

มลพิษทางอากาศและการเสียชีวิตด้วยโรคติดเชื้อไวรัสโคโรนา 2019 ในประเทศไทย

AIR POLLUTION AND MORTALITY FROM COVID-19 IN THAILAND

อนูวัฒน์ แสงอนัน *

Anuwat Sangon *

สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏนครสวรรค์
Environmental science program, Faculty of Science and Technology, Nakhon Sawan Rajabhat University

*corresponding author e-mail: anuwat.s@nsru.ac.th

(Received: 25 November 2021; Revised: 25 March 2022; Accepted: 25 March 2022)

บทคัดย่อ

วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้เพื่อหาความสัมพันธ์ของมลพิษทางอากาศกับจำนวนผู้เสียชีวิตด้วยโรคติดเชื้อไวรัสโคโรนา 2019 ในจังหวัดต่างๆ ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย ประกอบด้วย การหาสัดส่วนการตายมาตรฐานจากโรคติดเชื้อไวรัสโคโรนา 2019 ในแต่ละจังหวัด จำนวน 37 จังหวัด โดยแบ่งกลุ่มประชากรแต่ละจังหวัดออกตามกลุ่มอายุ จำนวน 8 กลุ่ม ตั้งแต่ช่วงอายุ 0–9 ปี ไปจนถึงมากกว่าหรือเท่ากับ 70 ปี โดยใช้ข้อมูลจำนวนประชากรปี พ.ศ. 2563 จากนั้นนำไปวิเคราะห์สหสัมพันธ์และการถดถอยเชิงเส้นเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างมลพิษทางอากาศและการเสียชีวิตของผู้ป่วยโรคติดเชื้อไวรัสโคโรนา 2019 ผลการศึกษาพบว่า สัดส่วนการตายมาตรฐานในบางจังหวัดมีค่าสูงมากเมื่อเทียบกับจำนวนตายที่คาดไว้ และพบว่า มีความสัมพันธ์กับปริมาณก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์ สรุปผลการศึกษาครั้งนี้พบหลักฐานแสดงความสัมพันธ์ระหว่างมลพิษทางอากาศและความเสี่ยงต่อการเสียชีวิตของผู้ป่วยโรคติดเชื้อไวรัสโคโรนา 2019

คำสำคัญ: มลพิษทางอากาศ การเสียชีวิต โรคติดเชื้อไวรัสโคโรนา 2019 ไนโตรเจนไดออกไซด์

Abstract

The purpose of this research is to investigate the relationship of air pollution and the number of deaths in each Thai province affected by COVID-19. To accomplish so, COVID-19 specific mortality has been normalized for each Thai province 37 provinces and every age group (8 groups) spanning from 0 to 9 years to ≥ 70 years, using national population numbers from 2020. A correlation and a linear regression model were used to investigate the association

between air pollution and COVID-19 mortality in Thai provinces. As a result, the SMR (Standardized Mortality Ratio) in some provinces is substantially higher than expected and the presence of NO₂ was found to be independently linked with case status. In conclusion, this study appears to uncover evidence that supports the presence of a link between air pollution and the risk of disease-related death, which refers to nitrogen dioxide (NO₂).

Keywords: Air pollution, Mortality, COVID-19, Nitrogen dioxide

บทนำ

มลพิษทางอากาศ เป็นสาเหตุสำคัญประการหนึ่งที่ทำให้เกิดการเจ็บป่วยและการเสียชีวิต มีหลักฐานทางวิทยาศาสตร์แสดงความเชื่อมโยงระหว่างการสัมผัสกับมลพิษทางอากาศทั้งที่เป็นระยะเวลาสั้นๆ หรือการสัมผัสเป็นระยะเวลายาวนานกับผลเสียต่างๆ ที่มีต่อสุขภาพ เช่น เพิ่มอัตราการเสียชีวิตและจำนวนการเข้ารับรักษาตัวในโรงพยาบาล ทำให้อาการของโรคบางชนิดรุนแรงขึ้น เช่น ภูมิแพ้ หลอดลมอักเสบ ปอดอุดกั้นเรื้อรัง เป็นต้น นอกจากนี้ยังพบว่า มลพิษทางอากาศเป็นปัจจัยทำให้เลวลงสำหรับโรคติดเชื้อที่เกิดจากไวรัส เช่น โรคติดเชื้อไวรัสอาร์เอสวี โรคไขหวัดใหญ่ สายพันธุ์เอและบี โรคติดเชื้อไวรัสพาราอินฟลูเอนซา สายพันธุ์ 3 (Copat et al., 2020)

โรคติดเชื้อไวรัสโคโรนา 2019 หรือโควิด-19 (COVID-19) เป็นโรคอุบัติใหม่ โดยองค์การอนามัยโรคได้รับแจ้งเมื่อเดือนธันวาคม 2562 ว่าพบผู้ป่วยมีอาการปอดบวมไม่ทราบสาเหตุ ที่เมืองอู่ฮั่น มณฑลเหอเป่ย์ ประเทศสาธารณรัฐประชาชนจีน ต่อมาจึงพบว่าเกิดจากเชื้อไวรัสโคโรนาสายพันธุ์ใหม่ (Severe Acute Respiratory Syndrome Coronavirus, SARS-CoV-2) และเกิดการแพร่ระบาดไปในประเทศต่างๆ ทั่วโลก เชื้อไวรัสดังกล่าวมีลักษณะทางพันธุกรรมคล้ายคลึงกับเชื้อไวรัสโรคซาร์ส (SARS) ที่เคยระบาดก่อนหน้าถึงร้อยละ 80 อัตราการเสียชีวิตของผู้ป่วยโรคติดเชื้อไวรัสโคโรนา 2019 เท่ากับร้อยละ 3.4 โดยสาเหตุของการเสียชีวิตเกิดจากภาวะปอดบวมซึ่งทำให้ระบบการหายใจล้มเหลว (สุรียา โสภณ และสุนมมาลย์, 2563) จากรายงานขององค์การอนามัยโลก ประจำประเทศไทย สถานการณ์การระบาดของโรคติดเชื้อไวรัสโคโรนา 2019 ของประเทศไทย ณ วันที่ 23 กันยายน พ.ศ. 2564 พบผู้ป่วยสะสมยืนยันทั้งสิ้น 1,524,613 ราย ยอดผู้เสียชีวิตสะสม 15,884 ราย ช่วงระยะเวลาการระบาด สามารถแบ่งได้เป็น 4 ระลอก โดยระลอกที่มีความรุนแรง กล่าวคือ มีจำนวนผู้ติดเชื้อและเสียชีวิตจำนวนมาก ได้แก่ ระลอกที่ 3 และระลอกที่ 4 ซึ่งเป็นระลอกที่มีการระบาดของเชื้อไวรัสโคโรนา 2019 สายพันธุ์อัลฟาและเดลตา ตามลำดับ ซึ่งเกิดขึ้น

ตั้งแต่วันที่ 1 เมษายน พ.ศ. 2564 เป็นต้นมา (สำนักงานองค์การอนามัยโลกประจำประเทศไทย, 2564)

ด้วยเหตุที่มีรายงานการวิจัยหลายฉบับบ่งชี้ว่ามลพิษทางอากาศมีผลกระทบต่อ การแพร่กระจายและการเสียชีวิตด้วยโรคติดเชื้อไวรัสโคโรนา 2019 โดยผลกระทบของมลพิษ ทางอากาศดังกล่าวอาจจำแนกได้เป็น 2 ลักษณะ คือ (1) มลพิษทางอากาศเป็นปัจจัยส่งเสริมให้ เกิดการแพร่กระจายของเชื้อไวรัส เช่น รายงานการวิจัยของ Jiang, Wu, & Guan (2020) และ Frontera et al. (2020) กล่าวถึงเอนไซม์ ACE2 (Angiotensin converting enzyme 2) ที่สามารถจับกับโปรตีน ส่วนหนามของเชื้อไวรัสโคโรนา 2019 ได้ดีเป็นเอนไซม์ที่พบมากในเซลล์ถุงลม ประเภทที่ 2 (Type II alveoli หรือ Septal cell) โดยเซลล์ถุงลมชนิดนี้อยู่ในระบบทางเดินหายใจส่วนใน ซึ่งฝุ่นละออง ขนาดเล็กกว่า 2.5 ไมครอน ($PM_{2.5}$) สามารถทำหน้าที่เป็นตัวพาไวรัสโคโรนา 2019 ไปสู่เซลล์ เป้าหมายดังกล่าวได้ และ Paital & Agrawal (2021) รายงานว่าละอองลอย (Aerosol) เป็นตัวกลาง ให้เชื้อไวรัสโคโรนา 2019 แขนงลอยอยู่ในอากาศได้นานถึง 3 ชั่วโมง ซึ่งเพิ่มโอกาสให้มีการแพร่ กระจายของเชื้อไวรัสไปในอากาศ (2) มลพิษทางอากาศเป็นปัจจัยส่งเสริมให้อาการของโรค เลวร้ายลงซึ่งมีทั้งที่เป็นสาเหตุโดยตรง เช่น การสัมผัสเป็นระยะเวลานาน (Chronic exposure) กับ ก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์ (NO_2) และฝุ่นละอองขนาดไม่เกิน 2.5 ไมครอนไปกระตุ้นการทำงานของ เอนไซม์ ACE2 (Paital & Agrawal, 2021) หรือก่อให้เกิดโรคประจำตัวซึ่งเป็นสาเหตุร่วม ในการเสียชีวิตของผู้ป่วย เช่น การสัมผัสกับก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์ส่งผลให้เกิดการอักเสบ ของระบบทางเดินหายใจซึ่งเพิ่มอัตราการเสียชีวิตเมื่อป่วยด้วยโรคติดเชื้อไวรัสโคโรนา 2019 (Ogen, 2020)

Ali et al. (2021) ได้ทบทวนข้อมูลจากรายงานการวิจัยที่เกี่ยวข้องกับความสัมพันธ์ ระหว่างการสัมผัสมลพิษทางอากาศกับความรุนแรงของโรคติดเชื้อไวรัสโคโรนา พบว่า การสัมผัส กับมลพิษทางอากาศบางชนิดเป็นระยะเวลานานมีความสัมพันธ์เชิงบวกต่อความรุนแรงของโรค ติดเชื้อไวรัสโคโรนา 2019 เช่น ฝุ่นละอองขนาดไม่เกิน 2.5 ไมครอน ก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์ และก๊าซโอโซน (O_3) โดยรายงานการวิจัยส่วนใหญ่แสดงข้อมูลว่าระดับการเพิ่มขึ้นของมลพิษ ทางอากาศแต่ละชนิดส่งผลให้อัตราการเสียชีวิตของผู้ป่วยโรคติดเชื้อไวรัสโคโรนาเพิ่มขึ้นร้อยละ เท่าใด เช่น รายงานการวิจัยของ Wu et al. (2020) พบว่า การสัมผัสกับอากาศที่มีปริมาณฝุ่นละออง ขนาดไม่เกิน 2.5 ไมครอนเพิ่มขึ้น 1 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ทำให้อัตราการเสียชีวิตของ ผู้ป่วยโรคติดเชื้อไวรัสโคโรนาเพิ่มขึ้นร้อยละ 11 Mendy et al. (2021) ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่าง การสัมผัสฝุ่นละอองขนาดเล็กกว่า 2.5 ไมครอนกับความรุนแรงของโรคในผู้ป่วยโรคติดเชื้อไวรัส โคโรนา 2019 โดยปรับแก้ข้อมูลที่เป็นผลกระทบจากลักษณะทางเศรษฐกิจสังคมและโรคประจำตัว พบว่า มีความสัมพันธ์เชิงบวกระหว่างการสัมผัสและการตอบสนอง (Exposure–response relationship)

ของผู้ป่วยโรคติดเชื้อไวรัสโคโรนา 2019 กับการสัมผัสฝุ่นละอองขนาดเล็กกว่า 2.5 ไมครอน ในรอบปีก่อนหน้า โดยไม่มีค่าต่ำสุดที่ปลอดภัยเลย (No threshold effect) Veronesi et al. (2022) ศึกษาผลกระทบที่มีต่ออุบัติการณ์ของโรคติดเชื้อไวรัสโคโรนา 2019 ของการสัมผัสระยะยาวกับ ฝุ่นละอองขนาดเล็กไม่เกิน 2.5 ไมครอนและฝุ่นละอองขนาดเล็กไม่เกิน 10 ไมครอน (PM₁₀) ก๊าซไนโตรเจน ไดออกไซด์ ก๊าซไนโตรเจนออกไซด์ (NO) และก๊าซโอโซน พบว่า มลพิษทางอากาศทุกชนิดยกเว้น ก๊าซโอโซนมีความสัมพันธ์เชิงบวกกับอุบัติการณ์ของโรค โดยไม่ขึ้นกับมลพิษชนิดอื่น

ผู้วิจัยเห็นว่าประเทศไทยเป็นประเทศหนึ่งที่มีผู้เสียชีวิตจำนวนมากจากโรคติดเชื้อไวรัสโคโรนา 2019 เป็นอันดับที่ 37 ของโลก (John Hopskin, 2021) และเป็นประเทศหนึ่งที่ประสบปัญหา ด้านมลพิษทางอากาศจากการเจริญเติบโตทางเศรษฐกิจของประเทศ เพื่อให้เกิดความตระหนัก ถึงผลเสียของมลพิษทางอากาศในอีกด้านหนึ่ง ผู้วิจัยจึงสนใจที่จะศึกษาถึงความสัมพันธ์ระหว่างมลพิษ ทางอากาศและความเสี่ยงจากการเสียชีวิตด้วยโรคติดเชื้อไวรัสโคโรนา 2019 ของประเทศไทย

วิธีดำเนินการวิจัย

1. พื้นที่ศึกษาและแหล่งที่มาของข้อมูล

การศึกษานี้ใช้ข้อมูลปริมาณมลพิษทางอากาศที่ตรวจวัดและรายงานโดยกรมควบคุม มลพิษ (2564) ซึ่งมีสถานีตรวจวัดกระจายอยู่ตามจังหวัดต่างๆ ทั่วประเทศไทย จำนวน 37 จังหวัด พื้นที่ศึกษาจึงประกอบด้วยจังหวัดเหล่านี้ ข้อมูลจำนวนผู้เสียชีวิตด้วยโรคติดเชื้อไวรัสโคโรนา 2019 ของแต่ละจังหวัดได้จากรายงานสถานการณ์ผู้ติดเชื้อ COVID-19 รายพื้นที่ของกรมควบคุมโรค (2564) และจำนวนประชากรจำแนกตามกลุ่มอายุ รายจังหวัดของประเทศไทยของสำนักงานสถิติ แห่งชาติ (2564)

2. การหาความเสี่ยงต่อการเสียชีวิตด้วยโรคติดเชื้อไวรัสโคโรนา 2019

ความเสี่ยงต่อการเสียชีวิตด้วยโรคติดเชื้อไวรัสโคโรนา 2019 ของประชากรในแต่ละ จังหวัดได้จากสัดส่วนการตายมาตรฐาน (Standardized mortality ratio; SMR) วิธีหาคำนวณ สัดส่วนการตายมาตรฐานของโรคติดเชื้อไวรัสโคโรนา 2019 อ้างอิงตามวิธีของ Dettori et al. (2021) โดยจำแนกกลุ่มอายุออกเป็น 8 กลุ่ม (ตั้งแต่อายุ 0–9 ปี ขึ้นไปจนถึงอายุมากกว่าหรือ เท่ากับ 70 ปี) ตามรายงานสถานการณ์ผู้เสียชีวิตจากเชื้อ COVID-19 ในประเทศไทยของกรมควบคุมโรค และใช้ข้อมูลจำนวนผู้เสียชีวิตจากโรคติดเชื้อไวรัสโคโรนา 2019 สะสม ช่วงเวลาตั้งแต่วันที่ 1 เมษายน–24 กันยายน พ.ศ. 2564 และจำนวนประชากรกลางปี 2563 ของประเทศไทยที่รายงาน โดยสำนักงานสถิติแห่งชาติ (2564) ทำการคำนวณจำนวนตายที่คาดหวัง (The expected number of deaths, e) ดังสมการที่ 1

$$e = \sum_{i=1}^K \eta_i R_i \quad (1)$$

เมื่อ e แทน จำนวนตายที่คาดไว้
 η_i แทน จำนวนประชากรในกลุ่มอายุเฉพาะของแต่ละจังหวัด
 R_i แทน อัตราตายด้วยโรคติดเชื้อไวรัสโคโรนา 2019 ของประเทศไทยในกลุ่มอายุเฉพาะ
 แล้วนำค่าที่ได้มาคำนวณสัดส่วนการตายมาตรฐานของแต่ละจังหวัด ดังสมการที่ 2

$$SMR = \frac{d}{e} \quad (2)$$

เมื่อ d แทน จำนวนตายที่เกิดขึ้นจริง (The observed number of deaths) จากโรคติดเชื้อไวรัสโคโรนา 2019

จากนั้นคำนวณช่วงความเชื่อมั่นที่ร้อยละ 95 (95% CI) ของสัดส่วนการตายมาตรฐานของแต่ละจังหวัดด้วยวิธีของ Vandenbroucke (1982) ดังสมการที่ 3

$$95\% \text{ CI} = \frac{(\sqrt{d \pm 0.5Z_{(1-\alpha/2)}})^2}{e} \quad (3)$$

เมื่อ $Z_{(1-\alpha/2)}$ แทน คะแนน Z ที่สัมพันธ์กับความเชื่อมั่นเท่ากับ $1-\alpha/2$

3. ข้อมูลมลพิษทางอากาศ

มลพิษทางอากาศที่ศึกษารังนี้ ได้แก่ ไนโตรเจนไดออกไซด์ โอโซน ผุ่นละอองขนาดไม่เกิน 10 ไมครอน และผุ่นละอองขนาดไม่เกิน 2.5 ไมครอน โดยใช้ค่าเฉลี่ยรายปี (Annual average) ของมลพิษทางอากาศทั้ง 4 ชนิด ในปี พ.ศ. 2561–2563 มาหาค่าเฉลี่ย เพื่อเป็นตัวแทนปริมาณมลพิษทางอากาศของแต่ละจังหวัด

4. การหาความสัมพันธ์ระหว่างมลพิษทางอากาศและการเสียชีวิตด้วยโรคติดเชื้อไวรัสโคโรนา 2019

การหาความสัมพันธ์ระหว่างมลพิษทางอากาศและการเสียชีวิตด้วยโรคติดเชื้อไวรัสโคโรนา 2019 ดำเนินการโดยนำข้อมูลสัดส่วนการตายมาตรฐานที่คำนวณได้ทั้ง 37 จังหวัด และข้อมูลปริมาณมลพิษทางอากาศของแต่ละจังหวัดมาวิเคราะห์หาค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์แบบสเปียร์แมน (Spearman's rank correlation coefficient) ทั้งนี้เนื่องจากข้อมูลสัดส่วนการตายมาตรฐานของจังหวัดที่ใช้เป็นกลุ่มตัวอย่างไม่มีการแจกแจงแบบปกติ และหาความสัมพันธ์ในรูปแบบ

สมการของการเสียชีวิตด้วยโรคติดเชื้อไวรัสโคโรนา 2019 และมลพิษทางอากาศโดยใช้การวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้น (Linear regression analysis)

ผลการวิจัย

1. ผลการวิเคราะห์ความเสี่ยงต่อการเสียชีวิตด้วยโรคติดเชื้อไวรัสโคโรนา 2019

สัดส่วนการตายมาตรฐานจากโรคติดเชื้อไวรัสโคโรนา 2019 ที่มีค่ามากกว่า 1.00 บ่งชี้ว่าประชากรในจังหวัดนั้นมีการตายด้วยโรคติดเชื้อไวรัสโคโรนา 2019 มากกว่าของประชากรทั่วไปในประเทศ ผลการศึกษาครั้งนี้พบว่า ในจำนวน 37 จังหวัดที่ศึกษามี 14 จังหวัดที่ค่าสัดส่วนการตายมาตรฐานจากโรคติดเชื้อไวรัสโคโรนา 2019 มีค่ามากกว่า 1.00 โดยแสดงข้อมูลเรียงลำดับจากมากไปหาน้อย ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 สัดส่วนการตายมาตรฐานจากโรคติดเชื้อไวรัสโคโรนา 2019 ของจังหวัดที่มีค่ามากกว่า 1.00

ที่	จังหวัด	SMR	95% CI	
			Lower bound	Upper bound
1	สมุทรสาคร	6.10	5.68	6.54
2	กรุงเทพมหานคร	4.05	3.95	4.15
3	สมุทรปราการ	3.83	3.61	4.05
4	ปทุมธานี	2.95	2.75	3.17
5	นครปฐม	2.36	2.16	2.56
6	ตาก	2.23	1.96	2.51
7	สมุทรสงคราม	2.00	1.65	2.38
8	ชลบุรี	1.83	1.68	1.98
9	นครราชสีมา	1.82	1.60	2.05
10	สระบุรี	1.77	1.56	1.98
11	ยะลา	1.63	1.38	1.89
12	ฉะเชิงเทรา	1.47	1.30	1.66
13	พระนครศรีอยุธยา	1.46	1.30	1.62
14	นนทบุรี	1.13	1.02	1.25

2. ผลการวิเคราะห์ปริมาณมลพิษทางอากาศ

จากข้อมูลปริมาณมลพิษทางอากาศ ประกอบด้วย ไนโตรเจนไดออกไซด์ โอโซน ฝุ่นละอองขนาดไม่เกิน 10 ไมครอน และฝุ่นละอองขนาดไม่เกิน 2.5 ไมครอน ใน 37 จังหวัด ระหว่างปี พ.ศ. 2561-2563 รายงานโดยกรมควบคุมมลพิษ (2564) พบว่า จังหวัดที่มีค่าเฉลี่ยก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์

มากที่สุด 5 อันดับแรก ได้แก่ สระบุรี กรุงเทพมหานคร นครราชสีมา สมุทรสาคร และนนทบุรี เท่ากับ 19.3 ± 1.04 18.8 ± 0.87 18.0 ± 1.41 18.0 ± 1.32 และ 17.8 ± 1.77 พีพีบี ตามลำดับ จังหวัดที่มีค่าเฉลี่ยก๊าซโอโซนมากที่สุด 5 อันดับแรก ได้แก่ พะเยา อุบลราชธานี สงขลา เชียงใหม่ และขอนแก่น เท่ากับ 31.0 30.0 29.5 ± 16.26 28.7 ± 2.52 และ 27.0 ± 21.21 พีพีบี ตามลำดับ จังหวัดที่มีค่าเฉลี่ยฝุ่นละอองขนาดไม่เกิน 10 ไมครอนมากที่สุด 5 อันดับแรก ได้แก่ สระบุรี นครสวรรค์ ขอนแก่น พระนครศรีอยุธยา และตาก เท่ากับ 85.5 ± 6.06 57.3 ± 3.79 55.7 ± 3.51 55.0 ± 7.21 และ 52.7 ± 1.15 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ตามลำดับ และจังหวัดที่มีค่าเฉลี่ยฝุ่นละอองขนาดไม่เกิน 2.5 ไมครอนมากที่สุด 5 อันดับแรก ได้แก่ เชียงราย พะเยา ลำพูน แม่ฮ่องสอน และขอนแก่น เท่ากับ 36.5 ± 0.71 32.0 ± 0.00 31.5 ± 6.36 31.5 ± 0.71 และ 31.3 ± 2.52 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ค่าเฉลี่ยปริมาณมลพิษทางอากาศของแต่ละจังหวัดระหว่างปี พ.ศ. 2561-2563

ที่	จังหวัด	เขต สุขภาพ	NO ₂ (ppb)	O ₃ (ppb)	PM ₁₀ (ug/m ³)	PM _{2.5} (ug/m ³)
1	เชียงใหม่	1	10.8±2.47	28.7±2.52	49.2±3.75	30.2±3.01
2	ลำปาง	1	4.9±0.63	26.9±1.88	41.8±5.51	27.5±2.50
3	เชียงราย	1	6.0±1.73	19.7±2.93	46.0±9.18	36.5±0.71
4	แม่ฮ่องสอน	1	4.7±0.58	20.0±3.00	38.3±3.79	31.5±0.71
5	น่าน	1	4.0±0.50	21.8±2.47	43.2±6.21	25.5±6.50
6	ลำพูน	1	14.3±2.89	26.5±0.71	50.5±9.19	31.5±6.36
7	แพร่	1	7.0±2.83	25.7±2.52	43.3±3.79	31.0±0.00
8	พะเยา	1	6.0±0.00	31.0*	42.0±7.07	32.0±0.00
9	ตาก	2	6.0±0.00	20.7±2.08	52.7±1.15	28.7±1.15
10	นครสวรรค์	3	13.0±1.00	25.0±2.65	57.3±3.79	26.5±2.12
11	นนทบุรี	4	17.8±1.77	24.3±9.55	41.5±3.54	21.5±2.12
12	ปทุมธานี	4	14.0±1.41	22.0±0.00	36.5±2.12	23.5±2.12
13	พระนครศรีอยุธยา	4	12.3±1.15	23.7±1.15	55.0±7.21	24.0±1.41
14	สระบุรี	4	19.3±1.04	23.2±0.29	85.5±6.06	3.0±1.73
15	สมุทรสาคร	5	18.0±1.32	20.0±0.71	47.2±2.02	29.3±4.51
16	ราชบุรี	5	7.0±0.00	24.0±0.00	51.7±2.52	26.0±3.61
17	กาญจนบุรี	5	8.5±0.71	19.7±1.15	38.3±2.52	25.7±1.53
18	นครปฐม	5	9.0*	23.0*	39.0*	20.0*

ตารางที่ 2 (ต่อ)

ที่	จังหวัด	เขต สุขภาพ	NO ₂ (ppb)	O ₃ (ppb)	PM ₁₀ (ug/m ³)	PM _{2.5} (ug/m ³)
19	สมุทรสงคราม	5	8.0*	26.0*	25.0*	14.0*
20	สมุทรปราการ	6	14.9±0.95	23.2±1.76	46.0±4.55	26.7±3.51
21	ระยอง	6	11.1±0.70	22.1±2.80	41.4±2.62	17.7±2.42
22	ชลบุรี	6	12.6±0.77	22.9±1.92	42.4±2.04	21.4±3.24
23	ฉะเชิงเทรา	6	10.3±0.58	21.0±1.00	45.3±4.51	19.0±0.00
24	สระแก้ว	6	N/A**	N/A**	39.3±1.15	19.0±1.41
25	ปราจีนบุรี	6	6.0±1.00	26.3±0.58	43.3±2.31	25.0±0.00
26	ขอนแก่น	7	9.3±0.58	27.0±21.21	55.7±3.51	31.3±2.52
27	เลย	8	N/A**	N/A**	39.3±4.16	24.0±1.41
28	หนองคาย	8	4.0*	23.0*	42.0*	26.0*
29	นครราชสีมา	9	18.0±1.41	24.3±2.08	50.7±2.08	27.0*
30	อุบลราชธานี	10	7.0*	30.0*	39.0*	24.0*
31	สุราษฎร์ธานี	11	4.0±1.73	17.0±2.00	30.7±1.15	16.0±1.41
32	ภูเก็ต	11	8.5±2.12	18.3±1.15	31.0±1.73	15.0*
33	สงขลา	12	6.0±1.41	29.5±16.26	31.0±2.83	17.0±2.83
34	นราธิวาส	12	5.7±0.58	20.0±3.46	30.3±2.31	15.7±1.53
35	ยะลา	12	5.3±0.58	21.3±5.51	29.5±4.44	17.3±4.73
36	สตูล	12	3.0±0.00	18.3±1.53	22.7±2.52	12.0±2.00
37	กรุงเทพมหานคร	13	18.8±0.87	24.3±4.10	40.3±2.64	21.8±1.41

หมายเหตุ * มีข้อมูลที่กรมควบคุมมลพิษรายงานเพียง 1 ปี

** ไม่ปรากฏในข้อมูลที่กรมควบคุมมลพิษรายงาน

3. ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างความเสี่ยงต่อการเสียชีวิตด้วยโรคติดเชื้อไวรัสโคโรนา 2019 กับมลพิษทางอากาศ

เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความเสี่ยงต่อการเสียชีวิตด้วยโรคติดเชื้อไวรัสโคโรนา 2019 กับมลพิษทางอากาศ ผู้วิจัยได้วิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์แบบสเปียร์แมนของสัดส่วนการตายมาตรฐานของแต่ละจังหวัดกับค่าเฉลี่ยปริมาณมลพิษทางอากาศของแต่ละจังหวัดระหว่างปี พ.ศ. 2561–2563 ทั้ง 37 จังหวัด เพื่อดูผลกระทบจากการได้รับมลพิษทางอากาศเป็นระยะเวลาสั้น พบว่าก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์และฝุ่นละอองขนาดไม่เกิน 2.5 ไมครอน มีความสัมพันธ์อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติกับสัดส่วนการตายมาตรฐาน ดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์แบบสเปียร์แมนของสัดส่วนการตายมาตรฐานของแต่ละจังหวัด กับค่าเฉลี่ยปริมาณมลพิษทางอากาศของแต่ละจังหวัดระหว่างปี พ.ศ. 2561–2563

	SMR	NO ₂	O ₃	PM ₁₀	PM _{2.5}
SMR	1.000	0.495**	-0.268	-0.069	-0.423**
NO ₂		1.000	0.231	0.466**	0.159
O ₃			1.000	0.309	0.311
PM ₁₀				1.000	0.701**
PM _{2.5}					1.000

หมายเหตุ* p-Value น้อยกว่า 0.05 ** p-Value น้อยกว่า 0.01

จากนั้นผู้วิจัยได้นำข้อมูลมลพิษทางอากาศที่มีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ที่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ซึ่งประกอบด้วย ค่าเฉลี่ยปริมาณก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์และฝุ่นละอองขนาดไม่เกิน 2.5 ไมครอน ระหว่างปี พ.ศ. 2561–2563 มาวิเคราะห์การถดถอยเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนการตายมาตรฐานกับปริมาณมลพิษทางอากาศ ได้สมการเชิงเส้นเพียงแบบเดียวที่มีนัยสำคัญทางสถิติ คือ สมการความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่างสัดส่วนการตายมาตรฐานของโรคติดเชื้อไวรัสโคโรนา 2019 กับค่าเฉลี่ยปริมาณก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์ระหว่างปี พ.ศ. 2561–2563 โดยมีค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยของค่าเฉลี่ยปริมาณก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์ เท่ากับ 0.161 ($P\text{-value} = 0.005$, $CI = 0.054\text{--}0.269$) ดังสมการที่ 4

$$SMR = 0,161C_{NO_2} \quad (4)$$

เมื่อ C_{NO_2} แทน ค่าเฉลี่ยรายปีปริมาณก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์ในหน่วยพีพีบี

อภิปรายผล

ในการศึกษาผลของมลพิษทางอากาศที่มีต่อจำนวนผู้เสียชีวิตด้วยโรคติดเชื้อไวรัสโคโรนา 2019 ครั้งนี้ การเลือกใช้สัดส่วนการตายมาตรฐานเป็นตัวแปรแทนจำนวนผู้เสียชีวิตของแต่ละจังหวัดอ้างอิงจากงานวิจัยของ Dettori et al. (2021); Azarudeen et al. (2021) มีเหตุผลสำคัญ 2 ประการ คือ สัดส่วนการตายมาตรฐานคำนวณโดยอ้างอิงจากโครงสร้างอายุของประชากรซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อการเสียชีวิตของผู้ป่วย และไม่ขึ้นกับข้อมูลการวินิจฉัยการติดเชื้อ ซึ่งหากเป็นกรณีที่ใช้อัตราการตายรายโรค (Case fatality rate; CFR) ซึ่งเป็นอัตราส่วนระหว่างจำนวนผู้เสียชีวิตต่อจำนวนผู้ป่วยที่ได้รับการวินิจฉัย การแพร่กระจายของโรคในวงกว้างอาจทำให้มีผู้ป่วยจำนวนหนึ่งไม่ได้เข้าสู่กระบวนการวินิจฉัย เช่น ผู้ป่วยที่ไม่มีอาการหรือมีอาการไม่รุนแรง อาจทำให้ได้อัตราการตายรายโรคสูงกว่าที่ควรจะเป็น

ตัวแปรแทนปริมาณมลพิษทางอากาศในการศึกษาครั้งนี้ใช้ค่าเฉลี่ย 3 ปี ระหว่าง พ.ศ. 2561–2563 การใช้ค่าเฉลี่ยของข้อมูลมลพิษทางอากาศ 3 ปีติดต่อกันอ้างอิงจากวิธีหาค่าเฉลี่ยคุณภาพอากาศรายปีของ USEPA (Office of the Federal Register, 2022) การใช้ข้อมูลปี พ.ศ. 2561–2563 เนื่องจากข้อมูลประชากรที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้เป็นข้อมูลประชากรกลางปี พ.ศ. 2563 ซึ่งเป็นข้อมูลที่รายงานล่าสุดของสำนักงานสถิติแห่งชาติใช้แทนประชากรของแต่ละจังหวัดในช่วงเวลาที่เกิดการระบาดของโรคติดเชื้อไวรัสโคโรนา 2019 จึงสัมพันธ์กับมลพิษทางอากาศในปีเดียวกัน

ส่วนการใช้ข้อมูลสถิติจำนวนผู้เสียชีวิตด้วยโรคติดเชื้อไวรัสโคโรนา 2019 ในวันที่ 24 กันยายน พ.ศ. 2564 ในการศึกษาครั้งนี้ เพราะเป็นช่วงเวลาที่มีการระบาดในวงกว้างของโรคเนื่องจากเชื้อไวรัสโคโรนา 2019 สายพันธุ์เดลตาและผ่านช่วงที่มีจำนวนผู้เสียชีวิตสูงสุดช่วงปลายเดือนสิงหาคม 2564 มาแล้ว (สำนักงานองค์การอนามัยโลกประจำประเทศไทย, 2564)

ผลการศึกษามลพิษทางอากาศและการเสียชีวิตด้วยโรคติดเชื้อไวรัสโคโรนา 2019 ในประเทศไทยพบว่า มีความสัมพันธ์อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติระหว่างสัดส่วนการตายมาตรฐานกับปริมาณมลพิษทางอากาศ 2 ชนิด ได้แก่ ก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์ และฝุ่นละอองขนาดเล็กไม่เกิน 2.5 ไมครอน ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิจัยในหลายประเทศของ Jiang, Wu, & Guan (2020); Li et al. (2020); Zhu et al. (2020) ที่พบความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์ในอากาศกับจำนวนผู้ติดเชื้อไวรัสโคโรนา 2019 ในประเทศจีน งานวิจัยของ Ogen (2020) ที่ศึกษาการเสียชีวิตของผู้ป่วยโรคติดเชื้อไวรัสโคโรนา 2019 ในประเทศอิตาลี สเปน ฝรั่งเศส และเยอรมนี พบว่า การได้รับก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์เป็นเวลานานทำให้มีโอกาสสูงที่จะเสียชีวิตจากโรคติดเชื้อไวรัสโคโรนา 2019

ความสัมพันธ์ระหว่างก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์ในอากาศกับการเสียชีวิตของผู้ป่วยโรคติดเชื้อไวรัสโคโรนา 2019 มี 2 สมมติฐาน ซึ่งสมมติฐานแรกรายงานโดย Alifano et al. (2020) ว่ามีสาเหตุจากก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์มีผลในการเหนี่ยวนำให้เกิดการทำงานของเอนไซม์ที่ชื่อ ACE2 เพิ่มสูงขึ้น ซึ่งเอนไซม์ดังกล่าวเป็นส่วนหนึ่งของเซลล์ที่สามารถจับกับโปรตีนส่วนหนาม (Spike protein) ของเชื้อไวรัสโคโรนา 2019 ได้อย่างเหนียวแน่น ทำให้ไวรัสเข้าสู่เซลล์แล้วเกิดกระบวนการเพิ่มจำนวน โดยเอนไซม์ ACE2 พบได้ในปอด หัวใจ ไต และลำไส้เล็ก ทำให้ผู้ป่วยที่ติดเชื้อไวรัสโคโรนา 2019 มีโอกาสเสียชีวิตสูงจากอาการปอดติดเชื้อ

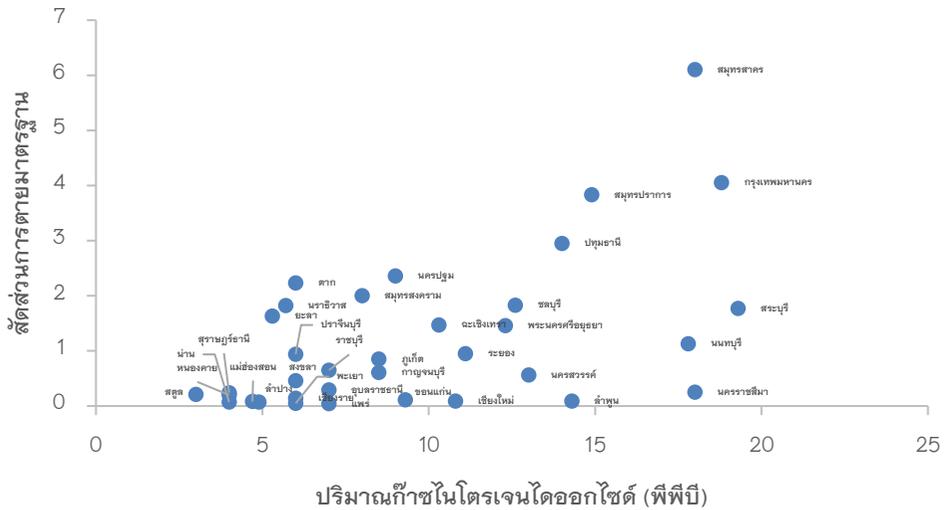
สมมติฐานที่ 2 เกี่ยวกับความสัมพันธ์ระหว่างก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์ในอากาศกับการเสียชีวิตของผู้ป่วยโรคติดเชื้อไวรัสโคโรนา 2019 รายงานโดย Di Ciaula et al. (2022) และ Ogen (2020) ว่าสาเหตุการเสียชีวิตของผู้ป่วยเกี่ยวข้องกับกลุ่มอาการที่เรียกว่า พายุไซโตไคน์ (Cytokine storm syndrome) กล่าวคือ ผู้ป่วยบางรายจะเกิดความผิดปกติของระบบภูมิคุ้มกัน โดย

เซลล์ในระบบภูมิคุ้มกันจะสร้างและหลั่งสารไซโตไคน์หลายชนิดพร้อมกันในปริมาณมากสูง กระแสเลือด ทำให้อวัยวะหลายอย่างทำงานล้มเหลว และอาจพบอาการทางระบบประสาทส่วนกลาง เช่น อาการชักอย่างรุนแรง และนำไปสู่การเสียชีวิตของผู้ป่วย กลุ่มอาการพายุไซโตไคน์นี้พบว่ามี ความเกี่ยวข้องกับการสัมผัสกับก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์ การที่ผู้ป่วยโรคติดเชื้อไวรัสโคโรนา 2019 เคยสัมผัสกับก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์มาก่อนจึงมีโอกาที่การติดเชื้อจะทำให้เกิดกลุ่มอาการดังกล่าว

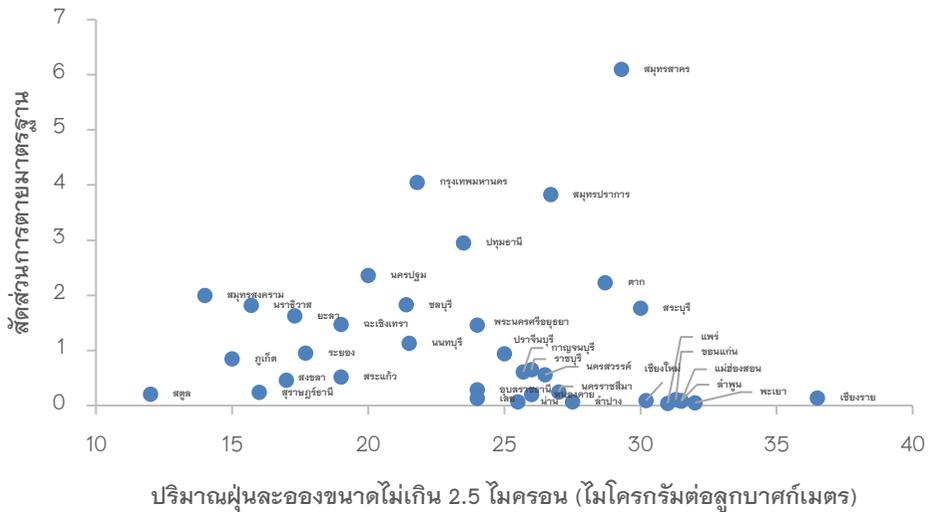
ส่วนความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณฝุ่นละอองขนาดเล็กกว่า 2.5 ไมครอนกับการเสียชีวิตของผู้ป่วยโรคติดเชื้อไวรัสโคโรนา 2019 มีผลการศึกษาที่หลากหลายตามรายงานของ Copat et al. (2020) ซึ่งรวบรวมผลการศึกษาที่เกี่ยวข้องกับบทบาทของมลพิษทางอากาศที่มีต่อการแพร่กระจายและการเสียชีวิตของโรคติดเชื้อไวรัสโคโรนา 2019 พบว่า มีงานวิจัยที่พบความสัมพันธ์ทั้งแบบแปรผันตามกันและแบบแปรผกผันกันระหว่างปริมาณฝุ่นละอองขนาดเล็กไม่เกิน 2.5 ไมครอนกับการเสียชีวิตของผู้ป่วยโรคติดเชื้อไวรัสโคโรนา 2019

ข้อมูลนี้อาจช่วยอธิบายความสัมพันธ์เชิงลบของปริมาณฝุ่นละอองขนาดเล็กไม่เกิน 2.5 ไมครอนกับสัดส่วนการตายมาตรฐานได้ คือ รายงานของ Nouvellet et al. (2021) ว่ามีความสัมพันธ์อย่างมีนัยสำคัญของพฤติกรรมการเดินทางของประชาชนกับการแพร่ระบาดของโรคติดเชื้อไวรัสโคโรนา 2019 ดังปรากฏนโยบายจำกัดการเดินทางของประชาชนเพื่อควบคุมการแพร่ระบาดของโรคในประเทศต่างๆ ทั่วโลก และจากรายงานสถานการณ์คุณภาพอากาศในประเทศไทยของสถาบันสิ่งแวดล้อมสต็อกโฮล์ม (Stockholm Environment Institute, 2021) ว่าก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์และฝุ่นละอองขนาดเล็กไม่เกิน 2.5 ไมครอนของประเทศไทยมีแหล่งกำเนิดสำคัญ คือ การขนส่งทางถนน แต่รายงานการวิจัยของ Khamkaew et al. (2016); Choo Chuay et al. (2020) พบข้อแตกต่างระหว่างแหล่งกำเนิดสำคัญของฝุ่นละอองขนาดเล็กไม่เกิน 2.5 ไมครอนว่าในจังหวัดเชียงใหม่แหล่งกำเนิดสำคัญเป็นการเผาชีวมวล ส่วนแหล่งกำเนิดสำคัญในกรุงเทพฯ เป็นการจราจร จึงเป็นไปได้ว่าปริมาณไนโตรเจนไดออกไซด์ที่สูงสะท้อนพฤติกรรมการเดินทางของประชาชนที่สูงของจังหวัดนั้น และสัมพันธ์กับการแพร่ระบาดของโรคจึงทำให้สัดส่วนการตายมาตรฐานสูง ดังภาพที่ 1

ขณะที่ปริมาณฝุ่นละอองขนาดเล็กไม่เกิน 2.5 ไมครอน ไม่ได้สะท้อนพฤติกรรมการเดินทางของประชาชนในบางจังหวัดที่มีแหล่งกำเนิดสำคัญมาจากการเผาชีวมวล จึงไม่มีความสัมพันธ์เชิงบวกกับสัดส่วนการตายมาตรฐาน นอกจากนี้ยังมีการรณรงค์ให้ประชาชนในจังหวัดที่มีปริมาณฝุ่นละอองขนาดเล็กไม่เกิน 2.5 ไมครอนสูง เช่น จังหวัดต่างๆ ในภาคเหนือ หลีกเลี่ยงการทำกิจกรรมกลางแจ้ง ซึ่งอาจส่งผลให้ประชาชนในจังหวัดเหล่านี้มีพฤติกรรมการเดินทางลดลง จึงกลับมีความสัมพันธ์เชิงลบต่อสัดส่วนการตายมาตรฐาน ดังภาพที่ 2



ภาพที่ 1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์และสัดส่วนการตายมาตรฐาน



ภาพที่ 2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณฝุ่นละอองขนาดไม่เกิน 2.5 ไมครอนและสัดส่วนการตายมาตรฐาน

ทั้งนี้การศึกษาครั้งนี้มีข้อจำกัดหลายประการ ได้แก่ (1) ข้อมูลเกี่ยวกับจำนวนผู้เสียชีวิตได้มาจากข้อมูลระดับกลุ่มประชากร ทั้งโครงสร้างอายุ และอัตราการเสียชีวิต ไม่ได้ใช้ข้อมูลรายบุคคล เช่น เพศ อายุ ข้อมูลสุขภาพต่างๆ ทำให้ไม่สามารถวิเคราะห์หลังในรายละเอียดเชิงลึกได้

อธิบายได้เพียงข้อมูลในภาพรวมของประชากรทั้งประเทศ (2) ข้อมูลมลพิษทางอากาศของแต่ละจังหวัดที่ใช้เป็นตัวแทนของพื้นที่จังหวัดนั้นๆ บางจังหวัดมีเพียงสถานีเดียว และไม่ได้ครอบคลุมทุกจังหวัดของประเทศไทย ทำให้เกิดข้อจำกัดในการวิเคราะห์ทางสถิติ ซึ่งผู้วิจัยได้พยายามทดแทนด้วยการเลือกใช้สถิติไม่อิงพารามิเตอร์ที่อาจทำให้อำนาจในการอธิบายลดลงเมื่อเทียบกับสถิติอิงพารามิเตอร์ ข้อเสนอแนะในการวิจัยต่อไปจึงควรลงรายละเอียดในข้อมูลผู้ป่วยหรือเสียชีวิตแต่ละราย และใช้เทคโนโลยีภูมิสารสนเทศพยากรณ์คุณภาพอากาศจากข้อมูลที่มีให้ครอบคลุมทุกจังหวัด

สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาถึงผลกระทบของมลพิษทางอากาศ 4 ชนิด ได้แก่ ก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์ ก๊าซโอโซน ฝุ่นละอองขนาดไม่เกิน 10 ไมครอน และฝุ่นละอองขนาดไม่เกิน 2.5 ไมครอน ต่อการเสียชีวิตของผู้ป่วยโรคติดเชื้อไวรัสโคโรนา 2019 ซึ่งผลการศึกษาพบว่าการสัมผัสกับก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์เป็นระยะเวลาสั้น มีผลต่อการเพิ่มโอกาสเสียชีวิตจากโรคติดเชื้อไวรัสโคโรนา 2019 ซึ่งผลการวิเคราะห์การถดถอยแสดงให้เห็นว่า ค่าเฉลี่ยปริมาณก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์ที่สูงกว่า 6.211 พีพีบี จะทำให้ค่าสัดส่วนการตายมาตรฐานของพื้นที่นั้นมีค่าสูงกว่า 1.0 อันหมายถึงพื้นที่นั้นมีความเปราะบางที่จะมีผู้เสียชีวิตจากโรคติดเชื้อไวรัสโคโรนา 2019 มากกว่าพื้นที่อื่นๆ โดยค่าเฉลี่ยดังกล่าวใกล้เคียงกับค่าเฉลี่ยรายปีของปริมาณก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์ตามมาตรฐานคุณภาพอากาศที่แนะนำ (Air quality guidelines) ขององค์การอนามัยโลก ปี พ.ศ. 2564 (World Health Organization, 2021) ที่กำหนดไว้ไม่เกิน 5.3 พีพีบี (10 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร) ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับมาตรฐานคุณภาพอากาศในบรรยากาศโดยทั่วไปของประเทศไทย ซึ่งกำหนดให้ค่าเฉลี่ยรายปีก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์ต้องไม่เกิน 30 พีพีบี สูงกว่าที่ควรจะเป็นจากผลการศึกษาครั้งนี้มาก ควรที่จะได้นำไปเป็นข้อมูลเพื่อทบทวนการกำหนดค่ามาตรฐานคุณภาพอากาศในบรรยากาศโดยทั่วไปของประเทศไทยให้สอดคล้องกับสถานการณ์และหลักฐานทางวิทยาศาสตร์ที่เป็นปัจจุบันต่อไป

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณแหล่งข้อมูลสำคัญที่นำมาใช้ในการศึกษาวิจัยครั้งนี้ อันได้แก่ ข้อมูลเกี่ยวกับจำนวนผู้เสียชีวิตจากโรคติดเชื้อไวรัสโคโรนา 2019 กรมควบคุมโรค กระทรวงสาธารณสุข ข้อมูลปริมาณมลพิษทางอากาศ กรมควบคุมมลพิษ กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม และขอขอบคุณคณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏนครสวรรค์ ที่สนับสนุนให้ผู้วิจัยผลิตผลงานครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

- กรมควบคุมมลพิษ. (2564). **รายงานสถานการณ์และคุณภาพอากาศประเทศไทย**. สืบค้นเมื่อ 17 พฤศจิกายน 2564. จาก <http://air4thai.pcd.go.th/webV2/download.php>
- กรมควบคุมโรค. (2564). **สถานการณ์ผู้ติดเชื้อ COVID-19 รายพื้นที่ กระทรวงสาธารณสุข**. สืบค้นเมื่อ 24 กันยายน 2564. จาก <https://ddc.moph.go.th/covid19-dashboards/index.php?dashboard=province>
- สำนักงานสถิติแห่งชาติ. (2564). **จำนวนประชากรจากการทะเบียน จำแนกตามกลุ่มอายุ รายจังหวัด และ ภาค พ.ศ. 2554 – 2563**. สืบค้นเมื่อ 19 สิงหาคม 2564. จาก http://statbbi.nso.go.th/staticreport/Page/sector/TH/report/sector_01_11102_TH_.xlsx
- สำนักงานองค์การอนามัยโลกประจำประเทศไทย. (2564). **รายงานสถานการณ์โดยองค์การอนามัยโลก ประจำประเทศไทยฉบับที่ 202 COVID-19**. สืบค้นเมื่อ 25 ตุลาคม 2564. จาก https://cdn.who.int/media/docs/default-source/searo/thailand/2021_09_23_tha-sitrep-202-covid19.pdf?sfvrsn=3a8bb0aa_5
- สุรียยา หมานมานะ, โสภณ เขี่ยมศิริถาวร, และสุนนมาลย์ อุทัยมกุล, (2563). โรคติดเชื้อไวรัสโคโรนา 2019 (COVID-19). **วารสารสถาบันบำราศนราดูร**, 14(2), 124–133.
- Ali, N., Fariha, K.A., Islam, F., Mishu, M.A., Mohanto, N.C., Hosen, M.J., & Hossain, K. (2021). Exposure to air pollution and COVID-19 severity: A review of current insights, management, and challenges. **Integrated Environmental Assessment and management**, 17(6), 1114–1122.
- Alifano, M., Alifano, P., Forgez, P., & Iannelli, A. (2020). Renin-angiotensin system at the heart of COVID-19 pandemic. **Biochimie**, 174, 30–33.
- Azarudeen, M.J., Aroskar, K., Kurup, K.K., Dikid, T., Chauhan, H., Jain, S.K., & Singh, S.K. (2021). Comparing COVID-19 mortality across selected states in India: The role of age structure. **Clinical Epidemiology and Global Health**, 12, 100877.
- ChooChuay, C., Pongpiachan, S., Tipmanee, D., Suttinun, O., Deelaman, W., Wang, Q., Xing, L. Li, G., Han, Y., Palakun, J., & Cao, J. (2020). Impacts of PM_{2.5} sources on variations in particulate chemical compounds in ambient air of Bangkok, Thailand. **Atmospheric Pollution Research**, 11(9), 1657–1667.
- Copat, C., Cristaldi, A., Fiore, M., Grasso, A., Zuccarello, P., Signorelli, S.S., Conti, G.O., & Ferrante, M. (2020). The role of air pollution (PM and NO₂) in COVID-19 spread and lethality: A systematic review. **Environmental Research**, 191, 110129.
- Dettori, M., Deiana, G., Balletto, G., Borruso, G., Murgante, B., Arghittu, A., Azara, A., & Castiglia, P. (2021). Air pollutants and risk of death due to COVID-19 in Italy. **Environmental Research**, 192, 110459.

- Di Ciaula, A., Bonfrate, L., Portincasa, P., IMC–19 Group, Appice, C., Belfiore, A., Binetti, M., Cafagna, G., Campanale, G., Carrieri, A., Cascella, G., Cataldi, S., Cezza, A., Ciannarella, M., Cicala, L., D'Alitto, F., Dell'Acqua, A., Dell'Anna, L., Diaferia, M., Erroi, G., Fiermonte, F., Galerati, I., Giove, M., Grimaldi, L., Mallardi, C., Mastrandrea, E., Mazelli, G.D., Mersini, G., Messina, G., Messina, M., Montesano, A., Noto, A., Novielli, M.E., Noviello, M., Palma, M.V., Palmieri, V.O., Passerini, F., Perez, F., Piro, C., Prigigallo, F., Pugliese, S., Rossi, O., Stasi, C., Stranieri, R., & Vitariello, G. (2022). Nitrogen dioxide pollution increases vulnerability to COVID–19 through altered immune function. **Environmental Science and Pollution Research**, <https://doi.org/10.1007/s11356-022-19025-0>.
- Frontera, A., Cianfanelli, L., Vlachos, K., Landoni, G., & Cremona, G. (2020). Severe air pollution links to higher mortality in COVID–19 patients: The “double-hit” hypothesis. **Journal of Infection**, **81**, 255–259.
- Jiang, Y., Wu, X., & Guan, Y. (2020). Effect of ambient air pollutants and meteorological variables on COVID–19 incidence. **Infection Control & Hospital Epidemiology**, **41**, 1011–1015.
- Johns Hopkins University, & Medicine. (2021). **Mortality analyses: Cases and mortality by country**. Retrieved October 25, 2021, from <http://coronavirus.jhu.edu/data/mortality>
- Khamkaew, C., Chantara, S., Janta, R., Pani, S.K., Prapamontol, T., Kawichai, S., Wiriyawong, W., & Lin, N.H. (2016). Investigation of biomass burning chemical components over Northern Southeast Asia during 7–SEAS/BASELInE 2014 campaign. **Aerosol and Air Quality Research**, **16**, 2655–2670.
- Li, H., Xu, X., Dai, D., Huang, Z., Ma, Z., & Guan, Y. (2020). Air pollution and temperature are associated with increased COVID–19 incidence: a time series study. **International Journal of Infectious Disease**, **97**, 278–282.
- Mendy, A., Wu, X., Keller, J.L., Fassler, C.S., Apewokin, S., Mersha, T.B., Xie, C., & Pinney, S.M. (2021). Air pollution and the pandemic: long-term PM_{2.5} exposure and disease severity in COVID–19 patients. **Respirology**, **26**, 1181–7.
- Nouvellet, P., Bhatia, S., Cori, A., Ainslie, K.E.C., Baguelin, M., Bhatt, S., Boonyasiri, A., Brazeau, N.F., Cattarino, L., Cooper, L.V., Coupland, H., Cucunubá, Z.M., Cuomo-Dannenburg, G., Dighe, A., Djaafara, B.A., Dorigatti, I., Eales, O.D., van Elsland, S.L., Nascimento, F.F., FitzJohn, R.G., Gaythorpe, K.A.M., Geidelberg, L., Green, W.D., Hamlet, A., Hauck, K., Hinsley, W., Imai, N., Jeffrey, B., Knock, E., Laydon, D.J., Lees, J.A., Mangal, T., Mellan, T.A., Nedjati-Gilani, G., Parag, K.V., Pons-Salort, M., Ragonnet-Cronin, M., Riley, S., Unwin, H.J.T., Verity, R., Vollmer, M.A.C., Volz, E., Walker, P.G.T., Walters, C.E., Wang, H., Watson, O.J., Whittaker, C., Whittles, L.K., Xi, X., Ferguson, N.M., & Donnelly, C.A. (2021). Reduction in mobility and COVID–19 transmission. **Natural Communication**, **12**, 1090.

- Office of the Federal Register. (2022). **CFR Part 50 National Primary and Secondary Ambient Air Quality Standards**. Retrieved February 10, 2022, from <https://www.ecfr.gov/current/title-40/chapter-I/subchapter-C/part-50?toc=1>
- Ogen, Y. (2020). Assessing nitrogen dioxide (NO₂) levels as a contributing factor to coronavirus (COVID-19) fatality. **Science of the Total Environment**, **726**, 138605.
- Paital, B., & Agrawal, P.K. (2021). Air pollution by NO₂ and PM_{2.5} explains COVID-19 infection severity by overexpression of angiotensin-converting enzyme 2 in respiratory cells: a review. **Environmental Chemistry Letters**, **19**, 25–42.
- Stockholm Environment Institute. (2021). **Air quality in Thailand: Understanding the regulatory**. Retrieved February 10, 2022, from <https://cdn.sei.org/wp-content/uploads/2021/02/210212c-killeen-archer-air-quality-in-thailand-wp-2101e-final.pdf>
- Vandenbroucke, J.P. (1982). A shortcut method for calculating the 95 per cent confidence interval of the standardized mortality ratio. **American Journal of Epidemiology**, **115**(2), 303–304.
- Veronesi, G., De Matteis, S., Calori, G., Pepe, N., & Ferrario, M.M. (2022). Long-term exposure to air pollution and COVID-19 incidence: a prospective study of residents in the city of Varese, Northern Italy. **Occupational and Environmental Medicine**, **0**, 1–8.
- World Health Organization. (2021). **WHO global air quality guidelines: particulate matter (PM_{2.5} and PM₁₀), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide: executive summary**. Retrieved November 21, 2021, from <https://apps.who.int/iris/handle/10665/345334>
- Wu, X., Nethery, R.C., Sabath, B.M., Braun, D., & Dominici, F. (2020). Air pollution and COVID-19 mortality in the United States: Strengths and limitations of an ecological regression analysis. **Science Advance**, **6**, eabd4049.
- Zhu, Y., Xie, J., Huang, F., & Cao, L. (2020). Association between short-term exposure to air pollution and COVID-19 infection: evidence from China. **Science of the Total Environment**, **727**, 138704.