

## บทความวิจัย

# การวิเคราะห์เชิงสาเหตุของโอโซนระดับพื้นดินและตัวแปรอื่นๆ ในเขตควบคุมมลพิษมาบตาพุด จังหวัดระยอง ประเทศไทย

เขตสิริ คำขอด<sup>1\*</sup> พิมพ์กา ธาณินพงศ์<sup>2,3</sup> วฐา มินเสน<sup>3</sup> และ สาลินี อ่างเลาหะพันธุ์<sup>3</sup>

ได้รับบทความ: 4 กุมภาพันธ์ 2563

ได้รับบทความแก้ไข: 14 พฤษภาคม 2563

ยอมรับตีพิมพ์: 8 มิถุนายน 2563

## บทคัดย่อ

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่ออธิบายความสัมพันธ์เชิงสาเหตุระหว่างโอโซนระดับพื้นดินและตัวแปรอื่นๆ ได้แก่ ปัจจัยปฏิกิริยาโฟโตเคมี ปัจจัยทางอุตุนิยมวิทยา ปัจจัยมลพิษทางอากาศ และปัจจัยสารประกอบอินทรีย์ระเหยง่าย โดยใช้การวิเคราะห์เชิงสาเหตุด้วยการสร้างตัวแบบเส้นทางกำลังสองน้อยที่สุดบางส่วน (Partial Least Squares Path Modeling: PLS-PM) การศึกษานี้รวบรวมข้อมูลระหว่างเดือนมกราคม พ.ศ. 2551 ถึง เดือนสิงหาคม พ.ศ. 2562 จากกรมควบคุมมลพิษ กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม ประเทศไทย ผลการศึกษพบว่าปัจจัยสารอินทรีย์ระเหยง่ายมีผลกระทบทางตรงเชิงบวกต่อมลพิษทางอากาศและมีผลกระทบทางอ้อมเชิงบวกต่อความเข้มข้นของโอโซนระดับพื้นดิน ซึ่งมีค่าผลกระทบเท่ากับ 0.2384 และ 0.1777 ตามลำดับ ขณะที่ปัจจัยทางอุตุนิยมวิทยามีผลกระทบทางตรงเชิงลบต่อปัจจัยมลพิษทางอากาศและปัจจัยสารอินทรีย์ระเหยง่ายด้วยค่าผลกระทบ -0.7312 และ -0.5824 ตามลำดับ นอกจากนี้ พบว่าปัจจัยมลพิษทางอากาศและปัจจัยปฏิกิริยาโฟโตเคมีมีผลกระทบทางตรงเชิงบวกต่อความเข้มข้นของโอโซนระดับพื้นดิน โดยมีค่าผลกระทบเท่ากับ 0.7453 และ 0.1423 ตามลำดับ อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาผลกระทบรวมพบว่าปัจจัยหลักที่มีผลต่อการเพิ่มขึ้นของความเข้มข้นของโอโซน ระดับพื้นดิน คือ ปัจจัยมลพิษทางอากาศ ขณะที่ปัจจัยที่มีผลต่อการลดลงของความเข้มข้นของโอโซนระดับพื้นดิน คือ ปัจจัยทางอุตุนิยมวิทยา

**คำสำคัญ:** โอโซนระดับพื้นดิน PLS-PM การวิเคราะห์เชิงสาเหตุ ระยอง

<sup>1</sup>บัณฑิตศึกษา สาขาสถิติประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

<sup>2</sup>ศูนย์วิจัยวิทยาการข้อมูล คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

<sup>3</sup>ภาควิชาสถิติ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

\*ผู้นิพนธ์ประสานงาน, email: ketsiri\_khamkhod@hotmail.com

# Causal Analysis of Ground-Level Ozone and Other Variables in Map Ta Phut Pollution Control Zone, Rayong Province, Thailand

Ketsiri Khamkhod<sup>1\*</sup>, Phimpaka Taninpong<sup>2,3</sup>, Watha Minsan<sup>3</sup>  
and Salinee Thumronglaohapun<sup>3</sup>

---

*Received: 4 February 2020*

*Revised: 14 May 2020*

*Accepted: 8 June 2020*

## ABSTRACT

This study aims to describe the causal relationship between ground-level ozone and other variables including photochemical reaction factors, meteorological factors, air pollution factors, and Volatile Organic Compound (VOCs) factors using causal analysis by partial least squares path modeling (PLS-PM). The data were collected during January 2008 to August 2019 from Pollution Control Department, Ministry of Natural Resources and Environment, Thailand. The results show that VOCs factors have the direct positive impact on air pollution factor and have indirect positive impact on ground-level ozone concentration with impact values of 0.2384 and 0.1777, respectively. In contrast, meteorological factors have direct negative impact on air pollution factors and VOCs factors with impact values of -0.7312 and -0.5824, respectively. Furthermore, air pollution factors and photochemical reaction factors have direct positive impact on ground-level ozone concentration with impact value of 0.7453 and 0.1423, respectively. However, the total impacts show that the main factor affects the increase on ground-level ozone concentration is air pollution factors whereas the factor affects the decrease on ground-level ozone concentration is meteorological factors.

**Keywords:** Ground-Level Ozone, PLS-PM, Causal Analysis, Rayong

---

<sup>1</sup>Master's Degree Program in Applied Statistics, Faculty of Science, Chiang Mai University.

<sup>2</sup>Data Science Research Center, Faculty of Science, Chiang Mai University.

<sup>3</sup>Department of Statistics, Faculty of Science, Chiang Mai University.

\*Corresponding author, email: ketsiri\_khamkhod@hotmail.com

## บทนำ

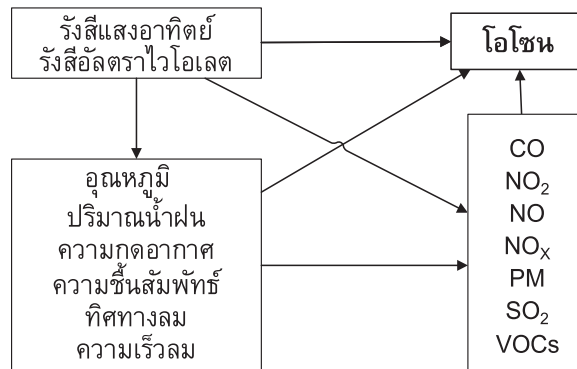
โอโซนระดับพื้นดิน (Ground-Level Ozone) เกิดขึ้นในบรรยากาศชั้นโทรโพสเฟียร์ (Troposphere) เป็นก๊าซที่ประกอบด้วยออกซิเจนสามอะตอม ( $O_3$ ) โดยทั่วไปแล้วโอโซนเกิดจากการแตกตัวของโมเลกุลของออกซิเจน ( $O_2$ ) เป็นอะตอมของออกซิเจน (O) โดยแหล่งกำเนิดหลักของอะตอมของออกซิเจนและไนโตรเจนมอนอกไซด์ (Nitrogen Monoxide: NO) มาจากการแตกตัวของไนโตรเจนไดออกไซด์ (Nitrogen Dioxide:  $NO_2$ ) โดยมีแสงอาทิตย์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา จากนั้นอะตอมของออกซิเจนจะรวมตัวกับโมเลกุลของออกซิเจนกลายเป็นโอโซน [1-3]

โอโซนระดับพื้นดินไม่ได้ถูกปล่อยสู่อากาศโดยตรง แต่เกิดจากปฏิกิริยาโฟโตเคมี (Photochemical Reaction) ซึ่งมีสารตั้งต้นเป็นออกไซด์ของไนโตรเจน (Oxide of Nitrogen:  $NO_x$ ) และสารประกอบอินทรีย์ระเหยง่าย (Volatile Organic Compound: VOCs) ทั้งนี้  $NO_x$  และ VOCs ส่วนใหญ่มีแหล่งกำเนิดมาจากยานพาหนะ โรงไฟฟ้า โรงงานอุตสาหกรรม คังน้ำมัน สถานีให้บริการน้ำมัน โรงงานเคมี และอื่น ๆ รวมถึงการระเหยจากซากพืชซากสัตว์ตามธรรมชาติและการเผาไหม้ป่าไม้ [4-5] การเพิ่มขึ้นของความเข้มข้นของโอโซนในระดับพื้นดินจึงทำให้เกิดปรากฏการณ์หมอกควัน (Photochemical Smog) ซึ่งมีลักษณะเป็นหมอกหนาสีขาวปกคลุมพื้นที่ ก่อให้เกิดมลพิษทางอากาศและเป็นอันตรายต่อสิ่งแวดล้อม และสุขภาพของมนุษย์โดยเฉพาะระบบทางเดินหายใจ เนื่องจากโอโซนมีฤทธิ์กัดกร่อน และทำลายเยื่อต่างๆ [1, 5-6]

การเปลี่ยนแปลงระดับความเข้มข้นของโอโซนถูกควบคุมด้วยกระบวนการที่หลากหลายรวมถึงการเปลี่ยนแปลงสภาพอากาศและคุณภาพอากาศ โดยอุณหภูมิเป็นปัจจัยที่สำคัญที่สุดที่ส่งผลต่อความเข้มข้นของโอโซน [7-13] ซึ่งอุณหภูมิ [7-8, 13] ความชื้นสัมพัทธ์ [13] รังสีอัลตราไวโอเลตบี (UVB) และรังสีแสงอาทิตย์ [8-9, 12] มีความสัมพันธ์เชิงบวกกับความเข้มข้นของโอโซน นอกจากนี้การเปลี่ยนแปลงของการผสมผสานระหว่างอุณหภูมิ ความชื้น และ ปริมาณน้ำฝนอาจส่งผลกระทบต่อความเข้มข้นของโอโซน ส่วนความเร็วลมมีความสัมพันธ์เชิงลบกับความเข้มข้นของโอโซนซึ่งความเข้มข้นของโอโซนจะลดลงเมื่อความเร็วลมเพิ่มขึ้น [11, 13-14] ในขณะที่ทิศทางลมมีอิทธิพลมากที่สุดในการเปลี่ยนแปลงของความเข้มข้นของโอโซน [8, 14] เนื่องจากหากทิศทางลมค่อนข้างคงที่จะพบระดับมลพิษสูงอย่างต่อเนื่องเมื่อเทียบกับบริเวณพื้นที่เดียวกันในขณะที่มีทิศทางเคลื่อนที่ [15] สำหรับปัจจัยมลพิษทางอากาศ พบว่า ฝุ่นละอองขนาดเล็กไม่เกิน 2.5 ไมครอน ( $PM_{2.5}$ ) มีความสัมพันธ์เชิงบวกกับความเข้มข้นของโอโซนในฤดูร้อนและเชิงลบในช่วงฤดูหนาว [16] นอกจากนี้ความเข้มข้นของโอโซนยังมีความสัมพันธ์เชิงลบกับ  $NO_x$  NO และ  $NO_2$  [9, 12, 14, 17] ในทางตรงกันข้ามความเข้มข้นของโอโซนยังมีความสัมพันธ์เชิงบวกกับความเข้มข้นของ VOCs [9] ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของโอโซนกับตัวแปรทางอุตุนิยมวิทยา มลพิษทางอากาศ และ VOCs แสดงไว้ในรูปที่ 1

ดังนั้นเพื่อควบคุมความเข้มข้นของโอโซนระดับพื้นดินไม่ให้มีมากจนเป็นอันตรายต่อสิ่งแวดล้อมและสุขภาพของมนุษย์จึงเป็นเรื่องสำคัญอย่างยิ่งที่จะประเมินความแตกต่างของตัวแปรหรือปัจจัยที่มีผลต่อความเข้มข้นของโอโซนระดับพื้นดิน และนำไปสู่การใช้มาตรการที่เหมาะสมเพื่อป้องกันสาเหตุและผลกระทบที่เกิดจากความเข้มข้นของโอโซนระดับพื้นดิน การศึกษานี้จึงใช้การวิเคราะห์เชิงสาเหตุด้วยการสร้าง

ตัวแบบเส้นทางกำลังสองน้อยที่สุดบางส่วน (Partial Least Squares Modeling: PLS-PM) เพื่ออธิบายความสัมพันธ์เชิงสาเหตุระหว่างความเข้มข้นของโอโซนระดับพื้นดินและตัวแปรอื่นๆ ทั้งนี้การสร้างตัวแบบและการตรวจสอบความเหมาะสมของตัวแบบดำเนินการโดยใช้แพ็คเกจ PLS predict ในโปรแกรมซอฟต์แวร์ R (<https://github.com/ISS-Analytics/pls-predict>) [18]



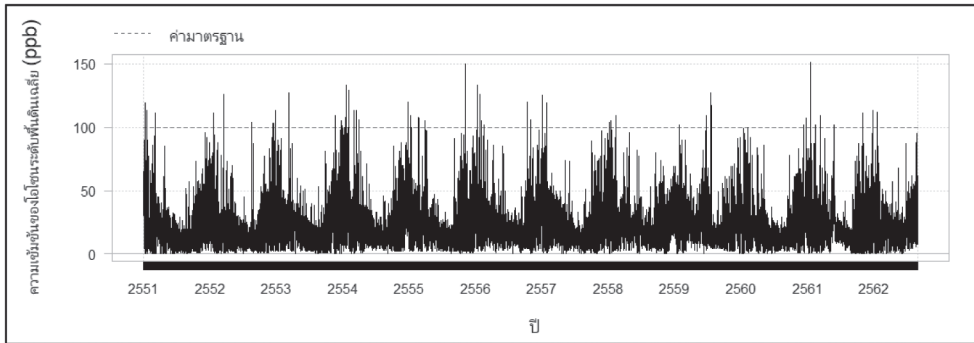
รูปที่ 1 ความสัมพันธ์ระหว่างโอโซนกับตัวแปรทางอุตุนิยมวิทยา มลพิษทางอากาศ และ VOCs

## วิธีดำเนินการวิจัย

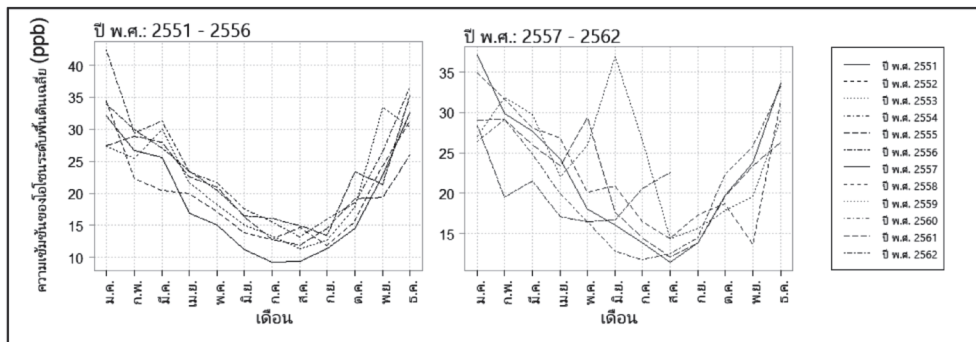
การศึกษาครั้งนี้ทำการวิเคราะห์เชิงสาเหตุของโอโซนระดับพื้นดินและตัวแปรต่างๆ ในเขตควบคุมมลพิษมาตาฟูด จังหวัดระยอง โดยมีรายละเอียดพื้นที่ศึกษาและการเก็บรวบรวมข้อมูล รวมถึงทฤษฎีตัวแบบเส้นทางกำลังสองน้อยที่สุดบางส่วนที่ใช้ในการวิเคราะห์ และการตรวจสอบความเหมาะสมของตัวแบบเส้นทางกำลังสองน้อยที่สุดบางส่วนด้วยสถิติทดสอบทีและค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ ดังนี้

## พื้นที่ศึกษาและการเก็บรวบรวมข้อมูล

จังหวัดระยองตั้งอยู่ทางทิศตะวันออกของประเทศไทยซึ่งเป็นเขตควบคุมมลพิษ โดยเทศบาลเมืองมาตาฟูดเป็นพื้นที่โครงการพัฒนาชายฝั่งทะเลตะวันออกและเป็นเขตอุตสาหกรรม ปัจจุบันนิคมอุตสาหกรรมมาตาฟูดเป็นฐานการผลิตที่สำคัญของประเทศไทย เช่น ปิโตรเคมี เคมีภัณฑ์ เหล็กและโลหะ และโรงกลั่นน้ำมัน การรวมกลุ่มอุตสาหกรรมในพื้นที่นี้จึงทำให้เกิดปัญหาของ VOCs ดังนั้นบริเวณนี้จึงมีปัญหามลพิษทางอากาศ จากการรวบรวมข้อมูลความเข้มข้นของโอโซนรายชั่วโมงในพื้นที่ศึกษา ช่วงเดือนมกราคม ปี พ.ศ. 2551 ถึงสิงหาคม ปี พ.ศ. 2562 แสดงในรูปที่ 2 พบว่า ค่าความเข้มข้นของโอโซนสูงสุดรายชั่วโมงของแต่ละปีสูงเกินค่ามาตรฐาน (100 ppb) กำหนดโดยคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ สอดคล้องตามที่ระบุในหนังสือสถานการณ์มลพิษของประเทศไทย [19]



รูปที่ 2 ความเข้มข้นของโอโซนระดับพื้นดินรายชั่วโมง ระหว่างปี พ.ศ. 2551-2562



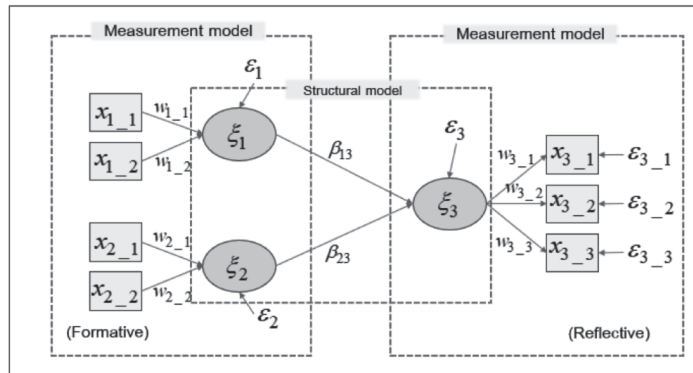
รูปที่ 3 ความเข้มข้นของโอโซนระดับพื้นดินเฉลี่ยรายเดือนในช่วง ระหว่างปี พ.ศ. 2551-2562

ข้อมูลที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้คือข้อมูลรายชั่วโมง ได้แก่ ข้อมูลอุตุนิยมวิทยา ข้อมูลสารมลพิษทางอากาศ ความเข้มข้นของโอโซนระดับพื้นดิน ( $O_3$ ) ข้อมูลรังสีดวงอาทิตย์ และ ข้อมูลรายเดือนของ VOCs ของสถานีตรวจวัดโรงพยาบาลส่งเสริมสุขภาพมาบตาพุด (29t) โดยกรมควบคุมมลพิษ ในช่วงเดือนมกราคม ปี พ.ศ. 2551 ถึงสิงหาคม ปี พ.ศ. 2562 จากในรูปที่ 3 พบว่าความเข้มข้นของโอโซนในเขตนิกมอุตสาหกรรมมาบตาพุดมีค่าสูงสุดในช่วงฤดูหนาว (พฤศจิกายน-กุมภาพันธ์) และต่ำสุดในช่วงฤดูฝน (กรกฎาคม-สิงหาคม) โดยค่าเฉลี่ยโอโซนรอบปีจะมีค่าสูงสุดในช่วงฤดูหนาวและค่อยๆ ลดลงในฤดูร้อน แล้วลดลงต่ำสุดในช่วงฤดูฝน [20] เนื่องจากปริมาณน้ำฝนและความชื้นสัมพัทธ์มีความสัมพันธ์เชิงลบกับความเข้มข้นของโอโซน และรังสีดวงอาทิตย์มีความสัมพันธ์เชิงบวกกับความเข้มข้นของโอโซน [21]

### ตัวแบบสมการโครงสร้าง (Structural Equation Modeling : SEM)

ตัวแบบสมการโครงสร้าง (Structural Equation Modeling: SEM) พัฒนาโดย Charles Spearman ในปี ค.ศ. 1904 ต่อมา Sewall Wright ได้เสนอวิธีการวิเคราะห์เส้นทางสำหรับการประเมินความสัมพันธ์เชิงสาเหตุระหว่างตัวแปรในปี ค.ศ. 1934 SEM เป็นเทคนิคที่ใช้สำหรับการทดสอบและประเมินความสัมพันธ์เชิงสาเหตุบนพื้นฐานของการวิเคราะห์หลายตัวแปรโดยรวบรวมหลายเทคนิคเข้าด้วยกัน เพื่อวิเคราะห์ข้อมูล เช่น การวิเคราะห์ปัจจัย (Factor Analysis) การวิเคราะห์เส้นทาง (Path Analysis) และการวิเคราะห์การถดถอยพหุคูณ (Multiple Regression Analysis)

SEM ประกอบด้วย 2 องค์ประกอบ คือ ตัวแบบการวัด (Measurement Model) และ ตัวแบบโครงสร้าง (Structural Model) โดยตัวแบบการวัดจะระบุความสัมพันธ์เชิงเส้นของตัวแปรแฝง (Latent Variables :  $\xi$ ) กับตัวแปรสังเกต (Observed Variables:  $x$ ) โดยที่ตัวแปรแฝงคือตัวแปรที่แสดงถึงแนวคิด ขณะที่ตัวแปรสังเกตคือตัวแปรที่เก็บค่าได้โดยตรง ตัวแบบโครงสร้างจะระบุความสัมพันธ์เชิงสาเหตุระหว่างตัวแปรแฝงสองตัวซึ่งมีค่าสัมประสิทธิ์เส้นทางที่แสดงการเชื่อมโยง [22] ดังรูปที่ 4



รูปที่ 4 ตัวแบบพื้นฐานของการวิเคราะห์ด้วยตัวแบบสมการโครงสร้าง

การประมาณค่าพารามิเตอร์ใน SEM มีสองวิธี ได้แก่ วิธีใช้ความแปรปรวนร่วมเป็นฐาน (Covariance-Based SEM: CB-SEM) และ วิธีใช้ความแปรปรวนเป็นฐาน (Variance-Based SEM: VB-SEM) สำหรับกระบวนการของ CB-SEM จะใช้วิธีการน่าจะเป็นสูงสุด (Maximum Likelihood: ML) ในการประมาณค่าพารามิเตอร์  $\beta$  ขณะที่กระบวนการของ VB-SEM จะใช้วิธีกำลังสองน้อยที่สุด (Ordinary Least Square: OLS) ในการประมาณค่าพารามิเตอร์  $\beta$  และวิเคราะห์ค่าสถิติคร่าวๆหนึ่งส่วน VB-SEM เรียกอีกอย่างว่า ตัวแบบเส้นทางกำลังสองน้อยที่สุดบางส่วน (PLS-PM) [23] อย่างไรก็ตาม CB-SEM เหมาะสำหรับข้อมูลที่มีการแจกแจงปกติหลายตัวแปรและจำเป็นต้องใช้ตัวอย่างขนาดใหญ่เนื่องจากใช้วิธี ML ในการประมาณพารามิเตอร์ ขณะที่ PLS-PM สามารถใช้ตัวอย่างขนาดเล็กได้ และมีกำลังทางสถิติ (Statistical Power) ที่สูง [22]

#### ตัวแบบเส้นทางกำลังสองน้อยที่สุดบางส่วน (PLS-PM)

PLS-PM ประกอบด้วยองค์ประกอบหลัก 2 องค์ประกอบเช่นเดียวกับในรูปที่ 4 หากแต่ใน PLS-PM เรียกตัวแบบการวัดว่า ตัวแบบภายนอก (Outer Model) และตัวแบบโครงสร้างว่า ตัวแบบภายใน (Inner Model) โดยตัวแบบภายนอกใช้ระบุความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่างตัวแปรแฝงและตัวแปรสังเกต ขณะที่ตัวแบบภายในใช้ระบุความสัมพันธ์เชิงสาเหตุระหว่างตัวแปรแฝงสองตัว ตัวแบบการวัดใน PLS-PM มี 2 ประเภท ได้แก่ ประเภทมาตรวัดชี้ออก (Reflective Indicator) และประเภทมาตรวัดชี้เข้า (Formative Indicator) โดยมาตรวัดชี้ออกเป็นการสะท้อนการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรแฝง ในขณะที่มาตรวัดชี้เข้าเป็นสถานการณ์ที่ตัวแปรแฝงเกิดขึ้นจากการรวมกันของตัวแปรสังเกตตามแนวคิดของสมการการถดถอย พหุคูณซึ่งถือว่าใช้ตัวแปรอิสระในการอธิบายตัวแปรตาม

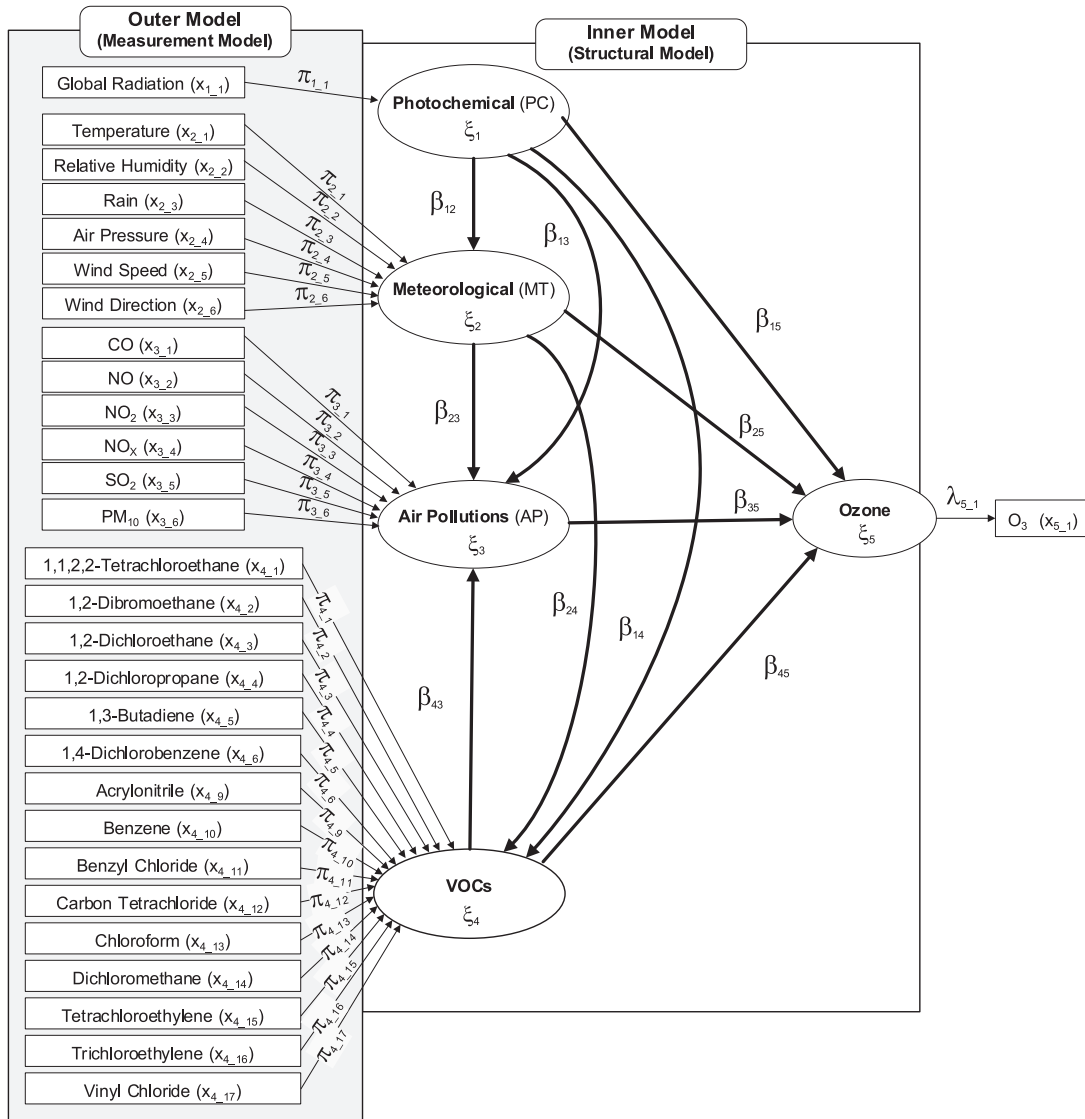
โดยทั่วไปแล้วการสร้าง PLS-PM ต้องมีการออกแบบตัวแบบแนวคิดเบื้องต้นมาก่อน เพื่อแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยต่างๆ ที่มีอิทธิพลต่อความเข้มข้นของโอโซนระดับพื้นดิน จากความสัมพันธ์ดังรูปที่ 1 กำหนดให้ปัจจัยทางปฏิกิริยาโฟโตเคมี (Photochemical: PC) ปัจจัยทางอุตุนิยมวิทยา (Meteorological: MT) ปัจจัยทางมลพิษทางอากาศ (Air Pollutions: AP) และปัจจัยสารอินทรีย์ระเหยง่าย (Volatile Organic Compound: VOCs) เป็นมาตรวัดชี้เข้า ส่วนปัจจัยโอโซนระดับพื้นดินเป็นมาตรวัดชี้ออก ซึ่งตัวแปรทั้งหมดในแต่ละปัจจัยที่แสดงไว้ในตารางที่ 1 และจะนำไปใช้ในการวิเคราะห์เชิงสาเหตุของความเข้มข้นของโอโซนระดับพื้นดิน อย่างไรก็ตามข้อมูลที่เก็บรวบรวมมามีค่าสูญหาย ในการศึกษาครั้งนี้จึงทำการประมาณค่าสูญหายของข้อมูลทางอุตุนิยมวิทยา ข้อมูลมลพิษทางอากาศ และข้อมูลโอโซน ซึ่งเป็นข้อมูลรายชั่วโมงทำการแทนที่ด้วยค่าเฉลี่ยของข้อมูลที่มีในชั่วโมง วัน และเดือนเดียวกันของปีอื่นๆ จากนั้นคำนวณค่าเฉลี่ยรายเดือน สำหรับข้อมูล VOCs ซึ่งเป็นข้อมูลรายเดือน ค่าที่สูญหายจะถูกประมาณโดยค่าเฉลี่ยของ VOCs ที่มีในเดือนเดียวกันของปีอื่นๆ ทั้งนี้ตัวแปรที่มีจำนวนข้อมูลสูญหายมากที่สุดคือ ตัวแปรรังสีโลก คิดเป็นร้อยละ 19.4 ส่วนตัวแปรอื่นๆ จำนวนข้อมูลสูญหายจะอยู่ในช่วงร้อยละ 5-14 การศึกษาครั้งนี้ใช้การประมาณค่าสูญหายด้วยวิธีการแทนที่ด้วยค่าเฉลี่ยซึ่งเหมาะสำหรับข้อมูลอนุกรมเวลา โดยเฉพาะอย่างยิ่งในกรณีที่ข้อมูลสูญหายเป็นช่วงกว้าง ทั้งนี้ในส่วนของ VOCs ได้ตัดตัวแปร 1,4-Dioxane ( $x_{4-7}$ ) และ Acetaldehyde ( $x_{4-8}$ ) เนื่องจากมีค่าสูญหายมากเกินไป ซึ่ง 1,4-Dioxane และ Acetaldehyde สูญหายคิดเป็นร้อยละ 59.29 และ 68.57 ตามลำดับ สำหรับตัวแบบแนวคิดของปัญหานี้แสดงดังรูปที่ 5 โดยมีตัวแปรแฝงที่เป็นตัวแปรอิสระ ประกอบด้วย ปัจจัยทางปฏิกิริยาโฟโตเคมี ( $\xi_1$ ) ปัจจัยทางอุตุนิยมวิทยา ( $\xi_2$ ) ปัจจัยมลพิษทางอากาศ ( $\xi_3$ ) และปัจจัย VOCs ( $\xi_4$ ) ขณะที่ตัวแปรตามคือปัจจัยโอโซนระดับพื้นดิน ( $\xi_5$ ) โดยที่รูปวงรีชี้แสดงตัวแปรแฝง และรูปสี่เหลี่ยมแสดงตัวแปรสังเกต ขณะที่ลูกศรแสดงทิศทางและสาเหตุของตัวแปร



ตารางที่ 1 รายละเอียดของตัวแปรที่ศึกษา

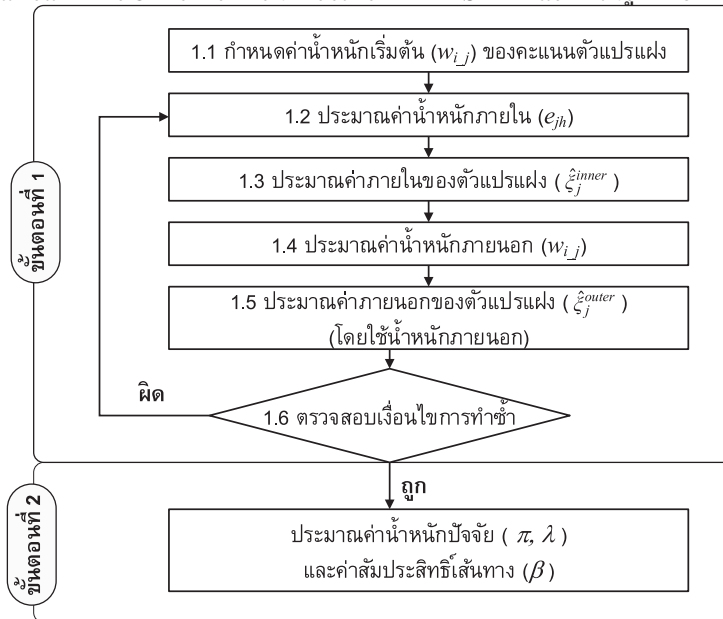
ปัจจัย	ตัวแปรแฝง	คำอธิบาย	ตัวแปรสังเกต
ปัจจัยทางปฏิกิริยาโฟโตเคมี (PC)	$\xi_1$	รังสีแห่งโลก (Global Radiation) ( $w/m^2$ )	$x_{1\_1}$
ปัจจัยทางอุตุนิยมวิทยา (MT)	$\xi_2$	อุณหภูมิ (Temperature) ( $^{\circ}C$ )	$x_{2\_1}$
		ความชื้นสัมพัทธ์ (Relative Humidity) (%RH)	$x_{2\_2}$
		ปริมาณน้ำฝน (Rain) (mm)	$x_{2\_3}$
		ความกดอากาศ (Air Pressure) (mm/Hg)	$x_{2\_4}$
		ความเร็วลม (Wind Speed) (m/s)	$x_{2\_5}$
		ทิศทางลม (Wind Direction) (Deg.M)	$x_{2\_6}$
ปัจจัยทางมลพิษทางอากาศ (AP)	$\xi_3$	คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) (ppm)	$x_{3\_1}$
		ไนโตรเจนมอนอกไซด์ (NO) (ppb)	$x_{3\_2}$
		ไนโตรเจนไดออกไซด์ ( $NO_2$ ) (ppb)	$x_{3\_3}$
		ออกไซด์ของไนโตรเจน ( $NO_x$ ) (ppb)	$x_{3\_4}$
		ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ( $SO_2$ ) (ppb)	$x_{3\_5}$
		ฝุ่นละอองขนาดเล็กกว่า 10 ไมครอน ( $PM_{10}$ ) ( $\mu g/m^3$ )	$x_{3\_6}$
ปัจจัยสารอินทรีย์ระเหยง่าย (VOCs)	$\xi_4$	1,1,2,2-Tetrachloroethan ( $\mu g/m^3$ )	$x_{4\_1}$
		1,2-Dibromoethane ( $\mu g/m^3$ )	$x_{4\_2}$
		1,2-Dichloroethane ( $\mu g/m^3$ )	$x_{4\_3}$
		1,2-Dichloropropane ( $\mu g/m^3$ )	$x_{4\_4}$
		1,3-Butadiene ( $\mu g/m^3$ )	$x_{4\_5}$
		1,4-Dichlorobenzene ( $\mu g/m^3$ )	$x_{4\_6}$
		1,4-Dioxane ( $\mu g/m^3$ )	$x_{4\_7}$
		Acetaldehyde ( $\mu g/m^3$ )	$x_{4\_8}$
		Acrylonitrile ( $\mu g/m^3$ )	$x_{4\_9}$
		Benzene ( $\mu g/m^3$ )	$x_{4\_10}$
		Benzyl Chloride ( $\mu g/m^3$ )	$x_{4\_11}$
		Carbon Tetrachloride ( $\mu g/m^3$ )	$x_{4\_12}$
		Chloroform ( $\mu g/m^3$ )	$x_{4\_13}$
		Dichloromethane ( $\mu g/m^3$ )	$x_{4\_14}$
		Tetrachloroethylene ( $\mu g/m^3$ )	$x_{4\_15}$
		Trichloroethylene ( $\mu g/m^3$ )	$x_{4\_16}$
Vinyl Chloride ( $\mu g/m^3$ )	$x_{4\_17}$		
ปัจจัยโอโซนระดับพื้นดิน (Ozone)	$\xi_5$	ความเข้มข้นของโอโซนระดับพื้นดิน ( $O_3$ ) (ppb)	$x_{5\_1}$





รูปที่ 5 ตัวแบบแนวคิดแสดงความสัมพันธ์เชิงสาเหตุระหว่างตัวแปร

วัตถุประสงค์หลักของ PLS-PM คือ การประเมินทั้งตัวแบบการภายนอกและตัวแบบภายในในตัวแบบภายในจะประมาณค่าสัมประสิทธิ์เส้นทาง (Path Coefficient:  $\beta$ ) เพื่อแสดงความสัมพันธ์เชิงสาเหตุระหว่างตัวแปรแฝงทั้งสองตัว กระบวนการวิเคราะห์ PLS-PM แสดงในรูปที่ 6



รูปที่ 6 กระบวนการวิเคราะห์ PLS-PM

ซึ่งขั้นตอนวิธีสามารถแบ่งออกเป็นสองขั้นตอนหลัก ได้แก่ ขั้นตอนการคำนวณคะแนนตัวแปรแฝง และขั้นตอนการประมาณค่าถ่วงปัจจัย โดยมีรายละเอียดแต่ละขั้นตอนดังนี้

**ขั้นตอนที่ 1** การคำนวณคะแนนตัวแปรแฝง ( $\xi_j$ )

1.1 ปรับตัวแปรสังเกตทั้งหมดให้อยู่ในรูปค่ามาตรฐาน และกำหนดน้ำหนักเริ่มต้น ( $w_{ij}$ ) ให้เท่ากับ 1 และประมาณตัวแปรแฝงภายนอกตามสมการ (1)

$$\xi_j^{outer} = \sum_i w_{ij} x_{ij}; w_{ij} = 1 \tag{1}$$

เมื่อ  $\xi_j^{outer}$  คือ ตัวประมาณตัวแปรแฝงภายนอกที่  $j$   
 $x_{ij}$  คือ ค่าของตัวแปรที่สังเกตได้ทั้งหมด และ  
 $w_{ij}$  คือ น้ำหนักของตัวแปรที่สังเกตได้

1.2 ประมาณน้ำหนักภายใน ( $e_{jh}$ ) ตามความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรแฝง ดังสมการ (2) ซึ่งกระบวนการนี้ภายหลังจะถูกแทนที่ด้วยน้ำหนักสำหรับเส้นทาง ( $\beta$ ) ในขั้นตอนที่ 2

$$e_{jh} = \begin{cases} cov(\xi_j^{outer}, \xi_h^{outer}) & \xi_j, \xi_h \text{ มีเส้นทางเชื่อมโยงกัน} \\ 0 & \text{อื่นๆ} \end{cases} \tag{2}$$

1.3 ประมาณค่าภายในของตัวแปรแฝง ( $\xi_j^{inner}$ ) โดยใช้ชุดผลรวมเชิงเส้นของน้ำหนักภายใน ( $e_{jh}$ )

กับตัวแปรแฝงภายนอกจากขั้นที่ 1.1

$$\xi_j^{inner} = \sum_h e_{jh} \xi_h^{outer} \quad (3)$$

1.4 ประมวลน้ำหนักภายนอกใหม่ ( $w_{ij}$ ) โดยปรับน้ำหนักเริ่มต้นในขั้นที่ 1.1 ให้ตรงตามมาตรวัดที่ใช้ในตัวแบบดังสมการ (4)

$$x_{ij} = c_{ij} + w_{ij} \xi_j^{inner} + \varepsilon_{ij} \quad (\text{มาตรวัดชี้้ออก}) \quad (4)$$

$$\xi_j^{inner} = c_j + \sum_i w_{ij} x_{ij} + \varepsilon_j \quad (\text{มาตรวัดชี้เข้า})$$

เมื่อ  $\xi_j^{inner}$  คือ ตัวประมวลตัวแปรแฝงภายในที่  $j$

$c_{ij}$  และ  $c_j$  คือ ค่าคงที่ของตัวแบบถดถอย

$\varepsilon_{ij}$  และ  $\varepsilon_j$  คือ ค่าความคลาดเคลื่อนของตัวแบบการถดถอย

1.5 ประมวลค่าภายนอกของตัวแปรแฝง  $\xi_j^{inner}$  โดยใช้สมการ (1) และใช้น้ำหนัก ( $w_{ij}$ ) ที่ได้จากขั้นที่ 1.4

1.6 ตรวจสอบเงื่อนไขการทำงานซ้ำซึ่งเป็นการตรวจสอบทั้งตัวแบบภายในและภายนอกว่าค่าผลรวมของขนาดผลต่างระหว่างน้ำหนักรอบสุดท้ายและน้ำหนักรอบก่อนหน้า ( $d_k$ ) ดังสมการ (5) มีค่าน้อยกว่า  $10^{-5}$  [22] หาก  $d_k$  มีค่ามากกว่า  $10^{-5}$  จะทำซ้ำตั้งแต่ขั้นที่ 1.2-1.5 จนกว่า  $d_k$  จะมีค่าน้อยกว่า  $10^{-5}$

$$d_k = \sum_{i,j} |w_{ij}^{(k)} - w_{ij}^{(k-1)}| \quad (5)$$

เมื่อ  $k$  คือ รอบสุดท้ายที่ใช้ประมวลน้ำหนัก

**ขั้นตอนที่ 2** เป็นการประมวลค่าถ่วงปัจจัย (Factor Loading:  $\pi$ ,  $\lambda$ ) ของตัวแบบภายนอกดังสมการ (6) และค่าสัมประสิทธิ์เส้นทาง ( $\beta$ ) ของตัวแบบภายในดังสมการ (7) โดยใช้คะแนนตัวแปรแฝงจากขั้นตอนแรก ด้วยวิธี OLS และกำหนดให้  $\xi_j = \xi_j^{outer}$

$$x_{ij} = c_{ij} + \lambda_{ij} \xi_j + \varepsilon_{ij} \quad (\text{มาตรวัดชี้้ออก}) \quad (6)$$

$$\xi_j = c_j + \sum_i \pi_{ij} x_{ij} + \varepsilon_j \quad (\text{มาตรวัดชี้เข้า})$$

เมื่อ  $\lambda_{ij}, \pi_{ij}$  คือ ค่าถ่วงปัจจัย

$\xi_j$  คือ คะแนนตัวแปรแฝงที่  $j$

$$\xi_j = \sum_h \beta_{hj} \xi_h + \zeta_j \quad (7)$$

เมื่อ  $\beta_{hj}$  คือ สัมประสิทธิ์เส้นทางของตัวแบบ และ

$\xi_h$  คือ คะแนนตัวแปรแฝงที่  $h$  ที่ส่งผลต่อ  $\xi_j$

$\zeta_j$  คือ ค่าความคลาดเคลื่อนของตัวแบบการถดถอย

ดังนั้นในการศึกษาครั้งนี้สามารถเขียนสมการเพื่อประมวลค่าถ่วงปัจจัย ( $\pi$ ) ได้ดังสมการ (8-11) และค่าถ่วงปัจจัย ( $\lambda$ ) ได้ดังสมการ (12)

$$\xi_1 = c_1 + \pi_{1_1} x_{1_1} + \varepsilon_1 \quad (8)$$

$$\xi_2 = c_2 + \pi_{2_1} x_{2_1} + \pi_{2_2} x_{2_2} + \pi_{2_3} x_{2_3} + \pi_{2_4} x_{2_4} + \pi_{2_5} x_{2_5} + \pi_{2_6} x_{2_6} + \varepsilon_2 \quad (9)$$

$$\xi_3 = c_3 + \pi_{3_1} x_{3_1} + \pi_{3_2} x_{3_2} + \pi_{3_3} x_{3_3} + \pi_{3_4} x_{3_4} + \pi_{3_5} x_{3_5} + \pi_{3_6} x_{3_6} + \varepsilon_3 \quad (10)$$

$$\xi_4 = c_4 + \pi_{4_1} x_{4_1} + \pi_{4_2} x_{4_2} + \pi_{4_3} x_{4_3} + \pi_{4_4} x_{4_4} + \pi_{4_5} x_{4_5} + \pi_{4_6} x_{4_6} + \pi_{4_9} x_{4_9} + \pi_{4_{10}} x_{4_{10}} + \pi_{4_{11}} x_{4_{11}} + \pi_{4_{12}} x_{4_{12}} + \pi_{4_{13}} x_{4_{13}} + \pi_{4_{14}} x_{4_{14}} + \pi_{4_{15}} x_{4_{15}} + \pi_{4_{16}} x_{4_{16}} + \pi_{4_{17}} x_{4_{17}} + \varepsilon_4 \quad (11)$$

$$x_{5_1} = c_{5_1} + \lambda_{5_1} \xi_5 + \varepsilon_{5_1} \quad (12)$$

ส่วนสมการเพื่อประมาณค่าสัมประสิทธิ์เส้นทางของตัวแบบภายในแสดงได้ดังสมการ (13 – 17)

$$\xi_1 = \beta_{01} + \zeta_1 \quad (13)$$

$$\xi_2 = \beta_{02} + \beta_{12}\xi_1 + \zeta_2 \quad (14)$$

$$\xi_3 = \beta_{03} + \beta_{13}\xi_1 + \beta_{23}\xi_2 + \beta_{43}\xi_4 + \zeta_3 \quad (15)$$

$$\xi_4 = \beta_{04} + \beta_{14}\xi_1 + \beta_{24}\xi_2 + \zeta_4 \quad (16)$$

$$\xi_5 = \beta_{05} + \beta_{15}\xi_1 + \beta_{25}\xi_2 + \beta_{35}\xi_3 + \beta_{45}\xi_4 + \zeta_5 \quad (17)$$

การตรวจสอบความเหมาะสมของตัวแบบ PLS-PM

ภายหลังจากการสร้างตัวแบบแล้วจะทำการตรวจสอบความเหมาะสมของตัวแบบ PLS-PM โดยประเมินตัวแบบภายนอก และประเมินตัวแบบภายใน

**ขั้นที่ 1** ประเมินตัวแบบภายนอก เป็นการประเมินความเที่ยงตรงเชิงเสมือน (Convergent Validity) โดยพิจารณาจากค่าถ่วงปัจจัยของมาตรวัดที่ออกเท่านั้น โดยตัวแบบภายนอกที่มีความเที่ยงตรงค่าถ่วงปัจจัยควรมีค่ามากกว่า 0.5 [22] ดังนั้นในการศึกษาครั้งนี้ไม่พิจารณา ค่าถ่วงปัจจัยของปัจจัย PC ปัจจัย MT ปัจจัย AP และปัจจัย VOCs เนื่องจากเป็นมาตรวัดที่เข้า

**ขั้นที่ 2** ประเมินตัวแบบภายใน ในขั้นตอนนี้จะทำการประเมิน 3 ส่วน ดังนี้

2.1 การประเมินความเที่ยงตรงของตัวแบบ โดยพิจารณาจากค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Coefficient of Determination:  $R^2$ ) ดังสมการที่ (18)

$$R_j^2 = 1 - \frac{\sum_i (\xi_j - \hat{\xi}_j)^2}{\sum_i (\xi_j - \zeta_j)^2} \quad (18)$$

เมื่อ  $\xi_j$  คือ คะแนนตัวแปรแฝงที่  $j$  ที่ได้จากสมการที่ 6

$\hat{\xi}_j$  คือ ค่าประมาณของคะแนนตัวแปรแฝงที่  $j$  ที่ได้จากสมการที่ 7

โดยตัวแบบภายนอกที่มีความน่าเชื่อถือสามารถช่วยประเมินความเหมาะสมของตัวแบบภายในได้ ซึ่งประเมินได้จากค่า  $R^2$  ของตัวแปรแฝงภายนอก โดยที่ค่า  $R^2$  ที่แนะนำสำหรับใช้อธิบายตัวแปรแฝงอื่นๆ ที่มีผลต่อตัวแปรแฝงภายนอกควรมีค่าไม่น้อยกว่า 0.19 [24] ค่า  $R^2$  ตั้งแต่ 0.19 แสดงว่าตัวแปรแฝงนั้นสามารถอธิบายตัวแปรแฝงภายนอกได้ 19% ที่เหลืออีก 81% อาจเกิดจากอิทธิพลอื่น และหากคำนวณค่าสัมประสิทธิ์สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ ( $r$ ) จาก  $R^2$  เท่ากับ 0.19 จะได้ค่า  $|r|$  มีค่าประมาณ 0.44 ซึ่งแสดงว่าตัวแปรแฝงนั้นมีความสัมพันธ์กับตัวแปรภายนอกค่อนข้างมากและมีนัยสำคัญทางสถิติ นอกจากนี้สามารถแบ่งระดับของ  $R^2$  ออกเป็น 3 ระดับ ได้แก่  $R^2$  น้อยกว่า 0.33 อยู่ในระดับอ่อน  $R^2$  น้อยกว่า 0.67 อยู่ในระดับปานกลาง และ  $R^2$  มากกว่าหรือเท่ากับ 0.67 อยู่ในระดับดีมาก [24]

2.2 การตรวจสอบความเหมาะสมของสัมประสิทธิ์เส้นทาง โดยใช้สถิติทดสอบที ( $t$  test) ดังสมการที่ (19) ด้วยสมมติฐาน  $H_0: \beta_{hj} = 0$  (เส้นทางจากปัจจัย  $h$  ถึงปัจจัย  $j$  ไม่ควรอยู่ในตัวแบบ)

$$t_{hj} = \frac{\hat{\beta}_{hj}}{Se(\hat{\beta}_{hj})} \quad (19)$$

เมื่อ  $t_{hj}$  คือ สถิติทดสอบทีของเส้นทางจากปัจจัย  $h$  ถึงปัจจัย  $j$  ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 จะปฏิเสธสมมติฐาน  $H_0$  เมื่อค่า  $p$ -value มีค่าน้อยกว่า 0.05

2.3 การตรวจสอบความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรแฝง โดยการประเมินผลกระทบทางอ้อมและผลกระทบรวมของตัวแปรแฝงต่อตัวแปรแฝง โดยผลกระทบทางอ้อมสามารถคำนวณด้วยผลรวมของการคูณของสัมประสิทธิ์เส้นทางของเส้นทางอ้อมทั้งหมด เช่น ผลกระทบทางอ้อมของเส้นทางจากปัจจัย MT ไปยังปัจจัย Ozone สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (20)

$$\text{ผลกระทบทางอ้อม}_{\text{MT} \rightarrow \text{Ozone}} = (\beta_{23} \times \beta_{35}) + (\beta_{24} \times \beta_{43} \times \beta_{45}) \quad (20)$$

และผลกระทบรวมสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (21)

$$\text{ผลกระทบรวม} = \beta_{25} + \text{ผลกระทบทางอ้อม}_{\text{MT} \rightarrow \text{Ozone}} \quad (21)$$

ทั้งนี้ผลกระทบทางตรง ทางอ้อม และผลกระทบรวม ของเส้นทางต่างๆ ของตัวแบบมีค่าอยู่ระหว่าง -1 ถึง 1 นั่นคือ หากผลกระทบของเส้นทางจากปัจจัย  $h$  ถึงปัจจัย  $j$  มีค่าน้อย (ผลกระทบ  $_{hj} < 0$ ) หมายความว่าปัจจัย  $h$  ช่วยลดปัจจัย  $j$  ขณะที่หากผลกระทบของเส้นทางจากปัจจัย  $h$  ถึงปัจจัย  $j$  มีค่ามาก (ผลกระทบ  $_{hj} > 0$ ) นั้นหมายความว่าปัจจัย  $h$  เป็นปัจจัยที่มีอิทธิพลทำให้ปัจจัย  $j$  เพิ่มขึ้น

## ผลการวิจัย

ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์เชิงสาเหตุระหว่างตัวแปรแฝง ได้แก่ ปัจจัย PC, MT, AP และ VOCs และความเข้มข้นของโอโซนระดับพื้นดิน จะถูกแบ่งออกเป็น 3 ส่วน ได้แก่ ส่วนที่ 1 การวิเคราะห์ตัวแบบภายนอก ส่วนที่ 2 การวิเคราะห์ตัวแบบภายใน และส่วนที่ 3 การตรวจสอบความเหมาะสมของตัวแบบ

### การวิเคราะห์ตัวแบบภายนอก

การวิเคราะห์ตัวแบบภายนอกมีวัตถุประสงค์ เพื่อคัดเลือกตัวแปรสังเกตเข้ากลุ่มตัวแปรแฝง โดยใช้ค่าองค์ประกอบความแปรปรวน (Variance Inflation Factor: VIF) ในการประเมินความสัมพันธ์สำหรับตัวแปรสังเกตมากกว่าสองตัวแปรพร้อมกัน หาก VIF มีค่ามากกว่า 10 แสดงว่าเกิดความสัมพันธ์เชิงเส้นพหุ (Multicollinearity) หรือเกิดความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่างตัวแปรสังเกต [25]

จากตารางที่ 2 พบว่า เกิดปัญหาความสัมพันธ์เชิงเส้นพหุในปัจจัย AP และ VOCs เนื่องจากค่า VIF ของตัวแปร  $\text{NO}_x$  ( $x_{3-2}$ )  $\text{NO}_2$  ( $x_{3-3}$ )  $\text{NO}_x$  ( $x_{3-4}$ ) 1,1,2,2-Tetrachloroethane ( $x_{4-1}$ ) และ 1,2-Dibromoethane ( $x_{4-2}$ ) มีค่ามากกว่า 10 เมื่อตัดตัวแปร  $\text{NO}_x$  ( $x_{3-4}$ ) และ 1,1,2,2-Tetrachloroethane ( $x_{4-1}$ ) เนื่องจากมีค่า VIF สูงที่สุดภายในกลุ่มออกจากกลุ่ม แล้วประเมินความสัมพันธ์ใหม่ พบว่าไม่เกิดปัญหาความสัมพันธ์เชิงเส้นพหุ

ตารางที่ 2 ค่า VIF ของแต่ละตัวแปรจำแนกตามปัจจัย

ปัจจัย	ตัวแปร	คำอธิบาย	VIF
PC (ปัจจัยการเกิดปฏิกิริยาโฟโตเคมี)	$x_{1.1}$	รังสีแห่งโลก	-
MT (ปัจจัยทางอุตุนิยมวิทยา)	$x_{2.1}$	อุณหภูมิ	1.535
	$x_{2.2}$	ความชื้นสัมพัทธ์	1.468
	$x_{2.3}$	ปริมาณน้ำฝน	1.385
	$x_{2.4}$	ความกดอากาศ	1.251
	$x_{2.5}$	ความเร็วลม	1.801
	$x_{2.6}$	ทิศทางลม	1.410
AP (ปัจจัยมลพิษทางอากาศ)	$x_{3.1}$	CO	3.699
	$x_{3.2}$	NO	164.771
	$x_{3.3}$	NO <sub>2</sub>	331.250
	$x_{3.4}$	NO <sub>x</sub>	410.197
	$x_{3.5}$	SO <sub>2</sub>	1.681
	$x_{3.6}$	PM <sub>10</sub>	2.738
VOCs (ปัจจัยสารประกอบอินทรีย์ระเหยง่าย)	$x_{4.1}$	1,1,2,2-Tetrachloroethan	24.629
	$x_{4.2}$	1,2-Dibromoethane	23.984
	$x_{4.3}$	1,2-Dichloroethane	2.078
	$x_{4.4}$	1,2-Dichloropropane	1.467
	$x_{4.5}$	1,3-Butadiene	2.203
	$x_{4.6}$	1,4-Dichlorobenzene	3.517
	$x_{4.9}$	Acrylonitrile	2.258
	$x_{4.10}$	Benzene	1.562
	$x_{4.11}$	Benzyl Chloride	1.604
	$x_{4.12}$	Carbon Tetrachloride	1.339
	$x_{4.13}$	Chloroform	1.373
	$x_{4.14}$	Dichloromethane	1.712
	$x_{4.15}$	Tetrachloroethylene	3.202
	$x_{4.16}$	Trichloroethylene	1.801
	$x_{4.17}$	Vinyl Chloride	2.102

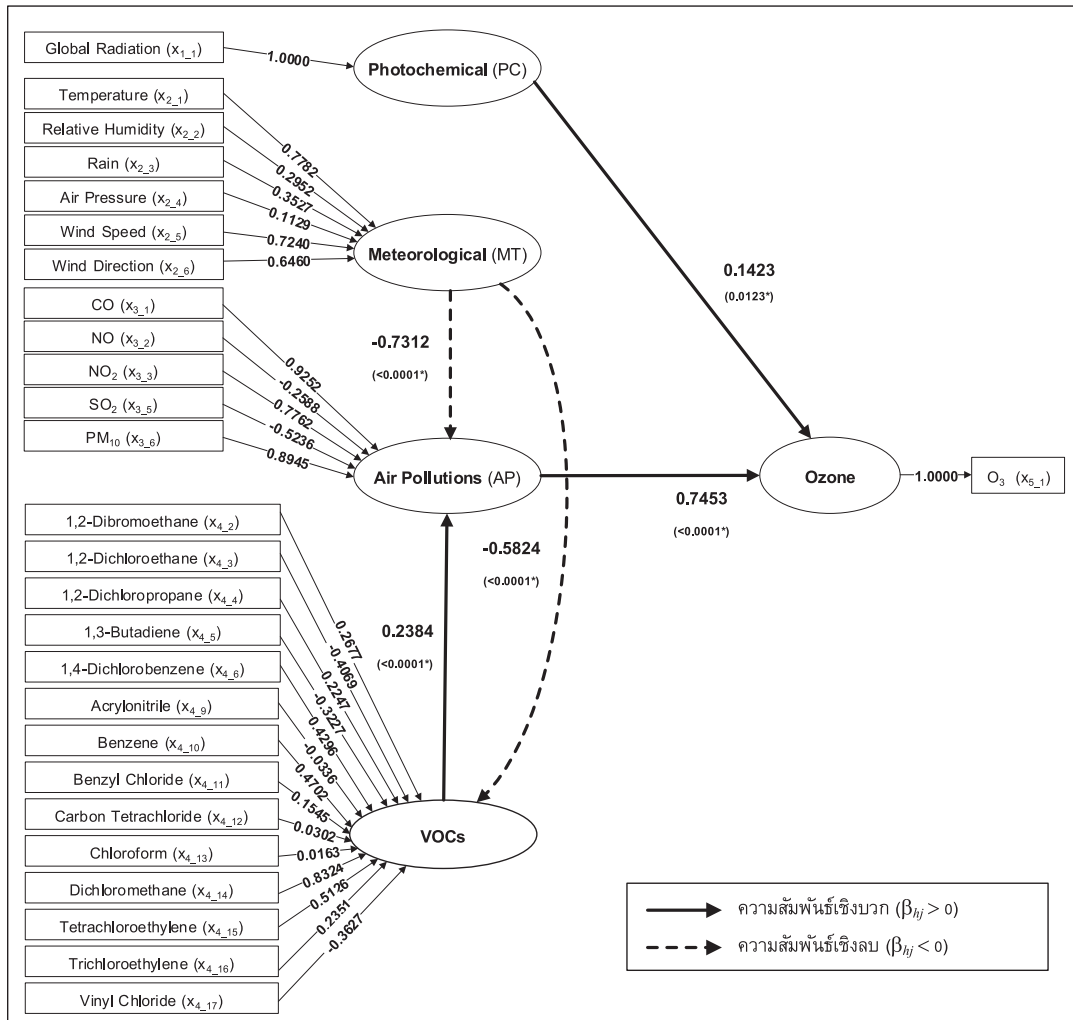
### การวิเคราะห์ตัวแบบภายใน

การวิเคราะห์ตัวแบบภายในมีวัตถุประสงค์เพื่อวิเคราะห์ความสัมพันธ์เชิงสาเหตุระหว่างตัวแปรแฝงกับความเข้มข้นของโอโซนระดับพื้นดิน โดยพิจารณาจากค่าสัมประสิทธิ์เส้นทาง จากผลลัพธ์แสดงในรูปที่ 7 ซึ่งแสดงค่าสัมประสิทธิ์เส้นทาง ( $\beta$ ) ได้ดังนี้ ปัจจัย MT มีความสัมพันธ์เชิงลบกับปัจจัย AP และปัจจัย VOCs โดยมีค่าสัมประสิทธิ์เส้นทางเท่ากับ -0.7312 และ -0.5824 ตามลำดับ อย่างไรก็ตามปัจจัย VOCs มีความสัมพันธ์เชิงบวกกับปัจจัย AP โดยมีค่าสัมประสิทธิ์เส้นทางเท่ากับ 0.2384 ทั้งนี้ปัจจัย PC และ ปัจจัย AP มีความสัมพันธ์เชิงบวกโดยตรงกับความเข้มข้นของโอโซนระดับพื้นดิน โดยมีค่าสัมประสิทธิ์เส้นทางเท่ากับ 0.1423 และ 0.7453 ตามลำดับ เมื่อพิจารณาถึงผลกระทบทั้งทางตรงและทางอ้อม จากตารางที่ 3 พบว่า ปัจจัย MT ส่งผลกระทบทางอ้อมเชิงลบต่อปัจจัย AP โดยมีค่าผลกระทบเท่ากับ -0.1389 ส่งผลให้ปัจจัย MT มีผลต่อการลดลงของปัจจัย AP โดยมีค่าผลกระทบรวมเท่ากับ -0.8701 นอกจากนี้ปัจจัย MT ยังมีผลต่อการลดลงของความเข้มข้นของโอโซนระดับพื้นดินทางอ้อม ซึ่งมีค่าผลกระทบทางอ้อมเท่ากับ -0.6485 ขณะที่ปัจจัย VOCs มีผลต่อการเพิ่มขึ้นของความเข้มข้นของโอโซนระดับพื้นดินทางอ้อม โดยมีค่าผลกระทบเท่ากับ 0.1777 แต่ปัจจัย VOCs ส่งผลกระทบทางตรงต่อปัจจัย AP ทำให้ปัจจัย AP มีผลต่อการเพิ่มขึ้นของความเข้มข้นของโอโซนระดับพื้นดินมากที่สุด ขณะที่ปัจจัย MT มีผลต่อการลดลงของความเข้มข้นของโอโซนระดับพื้นดินมากที่สุด

ตารางที่ 3 ผลกระทบระหว่างปัจจัยต่างๆ และผลกระทบของปัจจัยที่มีผลต่อโอโซนระดับพื้นดิน

ปัจจัยเป้าหมาย	R <sup>2</sup>	ผลกระทบ	ปัจจัยต้นทาง			
			PC	MT	AP	VOCs
AP	0.7946	ทางตรง		-0.7312		0.2384
		ทางอ้อม		-0.1389		0.0000
		รวม		-0.8701		0.2384
VOCs	0.3392	ทางตรง		-0.5824		
		ทางอ้อม		0.0000		
		รวม		-0.5824		
Ozone	0.5693	ทางตรง	0.1423	0.0000	0.7453	0.0000
		ทางอ้อม	0.0000	-0.6485	0.0000	0.1777
		รวม	0.1423	-0.6485	0.7453	0.1777





รูปที่ 7 ค่าประมาณน้ำหนักปัจจัย และสัมประสิทธิ์เส้นทางของตัวแบบ PLS-PM

หมายเหตุ ตัวเลขในวงเล็บหมายถึงค่า p-value ของการทดสอบความเหมาะสมของสัมประสิทธิ์เส้นทางโดยใช้สถิติทดสอบที

**การตรวจสอบความเหมาะสมของตัวแบบ**

การตรวจสอบความเหมาะสมของตัวแบบ PLS-PM จะพิจารณาค่า R<sup>2</sup> ของสมการที่ 15-17 สำหรับแสดงความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่างตัวแปรแฝงภายนอกทั้ง 3 ตัวแปร คือ ปัจจัย AP ปัจจัย VOCs และปัจจัย Ozone กับตัวแปรแฝงอื่น โดย R<sup>2</sup> ของปัจจัย AP ดังสมการ (15) ได้ค่าเท่ากับ 0.7946 ส่วน R<sup>2</sup> ของปัจจัย VOCs สมการ (16) มีค่าเท่ากับ 0.3392 และค่า R<sup>2</sup> ของปัจจัย Ozone ดังสมการ (17) เท่ากับ 0.5693 จะเห็นว่าค่า R<sup>2</sup> มีค่าสูงกว่า 0.19 [24] กล่าวคือ ปัจจัย MT และ VOCs สามารถอธิบายปัจจัย AP ได้ร้อยละ 79.46 ซึ่งเป็นระดับดีมาก ขณะที่ปัจจัย MT สามารถอธิบายปัจจัย VOCs ได้ร้อยละ 33.92 และปัจจัย PC AP MT และ VOCs สามารถอธิบายปัจจัย Ozone ได้ร้อยละ 56.93 ซึ่งเป็นระดับปานกลาง

## การอภิปรายผล

การศึกษาครั้งนี้ได้ทำการประเมินผลกระทบของพารามิเตอร์ทางอุตุนิยมวิทยา มลพิษทางอากาศ ปัจจัยการเกิดปฏิกิริยาโฟโตเคมีและสารอินทรีย์ระเหยต่อความเข้มข้นของโอโซนระดับพื้นดิน ( $O_3$ ) เพื่อเป็นประโยชน์ในการวางแผนควบคุมตัวแปรอื่นๆ ที่เกี่ยวข้องกับความเข้มข้นของโอโซนระดับพื้นดินในเขตนิคมอุตสาหกรรมมาบตาพุด จังหวัดระยอง ผลการวิจัยในครั้งนี้ให้ผลลัพธ์ที่สอดคล้องกับงานวิจัยที่ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างสารตั้งต้นกับโอโซนระดับพื้นดินที่เมืองกัลฟพอร์ต มลรัฐมิสซิสซิปปี ประเทศสหรัฐอเมริกา [25] โดยพบว่าปัจจัยปฏิกิริยาโฟโตเคมี มีผลกระทบโดยตรงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติต่อความเข้มข้นของโอโซนระดับพื้นดิน ปัจจัยมลพิษทางอากาศมีผลกระทบเชิงบวก และปัจจัยทางอุตุนิยมวิทยามีผลกระทบเชิงลบต่อความเข้มข้นของโอโซนระดับพื้นดิน นอกจากนี้ผลการวิจัยครั้งนี้พบว่า ปัจจัยสารประกอบอินทรีย์ระเหยง่าย (VOCs) ไม่ได้ส่งผลต่อโอโซนระดับพื้นดินโดยตรงตามสมมติฐานแต่พบว่า VOCs ส่งผลทางอ้อมต่อโอโซนระดับพื้นดิน ซึ่ง VOCs ส่งผลโดยตรงต่อปัจจัยมลพิษทางอากาศ อาจแสดงให้เห็นว่าถึงแม้ว่าในเขตนิคมอุตสาหกรรมจะเป็นบริเวณที่มี VOCs สูงแต่ปริมาณก๊าซมลพิษต่างๆ อาจมีค่าสูงด้วยจึงกลายเป็นปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อโอโซนระดับพื้นดินมากที่สุด ซึ่งไม่สอดคล้องกับผลวิจัยใน [25] ที่พบว่าปัจจัยปฏิกิริยาโฟโตเคมี มีผลกระทบต่อความเข้มข้นของโอโซนมากที่สุด อย่างไรก็ตามผลการวิเคราะห์ความเข้มข้นของโอโซนระดับพื้นดินยังขึ้นอยู่กับรังสีอัลตราไวโอเลตบี (UVB) ด้วย แต่ไม่ได้ทำการศึกษาในครั้งนี้เนื่องจากไม่มีการจัดเก็บข้อมูลไว้ นอกจากนี้งานวิจัยครั้งนี้มีข้อจำกัดด้านข้อมูลเช่น ตัวแปร VOCs ที่มีการจัดเก็บข้อมูลแบบรายเดือน แตกต่างจากข้อมูลอื่นๆ ที่มีการจัดเก็บข้อมูลแบบรายชั่วโมง

## สรุปผลการวิจัย

การศึกษาครั้งนี้วิเคราะห์ความสัมพันธ์เชิงสาเหตุระหว่างสารตั้งต้นและปัจจัยอื่นๆ ที่เกี่ยวข้องกับความเข้มข้นของโอโซนระดับพื้นดินซึ่งเป็นก๊าซที่มีพิษต่อร่างกายโดยใช้การวิเคราะห์ PLS-PM ผลการวิเคราะห์แสดงในสองประเด็น ประเด็นแรกเป็นการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรแฝงโดยพิจารณาผลกระทบรวม ซึ่งพบว่า ปัจจัยหลักที่มีผลต่อความเข้มข้นของโอโซนระดับพื้นดิน คือ มลพิษทางอากาศ รองลงมาเป็นปัจจัยสารอินทรีย์ระเหยง่าย ประเด็นที่สองเป็นการวิเคราะห์ผลกระทบทางตรงและทางอ้อมของปัจจัยต่างๆ พบว่าปัจจัยปฏิกิริยาโฟโตเคมีและปัจจัยมลพิษทางอากาศมีผลกระทบโดยตรงต่อความเข้มข้นของโอโซนระดับพื้นดิน ปัจจัยสารอินทรีย์ระเหยง่ายมีผลกระทบโดยตรงต่อมลพิษทางอากาศและมีผลทางอ้อมต่อความเข้มข้นของโอโซนระดับพื้นดิน นอกจากนี้พบว่าปัจจัยอุตุนิยมวิทยา มีผลกระทบทางตรงต่อปัจจัยมลพิษและปัจจัยสารอินทรีย์ระเหยง่าย ดังนั้นควรมีการควบคุมทั้งปัจจัยสารอินทรีย์ระเหยง่ายและปัจจัยมลพิษทางอากาศ ในช่วงฤดูหนาวที่มีความเข้มข้นของปริมาณโอโซนระดับพื้นดินสูงในพื้นที่ที่ศึกษา

## กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากคณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ และขอขอบคุณกรมควบคุมมลพิษ กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม ประเทศไทย ที่อนุเคราะห์ข้อมูลสำหรับการทำวิจัยในครั้งนี้

## เอกสารอ้างอิง

1. Kump, L. R., Kasting, J. F., & Crane, R. G. (2014). *The earth system (3<sup>rd</sup> ed.)*. Pearson Education Limited. pp. 392-394.
2. Group, W. B., Programme, U. N. E., & Organization, U. N. I. D. (1999). *Pollution prevention and abatement handbook, 1998: toward cleaner production*. World Bank Publications. pp. 227.
3. Metcalfe, S., & Derwent, D. (2005). *Atmospheric pollution and environmental change*. Hodder Arnold. pp. 35.
4. Pénard-Morand, C., & Annesi-Maesano, I. (2004). Air pollution: from sources of emissions to health effects. *Breathe*, 1(2), 108-119.
5. Luber, G., & Lemery, J. (2015). *Global climate change and human health: From science to practice (1<sup>st</sup> ed., pp. 137)*. John Wiley & Sons.
6. Pepper, I. L., Gerba, C. P., & Brusseau, M. L. (2011). *Environmental and pollution science (2<sup>nd</sup> ed., pp. 405)*. Elsevier Science.
7. Abdullah, A. M., Ismail, M., Yuen, F. S., Abdullah, S., & Elhadi, R. E. (2017). The relationship between daily maximum temperature and daily maximum ground level ozone concentration. *Polish Journal of Environmental Studies*, 26(3), 517-523.
8. Jasaitis, D., Vasiliauskien, V., Chadyšien, R., & Pečiulienė, M. (2016). Surface ozone concentration and its relationship with UV radiation, meteorological parameters and radon on the eastern coast of the Baltic Sea. *Atmosphere*, 7(2), 27.
9. Lu, X., Zhang, L., & Shen, L. (2019). Meteorology and climate influences on tropospheric ozone: a review of natural sources, chemistry, and transport patterns. *Current Pollution Reports*, 5(4), 238-260.
10. Ohring, G., & Muench, H. S. (1960). Relationships between ozone and meteorological parameters in the lower stratosphere. *Journal of Meteorology*, 17(2), 195-206.
11. Punithavathy, I. K., Vijayalakshmi, S., & Jeyakumar, S. J. (2015). Assessment of ground-level ozone and its variability with meteorological parameters at Karaikal, India. *Universal Journal of Environmental Research and Technology*, 5(5), 233-240.
12. Im, U., Incecik, S., Guler, M., Tek, A., Topcu, S., Unal, Y. S., et al. (2013). Analysis of surface ozone and nitrogen oxides at urban, semi-rural and rural sites in Istanbul, Turkey. *Science of the Total Environment*, 443, 920-931.
13. Ocak, S., & Turalioglu, F. S. (2008). Effect of meteorology on the atmospheric concentrations of traffic-related pollutants in Erzurum, Turkey. *Journal of International Environmental Application and Science*, 3(5), 325-335.

14. Gorai, A. K., Tuluri, F., Tchounwou, P. B., & Ambinakudige, S. (2015). Influence of local meteorology and NO<sub>2</sub> conditions on ground-level ozone concentrations in the eastern part of Texas, USA. *Air Quality, Atmosphere and Health*, 8(1), 81-96.
15. Godish, T., & Fu, J. S. (2003). *Air quality* (4<sup>th</sup> ed.). Taylor & Francis. pp. 80.
16. Jia, M., Zhao, T., Cheng, X., Gong, S., Zhang, X., Tang, L., et al. (2017). Inverse relations of PM<sub>2.5</sub> and O<sub>3</sub> in air compound pollution between cold and hot seasons over an urban area of east China. *Atmosphere*, 8(3), 59.
17. Han, S., Bian, H., Feng, Y., Liu, A., Li, X., Zeng, F., et al. (2011). Analysis of the relationship between O<sub>3</sub>, NO and NO<sub>2</sub> in Tianjin, China. *Aerosol and Air Quality Research*, 11(2), 128-139.
18. Shmueli, G., Ray, S., Velasquez Estrada, J. M., & Chatla, S. B. (2016). The elephant in the room: Predictive performance of PLS models. *Journal of Business Research*, 69(10), 4552-4564.
19. Pollution Control Department. (2019). *Booklet on Thailand State of Pollution 2018*. Bangkok. Pollution Control Department Ministry of Natural Resources and Environment. pp. 21.
20. Zhang, B. N., & Oanh, N. T. (2002). Photochemical smog pollution in the Bangkok Metropolitan Region of Thailand in relation to O<sub>3</sub> precursor concentrations and meteorological conditions. *Atmospheric Environment*, 36, 4211-4222.
21. Barrero, M. A., Grimalt, J., & Cantón, L. (2006). Prediction of daily ozone concentration maxima in the urban atmosphere. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, 80, 67-76.
22. Luiz, M., & Kun-huang, H. (2015). *Quantitative modelling in marketing and management* (2<sup>nd</sup> ed.). World Scientific. pp. 43-78.
23. Chakrit Ponathong. (2017). Quality evaluation of measurement model of risk management elements of Srinakharinwirot University. *Veridian E-Journal, Silpakorn University (Humanities, Social Sciences and Arts)*, 10(2), 169-188. (in Thai)
24. Chin, W. W. (1998). The partial least squares approach to structural equation modeling. In *Modern methods for business research*. pp. 295-336.
25. Kumar Gorai, A., Tuluri, F., & Tchounwou, P. B. (2015). Development of PLS-path model for understanding the role of precursors on ground level ozone concentration in Gulfport, Mississippi, USA. *Atmospheric Pollution Research*, 6(3), 389-397.

