การศึกษาคุณภาพอากาศภายในสถานที่ทำงาน: การตรวจวัดสารอินทรีย์ระเหยง่าย การวิเคราะห์แหล่งกำเนิด และการประเมินความเสี่ยงด้านอาชีวอนามัยของพนักงานในอาคารสำนักงาน

ภีมภัทร จุกจันทร์[*], สราวุธ เทพานนท์[**], เพลินพิศ พงษ์ประยูร[***], จุฑารัตน์ แก้วบุญชู[**a]**

บทคัดย่อ

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อเปรียบเทียบคุณภาพอากาศภายในอาคารสำนักงาน วิเคราะห์แหล่งกำเนิดของสารอินทรีย์ระเหยง่าย (VOCs) และประเมินความเสี่ยงด้านอาชีวอนามัยของพนักงานในอาคารเก่า (BD1) และอาคารใหม่ (BD2) ในกรุงเทพมหานคร เก็บตัวอย่างอากาศ 5 วัน โดยใช้วิธี U.S. EPA Method TO-15 และ TO-11A วิเคราะห์ด้วย GC/MS และ HPLC วิเคราะห์แหล่งกำเนิดด้วย PMF และประเมินความเสี่ยงตาม U.S. EPA ผลการศึกษาพบว่าอาคาร BD2 มีความเข้มข้น VOCs สูงกว่าอาคาร BD1 ถึง 2.6 เท่า (403.27 เทียบกับ 153.87 $\mu g/m^3$) และตรวจพบ 48 เทียบกับ 36 ชนิด แหล่งกำเนิดหลัก 3 แหล่ง คือ สารทำความสะอาด วัสดุก่อสร้างและเฟอร์นิเจอร์ไม้ และสีทาอาคาร

การประเมินความเสี่ยงพบว่าความเสี่ยงมะเร็งอยู่ในระดับยอมรับได้ โดย Formaldehyde มีค่า LCR สูงสุด (1.4×10^{-5} ใน BD1 และ 3.6×10^{-5} ใน BD2) อย่างไรก็ตาม Formaldehyde ในอาคาร BD2 มีค่า HQ เท่ากับ 1.29 สูงกว่าเกณฑ์ยอมรับได้ บ่งชี้ว่าพนักงานอาจได้รับผลกระทบต่อสุขภาพและประสิทธิภาพการทำงาน การศึกษาเน้นย้ำความจำเป็นในการจัดการคุณภาพอากาศอย่างเป็นระบบ โดยเฉพาะในอาคารใหม่ ผ่านการควบคุมแหล่งกำเนิด ปรับปรุงระบบระบายอากาศ และเลือกใช้วัสดุที่ปล่อย VOCs ต่ำ เพื่อคุ้มครองสุขภาพพนักงานตามหลักอาชีวอนามัยอย่างยั่งยืน

คำสำคัญ: สารอินทรีย์ระเหยง่าย; การวิเคราะห์แหล่งกำเนิดมลพิษ; การประเมินความเสี่ยงสุขภาพ; สภาพแวดล้อมภายในอาคาร; ความปลอดภัยและอาชีวอนามัย

[*] นักศึกษาปรัชญาดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม (หลักสูตรนานาชาติ) คณะสาธารณสุขศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล
[**] อาจารย์ คณะสาธารณสุขศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล
[***] ศูนย์วิจัยการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศและสิ่งแวดล้อม กรมการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศและสิ่งแวดล้อม
[****] อาจารย์ กลุ่มสหวิทยาการและการศึกษาตลอดชีวิต คณะสาธารณสุขศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล
[a] Corresponding author: จุฑารัตน์ แก้วบุญชู Email: jutarat.kea@mahidol.ac.th
รับบทความ: 2 ก.พ. 69; รับบทความแก้ไข: 13 ก.พ. 69; ตอบรับตีพิมพ์: 13 ก.พ. 69; ตีพิมพ์ออนไลน์: 25 เม.ย. 69

A Study of Indoor Air Quality in Workplaces: Measurement of Volatile Organic Compounds, Source Apportionment, and Occupational Health Risk Assessment of Office Workers

Peemapat Jookjantra[*], Sarawut Thepanondh[**], Plernpis Pongprayoon[***], Jutarat Keawboonchu[**a]**

Abstract

This study aimed to compare indoor air quality, analyze sources of volatile organic compounds (VOCs), and assess occupational health risks in an old building (BD1) and a new building (BD2) in Bangkok, Thailand. Air samples were collected over 5 days using U.S. EPA Method TO-15 and TO-11A, analyzed by GC/MS and HPLC. Source apportionment used PMF model, and health risk assessment followed U.S. EPA guidelines. Results showed BD2 had 2.6 times higher VOC concentrations than BD1 (403.27 vs. 153.87 μg/m³) and detected 48 vs. 36 species. Three major sources were identified: household cleaners, building materials and wood furniture, and paint and adhesives.

Health risk assessment revealed acceptable cancer risks, with formaldehyde showing highest lifetime cancer risk (1.4×10^{-5} in BD1 and 3.6×10^{-5} in BD2). However, formaldehyde in BD2 had a hazard quotient of 1.29, exceeding the acceptable threshold, indicating potential health effects on workers and work performance. This study emphasizes the need for systematic indoor air quality management, particularly in new buildings, through source control, ventilation improvements, and low-VOC material selection to protect workers' health according to occupational health principles sustainably.

Keywords: Volatile organic compound; Source apportionment; Health risk assessment; Indoor environment; Occupational health and safety

[*] Doctoral Student, Ph.D. Program in Environmental Technology (International Program), Faculty of Public Health, Mahidol University

[**] Lecturer, Faculty of Public Health, Mahidol University

[***] The Environmental Research and Training Center (ERTC), Department of Climate Change and Environment

[****] Lecturer, Interdisciplinary Studies and Lifelong Education, Faculty of Public Health, Mahidol University

[a] Corresponding author: Jutarat Keawboonchu Email: jutarat.kea@mahidol.ac.th

Received: Feb. 2, 26; Revised: Feb. 13, 26; Accepted: Feb. 13, 26; Published Online: Apr. 25, 26

บทนำ

คุณภาพอากาศภายในอาคาร (Indoor Air Quality: IAQ) เป็นประเด็นสำคัญด้านอาชีวอนามัย ที่มีผลโดยตรงต่อสุขภาพและประสิทธิภาพการทำงานของพนักงาน โดยเฉพาะในสถานที่ทำงานประเภทสำนักงานซึ่งบุคลากรใช้เวลาส่วนใหญ่อยู่ภายในอาคารอย่างต่อเนื่องในแต่ละวัน งานวิจัยและรายงานจากองค์กรด้านสาธารณสุขระบุว่ามนุษย์ใช้เวลาส่วนใหญ่อยู่ในสภาพแวดล้อมภายในอาคาร และคุณภาพอากาศภายในอาคารจึงมีบทบาทสำคัญต่อการสัมผัสมลพิษทางอากาศในชีวิตประจำวัน[1,2] สารอินทรีย์ระเหยง่าย (Volatile Organic Compounds: VOCs) เป็นกลุ่มสารมลพิษทางอากาศที่พบได้ทั่วไปในอาคารสำนักงาน เนื่องจากสามารถระเหยเข้าสู่อากาศได้ง่ายที่อุณหภูมิห้อง แหล่งกำเนิดของ VOCs ภายในอาคาร ได้แก่ วัสดุก่อสร้าง เฟอร์นิเจอร์ สี กาว วัสดุตกแต่งภายใน รวมถึงกิจกรรมการทำงานและกิจกรรมของผู้ใช้อาคาร การศึกษาหลายฉบับรายงานว่าความเข้มข้นของ VOCs ภายในอาคารมักสูงกว่าความเข้มข้นในอากาศภายนอกอย่างมีนัยสำคัญ อันเป็นผลจากแหล่งกำเนิดภายในอาคารและการระบายอากาศที่จำกัด การสัมผัส VOCs ในระดับต่ำแต่ต่อเนื่องเป็นระยะเวลานานอาจก่อให้เกิดอาการระคายเคืองต่อดวงตา จมูก และระบบทางเดินหายใจ รวมถึงอาการปวดศีรษะ อ่อนเพลีย และในบางสารอาจเพิ่มความเสี่ยงต่อผลกระทบต่อสุขภาพในระยะยาว[1,2]

ลักษณะทางกายภาพและอายุการใช้งานของอาคารเป็นปัจจัยสำคัญที่มีอิทธิพลต่อคุณภาพอากาศภายในอาคาร อาคารเก่ามักประสบปัญหาการเสื่อมสภาพของวัสดุและข้อจำกัดด้านระบบระบายอากาศ ขณะที่อาคารที่ผ่านการปรับปรุงหรืออาคารใหม่อาจมีการใช้วัสดุก่อสร้างและวัสดุตกแต่งที่เป็นแหล่งปล่อย VOCs ในระดับสูงในช่วงระยะเริ่มต้นของการใช้งาน งานศึกษาของ Park และ Ikeda[3] รายงานว่าความเข้มข้นของ VOCs ในอาคารใหม่มีแนวโน้มลดลงอย่างชัดเจนภายในระยะเวลาประมาณหนึ่งปี อย่างไรก็ตาม สารบางชนิดซึ่งมีแหล่งกำเนิดจากวัสดุไม้ อาจต้องใช้ระยะเวลานานกว่านั้นในการลดระดับความเข้มข้น[3] นอกจากนี้ งานทบทวนวรรณกรรมล่าสุดยังชี้ให้เห็นว่า ประเภทอาคารและกิจกรรมภายในอาคารมีผลต่อรูปแบบและระดับความเข้มข้นของมลพิษทางอากาศภายในอย่างมีนัยสำคัญ[4] การประเมินความเสี่ยงด้านอาชีวอนามัยจากการสัมผัสสาร VOCs เป็นขั้นตอนสำคัญในการคุ้มครองสุขภาพของพนักงาน โดยทั่วไปการประเมินความเสี่ยงจะพิจารณาจากระดับความเข้มข้นของสาร ระยะเวลาการสัมผัส และลักษณะของกลุ่มผู้ปฏิบัติงาน ซึ่งมักอ้างอิงค่าความเข้มข้นอ้างอิง (Reference Concentration: RfC) ที่ใช้เป็นเกณฑ์ในการประเมินความเสี่ยงของการสัมผัสสารเคมีแบบไม่ก่อมะเร็งในระยะยาว[5,6] อย่างไรก็ตาม สาร VOCs หลายชนิดยังไม่มีค่า RfC ที่กำหนดไว้อย่างชัดเจน ส่งผลให้การจำแนกสารออกเป็นกลุ่มที่มีและไม่มีค่า RfC เป็นประเด็นสำคัญในการประเมินความเสี่ยงอย่างครอบคลุม[6,7] นอกจากการตรวจวัดระดับความเข้มข้นของ VOCs แล้ว การระบุแหล่งกำเนิดของมลพิษยังเป็นข้อมูลสำคัญสำหรับการจัดการคุณภาพอากาศภายในอาคาร เนื่องจาก VOCs สามารถมีแหล่งกำเนิดหลายแหล่งที่ซ้อนทับกัน แบบจำลอง Positive Matrix Factorization (PMF) เป็นเครื่องมือทางสถิติที่ได้รับการยอมรับอย่างแพร่หลายในการวิเคราะห์แหล่งกำเนิดของมลพิษทางอากาศ โดยอาศัยข้อมูลความเข้มข้นของสารหลายชนิดเพื่อแยกองค์ประกอบ

และประเมินสัดส่วนการมีส่วนร่วมของแหล่งกำเนิดต่าง ๆ เช่น แหล่งจากวัสดุและอุปกรณ์ภายในอาคาร กิจกรรมของมนุษย์ หรือการแพร่กระจายจากอากาศภายนอก[8-10]

แม้ว่าจะมีงานวิจัยในต่างประเทศจำนวนมากที่ศึกษาคุณภาพอากาศภายในอาคาร การวิเคราะห์แหล่งกำเนิดของ VOCs ด้วยแบบจำลอง PMF และการประเมินผลกระทบต่อสุขภาพของผู้ปฏิบัติงาน อย่างไรก็ตาม งานวิจัยในบริบทของประเทศไทยยังมีจำนวนจำกัด โดยเฉพาะการศึกษาที่เปรียบเทียบคุณภาพอากาศระหว่างอาคารสำนักงานประเภทอาคารเก่า และอาคารใหม่ ร่วมกับการประเมินความเสี่ยงด้านอาชีวอนามัยของพนักงานอย่างเป็นระบบ[4,11] ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อเปรียบเทียบคุณภาพอากาศภายในอาคารสำนักงานทั้งสองประเภทผ่านการตรวจวัดสารอินทรีย์ระเหยง่าย วิเคราะห์แหล่งกำเนิดของสาร VOCs โดยใช้แบบจำลอง PMF และประเมินความเสี่ยงด้านอาชีวอนามัยของพนักงานสำนักงานในอาคารแต่ละประเภท เพื่อสนับสนุนการจัดการคุณภาพอากาศภายในอาคารและการป้องกันผลกระทบต่อสุขภาพในสถานที่ทำงานอย่างเหมาะสมและยั่งยืน

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อเปรียบเทียบชนิดและปริมาณสารอินทรีย์ระเหยง่ายในอากาศภายในอาคารสำนักงานระหว่างอาคารเก่า และอาคารใหม่
2. เพื่อวิเคราะห์แหล่งกำเนิดของสารอินทรีย์ระเหยง่าย (VOCs) ในอาคารสำนักงานแต่ละประเภทโดยใช้แบบจำลอง Positive Matrix Factorization (PMF)
3. เพื่อประเมินความเสี่ยงด้านอาชีวอนามัยของพนักงานสำนักงานจากการสัมผัสสารอินทรีย์ระเหยง่าย (VOCs) ในอาคารสำนักงานแต่ละประเภท

วิธีดำเนินการวิจัย

รูปแบบการวิจัย

การวิจัยนี้เป็นการวิจัยเชิงปริมาณ แบบสำรวจภาคสนามและการวิเคราะห์เชิงประยุกต์ เพื่อศึกษาชนิด ปริมาณ แหล่งกำเนิด และการประเมินความเสี่ยงด้านอาชีวอนามัยจากสารอินทรีย์ระเหยง่าย (VOCs) ในอาคารสำนักงานเขตกรุงเทพมหานคร ดำเนินการโดยเก็บตัวอย่างอากาศภายในอาคารสำนักงาน วิเคราะห์แหล่งกำเนิด VOCs ด้วยแบบจำลอง PMF และประเมินความเสี่ยงต่อสุขภาพพนักงานโดยใช้ค่าความเข้มข้นอ้างอิง (RfC) ผลการศึกษาจะให้ข้อมูลเพื่อวางแผนจัดการคุณภาพอากาศและป้องกันผลกระทบต่อสุขภาพในสถานที่ทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ

พื้นที่ศึกษา

การศึกษานี้ดำเนินการตรวจวัดสารอินทรีย์ระเหยง่ายภายในอาคารสำนักงาน โดยคัดเลือกอาคารตามอายุการใช้งานและลักษณะการปรับปรุงอาคาร แบ่งออกเป็น 2 ประเภท ได้แก่ อาคารสำนักงานเก่า และอาคารสำนักงานใหม่ รายละเอียดของอาคารสำนักงานที่ใช้เป็นพื้นที่ศึกษา มีดังนี้

1. อาคารสำนักงาน BD1 เป็นอาคารของหน่วยงานราชการ มีอายุการใช้งานมากกว่า 10 ปี พื้นที่ศึกษาตั้งอยู่บริเวณชั้น 7 ของอาคาร มีพื้นที่รวมประมาณ 500 ตารางเมตร ลักษณะการจัดพื้นที่ภายในเป็นสำนักงานแบบเปิด โดยมีการแบ่งพื้นที่ด้วยฉากกั้น มีความหนาแน่นของบุคลากรและเฟอร์นิเจอร์

ค่อนข้างสูง ซึ่งส่วนใหญ่เป็นเฟอร์นิเจอร์ที่ใช้งานมานาน อาคารใช้ระบบเครื่องปรับอากาศส่วนกลาง โดยเปิดใช้งานในช่วงเวลา 09.00-16.00 น.

2. อาคารสำนักงาน BD2 เป็นอาคารของบริษัทเอกชน มีอายุการใช้งานน้อยกว่า 5 ปี ตัวอาคารได้รับการออกแบบในลักษณะอาคารสำนักงานสมัยใหม่ แบ่งพื้นที่ใช้งานออกเป็นห้องสำนักงานหลายส่วน พื้นที่ศึกษาตั้งอยู่บริเวณชั้นใต้ดิน 1 มีพื้นที่ประมาณ 465 ตารางเมตร อาคารมีระบบบำบัดอากาศจากภายนอกก่อนนำเข้ามาใช้งานภายใน และติดตั้งระบบเครื่องปรับอากาศส่วนกลางที่ครอบคลุมพื้นที่สำนักงานทั้งหมด

อาคารสำนักงานทั้งสองแห่งมีลักษณะการใช้งานเป็นสำนักงานทั่วไป มีจำนวนผู้ใช้งานประมาณ 30-120 คนต่อวัน และมีการใช้งานอย่างต่อเนื่องในวันทำการปกติ (วันจันทร์-วันศุกร์) ในช่วงเวลาปฏิบัติงาน 08.00-17.00 น. โดยทั้งหมดใช้ระบบระบายอากาศแบบปิด (recirculation system)

การเก็บและวิเคราะห์ตัวอย่าง

การตรวจวัดสารอินทรีย์ระเหยง่าย (VOCs) ในอากาศภายในอาคารดำเนินการด้วย 2 วิธี ได้แก่ การตรวจวัดสารอินทรีย์ระเหยง่ายทั่วไปตามวิธี U.S. EPA Method TO-15[12] โดยใช้เทคนิค Canister–Preconcentrator–GC/MS และการตรวจวัดสารในกลุ่มคาร์บอนิล (เช่น Formaldehyde) ตามวิธี U.S. EPA Method TO-11A[13] โดยใช้เทคนิค DNPH-HPLC โดยทำการเก็บตัวอย่างทั้งหมด 5 วัน (วันจันทร์-วันศุกร์) ในช่วงเวลาที่มีการปฏิบัติงานภายในสำนักงาน จุดเก็บตัวอย่างอากาศถูกกำหนดที่ระดับความสูง 1.0-1.5 เมตรจากพื้น เพื่อให้สอดคล้องกับระดับการหายใจของผู้ใช้งาน สำหรับการเก็บตัวอย่าง VOCs ทั่วไป ใช้ Canister ขนาด 6 ลิตร เชื่อมต่อกับตัวควบคุมอัตราการไหล (Flow controller) เพื่อเก็บตัวอย่างแบบรวม (Integrated sampling) เป็นระยะเวลา 8 ชั่วโมง ในอัตราการไหลเฉลี่ย 10.4 mL/min ตามวิธี U.S. EPA Method TO-15[12] ขณะที่การเก็บตัวอย่างสารกลุ่มคาร์บอนิลใช้ DNPH cartridge (2,4-dinitro-phenylhydrazine) ต่อกับปั๊มดูดอากาศแบบควบคุมอัตราการไหลคงที่ที่ 300 mL/min เป็นระยะเวลา 8 ชั่วโมง ตามวิธี U.S. EPA Method TO-11A[13] ภายหลังการเก็บตัวอย่าง ตัวอย่างทั้งหมดถูกจัดเก็บในภาชนะที่ปิดสนิท และเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4 °C ระหว่างการขนส่งไปยังห้องปฏิบัติการ โดยค่าความเข้มข้นที่ได้ถูกประมวลผลเป็นค่าเฉลี่ยถ่วงน้ำหนักตามเวลา 8 ชั่วโมง (8-hour Time-Weighted Average; 8-h TWA) ซึ่งสอดคล้องกับหลักการประเมินการสัมผัสของบุคลากรตลอดช่วงเวลาการทำงาน และสะท้อนรูปแบบการสัมผัสตามสภาพการทำงานจริง เนื่องจากระดับความเข้มข้นของสารอาจเปลี่ยนแปลงตามกิจกรรมในแต่ละช่วงเวลา

ตัวอย่างอากาศที่เก็บด้วย Canister ถูกนำไปวิเคราะห์ด้วยระบบ Preconcentrator–Gas Chromatography–Mass Spectrometry (GC/MS) โดยใช้เทคนิคการเพิ่มความเข้มข้นแบบอุณหภูมิต่ำ (Cryogenic preconcentration) ตามแนวทางของ US EPA Method TO-15[12] เพื่อระบุและวิเคราะห์สารอินทรีย์ระเหยง่าย ขณะที่ตัวอย่างสารกลุ่มคาร์บอนิลซึ่งเก็บด้วย DNPH cartridge ถูกสกัดด้วยตัวทำละลาย Acetonitrile และนำไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง High Performance Liquid Chromatography (HPLC) ร่วมกับตัวตรวจวัดแบบอัลตราไวโอเลต (UV detector) ที่ความยาวคลื่น 360 นาโนเมตร ตามวิธี US EPA Method TO-11A[13] เพื่อใช้ในการตรวจวัดสารคาร์บอนิล เช่น Formaldehyde และ Acetaldehyde

เป็นต้น ตลอดกระบวนการเก็บและวิเคราะห์ตัวอย่างมีการควบคุมคุณภาพอย่างเป็นระบบ โดยทำการสอบเทียบเครื่องมือวิเคราะห์ด้วยก๊าซมาตรฐานที่ได้รับการรับรองตามมาตรฐานสากลก่อนการวิเคราะห์ในแต่ละชุด รวมถึงการตรวจสอบคุณภาพด้วยการวิเคราะห์ตัวอย่าง Blank, Duplicate และ Calibration เพื่อให้มั่นใจในความถูกต้องและความน่าเชื่อถือของผลการวิเคราะห์



(ก) (ข)

ภาพที่ 1 การเก็บตัวอย่างสารอินทรีย์ระเหยง่ายในอากาศ ณ อาคารสำนักงาน (ก) BD1 และ (ข) BD2

การประมวลผลข้อมูล

ผลการวิเคราะห์ชนิดและระดับความเข้มข้นของสารอินทรีย์ระเหยง่าย แสดงในรูปของค่าเฉลี่ยถ่วงน้ำหนักตามเวลา 8 ชั่วโมง (8-h TWA) โดยรายงานในหน่วยไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร (μg/m^3) ทั้งนี้ค่าความเข้มข้นของแต่ละสารที่ตรวจวัดได้ในแต่ละวันถูกนำมาคำนวณค่าเฉลี่ยตลอดช่วงการศึกษา เพื่อใช้เป็นค่าตัวแทนของระดับความเข้มข้นของสารในพื้นที่สำนักงานแต่ละแห่ง โดยพิจารณาเฉพาะสารที่ตรวจพบในสัดส่วนมากกว่าร้อยละ 30 ของจำนวนตัวอย่างทั้งหมด เพื่อเพิ่มความน่าเชื่อถือของการวิเคราะห์เชิงสถิติ ในกรณีที่ค่าความเข้มข้นของสารต่ำกว่าขีดจำกัดการตรวจวัด (Method detection limit; MDL) ค่าดังกล่าวถูกแทนด้วยครึ่งหนึ่งของค่า MDL ตามแนวปฏิบัติมาตรฐานที่ใช้กันทั่วไปในงานศึกษาด้านสิ่งแวดล้อมและอาชีวอนามัย แนวทางการจัดการข้อมูลดังกล่าวช่วยลดอคติจากข้อมูลที่ไม่สมบูรณ์ และเอื้อต่อการตีความผลการสัมผัสของบุคลากรภายใต้สภาพการทำงานจริงอย่างเหมาะสม

การระบุแหล่งกำเนิดและการวิเคราะห์สัดส่วนแหล่งกำเนิดของสารอินทรีย์ระเหยง่ายภายในอาคาร

การวิเคราะห์แหล่งกำเนิดและสัดส่วนการมีส่วนร่วมของสารอินทรีย์ระเหยง่าย ภายในอาคาร ดำเนินการโดยใช้แบบจำลอง Positive Matrix Factorization (PMF) Version 5.0 ซึ่งเป็นแบบจำลองตัวรับ

เชิงสถิติแบบพหุตัวแปรที่อาศัยข้อมูลความเข้มข้นจากการตรวจวัดจริงร่วมกับค่าความไม่แน่นอนของข้อมูล เพื่อแยกแยะโปรไฟล์ของแหล่งกำเนิดและประเมินสัดส่วนการมีส่วนร่วมของแต่ละแหล่งต่อความเข้มข้นรวมของสาร VOCs โดยไม่จำเป็นต้องทราบองค์ประกอบของแหล่งกำเนิดล่วงหน้า[14] แบบจำลองดังกล่าวสามารถสะท้อนบทบาทของแหล่งกำเนิดที่สำคัญภายในอาคารได้อย่างเป็นระบบ เช่น วัสดุก่อสร้าง เฟอร์นิเจอร์ กิจกรรมของผู้ใช้อาคาร และระบบระบายอากาศ ซึ่งข้อมูลสัดส่วนการมีส่วนร่วมที่ได้มีความสำคัญต่อการตีความรูปแบบการสัมผัสของบุคลากรและการกำหนดแนวทางควบคุมแหล่งกำเนิดมลพิษภายในอาคารอย่างมีประสิทธิภาพ ทั้งนี้ PMF ได้รับการยอมรับและถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายในงานศึกษาด้านคุณภาพอากาศและการประเมินแหล่งกำเนิดมลพิษ[14]

การประเมินความเสี่ยงต่อสุขภาพของผู้ปฏิบัติงาน

การประเมินความเสี่ยงต่อสุขภาพ (Health risk assessment) สำหรับพนักงานที่ปฏิบัติงานในสำนักงานดำเนินการโดยนำค่าความเข้มข้นของสารอินทรีย์ระเหยง่าย ที่ตรวจวัดได้ในอากาศภายในอาคารมาใช้ในการวิเคราะห์ทั้งความเสี่ยงด้านการก่อมะเร็ง (cancer risk) และความเสี่ยงที่ไม่ก่อมะเร็ง (Non-cancer risk)[15] โดยเริ่มจากการคำนวณค่าความเข้มข้นการรับสัมผัสทางการหายใจ (Inhalation Exposure Concentration; EC) ซึ่งสะท้อนระดับการรับสัมผัสของพนักงานตลอดช่วงเวลาการทำงานจริง คำนวณได้จากสมการที่ 1

$$EC = \frac{C \times ET \times EF \times ED}{AT} \quad (1)$$

โดยที่ C คือความเข้มข้นของสารในอากาศ ($\mu g/m^3$), ET คือระยะเวลาการรับสัมผัสต่อวัน (ชั่วโมง/วัน), EF คือความถี่การรับสัมผัส (วัน/ปี), ED คือระยะเวลาการรับสัมผัส (ปี) และ AT คือระยะเวลาเฉลี่ย ซึ่งสำหรับการประเมินความเสี่ยงด้านการก่อมะเร็งกำหนดจากช่วงชีวิตเฉลี่ย 70 ปี ขณะที่การประเมินความเสี่ยงที่ไม่ก่อมะเร็งใช้ค่า AT เท่ากับช่วงเวลาการรับสัมผัสจริง

จากนั้นการประเมินความเสี่ยงด้านการก่อมะเร็ง (Cancer Risk Assessment) จะคำนวณค่าความเสี่ยงตลอดช่วงชีวิต (Lifetime Cancer Risk; LCR) จากค่า EC ร่วมกับค่า inhalation unit risk (IUR) ของสารแต่ละชนิด ตามสมการที่ 2

$$LCR = EC \times IUR \quad (2)$$

โดยที่ IUR มีหน่วยเป็น $(\mu g/m^3)^{-1}$ ซึ่งค่า LCR ที่ได้สะท้อนความน่าจะเป็นในการเกิดโรคมะเร็งจากการรับสัมผัสสารผ่านทางการหายใจตลอดช่วงชีวิตการทำงานของพนักงานสำนักงาน ตามเกณฑ์ U.S. EPA ค่า LCR น้อยกว่า 1×10^{-6} ถือว่าความเสี่ยงต่ำมาก, 1×10^{-6} ถึง 1×10^{-4} เป็นระดับที่ยอมรับได้ และมากกว่า 1×10^{-4} เป็นความเสี่ยงที่ไม่สามารถยอมรับได้[15]

ขณะเดียวกัน การประเมินความเสี่ยงที่ไม่ก่อมะเร็ง (Non-cancer Risk Assessment) จะพิจารณาในรูปของค่า Hazard Quotient (HQ) โดยเปรียบเทียบค่า EC กับค่าความเข้มข้นอ้างอิงที่ไม่ก่อให้เกิดผลกระทบต่อสุขภาพ (Reference Concentration; RfC) ในหน่วย mg/m^3 ดังสมการที่ 3

$$HQ = \frac{EC}{RfC \times 1000} \quad (3)$$

โดยค่า HQ ที่มากกว่า 1 บ่งชี้ถึงความเป็นไปได้ของผลกระทบต่อสุขภาพที่ไม่ใช่มะเร็ง แนวทางการประเมินดังกล่าวช่วยสะท้อนระดับความเสี่ยงต่อสุขภาพของพนักงานสำนักงานภายใต้สภาพการทำงานจริง และสามารถใช้เป็นข้อมูลสนับสนุนในการจัดการคุณภาพอากาศภายในอาคารได้อย่างเหมาะสมตามหลักอาชีวอนามัยและสิ่งแวดล้อม

ในการคำนวณค่าการรับสัมผัสทางการหายใจ (EC) สำหรับพนักงานในอาคารสำนักงาน ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ถูกกำหนดให้สอดคล้องกับรูปแบบการทำงานจริงและแนวทางมาตรฐานด้านการประเมินความเสี่ยงต่อสุขภาพ โดยกำหนดค่าความเข้มข้นของสารในอากาศ (C) จากผลการตรวจวัดซึ่งรายงานในรูปของค่าเฉลี่ยถ่วงน้ำหนักตามเวลา 8 ชั่วโมง (8-h TWA) ระยะเวลาการรับสัมผัสต่อวัน (ET) กำหนดเท่ากับ 8 ชั่วโมงต่อวัน ซึ่งสอดคล้องกับเวลาการทำงานปกติ ความถี่การรับสัมผัส (EF) กำหนดเท่ากับ 250 วันต่อปี โดยพิจารณาจากจำนวนวันทำงานเฉลี่ยต่อปี (ไม่นับวันหยุดสุดสัปดาห์และวันหยุดนักขัตฤกษ์) ระยะเวลาการรับสัมผัส (ED) กำหนดเท่ากับ 25 ปี เพื่อสะท้อนช่วงเวลาการทำงานโดยเฉลี่ยของบุคลากรในสำนักงาน สำหรับการประเมินความเสี่ยงด้านการก่อมะเร็ง ระยะเวลาเฉลี่ย (AT) มีค่าเท่า 613,200 ชั่วโมง ซึ่งคำนวณจากช่วงชีวิตเฉลี่ย 70 ปี ขณะที่การประเมินความเสี่ยงที่ไม่ก่อมะเร็งกำหนดค่า AT เท่ากับ 219,000 ชั่วโมง ซึ่งคำนวณจากช่วงเวลาการรับสัมผัสจริง (ED) ค่าพารามิเตอร์ดังกล่าวเป็นค่าที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในงานประเมินความเสี่ยงจากการรับสัมผัสสารเคมีผ่านการหายใจในสภาพแวดล้อมการทำงาน และได้รับการแนะนำโดยหน่วยงานด้านสิ่งแวดล้อมและอาชีวอนามัย[15,16]

ผลการศึกษา

ชนิดและความเข้มข้นของสารอินทรีย์ระเหยง่ายภายในอาคาร

ผลการตรวจวัดสารอินทรีย์ระเหยง่ายในบรรยากาศภายในอาคารสำนักงานทั้งสองแห่ง แสดงให้เห็นความแตกต่างทั้งในด้านชนิดและระดับความเข้มข้นของสาร โดยรายละเอียดองค์ประกอบและค่าเฉลี่ยความเข้มข้นแสดงไว้ในตารางที่ 1 สำหรับสำนักงาน BD1 ตรวจพบสาร VOCs จำนวน 36 ชนิด มีค่าเฉลี่ยความเข้มข้นของสารอินทรีย์ระเหยง่ายภายในอาคารตลอดช่วงการทำงาน 8 ชั่วโมงรวม 153.87 μg/m³ โดยสารที่มีความเข้มข้นสูงสุด 5 ชนิด ได้แก่ Ethanol (34.29 μg/m³), Isopropyl alcohol (17.21 μg/m³), Formaldehyde (15.97 μg/m³), Acetone (15.16 μg/m³), และ Freon 22 (12.38 μg/m³) ขณะที่สำนักงาน BD2 สามารถตรวจพบสาร VOCs จำนวนทั้งสิ้น 48 ชนิด โดยมีค่าเฉลี่ยความเข้มข้นของสารอินทรีย์ระเหยง่ายภายในอาคารตลอดช่วงการทำงาน 8 ชั่วโมงรวม 403.27 μg/m³ มีค่าความเข้มข้นรวมสูงกว่าสำนักงาน BD1 อยู่ที่ 249.40 μg/m³ ซึ่งสารที่พบความเข้มข้นในระดับสูงสุด 5 ชนิด ได้แก่ Toluene (54.27 μg/m³), Isopropyl alcohol (50.24 μg/m³), Ethanol (45.23 μg/m³), Formaldehyde (39.55 μg/m³), และ Hexanal (34.99 μg/m³) ผลการตรวจวัดดังกล่าวสะท้อนให้เห็นถึงความแตกต่าง

ของลักษณะแหล่งกำเนิดและสภาพแวดล้อมภายในอาคารสำนักงานแต่ละแห่ง ซึ่งอาจมีผลต่อระดับการสัมผัสของผู้ปฏิบัติงานภายในพื้นที่ทำงาน

ตารางที่ 1 ชนิดและค่าเฉลี่ยความเข้มข้นของสาร VOCs ที่ตรวจพบภายในอาคารสำนักงาน

ลำดับที่	ชนิดของสารอินทรีย์ระเหยง่าย	ค่าเฉลี่ยความเข้มข้นของสารอินทรีย์ระเหยง่ายภายในอาคาร ตลอดช่วงการทำงาน 8 ชั่วโมง (μg/m³)	
		อาคารสำนักงาน BD1	อาคารสำนักงาน BD2
1	Propene	1.88	8.92
2	Freon 12	1.88	2.03
3	Freon 22	12.38	2.58
4	Chloromethane	1.45	1.71
5	Isobutene	0.57	1.51
6	1,3-Butadiene	-	0.31
7	Freon 11	1.07	1.4
8	Pentane	1.98	5.9
9	Isoprene	2.37	4.57
10	Acrylonitrile	1.87	3.82
11	Ethanol	34.29	45.23
12	2-Propenal	0.83	1.7
13	Freon 113	-	0.61
14	Acetone	15.16	34.68
15	Isopropyl Alcohol	17.21	50.24
16	Dichloromethane	1.01	1.95
17	Cyclopentane	1.32	10.56
18	Hexane	1.13	4.65
19	Methacrolein	0.46	1
20	1-Propanol	1.38	2.31
21	Methyl vinyl ketone	1.43	2.29
22	2-Butanone	2.71	4.13
23	Chloroform	0.73	0.98
24	Cyclohexane	0.86	5.23
25	Carbon tetrachloride	-	0.57
26	Benzene	0.83	1.37
27	2-Pentanone	0.56	0.81
28	Pentanal	0.92	1.55
29	3-Pentanone	-	0.63

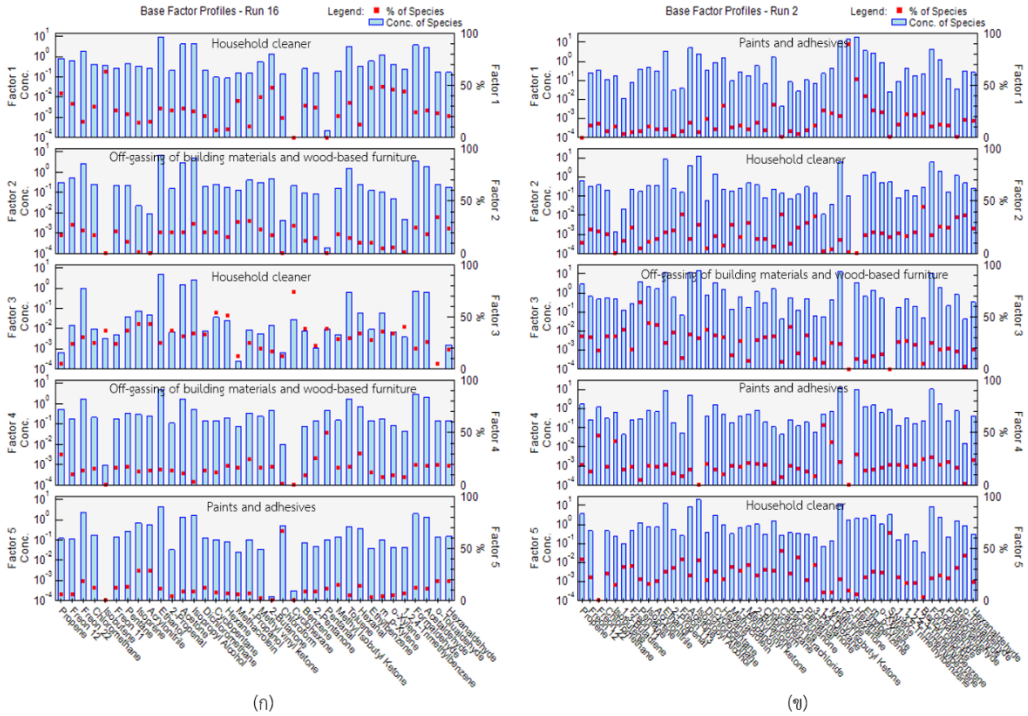
ตารางที่ 1 (ต่อ) ชนิดและค่าเฉลี่ยความเข้มข้นของสาร VOCs ที่ตรวจพบภายในอาคารสำนักงาน

ลำดับที่	ชนิดของสารอินทรีย์ระเหยง่าย	ค่าเฉลี่ยความเข้มข้นของสารอินทรีย์ระเหยง่ายภายในอาคาร ตลอดช่วงการทำงาน 8 ชั่วโมง (µg/m³)	
		อาคารสำนักงาน BD1	อาคารสำนักงาน BD2
30	1,4-Dioxane	-	0.9
31	Methyl Isobutyl Ketone	0.94	1.8
32	Toluene	9.87	54.27
33	2-Hexanone	-	17.05
34	Hexanal	2.58	34.99
35	Ethylbenzene	1.3	9.17
36	m,p-Xylene	2.56	10.69
37	o-Xylene	0.87	3.69
38	Styrene	-	4.86
39	1,3,5-Trimethylbenzene	-	0.69
40	1,2,4-Trimethylbenzene	0.59	1.82
41	1,2,3-Trimethylbenzene	-	0.84
42	Benzyl chloride	-	0.93
43	Formaldehyde	15.97	39.55
44	Acetaldehyde	11.35	9.52
45	Propionaldehyde	-	1.02
46	Benzaldehyde	-	4.69
47	o-Tolualdehyde	0.74	1.87
48	Hexanaldehyde	0.82	1.68

แหล่งกำเนิดและสัดส่วนแหล่งกำเนิดของสารอินทรีย์ระเหยง่ายภายในอาคาร

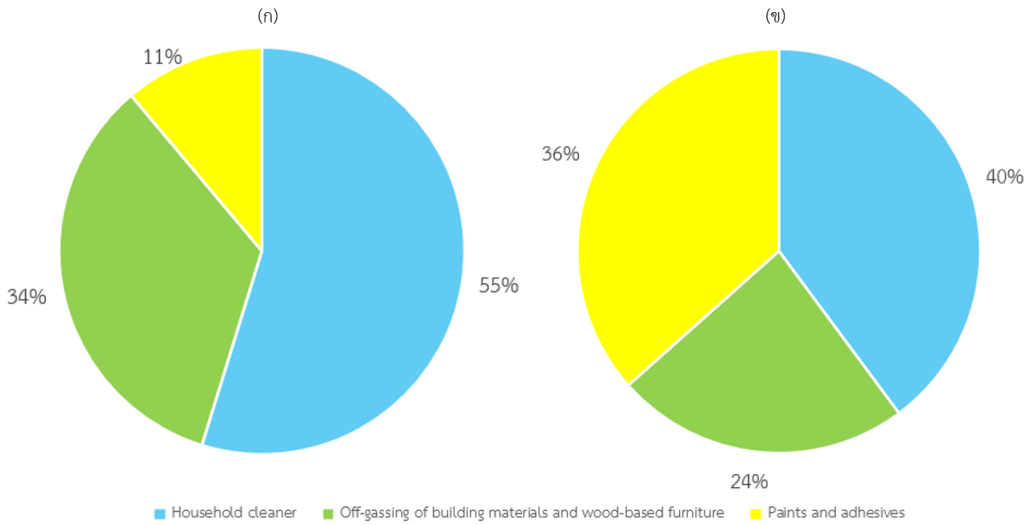
ผลการศึกษาแหล่งกำเนิดและสัดส่วนแหล่งกำเนิดของสารอินทรีย์ระเหยง่ายภายในอาคารสำนักงาน BD1 และ BD2 ตลอดช่วงการทำงาน 8 ชั่วโมง พบว่า หลังจากการวิเคราะห์ข้อมูลโดยแบบจำลอง PMF model และการพิจารณาสารเอกลักษณ์ (Signature) ของแหล่งกำเนิดต่างๆ ในแต่ละ Factor (ดังภาพที่ 2) แล้วนั้น แหล่งกำเนิดที่มีการปลดปล่อยสารอินทรีย์ระเหยง่ายในพื้นที่การศึกษานี้ประกอบไปด้วย 3 แหล่งกำเนิดหลัก คือ 1) แหล่งกำเนิดจากสีทาอาคารและสารยึดติด (Paint and adhesives) โดยมีสารเอกลักษณ์หลักที่ใช้พิจารณา ได้แก่ Xylene และ Benzene, 2) แหล่งกำเนิดจากสารทำความสะอาดในอาคาร (Household cleaner) โดยมีสารเอกลักษณ์หลักที่ใช้พิจารณา ได้แก่ Ethanol, Isopropyl alcohol, และกลุ่ม Oxygenated VOCs, และ 3) แหล่งกำเนิดจากวัสดุก่อสร้างและเฟอร์นิเจอร์ไม้ (Off-gassing of

building materials and wood-based furniture) โดยมีสารเอกลักษณ์หลักที่ใช้พิจารณา ได้แก่ Formaldehyde, Acetaldehyde, และกลุ่ม Alkanes



ภาพที่ 2 ผลของ PMF model ที่ระบุถึงแหล่งกำเนิดของสารอินทรีย์ระเหยง่ายภายในอาคารสำนักงาน (ก) BD1 และ (ข) BD2

ผลการวิเคราะห์สัดส่วนแหล่งกำเนิดของสารอินทรีย์ระเหยง่ายภายในอาคารสำนักงาน BD1 และ BD2 ดังแสดงในภาพที่ 3 พบว่าแหล่งกำเนิดหลักของ VOCs ในทั้งสองอาคารมาจากสารทำความสะอาดภายในอาคาร ซึ่งมีสัดส่วนอิทธิพลของแหล่งกำเนิดต่อความเข้มข้นสูงสุด คิดเป็นร้อยละ 55 สำหรับอาคาร BD1 และร้อยละ 40 สำหรับอาคาร BD2 สะท้อนให้เห็นถึงอิทธิพลของกิจกรรมการใช้งานประจำวันต่อคุณภาพอากาศภายในอาคาร สำรับอาคารสำนักงาน BD1 แหล่งกำเนิดรองลงมาคือการระเหยของสารจากวัสดุก่อสร้างและเฟอร์นิเจอร์ที่ทำจากไม้ ซึ่งมีสัดส่วนร้อยละ 34 ขณะที่อาคารสำนักงาน BD2 พบว่าแหล่งกำเนิดจากสีทาอาคารและสารยึดติด มีสัดส่วนสูงเป็นอันดับที่สอง คิดเป็นร้อยละ 36 ซึ่งสอดคล้องกับลักษณะของอาคารที่เป็นอาคารใหม่หรือผ่านการปรับปรุงไม่นาน ส่งผลให้ยังคงมีการปลดปล่อยสารระเหยจากสีและวัสดุตกแต่งภายใน ผลการศึกษานี้ช่วยสนับสนุนการอธิบายรูปแบบการกระจายของสาร VOCs ที่ตรวจวัดได้ในอาคารสำนักงาน และสามารถนำไปใช้ประกอบการตีความผลการประเมินผลกระทบต่อสุขภาพของผู้ปฏิบัติงานในภาพรวมได้อย่างเหมาะสม



ภาพที่ 3 สัดส่วนของแต่ละแหล่งกำเนิดที่ปลดปล่อยสารอินทรีย์ระเหยง่ายภายในอาคารสำนักงาน (ก) BD1 และ (ข) BD2

ผลการประเมินความเสี่ยงต่อสุขภาพของผู้ปฏิบัติงานในอาคารสำนักงาน

การประเมินผลกระทบต่อสุขภาพจากการสัมผัสสาร VOCs ผ่านทางการหายใจในอากาศภายในอาคารสำนักงานต่อพนักงานที่ทำงานในช่วงเวลา 8 ชั่วโมงต่อวัน แบ่งออกเป็น 2 ด้าน คือ ความเสี่ยงต่อการเกิดโรคมะเร็ง และความเสี่ยงต่อการเกิดผลกระทบทางสุขภาพที่ไม่ใช่มะเร็ง ตามแนวทางของ U.S. EPA จากสาร VOCs ทั้งหมด ที่ตรวจพบในการศึกษานี้ พบว่ามีค่า Reference Concentration (RfC) จากฐานข้อมูล U.S. EPA และ IRIS เพียง 28 ชนิด และมีค่า Inhalation Unit Risk (IUR) เพียง 9 ชนิด ดังแสดงในตารางที่ 2 ซึ่งสามารถนำมาประเมินความเสี่ยงเชิงปริมาณได้ สาร VOC ที่เหลือไม่ได้นำมาคำนวณความเสี่ยงทางสุขภาพ เนื่องจากยังไม่มีค่ามาตรฐานทางพิษวิทยา (RfC และ IUR) ที่เผยแพร่ในฐานข้อมูล U.S. EPA และ IRIS ซึ่งเป็นผลมาจากข้อจำกัดของข้อมูลทางพิษวิทยาที่ยังไม่เพียงพอต่อการกำหนดความสัมพันธ์เชิงปริมาณระหว่างระดับการสัมผัสและผลตอบสนองทางสุขภาพได้อย่างน่าเชื่อถือ อย่างไรก็ตาม สาร VOCs ที่ไม่ได้นำมาประเมินส่วนใหญ่เป็นสารที่มีความเข้มข้นต่ำและไม่มีหลักฐานทางวิทยาศาสตร์ที่ชัดเจนว่าก่อให้เกิดผลกระทบต่อสุขภาพในระดับที่ตรวจพบ ดังนั้นการประเมินความเสี่ยงในการศึกษานี้จึงครอบคลุมสาร VOCs ที่มีนัยสำคัญต่อสุขภาพและมีหลักฐานทางวิทยาศาสตร์รองรับอย่างเพียงพอ ทำให้ผลการประเมินสะท้อนความเสี่ยงที่แท้จริงได้อย่างเชื่อถือได้

ตารางที่ 2 ค่าความเข้มข้นอ้างอิงที่ไม่ก่อให้เกิดผลกระทบต่อสุขภาพ (RfC) และค่าความเสี่ยงต่อหน่วยการสัมผัสทางการหายใจ (IUR) ของสารแต่ละชนิดที่พบในบรรยากาศภายในอาคารสำนักงาน

ลำดับ	VOCs	RfC (mg/m^3)	IUR $(\mu g/m^3)^{-1}$	ลำดับ	VOCs	RfC (mg/m^3)	IUR $(\mu g/m^3)^{-1}$
1	Propene	3	-	15	Benzene	0.003	7.8×10^{-6}
2	Chloromethane	0.06	-	16	1,4-Dioxane	0.03	5.0×10^{-6}
3	1,3-Butadiene	0.002	3.6×10^{-5}	17	Methyl Isobutyl Ketone	3	-
4	Freon 11	1	-	18	Toluene	4	-
5	Acrylonitrile	0.002	-	19	2-Hexanone	0.03	-
6	Freon 113	5	-	20	Ethylbenzene	0.3	2.5×10^{-6}
7	Acetone	20	-	21	m,p-Xylene	0.1	-
8	Isopropyl Alcohol	0.2	-	22	o-Xylene	0.1	-
9	Dichloromethane	0.6	1.0×10^{-8}	23	Styrene	0.9	-
10	Hexane	0.7	-	24	1,3,5-Trimethylbenzene	0.06	-
11	2-Butanone	3	-	25	1,2,4-Trimethylbenzene	0.06	-
12	Chloroform	0.002	-	26	Benzyl chloride	0.001	4.9×10^{-5}
13	Cyclohexane	6	-	27	Formaldehyde	0.007	1.1×10^{-5}
14	Carbon tetrachloride	0.1	6.0×10^{-6}	28	Acetaldehyde	0.009	2.2×10^{-6}

การประเมินความเสี่ยงต่อสุขภาพของผู้ปฏิบัติงานในอาคารสำนักงาน BD1 และ BD2 ดำเนินการโดยคำนวณค่าความเสี่ยงต่อการเกิดมะเร็งตลอดช่วงชีวิต (LCR) และค่าดัชนีอันตราย (HQ) จากสาร VOCs ที่มีค่าความเข้มข้นอ้างอิง (RfC) และค่าความเสี่ยงต่อหน่วยการสัมผัสทางการหายใจ (IUR) ตามแนวทางของ U.S. EPA[15] ดังแสดงในตารางที่ 3

ผลการประเมินความเสี่ยงต่อการเกิดมะเร็งจากการสัมผัสสาร VOCs ตลอดช่วงชีวิตการทำงานของผู้ปฏิบัติงานในอาคารสำนักงาน BD1 และ BD2 พบว่าจากสาร VOCs ที่ตรวจพบทั้งหมด มีเพียง 9 ชนิดที่สามารถประเมินความเสี่ยงต่อการเกิดมะเร็งได้ ได้แก่ Formaldehyde, Benzyl chloride, Ethylbenzene, Acetaldehyde, 1,3-Butadiene, Benzene, 1,4-Dioxane, Carbon tetrachloride และ Dichloromethane โดยสารที่มีค่า LCR สูงที่สุดคือ Formaldehyde ซึ่งมีค่า LCR เท่ากับ 1.4×10^{-5} ในอาคาร BD1 และ 3.6×10^{-5} ในอาคาร BD2 อยู่ในระดับความเสี่ยงที่ยอมรับได้ตามเกณฑ์ U.S. EPA[15] รองลงมาคือ Benzyl chloride ที่พบเฉพาะในอาคาร BD2 โดยมีค่า LCR เท่ากับ 3.7×10^{-6} ตามด้วย Acetaldehyde ที่มีค่า LCR เท่ากับ 2.0×10^{-6} และ 1.7×10^{-6} ในอาคาร BD1 และ BD2 ตามลำดับ และ Ethylbenzene ที่มีค่า LCR เท่ากับ 2.7×10^{-7} และ 1.9×10^{-6} ในอาคาร BD1 และ BD2 ตามลำดับ สำหรับสารชนิดอื่นๆ ได้แก่ 1,3-Butadiene ที่พบเฉพาะในอาคาร BD2 มีค่า LCR เท่ากับ 8.9×10^{-7} Benzene ที่มีค่า LCR เท่ากับ 8.7×10^{-7} ในอาคาร BD2 1,4-Dioxane ที่มีค่า LCR เท่ากับ 3.7×10^{-7} ในอาคาร BD2 Carbon tetrachloride ที่มีค่า LCR เท่ากับ 2.8×10^{-7} ในอาคาร BD2 และ Dichloromethane ที่มีค่า LCR

เท่ากับ 8.2×10^{-10} และ 1.6×10^{-9} ในอาคาร BD1 และ BD2 ตามลำดับ ซึ่งมีค่า LCR ต่ำกว่า 1×10^{-6} ถือว่ามีความเสี่ยงต่ำมาก

สำหรับความเสี่ยงที่ไม่ก่อมะเร็ง มีสาร VOCs ทั้งหมด 28 ชนิดที่สามารถประเมินความเสี่ยงได้โดยใช้ค่า Hazard Quotient (HQ) โดยสารที่มีค่า HQ สูงที่สุดคือ Formaldehyde ซึ่งมีค่า HQ เท่ากับ 0.52 ในอาคาร BD1 และ 1.29 ในอาคาร BD2 โดยในอาคาร BD2 มีค่า HQ มากกว่า 1 บ่งชี้ว่าความเข้มข้นของ Formaldehyde มีความเป็นไปได้ที่จะก่อให้เกิดผลกระทบต่อสุขภาพของผู้ปฏิบัติงาน[15] รองลงมาคือ Acrylonitrile ที่มีค่า HQ เท่ากับ 0.21 ในอาคาร BD1 และ 0.44 ในอาคาร BD2 ตามด้วย Acetaldehyde ที่มีค่า HQ เท่ากับ 0.29 และ 0.24 ในอาคาร BD1 และ BD2 ตามลำดับ Benzyl chloride ที่พบเฉพาะในอาคาร BD2 มีค่า HQ เท่ากับ 0.21 และ 2-Hexanone ที่พบเฉพาะในอาคาร BD2 มีค่า HQ เท่ากับ 0.13 นอกจากนี้ Chloroform มีค่า HQ เท่ากับ 0.08 และ 0.11 ในอาคาร BD1 และ BD2 ตามลำดับ และ Benzene มีค่า HQ เท่ากับ 0.06 และ 0.10 ในอาคาร BD1 และ BD2 ตามลำดับ สำหรับสารชนิดอื่น ๆ มีค่า HQ ต่ำกว่า 0.06 ซึ่งบ่งชี้ว่ามีความเสี่ยงต่อสุขภาพของผู้ปฏิบัติงานในระดับต่ำ

ตารางที่ 3 ผลการประเมินความเสี่ยงต่อสุขภาพจากสาร VOCs ในอาคารสำนักงาน BD1 และ BD2

ชนิดของสารอินทรีย์ระเหยง่าย	อาคารสำนักงาน BD1				อาคารสำนักงาน BD2			
	EC สำหรับ noncancer	EC สำหรับ cancer	HQ	LCR	EC สำหรับ noncancer	EC สำหรับ cancer	HQ	LCR
Propene	0.43	-	0.0001	-	2.04	-	0.0007	-
Chloromethane	0.33	-	0.0055	-	0.39	-	0.0065	-
1,3-Butadiene	-	-	-	-	0.07	0.03	0.0354	8.9×10^{-7}
Freon 11	0.24	-	0.0002	-	0.32	-	0.0003	-
Acrylonitrile	0.43	-	0.2135	-	0.87	-	0.4361	-
Freon 113	-	-	-	-	0.14	-	0.0000	-
Acetone	3.46	-	0.0002	-	7.92	-	0.0004	-
Isopropyl Alcohol	3.93	-	0.0196	-	11.47	-	0.0574	-
Dichloromethane	0.23	0.08	0.0004	8.2×10^{-10}	0.45	0.16	0.0007	1.6×10^{-9}
Hexane	0.26	-	0.0004	-	1.06	-	0.0015	-
2-Butanone	0.62	-	0.0002	-	0.94	-	0.0003	-
Chloroform	0.17	-	0.0833	-	0.22	-	0.1119	-
Cyclohexane	0.20	-	0.0000	-	1.19	-	0.0002	-
Carbon tetrachloride	-	-	-	-	0.13	0.05	0.0013	2.8×10^{-7}
Benzene	0.19	-	0.0632	-	0.31	0.11	0.1043	8.7×10^{-7}
1,4-Dioxane	-	-	-	-	0.21	0.07	0.0068	3.7×10^{-7}

ตารางที่ 3 (ต่อ) ผลการประเมินความเสี่ยงต่อสุขภาพจากสาร VOCs ในอาคารสำนักงาน BD1 และ BD2

ชนิดของสารอินทรีย์ระเหยง่าย	อาคารสำนักงาน BD1				อาคารสำนักงาน BD2			
	EC สำหรับ noncancer	EC สำหรับ cancer	HQ	LCR	EC สำหรับ noncancer	EC สำหรับ cancer	HQ	LCR
Methyl Isobutyl Ketone	0.21	-	0.0001	-	0.41	-	0.0001	-
Toluene	2.25	-	0.0006	-	12.39	-	0.0031	-
2-Hexanone	-	-	-	-	3.89	-	0.1298	-
Ethylbenzene	0.30	0.11	0.0010	2.7×10^{-7}	2.09	0.75	0.0070	1.9×10^{-6}
m,p-Xylene	0.58	-	0.0058	-	2.44	-	0.0244	-
o-Xylene	0.20	-	0.0020	-	0.84	-	0.0084	-
Styrene	-	-	-	-	1.11	-	0.0012	-
1,3,5-Trimethylbenzene	-	-	-	-	0.16	-	0.0026	-
1,2,4-Trimethylbenzene	0.13	-	0.0022	-	0.42	-	0.0069	-
Benzyl chloride	-	-	-	-	0.21	0.08	0.2123	3.7×10^{-6}
Formaldehyde	3.65	1.30	0.5209	1.4×10^{-5}	9.03	3.22	1.2900	3.6×10^{-5}
Acetaldehyde	2.59	0.93	0.2879	2.0×10^{-6}	2.17	0.78	0.2415	1.7×10^{-6}

หมายเหตุ: EC=Exposure Concentration (μg/m³); HQ=Hazard Quotient; LCR=Lifetime Cancer Risk

สรุปและอภิปรายผล

การศึกษานี้ประเมินคุณภาพอากาศภายในสถานที่ทำงานและความเสี่ยงด้านอาชีวอนามัยของพนักงานสำนักงานในอาคารเก่า (BD1) และอาคารใหม่ (BD2) พบว่าอาคาร BD2 มีระดับความเข้มข้นของ VOCs รวมสูงกว่าอาคาร BD1 ถึง 2.6 เท่า (403.27 μg/m³ เทียบกับ 153.87 μg/m³) และตรวจพบสาร VOCs มากกว่า (48 ชนิด เทียบกับ 36 ชนิด) การวิเคราะห์แหล่งกำเนิดด้วยแบบจำลอง PMF ระบุแหล่งกำเนิดหลัก 3 แหล่ง คือ สารทำความสะอาดในอาคาร (55% ใน BD1 และ 40% ใน BD2) วัสดุก่อสร้างและเฟอร์นิเจอร์ไม้ (34% ใน BD1 และ 24% ใน BD2) และสีทาอาคารและสารยึดติด (11% ใน BD1 และ 36% ใน BD2) ซึ่งสอดคล้องกับงานศึกษาของ Park และ Ikeda (2006)[3] ที่รายงานว่าอาคารใหม่มีระดับ VOCs สูงจากการปลดปล่อยสารจากวัสดุใหม่ ผลการประเมินความเสี่ยงต่อสุขภาพตาม U.S. EPA[15] พบว่า

ความเสี่ยงต่อการเกิดมะเร็ง (LCR) อยู่ในระดับที่ยอมรับได้ โดย Formaldehyde มีค่า LCR สูงสุด (1.4×10^{-5} ใน BD1 และ 3.6×10^{-5} ใน BD2) อย่างไรก็ตาม ความเสี่ยงที่ไม่ก่อมะเร็งในอาคาร BD2 พบว่า Formaldehyde มีค่า HQ เท่ากับ 1.29 ซึ่งสูงกว่าเกณฑ์ที่ยอมรับได้ (HQ > 1) บ่งชี้ว่า พนักงานมีความเป็นไปได้ที่จะได้รับผลกระทบต่อสุขภาพ เช่น อาการระคายเคืองต่อดวงตา จมูก ระบบทางเดินหายใจ ปวดศีรษะ และอ่อนเพลีย ซึ่งอาจส่งผลต่อประสิทธิภาพการทำงาน นอกจากนี้พบสารอื่นที่มีค่า HQ ในระดับที่ควรให้ความสนใจ ได้แก่ Acrylonitrile (0.44 ใน BD2) Acetaldehyde (0.29 ใน BD1 และ 0.24 ใน BD2) และ Benzyl chloride (0.21 ใน BD2)

ข้อเสนอแนะด้านอาชีวอนามัยสำหรับการจัดการคุณภาพอากาศในอาคารสำนักงานมีดังนี้ สำหรับอาคารใหม่ ควรมีช่วงระบายอากาศก่อนเริ่มใช้งาน (Pre-occupancy ventilation) 2-4 สัปดาห์ เพิ่มอัตราการระบายอากาศในช่วง 6-12 เดือนแรก เลือกใช้วัสดุก่อสร้างและเฟอร์นิเจอร์ที่ปล่อย VOCs ต่ำตามมาตรฐาน Green Label[17] หรือ LEED[18] และติดตั้งระบบกรองอากาศที่มีประสิทธิภาพ สำหรับอาคารเก่า ควรตรวจสอบคุณภาพอากาศเป็นประจำทุก 6 เดือน ปรับปรุงระบบระบายอากาศตามมาตรฐาน ASHRAE 62.1[19] เปลี่ยนเฟอร์นิเจอร์เก่าที่เป็นแหล่งปล่อย Formaldehyde และควบคุมการใช้สารทำความสะอาดที่มี VOCs สูง สำหรับทั้งสองประเภทอาคาร ควรจัดทำโปรแกรมเฝ้าระวังสุขภาพพนักงาน โดยมีการตรวจสุขภาพประจำปี จัดฝึกอบรมความรู้ด้านอาชีวอนามัยเกี่ยวกับความเสี่ยงจาก VOCs แก่พนักงาน จัดทำแนวปฏิบัติในการใช้สารเคมีอย่างปลอดภัย และติดตั้งระบบแจ้งเตือนคุณภาพอากาศแบบเรียลไทม์ การศึกษาในอนาคตควรขยายขอบเขตให้ครอบคลุมอาคารมากขึ้น เก็บข้อมูลระยะยาวเพื่อศึกษาความแปรปรวนตามฤดูกาล ศึกษาผลกระทบต่อสุขภาพพนักงานโดยตรง และพัฒนาแนวทางการจัดการคุณภาพอากาศที่เหมาะสมกับบริบทของประเทศไทยเพื่อลดความเสี่ยงด้านอาชีวอนามัยและส่งเสริมสุขภาพของพนักงานอย่างยั่งยืน

กิตติกรรมประกาศ

การวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนข้อมูลและการอนุเคราะห์จากศูนย์วิจัยการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศและสิ่งแวดล้อม กรมการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศและสิ่งแวดล้อม ในการนำข้อมูลการตรวจวัดคุณภาพอากาศมาใช้ประโยชน์ในการศึกษาครั้งนี้ คณะผู้วิจัยขอขอบพระคุณผู้บริหารและเจ้าหน้าที่ของอาคารสำนักงานทั้งสองแห่งที่เป็นพื้นที่ศึกษา ที่ให้ความอนุเคราะห์สถานที่และอำนวยความสะดวกในการเก็บตัวอย่างอากาศภายในอาคาร ตลอดจนให้ความร่วมมือในการดำเนินการวิจัยเป็นอย่างดี

เอกสารอ้างอิง

1. American Lung Association. Volatile Organic Compounds [Internet]. 2026 [cited 2026 Jan 15]. Available from: https://www.lung.org/clean-air/indoor-air/indoor-air-pollutants/volatile-organic-compounds
2. United States Environmental Protection Agency. Volatile Organic Compounds' Impact on Indoor Air Quality [Internet]. 2025 [cited 2026 Jan 15]. Available from: https://www.epa.gov/indoor-air-quality-iaq/volatile-organic-compounds-impact-indoor-air-quality
3. Park JS, Ikeda K. Variations of formaldehyde and VOC levels during 3 years in new and older homes. Indoor Air. 2006 Apr;16(2):129-35. doi: 10.1111/j.1600-0668.2005.00408.x.
4. Baeza Romero MT, Dudzinska MR, Amouei Torkmahalleh M, Barros N, Coggins AM, Ruzgar DG, et al. A review of critical residential buildings parameters and activities when investigating indoor air quality and pollutants. Indoor Air. 2022 Nov;32(11):e13144. doi: 10.1111/ina.13144.
5. Alaska Department of Environmental Conservation. Environmental Protection Agency's Reference Concentrations (RfCs) [Internet]. 2003 [cited 2026 Jan 15]. Available from: https://dec.alaska.gov/air/anpms/toxics/non-carcinogens/
6. Su FC, Jia C, Batterman S. Extreme value analyses of VOC exposures and risks: A comparison of RIOPA and NHANES datasets. Atmos Environ (1994). 2012 Dec 1;62:97-106. doi: 10.1016/j.atmosenv.2012.06.038.
7. Mo Z, Lu S, Shao M. Volatile organic compound (VOC) emissions and health risk assessment in paint and coatings industry in the Yangtze River Delta, China. Environ Pollut. 2021 Jan 15;269:115740. doi: 10.1016/j.envpol.2020.115740.
8. Su YC, Chen WH, Fan CL, Tong YH, Weng TH, Chen SP, et al. Source Apportionment of Volatile Organic Compounds (VOCs) by Positive Matrix Factorization (PMF) supported by Model Simulation and Source Markers - Using Petrochemical Emissions as a Showcase. Environ Pollut. 2019;254:112848. doi: 10.1016/j.envpol.2019.07.016
9. Healy RM, Sofowote UM, Wang JM, Chen Q, Todd A. Spatially Resolved Source Apportionment of Industrial VOCs Using a Mobile Monitoring Platform. Atmosphere. 2022;13(10):1722. doi: 10.3390/atmos13101722
10. Frischmon C, Hannigan M. VOC source apportionment: How monitoring characteristics influence positive matrix factorization (PMF) solutions. Atmos Environ X. 2024;21:100230. doi: 10.1016/j.aeaoa.2023.100230

11. Felgueiras F, Mourão Z, Moreira A, Gabriel MF. Indoor environmental quality in offices and risk of health and productivity complaints at work: A literature review. J Hazard Mater Adv. 2023;10:100314. doi: 10.1016/j.hazadv.2023.100314
12. United States Environmental Protection Agency. Compendium Method TO-15: Determination of Volatile Organic Compounds (VOCs) in Air Collected in Specially-Prepared Canisters and Analyzed by GC/MS. Cincinnati (OH): U.S. Environmental Protection Agency; 1999.
13. United States Environmental Protection Agency. Compendium Method TO-11A: Determination of Formaldehyde in Ambient Air Using Adsorbent Cartridge Followed by HPLC. Cincinnati (OH): U.S. Environmental Protection Agency; 1999.
14. United States Environmental Protection Agency. EPA Positive Matrix Factorization (PMF) 5.0 Fundamentals and User Guide. Washington (DC): Office of Research and Development; 2014.
15. United States Environmental Protection Agency. Risk Assessment Guidance for Superfund, Volume I: Human Health Evaluation Manual (Part F): Supplemental Guidance for Inhalation Risk Assessment. Washington (DC): U.S. Environmental Protection Agency; 2009.
16. United States Environmental Protection Agency. Exposure Factors Handbook. Washington (DC): Office of Research and Development; 2011.
17. Singapore Environment Council. Singapore Green Labelling Scheme (SGLS): Indoor Air Quality for Furniture Products [Internet]. Singapore: Singapore Environment Council; 2023 [cited 2026 Jan 18]. Available from: https://sgls.sec.org.sg/
18. U.S. Green Building Council. LEED v4.1 Building Design and Construction Guide. Washington (DC): U.S. Green Building Council; 2021. doi: 10.1016/B978-0-12-818130-1.00001-6
19. ASHRAE. ANSI/ASHRAE Standard 62.1-2019: Ventilation for Acceptable Indoor Air Quality. Atlanta (GA): American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers; 2019.