

การจัดการซากหลอดฟลูออเรสเซนต์อย่างยั่งยืนในพื้นที่รวบรวมขยะท้องถิ่น Sustainable Management of Fluorescent Lamp Waste in Local Waste Management Areas

จันทิราพร ทั้งสุวรรณ^{1*} รัชตวรรณ เกตุวัง¹ เต็มเดือน ชานะทร¹ อรจิรียา ช่างเหล็ก¹ ชนัญญา กระแสสืบ¹ พิมพ์พิชญ์ นิโกบ²
และ ประพัทธ์ พงษ์เกียรติกุล²

Chanthiraporn Tangsuwan^{1*} Ratchatawan Ketwang¹ Temduean Chanatorn¹ Onjeereeya Changlek¹
Chananya Krasaesueb¹ Pimpich Nigob² and Prapat Pongkiatkul²

¹ศูนย์วิจัยการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศและสิ่งแวดล้อม กรมการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศและสิ่งแวดล้อม
กรุงเทพฯ ประเทศไทย

²ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี กรุงเทพฯ ประเทศไทย

¹Climate Change and Environmental Research Center, Department of Climate Change and Environment,
Bangkok, Thailand

²Department of Environmental Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's University of
Technology Thonburi, Bangkok, Thailand

วันที่ส่งบทความ : 30 ตุลาคม 2568 วันที่แก้ไขบทความ : 24 มิถุนายน 2569 วันที่ตอบรับบทความ : 25 มิถุนายน 2569

Received: 30 October 2025, Revised: 24 June 2026, Accepted: 25 June 2026

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินการปนเปื้อนของสารปรอทในอากาศภายในพื้นที่จัดเก็บซากหลอดฟลูออเรสเซนต์ และวิเคราะห์ผลของการระบายอากาศต่อการลดความเข้มข้นของไอปรอท เพื่อใช้เป็นแนวทางในการจัดการซากหลอดฟลูออเรสเซนต์อย่างปลอดภัยและยั่งยืน ผลการศึกษาพบว่า พื้นที่ชนบทยังคงมีการใช้และเกิดซากหลอดฟลูออเรสเซนต์ในสัดส่วนสูงกว่าพื้นที่เมืองอย่างชัดเจน ขณะที่การตรวจวัดปริมาณสารปรอทในอากาศบริเวณพื้นที่จัดเก็บพบว่า พื้นที่ปิดมีความเข้มข้นของไอปรอทเฉลี่ยสูงกว่าพื้นที่เปิดถึงกว่า 50 เท่า โดยเฉพาะในห้องจัดเก็บที่ไม่มีการระบายอากาศ ซึ่งมีค่าเฉลี่ยสูงถึง $520.9 \pm 160.3 \text{ ng/m}^3$ ขณะที่พื้นที่เปิดมีค่าเฉลี่ยเพียง $10.9 \pm 5.4 \text{ ng/m}^3$ การทดสอบในห้องควบคุมพบว่า หลอดฟลูออเรสเซนต์ที่แตกสามารถปลดปล่อยสารปรอทได้มากในช่วง 10 นาทีแรก และสามารถมีปริมาณการปลดปล่อยรวมเฉลี่ย ประมาณ 8 มิลลิกรัมต่อหลอด การจำลองด้วยสมการสมดุลมวลแสดงให้เห็นว่า การระบายอากาศแบบมีช่องเปิดตรงกันในแนวทิศทางลม (Cross ventilation) มีประสิทธิภาพในการลดความเข้มข้นของไอปรอทได้ดีกว่าแบบการระบายอากาศแบบด้านเดียว (Single-sided ventilation) โดยเมื่อมีช่องเปิดขนาดเหมาะสมสามารถลดความเข้มข้นของไอปรอทจาก 520.8 ng/m^3 เหลือเพียง 21.7 ng/m^3 ซึ่งแสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์โดยตรงระหว่างอัตราการระบายอากาศและการลดการสะสมของไอปรอท สามารถสรุปได้ว่า แนวทางที่เหมาะสมในการจัดการซากหลอดฟลูออเรสเซนต์ควรเริ่มจากการคัดแยก

*ที่อยู่ติดต่อ E-mail address: chanthiraporn.tsuwan@gmail.com <https://doi.org/10.55003/scikmitl.2026.269686>

ประเภทของหลอดตั้งแต่ต้นทาง การใช้ภาชนะที่แข็งแรงระหว่างการขนส่ง และการจัดเก็บในพื้นที่ที่มีอัตราการระบายอากาศเพียงพอภายใต้ระบบการจัดการของเสียอันตรายที่ถูกต้องตามกฎหมาย เพื่อป้องกันการปนเปื้อนและลดความเสี่ยงต่อสุขภาพและสิ่งแวดล้อมอย่างยั่งยืน

คำสำคัญ : หลอดฟลูออเรสเซนต์ การจัดการขยะในท้องถิ่น สารปรอท เป้าหมายการพัฒนาที่ยั่งยืน

Abstract

This study aimed to evaluate mercury contamination in the air within fluorescent lamp waste storage areas and to analyze the effect of ventilation on reducing airborne mercury concentration, in order to develop safe and sustainable waste management guidelines. The results revealed that rural areas still generate and use fluorescent lamps at significantly higher proportions than urban areas. Measurements of airborne mercury in storage facilities showed that closed areas exhibited mercury concentrations more than 50 times higher than open areas. Specifically, non-ventilated storage rooms recorded an average concentration of 520.9 ± 160.3 ng/m³, whereas open areas averaged only 10.9 ± 5.4 ng/m³. Controlled chamber tests indicated that broken fluorescent lamps released a large amount of mercury vapor during the first 10 minutes, with a total average emission of approximately 8 milligrams per lamp. Simulation using the mass balance model demonstrated that cross ventilation was significantly more effective in reducing mercury concentration than single-sided ventilation. When properly sized openings were applied, the mercury concentration decreased dramatically—from 520.8 ng/m³ to only 21.7 ng/m³—highlighting the direct correlation between ventilation rate and reduction of mercury accumulation. In conclusion, effective management of fluorescent lamp waste should begin with proper source separation between fluorescent and LED lamps, the use of durable and sealed containers during transport, and storage in facilities with adequate ventilation rates, all under a legally compliant hazardous waste management system. These measures are essential to prevent environmental contamination and mitigate long-term health risks in a sustainable manner.

Keywords: Fluorescent lamp, Local waste management, Mercury, Sustainable Development Goals (SDG)

1. บทนำ

ในปัจจุบันหลายประเทศทั่วโลกกำลังเผชิญกับปัญหาการจัดการของเสียอันตรายที่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและสุขภาพของมนุษย์ โดยเฉพาะอย่างยิ่งปัญหาขยะชุมชนที่มีองค์ประกอบของสารพิษหรือ

โลหะหนัก ปัญหาของเสียอันตรายชุมชนที่ได้รับความสนใจมากขึ้นในช่วงทศวรรษที่ผ่านมา คือ ซากหลอดฟลูออเรสเซนต์ (Fluorescent lamp waste) (Forti et al., 2020; Liu et al., 2023) ซึ่งเป็นวัสดุที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในชีวิตประจำวัน ทั้งในบ้านเรือน อาคารสำนักงาน โรงเรียน โรงพยาบาล โรงงาน หรือสถานที่สาธารณะ หลอดฟลูออเรสเซนต์มีข้อดีคือสามารถผลิตพลังงานและมีอายุการใช้งานยาวนานกว่าหลอดไส้ทั่วไป อย่างไรก็ตาม ภายในหลอดไฟดังกล่าวมีการใช้สารปรอท (Mercury: Hg) เป็นส่วนประกอบสำคัญในการสร้างแสงสว่างจากการเรืองแสงของสารฟอสฟอรัสภายในหลอด เมื่อหลอดเหล่านี้หมดอายุการใช้งานและไม่ได้รับการจัดการอย่างถูกต้อง ปรอทที่อยู่ภายในอาจรั่วไหลออกสู่สิ่งแวดล้อมและก่อให้เกิดอันตรายต่อทั้งมนุษย์และระบบนิเวศได้

สารปรอทเป็นโลหะหนักที่มีคุณสมบัติพิเศษแตกต่างจากโลหะชนิดอื่นคือสามารถระเหยและอยู่ในสถานะก๊าซได้แม้ที่อุณหภูมิห้อง ส่งผลให้มีศักยภาพในการแพร่กระจายสู่อากาศและบรรยากาศโดยรอบได้อย่างรวดเร็ว รูปแบบของสารปรอทในสิ่งแวดล้อมสามารถแบ่งได้เป็น 3 ประเภท ได้แก่ 1) ปรอทธาตุ (Elemental mercury: Hg^0) ซึ่งเป็นรูปแบบก๊าซที่พบในหลอดฟลูออเรสเซนต์ 2) ปรอทอนินทรีย์ (Inorganic mercury: Hg^{2+}) เกิดจากการออกซิไดซ์ของปรอทธาตุในอากาศหรือน้ำ ละลายน้ำได้ดี และมีแนวโน้มสะสมในดินและตะกอน และ 3) ปรอทอินทรีย์ (Organic mercury) ที่เกิดจากกระบวนการทางชีวภาพในน้ำ สามารถสะสมในสิ่งมีชีวิตและผ่านเข้าสู่ห่วงโซ่อาหารได้อย่างต่อเนื่อง (Clarkson & Magos, 2006; U.S. Environmental Protection Agency, 2021; World Health Organization, 2003) ดังนั้นสารปรอทจึงเป็นโลหะที่มีความซับซ้อนทางเคมีและพิษสูง (Ullrich et al., 2001; Morel et al., 1998; Hsu-Kim et al., 2013) องค์การอนามัยโลก (World Health Organization: WHO) (World Health Organization, 2000) แนะนำให้การสัมผัสไอปรอทเฉลี่ยรายปีในอากาศไม่ควรเกิน $1 \mu g/m^3$ เพื่อป้องกันผลกระทบต่อสุขภาพในระยะยาว ขณะเดียวกันหน่วยงาน Agency for Toxic Substances and Disease Registry (ATSDR) ได้กำหนดค่า Chronic Minimal Risk Level (MRL) สำหรับการสัมผัสระยะยาวไว้ที่ $0.3 \mu g/m^3$ ซึ่งมีความเข้มงวดมากกว่า และใช้เป็นค่าอ้างอิงในการประเมินความเสี่ยงด้านสุขภาพจากการสัมผัสไอปรอทอย่างต่อเนื่อง (Agency for Toxic Substances and Disease Registry, 2024) ขณะที่หน่วยงาน Occupational Safety and Health Administration (OSHA) ของสหรัฐอเมริกา กำหนดค่าขีดจำกัดการสัมผัสสารปรอทในอากาศสำหรับการทำงาน 8 ชั่วโมง ต่อวัน (Permissible Exposure Limit: PEL) ไว้ที่ $0.1 mg/m^3$ (Occupational Safety and Health Administration, 2021) ประเทศไทยได้กำหนดค่าขีดจำกัดความเข้มข้นสูงสุดของไอปรอทในบรรยากาศการทำงานแบบ Ceiling limit ไว้ที่ $0.1 mg/m^3$ สำหรับการสัมผัสในช่วงเวลาทำงาน 8 ชั่วโมง ตามประกาศกรมสวัสดิการและคุ้มครองแรงงาน เรื่อง ขีดจำกัดความเข้มข้นของสารเคมีอันตรายในบรรยากาศการทำงาน ซึ่งสอดคล้องกับค่าที่กำหนดโดย OSHA

จากงานวิจัยของ Stemp-Morlock (2008) รายงานว่าความเข้มข้นของไอปรอทในอากาศบริเวณใกล้จุดที่หลอดฟลูออเรสเซนต์แตกอาจสูงถึง $200-800 \mu g/m^3$ ซึ่งถือว่าสูงกว่าค่ามาตรฐานความปลอดภัยในการสัมผัสสารปรอทในอากาศที่กำหนดโดย WHO และ OSHA การสัมผัสไอปรอทในระดับดังกล่าวสามารถก่อให้เกิดความเป็นพิษเฉียบพลันต่อระบบประสาทส่วนกลาง (Central nervous system toxicity) ได้ภายในระยะเวลาอันสั้น โดยไอปรอทในรูปปรอทธาตุ (Hg^0) จะเข้าสู่ร่างกายผ่านการหายใจและ

สามารถซึมผ่านถุงลมในปอดเข้าสู่กระแสเลือดได้ทันที (Caravati et al., 2008; Lim et al., 1998; Agency for Toxic Substances and Disease Registry, 2024; Cortes et al., 2018) จากนั้นจะถูกส่งผ่านไปยังอวัยวะต่าง ๆ โดยเฉพาะสมอง ตับ และไต เนื่องจากปรอทมีความสามารถในการละลายในไขมันและสามารถผ่าน Blood-Brain Barrier (BBB) ได้โดยง่าย ส่งผลให้เกิดการสะสมในเนื้อเยื่อสมองและส่งผลกระทบต่อการทำงานของเซลล์ประสาท ผู้ที่ได้รับสารปรอทในระดับสูงมักมีอาการทางระบบประสาท เช่น ปวดศีรษะ เวียนศีรษะ มือสั่น กล้ามเนื้อกระตุก ความจำเสื่อม อารมณ์แปรปรวน และการพูดไม่ชัด (Park & Zheng, 2012; Bernhoft, 2011; Aschner & Aschner, 1990) รวมถึงอาการทางระบบทางเดินหายใจ เช่น ไอ หายใจลำบาก และปอดอักเสบ (Lim et al., 1998; Hammerling et al., 2020) นอกจากนี้ยังมีผลต่อระบบอวัยวะอื่น เช่น ตับและไต ซึ่งเป็นอวัยวะหลักในการขับสารพิษ ทำให้เกิดการทำลายเนื้อเยื่อและการทำงานของอวัยวะของระบบกรองของเสียในร่างกาย (Agency for Toxic Substances and Disease Registry, 2024; Bernhoft, 2011; Park & Zheng, 2012; Clarkson & Magos, 2006)

แม้ว่าปัจจุบันการใช้หลอดฟลูออเรสเซนต์จะมีแนวโน้มลดลงอย่างต่อเนื่อง (U.S. Energy Information Administration, 2020; CSIL, 2025; Mordor Intelligence, 2026; IMARC Group, 2025) เนื่องจากการเปลี่ยนผ่านทางเทคโนโลยีอย่างรวดเร็วจากหลอดไส้และหลอดฟลูออเรสเซนต์ไปสู่หลอด LED ซึ่งมีประสิทธิภาพในการใช้พลังงานน้อยกว่าเป็นอย่างมาก และไม่มีการใช้สารปรอทในกระบวนการผลิต อันเป็นผลจากแรงขับเคลื่อนด้านการประหยัดพลังงาน การลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก รวมถึงนโยบายควบคุมการใช้สารอันตรายในผลิตภัณฑ์ไฟฟ้า ทำให้หลายภาคส่วนทั้งภาครัฐและเอกชนมักมองว่า “ปัญหาจากหลอดฟลูออเรสเซนต์” น่าจะลดความสำคัญลงและจะหมดไปในไม่ช้า ส่งผลให้ประเด็นการจัดการของเสียอันตรายชุมชนประเภทนี้ถูกละเลยหรือไม่ได้รับความสนใจเท่าที่ควร โดยเฉพาะอย่างยิ่งในแผนการบริหารจัดการขยะอันตรายระดับท้องถิ่น อย่างไรก็ตาม จากการสำรวจและติดตามสถานการณ์เบื้องต้นในพื้นที่หลายจังหวัดกลับพบว่า ซากหลอดฟลูออเรสเซนต์ยังคงปรากฏอยู่ในปริมาณมากภายในระบบการจัดเก็บขยะขององค์กรปกครองส่วนท้องถิ่น (อปท.) โดยเฉพาะจากแหล่งกำเนิดประเภทอาคารราชการ โรงเรียน โรงพยาบาล ตลาด และสำนักงานเอกชน ที่ยังใช้หลอดชนิดนี้อยู่ในปริมาณมาก เนื่องจากการเปลี่ยนระบบแสงสว่างยังค่อนข้างสูง หรือยังมีหลอดเก่าเหลือใช้สะสมในคลังวัสดุ ปัจจุบันพบว่าเมื่อหลอดฟลูออเรสเซนต์หมดอายุการใช้งานแล้ว ซากหลอดฟลูออเรสเซนต์มักปะปนอยู่กับหลอด LED ในกระบวนการจัดเก็บและขนส่งขยะซากหลอดไฟ เนื่องจากมีลักษณะภายนอกใกล้เคียงกัน การขาดระบบจำแนกประเภทและพื้นที่รองรับเฉพาะสำหรับขยะอันตราย จึงทำให้หลอดฟลูออเรสเซนต์จำนวนมากแตกหักระหว่างการขนส่ง การจัดเก็บ หรือการทิ้งรวมในบ่อฝังกลบ ซึ่งกระบวนการเหล่านี้ก่อให้เกิดการระเหยของไอปรอท (Mercury vapor release) กระจายออกสู่สิ่งแวดล้อมโดยตรง ดังนั้น แม้เทคโนโลยี LED จะเข้ามาแทนที่ในเชิงพาณิชย์ แต่ในเชิงสิ่งแวดล้อมหลอดฟลูออเรสเซนต์ที่หมดอายุแล้ว ยังคงเป็นภาระที่ต้องได้รับการจัดการอย่างถูกต้องและรอบคอบ การวางระบบการเก็บรวบรวม การขนส่ง และการกำจัดซากหลอดอย่างถูกต้องเป็นสิ่งจำเป็นอย่างยิ่ง เพื่อป้องกันการปนเปื้อนของสารปรอทในสิ่งแวดล้อมและลดความเสี่ยงต่อสุขภาพของประชาชนในระยะยาว

ในบริบทของ อปท. การจัดการซากหลอดฟลูออเรสเซนต์มักเผชิญกับข้อจำกัดหลายประการ ทั้งด้านงบประมาณ บุคลากร โครงสร้างพื้นฐาน และองค์ความรู้ทางเทคนิค หลายพื้นที่ยังไม่มีระบบคัดแยก

หลอดไฟตั้งแต่ต้นทางอย่างเป็นระบบ ไม่มีสถานที่จัดเก็บเฉพาะที่ออกแบบตามหลักความปลอดภัย และขาดแนวทางการจัดการที่เหมาะสมในพื้นที่จัดเก็บ ส่งผลให้หลอดไฟมีโอกาสแตกหักระหว่างการรวบรวมและจัดเก็บ และก่อให้เกิดการสะสมของไอปรอทในพื้นที่ปิด ปัญหาดังกล่าวแสดงให้เห็นถึงความเสี่ยงเชิงโครงสร้างในระบบการจัดการของเสียอันตรายในระดับท้องถิ่น ซึ่งมักถูกมองข้ามเมื่อเทียบกับแหล่งกำเนิดมลพิษขนาดใหญ่ในภาคอุตสาหกรรม

แม้ว่าจะมีงานวิจัยจำนวนมากในต่างประเทศที่ศึกษาการปลดปล่อยสารปรอทจากหลอดฟลูออเรสเซนต์ที่แตกในระดับครัวเรือน หรือการสัมผัสของพนักงานในโรงงานรีไซเคิลหลอดไฟ แต่การศึกษาที่มุ่งเน้นการศึกษาสถานการณ์จริงของพื้นที่จัดเก็บซากหลอดไฟในระดับ อปท. ยังมีอยู่อย่างจำกัด โดยเฉพาะในบริบทของประเทศเขตร้อนที่มีอุณหภูมิสูงและมีรูปแบบการระบายอากาศแตกต่างจากประเทศเขตอบอุ่น นอกจากนี้ งานวิจัยส่วนใหญ่ยังให้ความสำคัญกับการประเมินความเสี่ยงต่อสุขภาพเป็นรายกรณี แต่ยังขาดการบูรณาการข้อมูลด้านปริมาณซากหลอดไฟ รูปแบบการจัดเก็บ สภาพการระบายอากาศ และการจำลองการสะสมของสารปรอทในเชิงระบบ ช่องว่างความรู้ดังกล่าวส่งผลให้การกำหนดแนวทางการจัดการซากหลอดฟลูออเรสเซนต์ในระดับท้องถิ่นยังขาดหลักฐานเชิงวิทยาศาสตร์ที่เพียงพอ โดยเฉพาะหลักฐานที่สามารถใช้สนับสนุนการออกแบบพื้นที่จัดเก็บ การกำหนดอัตราการระบายอากาศที่เหมาะสม และการประเมินความเสี่ยงต่อผู้ปฏิบัติงานอย่างเป็นรูปธรรม ในขณะเดียวกัน แนวคิด “การจัดการอย่างยั่งยืน” มักถูกกล่าวถึงในเชิงนโยบาย แต่ยังขาดการแปลงไปสู่ข้อเสนอเชิงปฏิบัติที่ตั้งอยู่บนข้อมูลเชิงประจักษ์ในระดับพื้นที่จริง

งานวิจัยนี้ได้นำแนวคิดการพัฒนาอย่างยั่งยืนมาเป็นเป้าหมาย โดยพิจารณาความยั่งยืนในมิติต่าง ๆ อย่างบูรณาการ ได้แก่ มิติสิ่งแวดล้อม (การลดการปลดปล่อยสารปรอทสู่บรรยากาศ) มิติสุขภาพ (การลดความเสี่ยงของผู้ปฏิบัติงานและชุมชน) และมิติการบริหารจัดการ (ความเหมาะสมและความเป็นไปได้ในการดำเนินงานของ อปท.) การศึกษานี้ไม่ได้มุ่งเน้นเพียงการศึกษาปริมาณสารปรอทที่หลงเหลืออยู่ในซากหลอดฟลูออเรสเซนต์เท่านั้น แต่ยังพยายามเชื่อมโยงผลการตรวจวัดเข้ากับปริมาณซากหลอดไฟที่เกิดขึ้นจริง ศึกษาปริมาณการเกิดสารปรอทในรูปแบบของก๊าซ นอกจากนี้ยังมีการประเมินการแพร่กระจายของสารปรอทในพื้นที่จัดเก็บซากหลอดไฟของหน่วยงาน และวิเคราะห์ผลของการระบายอากาศผ่านการจำลองสมมูลมวล เพื่อให้ได้ข้อเสนอเชิงระบบที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้จริง ผลการศึกษานี้ช่วยเติมเต็มช่องว่างองค์ความรู้ด้านการจัดการของเสียอันตรายจากชุมชน และสนับสนุนการกำหนดนโยบายและมาตรการเชิงปฏิบัติที่สอดคล้องกับเป้าหมายการพัฒนาที่ยั่งยืน ลดความเสี่ยงทางสิ่งแวดล้อมและสุขภาพของประชาชนในพื้นที่ ทั้งในระดับท้องถิ่นและระดับประเทศในระยะยาว ให้เกิดระบบการจัดการขยะที่ปลอดภัย ครอบคลุม และสามารถลดการปนเปื้อนของสารปรอทในสิ่งแวดล้อมได้อย่างมีประสิทธิภาพ

2. วิธีดำเนินการวิจัย

กิจกรรมภายใต้งานวิจัยประกอบด้วย การสำรวจภาคสนาม การเก็บตัวอย่าง การตรวจวัดปริมาณสารปรอท และการวิเคราะห์ข้อมูลเชิงเปรียบเทียบระหว่างพื้นที่ต่าง ๆ ภายใต้กรอบการศึกษานี้ โดยได้มีการดำเนินการสำรวจในพื้นที่ของ อปท. ทั้งนี้มีการแบ่งลักษณะของพื้นที่ศึกษา ตามแนวทางการจัดแบ่ง อปท. ของประเทศไทย ออกเป็น 2 ประเภทหลัก ได้แก่ 1) พื้นที่เขตเมือง (Urban local administrative

organizations) เช่น เทศบาลนคร เทศบาลเมือง และเทศบาลตำบล ซึ่งเป็นพื้นที่ที่มีความหนาแน่นของประชากรสูง (มากกว่า 7,000 คนขึ้นไป) มีความเป็นเมืองและการใช้พลังงานไฟฟ้ามาก มีอัตราการเกิดของเสียจากครัวเรือนและภาคบริการในระดับสูง และ 2) พื้นที่ชนบท (Rural local administrative organizations) เช่น องค์การบริหารส่วนตำบล (อบต.) หรือพื้นที่ชุมชนเกษตรกรรม ที่มีประชากรไม่มาก (น้อยกว่า 7,000 คนขึ้นไป) พื้นที่รอบนอกที่เป็นชนบทหรือตำบลทั่วไปที่ยังไม่เป็นเมือง มีโครงสร้างการจัดการขยะในลักษณะกระจายตัวและมีปริมาณของเสียต่อหน่วยพื้นที่ต่ำกว่า

2.1 การสำรวจปริมาณซากหลอดฟลูออเรสเซนต์

การเก็บข้อมูลภาคสนามในงานวิจัยครั้งนี้ได้ดำเนินการในพื้นที่ของ อบท. ภายในจังหวัดปทุมธานี ซึ่งถูกเลือกให้เป็นพื้นที่การศึกษา เนื่องจากจังหวัดดังกล่าวมีลักษณะพื้นที่ที่ผสมผสานทั้งเขตเมืองและเขตชนบทอยู่ภายในจังหวัดเดียวกัน ทำให้สามารถแสดงถึงความแตกต่างของรูปแบบการใช้หลอดไฟและการจัดการซากหลอดฟลูออเรสเซนต์ในบริบทของพื้นที่เมืองและชนบทได้อย่างชัดเจน โดยมีเป้าหมายเพื่อรวบรวมและประเมินข้อมูลเชิงปริมาณเกี่ยวกับสถานการณ์ของซากหลอดไฟที่หมดอายุการใช้งานภายในรอบปี พ.ศ. 2566 รวมถึงการวิเคราะห์สัดส่วนของปริมาณซากหลอดฟลูออเรสเซนต์เมื่อเทียบกับปริมาณขยะอันตรายทั้งหมดที่เกิดขึ้นในแต่ละท้องถิ่น การดำเนินงานเก็บข้อมูลครอบคลุมพื้นที่ อบท. ทั้งหมด 64 แห่ง ในจังหวัดที่เลือกเป็นกรณีศึกษา โดยแบ่งออกเป็น พื้นที่เขตเมืองจำนวน 29 แห่ง (เช่น เทศบาลนคร เทศบาลเมือง และเทศบาลตำบล) และพื้นที่เขตชนบทจำนวน 35 แห่ง (เช่น องค์การบริหารส่วนตำบลและชุมชนเกษตรกรรม) การเก็บข้อมูลมุ่งเน้นไปที่การรวบรวมข้อมูลปริมาณซากหลอดไฟและขยะอันตรายในชุมชน เพื่อใช้ในการประเมินแนวโน้มการเกิดของเสียอันตรายที่เกี่ยวข้องกับหลอดไฟในพื้นที่แต่ละประเภท

นอกจากนี้ เพื่อประเมินสัดส่วนของปริมาณซากหลอดฟลูออเรสเซนต์ต่อปริมาณหลอดไฟทั้งหมด (รวมถึงหลอด LED) งานวิจัยนี้ได้ดำเนินการสำรวจภาคสนามร่วมกับเจ้าหน้าที่สิ่งแวดล้อมของ อบท. โดยการลงพื้นที่ตรวจสอบจุดจัดเก็บซากหลอดไฟในพื้นที่ตัวอย่างจาก อบท. จำนวน 2 แห่ง ประกอบด้วย พื้นที่เขตเมืองจำนวน 1 แห่ง และพื้นที่เขตชนบทจำนวน 1 แห่ง การคัดเลือกพื้นที่ศึกษาและตัวอย่างในงานวิจัยนี้ดำเนินการอย่างเป็นระบบโดยใช้วิธีการคัดเลือกแบบเจาะจง (Purposive sampling) เพื่อให้ได้ข้อมูลที่สะท้อนสถานการณ์จริงของการจัดการซากหลอดฟลูออเรสเซนต์ในระดับ อบท. พื้นที่ที่เลือกต้องเป็นพื้นที่ที่มีการรวบรวมและจัดเก็บซากหลอดไฟอย่างชัดเจน มีสถานที่จัดเก็บเฉพาะ และมีการแยกซากหลอดฟลูออเรสเซนต์ออกจากของเสียอันตรายประเภทอื่น เพื่อลดปัจจัยรบกวนจากแหล่งกำเนิดสารปรอทอื่น นอกจากนี้พื้นที่จัดเก็บที่ทำการศึกษายังถูกจำแนกตามลักษณะการระบายอากาศ ได้แก่ พื้นที่ปิดที่ไม่มีหรือมีการถ่ายเทอากาศต่ำ และพื้นที่เปิดที่มีการถ่ายเทอากาศตามธรรมชาติ เพื่อให้สามารถวิเคราะห์บทบาทของการระบายอากาศต่อการสะสมของไอปรอทได้อย่างชัดเจน โดยในการศึกษาได้ทำการเก็บข้อมูลภาคสนามประกอบด้วยการตรวจนับจำนวนซากหลอดที่สะสมอยู่จริงในแต่ละพื้นที่ รวมถึงการชั่งน้ำหนักซากหลอดที่เก็บรวบรวมได้ เพื่อคำนวณปริมาณรวมของซากหลอดที่เข้าสู่ระบบจัดเก็บ

การเก็บข้อมูลระบบการจัดการซากหลอดฟลูออเรสเซนต์ของ อบท. ดำเนินการภายใต้แนวทางการประเมินสภาพการดำเนินงานจริง (Actual operational practices) เพื่อให้สะท้อนบริบทการบริหารจัดการในระดับพื้นที่อย่างครบถ้วน ข้อมูลถูกเก็บรวบรวมผ่านการสัมภาษณ์เชิงกึ่งโครงสร้าง (Semi-

structured interview) กับเจ้าหน้าที่ผู้รับผิดชอบด้านสิ่งแวดล้อมหรือการจัดการขยะของ อปท. การสังเกตการณ์ภาคสนามในพื้นที่จัดเก็บซากหลอดไฟ รวมถึงการทบทวนเอกสารที่เกี่ยวข้อง เช่น แผนปฏิบัติการจัดการขยะ รายงานปริมาณขยะอันตราย และบันทึกการส่งกำจัด โดยเนื้อหาการเก็บข้อมูลครอบคลุมขั้นตอนการคัดแยกตั้งแต่ต้นทาง การรวบรวมและจัดเก็บชั่วคราว ลักษณะภาชนะที่ใช้ การป้องกันการแตกหัก การระบายอากาศในพื้นที่จัดเก็บ ความถี่ในการขนส่ง ตลอดจนกระบวนการส่งต่อไปยังผู้รับกำจัดที่ได้รับอนุญาต ข้อมูลเชิงระบบดังกล่าวถูกนำมาวิเคราะห์ร่วมกับผลการตรวจวัดความเข้มข้นของสารปรอทเพื่อประเมินความสอดคล้อง ประสิทธิภาพ และช่องว่างของระบบการจัดการในมิติความยั่งยืน ทั้งด้านสิ่งแวดล้อม สุขภาพ และการบริหารจัดการในระดับท้องถิ่น

นอกจากการเก็บข้อมูลระบบการจัดการซากหลอดฟลูออเรสเซนต์แล้ว การศึกษานี้ยังได้การเก็บข้อมูลจากเจ้าหน้าที่ อปท. ผู้รับผิดชอบงานด้านสิ่งแวดล้อมหรือการจัดการขยะ เพื่อทำความเข้าใจบริบทการจัดการซากหลอดฟลูออเรสเซนต์ในระดับปฏิบัติการจริง โดยใช้วิธีการสัมภาษณ์เชิงกึ่งและการสนทนากลุ่มย่อย (Focus group discussion) ประเด็นคำถามครอบคลุมกระบวนการปฏิบัติงานจริง ปัญหาและอุปสรรคในการคัดแยกและจัดเก็บซากหลอดไฟ ความเข้าใจเกี่ยวกับความเสี่ยงจากสารปรอท ความเพียงพอของอุปกรณ์ป้องกันส่วนบุคคล ระบบการระบายอากาศในพื้นที่จัดเก็บ ตลอดจนข้อเสนอแนะต่อแนวทางการจัดการที่เหมาะสมและยั่งยืน ข้อมูลที่ได้ถูกบันทึก ถอดความ และวิเคราะห์เชิงเนื้อหา (Content analysis) เพื่อจัดหมวดหมู่ประเด็นสำคัญและระบุรูปแบบความคิดหรือปัญหาที่เกิดขึ้น

2.2 การตรวจวัดปริมาณสารปรอทในอากาศในพื้นที่การจัดเก็บซากหลอดไฟ

งานวิจัยนี้ได้จำแนกลักษณะของพื้นที่จัดเก็บหลอดไฟของ อปท. ออกเป็น 2 ประเภทตามสภาพการระบายอากาศ ได้แก่ พื้นที่ปิด (Closed area) ซึ่งเป็นห้องหรืออาคารที่ไม่มีระบบระบายอากาศหรือถ่ายเทอากาศอย่างเพียงพอ ทำให้มีโอกาสสะสมของไอปรอทในระดับสูง และพื้นที่เปิด (Open area) ซึ่งเป็นพื้นที่โรงเก็บของเปิดโล่งที่มีหลังคาคลุม มีการถ่ายเทอากาศตามธรรมชาติได้ดี และดำเนินการตรวจวัดปริมาณสารปรอทในอากาศในพื้นที่การจัดเก็บซากหลอดไฟ ทั้งนี้ การเก็บตัวอย่างสารปรอทในอากาศในพื้นที่จัดเก็บซากหลอดไฟได้ดำเนินการในพื้นที่ที่คัดเลือกเป็นกรณีศึกษาจำนวน 2 แห่ง ซึ่งเป็นพื้นที่ที่มีการจัดเก็บซากหลอดไฟแยกออกจากขยะอันตรายประเภทอื่นอย่างชัดเจน โดยเป็นพื้นที่จัดเก็บเฉพาะที่แยกออกมา เพื่อให้การประเมินความเข้มข้นของสารปรอทสะท้อนผลกระทบจากซากหลอดไฟโดยตรงและลดอิทธิพลจากแหล่งกำเนิดอื่น ทั้งนี้ขนาดของพื้นที่จัดเก็บซากหลอดไฟทั้งสองประเภทมีขนาดใกล้เคียงกัน โดยพื้นที่ปิดมีขนาดประมาณ 8×4 เมตร และมีความสูง 3 เมตร ขณะที่พื้นที่เปิดมีขนาดประมาณ 5×4 เมตร และมีความสูง 3 เมตรเท่ากัน

การเก็บตัวอย่างอากาศเพื่อวิเคราะห์ปริมาณปรอทรวมในอากาศ (Total Gaseous Mercury: TGM) ดำเนินการตามมาตรฐาน U.S. EPA Method IO-5 (U.S. Environmental Protection Agency, 1999) โดยใช้อุปกรณ์หลักประกอบด้วย 1) แผ่นกรองฝุ่นชนิด Cellulose filter สำหรับดักจับฝุ่นละอองก่อนการวิเคราะห์ 2) หลอดเก็บตัวอย่างชนิด Gold amalgam tube ซึ่งมีคุณสมบัติในการดูดซับไอปรอทในอากาศได้อย่างมีประสิทธิภาพ 3) บั๊มดูดอากาศพร้อมเครื่องวัดอัตราการไหล รุ่น NIC PS-4 ซึ่งสามารถ

ควบคุมอัตราการไหลของอากาศให้คงที่ที่ 1 ลิตรต่อนาที และ 4) เครื่องวัดปริมาตรอากาศชนิด Dry gas meter สำหรับตรวจสอบปริมาตรอากาศสะสมตลอดช่วงเวลาการเก็บตัวอย่าง

ในการเก็บตัวอย่าง อากาศจะถูกดูดผ่านปั๊มที่ควบคุมอัตราการไหลคงที่ที่ 1 ลิตรต่อนาที ผ่านตัวกรองฝุ่นละเอียด ก่อนเข้าสู่หลอดเก็บตัวอย่างชนิด Gold amalgam tube การเก็บตัวอย่างดำเนินการครั้งละ 24 ชั่วโมง และทำซ้ำต่อเนื่องเป็นระยะเวลา 4 วัน เพื่อป้องกันการรบกวนจากสภาพอากาศภายนอก โดยเลือกดำเนินการในช่วงฤดูร้อนซึ่งไม่มีฝนตลอดระยะเวลาการเก็บตัวอย่าง เพื่อลดการรบกวนจากปัจจัยด้านสภาพอากาศภายนอก และได้ข้อมูลที่ครอบคลุมความแปรผันของความเข้มข้นปรอทภายใต้สภาวะอากาศและการใช้งานพื้นที่ที่แตกต่างกัน สำหรับการเก็บตัวอย่างในสถานที่จัดเก็บซากหลอดฟลูออเรสเซนต์ ตำแหน่งของจุดเก็บตัวอย่างอากาศถูกกำหนดให้อยู่ในบริเวณกลางห้อง และเป็นตัวแทนของพื้นที่ทำงานของผู้ปฏิบัติงาน โดยติดตั้งหัวดูดตัวอย่างที่ระดับความสูงประมาณ 1.2–1.5 เมตรจากพื้น ซึ่งสอดคล้องกับระดับการหายใจของมนุษย์

หลังสิ้นสุดการเก็บตัวอย่าง หลอดเก็บตัวอย่างทั้งหมดจะถูกปิดผนึกอย่างมิดชิดเพื่อป้องกันการสูญเสียของสารปรอท และนำส่งห้องปฏิบัติการกลางเพื่อทำการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Mercury Analyzer ที่ทำงานตามหลักการ Cold Vapor Atomic Fluorescence Spectrometry (CVAFS) ตามมาตรฐาน U.S. EPA Method 1631 (U.S. Environmental Protection Agency, 2002) ซึ่งเป็นเทคนิคที่มีความไวสูง สามารถตรวจวัดความเข้มข้นของไอปรอทในอากาศได้ในระดับนาโนกรัมต่อลูกบาศก์เมตร (ng/m^3) ด้วยความแม่นยำและความน่าเชื่อถือสูง

2.3 การประเมินปริมาณสารปรอทที่ระเหยจากซากหลอดฟลูออเรสเซนต์

นอกจากการเก็บตัวอย่างอากาศในพื้นที่จริงแล้ว ทีมวิจัยยังได้ดำเนินการทดลองในสภาวะควบคุม (Controlled chamber experiment) เพื่อศึกษาพฤติกรรมการระเหยของสารปรอทจากหลอดฟลูออเรสเซนต์เมื่อเกิดการแตกหัก ซึ่งเป็นสถานการณ์ที่สามารถเกิดขึ้นได้จริงระหว่างการเก็บรวบรวมหรือขนส่งซากหลอดไฟ ในการทดสอบ ทีมวิจัยได้ออกแบบและสร้างกล่องทดสอบแบบปิด (Closed test chamber) ทำจากเหล็กขนาดปริมาตร 216 ลิตร ($0.60 \times 0.60 \times 0.60$ ลูกบาศก์เมตร) โดยเคลือบพื้นผิวภายในด้วยสาร Teflon เพื่อป้องกันการดูดซับหรือการเกาะติดของสารปรอทบนผนังกล่อง การทดลองดำเนินการภายในห้องปฏิบัติการภายใต้สภาวะอุณหภูมิใกล้เคียงกับบรรยากาศทั่วไป (ประมาณ $30 \pm 2^\circ\text{C}$) โดยไม่มีการปรับอากาศหรือระบบระบายอากาศ ภายในกล่องทดสอบได้ติดตั้งพัดลมหมุนเวียนอากาศขนาดเล็กเพื่อช่วยให้ไอปรอทที่ปลดปล่อยออกมากระจายตัวอย่างสม่ำเสมอทั่วทั้งปริมาตรกล่อง

กล่องทดสอบถูกติดตั้งสำหรับดูดตัวอย่างอากาศซึ่งเชื่อมต่อกับระบบตรวจวัดไอปรอท โดยทำการตรวจวัดความเข้มข้นของไอปรอทในกล่องทดสอบด้วยเครื่อง EMP-3 Mercury Analyzer ซึ่งเป็นเครื่องตรวจวัดไอปรอทแบบต่อเนื่อง และทำงานตามหลักการ Cold Vapor Atomic Absorption Spectrometry (CVAAS) ที่ความยาวคลื่น 253.7 นาโนเมตร ตามแนวทางของมาตรฐานของ U.S. EPA Method 1631 (U.S. Environmental Protection Agency, 2002)

ในการทดลอง ได้คัดเลือกหลอดฟลูออเรสเซนต์ที่ผ่านการใช้งานแล้วและรวบรวมจากพื้นที่จริง เพื่อให้สะท้อนสภาพหลอดที่พบในระบบจัดเก็บจริงมากที่สุด หลอดฟลูออเรสเซนต์ขนาด 18W (T5) ถูกทำ

ให้แตกภายในกล่องทดสอบโดยใช้วิธีดึงเชือกที่ผูกติดกับหลอดให้กระแทกกับผนังกล่อง บริเวณกลางกล่อง เพื่อให้สารปรอทที่บรรจุอยู่ในหลอดระเหยออกมาในสถานะที่มีปริมาตรจำกัด หลังจากหลอดแตก เครื่อง EMP-3 Mercury Analyzer จะทำการดูดตัวอย่างอากาศผ่านหัวตรวจวัด (Probe) เข้าสู่ส่วนวิเคราะห์อย่างต่อเนื่อง และบันทึกค่าความเข้มข้นของไอปรอททุก ๆ 1 นาที เพื่อให้ได้ข้อมูลเชิงเวลาเกี่ยวกับพฤติกรรมเปลี่ยนแปลงและอัตราการระเหยของสารปรอทภายใต้สภาวะควบคุมดังกล่าว ไอระเหยที่ผ่านการตรวจวัดด้วยเครื่อง EMP-3 Mercury Analyzer จะถูกส่งกลับเข้าสู่กล่องทดสอบอีกครั้ง เพื่อรักษาปริมาณไอปรอทภายในระบบไม่ให้สูญเสียไปจากกระบวนการตรวจวัด

ข้อมูลที่ได้จากการทดลองนี้ช่วยให้สามารถประเมินรูปแบบการระเหย (Evaporation profile) และความเข้มข้นสูงสุดของไอปรอท (Peak concentration) ภายในช่วงเวลาต่าง ๆ หลังการแตกของหลอด รวมทั้งสามารถนำไปใช้ประกอบกับการประเมินเชิงมวลสมดุล (Mass balance) และการจำลองการแพร่กระจายของไอปรอทในพื้นที่จัดเก็บจริง เพื่อพัฒนาแนวทางการระบายอากาศและมาตรการป้องกัน การสัมผัสสารปรอทในระดับปฏิบัติการได้อย่างเหมาะสม

2.4 การควบคุมคุณภาพข้อมูล (Quality Assurance / Quality Control: QA/QC) ของการตรวจวัด

เพื่อให้ผลการวัดและการวิเคราะห์มีความถูกต้อง เชื่อถือได้ งานวิจัยนี้ได้ดำเนินการตามมาตรการด้าน QA/QC โดยก่อนเริ่มการเก็บตัวอย่างได้มีการสอบเทียบเครื่องมือวัดทุกชนิด (Calibration) ทั้งเครื่องตรวจวัดไอปรอท เครื่องวัดอัตราการไหลของอากาศ และเครื่องวิเคราะห์ในห้องปฏิบัติการ โดยใช้สารมาตรฐานปรอทที่ทราบค่าแน่นอน (Certified mercury standard) เพื่อยืนยันความแม่นยำและความเสถียรของเครื่องมือ ทั้งนี้การสอบเทียบจะดำเนินการทั้งก่อนและหลังการเก็บตัวอย่าง เพื่อประเมินความคงที่ของระบบวัดในแต่ละรอบการทดลอง ในระหว่างการเก็บตัวอย่างมีการจัดทำตัวอย่างเปล่า (Field blanks) ในแต่ละพื้นที่ เพื่อใช้ตรวจสอบการปนเปื้อนที่อาจเกิดขึ้นจากอุปกรณ์หรือขั้นตอนการเก็บตัวอย่าง นอกจากนี้ยังได้ตรวจสอบและบันทึกอัตราการไหลของอากาศ (Flow rate verification) ก่อนและหลังการเก็บในแต่ละครั้ง เพื่อให้มั่นใจว่าปริมาตรอากาศที่ผ่านเข้าสู่ระบบเก็บตัวอย่างมีค่าตรงตามที่กำหนดในมาตรฐานของ U.S. EPA นอกจากนี้การศึกษานี้ยังได้ดำเนินการตรวจวัดความเข้มข้นของสารปรอทในอากาศบริเวณภายนอกพื้นที่จัดเก็บซากหลอดไฟ (Background concentration) ของทั้งสองพื้นที่ศึกษา เพื่อใช้เป็นค่าพื้นฐานสำหรับการเปรียบเทียบและประเมินอิทธิพลของแหล่งกำเนิดสารปรอทจากพื้นที่จัดเก็บโดยตรง จุดเก็บตัวอย่างพื้นฐานถูกกำหนดให้อยู่ห่างจากพื้นที่จัดเก็บซากหลอดไฟประมาณ 50 เมตร ในทิศทางเหนือลม (Upwind direction) เพื่อหลีกเลี่ยงผลกระทบจากการแพร่กระจายของไอปรอทจากแหล่งศึกษา

2.5 การประเมินปริมาณสารปรอทในห้องจัดเก็บซากหลอดฟลูออเรสเซนต์

เพื่อประเมินความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพของการระบายอากาศกับปริมาณการสะสมของสารปรอทในห้องจัดเก็บซากหลอดฟลูออเรสเซนต์ งานวิจัยนี้ได้ดำเนินการวิเคราะห์เชิงปริมาณโดยอาศัยข้อมูลจากการสำรวจภาคสนามจริงและการทดลองภายใต้สภาวะควบคุมในห้องปฏิบัติการ เพื่อให้ได้ค่าประมาณที่แสดงถึงสถานะการปนเปื้อนของสารปรอทในพื้นที่จัดเก็บจริงอย่างใกล้เคียงที่สุด การประเมิน

นี้พิจารณาจากจำนวนซากหอดฟลูออเรสเซนต์ที่รวบรวมได้ในแต่ละพื้นที่ ร่วมกับอัตราการระเหยของสารปรอทจากหอดฟลูออเรสเซนต์ที่แตกหัก ซึ่งได้จากการทดลองในสภาวะจำลอง ข้อมูลทั้งสองส่วนถูกนำมาวิเคราะห์และประมวลผลโดยใช้หลักการของสมการสมดุลมวล (Mass balance equation) ในสมการที่ (1) เพื่อคำนวณปริมาณสารปรอทที่คาดว่าจะสะสมอยู่ในอากาศภายในห้องจัดเก็บ ภายใต้สมมติฐานของอัตราการระบายอากาศ (Air exchange rate) ที่แตกต่างกัน ผลจากการคำนวณดังกล่าวจะนำไปสู่การกำหนดแนวทางการออกแบบระบบระบายอากาศที่เหมาะสมสำหรับสถานที่จัดเก็บซากหอดฟลูออเรสเซนต์ เพื่อควบคุมการปนเปื้อนและลดความเสี่ยงต่อสุขภาพของผู้ปฏิบัติงานและสิ่งแวดล้อมโดยรอบ

$$V \frac{dC}{dt} = (QC_{out} + G) - (Q + kV)C \quad (1)$$

โดยที่ V คือ ปริมาตรของพื้นที่หรือห้องที่ใช้เป็นขอบเขตการประเมิน (Boundary volume) หน่วยลูกบาศก์เมตร

C_{out} คือ ความเข้มข้นของสารมลพิษในอากาศภายนอกที่สามารถเข้าสู่ห้องได้ผ่านกระบวนการแลกเปลี่ยนอากาศ หน่วยมิลลิกรัมต่อลูกบาศก์เมตร

Q คือ อัตราการแลกเปลี่ยนอากาศหรือปริมาณอากาศที่เข้า-ออกจากห้องต่อหน่วยเวลา หน่วย ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง

k คือ ค่าคงที่อัตราการเปลี่ยนแปลงสุทธิ (Net rate of change) โดยไม่รวมผลของการแลกเปลี่ยนอากาศ (ไม่มีหน่วย)

C คือ ค่าความเข้มข้นเฉลี่ยของสารมลพิษภายในห้อง (Average concentration) หน่วย ppm

G คือ อัตราการปลดปล่อยหรือการเกิดของสารมลพิษ (Emission rate หรือ Generation rate of pollutant) หน่วยมิลลิกรัมต่อชั่วโมง

การศึกษาพฤติกรรมของการปลดปล่อยสารปรอทจากหอดฟลูออเรสเซนต์ที่แตกภายใต้สภาวะควบคุมมีส่วนสำคัญในการสร้างฐานข้อมูลเชิงวิทยาศาสตร์ที่สามารถนำไปแปลงเป็นมาตรการปฏิบัติในพื้นที่จริงได้อย่างเป็นรูปธรรม โดยสามารถประเมินผลของอัตราการระบายอากาศ ขนาดพื้นที่ และปริมาณหอดที่แตกต่อระดับความเข้มข้นของไอปรอทในอากาศได้อย่างเป็นระบบ ซึ่งเป็นข้อมูลสำคัญในการกำหนดค่าการระบายอากาศที่เหมาะสม (เช่น อัตราการแลกเปลี่ยนอากาศต่อชั่วโมง) การออกแบบตำแหน่งช่องเปิด หรือการติดตั้งระบบระบายอากาศเชิงกลในพื้นที่จัดเก็บ นอกจากนี้ ผลการทดลองยังสนับสนุนการกำหนดมาตรการเชิงปฏิบัติ เช่น การลดระยะเวลาการจัดเก็บซากหอดในพื้นที่ปิด การใช้ภาชนะที่ป้องกันการแตกหัก การจัดเตรียมอุปกรณ์ป้องกันส่วนบุคคลสำหรับเจ้าหน้าที่ และการกำหนดแนวทางปฏิบัติกรณีหอดแตก (Spill response protocol) โดยอาศัยหลักฐานเชิงประจักษ์จากการทดลองเป็นข้อมูลรองรับ

2.6 มิติด้านความยั่งยืน

นอกจากการประเมินด้านปริมาณของสารปรอทและศึกษาแนวทางการแก้ปัญหาที่เฉพาะเจาะจงไปยังแหล่งกำเนิดโดยตรงแล้ว การวิจัยนี้ได้ออกแบบภายใต้กรอบแนวคิดการจัดการของเสียอันตรายอย่างยั่งยืน โดยบูรณาการมิติด้านสิ่งแวดล้อม สุขภาพ เศรษฐศาสตร์ และการบริหารจัดการในระดับ อปท. เข้าด้วยกันอย่างเป็นระบบ พร้อมเชื่อมโยงผลการวิเคราะห์กับเป้าหมายการพัฒนาที่ยั่งยืนของสหประชาชาติ (Sustainable Development Goals: SDGs) เพื่อให้ผลการศึกษานี้สามารถสะท้อนคุณค่าเชิงนโยบายในระดับสากลได้อย่างชัดเจน

ในมิติด้านสิ่งแวดล้อม การสำรวจปริมาณและสัดส่วนซากหลอตฟลูออเรสเซนต์ในพื้นที่เมืองและชนบท รวมถึงการตรวจวัดความเข้มข้นของไอปรอทในพื้นที่จัดเก็บ ถูกใช้เพื่อประเมินศักยภาพการลดการปลดปล่อยสารปรอทสู่บรรยากาศ ข้อมูลดังกล่าวสนับสนุน SDG 12 (Responsible Consumption and Production) โดยเฉพาะเป้าหมายย่อยด้านการจัดการของเสียอันตรายอย่างถูกต้องตามหลักสิ่งแวดล้อม และ SDG 11 (Sustainable Cities and Communities) ในด้านการลดผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อมในระดับชุมชน

ในมิติด้านสุขภาพและความปลอดภัย การเปรียบเทียบค่าความเข้มข้นของไอปรอทกับเกณฑ์มาตรฐานการสัมผัสสารในระดับสากล ช่วยประเมินความเสี่ยงต่อผู้ปฏิบัติงานและประชาชนโดยรอบ ซึ่งสอดคล้องกับ SDG 3 (Good Health and Well-being) โดยเฉพาะการลดการเจ็บป่วยจากสารเคมีอันตรายและมลพิษทางอากาศ การทดลองอัตราการปลดปล่อยสารปรอทจากหลอดที่แตกภายใต้สภาวะควบคุม รวมถึงการจำลองสมมูลมวลเพื่อประเมินผลของอัตราการระบายอากาศต่อการสะสมของไอปรอท ยังสะท้อนแนวทางเชิงป้องกัน (Preventive approach) ที่สนับสนุนสุขภาพในระยะยาว

ในมิติด้านเศรษฐศาสตร์และการบริหารจัดการ การวิเคราะห์ความเป็นไปได้ของแนวทางที่เสนอภายใต้ข้อจำกัดของ อปท. ช่วยประเมินความสามารถในการดำเนินการจริง (Practical feasibility) และศักยภาพในการขยายผล (Scalability) ซึ่งเกี่ยวข้องกับ SDG 16 (Peace, Justice and Strong Institutions) ในด้านการเสริมสร้างระบบบริหารจัดการที่มีประสิทธิภาพ

การวิจัยนี้มุ่งสร้างองค์ความรู้ที่เชื่อมโยงข้อมูลเชิงเทคนิคกับบริบทการบริหารจัดการในระดับท้องถิ่น เพื่อพัฒนาแนวทางการจัดการซากหลอตฟลูออเรสเซนต์ที่ลดการปลดปล่อยสารปรอท เพิ่มความปลอดภัยของผู้ปฏิบัติงาน และสนับสนุนการพัฒนาระบบจัดการของเสียที่สอดคล้องกับหลักการพัฒนาที่ยั่งยืนอย่างเป็นรูปธรรมในระยะยาว

3. ผลการวิจัยและอภิปรายผล

3.1 ปริมาณซากหลอตฟลูออเรสเซนต์

จากการรวบรวมและวิเคราะห์ข้อมูลปริมาณซากหลอตไฟที่สะสมอยู่ในพื้นที่ของ อปท. พบว่าสัดส่วนของซากหลอตไฟเมื่อเทียบกับปริมาณขยะอันตรายทั้งหมดมีความแตกต่างกันอย่างชัดเจนในแต่ละพื้นที่ โดยลักษณะของการจัดการและการเก็บรวบรวมขยะอันตรายขึ้นอยู่กับศักยภาพของแต่ละท้องถิ่น บางพื้นที่พบว่า ไม่มีการจัดเก็บขยะอันตรายเลย ในขณะที่บางพื้นที่พบว่า ขยะอันตรายส่วนใหญ่เกือบทั้งหมดเป็นซากหลอตไฟเพียงอย่างเดียว ทั้งที่โดยทั่วไปขยะอันตรายในชุมชนมักพบ ประกอบด้วย หลอดไฟ

ถ่านไฟฉาย กระป๋องสเปรย์ ภาชนะบรรจุสารเคมี และขยะอิเล็กทรอนิกส์ ทั้งนี้แสดงถึงความแตกต่างด้านระบบการจัดการ การมีส่วนร่วมของชุมชน และความพร้อมของโครงสร้างพื้นฐานด้านสิ่งแวดล้อมในแต่ละเขตพื้นที่ที่แตกต่างกัน

อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาภาพรวมของข้อมูลที่รวบรวมจากเทศบาลและ อบต. ทั้งหมด พบว่า ในพื้นที่เขตเมือง (จำนวน 29 แห่ง) ชากหลอดไฟมีสัดส่วนเฉลี่ยคิดเป็น 52.2% ของขยะอันตรายชุมชนทั้งหมด โดยมีปริมาณชากหลอดไฟรวม 2,044 กิโลกรัม จากขยะอันตรายทั้งหมด 3,919 กิโลกรัม ในขณะที่ในพื้นที่เขตชนบท (จำนวน 35 แห่ง) พบว่า สัดส่วนของชากหลอดไฟสูงกว่า โดยคิดเป็น 66.4% ของขยะอันตรายชุมชนทั้งหมด หรือเท่ากับ 631 กิโลกรัม ของชากหลอดไฟจากขยะอันตรายรวม 950 กิโลกรัม ดังแสดงในตารางที่ 1 ผลการเปรียบเทียบดังกล่าวแสดงให้เห็นว่า แม้พื้นที่เขตเมืองจะมีปริมาณขยะอันตรายโดยรวมสูงกว่า แต่พื้นที่ชนบทกลับมีสัดส่วนของชากหลอดไฟในขยะอันตรายมากกว่า ซึ่งอาจแสดงถึงการขาดขาดระบบการรวบรวมขยะอันตรายที่เหมาะสมและหลากหลาย และขาดความเข้าใจในการจัดการขยะอันตรายชนิดอื่น ทำให้ชากหลอดไฟกลายเป็นของเสียอันตรายหลักในระบบจัดการของเสียอันตรายชุมชนของพื้นที่ชนบท

ตารางที่ 1. ข้อมูลปริมาณชากหลอดไฟรวม เมื่อเทียบกับขยะอันตรายทั้งหมดในพื้นที่ศึกษา ปี พ.ศ. 2566

ปริมาณขยะอันตราย	พื้นที่เขตเมือง (จำนวน 29 แห่ง) (กก./ปี)	พื้นที่ชนบท (จำนวน 35 แห่ง) (กก./ปี)
ชากหลอดไฟรวม	2,044.5	630.7
ปริมาณขยะอันตรายรวม	3,918.8	950.4
สัดส่วนชากหลอดไฟ/ขยะอันตรายรวม	52.2%	66.4%

นอกจากนี้จากการสำรวจภาคสนามในพื้นที่ตัวอย่างของ อบต. ที่มีขนาดประชากรใกล้เคียงกันพบว่า เมื่อพิจารณาทั้งในเชิงจำนวนและเชิงน้ำหนัก พบว่า พื้นที่ชนบทมีสัดส่วนของชากหลอดฟลูออเรสเซนต์สูงกว่าพื้นที่เขตเมืองอย่างชัดเจน ดังแสดงไว้ในตารางที่ 2 ทั้งนี้สาเหตุสำคัญมาจากการเปลี่ยนผ่านเทคโนโลยีระบบแสงสว่างในเขตเมืองที่เกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว หน่วยงานภาครัฐ ภาคเอกชน และสถานประกอบการในเขตเมืองจำนวนมากได้หันมาใช้ หลอด LED ซึ่งมีอายุการใช้งานยาวนานกว่า ประหยัดพลังงานมากกว่า และที่สำคัญคือ ไม่มีสารปรอทเป็นส่วนประกอบ ส่งผลให้ปริมาณชากหลอดฟลูออเรสเซนต์ในระบบเริ่มลดลงอย่างต่อเนื่อง แม้จะยังคงมีการสะสมของหลอดเก่าที่ทยอยปลดระวางออกจากระบบอยู่บ้าง แม้ว่าข้อมูลเชิงปริมาณเกี่ยวกับสัดส่วนชากหลอดไฟในระบบจัดการของเสียจะยังมีอยู่อย่างจำกัด แต่แนวโน้มที่พบจากการศึกษานี้สอดคล้องกับทิศทางการเปลี่ยนแปลงของตลาดและรูปแบบการใช้หลอดไฟในหลายประเทศ โดยเฉพาะประเทศที่มีความเป็นเมืองสูง ตัวอย่างเช่น ในครัวเรือนของสหรัฐอเมริกา มีรายงานว่าการใช้หลอด LED เป็นแหล่งให้แสงสว่างหลักภายในบ้านทั้งหมดหรือเกือบทั้งหมดเพิ่มขึ้นจากเพียงร้อยละ 4 ในปี ค.ศ. 2015 เป็นร้อยละ 47 ในปี ค.ศ. 2020 ในขณะที่สัดส่วนการใช้หลอดฟลูออเรสเซนต์ลดลงอย่างต่อเนื่องจากร้อยละ 32 ในปี ค.ศ. 2015 เหลือเพียงร้อยละ 12 ในปี ค.ศ.

2020 (U.S. Energy Information Administration, 2020) ในทวีปยุโรป เทคโนโลยีหลอด LED ได้ครองส่วนแบ่งมูลค่าตลาดเกือบร้อยละ 90 ซึ่งเป็นผลโดยตรงจากนโยบายของสหภาพยุโรปในการประกาศยกเลิกการใช้หลอดฟลูออเรสเซนต์และหลอดฮาโลเจนเกือบทั้งหมด (CSIL, 2025) ขณะที่ในภูมิภาคเอเชีย-แปซิฟิก ตลาดหลอด LED มีส่วนแบ่งตลาดร้อยละ 46.55 ในปี ค.ศ. 2025 (Mordor Intelligence, 2026) ที่แสดงถึงการเติบโตอย่างรวดเร็วของเทคโนโลยีดังกล่าว สำหรับประเทศไทย ตลาดหลอดไฟ LED ในปี ค.ศ. 2025 มีอัตราการเติบโตเฉลี่ยต่อปีสูงถึงร้อยละ 19.31 (IMARC Group, 2025) แนวโน้มเหล่านี้ชี้ให้เห็นว่าการเปลี่ยนผ่านจากหลอดฟลูออเรสเซนต์ไปสู่หลอด LED กำลังเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องในระดับโลก โดยเฉพาะในพื้นที่เมืองและประเทศที่มีนโยบายด้านพลังงานและสิ่งแวดล้อมที่เข้มแข็ง

ตารางที่ 2. ข้อมูลการสำรวจปริมาณซากหลอดไฟฟลูออเรสเซนต์ จากการสุ่มเก็บตัวอย่างในพื้นที่ศึกษา เมื่อเทียบกับปริมาณหลอดไฟทั้งหมดในขยะอันตรายชุมชนของ อปท. ที่เป็นตัวแทนพื้นที่เขตเมืองและเขตชนบท

ปริมาณขยะอันตราย	พื้นที่เขตเมืองจำนวน 1 แห่ง		พื้นที่ชนบทจำนวน 1 แห่ง	
	จำนวนหลอด (หลอด)	น้ำหนัก (กก.)	จำนวนหลอด (หลอด)	น้ำหนัก (กก.)
ซากหลอดไฟฟลูออเรสเซนต์	481	72	830	123.6
ซากหลอดไฟ LED	662	121.9	360	48.8
สัดส่วนซากหลอดไฟฟลูออเรสเซนต์ / ซากหลอดไฟทั้งหมด	42.1%	37.1%	69.7%	71.7%

อย่างไรก็ตาม พื้นที่ชนบทส่วนใหญ่ยังคงมีการใช้หลอดฟลูออเรสเซนต์ในระดับสูง จากข้อมูลสัดส่วนของซากหลอดฟลูออเรสเซนต์ที่พบในพื้นที่ ซึ่งมีค่ามากกว่าร้อยละ 50 ปัจจัยสำคัญประการหนึ่งอาจเกี่ยวข้องกับการเข้าถึงมาตรการสนับสนุนจากภาครัฐ โดยเฉพาะโครงการส่งเสริมการเปลี่ยนมาใช้หลอด LED ซึ่งอาจยังครอบคลุมไม่ทั่วถึงในบางหน่วยงานหรือชุมชนชนบท นอกจากนี้ ต้นทุนเริ่มต้นของหลอด LED ยังคงเป็นอุปสรรคสำคัญ แม้ว่าในระยะยาวจะมีความคุ้มค่าทั้งด้านการประหยัดพลังงานและอายุการใช้งานที่ยาวนานกว่า แต่สำหรับครัวเรือนที่มีรายได้เฉลี่ยต่ำ การตัดสินใจเลือกซื้ออุปกรณ์มักพิจารณาจากราคาซื้อเริ่มต้นมากกว่าต้นทุนตลอดอายุการใช้งาน (Life-cycle cost) ทำให้หลอดฟลูออเรสเซนต์หรือหลอดราคาถูกยังคงเป็นทางเลือกหลัก นอกจากนี้ อีกประเด็นสำคัญหนึ่ง คือข้อจำกัดด้านการกระจายสินค้าและโครงสร้างตลาดในพื้นที่ชนบท การเข้าถึงร้านจำหน่ายอุปกรณ์ไฟฟ้าขนาดใหญ่มีน้อยเมื่อเทียบกับเขตเมือง ขณะที่ร้านค้าปลีกในชุมชนหรือร้านขายของชำซึ่งเป็นแหล่งซื้อหลักของประชาชน มักมีตัวเลือกหลอด LED จำกัด หรือมีราคาสูงกว่าพื้นที่เมืองเนื่องจากต้นทุนการขนส่งและปริมาณการสั่งซื้อที่น้อยกว่า นอกจากนี้ การประชาสัมพันธ์เกี่ยวกับข้อดีด้านประสิทธิภาพพลังงาน ความปลอดภัย และผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมของหลอด LED อาจยังไม่ทั่วถึง ส่งผลให้ประชาชนบางส่วนยังขาดข้อมูลในการตัดสินใจเปลี่ยนเทคโนโลยี

แม้ข้อมูลดังกล่าวชี้ให้เห็นถึงแนวโน้มการลดลงของแหล่งกำเนิดสารปรอทในเขตเมือง แต่ความจำเป็นในการจัดการของเสียตกค้างที่ยังคงอยู่ในระบบอย่างมีประสิทธิภาพและปลอดภัยยังคงมีความสำคัญ โดยเฉพาะในพื้นที่ชนบท ซึ่งส่วนใหญ่ยังคงพึ่งพาหลอดฟลูออเรสเซนต์ในระดับสูง

จากการเก็บข้อมูลระบบการจัดการซากหลอดฟลูออเรสเซนต์ของ อปท. ที่คัดเลือกเป็นพื้นที่ศึกษาพบว่า อปท. มีการจัดระบบรวบรวมขยะอันตรายในชุมชนอย่างเป็นรูปธรรม ทั้ง อปท. ที่มีลักษณะเป็นเมืองและพื้นที่ชนบท โดยเฉพาะการจัดเก็บซากหลอดไฟผ่านตู้รวบรวมขยะอันตรายประจำชุมชน ซึ่งมีการแบ่งประเภทของขยะอันตรายอย่างชัดเจนและออกแบบให้มีระบบป้องกันความเสียหาย โดยเฉพาะการป้องกันการแตกหักของหลอดไฟ ลักษณะการจัดเก็บซากหลอดไฟเป็นรูปแบบกล่องเฉพาะ เพื่อให้ประชาชนนำหลอดไฟที่หมดอายุการใช้งานมาทิ้งอย่างเหมาะสม โดยไม่ได้มีการแยกระหว่างหลอดฟลูออเรสเซนต์และหลอด LED ทั้งนี้รูปแบบของตู้รวบรวมเป็นไปตามแนวทางที่กรมควบคุมมลพิษแนะนำ อย่างไรก็ตาม พบว่าปริมาณตู้รวบรวมขยะอันตรายประจำชุมชนภายในพื้นที่ อปท. ในพื้นที่ชนบท อาจมีจำนวนน้อยกว่า และอยู่กระจัดกระจายมากกว่าของ อปท. เขตเมือง ในเชิงปฏิบัติ อปท. มีการจัดเก็บขยะอันตรายจากชุมชนเป็นระยะ ไม่ได้มีรอบอย่างชัดเจน เนื่องจากปริมาณขยะอันตรายมีความแปรผันอย่างมากในแต่ละช่วงเวลา ขยะอันตรายจะถูกนำไปจัดเก็บยังสถานที่รวบรวมกลางที่จัดเตรียมไว้ โดยมีการบันทึกข้อมูลปริมาณและประเภทของขยะอันตรายอย่างต่อเนื่อง อย่างไรก็ตาม กระบวนการกำจัดขยะอันตรายรวมถึงซากหลอดฟลูออเรสเซนต์ มักดำเนินการในลักษณะการรวบรวมเพื่อส่งกำจัดเป็นรอบรายปี โดยองค์การบริหารส่วนจังหวัดมีบทบาทในการประสานงานกับผู้รับกำจัดที่ได้รับอนุญาต และรวบรวมขยะอันตรายจากท้องถิ่นทั้งหมดภายในจังหวัดเพื่อส่งกำจัดในคราวเดียว ส่งผลให้ อปท. ต้องรอรอบการดำเนินการของระดับจังหวัดก่อนจึงจะสามารถส่งซากหลอดไฟไปกำจัดได้ ซึ่งโครงสร้างการบริหารจัดการในลักษณะนี้มีผลต่อระยะเวลาการจัดเก็บและความเสี่ยงต่อการสะสมของซากหลอดไฟในพื้นที่จัดเก็บชั่วคราว

จากการเก็บข้อมูลผ่านการสัมภาษณ์เจ้าหน้าที่ อปท. ผู้รับผิดชอบด้านสิ่งแวดล้อม พบว่า ปัญหาหลักของการจัดการซากหลอดฟลูออเรสเซนต์อยู่ที่ความยากลำบากในการประเมินปริมาณซากหลอดที่เกิดขึ้นในแต่ละพื้นที่ เนื่องจากปริมาณมีความแปรผันสูง ส่งผลให้การรวบรวมยังไม่ได้เป็นรอบที่ชัดเจน นอกจากนี้ยังไม่สามารถจำแนกประเภทของหลอดไฟได้อย่างชัดเจน เนื่องจากขาดการคัดแยกตั้งแต่ต้นทาง ส่งผลให้ซากหลอดฟลูออเรสเซนต์และหลอด LED ถูกจัดเก็บปะปนกัน ในด้านองค์ความรู้พบว่า เจ้าหน้าที่ในระดับปฏิบัติบางส่วนยังมีความเข้าใจเกี่ยวกับการจัดการสารปรอทและความเสี่ยงต่อสุขภาพในระดับจำกัด โดยเฉพาะประเด็นการสะสมของไอปรอทในพื้นที่ปิด รวมถึงมาตรการควบคุมความเสี่ยงที่เหมาะสม พื้นที่จัดเก็บบางแห่งยังขาดอุปกรณ์ป้องกันส่วนบุคคล (Personal Protective Equipment: PPE) ที่เพียงพอ และไม่มีอุปกรณ์เฉพาะสำหรับป้องกันหรือจัดการกรณีหลอดแตกและการปนเปื้อนของสารปรอท อุปกรณ์สำคัญอีกประการหนึ่งคือโครงสร้างการบริหารจัดการที่ต้องรอรอบการรวบรวมและส่งกำจัดของระดับจังหวัด ทำให้บางช่วงเวลาต้องจัดเก็บซากหลอดไฟในปริมาณมากเป็นระยะเวลานาน ส่งผลต่อความเสี่ยงในการแตกหักและการสะสมของสารปรอทในพื้นที่จัดเก็บชั่วคราว

3.2 ปริมาณสารปรอทในอากาศภายในพื้นที่การจัดเก็บซากหลอดไฟ

ผลการตรวจวัดปริมาณสารปรอทในอากาศจากพื้นที่รวบรวมซากหลอดฟลูออเรสเซนต์ที่มีลักษณะและขนาดใกล้เคียงกัน รวมถึงมีปริมาณหลอดไฟที่เก็บรวบรวมได้ในระดับใกล้เคียงกัน พบว่า ความเข้มข้นของสารปรอทในอากาศแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญตามลักษณะของสภาพแวดล้อมและระบบการระบายอากาศของพื้นที่จัดเก็บ ผลการตรวจวัดได้ดังแสดงในตารางที่ 3 โดยพบว่า พื้นที่ปิดซึ่งไม่มีระบบถ่ายเท

อากาศที่เหมาะสม มีความเข้มข้นเฉลี่ยของสารปรอทในอากาศสูงที่สุดที่ $520.9 \pm 160.3 \text{ ng/m}^3$ แสดงถึงการสะสมของไอปรอทที่เกิดจากหลอดฟลูออเรสเซนต์ที่แตกหรือเสื่อมสภาพภายในพื้นที่ที่อากาศไม่สามารถหมุนเวียนได้ดี ในขณะที่ พื้นที่เปิดซึ่งมีการถ่ายเทอากาศตามธรรมชาติอย่างต่อเนื่อง พบว่า มีความเข้มข้นของสารปรอทเฉลี่ยเพียง $10.9 \pm 5.4 \text{ ng/m}^3$ ซึ่งต่ำกว่าพื้นที่ปิดมากถึง 52 เท่า อย่างไรก็ตามระดับความเข้มข้นที่ตรวจวัดได้ยังต่ำกว่าค่าขีดจำกัดการสัมผัสที่กำหนดโดย OSHA และกรมสวัสดิการและคุ้มครองแรงงานของประเทศไทย ซึ่งกำหนดไว้ที่ 0.1 mg/m^3 ($100 \text{ }\mu\text{g/m}^3$) สำหรับพื้นที่ทำงาน นอกจากนี้ยังต่ำกว่าคำแนะนำขององค์การอนามัยโลก (World Health Organization, 2003) ที่ระบุว่าความเข้มข้นเฉลี่ยรายปีของไอปรอทในอากาศไม่ควรเกิน $1 \text{ }\mu\text{g/m}^3$ อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาในมิติของการสัมผัสระยะยาว พบว่า ความเข้มข้นเฉลี่ยของสารปรอทในอากาศภายในพื้นที่ปิด มีค่าสูงกว่าค่า Chronic Minimal Risk Level (MRL) ของ Agency for Toxic Substances and Disease Registry (Agency for Toxic Substances and Disease Registry, 2024) ซึ่งกำหนดไว้ที่ $0.3 \text{ }\mu\text{g/m}^3$ (300 ng/m^3) สำหรับการสัมผัสต่อเนื่องในระยะยาว ดังนั้น ผู้ปฏิบัติงานที่ต้องทำงานในพื้นที่ดังกล่าวเป็นประจำควรใช้ความระมัดระวังและควรมีมาตรการควบคุมความเสี่ยงที่เหมาะสม ผลการศึกษานี้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Shi et al. (2025) ซึ่งรายงานผลการประเมินอันตรายต่อสุขภาพ (Health hazard evaluation) ในสถานประกอบการรีไซเคิลหลอดไฟที่มีการระบายอากาศน้อย โดยพบว่า ระดับความเข้มข้นไอปรอทในอากาศอยู่ที่ $35.8 \text{ }\mu\text{g/m}^3$ โดยเฉลี่ย และในบางตำแหน่งมีค่าสูงถึง $106.3 \text{ }\mu\text{g/m}^3$ ซึ่งเกินค่าขีดจำกัดการสัมผัสที่ OSHA กำหนดไว้

ตารางที่ 3. ความเข้มข้นเฉลี่ยของสารปรอทในอากาศภายในพื้นที่การจัดเก็บซากหลอดไฟ

ประเภทพื้นที่	ค่าความเข้มข้นของสารปรอทเฉลี่ย ในพื้นที่จัดเก็บหลอดไฟ (ng/m^3)	ค่าความเข้มข้นของสารปรอทเฉลี่ย นอกพื้นที่จัดเก็บหลอดไฟ (ng/m^3)
พื้นที่เปิด	10.9 ± 5.4	2.3 ± 0.3
พื้นที่ปิด	520.9 ± 160.3	1.9 ± 0.1

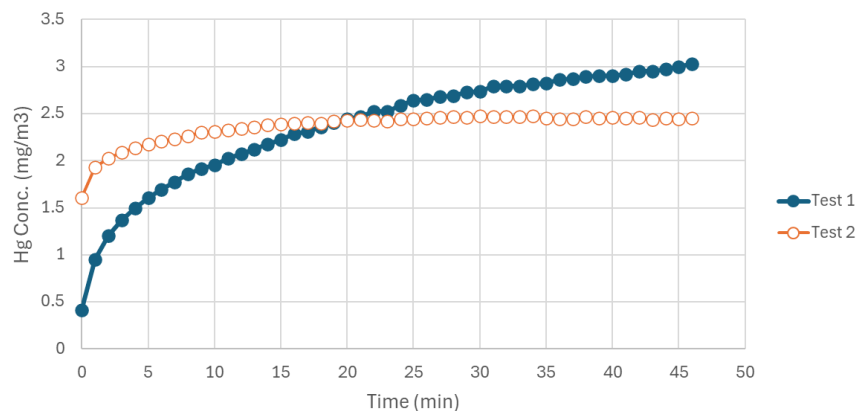
ทั้งนี้ค่าความเข้มข้นของสารปรอทในอากาศบริเวณภายนอกพื้นที่จัดเก็บหลอดไฟ (Background) ของทั้ง 2 พื้นที่ พบว่า มีค่าใกล้เคียงกันและมีความแปรปรวนต่ำ โดยในพื้นที่เปิดมีค่าเฉลี่ย $2.3 \pm 0.3 \text{ ng/m}^3$ และพื้นที่ปิดมีค่าเฉลี่ย $1.9 \pm 0.1 \text{ ng/m}^3$ ซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยตลอดช่วงระยะเวลาการศึกษาทั้ง 4 วัน นอกจากนี้ยังพบว่า ความเข้มข้นของสารปรอทในอากาศบริเวณภายนอกพื้นที่จัดเก็บซากหลอดไฟมีค่าอยู่ในระดับต่ำและใกล้เคียงกับค่าที่ตรวจพบในพื้นที่ทั่วไปอื่น ๆ ซึ่งแสดงให้เห็นว่า ไม่มีแหล่งกำเนิดสารปรอทจากภายนอกเข้ามารบกวนการศึกษา ดังนั้น ปริมาณสารปรอทที่ตรวจพบภายในพื้นที่จัดเก็บจึงสามารถพิจารณาได้ว่า มีแหล่งกำเนิดหลักมาจากซากหลอดไฟภายในพื้นที่จัดเก็บเอง

ดังนั้นการระบายอากาศมีบทบาทสำคัญอย่างยิ่งต่อการลดการสะสมของสารปรอทในบรรยากาศภายในพื้นที่จัดเก็บ อย่างไรก็ตาม แม้ว่าผลการตรวจวัดในครั้งนี้จะพบว่า ระดับความเข้มข้นของสารปรอทในอากาศยังอยู่ในระดับที่ต่ำกว่าค่ามาตรฐานความปลอดภัยที่กำหนดโดยหน่วยงานสากล แต่ก็ยังถือเป็น

ประเด็นที่ควรเฝ้าระวัง แม้พื้นที่ปิดมีระดับความเข้มข้นของสารปรอทในอากาศที่ตรวจพบยังคงอยู่ในระดับต่ำ ไม่ก่อให้เกิดอาการพิษต่อผู้ที่ได้รับสัมผัสและไม่เกินเกณฑ์ความปลอดภัยตามมาตรฐานสากล แต่ในเชิงอาชีวอนามัย ผู้ปฏิบัติงานที่ต้องทำงานอยู่ในพื้นที่ดังกล่าวเป็นประจำ โดยเฉพาะในกรณีที่มีการเคลื่อนย้ายคัดแยกหรือจัดเรียงซากหลอดฟลูออเรสเซนต์ อาจมีความเสี่ยงต่อการได้รับสัมผัสสะสมในระยะยาว (Chronic exposure) ได้ เนื่องจากสารปรอทในรูปไอสามารถเข้าสู่ร่างกายผ่านการหายใจและมีแนวโน้มสะสมในอวัยวะสำคัญ เช่น ระบบประสาท ไต และปอด การได้รับสัมผัสแม้ในระดับต่ำแต่ต่อเนื่องเป็นเวลานานจึงอาจก่อให้เกิดผลกระทบต่อสุขภาพในระยะยาวได้ โดยเฉพาะในกรณีที่ไม่มีการใช้เครื่องป้องกันส่วนบุคคลหรือไม่มีระบบระบายอากาศที่เพียงพอ ในขณะเดียวกัน ผลการตรวจวัดความเข้มข้นของสารปรอทบริเวณภายนอกพื้นที่จัดเก็บซึ่งอยู่ห่างออกไปประมาณ 50 เมตรในทิศทางเหนือลม พบว่า มีค่าเฉลี่ยอยู่ในระดับต่ำมาก และใกล้เคียงกับค่าพื้นหลังของบรรยากาศทั่วไป (Background concentration) จึงสามารถสรุปได้ว่า ในช่วงเวลาที่ทำการศึกษา ยังไม่พบหลักฐานที่บ่งชี้ถึงผลกระทบต่อสุขภาพของชุมชนโดยรอบอย่างมีนัยสำคัญ อย่างไรก็ตาม การปลดปล่อยไอปรอทจากการแตกหักของหลอดฟลูออเรสเซนต์ไม่ว่าจะเกิดขึ้นในพื้นที่เปิดหรือพื้นที่ปิด ยังคงมีศักยภาพในการกระจายสู่สิ่งแวดล้อมและก่อให้เกิดการปนเปื้อนในระดับท้องถิ่นได้ โดยเฉพาะในกรณีที่มีการแตกหักจำนวนมากหรือมีการสะสมซากหลอดเป็นเวลานาน แม้ว่าการศึกษานี้ยังไม่สามารถตรวจพบการปนเปื้อนในระดับสิ่งแวดล้อมภายนอกที่ชัดเจน แต่ผลการทดลองและข้อมูลภาคสนามสะท้อนถึงความจำเป็นในการจัดการเชิงป้องกัน โดยเน้นการลดการแตกหัก การเพิ่มประสิทธิภาพการระบายอากาศ และการกำหนดแนวปฏิบัติด้านความปลอดภัยสำหรับผู้ปฏิบัติงานเพื่อลดความเสี่ยงทั้งในระดับบุคคลและสิ่งแวดล้อมในระยะยาว และสนับสนุนการจัดการซากหลอดฟลูออเรสเซนต์อย่างปลอดภัยและยั่งยืนมากยิ่งขึ้น

3.3 การระบายสารปรอทจากซากหลอดไฟ

นอกจากการเก็บตัวอย่างในพื้นที่จริงแล้ว งานวิจัยนี้ยังได้ดำเนินการประเมินอัตราการระเหยของสารปรอทจากซากหลอดฟลูออเรสเซนต์ภายใต้สภาวะควบคุมในห้องทดสอบ (Controlled chamber test) เพื่อศึกษาพฤติกรรมการปลดปล่อยสารปรอทในสภาวะที่จำลองให้ใกล้เคียงกับสภาพการจัดเก็บจริง โดยใช้หลอดฟลูออเรสเซนต์ขนาด 18 วัตต์ ที่ผ่านการใช้งานแล้วและถูกรวบรวมจากพื้นที่มาเป็นตัวอย่างในการทดสอบหลอดฟลูออเรสเซนต์ถูกทำให้แตกภายในห้องทดสอบแบบปิดที่มีปริมาตรคงที่ เพื่อประเมินการระเหยของสารปรอทภายใต้สภาวะที่ไม่มีการระบายอากาศ พบว่า ความเข้มข้นของสารปรอทภายในห้องทดสอบเพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็วภายในช่วงเวลาที่แรกหลังจากการแตกของหลอดฟลูออเรสเซนต์ โดยตรวจพบค่าความเข้มข้นสูงสุดอยู่ในช่วงประมาณ 2.5–3.0 mg/m³ การทดสอบจำนวนสองครั้งให้ผลการเปลี่ยนแปลงของความเข้มข้นสารปรอทแตกต่างกันเล็กน้อย ซึ่งคาดว่าเกิดจากความแตกต่างของปริมาณสารปรอทที่คงเหลืออยู่ภายในหลอดแต่ละหลอด รวมถึงลักษณะและสภาพความเสียหายของหลอดในขณะทำการแตก ดังแสดงรูปที่ 1

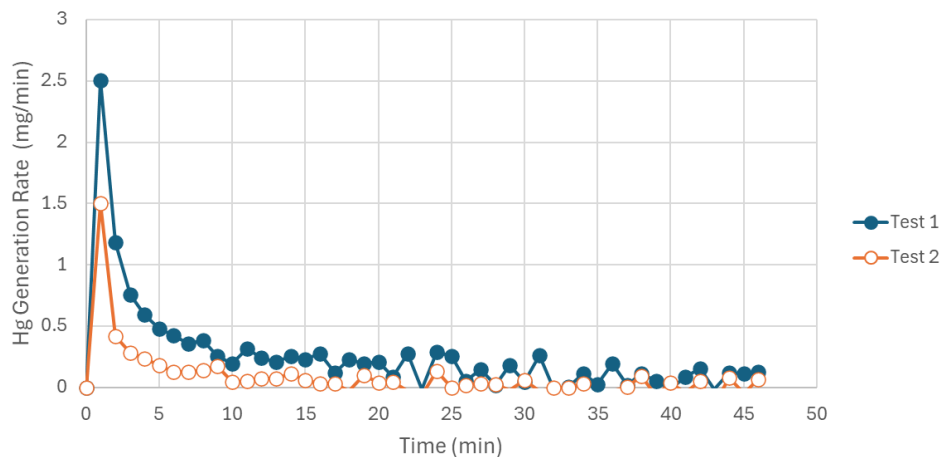


รูปที่ 1. การเปลี่ยนแปลงของความเข้มข้นสารปรอทที่ปลดปล่อยจากหลอดฟลูออเรสเซนต์ใช้แล้ว
ภายหลังการแตกภายในห้องทดสอบ

สำหรับพฤติกรรมการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารปรอทที่ปลดปล่อยออกมาภายใต้การทดสอบในห้อง พบว่า ในการทดสอบครั้งที่ 1 ความเข้มข้นของสารปรอทภายในห้องมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องตลอดช่วงระยะเวลาการทดสอบ ขณะที่การทดสอบครั้งที่ 2 ความเข้มข้นเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงแรก และมีแนวโน้มค่อนข้างคงที่หลังจากเวลาผ่านไปประมาณ 20 นาที ดังแสดงในรูปที่ 1 ความแตกต่างของผลการทดสอบทั้งสองกรณีจึงมีแนวโน้มสัมพันธ์กับปริมาณสารปรอทที่หลงเหลืออยู่ภายในหลอดและลักษณะการแตกของหลอดที่แตกต่างกัน ดังที่กล่าวไว้ข้างต้น

เมื่อทำการคำนวณอัตราการเกิดของสารปรอทโดยอาศัยสมการสมดุลมวลภายในห้องทดสอบ พบว่า อัตราการปลดปล่อยสารปรอทมีค่าสูงสุดในช่วงนาทีแรกหลังจากหลอดฟลูออเรสเซนต์แตก และมีแนวโน้มลดลงอย่างต่อเนื่องตามเวลา ก่อนจะเริ่มเข้าสู่ภาวะค่อนข้างคงที่หลังจากระยะเวลาประมาณ 10 นาที ดังแสดงรูปที่ 2 อย่างไรก็ตาม ยังตรวจพบการปลดปล่อยสารปรอทอย่างต่อเนื่องในระดับต่ำตลอดช่วงระยะเวลาการทดลอง ทั้งนี้ในการทดสอบครั้งที่ 1 พบว่า ยังคงมีการปลดปล่อยสารปรอทจากหลอดที่แตกอย่างต่อเนื่องแม้เป็นปริมาณไม่สูงมาก แต่มีการปลดปล่อยมากกว่า 30 นาที ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญที่ทำให้ความเข้มข้นของสารปรอทภายในห้องทดสอบดังแสดงในรูปที่ 1 ยังคงมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องตลอดระยะเวลาการทดลองซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาของ Stemp-Morlock (2008) ที่รายงานไว้ในช่วง 1 ชั่วโมงแรกหลังการแตกของหลอดไฟ พบความเข้มข้นของไอปรอทบริเวณเศษหลอดอยู่ในช่วง 200–800 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ นอกจากนี้ การศึกษายังพบว่าหลอดฟลูออเรสเซนต์ขนาด 13 วัตต์ที่ยังใหม่สามารถปลดปล่อยสารปรอทได้ประมาณ 30% ของปริมาณทั้งหมดภายในระยะเวลา 4 วันหลังการแตกของหลอด ผลการศึกษาดังกล่าว แสดงให้เห็นว่า ช่วงเวลาความเสี่ยงสูงสุดของการสัมผัสไอปรอทอยู่ในช่วง 0–10 นาทีแรกหลังการแตกของหลอด ซึ่งเป็นช่วงที่ความเข้มข้นในอากาศสามารถเพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว ดังนั้น ในกรณีเกิดเหตุหลอดแตกในพื้นที่จัดเก็บหรือพื้นที่ใช้งานจริง ควรกำหนดแนวปฏิบัติที่เน้นการลดการสัมผัสในทันที เช่น ย้ายบุคลากรทำงานออกจากพื้นที่ชั่วคราว การเพิ่มการระบายอากาศโดยเปิดช่องลม หรือเปิด

ระบบดูดอากาศ และหลีกเลี่ยงการกวาดหรือทำความสะอาดทันทีในช่วงแรก เพื่อให้ความเข้มข้นของไอปรอทลดลงตามธรรมชาติบางส่วนก่อนดำเนินการเก็บกวาดอย่างปลอดภัย



รูปที่ 2. อัตราการเกิดของสารปรอทต่อเวลา ที่ประเมินจากการทดสอบ

จากการประเมินโดยรวมพบว่า ปริมาณการระบายของสารปรอทรวมภายในกล่องเฉลี่ยอยู่ที่ประมาณ 8.0 มิลลิกรัมต่อหลอด ซึ่งอยู่ในช่วงใกล้เคียงกับค่าที่ระบุในข้อมูลจำเพาะของผู้ผลิต โดยทั่วไปหลอดฟลูออเรสเซนต์ขนาดมาตรฐานจะมีสารปรอทอยู่ระหว่าง 3–10 มิลลิกรัมต่อหลอด (Johnson et al., 2008) ขึ้นอยู่กับรุ่น ยี่ห้อ อายุการใช้งาน และเทคโนโลยีการผลิต ทั้งนี้ปริมาณการระเหยของสารปรอทจากแต่ละหลอดอาจแตกต่างกัน เนื่องจากสภาวะของหลอดก่อนแตก เช่น การเสื่อมสภาพของสารเรืองแสงภายในหลอด ความชื้นภายใน รวมทั้งลักษณะการแตกของกระจกมีผลโดยตรงต่ออัตราการปลดปล่อย จากข้อมูลอัตราการปลดปล่อยสารปรอทเฉลี่ยดังกล่าว เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับค่าความเข้มข้นเฉลี่ยของสารปรอทที่ตรวจวัดได้ในพื้นที่จัดเก็บซากหลอดไฟแบบปิด และประยุกต์ใช้แบบจำลองสมมูลมวล ภายใต้อัตราการรั่วซึมของอากาศ (Air leakage rate) เฉลี่ย 0.5 h^{-1} พบว่า สามารถประมาณจำนวนหลอดที่แตกภายในพื้นที่ดังกล่าวได้ประมาณ 6.5 หลอด ซึ่งมีความใกล้เคียงกับสภาพการณ์จริงที่สำรวจพบ ณ จุดศึกษา โดยพบหลอดแตกประมาณ 10 หลอด อย่างไรก็ตาม การคำนวณดังกล่าวเป็นการประเมินเชิงปริมาณภายใต้สภาวะสมมติฐาน และไม่สามารถระบุช่วงเวลาที่เกิดการแตกหักได้อย่างชัดเจน เนื่องจากอัตราการปลดปล่อยสารปรอทมีลักษณะลดลงตามเวลา และอาจมีการระบายออกบางส่วนผ่านรอยร้าวหรือการเปิด-ปิดประตูในช่วงก่อนการตรวจวัด ในกรณีของพื้นที่จัดเก็บแบบเปิด แม้ว่าจะพบซากหลอดแตกเช่นเดียวกัน แต่เนื่องจากการถ่ายเทอากาศตามธรรมชาติอย่างต่อเนื่อง ทำให้ความเข้มข้นของไอปรอทในอากาศอยู่ในระดับต่ำและมีการเจือจางอย่างรวดเร็ว ส่งผลให้ไม่สามารถประเมินจำนวนหลอดที่แตกแบบย้อนกลับได้นอกจากนี้ค่าการปลดปล่อยปรอทรวมประมาณ 8 มิลลิกรัมต่อหลอดสามารถนำไปใช้เป็นข้อมูลตั้งต้น ในการจำลองสมมูลมวลและแบบจำลองการระบายอากาศของห้องจัดเก็บจริง เพื่อประเมินระดับความเข้มข้นสูงสุดที่อาจเกิดขึ้นภายใต้ปริมาตรห้องและอัตราการแลกเปลี่ยนอากาศที่แตกต่างกัน

3.4 ความสัมพันธ์ระหว่างการระบายอากาศและปริมาณสารปรอทในห้องจัดเก็บซากหลอดไฟ

เพื่อประเมินความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการระบายอากาศภายในห้องจัดเก็บซากหลอดฟลูออเรสเซนต์กับระดับความเข้มข้นของไอปรอทในอากาศ ได้มีการใช้หลักการสมดุลมวล (Mass balance approach) (Sakiyama et al., 2024; Yi et al., 2020) ในการคำนวณการสะสมและการระบายของสารปรอทภายในระบบปิด โดยพิจารณาจากตัวแปรสำคัญ ได้แก่ จำนวนหลอดฟลูออเรสเซนต์ที่แตก ปริมาณหลอดที่สะสมอยู่ในห้อง อัตราการปลดปล่อยสารปรอทเฉลี่ยต่อหลอด และอัตราการระบายอากาศของพื้นที่จัดเก็บ ข้อมูลทั้งหมดถูกนำไปจำลองในสมการสมดุลมวลเพื่อประมาณค่าความเข้มข้นของไอปรอทในอากาศในแต่ละช่วงเวลา สำหรับการจำลองนี้ กำหนดให้ห้องจัดเก็บซากหลอดฟลูออเรสเซนต์ซึ่งรอการขนส่งมีปริมาตร 100 ลูกบาศก์เมตร และมีอัตราการรั่วซึมของอากาศเฉลี่ย 0.5 h^{-1} ซึ่งเท่ากับขนาดพื้นที่การจัดเก็บซากหลอดไฟที่ได้ทำการศึกษาไม่มีการปนเปื้อนของสารปรอทจากภายนอกอาคารขนาดพื้นที่ช่องเปิดสูงสุด 2 ตารางเมตร ค่าพารามิเตอร์สำหรับการคำนวณประกอบด้วย Discharge coefficient (Cd) สำหรับหน้าต่าง/ช่องเปิดแบบทั่วไป ที่มีการระบายอากาศแบบช่องเปิดอยู่ตรงข้ามกัน ในแนวเดียวกับทิศทางลม (Cross ventilation) = 0.6 Pressure coefficient (Cp) สำหรับ Cross ventilation = 0.5 Cd สำหรับการระบายอากาศแบบด้านเดียว (Single-sided ventilation) = 0.35 และ Cp (Single-sided) = 0.25 (Yi et al., 2020; Iqbal et al., 2023) และกำหนดความเร็วลมเฉลี่ยภายนอกเท่ากับ 1 เมตรต่อวินาที ผลการจำลองแสดงในตารางที่ 4 พบว่า หากไม่มีการระบายอากาศอาจส่งผลให้เกิดการสะสมของสารปรอทในห้องในปริมาณสูง ในขณะที่การระบายอากาศแบบ Cross ventilation สามารถลดความเข้มข้นของไอปรอทที่สะสมภายในห้องได้อย่างมีนัยสำคัญ เมื่อเทียบกับการระบายอากาศแบบ Single-sided ventilation ที่มีช่องเปิดเพียงด้านเดียว ทั้งนี้ผลการจำลองชี้ให้เห็นอย่างชัดเจนว่า ขนาดของช่องเปิดมีผลโดยตรงต่ออัตราการระบายอากาศ โดยเมื่อเพิ่มพื้นที่ช่องเปิด ความเข้มข้นของไอปรอทภายในห้องจะลดลงอย่างต่อเนื่อง โดยสามารถลดปริมาณสารปรอทในห้องจาก 520.8 ng/m^3 ลงเหลือ 21.7 ng/m^3 ได้จากการใช้ช่องเปิดขนาด 2 ตารางเมตร ที่มีการระบายอากาศแบบ Cross ventilation ดังนั้น เพื่อความปลอดภัยและลดความเสี่ยงต่อการสะสมของไอปรอทในอากาศ ควรหลีกเลี่ยงการจัดเก็บซากหลอดฟลูออเรสเซนต์ในพื้นที่ปิดทึบ และควรจัดให้มีระบบการระบายอากาศแบบ Cross ventilation ที่มีขนาดช่องเปิดมากที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้สำหรับพื้นที่จัดเก็บดังกล่าว

ตารางที่ 4. การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของไอปรอทในอากาศ จากปรับขนาดช่องเปิด และรูปแบบการระบายอากาศในพื้นที่จัดเก็บซากหลอดฟลูออเรสเซนต์

Opening (%)	Opening area (m^2)	การระบายอากาศ		ปริมาณสารปรอทในห้อง	
		Cross ventilation (h^{-1})	Single-sided (h^{-1})	Cross ventilation (ng/m^3)	Single-sided (ng/m^3)
0	0.0	0	0	520.80	
10	0.20	3.05	1.26	206.44	376.25
20	0.40	6.11	2.52	108.08	241.49
30	0.60	9.16	3.78	72.21	171.08

ตารางที่ 4. (ต่อ) การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของโอโซนในอากาศ จากปรับขนาดช่องเปิด และรูปแบบการระบายอากาศ ในพื้นที่จัดเก็บซากหลอดฟลูออเรสเซนต์

Opening (%)	Opening area (m ²)	การระบายอากาศ		ปริมาณสารปรอทในห้อง	
		Cross ventilation (h ⁻¹)	Single-sided (h ⁻¹)	Cross ventilation (ng/m ³)	Single-sided (ng/m ³)
40	0.80	12.22	5.04	54.16	130.46
50	1.00	15.27	6.30	43.33	104.85
60	1.20	18.33	7.56	36.11	87.49
70	1.40	21.38	8.82	30.95	75.02
80	1.60	24.44	10.08	27.08	65.65
90	1.80	27.49	11.34	24.07	58.36
100	2.00	30.55	12.60	21.66	52.52

หมายเหตุ : ขนาดพื้นที่ช่องเปิดสูงสุด = 2 ตารางเมตร

3.5 แนวทางการจัดการสร้างซากหลอดฟลูออเรสเซนต์อย่างยั่งยืน

ผลการศึกษาที่สะท้อนให้เห็นอย่างชัดเจนว่า การจัดการซากหลอดฟลูออเรสเซนต์ในระดับ อปท. มิได้เป็นเพียงประเด็นด้านการจัดการของเสียทั่วไป แต่เป็นประเด็นเชิงระบบที่เชื่อมโยงโดยตรงกับความเสถียรต่อสุขภาพของประชาชนในระยะยาว คุณภาพสิ่งแวดล้อม และความยั่งยืนของระบบเมืองและชุมชน โดยเฉพาะอย่างยิ่งในบริบทของประเทศกำลังพัฒนา ซึ่งยังคงมีการใช้หลอดฟลูออเรสเซนต์ในระดับสูงและมีข้อจำกัดด้านโครงสร้างพื้นฐานในการจัดการขยะอันตราย

การพบปริมาณซากหลอดฟลูออเรสเซนต์ในสัดส่วนที่สูงในพื้นที่ชนบทเมื่อเทียบกับพื้นที่เมือง สะท้อนให้เห็นถึงความเหลื่อมล้ำของการเข้าถึงเทคโนโลยีระบบแสงสว่างที่ปลอดภัยกว่า เช่น หลอด LED รวมถึงข้อจำกัดด้านงบประมาณและพฤติกรรมจัดการของเสียของครัวเรือนและองค์กรท้องถิ่น ผลดังกล่าวชี้ให้เห็นว่า นโยบายด้านการจัดการของเสียอันตรายจำเป็นต้องพิจารณาความแตกต่างเชิงพื้นที่ (Urban-rural disparity) และออกแบบมาตรการที่เหมาะสมกับบริบทของแต่ละชุมชน ไม่ใช่การใช้แนวทางเดียวกันทั่วประเทศ

สำหรับแนวทางการจัดการอย่างยั่งยืนในมิติด้านสิ่งแวดล้อม การเก็บรวบรวมซากหลอดไฟควรดำเนินการคัดแยกตั้งแต่ต้นทาง (Source segregation) ซึ่งเป็นมาตรการเชิงป้องกัน เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการจัดการและลดความเสี่ยงของการปนเปื้อนสารอันตราย โดยเฉพาะในกรณีของหลอดฟลูออเรสเซนต์ ซึ่งมีสารปรอทเป็นองค์ประกอบสำคัญ จึงจำเป็นต้องแยกออกจากหลอด LED การแยกประเภทหลอดไฟตั้งแต่ต้นทางเป็นขั้นตอนสำคัญที่จะช่วยให้การรวบรวม ขนส่ง และกำจัดซากหลอดสามารถดำเนินการได้อย่างปลอดภัยและมีประสิทธิภาพมากขึ้น โดยผู้ทิ้งหรือเจ้าของหลอดไฟเป็นผู้คัดแยกเองในขั้นต้น เนื่องจากเป็นผู้ที่ทราบประเภทของหลอดไฟที่ใช้ งาน เช่น หลอดฟลูออเรสเซนต์ หรือหลอด LED ซึ่งมีลักษณะภายนอกแตกต่างกัน การจัดให้มีจุดรับคืนเฉพาะประเภท 2 แต่มัน ในสถานที่ต่าง ๆ เช่น อาคารสำนักงาน โรงเรียน โรงพยาบาล หรือร้านจำหน่ายอุปกรณ์ไฟฟ้า จะช่วยส่งเสริมให้ประชาชนสามารถแยกหลอดได้อย่างถูกต้องและลดการปะปนระหว่างหลอดฟลูออเรสเซนต์กับหลอด LED อย่างไรก็ดี แม้ว่าจะมีการ

ส่งเสริมการคัดแยกตั้งแต่ต้นทาง แต่ในทางปฏิบัติยังคงมีความเป็นไปได้ที่จะเกิดการปะปนของหลอดทั้งสองประเภท เนื่องจากประชาชนบางส่วนอาจไม่ทราบความแตกต่างของหลอด หรืออาจทิ้งรวมกันเพื่อความสะดวก ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการดำเนินการคัดแยกซ้ำ (Secondary sorting) ที่สถานที่เก็บรวบรวมส่วนกลาง (Central collection facility) โดยจัดให้มีพื้นที่และอุปกรณ์สำหรับแยกประเภทหลอดอย่างปลอดภัย เช่น การใช้ถุงมือป้องกัน ถึงเก็บเฉพาะชนิดปิดสนิท และการจัดเก็บหลอดฟลูออเรสเซนต์ในภาชนะที่รองรับแรงกระแทกได้ เพื่อลดโอกาสการแตกหักและการระเหยของสารปรอท

การขนส่งซากหลอดไฟจากจุดรวบรวมในระดับชุมชนไปยังสถานที่จัดเก็บส่วนกลางของ อปท. ควรดำเนินการป้องกันการแตกหักและการรั่วไหลของสารปรอทระหว่างการขนส่ง โดยหลอดไฟทั้งหมดควรถูกบรรจุในภาชนะหรือคอนเทนเนอร์ที่มีลักษณะคงรูป แข็งแรง และสามารถทนต่อแรงกระแทกได้ เช่น กล่องพลาสติกชนิดแข็ง (Rigid plastic container) หรือถังโลหะที่มีฝาปิดสนิท ภาชนะดังกล่าวควรบุด้วยวัสดุดูดซับแรงกระแทก เช่น โฟมหรือกระดาษลูกฟูก เพื่อป้องกันการสั่นสะเทือนและลดโอกาสการแตกหักของหลอดไฟในระหว่างการขนย้าย นอกจากนี้ควรจัดวางหลอดไฟในแนวราบและไม่เรียงซ้อนเกินชั้นที่กำหนด พร้อมติดป้ายระบุประเภทของขยะอันตราย (Hazardous waste label) อย่างชัดเจน เพื่อให้เจ้าหน้าที่ขนส่งและผู้ปฏิบัติงานสามารถระบุและจัดการได้อย่างปลอดภัย ในทางปฏิบัติเพื่อให้การขนส่งเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ ควรกำหนดระบบการแยกประเภทภายในคอนเทนเนอร์ (Internal segregation system) เช่น การใช้ถุงพลาสติกแยกประเภท การแบ่งช่องภายในกล่อง หรือการใช้สีของภาชนะต่างกันระหว่างหลอดฟลูออเรสเซนต์และหลอด LED เพื่อช่วยป้องกันการสับสนและลดความเสี่ยงจากการปนเปื้อนของสารปรอทในระหว่างการขนส่ง

ในมิติความยั่งยืนด้านสุขภาพและความปลอดภัย ผลการตรวจวัดและการทดลองภายใต้สภาวะควบคุมยืนยันว่า การแตกของหลอดฟลูออเรสเซนต์สามารถปลดปล่อยไอปรอทในระดับสูงในช่วงเวลาสั้น และยังคงมีการปลดปล่อยอย่างต่อเนื่องในระยะยาว หากไม่มีการจัดการที่เหมาะสม โดยเฉพาะในพื้นที่ปิดหรือพื้นที่ที่มีการระบายอากาศไม่เพียงพอ การสะสมของไอปรอทในบรรยากาศภายในอาจก่อให้เกิดความเสี่ยงต่อสุขภาพของผู้ปฏิบัติงานและประชาชนในบริเวณใกล้เคียง แม้ว่าค่าที่ตรวจพบในบางกรณีจะยังไม่เกินมาตรฐานความปลอดภัยสากล แต่การสัมผัสในระยะยาวและการสะสมร่วมกับแหล่งกำเนิดอื่นอาจนำไปสู่ผลกระทบเรื้อรังได้

สำหรับมาตรการควบคุมทางวิศวกรรม ผลการจำลองด้วยสมการสมดุลมวลแสดงให้เห็นว่า การระบายอากาศในพื้นที่จัดเก็บซากหลอดไฟถือเป็นองค์ประกอบสำคัญของระบบจัดการความปลอดภัย เนื่องจากหลอดฟลูออเรสเซนต์ที่แตกหรือเสียหายสามารถปลดปล่อยไอปรอทออกมาได้อย่างรวดเร็ว การระบายอากาศแบบ Cross ventilation หรือการระบายอากาศแบบไหลข้ามห้อง ซึ่งอาศัยแรงดันอากาศธรรมชาติ (Natural pressure difference) เพื่อให้เกิดการหมุนเวียนของอากาศอย่างต่อเนื่อง โดยจัดให้มีช่องรับอากาศ (Inlet) และช่องระบายอากาศ (Outlet) อยู่ในตำแหน่งตรงข้ามกัน เพื่อให้เกิดการเคลื่อนที่ของลมจากด้านหนึ่งไปยังอีกด้านหนึ่งอย่างมีประสิทธิภาพ สามารถลดระดับไอปรอทได้อย่างมีนัยสำคัญ ช่องระบายอากาศควรมีขนาดเพียงพอต่อปริมาตรของห้อง ในกรณีที่ไม่สามารถพึ่งพาการระบายอากาศตามธรรมชาติได้ ควรติดตั้งระบบระบายอากาศเชิงกล (Mechanical ventilation system) เช่น พัดลมดูดอากาศ หรือ Local Exhaust Ventilation (LEV) เพื่อช่วยเพิ่มอัตราการแลกเปลี่ยนอากาศ (Air Change

per Hour: ACH) ให้อยู่ในระดับที่ปลอดภัย ผลดังกล่าวสามารถนำไปใช้เป็นฐานข้อมูลเชิงวิศวกรรมสำหรับการกำหนดมาตรฐานขั้นต่ำของสถานที่จัดเก็บขยะอันตรายประเภทหลอดไฟในระดับท้องถิ่น โดยตามแนวทางของ US EPA และ NIOSH แนะนำให้อัตราการแลกเปลี่ยนอากาศในพื้นที่จัดเก็บขยะอันตรายหรือพื้นที่ที่อาจมีการระเหยของสารปรอทควรร้อยละ 6-10 ครั้งต่อชั่วโมง (ACH) เพื่อป้องกันไม่ให้อัตราความเข้มข้นของไอปรอทเกินค่ามาตรฐานความปลอดภัย (ไม่เกิน $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ สำหรับการสัมผัสระยะยาว และ $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$ สำหรับการสัมผัสระยะสั้นตาม WHO)

มาตรการเชิงบริหารจัดการ (ความยั่งยืนในมิติด้านเศรษฐศาสตร์และการบริหารจัดการ) และพฤติกรรมถือเป็นองค์ประกอบที่มีความจำเป็นอย่างยิ่งในการลดความเสี่ยงจากการปนเปื้อนสารปรอทในระบบจัดการซากหลอดฟลูออเรสเซนต์ เนื่องจากแม้จะมีมาตรการควบคุมทางวิศวกรรมที่เหมาะสม แต่หากขาดความรู้ ความตระหนัก และแนวปฏิบัติที่ถูกต้อง ก็อาจทำให้ความเสี่ยงยังคงเกิดขึ้นได้ ดังนั้น จึงควรมีการจัดอบรมเจ้าหน้าที่และผู้ปฏิบัติงานอย่างสม่ำเสมอในประเด็นเกี่ยวกับอันตรายของสารปรอท กลไกการระเหยและการสะสมในพื้นที่ปิด วิธีการจัดการหลอดที่แตกอย่างปลอดภัย รวมถึงขั้นตอนการทำความสะอาดพื้นที่ปนเปื้อนตามหลักวิชาการ นอกจากนี้ควรมีการจัดเตรียมอุปกรณ์ป้องกันส่วนบุคคลที่เหมาะสม เช่น ถุงมือป้องกันสารเคมี หน้ากากกรองไอโลหะหนัก แว่นตานิรภัย และชุดป้องกัน เพื่อใช้ในการบริหารจัดการหลอดแตกหรือเคลื่อนย้ายซากหลอดจำนวนมาก พร้อมทั้งกำหนดแนวปฏิบัติกรณีฉุกเฉินอย่างชัดเจน เช่น การย้ายบุคลากรทำงานออกจากพื้นที่ชั่วคราวหากมีหลอดแตก การจำกัดพื้นที่ การเพิ่มการระบายอากาศทันที หลีกเลี่ยงการกวาดหรือทำความสะอาดทันทีในช่วงแรก การเก็บกวาดโดยไม่ใช้เครื่องดูดฝุ่นทั่วไป และการจัดเก็บเศษวัสดุในภาชนะปิดสนิทที่เหมาะสม ควรกำหนดขั้นตอนการปฏิบัติงานมาตรฐาน (Standard Operating Procedures: SOPs) สำหรับการรวบรวม การจัดเก็บ และการขนส่งซากหลอดฟลูออเรสเซนต์ รวมถึงมีการบันทึกข้อมูลและติดตามผลการดำเนินงานอย่างต่อเนื่อง

นอกจากนี้ การรวบรวมและการขนส่งซากหลอดฟลูออเรสเซนต์ต้องดำเนินการภายใต้หลักการจัดการของเสียอันตรายอย่างถูกต้องตามกฎหมาย โดยซากหลอดฟลูออเรสเซนต์ถือเป็นของเสียที่มีสารปรอทเป็นองค์ประกอบ ซึ่งจัดอยู่ในประเภทขยะอันตรายจากชุมชน (Hazardous household waste) ตามประกาศของกรมควบคุมมลพิษ ดังนั้น การกำจัดของเสียประเภทนี้จำเป็นต้องดำเนินการโดย ผู้รับกำจัดที่ได้รับอนุญาต (Licensed hazardous waste treatment facility) เท่านั้น และบรรจุอยู่ในภาชนะที่แข็งแรง เพื่อให้มั่นใจว่ากระบวนการทั้งหมดตั้งแต่การขนส่ง การเก็บรวบรวม การรีไซเคิล ไปจนถึงการกำจัดสุดท้าย เป็นไปตามมาตรฐานด้านสิ่งแวดล้อมและความปลอดภัยต่อสุขภาพของประชาชน

สำหรับกระบวนการจัดการซากหลอดฟลูออเรสเซนต์ของผู้รับกำจัดที่ได้รับอนุญาต จะต้องเริ่มจากการคัดแยกและการกู้คืนวัสดุ (Material recovery process) ซึ่งเป็นขั้นตอนที่สำคัญในการลดปริมาณของเสียที่จะถูกฝังกลบ โดยหลอดฟลูออเรสเซนต์จะถูกบดเข้าสู่เครื่องจักรที่ออกแบบเฉพาะสำหรับการบดและแยกชิ้นส่วน (Lamp crushing & separation unit) ภายใต้ระบบปิดที่มีการดูดอากาศและกรองไอปรอทด้วย Sulfur-impregnated adsorbent เพื่อป้องกันการระเหยของไอปรอทออกสู่บรรยากาศ กระบวนการจะแยกน้ำมัน และผงฟอสเฟอร์ที่ได้จากกระบวนการจะถูกนำไปรีไซเคิล ส่วนสารปรอทจะถูกเก็บรวบรวมผ่านระบบ Cold vapor condensation หรือ Thermal desorption เพื่อแยกปรอทออกจากวัสดุอื่นและนำไปกู้คืนในรูปของปรอทธาตุที่สามารถนำไปใช้ซ้ำในอุตสาหกรรมได้ ในกรณีที่ไม่สามารถรีไซเคิลได้หรือมีเศษ

วัสดุที่ยังคงปนเปื้อนปรอทในระดับสูง จะต้องนำไปกำจัดด้วยวิธีฝังกลบแบบปลอดภัย (Secure landfill) ซึ่งเป็นพื้นที่ที่ออกแบบเฉพาะสำหรับของเสียอันตราย โดยต้องมีระบบป้องกันการรั่วซึม (Liner system) ป้องกันหลายชั้น

ทั้งนี้หลักการดังกล่าว ทั้งการจัดการซากหลอดฟลูออเรสเซนต์ที่เน้นการคัดแยกตั้งแต่ต้นทาง การขนส่งที่ถูกต้องในภาชนะที่แข็งแรง การจัดเก็บในพื้นที่ที่มีการระบายอากาศเหมาะสม และการกำจัดโดยผู้รับอนุญาตตามกฎหมาย มีความสอดคล้องอย่างชัดเจนกับเป้าหมายการพัฒนาที่ยั่งยืนของสหประชาชาติ (SDGs) SDG 11 (เมืองและชุมชนที่ยั่งยืน) และ SDG 12 (การผลิตและการบริโภคที่ยั่งยืน) ซึ่งเกี่ยวข้องกับความยั่งยืนในมิติด้านสิ่งแวดล้อมของโครงการ เพื่อลดการปนเปื้อนของสารปรอทออกสู่สิ่งแวดล้อม นอกจากนี้ยังรวมถึง SDG 3 (สุขภาพและความเป็นอยู่ที่ดี) ซึ่งเกี่ยวข้องกับความยั่งยืนในมิติด้านสุขภาพและความปลอดภัย รวมทั้งในมิติด้านเศรษฐศาสตร์และการบริหารจัดการ เกี่ยวข้องกับ SDG 16 (ส่งเสริมสังคมที่สงบสุขและครอบคลุมเพื่อการพัฒนาที่ยั่งยืน) ในด้านการเสริมสร้างระบบบริหารจัดการที่มีประสิทธิภาพ ดังนั้นการจัดการของเสียอันตรายในระดับท้องถิ่นสามารถเป็นกลไกสำคัญในการขับเคลื่อนการพัฒนาที่ยั่งยืนในภาพรวมของประเทศได้ ข้อเสนอเชิงนโยบายจากงานวิจัยนี้คือ หน่วยงานที่เกี่ยวข้องควรพัฒนาแนวทางหรือคู่มือการจัดการซากหลอดฟลูออเรสเซนต์ในระดับ อปท. อย่างเป็นระบบ โดยบูรณาการองค์ความรู้ด้านวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม มาตรฐานความปลอดภัยด้านอาชีวอนามัย และการมีส่วนร่วมของชุมชนควบคู่กันไป พร้อมทั้งส่งเสริมมาตรการจูงใจในการเปลี่ยนผ่านไปสู่เทคโนโลยีแสงสว่างที่ปลอดภัยกว่า เช่น หลอด LED เพื่อให้การลดแหล่งกำเนิดสารปรอทเกิดขึ้นอย่างยั่งยืนทั้งในระยะสั้นและระยะยาว

4. สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นการประเมินการปนเปื้อนของสารปรอทในอากาศภายในพื้นที่จัดเก็บซากหลอดฟลูออเรสเซนต์และการประเมินผลของระบบการระบายอากาศต่อการลดความเข้มข้นของไอปรอท เพื่อสร้างแนวทางในการจัดการซากหลอดอย่างปลอดภัยและยั่งยืน โดยพบว่า จากการสำรวจข้อมูลภาคสนามในพื้นที่เมืองและชนบท ยังมีซากหลอดฟลูออเรสเซนต์ตกค้างอยู่ในท้องถิ่นเป็นจำนวนมาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งในพื้นที่ชนบท และมีสัดส่วนของหลอดฟลูออเรสเซนต์สูงกว่าหลอด LED อย่างชัดเจน เมื่อเปรียบเทียบกับพื้นที่เขตเมือง และจากการตรวจวัดระดับสารปรอทในอากาศทั้งในพื้นที่จัดเก็บหลอดไฟของ อปท. พบว่า พื้นที่ปิดมีค่าความเข้มข้นของไอปรอทเฉลี่ยสูงกว่าพื้นที่เปิดกว่า 50 เท่า แสดงว่าการระบายอากาศมีบทบาทสำคัญในการลดการสะสมของสารปรอทภายในอาคาร การทดลองในห้องทดสอบแบบปิดเพื่อจำลองสภาวะการปลดปล่อยสารปรอทจากหลอดฟลูออเรสเซนต์ที่แตก พบว่า สารปรอทถูกปลดปล่อยออกมาอย่างรวดเร็วภายในช่วง 10 นาทีแรกหลังหลอดแตก และยังคงมีการระเหยออกมาอย่างต่อเนื่อง แม้เวลาผ่านไปแล้ว โดยปริมาณการปลดปล่อยรวมเฉลี่ยอยู่ที่ประมาณ 8 มิลลิกรัมต่อหลอด การระบายอากาศแบบมีช่องเปิดตรงกันในแนวทิศทางลมสามารถลดระดับไอปรอทได้มีประสิทธิภาพมากกว่าการระบายอากาศแบบด้านเดียวเกือบ 2 เท่า โดยเมื่อเพิ่มขนาดช่องเปิดจาก 0% เป็น 100% ความเข้มข้นของไอปรอทภายในห้องลดลงจากกว่า 520.8 ng/m³ เหลือ 20.7 ng/m³ จากการจำลองการระบายอากาศโดยใช้สมการสมมูลมวล ทั้งนี้ แนวทางการจัดการซากหลอดฟลูออเรสเซนต์อย่างยั่งยืนในระดับท้องถิ่นควรเริ่มต้นจากการแยกหลอดตั้งแต่ต้นทาง โดยแยกระหว่างหลอดฟลูออเรสเซนต์และหลอด LED อย่างชัดเจน เพื่อ

ลดความเสี่ยงจากการปนเปื้อนของสารปรอท การขนส่งและการจัดเก็บควรใช้ ภาชนะที่แข็งแรง ปิดสนิท และมีระบบยึดตรึงเพื่อลดการแตกหักของหลอด ขณะเดียวกันพื้นที่จัดเก็บควรออกแบบให้มี อัตราการระบายอากาศที่เหมาะสมในช่วง 6–10 ครั้งต่อชั่วโมงเป็นอย่างน้อย เพื่อป้องกันการสะสมของไอปรอทในอากาศ และการจัดการซากหลอดไฟทั้งหมดควรดำเนินการภายใต้ระบบการจัดการของเสียอันตรายที่ถูกต้องตามกฎหมาย และอยู่ภายใต้การกำกับของหน่วยงานที่มีความเชี่ยวชาญ เพื่อให้เกิดระบบการจัดการขยะที่ปลอดภัย ครอบคลุม และสามารถลดการปนเปื้อนของสารปรอทต่อสิ่งแวดล้อมได้อย่างยั่งยืน

กิตติกรรมประกาศ

บทความนี้เป็นส่วนหนึ่งของผลการศึกษาวิจัยโครงการ “พัฒนารูปแบบการจัดการซากหลอดฟลูออเรสเซนต์เพื่อประเมินผลประโยชน์ร่วมในการบรรเทาการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศและลดการปนเปื้อนต่อสิ่งแวดล้อม” ซึ่งได้รับการสนับสนุนงบประมาณในการศึกษาจากกองทุนส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม

เอกสารอ้างอิง (References)

- Aschner, M., & Aschner, J. L. (1990). Mercury neurotoxicity: Mechanisms of blood-brain barrier transport. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, 14(2), 169-176.
[https://doi.org/10.1016/S0149-7634\(05\)80217-9](https://doi.org/10.1016/S0149-7634(05)80217-9)
- Agency for Toxic Substances and Disease Registry. (2024). *Toxicological profile for mercury (TP-46)* (CS274127-A). U.S. Department of Health and Human Services.
- Bernhoft, R. A. (2011). Mercury toxicity and treatment: A review of the literature. *Journal of Environmental and Public Health*, 2012(1), Article 460508.
<https://doi.org/10.1155/2012/460508>
- Caravati, E. M., Erdman, A. R., Christianson, G., Nelson, L. S., Woolf, A. D., Booze, L. L., Cobaugh, D. J., Chyka, P. A., Scharman, E. J., Manoguerra, A. S., & Troutman, W. G. (2008). Elemental mercury exposure: An evidence-based consensus guideline for out-of-hospital management. *Clinical Toxicology*, 46(1), 1-21.
<https://doi.org/10.1080/15563650701664731>
- Clarkson, T. W., & Magos, L. (2006). The toxicology of mercury and its chemical compounds. *Critical Reviews in Toxicology*, 36(8), 609-662.
<https://doi.org/10.1080/10408440600845619>
- Cortes, J., Peralta, J., & Díaz-Navarro, R. (2018). Acute respiratory syndrome following accidental inhalation of mercury vapor. *Clinical Case Reports*, 6(8), 1535-1537.
<https://doi.org/10.1002/ccr3.1656>

- CSIL. (2025). *The European market for lighting fixtures* [Report code: EU.6]. CSIL Market Research. Industry Studies and Market Research for the Furniture, Lighting and Furnishings sector.
- Forti, V., Baldé, C. P., Kuehr, R., & Bel, G. (2020). *The Global E-waste Monitor 2020: Quantities, flows and the circular economy potential*. United Nations University.
- Hammerling, J., Kanters, A., Jacobs, B., Franzblau, A., Park, P. K., & Napolitano, L. M. (2020). An unusual cause of severe hypoxemia and acute respiratory distress syndrome. *Chest*, 158(2), e71-e77. <https://doi.org/10.1016/j.chest.2019.11.058>
- Hsu-Kim, H., Kucharzyk, K. H., Zhang, T., & Deshusses, M. A. (2013). Mechanisms regulating mercury bioavailability for methylating microorganisms in the aquatic environment: a critical review. *Environmental Science & Technology*, 47(6), 2441-2456. <https://doi.org/10.1021/es304370g>
- IMARC Group. (2025). *Thailand LED market size, share, trends and forecast by product type, application, installation type, and region, 2026-2034* [Report ID: SR112026A1202]. IMARC Group.
- Iqbal, M., Ozaki, A., Choi, Y., Arima, Y., & Hamashima, T. (2023). Investigation of discharge coefficient of louvre openings in naturally ventilated buildings. *Proceedings of the 11th International Conference on Indoor Air Quality, Ventilation & Energy Conservation in Buildings (IAQVEC2023)* (Article 02030). E3S Web of Conferences. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202339602030>
- Johnson, N. C., Manchester, S., Sarin, L., Gao, Y., Kulaots, I., & Hurt, R. H. (2008). Mercury vapor release from broken compact fluorescent lamps and in situ capture by new nanomaterial sorbents. *Environmental Science & Technology*, 42(15), 5772-5778. <https://doi.org/10.1021/es8004392>
- Lim, H.-E., Shim, J.-J., Lee, S.-Y., Lee, S.-H., Kang, S. X., Jo, J. Y., In, K. H., Kim, H. G., Yoo, S. H., & Kang, K. H. (1998). Mercury inhalation poisoning and acute lung injury. *The Korean Journal of Internal Medicine*, 13(2), 127-130. <https://doi.org/10.3904/kjim.1998.13.2.127>
- Liu, K., Tan, Q., Yu, J., & Wang, M. (2023). A global perspective on e-waste recycling. *Circular Economy*, 2(1), Article 100028. <https://doi.org/10.1016/j.cec.2023.100028>
- Mordor Intelligence. (2026). *Lighting market size and share analysis-growth trends and forecast (2026-2031)*. Mordor Intelligence.
- Morel, F. M. M., Kraepiel, A. M. L., & Amyot, M. (1998). The chemical cycle and bioaccumulation of mercury. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 29, 543-566. <https://doi.org/10.1146/annurev.ecolsys.29.1.543>

- Occupational Safety and Health Administration. (2021). *29 CFR Ch. XVII (7–1–21 edition)*.
<https://www.govinfo.gov/content/pkg/CFR-2021-title29-vol8/pdf/CFR-2021-title29-vol8-sec1926-55.pdf>
- Park, J. D., & Zheng, W. (2012). Human exposure and health effects of inorganic and elemental mercury. *Journal of Preventive Medicine and Public Health*, 45(6), 344-352. <https://doi.org/10.3961/jpmph.2012.45.6.344>
- Sakiyama, N. R. M., Carlo, J. C., Sakiyama, F. I. H., Abdessemed, N., Frick, J., & Garrecht, H. (2024). Impact of wind pressure coefficients on the natural ventilation effectiveness of buildings through simulations. *Buildings*, 14(9), Article 2803.
<https://doi.org/10.3390/buildings14092803>
- Shi, D. S., Charles, M., Beaucham, C., Walker, S., Alarcon, W., Brueck, S. E., Chiu, S. K., & Somerville, N. (2025). Occupational exposure to mercury at an electronics waste and lamp recycling facility-Ohio, 2023. *Morbidity and Mortality Weekly Report*, 74(1), 9-13. <https://doi.org/10.15585/mmwr.mm7401a2>
- Stemp-Morlock, G. (2008). Mercury cleanup for broken CFLs. *Environmental Health Perspectives*, 116(9), A378. <https://doi.org/10.1289/ehp.116-a378>
- U.S. Energy Information Administration. (2020). *Residential energy consumption survey (RECS)*. U.S. Department of Energy.
- U.S. Environmental Protection Agency. (1999). *Compendium of methods for the determination of inorganic compounds in ambient air: Chapter IO-5: Sampling and analysis for atmospheric mercury*. U.S. Environmental Protection Agency.
<https://www.epa.gov/sites/default/files/2015-07/documents/epa-io-5.pdf>
- U.S. Environmental Protection Agency. (2002). *Method 1631, revision E: Mercury in water by oxidation, purge and trap, and cold vapor atomic fluorescence spectrometry*. U.S. Environmental Protection Agency.
https://www.epa.gov/sites/default/files/2015-08/documents/method_1631e_2002.pdf
- U.S. Environmental Protection Agency. (2021). *Mercury compounds*. U.S. Environmental Protection Agency. https://www.epa.gov/system/files/documents/2021-12/mercury-compounds_12-3-2021_final.pdf
- Ullrich, S. M., Tanton, T. W., & Abdrashitova, S. A. (2001). Mercury in the aquatic environment: A review of factors affecting methylation. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 31(3), 241-293.
<https://doi.org/10.1080/20016491089226>

- World Health Organization. (2000). *Air quality guidelines for Europe* (2nd ed.). World Health Organization Regional Publications.
- World Health Organization. (2003). *Elemental mercury and inorganic mercury compounds: Human health aspects*. World Health Organization Regional Publications.
<https://www.who.int/publications/i/item/elemental-mercury-and-inorganic-mercury-compounds-human-health-aspects>
- Yi, Q., Zhang, G., Li, H., Wang, X., Janke, D., Amon, B., Hempel, S., & Amon, T. (2020). Estimation of opening discharge coefficient of naturally ventilated dairy buildings by response surface methodology. *Computers and Electronics in Agriculture*, 169, Article 105224. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105224>