001**
Friday	E-N	0.4238	0.0149	194025	<.0001**

Remark: *Statistically significant at the 0.05 level

**Statistically significant at the 0.01 level

***Statistically significant at the 0.001 level

6. การอภิปรายผล

จากผลการศึกษานี้กล่าวได้ว่าสถานการณ์ของมลภาวะในเมืองเชียงใหม่ยังคงเป็นปัญหาที่ต่อเนื่องและมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นซึ่งสอดคล้องกับสภาวะปัญหามลภาวะทางอากาศในหลายพื้นที่ของโลก ที่กลายเป็นภัยคุกคามต่อสุขภาพของประชากรโลกในช่วงเวลาปัจจุบัน โดยเฉพาะในภูมิภาคเอเชียใต้และจีน ซึ่งสาเหตุหลักของปัญหามลภาวะทางอากาศ สรุปได้จากปัญหาไฟป่า และการเผาผลาญเชื้อเพลิงฟอสซิลจากการคมนาคมขนส่งและการผลิตพลังงานต่าง ๆ (Thai PBS, 2023) ในขณะที่ระดับความรุนแรงของสภาพปัญหาก็มีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้น โดยในช่วงปี พ.ศ. 2563 – 2565 มลภาวะในพื้นที่เชียงใหม่มีค่าในระดับสูงที่สุดของโลกในหลายช่วงเวลา (Siamrath online, 2020; Pollution Control Department, 2022)

ในขณะที่พฤติกรรมที่เกิดขึ้นของมลภาวะของเมืองเชียงใหม่ที่พบว่ามีปริมาณสูงในช่วงเวลาที่มีการเดินทาง (เช้า กลางวัน และเย็น) ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาของ Bishop (2023) และ Kuerban et al. (2020) ประกอบกับกิจกรรมที่หลากหลายของเมืองเชียงใหม่การแก้ไขปัญหาทางอากาศต้องการความรู้ความเข้าใจในองค์ประกอบและแหล่งกำเนิดมลพิษอย่างชัดเจนเพื่อการกำหนดแนวทางการแก้ไขปัญหาได้อย่างครอบคลุมและเหมาะสมกับแหล่งกำเนิดแต่ละแหล่งอย่างครบถ้วน ซึ่ง Burrows (2018) สามารถสรุปแนวทางการดำเนินงานแก้ไขปัญหาทางอากาศของประเทศจีนได้เป็น 2 ขั้นตอนสำคัญ ประกอบด้วย

1) การสำรวจและจัดทำบัญชีแหล่งกำเนิดมลภาวะในอากาศ เพื่อความเข้าใจในปัญหาอย่างทั่วถึงอันจะนำไปสู่การกำหนดมาตรการแก้ไขปัญหาได้อย่างครอบคลุมในทุกประเด็นและตามความเหมาะสมของช่วงเวลาที่เกิดปัญหา

2) การพิจารณากำหนดมาตรการการแก้ไขปัญหที่เหมาะสมตามแหล่งกำเนิดมลพิษ ซึ่งแบ่งเป็นมาตรการควบคุมและป้องกัน และมาตรการลดและบรรเทาผลกระทบ ดังนี้

- มาตรการควบคุมและป้องกันปัญหา โดยพิจารณาประเด็นที่เกี่ยวข้องกับแหล่งกำเนิดของมลพิษและระยะเวลาที่เหมาะสมในการดำเนินงาน ได้แก่ การกำหนดมาตรฐานมลพิษ การจำกัดเขตก่อสร้างและเขตอุตสาหกรรมที่ชัดเจนพร้อมกับการบังคับใช้กฎหมายให้เป็นไปตามมาตรฐานอย่างเข้มงวด การบังคับใช้มาตรการทางการคลังในการจัดเก็บภาษีการอนุรักษ์สิ่งแวดล้อมจากแหล่งกำเนิดมลพิษ การเพิ่มพื้นที่สีเขียวในเมือง การลดปริมาณจราจรจากการพัฒนาระบบขนส่งสาธารณะเพื่อลดการใช้พาหนะส่วนตัว และการโยกย้ายหรือจำกัดกิจกรรมที่ดึงดูดการเดินทางที่ไม่เกี่ยวข้องกับเมืองเข้าสู่ศูนย์กลางเมือง เช่น การย้ายตลาดขายส่งออกจากศูนย์กลางเมือง (Voice online, 2018)

- มาตรการลดและบรรเทาปัญหามลภาวะทางอากาศ จากประสบการณ์แก้ไขปัญหามลพิษของประเทศไทย ได้ดำเนินการด้วยการฉีดพ่นละอองน้ำที่มีขนาดอนุภาคเล็กเท่ากับฝุ่นละออง เรียกว่า “การสร้างหมอกละอองน้ำ” ขึ้นไปในอากาศในช่วงเวลาเร่งด่วน โดยเฉพาะบริเวณที่มีการจราจรคับคั่งเพื่อให้ละอองน้ำไปจับกับฝุ่นละอองในอากาศและตกลงสู่พื้น ซึ่งการฉีดพ่นด้วยรถพ่นละอองน้ำวันละ 3-5 ครั้งต่อวัน สามารถลดปริมาณ PM_{10} ได้ร้อยละ 20 และ $PM_{2.5}$ ได้ร้อยละ 5 นอกจากการพ่นละอองน้ำแล้ว ประเทศไทยยังใช้เครื่องกรองอากาศติดตั้งบนหอคอยสูงกว่า 100 เมตร ซึ่งสามารถช่วยบรรเทาปัญหาได้ระดับหนึ่ง (Voice online, 2018)

จากแนวทางการแก้ไขปัญหามลภาวะดังกล่าวข้างต้น ประกอบกับผลการศึกษาที่พบว่ามลภาวะของเมืองเชียงใหม่มีความเข้มข้นสัมพันธ์กับช่วงเวลาที่ปริมาณจราจรสูง ซึ่งการลดและบรรเทาปัญหามลภาวะของเมือง ต้องพิจารณาให้ความสำคัญในปัจจัยด้านการขนส่งร่วมกับลักษณะการใช้ที่ดิน ในกระบวนการวางแผนการใช้ที่ดินของเมือง ซึ่งสอดคล้องกับข้อเสนอแนะของ Mun et al. (2022) นอกจากนั้น ควรให้ความสำคัญต่อความสัมพันธ์ระหว่างมลภาวะกับช่วงเวลา ซึ่งเป็นข้อมูลสำคัญสำหรับการกำหนดมาตรการด้านการอนุรักษ์พลังงานและการป้องกันสภาพแวดล้อมร่วมกันในกลุ่มพื้นที่ใกล้เคียง รวมถึงการแสวงหาความร่วมมือและการจัดหาระบบการบังคับใช้และแบ่งปันข้อมูลข่าวสารระหว่างรัฐบาลท้องถิ่นเป็นสิ่งที่จำเป็น ในขณะที่ความเข้าใจในแหล่งมลภาวะที่ชัดเจนของเมืองเป็นอีกปัจจัยที่มีความสำคัญต่อการกำหนดแนวทางการป้องกันและบรรเทาปัญหามลภาวะของเมือง ซึ่งต้องการการศึกษาในรายละเอียดต่อไป

7. สรุปและข้อเสนอแนะ

สถานการณ์ของมลภาวะในเมืองเชียงใหม่พบว่าค่าเฉลี่ยรายวันฝุ่นละออง (PM_{10} และ $PM_{2.5}$) มีการเคลื่อนไหวในปริมาณสูงในช่วงเดือนมกราคมถึงเดือนเมษายน ส่วนค่าเฉลี่ยรายวันก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ในช่วงเดือนมกราคมถึงเดือนเมษายน มีการเคลื่อนไหวในปริมาณที่น้อย ในขณะที่ค่าเฉลี่ยรายวันก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์ (NO_2) ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO_2) ก๊าซโอโซน (O_3) มีการเคลื่อนไหวในปริมาณที่ปกติโดยทั่วไป โดยการพยากรณ์ในระยะสั้น ค่ามลภาวะในพื้นที่สรุปได้ว่า PM_{10} , $PM_{2.5}$, SO_2 , NO_2 , และ O_3 มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น

ในขณะที่พฤติกรรมเปลี่ยนแปลงของมลภาวะในพื้นที่ พบว่าวันศุกร์ซึ่งมีการปล่อย CO โดยเฉลี่ยมากที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับวันทำงาน (ธรรมดา) และวันหยุด ทุกช่วงเวลาที่ทดสอบมีผลปฏิสัมพันธ์ให้ค่าเฉลี่ย CO ต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ที่ระดับ 0.01 หากพิจารณาถึงช่วงเวลา พบว่า ปริมาณ CO สูงมากในช่วงเย็น รองลงมา คือเวลาช่วงเช้า เวลาช่วงเที่ยง ตามลำดับ กล่าวได้ว่าช่วงวันและช่วงเวลามีอิทธิพลร่วมกัน หรืออิทธิพลของเวลาต่อความแตกต่างของการแพร่กระจายปริมาณก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ตามกิจกรรมต่าง ๆ ที่มีความเสี่ยงต่อการสัมผัสที่จะกระทบต่อสุขภาพและมิติด้านอื่นที่เกี่ยวข้องในแต่ละประเภทของวัน

จากสถานการณ์ของมลภาวะที่เกิดขึ้นในเมืองเชียงใหม่ บ่งชี้ความจำเป็นเร่งด่วนถึงการมีมาตรการที่เหมาะสมในการแก้ไขปัญหามลภาวะทางอากาศ โดยพิจารณาจากพฤติกรรมเชิงเวลาของค่าคาร์บอนมอนอกไซด์ที่เกิดขึ้นในเมืองเชียงใหม่ บ่งชี้ถึงแนวทางการแก้ไขปัญหาคควรให้ความสำคัญกับช่วงเวลาในการดำเนินงานที่เหมาะสมกับช่วงเวลาการเกิดของ

ปัญหามลภาวะทางอากาศที่สัมพันธ์กับปัจจัยด้านการขนส่งและการจราจร ซึ่งมีอิทธิพลต่อประสิทธิภาพในการลดและบรรเทาปริมาณมลภาวะทางอากาศได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด

8. องค์ความรู้ที่ได้รับ

ปัญหามลภาวะทางอากาศมีการกระจายตัวทางด้านเวลาที่แตกต่างกัน ทั้งในด้านฤดูกาลซึ่งเกิดมลภาวะทางอากาศสูงในช่วงฤดูแล้ง หากพิจารณาในรายวัน พบว่าวันศุกร์มีปริมาณสูงกว่าวันทำงานทั่วไป และวันหยุดมีปริมาณน้อยกว่าวันทำงาน ในส่วนการพิจารณาในรายชั่วโมง พบมลภาวะทางอากาศมีปริมาณสูงในเวลาเย็น รองลงมาเป็นช่วงเวลาเช้า ช่วงเวลาเที่ยงวัน และช่วงเวลาอื่น ๆ ตามลำดับ ลักษณะดังกล่าวบ่งชี้ถึงแหล่งมลภาวะที่สำคัญมาจากการจราจรเป็นสำคัญ ซึ่งแนวทางการแก้ไขปัญหามลภาวะทางอากาศควรมุ่งเน้นพื้นที่เส้นทางคมนาคม และในช่วงเวลาเร่งด่วนเป็นสำคัญ

เอกสารอ้างอิง

- Announcement of the Rattanakosin and Old City Preservation and Development Committee. (2010, December 13). *The announcement of Chiang Mai old city area, B.E. 2553*.
<https://law.onep.go.th/wp-content/uploads/2021/06/law10.4.pdf> (in Thai)
- Buathong, T. (2019, March 13). *Dust: Chiang Mai, smog crisis in the northern region a national agenda that has not been resolved for 12 years*. BBC News. <https://www.bbc.com/thai/thailand-47550696> (in Thai)
- Burrows, L. (2018, December 31). *China's war on particulate air pollution is causing more severe ozone pollution, PM 2.5 pollution is falling but ground-level ozone pollution is on the rise*. Harvard John, A. Paulson, School of Engineering and Applied Sciences.
<https://www.seas.harvard.edu/news/2018/12/chinas-war-particulate-air-pollution-causing-more-severe-ozone-pollution>
- Bishop, S. (2023). *The worst times for air quality: Understanding air pollution patterns and trends*. Clarity.
<https://www.clarity.io/blog/worst-times-for-air-quality-understanding-air-pollution-patterns-and-trends>
- Cisse, K., Dieng, N.R., Gassama, A., Milusheva, S., & Ndiaye, A. (2023, 16 March). *Innovative data collection for measuring air pollution in Dakar*. World Bank.
<https://blogs.worldbank.org/opendata/innovative-data-collection-measuring-air-pollution-dakar>
- EPA. (N.D.). *Criteria air pollutants*. United States Environmental Protection Agency.
<https://www.epa.gov/criteria-air-pollutants>
- Jian, S. (2021). Forecasting COVID-19 pandemic in Alberta, Canada using modified ARIMA models. *Computer methods and programs in Biomedicine update*. 1, 100029.
<https://doi.org/10.1016/j.cmpbup.2021.100029>
- Kamton, R., Saienperakul, K., Yotapakdee, T., & Nunthasen, K. (2019). Haze-relate air pollution and impacts on healthy in Chiang Mai province. *Thai Interdisciplinary and Sustainability Review*. 8, 265-273.
<https://so03.tci-thaijo.org/index.php/JIRGS/article/view/243646/164949> (in Thai)

- Kuerban, M., Waili, Y., Liu, F.F.Y., Qin, W., Dore, A.J., Peng, J., Xu, W., & Zhang, F. (2020). Spatio-temporal patterns of air pollution in China from 2015 to 2018 and implications for health risks. *Environmental Pollution*, 258, 113659. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.113659>
- Mun, H., Li, M., & Jung, J. (2022). Spatial-temporal characteristics and influencing factors of particulate matter: Geodetector approach. *Land*, 11, 2336. <https://doi.org/10.3390/land11122336>
- Pollution Control Department. (2022). *Archived data. hourly mean PM2.5 from A.D. 2011 to 2022*. Air4Thai. <http://air4thai.pcd.go.th/webV3/#/History>
- Pollution Control Department. (2024). *Archived data. hourly mean PM2.5 2024*. Air4Thai. <http://air4thai.pcd.go.th/webV3/#/History>
- Siamrath online. (2020, March 29). “Chiang Mai” dust levels reach the world’s worst air levels, 14 spots were in the dangerous red zones!. <https://siamrath.co.th/n/142735> (in Thai)
- Thai PBS. (2023, March 16). *The whole world faces poor air quality, “Asia” ranks among the most severely polluted*. <https://www.thaipbs.or.th/news/content/325615> (in Thai)
- UNEP. (2023). *We are in this # Togetherforcleanair*. UN Environment Programme. <https://www.cleanairblueskies.org/>
- UNEP. (2023). *Pollution action note – Data you need to know*. UN Environment Programme. <https://www.unep.org/interactives/air-pollution-note/>
- UNEP. (N.D.). *Across the globe, nine out of every ten people are breathing unclear air*. UN Environment Programme. <https://www.unep.org/interactive/all-you-need-to-know-air-pollution/sw>
- Voice online. (2018, February 19). *Water spraying truck–weapon to eliminate smog in Beijing*. <https://voicetv.co.th/read/rkjNLbuDG?fbclid=IwAR0s6QEY2OXQNyMyUjdB1YS0xqLo9LSjzbRUPEfzvMa5Cn-K43wvS6saOQc> (in Thai)
- Wang, J., Liu, D., Xu, X., Ma, J., & Han, L. (2022). Analysis of the temporal and spatial pattern of air pollution and the heterogeneity of its influencing factors in central Inner Mongolia from 2016 to 2018. *Front. Environ. Sci.* 10. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.893437>
- Zhou, X., Strezov, V., Jiang, Y., Kan, T., & Evans, T. (2022). Temporal and spatial variations of air pollution across China from 2015 to 2018. *Journal of Environmental Sciences*, 112, 161-169. <https://doi.org/10.1016/j.jes.2021.04.025>