

คุณภาพอากาศภายในห้องเรียนมหาวิทยาลัย: การวิเคราะห์เชิงทฤษฎี กรณีศึกษาจังหวัดชลบุรี

รจนา ประไพพ

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ ศรีราชา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิทยาเขตศรีราชา ชลบุรี 20230

E-mail: rotchana@eng.src.ku.ac.th

รับบทความ: 4 กันยายน 2568 แก้ไขบทความ: 27 ตุลาคม 2568 ยอมรับตีพิมพ์: 2 พฤศจิกายน 2568

บทคัดย่อ

คุณภาพอากาศภายในอาคารสถานศึกษามีผลกระทบต่อประสิทธิภาพการเรียนรู้และสุขภาพของผู้ใช้อาคาร การศึกษานี้วิเคราะห์ความเข้มข้นของ PM_{2.5} และ CO₂ ในห้องเรียนอุดมศึกษาจังหวัดชลบุรี โดยใช้แนวทางการจำลองทางคณิตศาสตร์เชิงทฤษฎี ห้องเรียนกรณีศึกษามีความจุสูงสุด 46 คน พื้นที่ 64 m² ปริมาตร 185.6 m³ เป็นห้องปรับอากาศที่มีพัดลมระบายอากาศ ยังไม่มีระบบกรองอากาศหรือเครื่องฟอกอากาศ การศึกษาจำลองสถานการณ์ปัจจุบันและกรณีที่มีเครื่องฟอกอากาศโดยใช้สมการสมดุลมวลในสภาวะคงตัว ผลการศึกษาพบว่าอัตราการแลกเปลี่ยนอากาศ 9.39 h⁻¹ เพียงพอรักษาระดับ CO₂ ไม่เกิน 1,000 ppm เมื่อใช้งานเต็มความจุ CO₂ ในห้องคำนวณได้ 829 ppm (กรณีกำหนด CO₂ ภายนอก 430 ppm) สำหรับ PM_{2.5} เมื่อไม่มีเครื่องฟอกอากาศ หากฝุ่น PM_{2.5} ภายนอกเท่ากับ 60 µg/m³ การคำนวณพบว่าภายในห้องจะมีฝุ่น PM_{2.5} เท่ากับ 47.49 µg/m³ การประเมินขนาดเครื่องฟอกอากาศเพื่อรักษาระดับ PM_{2.5} ภายในห้องให้ได้ 15 µg/m³ (เกณฑ์อากาศดีมาก) เมื่อฝุ่นภายนอก 30–70 µg/m³ จะต้องใช้ CADR 1,027–4,745 m³/h หากต้องการควบคุมค่าฝุ่น PM_{2.5} ภายในห้องให้ได้ระดับที่ต่ำกว่า 25 µg/m³ (เกณฑ์อากาศดี) ต้องใช้ CADR 1,800 m³/h การเปรียบเทียบผลคำนวณกับการวัดจริงพบว่า I/O ratio ของ PM_{2.5} จากการคำนวณเท่ากับ 0.79 และจากการวัดแล้วปรับค่าเท่ากับ 0.75–0.79 (ห้องไม่มีเครื่องฟอกอากาศ) เมื่อ PM_{2.5} วัดได้ตั้งแต่ 4 µg/m³ ขึ้นไป แสดงให้เห็นความแม่นยำของแบบจำลอง แต่การปรับค่าที่ PM_{2.5} ต่ำกว่า 4 µg/m³ ยังไม่แม่นยำนัก ส่วน CO₂ ความแม่นยำในการทำนายขึ้นกับการกำหนดค่า CO₂ ภายนอก อัตราการระบายอากาศ และอัตราการผลิต CO₂ ในห้องที่เหมาะสม ข้อจำกัดของการศึกษา คือ เป็นการศึกษาเชิงทฤษฎี สมมติพารามิเตอร์เป็นค่าคงที่ และศึกษาเฉพาะภาวะคงตัว การศึกษานี้สามารถใช้เป็นแนวทางในการทำนาย CO₂ การประมาณขนาดเครื่องฟอกอากาศที่เหมาะสม และการทำนายระดับ PM_{2.5} ภายในห้องเรียนซึ่งเป็นประโยชน์ในการเลือกระบบฟอกอากาศสำหรับสถานศึกษาต่อไป

คำสำคัญ: ฝุ่นละอองขนาดเล็กไม่เกิน 2.5 ไมครอน คาร์บอนไดออกไซด์ ห้องเรียน การวิเคราะห์เชิงทฤษฎี คุณภาพอากาศภายใน

Indoor Air Quality in University Classrooms: A Theoretical Modeling Approach with a Case Study in Chonburi

Rotchana Prapainop

Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering at Sri Racha,
Kasetsart University, Sri Racha Campus, Chonburi 20230, Thailand
E-mail: rotchana@eng.src.ku.ac.th

Received: 4 September 2025 Revised: 27 October 2025 Accepted: 2 November 2025

Abstract

Indoor air quality in educational buildings significantly impacts learning efficiency and occupant health. This study analyzes PM_{2.5} and CO₂ concentrations in higher education classrooms in Chonburi Province using theoretical mathematical modeling approaches. The case study classroom has a maximum capacity of 46 occupants, floor area of 64 m², volume of 185.6 m³, and is air-conditioned with exhaust fans but lacks air filtration or purification systems. The study simulates current conditions and scenarios with air purifiers using steady-state mass balance equations. Results indicate that an air exchange rate of 9.39 h⁻¹ is sufficient to maintain CO₂ levels below 1,000 ppm at full occupancy. Indoor CO₂ concentration was calculated at 829 ppm (assuming outdoor CO₂ of 430 ppm). For PM_{2.5} without air purification, when outdoor PM_{2.5} equals 60 µg/m³, calculations show indoor PM_{2.5} concentration of 47.49 µg/m³. Air purifier sizing assessment to maintain indoor PM_{2.5} at 15 µg/m³ (excellent air quality standard) with outdoor concentrations of 30–70 µg/m³ requires CADR of 1,027–4,745 m³/h. To control indoor PM_{2.5} below 25 µg/m³ (good air quality standard), CADR of 1,800 m³/h is required. Comparison between calculated and measured with adjusted results shows PM_{2.5} I/O ratios of 0.79 (calculated) and 0.75–0.79 (measured and adjusted) for rooms without air purifiers when PM_{2.5} is equal or higher than 4 µg/m³, demonstrating model accuracy. However, for PM_{2.5} is smaller than 4 µg/m³, the accuracy of prediction is reduced. For CO₂, prediction accuracy depends on appropriate assumptions of outdoor CO₂ concentrations, ventilation rates, and indoor CO₂ generation rates. Study limitations include theoretical approach, constant parameter assumptions, and steady-state conditions only. This study provides guidance for CO₂ prediction, appropriate air purifier sizing estimation, and indoor PM_{2.5} level prediction in classrooms, which is beneficial for selecting air purification systems for educational institutions.

Keywords: Particulate matter 2.5, Carbon dioxide, Classroom, Theoretical analysis, Indoor air quality

บทนำ

คุณภาพอากาศภายในอาคาร (indoor air quality: IAQ) หรือภายในห้องเรียนมีผลกระทบโดยตรงต่อสุขภาพและประสิทธิภาพการเรียนรู้ของผู้เรียน สารที่เกี่ยวข้องกับคุณภาพอากาศภายในอาคารมีหลายรายการ (Department of Health, 2022) ในที่นี้จะยกตัวอย่างสองรายการ ได้แก่ ฝุ่นละอองขนาดเล็ก PM2.5 และแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) สำหรับ PM2.5 เป็นฝุ่นละอองขนาดเล็กกว่า 2.5 ไมครอนที่สามารถเข้าสู่ปอดได้ลึกและเพิ่มความเสี่ยงต่อการเจ็บป่วยและการเสียชีวิต ผลกระทบจาก PM2.5 ที่เข้มข้นยังส่งผลต่อโรคหัวใจและหลอดเลือด (Rackow *et al.*, 2025) และเมื่อ polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) ซึ่งเป็นสารอินทรีย์ที่เกิดจากการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ของวัสดุอินทรีย์และเป็นสารก่อมะเร็งติดอยู่กับ PM2.5 ยิ่งเพิ่มความเสี่ยงมะเร็งปอด (Wang *et al.*, 2025; Zhang *et al.*, 2009) ส่วน CO₂ ที่ระดับสูงส่งผลเสียต่อสมรรถนะทางปัญญา ความสามารถในการตัดสินใจและประสิทธิภาพการเรียนรู้โดยรวมของผู้เรียน เช่น ระดับ CO₂ ภายในห้องเรียนที่สูงกว่า 1000 ppm บ่งบอกถึงการระบายอากาศที่ไม่เพียงพอและคุณภาพอากาศในห้องที่อาจมีปัญหา ส่งผลต่อประสิทธิภาพและผลสัมฤทธิ์ทางการศึกษาของผู้เรียน (Makaremi *et al.*, 2024)

ห้องเรียนถือว่าเป็นห้องในอาคารสาธารณะประเภทการชุมนุมคนเพื่อกิจกรรมการศึกษา กรมอนามัยประเทศไทยแนะนำว่า CO₂ ในห้องไม่ควรเกิน 1,000 ppm (ค่าเฉลี่ยใน 8 ชั่วโมงหรือเฉลี่ยค่าที่ตรวจวัดครึ่งชั่วโมงจำนวนทั้งหมดสี่ช่วงเวลาตลอดระยะเวลาที่มีผู้ใช้งานอยู่ในอาคาร) และ PM2.5 ไม่ควรเกิน 25 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์-

เมตร (µg/m³) (ค่าเฉลี่ยใน 24 ชั่วโมงหรือต่อวัน) (Department of Health, 2022) สำหรับ CO₂ ที่กรมอนามัยประเทศไทยระบุนี้สอดคล้องกับคำแนะนำตามมาตรฐาน ASHRAE 62.1-2022 (ASHRAE, 2022) ส่วนค่า PM2.5 องค์การอนามัยโลกระบุค่า air quality guidelines (AQG) ว่าสำหรับ PM2.5 ไม่ควรเกิน 5 µg/m³ ต่อปี และไม่ควรเกิน 15 µg/m³ ต่อวัน ค่า PM2.5 นี้คือค่าเป้าหมายที่ WHO แนะนำให้ทุกประเทศมุ่งเป้าไปถึง อย่างไรก็ตามหลายประเทศยังไม่สามารถบรรลุค่า AQG ได้ในทันที จึงแนะนำให้ค่อย ๆ ลดระดับ PM2.5 ไปทีละขั้นเพื่อช่วยลดความเสี่ยงต่อสุขภาพ (WHO, 2021)

การระบายอากาศโดยทั่วไปมี 2 วิธี ได้แก่ การระบายอากาศแบบธรรมชาติ (natural ventilation) และการระบายอากาศแบบบังคับ (forced ventilation) ในส่วนของการระบายอากาศแบบบังคับมีอีกหลายรูปแบบ ได้แก่ การติดตั้งแค่พัดลมดูดอากาศออก (exhaust fan) การติดตั้งทั้งพัดลมดูดอากาศเข้า (fresh air fan) และพัดลมดูดอากาศออก (exhaust fan) และการติดตั้ง energy recovery ventilator (ERV) (Keawmanee, 2019) โดยภาพรวมการมีพัดลมดูดอากาศเข้าห้องจะเรียกว่ามี outside air unit (OAU) หรือเครื่องเติมอากาศบริสุทธิ์ Maneewattana (2019) เสนอแนวปฏิบัติเพื่อป้องกัน PM2.5 ไม่ให้มีค่าเกิน 25 µg/m³ ในอาคารไว้สองวิธี วิธีแรกใช้เครื่องฟอกอากาศอย่างเดียวโดยไม่ใช้ OAU ซึ่งเหมาะกับพื้นที่ที่มีค่าฝุ่น PM2.5 ภายนอกไม่สูงมากนัก วิธีที่สอง คือ การใช้ OAU ที่มีแผงกรองฝุ่น MERV14/16/ HEPA โดยจะใช้ร่วมกับเครื่องฟอกอากาศหรือไม่ก็ได้

Han *et al.* (2025) ศึกษาห้องเรียนระดับประถมศึกษาในโรงเรียน 3 แห่งในเกาหลีใต้ขนาด

พื้นที่ 67.5–79.0 m² ต่อห้อง จำนวนคน 22–25 ต่อห้อง โดยทุกห้องมีเครื่องปรับอากาศส่วนระบายอากาศในห้องเป็นแบบธรรมชาติผ่านการเปิดหน้าต่าง และมีเพียง 1 ห้อง (ห้องขนาด 79 m²) (จากจำนวน 3 ห้องที่เขาศึกษา) ที่ใช้เครื่องฟอกอากาศ เขาพบว่าแหล่งที่มาของฝุ่น PM_{2.5} ในห้องเรียนร้อยละ 77 มาจากอากาศภายนอกที่ซึมผ่านเข้ามาผ่านโครงสร้างอาคาร และอีกร้อยละ 23 เกิดจากกิจกรรมในห้องเรียน เช่น การเคลื่อนไหว การเปิดหน้าต่าง ค่า indoor to outdoor ratio ของฝุ่น PM_{2.5} ในระหว่างที่ไม่มีคนใช้ห้องเท่ากับ 0.65–0.86 นอกจากนี้ยังพบว่าเครื่องฟอกอากาศในห้องเรียนที่เขาศึกษาช่วยลดฝุ่น PM_{2.5} ในห้องลงได้ประมาณร้อยละ 38 หรือ 6.1 µg/m³ โดยเมื่อ PM_{2.5} ภายนอก 20.1 (±4.0) µg/m³ พบว่า ห้องที่ใช้เครื่องฟอกอากาศ PM_{2.5} ลดเหลือ 13 (±3.6) µg/m³

ห้องเรียนในมหาวิทยาลัยแห่งหนึ่งมีหลายขนาดและเป็นห้องเรียนปรับอากาศติดตั้งพัดลมระบายอากาศแบบติดผนัง และยังไม่มียุทธศาสตร์การระบายอากาศในห้องเรียนสถานการณ์ปัจจุบันสมมติว่าอากาศภายนอกเป็น อากาศบริสุทธิ์และนำมาเจือจาง CO₂ ในห้องโดยตรง แต่สถานการณ์ปัจจุบันประเทศไทยมีระดับฝุ่น PM_{2.5} ภายนอกที่มีค่าสูงขึ้นและสูงกว่าคำแนะนำเป็นเวลาหลายเดือนต่อปี (Pollution Control Department, 2025) ถึงแม้จะมีร่าง พ.ร.บ. อากาศสะอาดเพื่อประชาชนโดยสาระสำคัญเป็นความพยายามในการควบคุมมลพิษจากแหล่งกำหนดแล้ว (Subcommittee for Promoting Clean Air Law Proposals, 2023) แต่ตราบไต่ที่สถานการณ์ระดับฝุ่น PM_{2.5} ภายนอกมีค่าสูงเกินกว่าคำแนะนำเพื่อความปลอดภัยในการบริหารจัดการ

ห้องเรียนในสถานศึกษาจึงต้องคำนึงถึงอิทธิพลของระดับ PM_{2.5} ภายนอกต่อระดับ PM_{2.5} ภายในห้องเรียนและแก้ปัญหาเฉพาะหน้าหรือแก้ปัญหาระยะยาวเช่นกัน การประเมินคุณภาพอากาศในห้องเรียนยังคงเป็นสิ่งสำคัญ บทความนี้จึงนำเสนอการวิเคราะห์เชิงทฤษฎีในสภาวะคงตัวด้านคุณภาพอากาศภายในห้องเรียนในแง่ CO₂ และ PM_{2.5} ในห้องเรียน โดยห้องเรียนที่ศึกษาในบทความนี้เป็นห้องเรียนขนาดเล็กในมหาวิทยาลัยแห่งหนึ่งในจังหวัดชลบุรี และใช้วิธีจำลองสถานการณ์ตามพารามิเตอร์ที่กำหนดเพื่อประเมินความเข้มข้น CO₂ ภายในห้องเรียน เลือกขนาดเครื่องฟอกอากาศ และทำนาย PM_{2.5} ในห้องเรียน เป็นต้น

วิธีดำเนินการวิจัย

การวิจัยนี้เป็นการวิเคราะห์เชิงทฤษฎีโดยใช้ข้อมูลจำนวนหนึ่งจากกรณีศึกษาห้องเรียนดังในภาพที่ 1–4 ซึ่งแสดงลักษณะหน้าห้องเรียนหลังห้องเรียน ประตูทางเข้าห้องเรียน หน้าต่างห้องเรียน ตามลำดับ สำหรับภาพที่ 3 แสดงประตูทางเข้าห้องเรียนจะเห็นว่าประตูทางเข้าห้องเรียนอยู่ติดกับโถงทางเดินภายในอาคาร ห้องเรียนติดตั้งพัดลมระบายอากาศแบบดูดออกที่ผนัง ในการวัดค่า CO₂ และ PM_{2.5} เป็นการวัดสภาพสิ่งแวดล้อมในห้องและนอกห้องในสถานการณ์จริงแล้วนำมาเปรียบเทียบกับค่าที่ประเมินด้วยสมการที่ (1) และ (3) ที่จะกล่าวถึงต่อไป โดยตารางการใช้ห้องเรียนที่ศึกษาสำหรับรายวิชาที่ผู้วิจัยทำการสอนตามปกติ คือ เวลา 9.00–12.00 น. สัปดาห์ละครั้ง กิจกรรมการเรียนการสอนดำเนินไปตามปกติเป็นเพียงการวัดสภาวะสิ่งแวดล้อมผู้วิจัยอ่านค่า CO₂ และ PM_{2.5} จากเครื่องมือวัด

ณ เวลา 10.00 น. ขนาดห้องเรียนและอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องดังนี้

ข้อมูลจำเพาะของห้องเรียน: ขนาด $8.0 \times 8.0 \times 2.9$ เมตร (ยาว $\times$ กว้าง $\times$ สูง) ปริมาตร 185.6 ลูกบาศก์เมตร จำนวนผู้เรียนสูงสุด 45 คนและจำนวนอาจารย์ 1 คน รวมเป็นจำนวนผู้ใช้ห้องสูงสุด 46 คน อย่างไรก็ตามในภาคการศึกษาที่พิจารณา ห้องเรียนนี้มีผู้เรียนในระบบลงทะเบียนเรียนจำนวน 16 คนเท่านั้นและการเข้าเรียนแต่ละครั้งอาจมีจำนวนผู้เรียนน้อยกว่าหรือเท่ากับจำนวนที่ลงทะเบียนเรียนได้ การจัดที่นั่งเป็นแบบบรรยายแถวเรียง กิจกรรมนั่งเรียนหรือทำกิจกรรมในห้องเรียน (ถ้ามี) ด้วยแท็บเล็ตส่วนตัว หน้าต่างเป็นกระจกแบบบานเลื่อนกรอบอลูมิเนียม จำนวน 2 ชุด ประตูเป็นประตูไม้แบบสองบานเปิดจำนวน 1 ชุด พัดลมระบายอากาศมี 3 เครื่อง ขนาด $581.4 \text{ m}^3/\text{h}$ ต่อเครื่อง (รวม $1,744.2 \text{ m}^3/\text{h}$) หรือกล่าวได้ว่า มีอัตราการระบายอากาศสูงสุด 9.39 ACH (จากพัดลมระบายอากาศแบบดูดออก $1,744.2 \text{ m}^3/\text{h}$ หารด้วย 185.6 m^3) อุปกรณ์การสอนประกอบด้วยบอร์ดดิจิทัล (ไม่มีฝุ่นจากชอล์ก ปากกา หรือกระดาษ) ระบบกรองอากาศเข้าสู่ห้องในสถานการณ์จริงยังไม่มีระบบกรอง $\text{PM}_{2.5}$ ในห้องเรียนนี้ แต่ในการศึกษามีการสมมติว่าหากมีเครื่องฟอกอากาศพกพาอยู่ภายในห้องจะต้องใช้ขนาดเท่าไรหรือถ้ากำหนดว่ามีเครื่องฟอกอากาศขนาดใดขนาดหนึ่งแล้วค่า $\text{PM}_{2.5}$ ภายในจะมีค่าเท่าไร

เครื่องมือวัด: ในการศึกษาที่ใช้เครื่องมือวัดราคาประหยัดในการวัดค่า $\text{PM}_{2.5}$ CO_2 ยี่ห้อ Qingping รุ่น Air Monitor Lite ที่ใช้เซ็นเซอร์วัด $\text{PM}_{2.5}$ แบบ built-in laser scattering และเซ็นเซอร์วัด CO_2 แบบ nondispersive infrared (NDIR) จากการทดสอบภายในของผู้นิพนธ์พบว่า สำหรับ $\text{PM}_{2.5}$



ภาพที่ 1 ลักษณะหน้าห้องเรียน



ภาพที่ 2 ลักษณะหลังห้องเรียน



ภาพที่ 3 ประตูทางเข้าห้องเรียนติดกับทางเดินในอาคารและพัดลมระบายอากาศติดผนังปล่อยสู่ทางเดินในอาคาร



ภาพที่ 4 ลักษณะเครื่องปรับอากาศและหน้าต่างในห้องเรียน

ช่วงการวัด 0–500 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ความแม่นยำ $\pm 10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ เมื่อค่า PM2.5 ที่วัดได้น้อยกว่า 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ และ $\pm 10\%$ เมื่อค่า PM2.5 ที่วัดได้มากกว่า 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ และสำหรับ CO₂ ช่วงการวัด 400–5000 ppm ความแม่นยำ $\pm 15\%$ ในการศึกษานี้เปรียบเทียบค่า PM2.5 ที่วัดได้จากเครื่องมือวัดราคาประหยัดนี้กับเครื่องมือวัดคุณภาพสูง (ราคาสูง) ของกรมควบคุมมลพิษที่แสดงข้อมูลทางเว็บไซต์ และประเมินหาการปรับค่าที่เหมาะสมเพื่อให้สามารถใช้เครื่องมือวัดราคาประหยัดนี้ในการประเมินผลได้แม่นยำขึ้น

ดัชนีคุณภาพอากาศ: ตาราง 1 แสดงดัชนีคุณภาพอากาศประเทศไทย และประชาชนกลุ่ม

ตาราง 1 ดัชนีคุณภาพอากาศประเทศไทย ในตารางนี้แสดงเฉพาะ PM2.5

สี	PM2.5 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	คุณภาพ	หมายเหตุ
ฟ้า	0–15	ดีมาก	ประชาชนทุกคนสามารถดำเนินชีวิตได้ตามปกติ
เขียว	15.1–25	ดี	ประชาชนทั่วไปสามารถทำกิจกรรมกลางแจ้งได้ ประชาชนกลุ่มเสี่ยง ควรสังเกตอาการผิดปกติ
เหลือง	25.1–37.5	ปานกลาง	ประชาชนทั่วไป ลดระยะเวลาการทำกิจกรรมกลางแจ้ง ประชาชนกลุ่มเสี่ยง ใช้อุปกรณ์ป้องกันตนเอง
ส้ม	37.6–75	เริ่มมีผลต่อสุขภาพ	ประชาชนทั่วไป ใช้อุปกรณ์ป้องกันตนเอง
แดง	≥ 75.1	มีผลต่อสุขภาพ	ประชาชนทุกคน งดกิจกรรมกลางแจ้ง

ที่มา: Pollution Control Department, 2023

ตาราง 2 ค่าเฉลี่ย 24 ชั่วโมง ของ PM2.5 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) ที่ตรวจวัดที่สถานีสนามกีฬาเทศบาลแหลมฉบัง ตำบลทุ่งสุขลา อำเภอสัตหีบ จังหวัดชลบุรี ปี พ.ศ. 2567 – 5 เดือนแรกของปี พ.ศ. 2568

เดือน	ค่าสูงสุด	ค่าต่ำสุด	ค่าเฉลี่ยรายเดือน	เดือน	ค่าสูงสุด	ค่าต่ำสุด	ค่าเฉลี่ยรายเดือน
1/67	59.6	22.2	37	10/67	30.5	7.9	16
2/67	62.4	12.0	24	11/67	32.1	10.9	17
3/67	42.1	11.1	20	12/67	35.8	10.8	22
4/67	29.6	6.4	16	1/68	67.2	15.8	38
5/67	40.4	7.6	18	2/68	63.1	17.1	33
6/67	12.7	5.7	9	3/68	55	12.8	24
7/67	13.7	7.4	10	4/68	32.1	7.6	15
8/67	16.7	6.1	10	5/68	20.4	7.5	12
9/67	24.7	6.9	12				

ที่มา: Pollution Control Department, 2025

เสี่ยงที่ระบุในตารางหมายถึงประชาชนที่อาจเสี่ยงต่อการได้รับผลกระทบต่อสุขภาพจากมลพิษทางอากาศมากกว่าประชาชนทั่วไป เช่น ผู้สูงอายุมากกว่า 60 ปีขึ้นไป เด็กเล็กอายุไม่เกิน 5 ปี หญิงตั้งครรภ์ ผู้ป่วยโรคระบบหัวใจและหลอดเลือด และโรคระบบทางเดินหายใจ ประชาชนทั่วไปหมายถึงประชาชนนอกเหนือกลุ่มเสี่ยง

สถิติ PM2.5: ตาราง 2 แสดงค่าเฉลี่ยของ PM2.5 ที่ตรวจวัดโดยกรมควบคุมมลพิษที่สถานีสนามกีฬาเทศบาลแหลมฉบังซึ่งห่างจากสถานศึกษาที่พิจารณาประมาณ 650 เมตรจึงถือว่าอยู่บริเวณพื้นที่ใกล้เคียงกัน

จากตาราง 2 จะเห็นว่าในปี พ.ศ. 2567 ที่ตำบลทุ่งสุขลา อำเภอศรีราชา จังหวัดชลบุรี มีค่าเฉลี่ย PM_{2.5} ใน 24 ชั่วโมงค่าสูงสุดเท่ากับ 62.4 µg/m³ ค่าต่ำสุดเท่ากับ 5.7 µg/m³ ค่าเฉลี่ยฝุ่น PM_{2.5} ใน 1 ปีประมาณ 18 µg/m³ ถือว่าจังหวัดชลบุรีบริเวณนี้ยังมีค่า PM_{2.5} สูงกว่า AQG ของ WHO และในปี พ.ศ. 2568 ช่วง 3 เดือนแรกของปี จะเห็นว่า ค่าฝุ่น PM_{2.5} มีค่าสูงกว่าเดือนเดียวกันของปีก่อนและทำสถิติค่าสูงสุดใหม่ที่ 67.3 µg/m³ ซึ่งเป็นระดับเกณฑ์สีส้มที่ว่ประชาชนทั่วไปควรใช้อุปกรณ์ป้องกันตนเอง

สมการการประมาณคาร์บอนไดออกไซด์ในสภาวะคงตัว (steady state): ASHRAE Standard 62.1–2022 (ASHRAE, 2022) กำหนดวิธีในการประมาณอัตราการระบายอากาศที่ต้องการในห้องไว้ 2 วิธี ได้แก่ วิธีที่ 1 การคำนวณการระบายอากาศขั้นต่ำ (ventilation procedure: VRP) อัตราการระบายอากาศขั้นต่ำที่ต้องการเท่ากับผลรวมของการคูณอัตราการระบายอากาศที่ต้องการต่อคนกับจำนวนคนและการคูณอัตราการระบายอากาศต่อพื้นที่กับพื้นที่ (Maneewattana, 2015) และวิธีที่ 2 การคำนวณอัตราการระบายที่ต้องการเพื่อเจือจางสารมลภาวะในห้องหรือ indoor air quality procedure (IAQ procedure) ในบทความนี้จะใช้วิธีการประเมินคุณภาพอากาศภายใน IAQ procedure โดยพิจารณาในสภาวะการไหลคงที่ (steady state) กล่าวคือให้ความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ภายในห้องมีการกระจายตัวสม่ำเสมอและสมมติให้ความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ภายนอกห้องเป็นค่าคงที่ เมื่อกำหนดอัตราการผลิตคาร์บอนไดออกไซด์ต่อคนให้มีค่าคงที่ อัตราการผลิตคาร์บอนไดออกไซด์ในห้องประเมินได้จากจำนวนคน และอัตราการระบายอากาศที่

ต้องการเพื่อเจือจางคาร์บอนไดออกไซด์ในห้องเขียนเป็นสมการได้ดังนี้ (Persily and de Jonge, 2017; Wongpinijwattana, 2020)

$$Q = \frac{G}{C_{in} - C_{out}} \quad \text{--- (1)}$$

โดย Q คืออัตราการระบายอากาศที่ต้องการเพื่อเจือจางคาร์บอนไดออกไซด์ในห้อง (L/s) G คืออัตราการผลิตคาร์บอนไดออกไซด์ในห้อง (L/s) C คือความเข้มข้นเชิงปริมาตรของคาร์บอนไดออกไซด์ ppm สำหรับตัวห้อย *in out* คือภายในห้องและภายนอกห้อง ตามลำดับ (หมายเหตุ เมื่อได้ Q หน่วย L/s แล้วแปลงหน่วยเป็น m³/h หรือหน่วยใด ๆ ที่สนใจต่อไปได้)

Persily and de Jonge (2017) เสนออัตราการผลิตคาร์บอนไดออกไซด์ตามช่วงอายุ เพศ กิจกรรม (ระดับเมแทบอลิซึม) และสำหรับห้องเรียนที่มีนักศึกษาอายุประมาณ 16–ไม่เกิน 21 ปี ค่าเฉลี่ยของการผลิตคาร์บอนไดออกไซด์ประมาณ $0.0042 \frac{L}{s \cdot person}$ ดังนั้นค่า G ในสมการที่ (2) คำนวณได้จากจากผลคูณของ $0.0042 \frac{L}{s \cdot person}$ กับจำนวนคน G ที่แทนในสมการเป็นหน่วย L/s

สมการประมาณ PM_{2.5} ในห้องในสภาวะคงตัว: Weisel *et al.* (2005) เสนอสมการทำนายความเข้มข้นของฝุ่น PM_{2.5} ในบ้านพักอาศัย สมมติว่าการผสมกันเป็นไปอย่างสมบูรณ์ และปัจจัยที่ส่งผลต่อความเข้มข้นภายในห้องเป็นค่าคงที่ เมื่อสมดุลมวล PM_{2.5} ที่ภาวะคงตัวได้ตั้งสมการที่ (2)

$$C_{in} = \frac{P \cdot a \cdot C_{out}}{a + k} + \frac{S/V}{a + k} \quad \text{--- (2)}$$

โดย P = penetration factor (dimensionless, 0–1) โดยขึ้นกับลักษณะกรอบอาคาร a = air exchange rate (AER, h⁻¹) k = การตกตะกอนบนพื้นผิว(decay rate due to deposition and reaction, h⁻¹) C_{in} = PM_{2.5} indoor concentration (µg/m³)

C_{out} = PM2.5 outdoor concentration ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

S = indoor source strength or emission rate ($\mu\text{g}/\text{h}$) และ V = internal volume (m^3)

อนึ่งสัญลักษณ์ C ในสมการที่ (1) และสมการที่ (2) ในบทความนี้สื่อถึงค่าที่ไม่เหมือนกันโดย C ในสมการที่ (1) คือ ค่าความเข้มข้นเชิงปริมาตรของคาร์บอนไดออกไซด์ในอากาศ (ppm) ส่วนค่า C ในสมการที่ (2) หมายถึงค่าความเข้มข้นของฝุ่น PM2.5 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

Chen and Zhao (2011) สรุปรวผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องพบว่า indoor to outdoor ratio (I/O ratio = C_{in} / C_{out}) ในบ้านมีค่าประมาณ 0.71–3.36 ค่า I/O สูงสัมพันธ์กับแหล่งกำเนิดฝุ่น PM2.5 ภายใน เช่น คิว้น ส่วน I/O ต่ำสัมพันธ์กับการกรองอากาศและลักษณะความแน่นหนาของอาคาร (filtration and tightness of building)

Kim and Yeo (2020) เสริมสมการที่ (2) ด้วยการระบุเพิ่มเติมเพิ่มเติมที่เกี่ยวข้องกับการระบายอากาศเชิงกลที่มีการกรองอากาศเข้าอาคารหรือระบบระบายอากาศที่มีทั้งพัดลมดูดอากาศเข้าห้องผ่านการกรองและพัดลมดูดอากาศออกจากห้อง รายละเอียดตามที่แสดงใน Kim and Yeo (2020) เมื่อนำมาปรับใช้กับห้องเรียนในบทความนี้ที่มีการติดตั้งเฉพาะพัดลมดูดอากาศออก และสมมติว่าอากาศเข้าห้องในปริมาณที่เท่ากันกับที่ดูดออกแต่อากาศที่เข้าห้องในลักษณะนี้ไม่ได้มีการกรองอากาศก่อนเข้าห้อง และแม้สถานการณ์จริงของห้องเรียนในบทความนี้จะยังไม่มีการใช้เครื่องฟอกอากาศหรือการกรองอากาศแต่ในบทความนี้ศึกษาสถานการณ์จำลองในกรณีถ้าใช้เครื่องฟอกอากาศในห้องจะเป็นเช่นไรจึงปรับสมการที่แสดงใน Kim and Yeo (2020) ให้เข้ากับขอบเขตการศึกษาของบทความนี้ตามสม-

การที่ (3)

$$C_{in} = \frac{P \cdot a \cdot C_{out}}{a + k_d + k_f} + \frac{S/V}{a + k_d + k_f} \quad \dots (3)$$

โดยที่ P C_{in} C_{out} S และ V มีนิยามเดิมตามสมการที่ (2) แต่ขยายความ a ในสมการนี้คือ infiltration or exfiltration rate (h^{-1})

สำหรับบ้านพักอาศัยทั่วไปมักพิจารณา a จากการรั่วซึม a = อัตราการรั่วซึม/ปริมาตรห้อง (a หน่วย h^{-1}) หากมีการติดตั้งพัดลมดูดอากาศออกจากห้องอย่างเดียวย่างในห้องที่ศึกษาในบทความนี้โดยไม่มีการกรองอากาศก่อนเข้าห้องและสมมติว่าปริมาณอากาศที่เข้าห้องเท่ากับปริมาณอากาศที่ดูดออกจากห้องจะได้ว่า a = อัตราการดูดอากาศออก/ปริมาตรห้อง (a หน่วย h^{-1}) ส่วนตัวแปร k_d k_f ในสมการที่ (3) มีความหมายดังนี้ k_d คือการตกตะกอนตามธรรมชาติของฝุ่นในห้อง (deposition rate, h^{-1}) หรือคือ k ในสมการที่ (2) k_f คือ ประสิทธิภาพของการกรองอากาศด้วยเครื่องฟอกอากาศแบบพกพา ขึ้นกับอัตราการไหลของอากาศเข้าเครื่องฟอกอากาศ Q_f (m^3/h) และประสิทธิภาพการกรอง (η_f) สมการหาค่า k_f ดังในสมการที่ (4)

$$k_f = \eta_f \cdot \frac{Q_f}{V} \quad \dots (4)$$

โดยที่ (clean air delivery rate: CADR) มักใช้ระบุคุณลักษณะเครื่องฟอกอากาศที่หมายถึงอัตราการส่งอากาศสะอาด (หรืออากาศที่ผ่านการกรองแล้ว) เมื่อจัดรูปสมการที่ (4) ใหม่จะได้ $\text{CADR} = \eta_f \times Q_f = k_f \times V$

Kim et al. (2024) ศึกษาห้องเรียนระดับมัธยมศึกษาจำนวน 17 ห้องเรียน พบว่าการติดตั้ง energy recovery ventilator (ERV) ในห้องเรียนช่วยลดฝุ่นได้ผลดีในระดับหนึ่ง ในการศึกษาเน้นที่การประเมิน PM2.5 ภายนอกควรมีค่าไม่

เกินเท่าไรหากต้องการควบคุมระดับ PM2.5 ภายในห้องให้ไม่เกิน $15 \mu\text{g}/\text{m}^3$ และพบว่าฝุ่นภายนอกต้องมีค่าไม่เกิน $34.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ สำหรับห้องเรียนที่มีการรั่วซึมน้อย และต้องไม่เกิน $24.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ สำหรับห้องเรียนที่มีการรั่วซึมมาก โดยระบบ ERV ที่เขาศึกษามีขนาดไม่เกิน $500 \text{ m}^3/\text{h}$ และประสิทธิภาพแผ่นกรอง 0.65–0.95 และห้องเรียนที่ศึกษามีพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องดังนี้ penetration factor (P) = 0.62–0.98 room volume (V) = $170.6\text{--}381.1 \text{ m}^3$ PM2.5 deposition rate (k_d) = $0.01\text{--}0.40 \text{ h}^{-1}$ PM2.5 generation rate (with students' activities, S) = $2.7\text{--}3.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ air exchange rate of infiltration (a) = $0.16\text{--}0.77 \text{ h}^{-1}$ เป็นต้น เนื่องจากขนาดห้องเรียนที่สนใจในบทความนี้มีขนาด 185.6 m^3 จึงอยู่ในขนาดที่อยู่ในช่วงที่ Kim *et al.* (2024) ศึกษาแต่แตกต่างกันที่ห้องเรียนในบทความนี้เป็นระดับอุดมศึกษาแต่ใน Kim *et al.* (2024) เป็นระดับมัธยมศึกษา ห้องเรียนในบทความนี้ใช้บอร์ดดิจิทัลหน้าจอและผู้เรียนใช้แท็บเล็ตเป็นหลัก นอกจากนี้ผู้เรียนนั่งเรียนเป็นหลักไม่ได้เดินไปเดินมาจึงถือว่าอัตราการผลิต PM2.5 ในห้องต่ำมากในที่นี้สมมติมีค่าเท่าศูนย์ ($S = 0 \mu\text{g}/\text{m}^3$) อย่างไรก็ตามในบทความนี้ประมาณ $k_d = 0.1 \text{ h}^{-1}$ $P = 0.8$ ให้ใกล้เคียงกับค่าเฉลี่ยในบทความของ Kim *et al.* (2024) และในการศึกษาสถานการณ์จำลองกรณีมีเครื่องฟอกอากาศเป็นการหาขนาดเครื่องฟอกอากาศที่เหมาะสมหรือการทำนาย PM2.5 ภายใน

ขั้นตอนการศึกษา

(1) คำนวณหาอัตราการระบายอากาศที่ต้องการเมื่อกำหนดค่าความเข้มข้นไดออกไซด์สูงสุดที่ยอมรับได้ในห้องโดยใช้สมการที่ (1) หรือหา Q ในสมการที่ (1) เมื่อกำหนด $C_{in, max} = 1000$

ppm C_{out} กำหนดให้เท่ากับ 430 ppm กรณีจำนวนผู้ใช้สูงสุดที่ 46 คน และกำหนดให้อัตราการผลิตคาร์บอนไดออกไซด์กำหนดให้มีค่าเท่ากับ $0.0042 \frac{L}{s \cdot person}$ และเปรียบเทียบกับอัตราการระบายอากาศที่มีอยู่

(2) วัดค่า CO₂ PM2.5 ในห้องและนอกห้องในทางปฏิบัติแล้วนำมาเปรียบเทียบกับค่าที่ประเมินด้วยสมการที่ (1) และ (3) สำหรับห้องเรียนปัจจุบันยังไม่มีเครื่องฟอกอากาศ ทั้งนี้สำหรับ PM2.5 มีการประเมินการปรับค่าด้วยการเทียบกับค่า PM2.5 ภายนอกกับค่าที่แม่นยำกว่าจากข้อมูลเผยแพร่ของกรมควบคุมมลพิษ

(3) ใช้สมการที่ (3) ประเมินขนาดเครื่องฟอกอากาศหรือหาอัตราการส่งมอบอากาศสะอาด (clean air delivery rate, CADR = $k_f \times V$) เมื่อกำหนดค่าความเข้มข้นฝุ่น PM2.5 สูงสุดที่ต้องการในห้อง ที่ค่าฝุ่น PM2.5 นอกห้องต่าง ๆ กัน

(4) ใช้สมการที่ (3) ทำนาย PM2.5 ในห้องในกรณีที่ติดตั้งเครื่องฟอกอากาศขนาดใดขนาดหนึ่ง

ผลการศึกษาและอภิปรายผล

ผลการคำนวณ CO₂

ตาราง 3 แสดง CO₂ จากการวัดและจากการทำนาย และเนื่องจากการทำนาย CO₂ ภายในห้องขึ้นกับค่า CO₂ ภายนอกและจำนวนผู้ใช้งานห้อง ดังนั้นตาราง 3 จึงแสดงจำนวนผู้ใช้งานห้องในแต่ละวันไว้ด้วย

ผลการตรวจวัดความเข้มข้นของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) ด้วยเครื่องมือวัดที่มีค่าความคลาดเคลื่อน $\pm 15\%$ พบว่า ค่าที่วัดได้ภายนอกอาคารมีความใกล้เคียงกับค่า CO₂ บรรยากาศโลกที่มีค่าเท่ากับ 430 ppm (NASA, 2025)

สะท้อนให้เห็นว่าเครื่องมือวัด CO₂ มีความแม่นยำและเชื่อถือได้ภายในช่วงความคลาดเคลื่อนที่กำหนด อย่างไรก็ตามผลการตรวจวัดภายในห้องพบว่าความเข้มข้นของ CO₂ สูงกว่าค่าที่แบบจำลองได้ทำนายไว้ เช่น สำหรับการทดลองวันที่ 1 ขณะที่มิจำนวนผู้ใช้ห้องเท่ากับ 12 คน เมื่อใช้สมการที่ (1) ประเมินความเข้มข้นของ CO₂ ในห้องที่จำนวนผู้ใช้งานเท่ากับ 12 คนจะทำนาย CO₂ ภายในได้เท่ากับ $430 + ((0.0042 \times 12 \times 10^{-3} \times 3600 \times 10^6) / 1744.2) = 430 + 104 = 534$ ppm เมื่อวัดค่าจริงได้เท่ากับ 627 ppm ในทำนองเดียวกันผลการทดลองวันที่ 2 ขณะที่มิจำนวนผู้ใช้ห้องตามเท่ากับ 13 คน ก็พบว่าค่า CO₂ ภายในที่วัดจริงมีค่าสูงกว่าที่ทำนาย คาดว่าเกิดจากการกำหนดค่าพารามิเตอร์ในการทำนาย ค่า CO₂ ภายนอกส่วนหนึ่งในทางปฏิบัติอาจมาจากแหล่งที่มีการสะสมของ CO₂ เช่น โถงทางเดินในอาคาร อัตราการระบายอากาศที่ใช้ในการทำนายเป็นค่า

ตามคุณลักษณะของพัดลมระบายอากาศแต่ในทางปฏิบัติอาจมีค่าต่ำกว่านี้ อัตราการผลิต CO₂ ต่อคนในความเป็นจริงอาจมีค่าสูงกว่าค่าที่ใช้ทำนาย เพราะผู้ใช้งานห้องส่วนใหญ่เป็นผู้ชายแต่ค่าที่ใช้ทำนายเป็นค่าเฉลี่ยจากผู้หญิงและผู้ชาย หรือการทำนายที่สภาวะคงตัวแต่ในทางปฏิบัติอาจไม่ได้คงตัวอย่างสมบูรณ์

ผลการคำนวณตามสมการที่ (1) แสดงว่าห้องเรียนที่ศึกษาเมื่ออัตราการระบายอากาศ 9.39 h⁻¹ ซึ่งเพียงพอต่อการรักษาระดับ CO₂ ไม่เกิน 1,000 ppm ตามเกณฑ์ใน ASHRAE (2022) โดยถ้าผู้ใช้งานห้อง 46 คน ค่า CO₂ ที่คำนวณได้ 829 ppm ทั้งนี้ค่านี้ไม่ได้แสดงในตาราง 3 ถ้าผู้ใช้งาน 12–15 คน ค่าที่คำนวณได้ 534–568 ppm สอดคล้องกับค่าที่วัดจริง 627–640 ppm ภายในได้ความคลาดเคลื่อนของเครื่องมือ $\pm 15\%$ แสดงให้เห็นว่าโมเดลสามารถทำนายแนวโน้มได้ถูกต้อง

ตาราง 3 CO₂ จากการวัดและการทำนาย

ครั้งที่	CO ₂ ภายนอกอาคารจากการวัด (ppm)	จำนวนผู้ใช้งานห้อง (คน)	CO ₂ ภายในห้องจากการวัด (ppm)	CO ₂ ภายในห้องจากการทำนาย (ppm) และกำหนด CO ₂ ภายนอก = 430 ppm
1	421	12	627	534
2	431	13	640	543
3	N/A	15	N/A	568

หมายเหตุ N/A หมายถึงไม่ได้วัดค่า

ผลการคำนวณ PM_{2.5}

ตาราง 4 แสดงสภาวะแวดล้อมและ PM_{2.5} จากการวัดและจากการทำนาย คอลัมน์ที่ 2 แสดงค่า PM_{2.5} ที่สถานีสนามบินกีฬาทะบอลแหลมฉบังที่วัดด้วยเครื่องมือวัดคุณภาพสูงของกรมควบคุมมลพิษ (Pollution Control Department, 2025) การวัดในคอลัมน์ที่ 3 และ 4 ที่ระบุว่า PM_{2.5} ภายนอกอาคารและภายในห้องเป็น

การวัดด้วยเครื่องมือวัดราคาประหยัดในงานวิจัยนี้ การวัดแต่ละครั้งเป็นวันละวันกันครั้งละห่างกัน 1 สัปดาห์ จากตารางจะเห็นว่าค่า PM_{2.5} ที่วัดด้วยเครื่องมือวัดราคาประหยัดมีค่าต่ำกว่าที่วัดด้วยเครื่องมือวัดคุณภาพสูงของกรมควบคุมมลพิษซึ่งแนวโน้มนี้สอดคล้องกับการทดสอบจาก Air Quality Sensor Performance Evaluation Center (AQ-SPEC, 2023) ที่เปรียบเทียบ Qing-

ping Air Monitor Lite (ราคาประมาณ USD 96) กับ federal equivalent method (FEM) GRIMM EDM180 (ราคาประมาณ USD 25,000) และพบว่าค่าฝุ่น PM2.5 ที่วัดได้โดย Qingping Air Monitor Lite โดยรวมมีค่าที่ต่ำกว่าค่าที่วัดได้โดย FEM GRIMM ดังนั้นในที่นี้ใช้วิธีการปรับค่าให้แม่นยำขึ้นด้วยการใช้ผลต่างระหว่างค่า PM2.5 ที่วัดได้โดย Qingping Air Monitor Lite หรือเรียกว่าเครื่องมือวัดราคาประหยัดในบทความนี้กับค่า PM2.5 ที่วัดโดยเครื่องมือวัดคุณภาพสูงของกรมควบคุมมลพิษ (ที่ข้อมูลแสดงในเว็บไซต์กรมควบคุมมลพิษ) การวัดจำนวน 3 ครั้งมีค่าเฉลี่ยของผลต่าง

ค่าที่วัดได้ด้วยเครื่องมือวัดคุณภาพสูงกับเครื่องมือวัดราคาประหยัดเท่ากับ $7.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ดังนั้นในการศึกษานี้จะใช้ค่านี้ในการปรับค่า PM2.5 ภายในห้องที่วัดได้ (คอลัมน์ที่ 5) ด้วยการบวก 7.5 เข้ากับค่าที่วัดได้ในคอลัมน์ที่ 4 และสำหรับการคำนวณ I/O ratio จากการวัดในที่นี้ใช้ PM2.5 ภายในห้องหลังปรับค่า (คอลัมน์ที่ 5) หารด้วย PM2.5 ที่สถานีสนามกีฬาแหลมฉบัง ตำบลทุ่งสุลา อำเภอสัตราธิราช จังหวัดชลบุรี (คอลัมน์ที่ 2 ซึ่งเป็นข้อมูลจาก Pollution Control Department (2025)) เพราะถือว่าเป็นค่าในพื้นที่บริเวณเดียวกับห้องเรียนที่ศึกษา (อยู่ห่างกันเพียง 650 เมตร)

ตาราง 4 PM2.5 จากการวัดและ I/O ratio จากการวัดและจากการทำนาย

ครั้งที่	PM2.5 ที่สถานีสนามกีฬาเทศบาลแหลมฉบังที่วัดด้วยเครื่องมือคุณภาพสูง	PM2.5 ภายในหออาคารที่วัดด้วยเครื่องมือราคาประหยัดก่อนปรับค่า ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	PM2.5 ภายในห้องที่วัดด้วยเครื่องมือราคาประหยัดก่อนปรับค่า ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	PM2.5 ภายในห้องหลังปรับค่า ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	I/O ratio จากการวัด (ที่ปรับค่าแล้ว)	I/O ratio จากการทำนาย
1	14.6	7	4	11.5	$\text{I/O} = 1.5/14.6 = 0.79$	0.79
2	16.6	7	5	12.5	0.75	0.79
3	11.2	6	3	10.5	0.94	0.79

จากตาราง 4 คอลัมน์สุดท้ายเป็นค่าที่ได้จากการทำนายฝุ่น PM2.5 ภายในห้องด้วยการที่ (3) ในกรณีที่ไม่มีเครื่องฟอกอากาศ ($k_f = 0$) และไม่มีแหล่งกำเนิดฝุ่น PM2.5 ภายในห้อง ($S = 0$) สมมติ $k_d = 0.1 \text{ h}^{-1}$ $P = 0.8$ $a = 9.39 \text{ h}^{-1}$ และเมื่อนำไปหารด้วยค่า PM2.5 ที่สถานีสนามกีฬาเทศบาลแหลมฉบังจะได้ว่า I/O ratio ที่ทำนาย (C_{in}/C_{out}) = 0.79 เป็นค่าที่ไม่ขึ้นกับจำนวนคน ดังนั้นจึงเป็นค่าเดียวกันในทุกครั้ง จะเห็นว่าการคำนวณ I/O ratio จากเครื่องมือวัดราคาประหยัดที่ปรับค่าแล้ว จะให้ค่า I/O ratio ใกล้เคียงกับการคำนวณตามสมการที่ (3) เมื่อ PM2.5 มีค่า $4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ขึ้นไปแต่ถ้า PM2.5 มีค่าน้อยกว่า $4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ จะมีคลาดเคลื่อนมาก สาเหตุอาจเกิด

จากในตารางเป็นการปรับค่าด้วยค่าคงที่ (+7.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) ในทางปฏิบัติที่ค่าฝุ่น PM2.5 ต่ำกว่า $4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ อาจต้องการการปรับค่าที่น้อยกว่านี้

ทั้งนี้ค่าฝุ่นในวันที่ทดลองมีค่าไม่สูงนัก เพราะอยู่ในช่วงฤดูฝน หากค่าฝุ่น PM2.5 มีค่าไม่เกิน $15 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ตลอดทั้งปีก็ไม่จำเป็นต้องใช้เครื่องฟอกอากาศหรือระบบกรองอากาศแต่อย่างใด แต่จากสถิติจากกรมควบคุมมลพิษพบว่าในฤดูหนาวหรือประมาณช่วงต้นปีค่าฝุ่น PM2.5 ทั่วประเทศมีค่าสูงขึ้นและสถิติที่จังหวัดชลบุรี PM2.5 มีค่าสูงถึงเกณฑ์สีส้มของกรมอนามัยที่เป็นค่าที่เริ่มมีผลต่อสุขภาพ อย่างไรก็ตามบทความนี้ยังไม่ได้วัดค่าที่เกี่ยวข้องในฤดูหนาวและจะทดลองเพิ่มเติมต่อไป เมื่อศึกษาเชิงทฤษฎีจึง

ประเมินขนาดเครื่องฟอกอากาศ (CADR) เพื่อรองรับกรณีที่อากาศภายนอกมีค่าฝุ่น PM2.5 เกินกว่าค่าแนะนำและทำนาย PM2.5 ภายในห้องเมื่อกำหนด PM2.5 ภายนอกดังจะแสดงรายละเอียดในหัวข้อถัดไป

การประเมิน CADR

ในการประเมินขนาดเครื่องฟอกอากาศ CADR (m³/h) ในที่นี้แบ่งเป็น 2 ส่วนส่วนแรก ได้แก่ การหาขนาด CADR ที่ต้องการเพื่อควบคุม PM2.5 ภายในให้อยู่ในค่าที่ต้องการเมื่อ PM2.5 ภายนอกต่างๆ กัน และส่วนที่ 2 ได้แก่ การทำนาย PM2.5 ภายในเมื่อใช้ CADR ต่าง ๆ กัน เมื่อกำหนด PM2.5 ภายนอกค่าใดค่าหนึ่ง ตาราง 5 ประเมินขนาดเครื่องฟอกอากาศ CADR (m³/h) ในกรณีที่เป้าหมายในการควบคุมให้ PM2.5 ภายในห้อง (C_{in}) เท่ากับ 15 µg/m³ เมื่อค่า PM2.5 ภายนอกห้องมีค่าต่าง ๆ กันตั้งแต่ 30–70 µg/m³ โดยพารามิเตอร์ที่ระบุ ได้แก่ อัตราการระบายอากาศในปัจจุบันตามคุณลักษณะพัฒนาที่ติดตั้ง สมมติอัตราการผลิต PM2.5 ในห้องค่าเท่ากับศูนย์ ($S = 0$ µg/m³) ประมาณ $k_d = 0.1$ h⁻¹ $P = 0.8$ $a = 9.39$ h⁻¹ และ $V = 185.6$ m³ จากตารางแสดงให้เห็นว่าเมื่อความเข้มข้นของฝุ่น PM2.5 ภายนอกห้อง

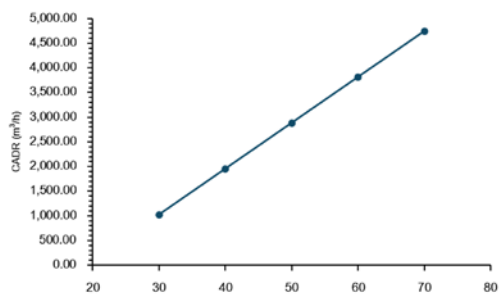
(C_{out}) มีค่าเพิ่มขึ้นจาก 30 ถึง 70 µg/m³ ค่าคงที่อัตราการกรอง (k_f) และอัตราการส่งอากาศสะอาด (CADR) จะเพิ่มขึ้นแบบสัดส่วนซึ่งสมเหตุผลทางกายภาพเนื่องจากเมื่อความเข้มข้นฝุ่น PM2.5 ภายนอกมีค่าสูงกว่าจำเป็นต้องใช้การกรองที่เข้มข้นมากขึ้นเพื่อรักษาความเข้มข้นฝุ่น PM2.5 ภายในห้องให้มีค่าที่ต้องการ โดยค่า CADR มีช่วงตั้งแต่ประมาณ 1,027 m³/h เมื่อ C_{out} เท่ากับ 30 µg/m³ ถึง 4,745 m³/h เมื่อ C_{out} เท่ากับ 70 µg/m³ ซึ่งเป็นช่วงที่กว้างมากและสอดคล้องกับความสามารถของเครื่องฟอกอากาศที่แตกต่างกัน ภาพที่ 5 แสดงให้เห็นความสัมพันธ์เชิงเส้นเชิงบวกระหว่างค่า CADR กับค่าความเข้มข้น PM2.5 ภายนอก เมื่อ PM2.5 ภายนอกสูงขึ้น จะต้องการขนาดเครื่องฟอกอากาศที่มี CADR สูงขึ้น เพื่อควบคุม PM2.5 ภายในห้องให้อยู่ในค่าที่กำหนด

การวิเคราะห์กรณีสมมติอื่น ถ้าฝุ่น PM2.5 ภายนอกหรือ $C_{out} = 60$ µg/m³ สำหรับห้องที่ไม่มีเครื่องฟอกอากาศหรือการกรองอากาศใด ๆ ($k_f = 0$) ค่าฝุ่น PM2.5 ในห้องนี้เมื่อคำนวณด้วยสมการที่ (3) C_{in} จะมีค่าเท่ากับ 47.49 µg/m³ ซึ่งอาจส่งผลกระทบต่อร่างกายเคืองและลดสมรรถภาพผู้เรียนตาม WHO (2021) ตาราง 6 ทำนายฝุ่น PM

ตาราง 5 การทำนายขนาดเครื่องฟอกอากาศ CADR (m³/h) ในการควบคุมให้ PM2.5 ภายในห้อง (C_{in}) เท่ากับ 15 µg/m³ เมื่อค่า PM2.5 ภายนอกห้องมีค่าต่าง ๆ กัน

C_{out} (PM2.5 ภายนอก, µg/m ³)	k_f	CADR (m ³ /h)
30	5.53	1,027.11
40	10.54	1,956.60
50	15.55	2,886.08
60	20.56	3,815.57
70	25.57	4,745.05

หมายเหตุ พารามิเตอร์ที่ใช้ในสมการที่ (3) ได้แก่ $S = 0$ µg/m³ $k_d = 0.1$ h⁻¹ $P = 0.8$ $a = 9.39$ h⁻¹ และ $V = 185.6$ m³
ในการหาค่า k_f และคำนวณ CADR = $k_f \times V$



ภาพที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า CADR ที่ต้องการกับความเข้มข้น PM2.5 ภายนอก สำหรับห้องเรียนขนาดปริมาตร 185.6 m³ (ตามสมมติฐานในตาราง 5)

2.5 ภายในห้องที่อัตราการฟอกอากาศต่าง ๆ กัน โดยในที่นี้จะแปรผันระหว่าง 300–1800 m³/h เพราะเป็นขนาดเครื่องฟอกอากาศที่มีวางจำหน่ายทั่วไป เมื่อ PM2.5 ภายนอก (C_{out}) เท่ากับ 60 µg/m³ (เกณฑ์สีส้ม) โดยสมมติอัตราการผลิต PM2.5 ในห้องเท่ากับศูนย์ ($S = 0$ µg/m³) ประเมิน $k_d = 0.1$ h⁻¹ $P = 0.8$ เมื่อแทนค่าต่าง ๆ ที่ $a = 9.39$ h⁻¹ และ $V = 185.6$ m³

จากตาราง 6 จะเห็นว่าเมื่อ CADR เพิ่มขึ้น ค่า C_{in} จะลดลง ความสัมพันธ์แสดงให้เห็นว่าเครื่องฟอกอากาศที่มีสมรรถนะสูงกว่า (CADR สูง)

ตาราง 6 การทำนายฝุ่น PM2.5 ภายในห้องที่อัตราการฟอกอากาศต่าง ๆ กันเมื่อ PM2.5 ภายนอก (C_{out}) เท่ากับ 60 µg/m³ (เกณฑ์สีส้ม)

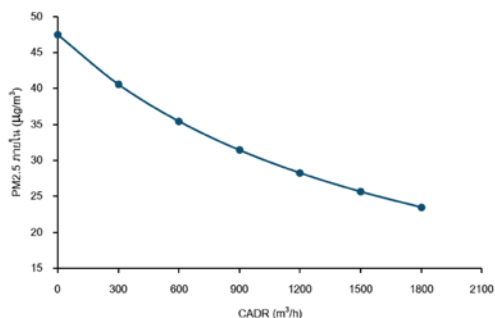
CADR (m ³ /h)	k_r	$a + k_d + k_r$	C_{in} (PM2.5 ภายใน µg/m ³)	เกณฑ์สี
0 (ไม่มีการฟอกอากาศ)	0	9.49	47.49	ส้ม
300	1.62	11.11	40.58	ส้ม
600	3.23	12.72	35.43	เหลือง
900	4.85	14.34	31.43	เหลือง
1200	6.47	15.96	28.25	เหลือง
1500	8.08	17.57	25.65	เหลือง
1800	9.70	19.19	23.49	เขียว

หมายเหตุ พารามิเตอร์ที่ใช้ในสมการที่ (3) ได้แก่ $S = 0$ µg/m³ $k_d = 0.1$ h⁻¹ $P = 0.8$ $a = 9.39$ และ $V = 185.6$ m³

สามารถลดความเข้มข้นของสารปนเปื้อนที่ทางเข้าได้มากกว่า C_{in} หรือ PM2.5 ภายในห้องจะลดลงจาก 40.58 µg/m³ เป็น 23.49 µg/m³ เมื่อ CADR = 1800 m³/h ตาราง 6 ช่วยให้ผู้ที่เกี่ยวข้องประเมินการเลือกขนาดเครื่องฟอกอากาศที่เหมาะสมกับความต้องการโดยควรหาข้อมูลประกอบการพิจารณาเพิ่มเติมเกี่ยวกับราคาและงบประมาณการใช้เครื่องฟอกอากาศที่มี CADR = 1800 m³/h ช่วยลดระดับความรุนแรงของฝุ่น PM2.5 จากเกณฑ์สีส้มเป็นสีเขียวได้ (แต่ยังไม่อยู่ในระดับเกณฑ์สีฟ้าที่ต้องการ) ส่วนการใช้งานเครื่องฟอกอากาศขนาดเล็ก CADR = 300 m³/h ในห้องนี้ไม่สามารถลดระดับความรุนแรงของระดับฝุ่นได้ ภาพที่ 6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง PM2.5 ภายในที่ทำนายกับขนาดเครื่องฟอกอากาศ CADR จากภาพจะเห็นว่าความสัมพันธ์ไม่เป็นเส้นตรงเชิงลบ

สรุปและข้อเสนอแนะ

การศึกษานี้มุ่งวิเคราะห์คุณภาพอากาศภายในห้องเรียนขนาดเล็กในสถานศึกษาระดับอุดมศึกษาโดยใช้การจำลองเชิงทฤษฎีภายใต้



ภาพที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้น PM2.5 ภายในที่ทำนายกับค่า CADR

สมการสภาวะคงตัวเพื่อประเมินความเข้มข้นของ แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) การทำนายระดับฝุ่นละอองขนาดเล็กไม่เกิน 2.5 ไมครอน (PM2.5) และการเลือกขนาดเครื่องฟอกอากาศ (CADR) ที่เหมาะสม ผลการวิเคราะห์ด้วยสมการที่ (1) สำหรับการประเมินความเข้มข้นของ CO₂ ภายในห้องเรียน พบว่าห้องเรียนที่ศึกษาที่มีปริมาตร 185.6 m³ มีผู้ใช้งานสูงสุด 46 คน และมีอัตราการระบายอากาศ 9.39 h⁻¹ มีการระบายอากาศเพียงพอในการควบคุม CO₂ ให้อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานไม่เกิน 1,000 ppm โดยคำนวณได้ค่าภายในห้องเท่ากับ 829 ppm เมื่อสมมติค่า CO₂ ภายนอก 430 ppm อย่างไรก็ตามค่าที่วัดได้จริงสูงกว่าที่คำนวณซึ่งอาจเกิดจากอากาศภายนอกบางส่วน เช่น บริเวณทางเดินในอาคารอาจมีการสะสมของ CO₂ ความแตกต่างของอัตราการระบายอากาศจริง การผลิต CO₂ ต่อคน และความคลาดเคลื่อนของเครื่องมือวัด

การทำนายค่าฝุ่นละออง PM2.5 ภายในห้องเรียนด้วยสมการที่ (3) โดยใช้พารามิเตอร์คงที่ $P = 0.8$ $k_d = 0.1 \text{ h}^{-1}$ $a = 9.39 \text{ h}^{-1}$ และสมมติว่าไม่มีแหล่งกำเนิดฝุ่นภายในห้อง พบว่าสามารถคำนวณอัตราส่วนภายในต่อภายนอก (I/O ratio) ได้เท่ากับ 0.79 ซึ่งมีความสอดคล้องกับผลการ

วัดจริงหลังจากปรับค่าเครื่องมือวัดราคาประหยัดให้สอดคล้องกับค่ามาตรฐานเพิ่มขึ้น 7.5 µg/m³ โดยเฉพาะในกรณีที่ค่าฝุ่นภายนอกมากกว่า 4 µg/m³ ทั้งนี้การปรับค่าความคลาดเคลื่อนควรพิจารณาตามลักษณะเฉพาะของเครื่องมือวัดแต่ละชนิด นอกจากนี้สามารถใช้สมการที่ (3) ในการประเมินขนาดเครื่องฟอกอากาศ (CADR) ที่เหมาะสม เช่น กรณีค่าฝุ่นภายนอก 60 µg/m³ หากต้องการให้ค่าฝุ่นในห้องไม่เกิน 15 µg/m³ ต้องใช้ CADR ประมาณ 3,800 m³/h ในขณะที่ CADR ประมาณ 1,800 m³/h สามารถลดค่าฝุ่นให้อยู่ในระดับเกณฑ์สีเขียวตามดัชนีคุณภาพอากาศของกรมอนามัยได้ หากไม่มีเครื่องฟอกอากาศ ค่าฝุ่นภายในห้องอยู่ที่ 47.49 µg/m³ ซึ่งยังอยู่ในระดับที่เริ่มส่งผลกระทบต่อสุขภาพ ส่วนการใช้ CADR ต่ำกว่า 600 m³/h เช่น 300 m³/h ไม่สามารถลดระดับความรุนแรงของมลภาวะได้อย่างมีนัยสำคัญ แสดงให้เห็นว่าสมการเชิงทฤษฎีดังกล่าวสามารถใช้เป็นเครื่องมือในการประเมินและวางแผนเลือกขนาดเครื่องฟอกอากาศที่เหมาะสมกับปริมาตรห้องและคุณภาพอากาศเป้าหมายได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ข้อจำกัดและข้อเสนอแนะงานวิจัยนี้เป็นการศึกษาเชิงทฤษฎีภายใต้สมมติฐานสภาวะคงที่และทดลองวัดค่าในฤดูฝนจึงควรขยายผลในอนาคตด้วย การทดลองวัดค่าในฤดูกาลอื่น นอกจากนี้ควรศึกษาเพิ่มเติมในห้องเรียนที่มีขนาดและลักษณะต่าง ๆ เพื่อให้ได้แนวทางการออกแบบและจัดการคุณภาพอากาศที่ครอบคลุมยิ่งขึ้น

ในระยะสั้นการใช้เครื่องฟอกอากาศแบบพกพาสามารถช่วยลดระดับฝุ่นภายในห้องเรียนได้แต่ควรเลือกขนาด CADR ให้เหมาะสมกับปริมาตรห้องและเป้าหมายคุณภาพอากาศโดยคำนึงถึงความคุ้มค่าระหว่างประสิทธิภาพและต้นทุน

ทุน ส่วนในระยะยาวควรติดตั้งระบบระบายอากาศเชิงกลที่มีหน่วยเติมอากาศบริสุทธิ์ (outdoor air unit) พร้อมระบบกรองอากาศคุณภาพสูงเพื่อควบคุมทั้ง CO₂ และ PM2.5 ได้อย่างต่อเนื่อง นอกจากนี้สถานศึกษาที่มีความพร้อมควรติดตั้งเครื่องตรวจวัด CO₂ และ PM2.5 ภายในห้องเรียน เพื่อให้ผู้สอนและผู้เรียนสามารถรับรู้และปรับกิจกรรมการเรียนการสอนได้ตามสภาวะจริง ในขณะที่ระดับนโยบายควรส่งเสริมแนวคิด “ห้องเรียนอากาศสะอาด (clean air classroom)” ที่มีระบบกรองอากาศอัจฉริยะและใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพเพื่อยกระดับคุณภาพสิ่งแวดล้อมการเรียนรู้ในระยะยาว

เอกสารอ้างอิง

- AQ-SPEC. (2023). Field Evaluation Qingping – Air Monitor Lite. **Air Quality Sensor Performance Evaluation Center**. Retrieved from <https://www.aqmd.gov/docs/default-source/aq-spec/field-evaluations/qingping--air-monitor-lite---field-evaluation.pdf?sfvrsn=12>, August 13, 2025.
- ASHRAE. (2022). **ANSI/ASHRAE62.1 – Ventilation and Acceptable Indoor Air Quality**. Atlanta, GA: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers (ASHRAE).
- Chen, C., and Zhao, B. (2011). Review of relationship between indoor and outdoor particles: I/O ratio, infiltration factor and penetration factor. **Atmospheric Environment** 45(2): 275–288.
- Department of Health. (2022). **Ministry of Health Department Announcement on Indoor Air Quality Surveillance Standards for Public Buildings, B.E. 2565**. Retrieved from <https://laws.anamai.moph.go.th/th/practices/download/?did=211864&id=99012&reload=>, August 13, 2025. (in Thai)
- Han, S., Kang, J., Park, Y., Kim, J., Son, Y.–S., Kim, J.–J., and Choi, W. (2025). Contributions of ambient air, indoor activity, and an air purifier to classroom PM2.5 levels in three elementary schools. **Building and Environment** 272: 112674.
- Keawmanee, V. (2019). Ventilation with IAQ of residential. **Air Conditioning Engineering Association of Thailand (ACAT) News** 22(79): 20–24. (in Thai)
- Kim, J. H., and Yeo, M. S. (2020). Effect of flow rate and filter efficiency on indoor PM2.5 in ventilation and filtration control. **Atmosphere** 11(10): 1061.
- Kim, S., Kang, K., Park, D., Na, H., and Kim, T. (2024). Balance point concentration: An indicator for classroom performance against outdoor PM2.5. **Building and Environment** 266: 112021.
- Makaremi, N., Yildirim, S., Morgan, G. T., Touchie, M. F., Jakubiec, J. A., and Robinson, J. B. (2024). Impact of classroom environment on student wellbeing in higher education: Review and future directions. **Building and Environment** 265: 111958.
- Maneeewattana, T. (2015). **Calculations of Ventilation Rate according to ASHRAE Stan-**

- dard 62.1**, Vol. 20. Bangkok: Air Conditioning Engineering Association of Thailand (ACAT). (in Thai)
- Maneewattana, T. (2019). Summarize the key points for protecting oneself from PM2.5. **Air Conditioning Engineering Association of Thailand (ACAT) News** 22(79): 26–33. (in Thai)
- NASA. (2025). **Carbon Dioxide**. Retrieved from <https://climate.nasa.gov/vital-signs/carbon-dioxide/?intent=121>, July 24, 2025.
- Persily, A., and de Jonge, L. (2017). Carbon dioxide generation rates for building occupants. **Indoor Air** 27(5): 868–879.
- Pollution Control Department. (2023). **Thailand Air Quality Index**. Retrieved from https://ratchakitcha.soc.go.th/documents/140D157S0000000000300.pdf?fbclid=IwAR2bJGm_x9Df4ZBCOu-T9_RqDUdd27EhzGBL1jjhuU1lb-Wo6k6t4YKXsxM, August 14, 2025. (in Thai)
- Pollution Control Department. (2025). **Thailand Air Quality Statistics**. Retrieved from <http://air4thai.pcd.go.th/webV3/#/History>, August 14, 2025. (in Thai)
- Rackow, B., König, H.H., Wall, M., and Konopka, C. (2025). The interaction between air pollution, weather conditions, and health risks: A systematic review. **Science of the Total Environment** 996: 180080.
- Subcommittee for Promoting Clean Air Law Proposals. (2023). **Principles of Draft Clean Air Law**. Office of National Strategy and Reconciliation Reform Promotion. Retrieved from https://law.go.th/listeningDetail?survey_id=MjgzOURHQV9MQVdfRIJPTIRFTkQ=, August 13, 2025. (in Thai)
- Wang, M., Kim, R. Y., Kohonen–Corish, M. R. J., Chen, H., Donovan, C., and Oliver, B. G. (2025). Particulate matter air pollution as a cause of lung cancer: Epidemiological and experimental evidence. **British Journal of Cancer** 132: 986–996.
- Weisel, C. P., Zhang, J., Turpin, B. J., Morandi, M. T., Colome, S., Stock, T. H., *et al.* (2005). **Research Report: Relationships of Indoor, Outdoor, and Personal Air (RIOPA). Part I. Collection Methods and Descriptive Analyses**. Retrieved from <https://www.healtheffects.org/system/files/RIOPA-I.pdf>, August 15, 2025.
- Wongpinijwattana, V. (2020). **Ventilation Windows to Reduce Indoor Air Pollution in Classrooms**. Bangkok: Thammasat University. Retrieved from https://ethesisarchive.library.tu.ac.th/thesis/2020/TU_2020_6216030103_13486_16440.pdf, August 15, 2025. (in Thai)
- World Health Organization [WHO]. (2021). **WHO Global Air Quality Guidelines. Particulate Matter (PM2.5 and PM10), Ozone, Nitrogen Dioxide, Sulfur Dioxide and Carbon Monoxide**. Geneva: WHO.
- Zhang, Y., Tao, S., Shen, H., and Ma, J. (2009).

Inhalation exposure to ambient polycyclic aromatic hydrocarbons and lung cancer risk of Chinese population. **The Proceedings of the National Academy of Sciences USA** 106 (50): 21063–21067.