

การประเมินปริมาณโลหะหนักในดินชั้นบนและฝุ่นหลังคาใน 4 เขต ของกรุงเทพมหานครฝั่งธนบุรี

Assessment of Heavy Metal Contents in Top Soil and Roof Dust around Four Districts in Thonburi Area

อุทุมพร สมพงษ์*

Utumporn Sompong*

Received: 25 April 2021, Revised: 20 October 2021, Accepted: 4 January 2022

บทคัดย่อ

ปัจจุบันปัญหาฝุ่นละอองเป็นปัญหาที่สำคัญของประเทศไทย หากเป็นฝุ่นละอองที่มีการปนเปื้อนของโลหะหนักด้วยแล้ว ยิ่งจะทำให้เกิดผลเสียเป็นอย่างมาก งานวิจัยในครั้งนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อตรวจวัดปริมาณโลหะหนักในดินชั้นบนและฝุ่นหลังคาในกรุงเทพมหานคร วิเคราะห์หาปัจจัยที่อาจมีผลต่อปริมาณโลหะหนัก และระบุแหล่งที่มาของโลหะหนัก โดยวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนัก 5 ชนิดที่พบมากในฝุ่นและใช้มากในอุตสาหกรรม ได้แก่ เหล็ก ทองแดง สังกะสี ตะกั่ว และแคดเมียม ในตัวอย่างดินชั้นบนและฝุ่นหลังคาใน 2 ปี คือ พ.ศ. 2563 และ 2564 จากชุมชน 4 เขตของกรุงเทพมหานครในฝั่งธนบุรี ได้แก่ บางขุนเทียน หนองแขม บางบอน และบางแค ซึ่งมีโรงงานอุตสาหกรรมจำนวนมาก ผลการวิจัยพบว่า ปริมาณตะกั่วและแคดเมียมในดินมีค่าเฉลี่ยเป็น 31.80 ± 12.22 และ 0.85 ± 0.36 มก./กก. ซึ่งต่ำกว่ามาตรฐานคุณภาพดินซึ่งไม่กำหนดมาตรฐานของโลหะหนักชนิดอื่นไว้ เช่นเดียวกับในฝุ่นที่ไม่มีมาตรฐานของปริมาณโลหะหนักในประเทศไทย ชนิดของตัวอย่าง พื้นที่ และเวลา มีผลต่อปริมาณตะกั่ว แต่ไม่พบอิทธิพลดังกล่าวในปริมาณโลหะชนิดอื่น ค่าเฉลี่ยปริมาณตะกั่วในฝุ่นมากกว่าในดินอย่างมีนัยสำคัญยิ่ง ($p\text{-value} < 0.0001$) ซึ่งมีค่าเป็น 86.83 ± 40.48 และ 31.80 ± 12.22 มก./กก. ตามลำดับ ค่าเฉลี่ยปริมาณตะกั่วในพ.ศ. 2564 มากกว่า พ.ศ. 2563 อย่างมีนัยสำคัญยิ่ง ($p\text{-value} = 0.0012$) ซึ่งมีค่าเป็น 72.93 ± 64.05 และ 47.61 ± 21.50 มก./กก. ตามลำดับ และค่าเฉลี่ยปริมาณตะกั่วในแต่ละเขตมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญยิ่ง ($p\text{-value} = 0.0003$) โดยเขตบางขุนเทียนมีค่ามากที่สุด คือ 86.95 ± 86.05 มก./กก. ยิ่งไปกว่านั้น ค่าการสะสมตัวของโลหะหนักในฝุ่นเฉลี่ยของสังกะสีในเขตหนองแขมและบางขุนเทียน และของแคดเมียมในเขตบางขุนเทียนพบว่า มีค่ามากกว่า

10

คณะศิลปศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ บพิธพิมุข จักรวรรดิ เขตสัมพันธวงศ์ กรุงเทพฯ 10100

Faculty of Liberal Art, Rajamangala University of Technology Rattanakosin, Bophit Phimuk Chakkrawat, Samphanthawong, Bangkok 10100, Thailand.

* ผู้นิพนธ์ประสานงานไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์ (Corresponding author, e-mail): utumporn.som@rmutr.ac.th

คำสำคัญ: ดินชั้นบน, ฝุ่นหลังคา, โลหะหนัก, ธนบุรี

ABSTRACT

Particular matter (PM) crisis is a currently important issue in Thailand. If the PM contaminates with heavy metals, it will be seriously affected. Therefore, this research aims to determine heavy metal contents in top soil and roof dust in Bangkok to find factors affecting the contents, and to identify sources of the heavy metals. The research method was done by assessing five heavy metal contents that have usually been found in dust and industry, including iron, copper, zinc, lead, and cadmium in samples. They are top soil and roof dust collected in two years of 2020 and 2021 from four districts in Bangkok, Thonburi zone composing of Bangkhuntien, Nongkhaem, Bangbon, and Bangkhae. There are lots of industries in the study areas. We found that the means of lead and cadmium contents in soil were 31.80 ± 12.22 and 0.85 ± 0.36 mg/kg which are less than those of standard quality of soil (No standard for other heavy metal contents in soil and no standard for all heavy metal contents in dust in Thailand). Besides, we found factors affecting lead content are types of samples, areas, and times, but there was no effect on the other heavy metal contents. The mean of lead content in dust was more than that of lead content in top soil comprising 86.83 ± 40.48 and 31.80 ± 12.22 mg/kg, respectively with a very high significance of $p\text{-value} < 0.0001$. The mean of lead content in 2020 was more than that of lead content in 2021 viz. 72.93 ± 64.05 and 47.61 ± 21.50 mg/kg, respectively with a very high significance of $p\text{-value} = 0.0012$. Moreover, the mean of lead content among different areas was highly significant with $p\text{-value} = 0.0003$. Bangkhuntien was the highest in the content of 86.95 ± 86.05 mg/kg. However, enrichment factor of zinc of Nongkhaem and Bangkhuntien and that of cadmium of Bangkhuntien were higher than 10.

Key words: roof dust, top soil, heavy metal, Thonburi

บทนำ

มลพิษทางอากาศ คือ ภาวะอากาศที่มีสารเจือปนอยู่ในปริมาณที่สูงกว่าระดับปกติเป็นเวลานานพอที่จะทำให้เกิดอันตรายแก่มนุษย์สัตว์ พืช หรือทรัพย์สินต่างๆ อาจเกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ ปัญหามลพิษทางอากาศที่รุนแรงมากขึ้นทุกปีจึงเนื่องมาจากฝุ่นเป็นสำคัญ ฝุ่นอาจจะมีการปนเปื้อนของโลหะหนักส่วนใหญ่มาจากอุตสาหกรรมหลายประเภท เช่น แบตเตอรี่ ชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ และหมึกพิมพ์ เป็นต้น โลหะหนักจะเข้าสู่สิ่งมีชีวิตโดย

การดูดซึมผ่านเข้าทางผิวหนัง หรือดูดซึมเข้าสู่เซลล์หรือร่างกาย หรือหากเป็นอนุภาคขนาดใหญ่ จะเข้าสู่กระบวนการย่อยอาหาร ผ่านทางระบบทางเดินอาหาร และถูกดูดซึมเข้าไปยังเนื้อเยื่ออวัยวะต่างๆ ของสิ่งมีชีวิต ซึ่งอาจจะก่อให้เกิดอันตรายหรือเกิดการเจ็บป่วยล้มตายลงได้ โลหะหนักเหล่านี้ไม่สลายตัวในธรรมชาติ สามารถสะสมอยู่ในอากาศ ดิน และน้ำ (Pollution Control Department, 2018)

โลหะหนัก คือ โลหะที่มีความหนาแน่นเกินกว่า 5 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ธาตุในตารางธาตุมี

อยู่ 80 ธาตุที่เป็นโลหะแต่มีโลหะประมาณ 22 ชนิด เท่านั้นที่มีรายงานว่า เป็นพิษต่อคน และการจัดการ ลำดับสารอันตรายโดย The Agency for Toxic Substance and Disease Registry (ATSDR) จัดให้โลหะหนักที่มี อันตรายสูงสุด 3 ชนิด คือปรอท ตะกั่ว และ แคดเมียม (NIDA center for research and development of disaster prevention and management, 2012) แต่โลหะหนักที่ พบมากในฝุ่นและใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรม ได้แก่ สังกะสี แมงกานีส เหล็ก ตะกั่ว และทองแดง (Thongsanit *et al.*, 2015)

Samara and Voutsas (2005) ได้ศึกษาการ กระจายของโลหะหนักในฝุ่นจากถนน เมือง Thessaloniki ประเทศกรีซ ในย่านชุมชนเมืองใกล้กับ เขตอุตสาหกรรม พบการกระจายของโลหะหนัก 3 แบบ คือ อยู่ในอากาศตลอดเวลา ได้แก่ ตะกั่วและ แคดเมียม กระจายในฝุ่นขนาดกลาง ได้แก่ นิกเกิล ทองแดง และแมงกานีส และกระจายในฝุ่นขนาด ใหญ่ ได้แก่ เหล็ก นอกจากนี้ Khashman (2004) ได้ ศึกษาหาปริมาณโลหะหนักในดินและฝุ่นถนนในเขต อุตสาหกรรมในเมือง Karak ประเทศจอร์แดน พบว่า มีการปนเปื้อนของเหล็กมากที่สุด รองลงมา คือ ทองแดง สังกะสี นิกเกิล และตะกั่วตามลำดับ นอกจากนี้ Ozcan and Altundag (2013) ได้ศึกษาปริมาณโลหะหนักใน ตัวอย่างของฝุ่นจากถนนของย่านอุตสาหกรรมในเมือง Sakarya ประเทศตุรกีด้วย Inductively Couple Plasma - Optical Emission Spectrometer (ICP-OES) พบว่า มีปริมาณของแคดเมียม แมงกานีส และสังกะสีมาก ที่สุด

งานวิจัยในครั้งนี้ จึงเป็นการวิเคราะห์ ปริมาณโลหะหนัก 5 ชนิด ได้แก่ เหล็ก ทองแดง สังกะสี ตะกั่ว และแคดเมียมด้วย ICP-OES ในดินชั้น บนและฝุ่นหลังคาใน 2 ปี คือ ปี พ.ศ. 2563 และ 2564 โดยใช้เก็บตัวอย่างดินชั้นบนและฝุ่นหลังคาจาก ชุมชนเขตของกรุงเทพมหานครในฝั่งธนบุรี จำนวน

4 เขต จากทั้งหมด 15 เขต ได้แก่ หนองแขม บางบอน บางขุนเทียน และบางแค ซึ่งอยู่ในเขตชานเมืองที่มี การจราจรหนาแน่นระดับหนึ่ง และมีโรงงาน อุตสาหกรรมจำนวนมาก โดยอุตสาหกรรมที่พบมาก ที่สุดในทุกเขต คือ อุตสาหกรรมผลิตภัณฑ์โลหะ ซึ่ง คิดเป็นร้อยละ 20.87, 18.53, 29.04 และ 21.58 ของ อุตสาหกรรมทั้งหมดในเขตหนองแขม บางบอน บาง ขุนเทียน และบางแค ตามลำดับ (Department of industrial works, 2021) ซึ่งมีโอกาสที่โลหะปนเปื้อนหนักผ่าน ทางอากาศได้ เพื่อวิเคราะห์ปัจจัยที่อาจมีผลต่อ ปริมาณโลหะหนัก ได้แก่ ชนิดของตัวอย่าง พื้นที่ และเวลา และหาค่าการสะสมตัวของโลหะหนักใน ฝุ่น (Enrichment Factor, EF) เพื่อระบุแหล่งที่มาของ โลหะหนักว่าเกิดจากกิจกรรมของมนุษย์หรือเกิดจาก ธรรมชาติ โดย EF เป็นค่าที่สามารถใช้เปรียบเทียบ การเปลี่ยนแปลงของธาตุชนิดต่างๆ ในรูปแบบต่างๆ ที่เปลี่ยนแปลงไปจากที่มีอยู่ในธรรมชาติ ซึ่งเป็นที่ นิยมอย่างแพร่หลายในการอธิบายการเปลี่ยนแปลง ของธาตุต่างๆ ที่มีกิจกรรมของมนุษย์เข้ามาเกี่ยวข้อง เป็นการบอกถึงระดับการปนเปื้อนของธาตุชนิดนั้น (Lawson and Winchester, 1979; Hirunkam, 2013)

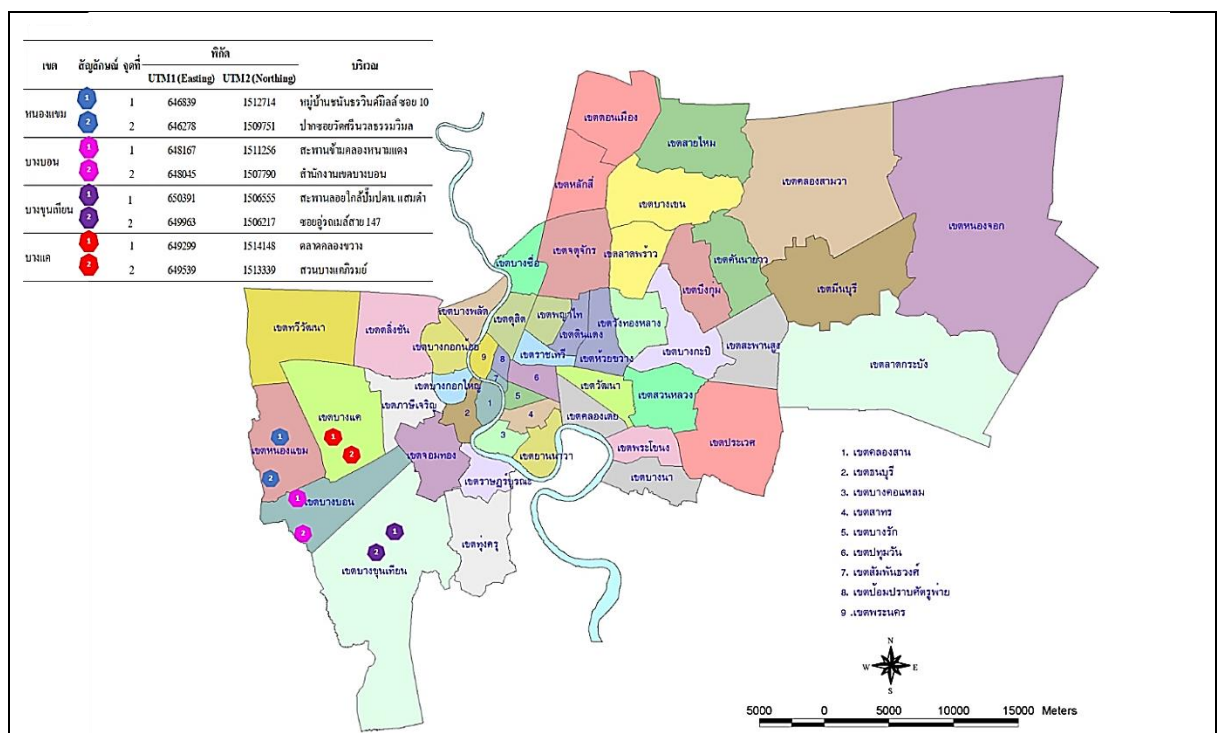
วิธีดำเนินการวิจัย

1. การเก็บตัวอย่างดินชั้นบน

เก็บตัวอย่างดินแบบสุ่มจากชุมชนใน 4 เขต ได้แก่ หนองแขม บางบอน บางขุนเทียน และบางแค ใน 2 ปี ได้แก่ พ.ศ. 2563 และ 2564 ในช่วงเดือน กุมภาพันธ์ ซึ่งสุ่มเดือนเก็บจากเดือนที่มีอากาศแห้ง ฝนตกน้อยซึ่งมีรายงานการทำวิจัยเกี่ยวกับฝุ่น (Meechaiyo, 2010) บันทึกพิกัด GPS (Global Positional System) (Deelaman *et al.*, 2015) ของจุดที่เก็บด้วยแอปพลิเคชัน Handy GPS (free) (BinaryEarth, 2021) ในระบบ UTM (Universal Transverse Mercator) แล้วสร้างเป็นแผนผัง การเก็บตัวอย่างดิน (Anuluxtipun *et al.*, 2003) ดังภาพที่

1 เพื่อใช้เก็บในปีที่ 2 เก็บตัวอย่างดินชั้นบนเขตละ 2 จุด จากการสุ่มในปีแรก และเก็บจุดเดิมในปีที่ 2 (เนื่องจากไม่สามารถสุ่มตัวอย่างแบบกระจายทั่วพื้นที่ในแต่ละเขต) โดยทั้ง 2 จุดที่สุ่ม เลือกจากจุดไม่เปียกและหรือมีน้ำท่วมขัง เก็บให้ห่างจากบ้านเรือนหรืออาคาร พิจารณาจุดที่ไม่มีสิ่งปนเปื้อน และเลือกเก็บในบริเวณที่เป็นแหล่งชุมชน ใกล้ถนนและโรงงานอุตสาหกรรม จุดละ 3 ตัวอย่างแล้วรวมเป็นตัวอย่างเดียว เก็บดินที่ความลึก 0-15 เซนติเมตร โดยใช้

วิธีการเจาะดินแบบคงสภาพ (Hirunkam, 2013; Pollution Control Department, 2015) ตากแดดไว้จนแห้ง ร่อนด้วยตะแกรงขนาด 250 ไมครอน (Hirunkam, 2013) และเก็บใส่ถุงพลาสติกหรือถุงกระดาษที่อุณหภูมิ 4 °C จากนั้น ส่งห้องปฏิบัติการวิจัยสถานะแวดล้อมจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ภายใน 4 วัน (Pollution Control Department, 2015) ด้วยตัวอย่างจำนวน 4 เขต $\times$ 2 ปี $\times$ 2 ซ้ำ = 16 ตัวอย่าง



ภาพที่ 1 บริเวณที่เก็บตัวอย่าง (BMA GIS portal, 2013)

2. การเก็บตัวอย่างฝุ่น

การเก็บตัวอย่างฝุ่นบนหลังคาหรือพื้นผิว ทำได้โดยเก็บฝุ่นที่ตกค้างบนหลังคาหรือพื้นของอาคาร ซึ่งเป็นหลังคากระเบื้องหรือพื้นปูนซีเมนต์ ที่สูงจากพื้นดิน 3 เมตรขึ้นไป เก็บในพื้นที่ 2 ตารางเมตร โดยใช้ตลับเมตรและไม้เมตรวัดและตีตารางพื้นที่ที่จะเก็บตัวอย่าง แล้วเก็บตัวอย่างโดยการกวาดด้วยแปรงหรือไม้กวาดที่ไม่มีส่วนประกอบของโลหะ (Hirunkam, 2013) เก็บตัวอย่างฝุ่นจากชุมชนใน 4 เขต ใน 2 ปี

ได้แก่ พ.ศ. 2563 และ 2564 ในช่วงเดือนกุมภาพันธ์ เช่นเดียวกับการเก็บตัวอย่างดินชั้นบน โดยเก็บในจุดเดียวกันกับที่เก็บตัวอย่างดินในทุกเขต คือ เก็บตัวอย่างเขตละ 2 จุด จุดละ 3 ตัวอย่างแล้วรวมเป็นตัวอย่างเดียว แล้วนำมาร่อนด้วยตะแกรงขนาด 250 ไมครอน เนื่องจากเป็นขนาดของฝุ่นที่พบโลหะหนักในปริมาณที่สูง และมีความเป็นอันตรายต่อสุขภาพหากได้รับเข้าสู่ร่างกาย (Hirunkam, 2013) จากนั้น เก็บใส่ถุงพลาสติกหรือถุงกระดาษที่อุณหภูมิ 4 °C ส่งห้องปฏิบัติการวิจัย

สภาวะแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ภายใน 4 วัน (Pollution Control Department, 2015) ด้วยตัวอย่าง จำนวน 4 เขต $\times$ 2 ปี $\times$ 2 ซ้ำ = 16 ตัวอย่าง

3. การวิเคราะห์หาปริมาณโลหะหนักในตัวอย่าง

ส่งตัวอย่างดินและฝุ่นไปวิเคราะห์หาปริมาณ โลหะหนัก 5 ชนิด ได้แก่ เหล็ก ทองแดง สังกะสี ตะกั่ว และแคดเมียม ที่ห้องปฏิบัติการสถาบันวิจัยสภาวะแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ซึ่งใช้วิธีการของ Standard methods for the examination of water and wastewater 22nd edition ปี 2012 (APHA-AWWA-WEF (American Public Health Association - American Water Works association - Water Environment Federation), 2012) โดยจะเตรียมสารละลายมาตรฐานของโลหะหนักที่มีความเข้มข้นต่างกัน 5 ความเข้มข้น ได้แก่ 5, 10, 50, 100, 500 และ 1,000 มก./ล. จากนั้น นำมาหาค่าการคายแสง (Emission) ของสารละลายมาตรฐาน ด้วย ICP-OES ยี่ห้อ Analytik Jena รุ่น PQ 9000 elite ด้วยอัตราการไหล 1 มล./วินาที โดยใช้ก๊าซ Plasma, Auxiliary, และ Nebulizer 12, 0.5 และ 0.5 ล./นาที่ ตามลำดับ และกำลังไฟ 1,200 วัตต์ แล้วสร้างกราฟมาตรฐานระหว่างค่าการคายแสงและความเข้มข้น จากนั้น เตรียมการย่อยตัวอย่าง ตัวอย่างละ 2 ซ้ำ โดยย่อยตัวอย่างดินและฝุ่นเหมือนกันตามวิธีมาตรฐาน ของ USEPA 3051A (USEPA, 2007) โดยการใช้ ตัวอย่างประมาณ 0.5 กรัม ชั่งน้ำหนักที่ถูกต้องด้วย ทัศนียม 4 ตำแหน่งไว้ นำตัวอย่างมาย่อยด้วยเครื่อง ไมโครเวฟยี่ห้อ MAR รุ่น 1600 และกรดไนตริก เข้มข้น 68% โดยใช้กำลังไฟ 1500 วัตต์ ด้วยอุณหภูมิ 0-250 °C เป็นเวลา 30 นาที และ 250 °C เป็นเวลา 30 นาที จากนั้น ทิ้งให้อุณหภูมิต่ำกว่า 75 °C จากนั้น นำมากรองและปรับปริมาตร แล้วจึงนำไปวัดค่าการ คายแสง ด้วย ICP-OES ด้วยสภาวะเดียวกับการทำ กราฟมาตรฐาน การคำนวณหาปริมาณโลหะหนักใน

ตัวอย่างดินและฝุ่นทำได้โดยนำค่าการคายแสงของ ตัวอย่างที่วัดได้เทียบกับกราฟมาตรฐาน

4. การวิเคราะห์ปัจจัยที่อาจมีผลต่อปริมาณโลหะหนัก

ปัจจัยที่อาจมีผลต่อปริมาณ โลหะหนัก 5 ชนิดในดินและฝุ่น ได้แก่ ชนิดตัวอย่าง พื้นที่ และ เวลา ปริมาณโลหะหนักดังกล่าวจะถูกนำมาวิเคราะห์ ความแปรปรวน (Analysis of variance, ANOVA) ด้วยแผนการทดลองแบบ Factorial in Completely Randomized Design (CRD) ของปัจจัยและปฏิกิริยา สัมพันธ์ระหว่างปัจจัย และเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยทรีท เมนต์ของปัจจัยที่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ทางสถิติด้วย Least significant different (LSD) ด้วย R program version 4.0.4 (R Core Team, 2021) โดย ค่าสถิติ F ที่คำนวณได้จากโปรแกรมจะตอบสมมติฐาน ของการวิจัย ซึ่งหากค่าสถิติ F ที่คำนวณได้มีค่ามากกว่า ค่าวิกฤติที่ระดับนัยสำคัญต่างๆ ได้แก่ 0.05, 0.01 และ 0.001 จะหมายถึง ค่าเฉลี่ยทรีทเมนต์ของปัจจัยนั้นๆ มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ หรือ ปัจจัยนั้นมีผลต่อปริมาณโลหะหนัก หรืออาจพิจารณา จากค่า *p-value* ที่น้อยกว่า 0.05, 0.01 และ 0.001 ก็ได้ เช่นเดียวกัน

5. การคำนวณหาการสะสมตัวของโลหะหนักใน ฝุ่น (Enrichment factor; EF)

การคำนวณหา EF ทำเพื่อบอกระดับการ ปนเปื้อนของโลหะหนักที่เกิดขึ้นว่ามาจากกิจกรรม ของมนุษย์หรือมาจากธรรมชาติ ซึ่งจะใช้ธาตุที่อ้างอิง ที่เป็นโลหะที่พบปริมาณมากในธรรมชาติ ได้แก่ เหล็ก ซิลิกอน ไททานเนียม และอลูมิเนียมเป็นส่วนใหญ่ (Lawson and Winchester, 1979; Hirunkam, 2013) โดยการเปรียบเทียบ สัดส่วนของโลหะหนักในธรรมชาติและฝุ่น ซึ่งคำนวณ จากสมการข้างล่างโดยการหาค่า EF ในงานวิจัยใน ครั้งนี้เป็นการเทียบระหว่างปริมาณโลหะหนักในฝุ่น กับปริมาณโลหะในดิน จึงใช้ปริมาณโลหะในดินแทน

crust ที่เป็นค่า background ซึ่งเป็นค่าที่แสดงดิน เฉพาะในพื้นที่ทำวิจัย

$$EF(X) = \frac{(\frac{X}{Ref})_{dust}}{(\frac{X}{Ref})_{crust}}$$

โดยที่ EF(X) คือ ค่า Enrichment factor ของโลหะหนักใดๆ

Ref คือ ปริมาณ โลหะหนัก อ้างอิงซึ่งใช้ปริมาณของเหล็ก

$(\frac{X}{Ref})_{dust}$ คือ อัตราส่วน โลหะหนัก ในฝุ่น

$(\frac{X}{Ref})_{crust}$ คือ อัตราส่วน โลหะหนัก ในดิน

โดยที่ ค่า EF บ่งบอกถึงระดับการปนเปื้อนของโลหะหนักดังนี้ (Yongming *et al.*, 2006)

EF < 2 หมายถึง ระดับ ต่ำ (Deficiency to minimal enrichment)

EF = 2 - 5 หมายถึง ระดับปานกลาง (Moderate enrichment)

EF = 5 - 20 หมายถึง ระดับ สูง (Significant enrichment)

EF = 20 - 40 หมายถึง ระดับสูงมาก (Very high enrichment)

EF > 40 หมายถึง ระดับสูงมาก เกินไป (Extremely high enrichment)

ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล

1. ปริมาณโลหะหนักในดินชั้นบน

ปริมาณเหล็กในดินใน 4 เขตของ กรุงเทพมหานครฝั่งธนบุรีใน 2 ปีที่ทำวิจัยมีค่าเฉลี่ย เป็น $17,638 \pm 919.09$ มก./กก. ดังตารางที่ 1 ซึ่งมากกว่ารายงานจากงานวิจัยของ Hirunkam (2013) ที่วิเคราะห์ความเข้มข้นและจัดกลุ่มโลหะหนักจากฝุ่นใน 10 พื้นที่ในจังหวัดนครราชสีมาที่พบปริมาณ

เหล็กในดินในช่วง 2,882 - 13,294 มก./กก. หรือคิดเป็นค่าเฉลี่ย 7,829 มก./กก. ทั้งนี้การที่ปริมาณเหล็กในดินที่มีค่ามากเป็นหลักหมื่นมก./กก. ในงานวิจัยดังกล่าว น่าจะมีสาเหตุมาจากตัวอย่างที่ใช้อยู่ในเมืองหลวงที่มีการจราจรหนาแน่นและมีโรงงานอุตสาหกรรมประเภทที่เกี่ยวข้องกับเหล็กอยู่ ได้แก่ โรงงานผลิตภัณฑ์โลหะและโรงงานผลิตยานพาหนะและอุปกรณ์ ซึ่งมีมากที่สุดเป็นอันดับ 1 และ 3 ใน 4 เขตที่ทำวิจัย และยังมากกว่างานวิจัยของ Karuchit and Hirunkam (2015) ที่ศึกษาปริมาณโลหะหนัก 9 ชนิดในดิน ฝุ่นหลังคา และฝุ่นละอองใน 10 ชุมชนในจังหวัดนครราชสีมา ที่พบค่ามัธยฐานของปริมาณเหล็กในดินเป็น 7,553 มก./กก.

ปริมาณทองแดงในดินใน 4 เขตของ กรุงเทพมหานครฝั่งธนบุรีใน 2 ปีที่ทำวิจัย มีค่าเฉลี่ย เป็น 176.22 ± 197.34 มก./กก. ดังตารางที่ 1 ซึ่งมีค่ามากกว่างานวิจัยของ Hirunkam (2013) ที่พบปริมาณทองแดงในช่วง 0 - 3.100 มก./กก. หรือคิดเป็นค่าเฉลี่ย 2.110 มก./กก. และมีค่ามากกว่าค่าเฉลี่ยของปริมาณทองแดงในดินของประเทศไทย (Zarcinas *et al.*, 2004) ที่ระบุว่ามีค่า 14.10 มก./กก. ยิ่งไปกว่านั้นยังมากกว่างานวิจัยของ Li and Feng (2012) ที่ศึกษาปริมาณโลหะหนัก 10 ชนิดในดินที่เมือง Weinan ในประเทศจีน ซึ่งพบปริมาณทองแดงอยู่ในช่วง 14.60-34.70 มก./กก.

ปริมาณสังกะสีในดินใน 4 เขตของ กรุงเทพมหานครฝั่งธนบุรีใน 2 ปีที่ทำวิจัยมีค่าเฉลี่ย เป็น 221.40 ± 191.82 มก./กก. ดังตารางที่ 1 ซึ่งมีค่ามากกว่างานวิจัยของ Hirunkam (2013) ที่พบปริมาณสังกะสีในช่วง 1.340 - 27.09 มก./กก. หรือคิดเป็นค่าเฉลี่ย 11.80 มก./กก. และมากกว่าค่าเฉลี่ยของ

ปริมาณสังกะสีในดินของประเทศไทย (Zarcinas *et al.*, 2004) ที่ระบุว่ามีค่า 23.90 มก./กก. ยิ่งไปกว่านั้นยังมากกว่างานวิจัยของ Li and Feng (2012) ที่พบปริมาณสังกะสีอยู่ในช่วง 44.50 - 196.80 มก./กก.

ปริมาณตะกั่วในดินใน 4 เขตของกรุงเทพมหานครฝั่งธนบุรีใน 2 ปีที่ทำวิจัย มีค่าเฉลี่ยเป็น 31.80 ± 12.22 มก./กก. ดังตารางที่ 1 ซึ่งมีค่ามากกว่างานวิจัยของ Hirunkam (2013) ที่พบปริมาณตะกั่วในช่วง 1.710 - 17.56 มก./กก. หรือคิดเป็นค่าเฉลี่ย 6.44 มก./กก. และมากกว่าค่าเฉลี่ยของปริมาณตะกั่วในดินของประเทศไทย (Zarcinas *et al.*, 2004) ที่ระบุว่ามีค่า 17.50 มก./กก. แต่น้อยกว่างานวิจัยของ Li and Feng (2012) ที่พบปริมาณตะกั่วอยู่ในช่วง 19.00 - 89.5 มก./กก. และน้อยกว่าค่ามาตรฐานคุณภาพดินเพื่อการอยู่อาศัยและเกษตรกรรม และเพื่อการอื่นนอกเหนือจากการอยู่อาศัยและเกษตรกรรมที่มีค่าเป็น 400 และ 750 มก./กก. ตามลำดับ ดังประกาศคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ ฉบับที่ 25 (Pollution control Department, 2015)

ปริมาณแคดเมียมในดินใน 4 เขตของกรุงเทพมหานครฝั่งธนบุรีใน 2 ปีที่ทำมีค่าเฉลี่ยเป็น 0.85 ± 0.36 มก./กก. ดังตารางที่ 1 ซึ่งมีค่ามากกว่างานวิจัยของ Hirunkam (2013) ที่พบปริมาณตะกั่วในช่วง 0.0400 - 0.1100 มก./กก. หรือคิดเป็นค่าเฉลี่ย 0.0700 มก./กก. และมากกว่าค่าเฉลี่ยของปริมาณแคดเมียมในดินของประเทศไทย (Zarcinas *et al.*, 2004) ที่ระบุว่า มีค่า 0.0300 มก./กก. แต่น้อยกว่าค่ามาตรฐานคุณภาพดินเพื่อการอยู่อาศัยและเกษตรกรรม และเพื่อการอื่นนอกเหนือจากการอยู่อาศัยและเกษตรกรรมที่มีค่าเป็น 37 และ 810 มก./กก. ตามลำดับดังประกาศคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ ฉบับที่ 25 (Pollution control Department, 2015)

2. ปริมาณโลหะหนักในฝุ่นหลังคา

ปริมาณเหล็กในฝุ่นใน 4 เขตของกรุงเทพมหานครฝั่งธนบุรีใน 2 ปีที่ทำวิจัยมีค่าเฉลี่ยเป็น $22,846 \pm 5,888$ มก./กก. ดังตารางที่ 1 ซึ่งมีค่ามากกว่างานวิจัยของ Hirunkam (2013) ที่พบปริมาณเหล็กในช่วง 6,099 - 24,129 มก./กก. หรือคิดเป็นค่าเฉลี่ย 11,528 มก./กก. และมากกว่างานวิจัยของ Srithawirat and Latif (2015) ที่ศึกษาปริมาณของโลหะหนัก 5 ชนิดเช่นเดียวกับในการวิจัยในครั้งนี้ในฝุ่นบนพื้นผิวบนอาคารบริเวณถนนหลักและถนนรองของจังหวัดพิษณุโลก ที่พบว่า มีปริมาณเหล็กบริเวณถนนหลักและถนนรองอยู่ในช่วง 4,384.2 - 8,376.4 และ 4,631.4 - 7,582 มก./กก. ตามลำดับ ยิ่งไปกว่านั้น ยังมากกว่าค่ามัธยฐานของปริมาณเหล็กในฝุ่นหลังคา ที่ Karuchit and Hirunkam (2015) ศึกษาที่พบว่าเป็น 13,444 มก./กก. อย่างไรก็ตาม ค่าเฉลี่ยปริมาณเหล็กในงานวิจัยครั้งนี้ยังน้อยกว่างานวิจัยของ Srithawirat and Chimjan (2017) ที่ศึกษาปริมาณโลหะหนัก 5 ชนิดเช่นเดียวกับงานวิจัยในครั้งนี้ฝุ่นที่ตกลงบ้านเรือนทั้งภายในบ้านและภายนอกบ้านในชุมชนเกษตรกรรมในจังหวัดสุโขทัย ที่พบค่าเฉลี่ยเป็น $35,091 \pm 7,159$ และ $37,064 \pm 5,955$ มก./กก. ตามลำดับ นอกจากนี้ การที่ปริมาณเหล็กในฝุ่นมีค่ามากเป็นหลักหมื่นมก./กก. ในงานวิจัยในครั้งนี้ก็น่าจะมีสาเหตุเช่นเดียวกันกับในดิน คือ ตัวอย่างที่ให้อยู่ในเมืองหลวงที่มีการจราจรหนาแน่นและมีโรงงานอุตสาหกรรมประเภทที่เกี่ยวข้องกับเหล็กอยู่ได้แก่ โรงงานผลิตภัณฑ์โลหะและโรงงานผลิตยานพาหนะและอุปกรณ์ ซึ่งมีมากที่สุดเป็นอันดับ 1 และ 3 ใน 4 เขตที่ทำวิจัย ยิ่งไปกว่านั้น เมื่อเปรียบเทียบผลการวิจัยกับงานวิจัยของ Khashman (2004) ได้ศึกษาหาปริมาณโลหะหนักในดินและฝุ่นถนนในเขตอุตสาหกรรมในเมือง Karak ประเทศออร์แดน พบว่า มีการปนเปื้อนของเหล็กมากที่สุด และ Samara

and Voutsas (2005) ที่ศึกษาการกระจายของโลหะหนักในฝุ่นจากถนน เมือง Thessaloniki ประเทศกรีซ ในย่านชุมชนเมืองใกล้กับเขตอุตสาหกรรม พบการกระจายของเหล็กฝุ่นละอองขนาดใหญ่ ซึ่งก็สอดคล้องกับผลการวิจัยในครั้งนี้

ปริมาณทองแดงในฝุ่นใน 4 เขตของกรุงเทพมหานครฝั่งธนบุรีใน 2 ปีที่ทำวิจัยมีค่าเฉลี่ยเป็น 180.29 ± 50.50 มก./กก. ดังตารางที่ 1 ซึ่งมีค่ามากกว่าจากงานวิจัยของ Hirunkam (2013) ที่พบปริมาณทองแดงในช่วง 29.99 - 182.37 มก./กก. หรือคิดเป็นค่าเฉลี่ย 96.99 มก./กก. และมากกว่าค่ามาตรฐานของปริมาณทองแดงในฝุ่นหลังคาที่ Karuchit and Hirunkam (2015) ศึกษาที่พบว่าเป็น 17.3 มก./กก.

ปริมาณสังกะสีในฝุ่นใน 4 เขตของกรุงเทพมหานครฝั่งธนบุรีใน 2 ปีที่ทำวิจัยมีค่าเฉลี่ยเป็น $1,702 \pm 1,473$ มก./กก. ดังตารางที่ 1 ซึ่งมีค่ามากกว่าจากงานวิจัยของ Hirunkam (2013) ที่พบปริมาณสังกะสีในช่วง 385.9 - 1,302 มก./กก. หรือคิดเป็นค่าเฉลี่ย 781.93 มก./กก. และมากกว่าค่ามาตรฐานของปริมาณสังกะสีในฝุ่นหลังคาที่ Karuchit and Hirunkam (2015) ศึกษาที่พบว่าเป็น 44 มก./กก. แต่น้อยกว่างานวิจัยของ Figueroa *et al.* (2007) ที่ศึกษาปริมาณโลหะ

หนัก 10 ชนิดในฝุ่นหลังของโรงเรียนอนุบาล 25 แห่งในเมือง Sonora ทางตอนเหนือของประเทศเม็กซิโก ซึ่งพบค่าเฉลี่ยปริมาณสังกะสี 2,012 มก./กก.

ปริมาณตะกั่วในฝุ่นใน 4 เขตของกรุงเทพมหานครฝั่งธนบุรีใน 2 ปีที่ทำวิจัยมีค่าเฉลี่ยคือ 86.83 ± 40.48 มก./กก. ดังตารางที่ 1 ซึ่งต่ำกว่าจากงานวิจัยของ Hirunkam (2013) ที่พบปริมาณตะกั่วในช่วง 408.5 - 2,111 มก./กก. หรือคิดเป็นค่าเฉลี่ย 1,127 มก./กก. และงานวิจัยของ Figueroa *et al.* (2007) พบค่าเฉลี่ยปริมาณตะกั่ว 101.88 มก./กก. แต่มากกว่าค่ามาตรฐานของปริมาณตะกั่วในฝุ่นหลังคาที่ Karuchit and Hirunkam (2015) ศึกษาที่พบว่าเป็น 10 มก./กก.

ในขณะที่ปริมาณแคดเมียมในฝุ่นใน 4 เขตของกรุงเทพมหานครฝั่งธนบุรีใน 2 ปีที่ทำวิจัยมีค่าเฉลี่ยเป็น 7.02 ± 9.05 มก./กก. ดังตารางที่ 1 ซึ่งสูงกว่าจากงานวิจัยของ Hirunkam (2013) ที่พบปริมาณแคดเมียมในช่วง 0.5400 - 2.4700 มก./กก. หรือคิดเป็นค่าเฉลี่ย 1.4200 มก./กก. และมากกว่าค่ามาตรฐานของปริมาณแคดเมียมในฝุ่นหลังคาที่ Karuchit and Hirunkam (2015) ศึกษาที่พบว่าเป็น 0.2 มก./กก. แต่น้อยกว่างานวิจัยของ Figueroa *et al.* (2007) พบค่าเฉลี่ยปริมาณแคดเมียม 28.38 มก./กก.

ตารางที่ 1 ค่าเฉลี่ยปริมาณโลหะหนักในดินชั้นบนและผืนหลังคาน 4 เขตของกรุงเทพมหานครฝั่งธนบุรี

เขต	ปีที่	ค่าเฉลี่ยปริมาณโลหะหนัก (มก./กก.)									
		เหล็ก		ทองแดง		สังกะสี		ตะกั่ว		แคดเมียม*	
		ดินชั้นบน	ผืนหลังคา	ดินชั้นบน	ผืนหลังคา	ดินชั้นบน	ผืนหลังคา	ดินชั้นบน	ผืนหลังคา	ดินชั้นบน	ผืนหลังคา
หนองแขม	1	18,360	22,827	66.80	112.00	40.28	378.50	19.91	37.78	BDL	0.32
	2	18,339	16,768	19.14	279.88	53.02	1,175	19.37	58.47	BDL	0.88
ค่าเฉลี่ย		18,350±14.85	19,798±4,284	42.97±33.70	195.94±118.71	46.65±9.01	776.75±563.21	19.64±0.38	48.12±14.63	BDL	0.60±0.40
บางบอน	1	18,692	36,194	209.00	200.00	372.00	427.50	42.92	87.25	0.47	0.29
	2	16,859	26,511	716.13	136.00	596.00	2,303.00	53.99	92.76	1.78	0.69
ค่าเฉลี่ย		17,776±1,296	31,353±6,847	462.57±358.60	168.00±45.25	484.0±158.39	1,365±1,326	48.46±7.83	90.01±3.90	1.13±0.93	0.49±0.28
บางขุนเทียน	1	22,006	16,338	274.00	133.43	377.00	503.00	44.55	71.73	0.44	0.49
	2	10,609	20,032	28.88	103.36	96.48	7,243	19.52	212.00	BDL	39.01
ค่าเฉลี่ย		16,308±8,059	18,185±2,612	151.44±173.33	118.4±21.26	236.74±198.36	3,873±4,766	32.04±17.70	141.87±99.19	0.44±0.00	19.75±27.24
บางแค	1	18,766	20,744	61.63	98.61	118.08	374.00	25.92	35.48	0.44	4.71
	2	17,476	23,354	34.20	379.00	118.32	1,213	28.19	99.19	1.55	9.80
ค่าเฉลี่ย		18,121±912.7	22,049±1,846	47.92±19.40	238.8±198.27	118.20±0.17	793.50±593.26	27.06±1.61	67.34±45.05	1.00±0.78	7.26±3.60
ค่าเฉลี่ยทุกเขต		17,638±919.09	22,846±5,888	176.22±197.34	180.29±50.50	221.40±191.82	1,702±1,473	31.80±12.22	86.83±40.48	0.85±0.36	7.02±9.05

หมายเหตุ *BDL คือ Below detection limit หมายถึง ปริมาณ โลหะหนักที่ตรวจวิเคราะห์ได้ต่ำกว่าค่าต่ำสุดที่เครื่องมือจะตรวจวัดได้

3. ปัจจัยที่อาจมีผลกับปริมาณโลหะหนัก

การวิเคราะห์ปัจจัยที่อาจมีผลต่อปริมาณโลหะหนัก ได้แก่ ชนิดของตัวอย่าง พื้นที่ และเวลา โดยการวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of variance, ANOVA) ของปัจจัยและปฏิริยาสัมพันธ์ของปัจจัย ด้วยแผนการทดลองแบบ Factorial in CRD และเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยที่พหุคูณของปัจจัยที่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติด้วย Least significant different (LSD) พบว่า ชนิดของตัวอย่าง ได้แก่ ดิน และฝุ่น พื้นที่ที่ทำวิจัย ได้แก่ 4 เขตของกรุงเทพมหานครฝั่งธนบุรี และเวลาที่ทำวิจัย ได้แก่ ปี พ.ศ. 2563 และ 2564 นั้น มีผลต่อปริมาณของตะกั่วเท่านั้น โดยไม่มีผลต่อปริมาณโลหะหนักอื่นที่ทำวิจัยอันได้แก่ เหล็ก ทองแดง สังกะสี และแคดเมียม ดังตารางที่ 2 โดยค่าเฉลี่ยโดยปริมาณตะกั่วในฝุ่นมีค่าเป็น $86.83^a \pm 40.48$ มก./กก. ซึ่งมีค่ามากกว่าในดินซึ่งมีค่าเป็น $31.80^b \pm 12.22$ มก./กก. อย่างมีนัยสำคัญยิ่ง ($p < 0.0001$) ด้วยค่าสถิติ $F = 65.340$ ดังตารางที่ 2 ดังนั้น ชนิดของตัวอย่างจึงเป็นปัจจัยที่สำคัญที่มีผลต่อปริมาณตะกั่ว เนื่องจากค่าสถิติ F ที่มากกว่าค่าวิกฤติที่ระดับนัยสำคัญ 0.001 ไปมาก หรือพิจารณาจาก p -value ที่น้อยกว่า 0.001 ไปมากเช่นเดียวกัน อย่างไรก็ตาม ผลดังกล่าวคล้ายกับงานวิจัยของ Hirunkam (2013) ที่พบค่าเฉลี่ยปริมาณตะกั่วในฝุ่นคิดเป็น 1,127 มก./กก. ซึ่งมีค่ามากกว่าในดินที่มีค่าเป็น 6.44 มก./กก.

เวลา ได้แก่ ปีที่ 1 (พ.ศ. 2563) และปีที่ 2 (พ.ศ. 2564) มีผลต่อค่าเฉลี่ยปริมาณตะกั่ว โดยค่าเฉลี่ยปริมาณตะกั่วในปีที่ 2 ที่มีค่าเป็น $72.93^a \pm 64.05$ มก./กก. มีค่ามากกว่าในปีที่ 1 ที่มีค่าเป็น $47.61^b \pm 21.50$ มก./กก. อย่างมีนัยสำคัญยิ่ง (p -value = 0.0012) ด้วยค่า $F = 16.010$ ดังตารางที่ 2 แต่ยังไม่พบรายงานการศึกษาปริมาณโลหะหนักในดินและฝุ่นในปัจจัยเรื่องเวลาพบแต่ในส่วน of ปริมาณฝุ่นขนาดเล็ก (PM 10) ในงานวิจัยของ Srithawirat and Sassriruang (2014) ที่

ศึกษาปริมาณฝุ่นขนาดเล็ก (PM 10) ในที่พักอาศัยในอำเภอเมืองจังหวัดพิษณุโลก ที่พบว่าปริมาณฝุ่นขนาดเล็กที่แตกต่างกันตามเดือนที่เก็บตัวอย่างมาตรวจวัดภายใน 6 เดือน ตั้งแต่เดือนมกราคมถึงเดือนมิถุนายนในปี พ.ศ. 2557 อยู่ในช่วง 90.5 - 147.8 มก./ลบ.ม.

พื้นที่ ได้แก่ เขตหนองแขม บางบอน บางขุนเทียน และบางแค มีผลต่อค่าเฉลี่ยปริมาณตะกั่ว ค่าเฉลี่ยของปริมาณตะกั่วแยกตามพื้นที่ที่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญยิ่ง ด้วยค่า $F = 11.905$ ที่ p -value = 0.0003 ดังตารางที่ 2 โดยค่าเฉลี่ยปริมาณตะกั่วในเขตบางขุนเทียนมีค่าสูงสุด คือ $86.95^a \pm 86.05$ มก./กก. รองลงมาคือ ของเขตบางบอน คือ $69.23^{ab} \pm 24.52$ มก./กก. และของเขตบางแค คือ $51.03^{bc} \pm 32.55$ มก./กก. ค่าเฉลี่ยปริมาณตะกั่วที่น้อยที่สุดในเขตหนองแขม คือ $33.88^c \pm 18.49$ มก./กก. ดังตารางที่ 2 ซึ่งคล้ายกับผลจากงานวิจัยของ Hirunkam (2013) ที่วิเคราะห์ความเข้มข้นของตะกั่วจากดินและฝุ่นใน 10 พื้นที่ในจังหวัดนครราชสีมาที่พบสัมประสิทธิ์การแปรผันของค่าเฉลี่ยปริมาณตะกั่วในแต่ละพื้นที่ในดินและฝุ่นเป็น 0.74 และ 0.42 ตามลำดับ

ส่วนของปฏิริยาสัมพันธ์ (interaction) ระหว่างปัจจัยทั้งสาม ได้แก่ ชนิดของตัวอย่าง พื้นที่ และเวลา ในแผนการทดลองแบบ factorial in CRD นั้น ไม่พบปฏิริยาสัมพันธ์ทางสถิติของ 3 ปัจจัยดังกล่าวในทั้ง 4 ปริมาณโลหะหนัก ได้แก่ เหล็ก ทองแดง สังกะสี และแคดเมียม ดังตารางที่ 2 แต่พบปฏิริยาสัมพันธ์ในปริมาณตะกั่วอย่างมีนัยสำคัญยิ่ง ได้แก่ ปฏิริยาสัมพันธ์ระหว่างชนิดของตัวอย่างและพื้นที่ ด้วยค่า $F = 7.382$ (p -value = 0.0029) ปฏิริยาสัมพันธ์ระหว่างชนิดของตัวอย่างและเวลาด้วยค่า $F = 19.810$ (p -value = 0.0005) และ ปฏิริยาสัมพันธ์ระหว่างชนิดของตัวอย่างเวลา และพื้นที่ ด้วยค่า $F = 7.590$ (p -value = 0.0026) ดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนและการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยทรีทเมนต์

ปัจจัย	ชนิดของปัจจัย	ค่าเฉลี่ยปริมาณโลหะ (มก./กก.)				
		เหล็ก	ทองแดง	สังกะสี	ตะกั่ว	แคดเมียม
ชนิดของตัวอย่าง	ดินชั้นบน	17,638±919.09	176.22±197.34	221.40±191.82	31.80^b±12.22	0.85±0.36
	ผืนหลังคา	22,846±5,888	180.29±50.50	1,702±1,473	86.83^a±40.48	7.02±9.05
	ค่าสถิติ F	3.641 ^{ns}	0.002 ^{ns}	2.851 ^{ns}	65.340***	1.658 ^{ns}
	p-value	0.0757	0.9670	0.1120	<0.0001	0.2170
เวลา	ปีที่ 1	22,599±6,214	146.80±73.08	334.40±145.20	47.61^b±21.50	0.62±0.76
	ปีที่ 2	18,743±4,761	212.07±241.00	1,600±2,406	72.93^a±64.05	6.60±13.48
	ค่าสถิติ F	1.206 ^{ns}	0.498 ^{ns}	2.117 ^{ns}	16.010**	1.527 ^{ns}
	p-value	0.2894	0.4910	0.1660	0.0012	0.2360
พื้นที่	หนองแขม	19,073±2,611	119.46±113.47	411.70±532.40	33.88^c±18.49	0.418±0.310
	บางบอน	24,564±8,811	315.28±269.20	924.50±923.59	69.23^{ab}±24.52	0.615±0.313
	บางขุนเทียน	17,246±5,010	134.92±102.61	2,054±3,462	86.95^a±86.05	9.94±19.34
	บางแค	21,802±3,509	148.09±156.31	477.08±502.00	51.03^{bc}±32.55	3.42±4.35
	ค่าสถิติ F	1.300 ^{ns}	0.919 ^{ns}	0.761 ^{ns}	11.905***	0.849 ^{ns}
	p-value	0.3110	0.4560	0.5340	0.0003	0.4880
ชนิดของตัวอย่าง x พื้นที่	ค่าสถิติ F	1.084 ^{ns}	1.339 ^{ns}	0.674 ^{ns}	7.382**	0.887 ^{ns}
	p-value	0.3859	0.2990	0.5810	0.0029	0.4700
ชนิดของตัวอย่าง x เวลา	ค่าสถิติ F	0.055 ^{ns}	0.048 ^{ns}	2.153 ^{ns}	19.810***	1.403 ^{ns}
	p-value	0.8183	0.8300	0.1630	0.0005	0.2550
พื้นที่ x เวลา	ค่าสถิติ F	0.243 ^{ns}	0.629 ^{ns}	0.581 ^{ns}	2.893 ^{ns}	0.862 ^{ns}
	p-value	0.8649	0.6080	0.6370	0.0700	0.4820
ชนิดของตัวอย่าง x พื้นที่ x เวลา	ค่าสถิติ F	0.935 ^{ns}	1.148 ^{ns}	0.727 ^{ns}	7.590**	0.902 ^{ns}
	p-value	0.4480	0.3620	0.5520	0.0026	0.4630

หมายเหตุ ^{ns} หมายถึง ไม่มีความแตกต่างทางสถิติ, ** หมายถึง แตกต่างทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญ 0.01, *** หมายถึง แตกต่างทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญ 0.001, และ ตัวอักษร ^a, ^b และ ^c แสดงถึงระดับความมากน้อยของค่าเฉลี่ยทรีทเมนต์ โดย ^a น้อยที่สุด รองลงมาคือ ^b และ ^c ตามลำดับ

5. การคำนวณหาการสะสมตัวของโลหะหนักในฝุ่น (EF)

หากพิจารณาค่าเฉลี่ยของ EF ของปริมาณโลหะหนักพบว่าค่าเฉลี่ย EF ของสังกะสีในเขตหนองแขมและบางขุนเทียนมีมากกว่า 10 ซึ่งงานวิจัยของ Mesa-Figueroa *et al.* (2007) Joshi *et al.* (2009) และ Hirunkam (2013) ระบุว่า หากค่า EF > 10 โลหะหนักที่พบในฝุ่นนั้นมีแนวโน้มที่จะมาจากกิจกรรมที่เกี่ยวข้องกับมนุษย์ โดยมีค่าเป็น 15.90 ± 11.79 และ 39.76 ± 26.85

ตามลำดับ ดังตารางที่ 3 ซึ่งคล้ายกับงานวิจัยของ Hirunkam (2013) ที่พบ EF ของสังกะสีใน 10 พื้นที่ของจังหวัดนครราชสีมาอยู่ในช่วง 17.15 - 303.2 ซึ่งมีค่ามากกว่า 10 ไปมากในทุกพื้นที่ และงานวิจัยของ Karuchit and Hirunkam (2015) ที่พบว่า EF ของสังกะสีอยู่ในช่วง 0.75 - 16.14 แสดงว่าปริมาณสังกะสีในเขตหนองแขมและเขตบางขุนเทียนมีโอกาสดังกล่าวจากกิจกรรมต่างๆ ของมนุษย์ร่วมด้วย ได้แก่ อุตสาหกรรมต่างๆ นอกเหนือไปจากสังกะสีที่เกิดเองตามธรรมชาติ

เช่น แร่ซัลไฟด์ เป็นต้น (Thongsanit *et al.*, 2015) อาการเมื่อได้รับฝุ่นหรือไอของสังกะสีในปริมาณมากจากการสูดดมจะเกิดอาการกระหายน้ำ ไอ หอบคลุมอกเสบ ปวดบวม เหนื่อยง่าย อ่อนแรง มีอาการปวดกล้ามเนื้อ คลื่นไส้ มีไข้ มีอาการหนาว

สะท้าน และผิวหนังเปลี่ยนเป็นสีน้ำเงิน ซึ่งมักเกิดภายใน 4-12 ชั่วโมง หลังการสัมผัส อาการเหล่านี้จะหายเป็นปกติภายใน 1-2 เรียกชื่อโรคนี้ว่า โรคไขว้นจันทร์ หรือโรคไขพิษโลหะ (Siamchemi, 2017)

ตารางที่ 3 ค่าการสะสมตัวของโลหะหนักในฝุ่น (EF)

เขต	ปีที่	ค่าการสะสมตัวของโลหะหนักในฝุ่น*				
		เหล็ก	ทองแดง	สังกะสี	ตะกั่ว	แคดเมียม
หนองแขม	1	1.00	1.35	7.56	1.53	1.16
	2	1.00	15.99	24.24	3.30	3.53
	ค่าเฉลี่ย	1.00	8.67±10.35	15.90±11.79	2.41±1.26	2.35±1.68
บางบอน	1	1.00	0.50	0.59	1.05	0.60
	2	1.00	0.12	2.46	1.09	0.68
	ค่าเฉลี่ย	1.00	0.31±0.26	1.53±1.32	1.07±0.03	0.639±0.05
บางขุนเทียน	1	1.00	0.66	1.797	2.17	1.06
	2	1.00	1.90	39.76	5.75	156.00
	ค่าเฉลี่ย	1.00	1.28±0.88	39.76±26.85	3.96±2.54	78.54±109.60
บางแค	1	1.00	1.51	2.28	1.06	5.30
	2	1.00	8.29	7.67	2.63	10.91
	ค่าเฉลี่ย	1.00	4.90±4.80	4.97±3.82	1.85±1.11	8.10±3.97
ค่าเฉลี่ยทุกเขต		1.00	3.79±3.80	10.79±9.05	2.32±1.22	22.41±37.56

หมายเหตุ * ตัวอักษรหนาหมายถึงค่าการสะสมตัวของโลหะหนักในฝุ่นที่มากกว่า 10

นอกจากนี้ ยังพบว่า ค่าเฉลี่ย EF ของแคดเมียมของเขตบางขุนเทียน มีค่ามากกว่า 10 ไปมาก คือ 78.54 ± 109.6 ดังตารางที่ 2 ซึ่งคล้ายกับงานวิจัยของ Hirunkam (2013) ที่พบ EF ของแคดเมียมใน 5 พื้นที่ของจังหวัดนครราชสีมาที่มีค่ามากกว่า 10 ซึ่งอยู่ในช่วง 14.89 - 53.95 แสดงว่าปริมาณแคดเมียมในเขตบางขุนเทียนมีโอกาสเกิดจากกิจกรรมต่างๆ ของมนุษย์ร่วมด้วย ได้แก่ การเคลือบฉนวนผิวโลหะต่างๆ เช่น เหล็ก เหล็กกล้า และทองแดง เป็นต้น ขั้วไฟฟ้าในแบตเตอรี่ชนิดที่เติมประจุใหม่ได้ เป็นตัวที่ทำให้พลาสติกชนิดพีวีซีอยู่ตัว ทำวัสดุอุดฟัน การผลิตหลอดเรืองแสง สารกึ่งตัวนำ เครื่องเพชรพลอย กระบวนการแกะสลักแม่พิมพ์ อุตสาหกรรมรถยนต์และเครื่องบิน ทำสารกำจัดเชื้อรา

สารกำจัดแมลง และสารกำจัดหนอน ทำเป็นตัวกระตุ้นให้เกิดปฏิกิริยาทางเคมี เม็ดสี สี และแก้ว อุตสาหกรรมการถ่ายภาพและการเคลือบมัน และเป็นตัวปนเปื้อนในปุ๋ยชนิดซูเปอร์ฟอสเฟต (Foundation of project of Thai encyclopedia for youth, 2015) พิษเฉียบพลันจากการหายใจสูดไอแคดเมียมเข้าไปในร่างกาย อาการที่พบคืออาการคล้ายโรคไขหวัดใหญ่และอาการของโรคไขควันโลหะ ได้แก่ อาการไอ แน่นหน้าอก หายใจไม่สะดวก ไข้ หนาวสั่น ปวดเมื่อยตามร่างกาย หากอาการรุนแรงมากขึ้นอาจพบภาวะปอดอักเสบและปอดบวม น้ำ การได้รับแคดเมียมเป็นระยะเวลานาน อาการพิษที่เด่นที่สุด คือ อัมตรัยต่อไต โดยเฉพาะท่อไตส่วนต้น โรคที่เกิดจากพิษแคดเมียมเรียกว่า โรค

พิษแคะเมียม หรือ โรคอึด อึด ส่วนอาการเรื้อรัง จะทำลายกระดูก ปวดกระดูก ทำลายปอด ตับและไต เป็นโรคโลหิตจาง และเป็นสารก่อมะเร็ง (Division of occupational and environmental disease, 2014)

อย่างไรก็ตาม ในงานวิจัยพบว่า แคะเมียม และสังกะสีมีค่า EF มากกว่า 10 แสดงว่ามีโอกาสที่ ทั้งแคะเมียมและสังกะสีในฝุ่นนั้นมีแหล่งที่มาจาก กิจกรรมต่างๆ ของมนุษย์ เช่น โรงงานอุตสาหกรรม และการจราจร เป็นต้น (Karuchit and Hirunkam, 2015) ซึ่งมีความเป็นไปได้สูงมาก เนื่องจากข้อมูลของกรม โรงงานอุตสาหกรรม พบว่า ทั้ง 4 เขตที่ท้าววิจัยมี โรงงานอุตสาหกรรมประเภทผลิตภัณฑ์โลหะมากที่สุดทุกเขต รองลงมา คือ ผลิตภัณฑ์พลาสติก และ ผลิตภัณฑ์ยานพาหนะและอุปกรณ์ (Department of industrial works, 2021)

นอกจากนี้ เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบค่าเฉลี่ย EF ที่ได้ในแต่ละเขตกับระดับการปนเปื้อนของโลหะหนัก จะพบว่า เขตบางบอนมีการปนเปื้อนของโลหะ ทั้ง 4 ชนิดอยู่ในระดับต่ำ ($EF < 2$) ในขณะที่เขตบางขุนเทียนมีทองแดงเท่านั้นที่มีการปนเปื้อนในระดับต่ำ และเขตบางแคมีตะกั่วเท่านั้นที่มีการปนเปื้อนในระดับต่ำ นอกจากนี้ยังพบว่า สังกะสีและแคะเมียมใน เขตบางขุนเทียนมีการปนเปื้อนในระดับสูงมาก ($EF = 20 - 40$) และระดับสูงมากเกินไป ($EF > 40$) ตามลำดับ เมื่อพิจารณาค่าเฉลี่ย EF ของทุกเขต พบว่า สังกะสีมีระดับการปนเปื้อนสูง ($EF = 5 - 20$) และแคะเมียมมีระดับการปนเปื้อนที่สูงมาก ($EF = 20 - 40$) ซึ่งไม่ค่อยสอดคล้องกับการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของแคะเมียม กับค่ามาตรฐานคุณภาพดิน ที่พบว่าต่ำกว่ามาตรฐาน (Pollution control Department, 2015) ในขณะที่ ทองแดง และตะกั่วมีระดับการปนเปื้อนปานกลาง ($EF = 2 - 5$) ซึ่งสอดคล้องกับการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของตะกั่ว กับค่ามาตรฐานคุณภาพดิน ที่พบว่าต่ำกว่ามาตรฐาน (Pollution control Department, 2015)

เมื่อพิจารณาค่า EF ในแต่ละเขตในทุกโลหะ หนักพบว่า เขตบางบอนมีการปนเปื้อนของโลหะหนักน้อยที่สุด น่าจะมีสาเหตุมาจากเขตบางบอนเป็น เขตที่มีโรงงานอุตสาหกรรมเกี่ยวกับผลิตภัณฑ์โลหะ น้อยที่สุด คือ ร้อยละ 18.53 ของโรงงานอุตสาหกรรม ทั้งหมดในเขต คือ 43 โรงงาน จาก 232 โรงงาน (Department of industrial works, 2021) ในขณะที่ เขตบางขุนเทียนมีการปนเปื้อนของโลหะมากที่สุด (สังกะสี ตะกั่ว และแคะเมียม) ซึ่งก็น่าจะมีสาเหตุมา จากเขตบางขุนเทียนเป็นเขตที่มีโรงงานอุตสาหกรรม เกี่ยวกับผลิตภัณฑ์โลหะมากที่สุด คือ ร้อยละ 29.04 ของโรงงานอุตสาหกรรมทั้งหมดในเขต คือ 255 โรงงาน จาก 878 โรงงาน และมีจำนวนโรงงาน อุตสาหกรรมเกี่ยวกับผลิตภัณฑ์โลหะมากที่สุดใน 4 เขตอีกด้วย (Department of industrial works, 2021) ยิ่งไปกว่านั้น การปนเปื้อนของโลหะหนักที่มากใน เขตบางขุนเทียนน่าจะมีสาเหตุจากการจราจร หนาแน่นและขนาดใหญ่ได้แก่ ถนนพระราม 2 อีก ด้วย เนื่องจากจุดเก็บตัวอย่างจุดที่ 1 ในเขตบางขุน เทียนอยู่ในบริเวณที่ติดกับถนนพระราม 2 แต่จุดที่ 2 อยู่ในซอย

อย่างไรก็ตามงานวิจัยในครั้งนี้ทำให้ได้ ทราบถึงปริมาณ โลหะหนักใน 4 เขตของ กรุงเทพมหานครฝั่งธนบุรี ปัจจัยที่เกี่ยวข้อง ระดับ การปนเปื้อนของโลหะหนักในฝุ่น และอิทธิพลจาก กิจกรรมของมนุษย์ ทั้งนี้ หากจะให้งานวิจัยมี ประโยชน์ยิ่งขึ้นไปอีกในแง่ของข้อมูลเพื่อการบริหาร จัดการด้านทรัพยากรอากาศของกรุงเทพมหานคร ควรมีการศึกษาเพิ่มเติมเฉพาะในเขตบางขุนเทียน โดยศึกษาปริมาณ โลหะหนักเปรียบเทียบตัวอย่างใน ชุมชนที่อยู่ติดกับ โรงงานอุตสาหกรรมที่เสี่ยงต่อการ ปลดปล่อยโลหะหนักกับตัวอย่างบริเวณที่อยู่ติดกับบริเวณ ที่มีการจราจรหนาแน่นในแง่ของการกระจายตัวของ โลหะหนักในฝุ่นขนาดต่างๆ ปริมาณของฝุ่นชนิด

ต่างๆ และขนาดต่างๆ และรวมถึงศึกษาผลกระทบ
ด้านสุขภาพของคนในชุมชน

สรุป

จากการวิจัยพบว่า ค่าเฉลี่ยปริมาณเหล็ก
ทองแดง สังกะสี และแคดเมียมในตัวอย่างดินและฝุ่น
ในทั้ง 4 เขต ใน 2 ปี ไม่แตกต่างกัน ในขณะที่ค่าเฉลี่ย
ปริมาณตะกั่วแตกต่างกัน ปัจจัยที่มีผลกับปริมาณ
ตะกั่วในตัวอย่าง ได้แก่ ชนิดของตัวอย่าง (ดินชั้นบน
และฝุ่นหลังคา) พื้นที่ และเวลา แต่ปัจจัยดังกล่าวไม่มี
ผลกับปริมาณเหล็ก ทองแดง สังกะสี และแคดเมียม
จากค่าการสะสมตัวของโลหะหนักในฝุ่นของสังกะสี
ในการวิจัยแสดงว่า ปริมาณสังกะสีในฝุ่นในเขต
หนองแขม และบางขุนเทียน และปริมาณแคดเมียม
ในฝุ่นในเขตบางขุนเทียนมีอิทธิพลจากกิจกรรมของ
มนุษย์ร่วมด้วย และแสดงระดับการปนเปื้อนของ
โลหะหนักที่พบมากที่สุดดินเขตบางขุนเทียน ซึ่ง
น่าจะมีสาเหตุมาจากเขตนี้มีจำนวนโรงงาน
อุตสาหกรรมประเภทผลิตภัณฑ์โลหะมากกว่าเขตอื่น
และการจราจรหนาแน่นในเส้นทางจราจรขนาดใหญ่
กว่าเขตอื่น โดยปริมาณโลหะหนักที่พบมากอาจ
ส่งผลต่อสุขภาพของคนในชุมชนต่างๆ ในเขตบาง
ขุนเทียนได้

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจาก
งบประมาณรายได้ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ ประจำปีงบประมาณ 2563

เอกสารอ้างอิง

Anuluxtipun, Y., Anu-rugsa, B. and Tangkongsap, S.
2003. Contamination of lead and cadmium
in soil, water and plant from landfill facility

of Amphor Muang, Suphanburi using geographic
information, pp. 514-521. *In Proceedings
of 41th Kasetsart University Annual Conference:
Science, Natural Resources and Environmental
Economics.* Kasetsart University, Bangkok.
(in Thai)

APHA-AWWA-WEF (American Public Health Association
- American Water Works association - Water
Environment Federation). 2012. **Standard
methods for the examination of water and
wastewater (22nd ed).** Available Source: <https://www.standardmethods.org>, March 10, 2016.

BinaryEarth. 2021. **Handy GPS (Version Free).** Available
Source: [https://play.google.com/store/apps/
details?id=binaryearth.handygpsfree&hl=e
n&gl=US](https://play.google.com/store/apps/details?id=binaryearth.handygpsfree&hl=en&gl=US), August 29, 2017.

BMA GIS portal. 2013. **Map of 50 districts in Bangkok.**
Available Source: [https://bmawebgis.cdg.co.th
/SEDPortal/50-map-overview/](https://bmawebgis.cdg.co.th/SEDPortal/50-map-overview/), December 25,
2021. (in Thai)

Deelaman, W., Chaochanchaikul, K. and Pankaew, P.
2015. **Evaluation of Contamination of Dust
with Size of Less Than 10 Micron in Rajamangala
University of Technology Phra Nakhon.**
Available Source: [https://repository.rmutp.
ac.th/bitstream/handle/123456789/1955/SC
I_59_05.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://repository.rmutp.ac.th/bitstream/handle/123456789/1955/SC_I_59_05.pdf?sequence=1&isAllowed=y), August
29, 2017. (in Thai)

Department of industrial works. 2021. **Information
of industrial plants in Bangkok.** Available
Source: [http://reg.diw.go.th/executive/prov2
.asp?prov=10](http://reg.diw.go.th/executive/prov2.asp?prov=10), December 25, 2021. (in Thai)

Division of occupational and environmental disease. 2014.
Disease from cadmium. Available Source:

- <http://envocc.ddc.moph.go.th/contents/view/61>, March 14, 2021. (in Thai)
- Figueroa, D.M., Villanueva, M.D.L.O. and Parra, M.L.D.L. 2007. Heavy metal distribution in dust from elementary schools in Hermosillo, Sonora, México. **Atmospheric Environment** 41(2): 276-288.
- Foundation of project of Thai encyclopedia for youth. 2015. **Cadmium**. Available Source: <http://saranukromthai.or.th/sub/book/book.php?book=22&chap=6&page=t22-6-infodetail05.html#~:text=cadmium compound used also for chemical of superphosphate>, March 8, 2021. (in Thai)
- Hirunkam, T. 2013. Heavy metal concentration and classification analysis of dust in Nakhon Ratchasima. Master degree of Engineering (Environmental engineering), Suranaree University of Technology. (in Thai)
- Joshi, U.M., Vijayaraghavan, K. and Balasubramanian, R. 2009. Elemental composition of urban street dusts and their dissolution characteristics in various aqueous media. **Chemosphere** 77: 526-533.
- Karuchit, S. and Hirunkam, T. 2015. Multivariate analysis of heavy metal concentrations in soil, roof dust, and dust fall in Nakhon Ratchasima, Thailand. **Suranaree Journal of Science and Technology** 22(2): 173-182.
- Khashman, O.A.A. 2004. Heavy metal distribution in dust, street dust and soils from the work place in Karak Industrial Estate, Jordan. **Atmospheric Environment** 38(39): 6803-6812.
- Lawson, D.R. and Winchester, J.W. 1979. A standard crustal aerosol as reference for elemental enrichment factors. **Atmospheric Environment** 13: 925-930.
- Li, X. and Feng, L. 2012. Multivariate and geostatistical analyzes of metals in urban soil of Weinan industrial areas, Northwest of China. **Atmospheric Environment** 47: 58-65.
- Meechaiyo, N. 2010. Study of cadmium, lead, and manganese in PM 10 in business areas in municipality of Phitsanulok. Master degree of Engineering (Environmental engineering), Naresuan University. (in Thai)
- Meza-Figueroa, D., O-Villanueva, M.D.L. and De la Parra, M.L. 2007. Heavy metal distribution in dust from elementary school in Hermosillo, Sonora, Mexico. **Atmospheric Environment** 41: 276-288.
- NIDA center for research and development of disaster prevention and management. 2012. **Danger of heavy metals**. Available Source: www.dpm.nida.ac.th/main/index.php/articles/chemical-hazards/item/91-danger-of-heavy-metals, March 29, 2021. (in Thai)
- Ozcan, N. and Altundag, H. 2013. Specification of heavy metals in street dust samples from Sakarya I. organized industrial district using the BCR sequential extraction procedure by ICP-OES. **Bulletin of the Chemical Society of Ethiopia** 27(2): 205-212.
- Pollution Control Department. 2015. **Standard quality of soil**. Available Source: http://www.pcd.go.th/info_serv/reg_std_soil01.html#s2, August 29, 2017. (in Thai)

- Pollution Control Department. 2018. **Notification of heavy metals in PM 2.5**. Available Source: <https://www.facebook.com/PCD.go.th/posts/2065066233576753>, March 5, 2021. (in Thai)
- R Core Team. 2021. **R program (version 4.0.4)**. Available Source: <https://cran.r-project.org/bin/windows/base/old/4.0.4>, August 29, 2017.
- Samara, C. and Voutsas, D. 2005. Size distribution of airborne particulate matter and associated heavy metals in the roadside environment. **Chemosphere** 59(8): 1197-1206.
- Siamchemi. 2017. **Zinc: benefit and toxicity**. Available Source: <https://www.siamchemi.com/zinc>, March 8, 2021. (in Thai)
- Srithawirat, T. and Chimjan, O. 2017. Contamination assessment of heavy metals in dust deposited on residential building walls in agricultural areas of Sukhothai. **Journal of Environmental Management** 13(1): 20-33. (in Thai)
- Srithawirat, T. and Latif, M.T. 2015. Concentration of selected heavy metals in the surface dust of residential buildings in Phitsanulok, Thailand. **Environmental and Earth Science** 74(3): 2701-2706.
- Srithawirat, T. and Sassriruang, P. 2014. Dust in building of household in community of Amphor Munag, Phitsanulok, pp. 1-7. **In Proceeding of 10th Academic Conference of Naresuan Environment**. University of Naresuan, Phitsanulok. (in Thai)
- Thongsanit, P., Imkrajang, W. and Pakamma, M. 2015. **Heavy metal in small dust in building aside road in Amphor Muang, Phitsanulok**. 1st ed. Naresuan University Press, Phitsanulok. (in Thai)
- USEPA. 2007. **Method 3051A (SW-846): Microwave Assisted Acid Digestion of Sediments, Sludges, and Oils Revision 1**. U.S. Environmental Protection Agency, Washington DC.
- Yongming, H., Peixuan, D., Junji, C and Pomentier, E.S. 2006. Multivariate analysis of heavy metal contamination in urban dust of Xi'an, Central China. **Science of the Total Environment** 355: 176-186.
- Zarcinas, B.A., Pongsakul, P., McLaughlin, M.J. and Cozen, G. 2004. Heavy metals in soils and crops in Southeast Asia. **Environmental Geochemistry and Health** 26: 359-371.