ความเข้มข้นของโลหะหนักในพื้นที่ปลูกฟ้าทะลายโจร จังหวัดนครปฐม

Concentration of Heavy Metals in *Andrographis paniculata* (Burm. f.) Wall. ex Nees Growing Area, Nakhon Pathom Province

เกวลิน ศรีจันทร์[1] ธวัชชัย อินทร์บุญช่วย[1*] ศิริสุดา บุตรเพชร[1] และ ธรรมธวัช แสงงาม[2]
Kavalin Srichan[1], Tawatchai Inboonchuay[1*], Sirisuda Bootpetch[1] and Thamthawat Saengngam[2]

[1]ภาควิชาปฐพีวิทยา คณะเกษตร กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน จ.นครปฐม 73140

[1]Department of Soil Science, Faculty of Agriculture at Kamphaeng Saen. Kasetsart University, Kamphaeng Saen Campus, Nakhon Pathom 73140, Thailand

[2]ศูนย์วิจัยและบริการวิชาการ คณะเกษตร กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน จ.นครปฐม 73140

[2]Research and Academic Center, Faculty of Agriculture at Kamphaeng Saen. Kasetsart University, Kamphaeng Saen Campus, Nakhon Pathom 73140, Thailand

**Corresponding author: Email: fagrtci@ku.ac.th*

(Received: 10 July 2023; Accepted: 29 September 2023)

Abstract: Soil contamination with heavy metals has become a serious threat in the cultivation of medicinal herbs in recent years. The cultivation of the plant in arsenic (As), lead (Pb) and cadmium (Cd) contaminated soil not only has adverse effects on their growth but it also harmful to human health after consumption. *Andrographis paniculata* (Burm. f.) Wall. ex Nees is one of the important medicinal plants used in preventing and treating respiratory illness and is known for its anti-viral activity. The purpose of this research was to study the concentration of heavy metals (Arsenic, Cadmium, Lead) in the *A. paniculata* growing area, Nakhon Pathom, at 10 locations. Results of the study revealed that the concentrations of As (7.74 - 18.94 mg/kg), Cd (0.55 - 1.67 mg/kg) and Pb (3.67 - 72.42 mg/kg) in all soils were lower than the critical value of soil quality standard for habitat and agriculture according to announcement of the National Environment Board 2021 and the critical concentration for plant growth. However, the concentration of Pb (6 sites) and Cd (9 sites) in plant were higher than permissible limits of Announcement of the Ministry of Public Health 2021 and WHO, while the As concentration in plant was within acceptable level. When considering the proportions of all heavy metals, it was found that Pb concentrations in soil and plants were the highest in all areas, followed by arsenic and cadmium, respectively. Moreover, the relationships between heavy metals and soil properties revealed that concentration of Cd ($r = -0.835$) and Pb ($r = -0.547$) in soil have moderate negative relationship with clay content and CEC. Soils with high clay content contained low cadmium and lead concentration. Additionally, Pb concentration shows a significantly positive correlation with Cd ($r = 0.546$). When considering the relationship between heavy metals in soil and plants, it was observed that concentration of As ($r = 0.573$) and Cd ($r = 0.361$) in plant have significant relationships with soil except Pb.

Copyright @ Journal of Agriculture, Faculty of Agriculture, Chiang Mai University. All rights reserved.

This information can be used for planning and developing agricultural management practices for this medicinal plant cultivation to ensure food safety and to reduce human and environmental health risks.

Keywords: Heavy metals, *Andrographis paniculata*, medicinal plant, Kamphaeng Saen soil series

บทคัดย่อ: การปนเปื้อนด้วยโลหะหนักในดินเป็นภัยคุกคามร้ายแรงในการเพาะปลูกสมุนไพรในช่วงไม่กี่ปีที่ผ่านมา การปลูกพืชในดินที่มีสารหนู (As) ตะกั่ว (Pb) และแคดเมียม (Cd) ปนเปื้อนนั้น ไม่เพียงแต่มีผลกระทบต่อการเจริญเติบโตของพืช แต่ยังเป็นอันตรายต่อสุขภาพของมนุษย์หลังจากการบริโภคอีกด้วย ฟ้าทะลายโจรเป็นพืชสมุนไพรชนิดหนึ่งที่มีความสำคัญใช้ในการป้องกันและรักษาโรคระบบทางเดินหายใจและมีฤทธิ์ในการต้านไวรัส วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้ เพื่อศึกษาความเข้มข้นของโลหะหนัก (สารหนู แคดเมียม ตะกั่ว) ในดินที่ปลูกฟ้าทะลายโจร จังหวัดนครปฐม จำนวน 10 แหล่ง ผลการศึกษา พบว่า ความเข้มข้นของสารหนู (7.74 - 18.94 มก./กก.) แคดเมียม (0.55 - 1.67 มก./กก.) และตะกั่ว (3.67 - 72.42 มก./กก.) ในดินทุกบริเวณไม่เกินค่ามาตรฐานคุณภาพดินเพื่อการอยู่อาศัยและเกษตรกรรม ตามประกาศคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ 2564 และค่าความเข้มข้นวิกฤตที่มีผลต่อพืช อย่างไรก็ตาม ความเข้มข้นตะกั่ว (6 บริเวณ) และแคดเมียม (9 บริเวณ) ในฟ้าทะลายโจร มีค่าเกินมาตรฐานตามประกาศกระทรวงสาธารณสุข พ.ศ. 2564 และองค์การอนามัยโลก ในขณะที่ความเข้มข้นของสารหนูอยู่ในระดับมาตรฐานที่กำหนดไว้ เมื่อพิจารณาสัดส่วนของโลหะหนักทั้ง 3 ชนิด พบว่า ความเข้มข้นของตะกั่วในดินและพืชมีความเข้มข้นสูงสุดในทุกพื้นที่ รองลงมาเป็นสารหนู และแคดเมียม ตามลำดับ นอกจากนี้ ความสัมพันธ์ของโลหะหนักกับสมบัติทางเคมีของดินพบว่า แคดเมียม ($r = -0.835$) และตะกั่วในดิน ($r = -0.547$) มีความสัมพันธ์เชิงลบปานกลางกับปริมาณดินเหนียวและค่าความจุแลกเปลี่ยนแคตไอออน กล่าวคือ ดินที่มีปริมาณดินเหนียวสูง มีปริมาณแคดเมียมและตะกั่วน้อยกว่าดินชนิดอื่น ในขณะที่ ตะกั่วและแคดเมียมในดิน ($r = 0.456$) มีความสัมพันธ์เชิงบวกปานกลางต่อกัน เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างโลหะหนักในดินและพืช สังเกตได้ว่า สารหนู ($r = 0.573$) และแคดเมียมในพืช ($r = 0.361$) มีความสัมพันธ์เชิงบวกกับดิน ยกเว้นตะกั่ว ข้อมูลนี้สามารถนำไปใช้ในการวางแผนและพัฒนาแนวทางการจัดการทางการเกษตรสำหรับการเพาะปลูกพืชสมุนไพรเพื่อให้มั่นใจในความปลอดภัยและเพื่อลดความเสี่ยงด้านสุขภาพของมนุษย์และสิ่งแวดล้อม

คำสำคัญ: โลหะหนัก ฟ้าทะลายโจร พืชสมุนไพร ชุดดินกำแพงแสน

คำนำ

มลพิษจากโลหะหนักในดินมาจากหลายแหล่ง ทั้งที่มาจากธรรมชาติและแหล่งที่มนุษย์สร้างขึ้น เช่น โรงงานอุตสาหกรรม การใส่ปุ๋ย สารกำจัดศัตรูพืช เป็นต้น ซึ่งมีผลกระทบต่อระบบนิเวศ พิษวิทยา และสุขภาพ ปริมาณโลหะหนักที่เพิ่มขึ้นในดินอาจเป็นสาเหตุของการสะสมในพืช อย่างไรก็ตาม การดูดซึมของโลหะหนักขึ้นอยู่กับทั้งปัจจัยทางสิ่งแวดล้อมและทางสรีรวิทยาของพืช (Khan *et al.*, 2015) การปนเปื้อนในดินด้วยโลหะ-หนัก ได้กลายเป็นภัยคุกคามร้ายแรงในการเพาะปลูกสมุนไพรในช่วงไม่กี่ปีที่ผ่านมา โดยมีรายงานการปนเปื้อนของโลหะหนักในยาแผนโบราณและสมุนไพรมีขึ้นอย่างต่อเนื่อง (Yang *et al.*, 2004) ในขณะนี้ พืชสมุนไพรมีบทบาทสำคัญมากขึ้นในอุตสาหกรรมยา อาหารเพื่อสุขภาพ และอุตสาหกรรมเครื่องสำอางจากธรรมชาติ (Kim *et al.*, 2016) ความกังวลเพิ่มขึ้นเกี่ยวกับความ-ปลอดภัยของยาสมุนไพรหลังจากการศึกษาพบว่ามีโลหะหนักระดับสูงในยาสมุนไพรบางชนิด ซึ่งเป็นปัญหาที่พบในการบำบัดทางการแพทย์แบบดั้งเดิมซึ่งถือเป็นสาเหตุของความผิดปกติทางสุขภาพหลายอย่าง (Maiga *et al.*, 2005) เป็นที่ทราบกันดีว่ายาแผนโบราณ

จำนวนมากสามารถก่อให้เกิดพยาธิสภาพของไตอย่างรุนแรง และมีความเกี่ยวข้องกับความเป็นพิษของโลหะหนัก (Awodele *et al*., 2013) การดูดซึมโลหะหนักโดยพืชและการสะสมในห่วงโซ่อาหารเป็นภัยคุกคามต่อสุขภาพสัตว์และมนุษย์ (Singh and Kalamdhad, 2011) ซึ่งอาจส่งผลให้เกิดผลข้างเคียงในมนุษย์แม้ในระดับความเข้มข้นต่ำมาก (Dghaim *et al*., 2015) ในบรรดาโลหะหนักชนิดต่าง ๆ สารหนู (As) ตะกั่ว (Pb) และแคดเมียม (Cd) ถูกจัดระดับความสำคัญอยู่ในอันดับที่หนึ่ง สอง และเจ็ดของสารมลพิษที่มีอันตรายสูง (ATSDR, 2022) ตามลำดับ ปัญหาสุขภาพเชื่อมโยงกับการดูดซึมโลหะหนักในอาหารมากเกินไปรวมถึงภูมิคุ้มกันลดลง ความผิดปกติของหัวใจ ความผิดปกติของทารกในครรภ์ พฤติกรรมทางจิตสังคม และระบบประสาทที่บกพร่อง (Harris *et al*., 2011) ตะกั่ว และแคดเมียม ไม่ใช่องค์ประกอบที่จำเป็นทั้งในร่างกายมนุษย์หรือในพืชและทำให้เกิดผลเสียแม้ได้รับในปริมาณที่ต่ำ (Maiga *et al*., 2005) ในขณะที่ สารหนูสามารถทำลายระบบปอด ประสาท ไต และระบบทางเดินหายใจ รวมทั้งทำให้เกิดพยาธิสภาพทางผิวหนัง (Järup, 2003) นอกจากนี้ยังอาจก่อให้เกิดความผิดปกติในระบบประสาทส่วนกลาง, ตับ ปอด หัวใจ ไตและสมอง นำไปสู่ความดันโลหิตสูง, ปวดท้อง, การปะทุของผิวหนัง, แผลในลำไส้ และเกี่ยวข้องกับมะเร็งชนิดต่าง ๆ (Maobe *et al*., 2012)

ฟ้าทะลายโจร [*Andrographis paniculata* (Burm.f.) Wall. ex Nees] เป็นสมุนไพรที่จัดอยู่ในบัญชียาหลักแห่งชาติ พ.ศ. 2558 มีสรรพคุณบรรเทาอาการเจ็บคอและบรรเทาอาการโรคหวัด (common cold) เช่น เจ็บคอ ปวดเมื่อยกล้ามเนื้อ (Jarukamjorn and Nemoto, 2008) เป็นหนึ่งในยาที่สำคัญที่ใช้ในการป้องกันและรักษาโรคทางเดินหายใจและเป็นที่ทราบกันดี สำหรับฤทธิ์ต้านไวรัส (Jiang *et al*., 2021) แม้ว่าจะมีการศึกษาเกี่ยวกับการปนเปื้อนโลหะหนักในพืชสมุนไพรอยู่บ้าง สำหรับฟ้าทะลายโจรยังมีข้อมูลค่อนข้างน้อย จากการตรวจเอกสารงานวิจัยโลหะหนักในพืชสมุนไพร Limmatvapirat *et al*. (2010) ศึกษาปริมาณโลหะหนักในเหง้าหรือรากของพืชสมุนไพรไทยในวงศ์ Zingiberaceae จำนวน 12 ชนิด ได้แก่ ขิง ข่า ไพล ขมิ้นชัน ขมิ้นอ้อย ขมิ้นขาว กระชาย กระชายดา ว่านชักมดลูก ว่านนางคา ว่านเอ็นเหลือง และว่านมหาเมฆ พบว่า เหง้าของข่า ขิง และกระชายดำ มีปริมาณของสารหนู แคดเมียม ปรอท และตะกั่ว สูงกว่าเกณฑ์มาตรฐานกำหนดคือ 4, 0.3, 0.5 และ 10 มก./กก. ตามลำดับ ปริมาณตะกั่วและสังกะสีในใบและก้านใบของตัวอย่างพืชส่วนใหญ่ในวงศ์ Zingiberaceae มีค่าสูงกว่าเกณฑ์มาตรฐาน คือ 10 และ 100 มก./กก. ตามลำดับ ระดับของแคดเมียมและปรอทที่พบในการสกัดข่าทุกสภาวะมีค่าสูงถึง 4.30 และ 3.77 มก./กก. ตามลำดับ ปริมาณโลหะหนักเป็นพิษที่สูงเกินเกณฑ์กำหนดในพืชบางชนิดในวงศ์ Zingiberaceac คาดว่าแหล่งของการปนเปื้อนของโลหะหนักอาจมาจากการใช้ปุ๋ยเคมี ยาฆ่าแมลง มลพิษในดินหรือน้ำ

อย่างไรก็ตาม ผลผลิตของฟ้าทะลายโจร และคุณภาพดินที่ใช้ปลูกไม่เคยมีการตรวจสอบการปนเปื้อนของโลหะหนักดังกล่าว โดยเฉพาะอย่างยิ่งในพื้นที่อำเภอกำแพงแสน จังหวัดนครปฐม ที่เป็นแหล่งปลูกฟ้าทะลายโจรมาอย่างยาวนานมากกว่า 30 ปี ถือเป็นแหล่งปลูกที่ใหญ่ที่สุดในประเทศ จากข้อมูลจากการสัมภาษณ์ประธานกลุ่มผู้ปลูกและส่งเสริมการปลูกสมุนไพร อำเภอกำแพงแสน พบว่า มีกำลังการผลิตปีละ 150 ตัน พื้นที่ปลูกรวมกว่า 150 ไร่ พื้นที่ปลูกกระจายตัวหนาแน่นในตำบลสระพัฒนา ตำบลกระตีบ อำเภอกำแพงแสน รองลงมาเป็นตำบลบ้านยาง อำเภอเมือง จังหวัดนครปฐม ซึ่งมีการรวมกลุ่มเกษตรผู้ปลูกฟ้าทะลายโจรมีสมาชิกมากกว่า 44 ราย ดังนั้น การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาความเข้มข้นของโลหะหนักในพื้นที่ปลูกฟ้าทะลายโจรจังหวัดนครปฐม ซึ่งเป็นแหล่งปลูกหลักในพื้นที่ภาคกลางฝั่งตะวันตกภายใต้สภาพแวดล้อมและการเขตกรรมที่แตกต่างกัน เพื่อเป็นข้อมูลสำคัญในการจัดการดินและปัจจัยการผลิตที่เหมาะสมและปลอดภัย ซึ่งจะเป็นประโยชน์ต่อการควบคุมคุณภาพการผลิตของฟ้าทะลายโจรให้ได้มาตรฐานและเพิ่มศักยภาพการผลิตของสมุนไพรไทยในการแข่งขันในตลาดโลกอีกด้วย

อุปกรณ์และวิธีการ

การสำรวจพื้นที่ การเก็บตัวอย่าง การวิเคราะห์สมบัติดินและโลหะหนัก

ทำการศึกษาตั้งแต่เดือน กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2565 ถึง มกราคม พ.ศ. 2566 ณ แปลงของเกษตรกรผู้ปลูกฟ้าทะลายโจรจังหวัดนครปฐม ศึกษาข้อมูลพื้นที่ปลูกฟ้าทะลายโจรจากสำนักงานเกษตรจังหวัดนครปฐม ร่วมกับแผนที่ดินมาตราส่วน 1: 100000 (Soil Survey Division, 2011) และการใช้ประโยชน์ที่ดิน มาตราส่วน 1 : 25,000 จากกรมพัฒนาที่ดิน(Land Development Department, 2019) เพื่อใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานในการกำหนดจุดเก็บตัวอย่างของดินและพืชให้ครอบคลุมจังหวัดนครปฐม จากนั้นเก็บตัวอย่างดินแบบรบกวนโครงสร้างบริเวณละ 4 จุด แต่ละจุดเก็บดิน 2 ระดับความลึก ได้แก่ 0 - 15 และ 15 - 30 ซม. และเก็บตัวอย่างต้นฟ้าทะลายโจรจำนวน 4 ต้นในแต่ละบริเวณ ซึ่งมีอายุใกล้เคียงกันในแต่ละพื้นที่ (> 2 เดือน) โดยตัดต้นเหนือดิน 5 ซม.ในตำแหน่งเดียวกันกับที่เก็บตัวอย่างดิน พร้อมทั้งบันทึกข้อมูลสภาพแวดล้อมและข้อมูลการจัดการแปลงปลูกพืชจากการสัมภาษณ์เกษตรกร โดยเก็บตัวอย่างดินทั้งหมด 10 บริเวณ ประกอบด้วย 2 ชุดดินได้แก่ ชุดดินกำแพงแสน 9 บริเวณ(P1, P2, P3, P4, P5, , P6, P7, P9, P10) และชุดดินสระบุรี 1 บริเวณ (P8) (Figure 1) เพื่อวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพและเคมีของดิน โดยใช้วิธีมาตรฐาน (National Soil Survey Center, 1996) ประกอบด้วย เนื้อดินโดยการตกตะกอนแล้วอ่านค่าปริมาณสารแขวนลอยด้วยไฮโดรมิเตอร์ (hydrometer method) พีเอชดินโดยใช้อัตราส่วนดินต่อน้ำ 1 : 1 ปริมาณอินทรียวัตถุในดินโดยวิธี Walkley and Black ไนโตรเจนทั้งหมดโดยวิธี Kjeldahl method ความเป็นประโยชน์ของฟอสฟอรัสโดยวิธี Bray II และโพแทสเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ในดินโดยสกัดด้วย 1 M NH_4OAc pH 7.0 และค่าความจุแลกเปลี่ยนแคตไอออนโดยวิธี leaching โดยใช้สารละลาย 1N NH_4OAc pH 7.0 วิเคราะห์โลหะหนักทั้งหมดในดินและพืช ได้แก่ สารหนู แคดเมียม และตะกั่ว โดยย่อยตัวอย่างดินด้วย กรดเปอร์คลอริก ($HClO_4$) และกรดไนตริก (HNO_3) ในอัตราส่วน 2 : 1 (Amacher, 1996) และเตรียมตัวอย่างพืชโดยนำฟ้าทะลายโจรทั้งต้นมาทำความสะอาดด้วยแปรง ตัดให้เป็นชิ้นเล็ก และอบที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส จนกระทั่งแห้งและนำไปบดละเอียด และย่อยด้วยกรด HNO_3 เข้มข้น (Zarcinas *et al.*, 1987) วิเคราะห์ปริมาณโลหะหนักทั้งหมด (As, Cd, Pb) ในดินและพืช ด้วยเครื่อง atomic absorption spectrophotometer (AAS) รุ่น 200 Series AA ยี่ห้อ Agilent Technologies

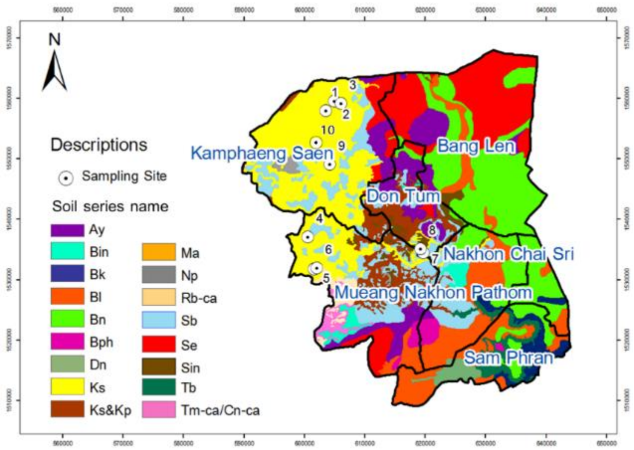

Figure 1. Sampling site and soil series name in Nakhon Pathom province

การวิเคราะห์ข้อมูล

วิเคราะห์ความสัมพันธ์ของสมบัติดินและโลหะหนักในดินและพืชโดยใช้สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์แบบเพียร์สัน (Pearson correlation coefficient) วิเคราะห์องค์ประกอบหลัก (principle component analysis) โดยการจัดกลุ่มตัวอย่างดินบนพื้นฐานของความสัมพันธ์ทางธรณีเคมี (Bellehumeur *et al.*, 1994) และสร้าง chart symbology ของโลหะหนักโดยใช้โปรแกรม Quantum GIS และประเมินศักยภาพความพิษของโลหะหนักเทียบกับดัชนีความเป็นพิษของโลหะหนัก

ผลการศึกษาและวิจารณ์

สมบัติทางเคมีดินและความเข้มข้นของโลหะหนักในดินที่ปลูกฟ้าทะลายโจร

การปลูกฟ้าทะลายโจรในจังหวัดนครปฐมกระจายตัวในพื้นที่เชื่อมต่อระหว่างตำบลกระตีบและตำบลสระพัฒนา อำเภอกำแพงแสน และบางส่วนของตำบลบ้านยาง อำเภอเมืองนครปฐม เป็นวิธีการปลูกแบบธรรมดาที่มีการใช้ปุ๋ยเคมีและสารเคมี จัดเป็นแหล่งผลิตฟ้าทะลายโจรที่ใหญ่ที่สุดในประเทศไทยที่ทำต่อเนื่องมาไม่น้อยกว่า 20 ปี โดยมีใช้ปุ๋ยคอกและปุ๋ยอินทรีย์รองพื้นก่อนเตรียมแปลงปลูก ทำการปลูกด้วยการหว่านเมล็ดและให้น้ำด้วยระบบสปริงเกลอร์ เกษตรกรปลูกได้ 2 รอบต่อปี เริ่มปลูกรอบแรกปลายเดือนกุมภาพันธ์ และรอบสองเดือนสิงหาคม ใส่ปุ๋ยเคมีอัตรา > 100 กก./ไร่/ปี ใส่ปุ๋ยยูเรียครั้งแรกที่อายุ 1 เดือน และให้อีก 7 ครั้ง แต่ละครั้งห่างกัน 1 - 2 สัปดาห์ เริ่มเก็บเกี่ยวฟ้าทะลายโจรได้เมื่ออายุ 120 - 150 วัน ซึ่งเป็นช่วงที่เริ่มออกดอกและมีสารสำคัญสูงสุด ดินที่ปลูกฟ้าทะลายโจรจังหวัดนครปฐมเป็นดินที่มีวัตถุต้นกำเนิดพัฒนามาจากตะกอนน้ำพา พื้นที่ปลูกฟ้าทะลายโจรส่วนใหญ่แจกกระจายอยู่ริมถนนสายย่อย (local roads) ผลวิเคราะห์ดินพบว่า เนื้อดินผันแปรอยู่ในช่วงระหว่างดินร่วน (loam) ถึงดินร่วนเหนียว (clay loam) ดินมีอินทรียวัตถุค่อนข้างต่ำ มีไนโตรเจนรวมต่ำมาก ความจุแลกเปลี่ยนแคตไอออนค่อนข้างสูง ดินมีฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์สูงมาก และโพแทสเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ต่ำถึงสูงมากอย่างไรก็ตาม ดินส่วนใหญ่มีค่าพีเอชเป็นกรดเล็กน้อยซึ่งเป็นช่วงที่ธาตุอาหารพืชในดินเป็นประโยชน์สูง (Table 1) จากการสัมภาษณ์เกษตรกรในพื้นที่ปลูกฟ้าทะลายโจร พบว่า เกษตรกรส่วนใหญ่ใส่ปุ๋ยอินทรีย์ ได้แก่ มูลวัว มูลไก่ และมูลแพะเพื่อปรับปรุงกายภาพของดิน และมีการใส่ปุ๋ยเคมีในพื้นที่ปลูกฟ้าทะลายโจรนอกจากปุ๋ยยูเรียแล้ว ยังมีปุ๋ยเคมีอื่นซึ่งมีเกรดปุ๋ยแตกต่างกันไป เช่น 15 - 15 - 15, 25 - 7 - 7 และ 30 - 5 - 5 โดยใส่ในอัตราแตกต่างกัน ซึ่งในพื้นที่ที่ใส่ปุ๋ยเคมีอัตราสูงก็จะมีปริมาณโพแทสเซียม และฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์สูงกว่าบริเวณอื่น เช่น ในบริเวณที่ 3 (P3), 4 (P4) และบริเวณที่ 5 (P5) ของพื้นที่ปลูกฟ้าทะลายโจร เป็นต้น

ความเข้มข้นของสารหนู แคดเมียม และตะกั่วในดินบนที่ระดับความลึก 0 - 15 ซม. มีค่าอยู่ในช่วง 7.7-15.17, 0.55-1.37 และ 3.67-72.42 มก./กก. ตามลำดับ ขณะที่ ความเข้มข้นในดินล่างที่ระดับความลึก 15-30 ซม. มีค่าอยู่ในช่วง 8.37-18.94, 0.72-1.67 และ 27.16-63.52 มก./กก. ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบความเข้มข้นของสารหนูในดินที่ปลูกฟ้าทะลายโจรกับค่ามาตรฐานคุณภาพดินตามประกาศคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ 2564 ข้อ 3.2 ซึ่งเป็นคุณภาพดินที่ใช้ประโยชน์เพื่อการค้าขาย เกษตรกรรม และกิจการอื่น ๆ (National Environment Board, 2021) พบว่า ความเข้มข้นของสารหนูในดินที่ปลูกฟ้าทะลายโจรทุกพื้นที่มีค่าต่ำกว่าค่ามาตรฐานคุณภาพดิน แต่อย่างไรก็ตาม ความเข้มข้นของสารหนูมีค่าต่ำกว่าค่าความเข้มข้นวิกฤตของดินที่มีผลต่อการเจริญเติบโตของพืช (Alloway, 1995; Kabata-Pendias, 2010) ในขณะที่ความเข้มข้นของแคดเมียม และตะกั่วในดินที่ปลูกฟ้าทะลายโจรอยู่ในระดับไม่เกินเกณฑ์คุณภาพดินและค่าความเข้มข้นวิกฤตที่มีผลต่อพืช (Table 1) จากข้อมูลของกรมพัฒนาที่ดินซึ่งเก็บตัวอย่างดินจากพื้นที่เกษตรกรรมทั่วประเทศจำนวน 3,186 ตัวอย่าง และประเมินโดยใช้วิธีทางสถิติทำให้ได้ค่าพื้นฐาน (background concentration) ของโลหะหนักต่าง ๆ ได้แก่ สารหนู 26 มก./กก. แคดเมียม 1.7 มก./กก.

Table 1. Chemical properties and concentration of heavy metals in soils and *Andrographis paniculata* at Nakhon Pathom province

Site	Depth	pH	Sand	Silt	Clay	OM[a]	TN[b]	AP[c]	EK[d]	CEC[e]	As[f]	Cd[g]	Pb[h]
	(cm)				(%)			(mg/kg)		cmol/kg		(mg/kg)	
P1	0-15	6.4	28.8	38.8	32.4	1.79	0.089	183.1	146.3	20.36	15.17	0.55	3.67
	15-30	6.7	25.4	43.0	31.6	1.54	0.078	171.7	96.23	19.76	15.68	0.72	46.02
P2	0-15	6.4	49.1	20.0	30.9	1.57	0.048	167.7	93.86	18.90	7.74	0.99	55.37
	15-30	6.4	49.9	20.0	30.1	1.55	0.043	169.7	95.05	18.43	8.37	0.97	27.16
P3	0-15	6.5	28.8	41.8	29.4	0.93	0.073	261.2	46.61	18.44	14.71	0.87	29.84
	15-30	6.5	26.8	44.4	28.8	0.97	0.062	257.1	46.39	17.93	14.54	0.98	45.93
P4	0-15	6.2	49.5	22.4	28.1	0.95	0.092	259.1	46.50	17.98	14.60	1.09	48.40
	15-30	6.2	36.6	36.0	27.5	0.90	0.069	259.7	35.36	17.29	11.52	1.09	59.45
P5	0-15	5.2	31.1	42.0	26.9	0.83	0.080	255.6	35.80	17.12	9.88	0.99	38.80
	15-30	4.1	38.1	35.6	26.3	0.87	0.086	257.6	35.58	16.87	11.14	0.76	46.34
P6	0-15	6.4	50.7	23.6	25.7	1.50	0.035	117.8	86.67	15.80	10.00	1.00	32.97
	15-30	6.3	50.1	24.8	25.1	1.44	0.037	113.7	87.91	15.48	12.09	1.19	30.70
P7	0-15	6.2	14.7	60.8	24.5	1.47	0.091	115.8	87.29	15.94	12.06	1.19	72.42
	15-30	6.4	15.1	61.0	23.9	1.24	0.087	135.3	90.79	15.54	12.05	1.14	63.52
P8	0-15	6.5	26.8	49.8	23.4	1.24	0.090	131.2	91.96	15.33	13.92	1.19	58.42
	15-30	6.7	26.9	50.2	22.9	1.24	0.088	133.3	91.37	15.00	11.41	1.25	63.23
P9	0-15	6.8	36.1	41.6	22.3	1.84	0.093	301.5	183.1	14.74	14.63	1.37	47.91
	15-30	6.9	34.1	44.2	21.7	1.84	0.040	297.4	181.7	13.61	18.94	1.67	51.17
P10	0-15	6.3	35.1	37.8	27.1	1.35	0.080	199.2	90.91	17.18	12.52	1.03	43.09
	15-30	6.2	33.6	39.9	26.4	1.29	0.070	199.5	84.50	16.66	12.86	1.08	48.16
[1/]Soil quality for agriculture (mg/kg)											25	762	800
[2/]Critical soil concentration											20-50	3-8	100-400

[1]National Environment Board (2021)

[2]Higher concentrations may be toxic to plants depending on speciation (Alloway, 1995)

[a]organic matter, [b]total nitrogen, [c]available phosphorus, [d] exchangeable potassium, [e]cation exchange capacity, [f]arsenic, [g]cadmium, [h]lead

และตะกั่ว 55 มก./กก. มีข้อสังเกตว่า ค่าพื้นฐานของสารหนูจากพื้นที่เกษตรกรรมทั่วประเทศ (Land Development Department, 2015) สูงกว่ามาตรฐานคุณภาพดินฯ เนื่องจากหลายพื้นที่ของประเทศไทยเป็นแหล่งสายแร่โลหะ จากการสำรวจของกรมทรัพยากรธรณี ได้รายงานว่าพื้นที่ประมาณ 1 ใน 3 ของประเทศไทย (Department of Mineral Resources, 2018) อาจมีสารหนูเกินมาตรฐานคุณภาพดินที่ใช้ประโยชน์เพื่อการอยู่อาศัยและเกษตรกรรมซึ่งเกิดจากธรณีเคมีของพื้นที่ โดยสารหนูพบมากที่สุดในรูปของอาซีโนไพไรต์ (FeAsS) นอกจากนี้ออกไซด์ของสารหนูในรูป arsenic trioxide ส่วนใหญ่เกิดจากการใช้ทางการเกษตร เช่น ยาฆ่าแมลง ปุ๋ยเคมี และมูลสัตว์ที่มีสารหนูเป็นองค์ประกอบ และการใช้สารเร่งการเจริญเติบโตของสัตว์ ทำให้มีโลหะหนักในมูลของ

สัตว์ปีกหรือปุ๋ยคอก เมื่อนำปุ๋ยคอกไปใช้อาจก่อให้เกิดการปนเปื้อนในดินได้ (Boonamnuayvitaya and Khummalai, 2015) นอกจากนี้ Liu *et al.* (2005) รายงานว่า มูลจากฟาร์มปศุสัตว์และสัตว์ปีกแบบหนาแน่นเป็นหนึ่งในแหล่งที่มาหลักของโลหะหนักในดินที่ใช้ทำการเกษตร ความเข้มข้นของสารหนู (0 - 14.1 มก./กก.) และ แคดเมียม (2.0 to 256.0 มก./กก.) มีค่าสูงเกินไปในปุ๋ยอินทรีย์เชิงพาณิชย์ จำนวน 162 ตัวอย่าง Ren *et al.* (2019) และ Rostami *et al.* (2021) รายงานว่า ความเข้มข้นของสารหนูและตะกั่วในดินที่ทำการเกษตรเพิ่มขึ้นจาก 4.81 เป็น 12.94 และ 26.65 เป็น 37.30 มก./กก. ตามลำดับหลังใช้ปุ๋ยฟอสเฟต และการใช้สารกำจัดศัตรูพืชเป็นระยะเวลานาน ทำให้ความเข้มข้นของสารหนู แคดเมียม และตะกั่ว เพิ่มขึ้นจาก 4.81 เป็น 14.15, 0.18 เป็น 0.45 และ 26.65 เป็น 38.08 มก./กก. ตามลำดับ ถึงแม้ว่าปุ๋ยและยาฆ่าแมลงมีความจำเป็นต่อการรักษาผลผลิต แต่การใช้ปุ๋ยและยาฆ่าแมลงชนิดเดียวกันในระยะยาวสามารถสะสมโลหะหนักในดินได้ (Marrugo-Negrete *et al.*, 2017)

การวิเคราะห์องค์ประกอบ (factor analysis)

การวิเคราะห์องค์ประกอบของดินเพื่อชี้บ่งพฤติกรรมของสมบัติทางธรณีเคมีที่คล้ายกันกับกลุ่มตัวอย่างดิน (Bellehumeur *et al.*,1994) พบว่า ความแปรปรวนของข้อมูลดินที่ใช้อธิบายปัจจัยหลัก สองปัจจัยที่ส่งผลต่อเนื้อดินมีค่าอยู่ที่ 68.99 % (Figure 2) โดยแบ่งสมบัติของดินออกเป็นสามกลุ่มดังนี้ กลุ่มที่ 1 ประกอบด้วยอนุภาคทรายแป้ง อินทรียวัตถุ สารหนู แคดเมียม และตะกั่ว ซึ่งธาตุเหล่านี้มีความสัมพันธ์กับปริมาณอินทรียวัตถุ โดยพื้นที่ศึกษามีการใช้ปุ๋ยคอกชนิดต่าง ๆ ได้แก่ มูลไก่ มูลแพะ มูลโค เป็นระยะเวลานานมากกว่า 20 ปี เพื่อปรับปรุงสมบัติทางกายภาพดินและเพิ่มอินทรียวัตถุให้แก่ดิน หากมีการวิเคราะห์โลหะหนักในปุ๋ยคอกแต่ละพื้นที่จะทำให้งานวิจัยมีความชัดเจนในแหล่งที่มาของโลหะหนักมากขึ้น อย่างไรก็ตาม He *et al.* (2009) และ Shi *et al.* (2011) รายงานว่าโลหะหนักที่ตกค้างในมูลสัตว์สามารถสะสมอยู่ที่ผิวดินเป็นผลจากการใช้ปุ๋ยคอกทางการเกษตรในระยะยาว และเนื้อดินอยู่ในกลุ่มเนื้อดินปานกลาง ดินร่วนปนทรายแป้ง และดินร่วน กลุ่มที่ 2 ประกอบด้วยอนุภาคทรายมีความสัมพันธ์กับดินในกลุ่มดินร่วนเหนียวปนทราย และกลุ่มที่ 3 ประกอบด้วยความจุแลกเปลี่ยนแคตไอออน กับอนุภาคดินเหนียว สัมพันธ์กับกลุ่มดินร่วนเหนียว อย่างไรก็ตาม ปริมาณของสารหนู แคดเมียม และตะกั่วในดิน ยังสะท้อนให้เห็นถึงความ-แตกต่างขององค์ประกอบของวัตถุต้นกำเนิด เนื้อดิน แร่วิทยาของดิน และมีความผันแปรตามการใส่ปุ๋ย และสาร-กำจัดศัตรูพืช (Chandrajith *et al.*, 2005; Wong *et al.*, 2002)

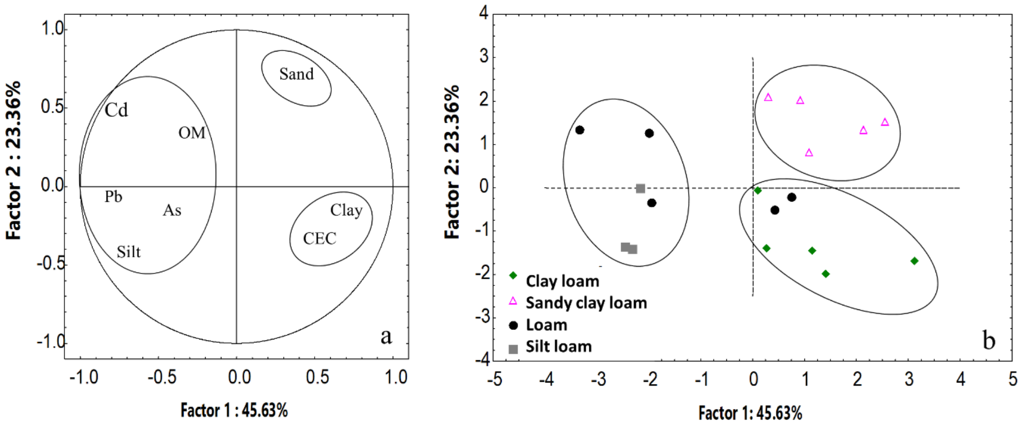

Figure 2. Factor analysis for the soil properties of whole soil materials (a) distribution of chemical properties (variables) (b) distribution of soil texture (cases)

ความเข้มข้นของโลหะหนักในฟ้าทะลายโจร

ความเข้มข้นของโลหะหนักทั้ง 3 ชนิดในฟ้าทะลายโจร มีปริมาณแตกต่างกัน โดยความเข้มข้นของตะกั่วในฟ้าทะลายโจรมีปริมาณสูงที่สุด มีค่าอยู่ในช่วง 8.9 - 19.96 มก./กก. รองลงมาเป็นสารหนูมีค่าอยู่ในช่วง 0.1 - 1.89 มก./กก. และแคดเมียมมีค่าอยู่ในช่วง 0.3 -1.28 มก./กก. ตามลำดับ (Table 2) เมื่อเปรียบเทียบความเข้มข้นของตะกั่วกับค่ามาตรฐานตามประกาศกระทรวงสาธารณสุข พ.ศ. 2564 และองค์การอนามัยโลก (WHO, 2007) ซึ่งกำหนดให้มีตะกั่วได้ไม่เกิน 10 มก./กก. พบว่า ความเข้มข้นตะกั่วในฟ้าทะลายโจรมีค่าเกินมาตรฐาน 6 บริเวณ Bolan *et al*. (2016) รายงาน ว่า ตะกั่วเป็นธาตุพิษที่พบมากที่สุดในพืชสมุนไพร โดยส่วนที่ละลายน้ำน้อยกว่า 10 % ของปริมาณทั้งหมด ในขณะที่ความเข้มข้นของสารหนูอยู่ในระดับมาตรฐานตามประกาศกระทรวงสาธารณสุข พ.ศ. 2564 ที่กำหนดไว้ แต่มีค่าสูงกว่ามาตรฐานขององค์การอนามัยโลก นอกจากนี้ยังพบว่า ความเข้มข้นของแคดเมียมในฟ้าทะลายโจรมีค่าสูงเกินค่ามาตรฐาน 9 บริเวณ (P1, P2, P3, P5, P6, P7, P8, P9 และ P10) อาจเนื่องจากการใช้ปุ๋ยเกรด 15-15-15, 46-0-0, 25-7-7 และ 30 - 5 - 5 อย่างต่อเนื่องและใช้ในอัตราสูง เป็นระยะเวลานานมากกว่า 10 ปี สอดคล้องกับ Brigden *et al*. (2002) พบว่า การปนเปื้อนของแคดเมียมในปุ๋ยสัมพันธ์ทิศทางเดียวกันกับร้อยละของ P_2O_5 ที่เป็นองค์ประกอบในปุ๋ย เนื่องจากกระบวนการเกิดหินฟอสเฟตในธรรมชาติมักพบแคดเมียมเกิดร่วมอยู่ด้วย แคดเมียมจึงเป็นสารปนเปื้อนที่สำคัญในปุ๋ยที่มีฟอสเฟตเป็นองค์ประกอบ ซึ่ง Pan *et al*. (2016) รายงานว่า การใช้ปุ๋ยฟอสเฟตถือเป็นแหล่งที่สำคัญของแคดเมียมในสิ่งแวดล้อม นอกจากนี้ปุ๋ยอนินทรีย์ เช่น ไนโตรเจน หรือโพแทสเซียมมีความเข้มข้นของแคดเมียมที่มีนัยสำคัญซึ่งเป็นแหล่งของแคดเมียมในดิน (Cai *et al*., 2012) มีเพียง 1 บริเวณที่มีค่าไม่เกินมาตรฐาน (P4) เนื่องจากพื้นที่ดังกล่าวเป็นแปลงปลูกขนาดเล็ก ไม่ได้ใส่ปุ๋ยคอกและปุ๋ยเคมี ผลผลิตที่ได้เพื่อการบริโภคในครัวเรือน อย่างไรก็ตาม ความเข้มข้นตะกั่วในฟ้าทะลายโจรมีค่าเกินมาตรฐาน 6 แหล่ง ซึ่ง Chizzola *et al*. (2003) ตั้งข้อสังเกตไว้ว่าการสะสมของตะกั่วที่ใบของสมุนไพรเป็นผลมาจากปลูกใกล้แหล่งชุมชน โรงงานอุตสาหกรรม หรือริมถนนทางหลวง ทั้งนี้ เนื่องจากพื้นที่ปลูกฟ้าทะลายโจรส่วนใหญ่อยู่ริมถนน อิทธิพลของเขม่าควันจราจรจากถนน เนื่องจากทิศทางลมที่อาจพัดพาอนุภาคขนาดเล็กของโลหะหนักจากถนนสายหลักมายังแปลงปลูกฟ้าทะลายโจร สอดคล้องกับรายงานของ Parkpian *et al*. (2003) พบว่า อนุภาคตะกั่วและแคดเมียมสามารถแขวนลอยและตกสะสมในดินและพืชได้ไกลจากแหล่งกำเนิดมากกว่า 2 กิโลเมตร ซึ่งมีลมเป็นปัจจัยสำคัญที่มีอิทธิพลในการกำหนดทิศทางของการแพร่กระจาย และระยะทางในการเคลื่อนที่ของอนุภาคตะกั่วและแคดเมียมจากเขม่าควันจราจร นอกจากนี้ความสามารถในการดูดใช้และสะสมโลหะหนักยังขึ้นกับลักษณะทางพันธุกรรม ระยะพัฒนาการ อัตราการเจริญเติบโตของพืช ความลึก และการกระจายตัวของรากพืช สัมประสิทธิ์การเคลื่อนย้าย ความต้องการธาตุอาหาร รวมถึงสัณฐานภายนอกที่มีผลต่อพื้นที่ในการตกสะสม และปริมาณการตกสะสมของอนุภาคโลหะหนักจากบรรยากาศลงสู่พืชอีกด้วย (Naszradi *et al*., 2004) นอกจากนี้ Walker *et al*. (2004) พบว่า การใส่ปุ๋ยหมักและปุ๋ยคอกที่ไม่ปนเปื้อน ช่วยลดปริมาณโลหะหนักรูปที่สกัดได้ในดิน ปริมาณการดูดใช้และสะสมในส่วนเหนือดินของพืช เนื่องจากสารฮิวมิกซึ่งเป็นส่วนสำคัญของอินทรียวัตถุที่อยู่ในปุ๋ยหมักสามารถลดความสามารถในการละลายของโลหะได้โดยการสร้างคีเลตโลหะที่เสถียร (Ross, 1994) ซึ่งสอดคล้องกับ Zhang *et al*. (2016) พบว่า การใช้ปุ๋ยอินทรีย์ช่วยปรับปรุงความปลอดภัยของสินค้าเกษตรที่ผลิตในพื้นที่เพาะปลูกที่ปนเปื้อนด้วย ตะกั่ว และ แคดเมียม เนื่องจากปุ๋ยอินทรีย์และฮิวมัสมีความสามารถในการดูดซับโลหะหนักและลดโลหะอิสระไอออนในสารละลายดิน

Table 2. Concentration of heavy metals in *Andrographis paniculata* plants

Location	As	Cd	Pb
	(mg/kg)		
P1	0.73	0.80	19.96
P2	0.10	0.79	8.91
P3	0.86	0.80	9.96
P4	1.07	0.30	16.78
P5	0.41	1.19	8.90
P6	0.30	1.19	17.81
P7	0.81	1.10	19.94
P8	1.89	1.10	14.93
P9	0.34	1.28	9.86
P10	0.72	0.95	14.12
Ministry of Public Health (2021)	5.0	0.3	10.0
WHO (2007)	0.4	0.3	10.0

การกระจายเชิงพื้นที่ของโลหะหนักในดินและฟ้าทะลายโจร

เมื่อเปรียบเทียบสัดส่วนของโลหะหนักทั้ง 3 ชนิด พบว่า การแจกกระจายของตะกั่วในดิน มีความเข้มข้นสูงสุดในทุกพื้นที่ รองลงมาเป็น สารหนู และแคดเมียม ขณะที่ ความเข้มข้นของตะกั่วในฟ้าทะลายโจรสูงสุดเช่นเดียวกันกับในดิน รองลงมาเป็นแคดเมียมและสารหนู อย่างไรก็ตาม ความเข้มข้นของสารหนูและแคดเมียมในดินบน มีความสัมพันธ์เชิงพื้นที่กับสารหนูและแคดเมียมในฟ้าทะลายโจร โดยเฉพาะบริเวณพื้นที่เก็บตัวอย่างในอำเภอดอนตูม มีความ-เข้มข้นของโลหะหนัก (As, Cd, Pb) อยู่ในระดับสูง (Figure 3) อาจเนื่องมาจากกิจกรรมทางการเกษตรในพื้นที่มีการใช้ปุ๋ยเคมีเกรด 15-15-15, 46-0-0, 25-7-7, 30-5-5 และปุ๋ยคอก ได้แก่ มูลไก่ มูลแพะ มูลโคอัตราสูงต่อเนื่องเป็นระยะเวลานานอาจส่งผลให้โลหะหนักสะสมในดินมากขึ้น

ความสัมพันธ์ระหว่างโลหะหนักในดิน ฟ้าทะลายโจร และสมบัติดินบางประการ

ความสัมพันธ์ของโลหะหนักกับสมบัติทางเคมีของดินบางประการ ได้แก่ ค่าพีเอช ปริมาณอินทรียวัตถุ ปริมาณธาตุอาหารหลัก (NPK) ค่าความจุแลกเปลี่ยนแคตไอออน และสมบัติทางกายภาพ (ปริมาณทราย ทรายแป้ง และดินเหนียว) พบว่า แคดเมียม (r = -0.835) และตะกั่วในดิน (r = -0.547) มีความสัมพันธ์เชิงลบปานกลาง (moderate negative correlation) กับปริมาณดินเหนียวและค่าความจุแลกเปลี่ยนแคตไอออน นอกจากนี้ยังพบว่า สารหนู (r = 0.429) และแคดเมียมในดิน (r = 0.421) มีความสัมพันธ์เชิงบวกน้อย (weak correlation) กับปริมาณโพแทสเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ในดิน ในขณะที่ตะกั่วและแคดเมียมในดิน (r = 0.546) มีความสัมพันธ์เชิงบวกปานกลาง (moderate positive) ต่อกัน ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Zhang *et al.* (2019) อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างโลหะหนักในดิน และ

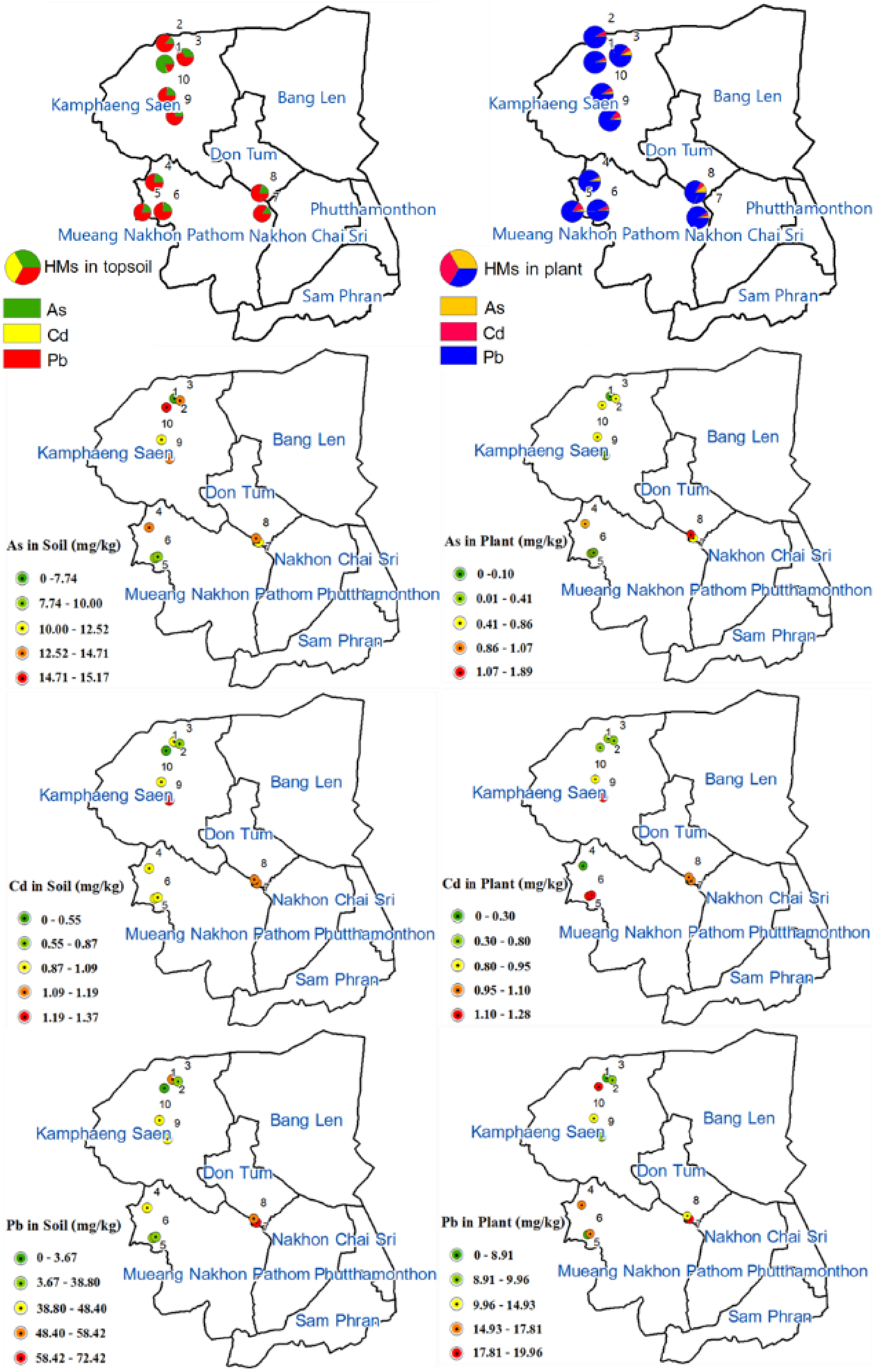

Figure 3. Proportion of heavy metals in topsoil (a) and plant (b) and distribution of As, Cd and Pb in topsoil (c, e, g) and plant (d, f, h) of Nakhon Pathom province

ฟ้าทะลายโจร สังเกตได้ว่า ทั้งสารหนู (r=0.573) และแคดเมียมในดิน (r=0.361) มีความสัมพันธ์เชิงบวกปานกลางกับพืช ยกเว้นตะกั่วที่มีความสัมพันธ์เชิงลบ (Table 3, Figure 4) จากข้อมูลความสัมพันธ์ระหว่างโลหะหนักในดินและพืช หรือโลหะหนักในดินกับสมบัติดิน ที่กล่าวมาข้างต้น จำเป็นต้องพิจารณารูปที่อยู่ในดินในสภาวะต่างๆ ซึ่งบ่งบอกถึงความสามารถในการละลายของโลหะหนักและการเคลื่อนย้ายเข้าสู่พืช โดยสารหนูในดินโดยปกติอยู่สภาวะออกซิเดชัน ได้แก่ As^{3+}, As^{5+}, As^{0} และ As^{3-} ในดินที่อากาศถ่ายเทดี สารหนูอยู่ในรูปอาร์เซเนต (As^{5+}) ซึ่งดูดซับกับอนุภาคดินเหนียวในดินที่มีพีเอชเป็นกลางได้อย่างรวดเร็ว ในสภาพดินกรดสารหนูอยู่ในรูปออกไซด์ของเหล็ก ($FeAsO_4$) และอะลูมินัม ($AlAsO_4$) ในขณะที่ดินในสภาพน้ำขัง สารหนูอยู่ในรูปอาร์เซไนต์ (As^{3+}) สามารถเคลื่อนย้ายได้ดี และมีความเป็นพิษสูง (Kamal and Miah, 2022) สำหรับรูปของแคดเมียมในดินที่มีความเป็นกรดโดยทั่วไปอยู่ในรูป Cd^{2+}, $CdSO_4^{0}$ และ $CdCl^{+}$ สามารถเคลื่อนย้ายได้สูงสุดในช่วง pH 4.5 - 5.5 ในดินด่างอยู่ในรูป $CdHCO^{3+}$ ดินที่มี pH สูงกว่า 7.5 แคดเมียมมีความสามารถในการเคลื่อนย้ายต่ำ

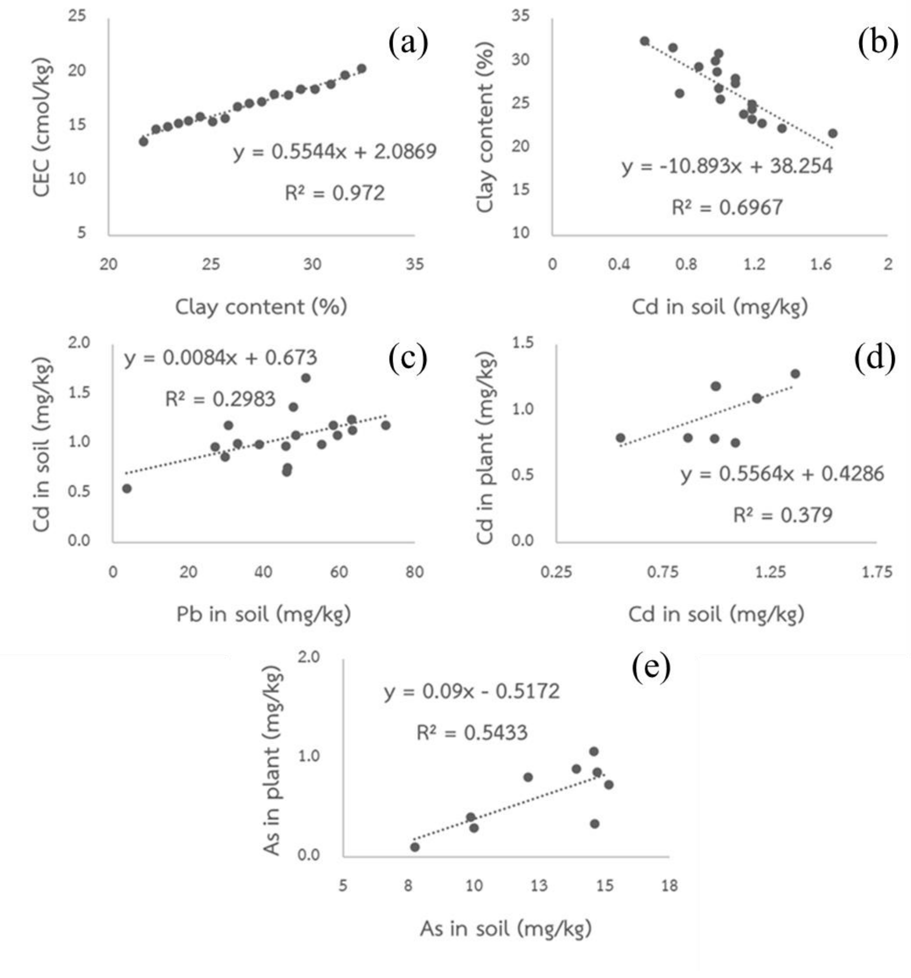

Figure 3. Proportion of heavy metals in topsoil (a) and plant (b) and distribution of As, Cd and Pb in topsoil (c, e, g) and plant (d, f, h) of Nakhon Pathom province

Table 3. The correlation coefficients for relationships between heavy metals concentrations in plant and topsoil

	Sand	Silt	Clay	pH	OM[a]	TN[b]	AP[c]	EK[d]	CEC[e]	As_s[f]	Cd_s[g]	Pb_s[h]	As_p[i]	Cd_p[j]	Pb_p[k]
Sand	1														
Silt	**-0.967****	1													
Clay	0.201	**-0.444***	1												
pH	-0.095	0.107	-0.077	1											
OM	0.091	-0.06	-0.091	**0.565****	1										
TN	**-0.613****	**0.586****	-0.094	-0.202	-0.273	1									
AP	0.079	-0.076	0.017	-0.178	-0.229	0.128	1								
AK	-0.045	0.121	-0.308	**0.565****	**0.924****	-0.095	0.005	1							
CEC	0.099	-0.346	**0.986****	-0.109	-0.134	0.074	0.036	-0.323	1						
As_s	-0.363	0.377	-0.175	0.382	0.221	0.222	**0.420***	**0.429***	-0.138	1					
Cd_s	-0.006	0.223	**-0.835****	0.387	0.245	-0.179	0.124	**0.421***	**-0.866****	0.237	1				
Pb_s	-0.389	**0.498***	**-0.547****	0.045	-0.196	0.283	0.091	-0.119	**-0.502***	-0.061	**0.546****	1			
As_p	-0.409	0.436	-0.251	0.175	0.546	0.554	0.289	0.124	-0.165	**0.573**	0.116	0.333	1		
Cd_p	-0.356	0.483	-0.626	-0.073	-0.121	-0.121	-0.047	0.033	-0.664	-0.256	**0.361**	0.149	-0.197	1	
Pb_p	-0.206	0.183	0.019	0.181	0.166	0.163	0.524	0.113	0.048	0.299	-0.234	-0.103	0.333	-0.165	1

* Correlation is significant at the 0.05 level (2-tailed)

** Correlation is significant at the 0.01 level (2-tailed)

[a]OM = organic matter, [b]TN = total nitrogen, [c]AP = available phosphorus, [d]EK = exchangeable potassium, [e]CEC = cation exchange capacity, [f]Ass = arsenic in soil, [g]Cds= cadmium in soil, [h]Pbs = lead in soil, [i]Asp= arsenic in plant, [j]Cds= cadmium in plant, [k]Pbs = lead in plant

โดยการสะสมแคดเมียมในดินมีสาเหตุหลักมาจากการตกสะสมจากบรรยากาศจากถลุงโลหะ (>1000 กรัม/เฮกตาร์/ปี) และปุ๋ยฟอสฟอรัส (>150 กรัม/เฮกตาร์/ปี) (Alloway and Steinnes, 1999) Sipos *et al*. (2005) พบว่า อินทรียวัตถุในดินมีบทบาทสำคัญในการดูดซับตะกั่ว แต่การตรึงด้วยแร่ดินเหนียวแข็งแรงมากกว่าการเคลื่อนย้ายของตะกั่วในดินมักช้า ดินที่เป็นกรดทำให้เกิดสารเชิงซ้อน Pb - OM ความสามารถในการละลายได้ของตะกั่วเพิ่มสูงขึ้น อย่างไรก็ตาม การปนเปื้อนตะกั่วในดินริมถนนเป็นปัญหาสิ่งแวดล้อมมาระยะหนึ่งแล้ว แม้ว่าสารเติมแต่งตะกั่ว ในน้ำมันเบนซินถูกห้ามใช้ในประเทศส่วนใหญ่ แต่ระดับตะกั่วในดินก็ยังเพิ่มสูงขึ้น (>7,000 มก./กก.) ตะกั่วในสารละลายดินมีทั้งรูปแบบประจุบวก (Pb^{2+}, $PbCl^{+}$, $PbOH^{+}$) และประจุลบ ($PbCl^{3-}$ และ $Pb(CO3)_2^{2-}$) (Kabata-Pendias and Sadurski, 2004) ความสามารถในการละลายของตะกั่วสามารถลดลงได้โดยการใช้ปูน ค่า pH ของดินที่สูงอาจทำให้ตะกั่วตกตะกอนได้ในรูปไฮดรอกไซด์ ฟอสเฟต หรือคาร์บอเนต รวมทั้งส่งเสริมการก่อตัวของสารเชิงซ้อนตะกั่วอินทรีย์ที่ค่อนข้างมีเสถียรภาพ Jin *et al*. (2005) กล่าวว่าอินทรียวัตถุในดินเป็นปัจจัยที่สำคัญที่สุดในการเพิ่มการดูดซึมของตะกั่ว ในพืชยังขึ้นกับสมบัติดิน ได้แก่ CEC และ pH รวมถึงปัจจัยทางพันธุกรรมของพืช พื้นที่ผิวราก และสารหลั่งของราก (Davies, 1995) นอกจากนี้ตะกั่วในอากาศซึ่งเป็นแหล่งกำเนิดมลพิษหลักของตะกั่วก็ถูกพืชดูดซึมผ่านใบพืชได้อย่างง่ายดายเช่นกัน จากงานวิจัยที่ผ่านมาแสดงให้เห็นว่าตะกั่วที่ตกสะสมอยู่บนผิวใบถูกเซลล์เหล่านี้ดูดซับไว้ แม้ว่าตะกั่วส่วนใหญ่สามารถกำจัดออกจากพื้นผิวใบได้โดยการล้างด้วยสารทำความสะอาด แต่ก็มีแนวโน้มว่าจะมีการเคลื่อนย้ายตะกั่วไปยังเนื้อเยื่อพืชอย่างมีนัยสำคัญ (Isermann, 1970) โดยมีการคำนวณว่ามากถึง 95 % ของตะกั่วทั้งหมดของพืชอาจเกิดจากการสะสมทางอากาศบนพืชที่มีใบ (Dalenberg and van Driel, 1990) อย่างไรก็ตาม Keshavarzi *et al*. (2015) รายงานว่าปริมาณธาตุทั้งหมดในดินไม่ได้เป็นตัวกำหนดความเข้มข้นของธาตุในพืชเท่านั้น ทั้งนี้เนื่องจากกระบวนการที่ซับซ้อนในพืช รวมทั้งปัจจัยสภาพแวดล้อมต่าง ๆ ซึ่งส่งผลต่อการเคลื่อนย้ายธาตุจากดินสู่พืช เช่น ความเข้มข้นของธาตุทั้งหมดในดินและชนิดพันธุ์พืช

สรุป

ดินที่ปลูกฟ้าทะลายโจรในจังหวัดนครปฐมมีเนื้อดินส่วนใหญ่เป็นดินร่วนเหนียว ความอุดมสมบูรณ์ดินอยู่ในระดับปานกลาง และมีค่าพีเอชเป็นกรดเล็กน้อย ซึ่งเป็นช่วงที่ธาตุอาหารพืชในดินเป็นประโยชน์สูง ความเข้มข้นของสารหนู (7.74 - 18.94 มก./กก.) แคดเมียม (0.55 - 1.67 มก./กก.) และตะกั่ว (3.67 - 72.42 มก./กก.) ในดินอยู่ในระดับไม่เกินค่ามาตรฐานคุณภาพดินเพื่อการอยู่อาศัยและเกษตรกรรม (25, 762 และ 800 มก./กก.) ตามประกาศคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ 2564 ความเข้มข้นของแคดเมียม (0.3 - 1.28 มก./กก.) และตะกั่ว (8.90 - 19.96 มก./กก.) ในฟ้าทะลายโจรบางบริเวณมีค่าเกินมาตรฐานของยาสมุนไพรไทย (0.3 และ 10 มก./กก.) และองค์การอนามัยโลก (0.3 และ 10 มก./กก.) ในขณะที่ความเข้มข้นของสารหนูอยู่ในระดับมาตรฐานที่กำหนดไว้ การแจกกระจายของตะกั่วในดิน มีความเข้มข้นสูงสุดในทุกพื้นที่ รองลงมาเป็นสารหนู และแคดเมียม ขณะที่ความเข้มข้นของตะกั่วในฟ้าทะลายโจรมีปริมาณสูงสุดเช่นเดียวกันกับในดิน รองลงมาเป็นแคดเมียม และสารหนู ความสัมพันธ์ของโลหะหนักกับสมบัติทางเคมีของดิน พบว่า บริเวณที่มีปริมาณดินเหนียวสูง มีปริมาณแคดเมียมและตะกั่วน้อย อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างโลหะหนักในดิน และฟ้าทะลายโจร สังเกตได้ว่าความเข้มข้นของสารหนู และแคดเมียมในดินสูงขึ้นมีแนวโน้มให้ความเข้มข้นในการสะสมโลหะหนักในพืชสูงขึ้นอีกด้วย ยกเว้นตะกั่ว การวิจัยครั้งนี้สามารถใช้เป็นฐานข้อมูลเบื้องต้นในการวางแผนการจัดการดินในการปลูกพืชสมุนไพรเพื่อให้มีความปลอดภัยต่อผู้บริโภค และมีมาตรฐานตามข้อกำหนดของยาสมุนไพรไทย

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน ปีงบประมาณ 2565

เอกสารอ้างอิง

Alloway, B.J. 1995. The origin of heavy metals in soils. pp.38 - 57. *In*: B.J. Alloway (ed.). Heavy Metals in Soils. Blackie Academic and Professional, London. 368 p.

Alloway, B.J. and E. Steinnes. 1999. Anthropogenic additions of cadmium to soils. pp. 97-123. *In:* M.J. McLaughlin, B.R. Singh (eds.). Cadmium in Soils and Plants. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht.

Amacher, C.M. 1996. Nickel, Cadmium and Lead. pp. 739-768. *In*: D.L. Sparks, A.L. Page, P.A. Helmke, R.H. Loeppert (ed.). Methods of Soil Analysis, Part 3: Chemical Methods. SSSA Book Series no.5. Soil Science Society of America and American Society of Agronomy, Madison, Wisconsin.

ATSDR. 2022. The ATSDR 2022 substance priority list. (Online). Available: https://www.atsdr.cdc.gov/spl/index.html#2022spl (July 7, 2023).

Awodele, O., T.D. Popoola, K.C. Amadi, H.A.B Coker and A. Akintonwa. 2013. Traditional medicinal plants in Nigeria -Remedies or risks. Journal of Ethnopharmacology 150(2): 614-618.

Bellehumeur, C., D. Marcotte and M. Jébrak. 1994. Multi-element relationships and spatial structures of regional geochemical data from stream sediments, Southwestern Quebec. Canada. Journal of Geochemical Exploration 51(1): 11-35.

Bolan, S., R. Naidu, A. Kunhikrishnan, B. Seshadri, Y.S. Ok, T. Palanisami, M. Dong and I. Clark. 2016. Speciation and bioavailability of lead in complementary medicines. Science of the Total Environment 539: 304-312.

Boonamnuayvitaya, V. and N. Khummalai. 2015. Arsenic and Environment. (Online). Available: https://digital.lib.kmutt.ac.th/magazine/issue2/articles/art2.html (June 16, 2023). (in Thai)

Brigden, K., R. Stringer and D. Santillo. 2002. Heavy metal and radionuclide contamination of fertilizer products and phosphogypsum waste produced by the Lebanese Chemical Company, Lebanon, 2002. Technical Note 13/2002, Greenpeace Research Laboratories, University of Exeter, Exeter. 15 p.

Cai, L., Z. Xu, M. Ren, Q. Guo, X. Hu, G. Hu, H. Wan and P. Peng. 2012. Source identification of eight hazardous heavy metals in agricultural soils of Huizhou, Guangdong province, China. Ecotoxicology and Environmental Safety 78: 2-8.

Chandrajith, R., C.B. Dissanayake and H.J. Tobschall. 2005. The abundances of rarer trace elements in paddy (rice) soil of Sri Lanka. Chemosphere 58(10): 1415-1420.

Chizzola, R., H. Michitsch and C. Franz. 2003. Monitoring of metallic micronutrients and heavy metals in herbs, spices and medicinal plants from Austria. European Food Research and Technology 216: 407-411.

Dalenberg, J.W. and W. van Driel. 1990 Contribution of atmospheric deposition to heavy metal concentrations in field crops. Netherlands Journal of Agricultural Science 38: 369-379.

Davies, B.E. 1995. Lead. pp. 206-223. *In:* B.J. Alloway (ed.). Heavy Metals in Soils. Trace Metals and Metalloids in Soils and their Bioavailability. 3rd ed. Blackie Academic and Professional, London. 368 p.

Department of Mineral Resources. 2018. Arsenic map. (Online). Available: http://www.dmr.go.th/download/poster/acrobat/as_a4.pdf (June 23, 2023). (in Thai)

Dghaim, R., S. Al. Khatib, H. Rasool and M. Ali. Khan. 2015. Determination of heavy metals concentration in traditional herbs commonly consumed in the United Arab Emirates. Journal of Environmental Public Health 2015: 973878, doi: 10.1155/2015/973878.

Harris, E.S.J., S. Cao, B.A. Littlefield, J.A. Craycroft, R. Scholten, T. Kaptchuk, Y. Fu, W. Wang, Y. Liu, H. Chen, Z. Zhao, J. Clardy, A.D. Woolf and D.M. Eisenberg. 2011. Heavy metal and pesticide content in commonly prescribed individual raw Chinese herbal medicines. Science of the Total Environment 409(20): 4297-4305.

Isermann, K. 1970. A method to reduce contamination and uptake of lead by plants from car exhaust gases. Environmental Pollution 12(3): 199-203.

He, Z.Q., D.M. Endale, H.H. Schomberg and M.B. Jenkins. 2009. Total phosphorus, zinc, copper, and manganese concentrations in Cecil soil through 10 years of poultry litter application. Soil Science 174(12) :687- 695.

Jarukamjorn, K. and N. Nemoto. 2008. Pharmacological aspects of *Andrographis paniculata* on health and its major diterpenoid constituent andrographolide. Journal of Health Sciences 54(4): 370-381.

Järup, L. 2003. Hazards of heavy metal contamination. British Medical Bulletin 68(1):167-182.

Jiang, M., F. Sheng, Z. Zhang, X. Ma, T. Gao, C. Fu and P. Li. 2021. *Andrographis paniculata* (Burm. f.) Nees and its major constituent andrographolide as potential antiviral agents. Journal of Ethnopharmacology 272: 113954, doi:10.1016/j.jep.2021.113954

Jin, C.W., S.J. Zheng, Y.F. He, G.D. Zhou and Z.X. Zhou. 2005. Lead contamination in the garden soils and factors affecting its bioavailability. Chemosphere 59(8): 1151-1159.

Kabata-Pendias, A. and W. Sadurski. 2004. Trace elements and compounds in soil. pp. 79-99. *In:* E. Merian, M. Anke, M. Ihnat and M. Stoeppler (2 eds.). Elements and their Compounds in the Environment, Wiley-VCH, Weinheim.

Kabata-Pendias, A. 2010. Trace Elements in Soils and Plants 4th ed. CRC Press, Boca Raton. 548 p.

Kamal, M.Z.U. and M.Y. Miah. 2022. Arsenic speciation techniques in soil water and plant: an overview. pp. 1 - 32. *In*: M. Stoytcheva and R. Zlatev (eds.). Arsenic Monitoring, Removal and Remediation. IntechOpen, London.

Keshavarzi, B., F. Moore, M. Ansari, M.R. Mehr, H. Kaabi and M. Kermani. 2015. Macronutrients and trace metals in soil and food crops of Isfahan province, Iran. Environmental Monitoring and Assessment 187(1): 4113, doi: 10.1007/s10661-014-4113-y.

Khan, A, S. Khan, M.A. Khan, Z. Qamar and M. Waqas. 2015. The uptake and bioaccumulation of heavy metals by food plants, their effects on plants nutrients, and

associated health risk: A review. Environmental Science and Pollution Research 22(18): 13772-13799.

Kim, H.S., B.-H. Seo, J.-S. Bae, W.-I. Kim, G. Owens and K.-R. Kim. 2016. An integrated approach to safer plant production on metal contaminated soils using species selection and chemical immobilization. Ecotoxicology and Environmental Safety 131: 89-95.

Land Development Department. 2015. State of soil and land resources of Thailand. Research and Development for Land Management Division. Land Development Department, Bangkok. 304 p. (in Thai).

Land Development Department. 2019. Land use map. (Online). Available: http://www1.ldd.go.th/web_OLP/Lu_62/Lu62_C/NPT2562.htm (Feb 24, 2022). (in Thai)

Limmatvapirat, C.T. Phaechamud and J. Charoenteeraboon. 2010. Determination the concentration of heavy metals in Thai herbal plants in family Zingiberaceae using inductively coupled plasma-mass spectrometry (ICP-MS). Final Report. Faculty of Pharmacy, Silpakorn University, Nakhon Pathom. 86 p. (in Thai)

Liu, R., S. Li, X. Wang and M. Wang. 2005. Contents of heavy metal in commercial organic fertilizer and organic wastes. Journal of Agro-environmental Science 24: 392-397.

Maiga, A., D. Diallo, R. Bye and B.S. Paulsen. 2005. Determination of some toxic and essential metal ions in medicinal and edible plants from Mali. Journal of Agricultural and Food Chemistry 53(6): 2316-2321.

Maobe, M.A.G, E. Gatebe, L. Gitu and H. Rotich. 2012. Profile of heavy metals in selected medicinal plants used for the treatment of diabetes, malaria and pneumonia in Kisii region, Southwest Kenya. Global Journal of Pharmacology 6(3): 245-251.

Marrugo-Negrete, J., J. Pinedo-Hernández and S. Díez. 2017. Assessment of heavy metal pollution, spatial distribution and origin in agricultural soils along the Sinú River Basin, Colombia. Environmental Research 54: 380-388.

Ministry of Public Health. 2021. Standard criteria, purity or other characteristics that are important to quality for registration of herbal products, inform details or notify. (Online). Available: https://www.ratchakitcha.soc.go.th/DATA/PDF/2564/E/294/T_0006.PDF (June 10, 2023). (in Thai).

Naszradi, T., A. Badacsonyi, N. Nemeth, Z. Tuba and F. Batic. 2004. Zinc, lead and cadmium content in meadow plants and mosses along the M13 motorway (Hungary). Journal of Atmospheric Chemistry 49: 593-603.

National Environment Board. 2021. Notification of the National Environmental Board: Soil quality standard. The Royal Gazette 138 (54 d): 20-24. (in Thai)

National Soil Survey Center. 1996. Soil Survey Laboratory Methods Manual. Soil Survey Investigation No. 42, Version 3. National Soil Survey Center, USDA, Washington, D.C. 735 p.

Pan, L., J. Ma, Y. Hu, B. Su, G. Fang, Y. Wang, Z. Wang, L. Wang and B. Xiang. 2016. Assessments of levels, potential ecological risk, and human health risk of heavy metals in the soils from a typical county in Shanxi province, China. Environmental Science and Pollution Research 23: 19330-19340.

Parkpian, P., S.T. Leong, P. Laortanakul and N. Thunthaisong. 2003. Regional monitoring of lead and cadmium contamination in a tropical grazing land site, Thailand. Environmental Monitoring and Assessment 85(2): 157-173.

Ren, Z., R. Xiao, Z. Zhang, X. Lv and X. Fei. 2019. Risk assessment and source identification of heavy metals in agricultural soil: A case study in the coastal city of Zhejiang province, China. Stochastic Environmental Research and Risk Assessment 33: 2109-2118.

Ross, S.M. 1994. Toxic Metals in Soil-Plant Systems. John Wiley & Sons, Chichester. 469 p.

Rostami, S., H. Kamani, S. Shahsavani and M. Hoseini. 2021. Environmental monitoring and ecological risk assessment of heavy metals in farmland soils. Human and Ecological Risk Assessment 27(2): 392-404.

Sipos, P., T. Nemeth and I. Mohai. 2005. Distribution and possible immobilization of lead in a forest soil (Luvisol) profile. Environmental Geochemistry and Health 27(1): 1-10.

Shi J., X. Yu, M. Zhang, S. Lu, W. Wu, J. Wu and J. Xu. 2011. Potential risks of copper, zinc, and cadmium pollution due to pig manure application in a soil-rice system under intensive farming: A case study of Nanhu, China. Journal of Environmental Quality 40(6):1695-1704.

Singh, J. and A.S. Kalamdhad. 2011. Effects of heavy metals on soil, plants, human health and aquatic life. International Journal of Research in Chemistry and Environment 1(2): 15-21.

Soil Survey Division. 2011. Detailed reconnaissance soil map of provinces in Thailand (scale 1: 100,000). (Online). Available: http://oss101.ldd.go.th/web_th_soilseries/01_central/73_NakhonPathom/73_prov.htm (Feb 24, 2022). (in Thai)

Walker, D.J., R. Clemente and M.P. Bernal. 2004. Contrasting effects of manure and compost on soil pH, heavy metal availability and growth of *Chenopodium album* L. in a soil contaminated by pyritic mine waste. Chemosphere 57(3): 215-224.

WHO. 2007. WHO Guidelines for Assessing Quality of Herbal Medicines with Reference to Contaminants and Residues. WHO Press, Geneva.

Wong, S.C., X.D. Li, G. Zhang, S.H. Qi and Y.S. Min. 2002. Heavy metals in agricultural soils of the Pearl River Delta, South China. Environmental Pollution 119(1): 33-44.

Yang, Y., Y. Guangyu and Q. Lin. 2004. Determination of heavy metal ions in Chinese herbal medicine by microwave digestion and RP-HPLC with UV-Vis detection. Microchimica Acta 144: 297-302.

Zarcinas, B.A., B. Cartwright and L.R. Spouncer. 1987. Nitric acid digestion and multi-element analysis of plant material by inductively coupled plasma spectrometry. Communications in Soil Science and Plant Analysis 18(1): 131-146.

Zhang, J., Y. Xu and Y. Wu. 2016. Factors affecting the levels of Pb and Cd heavy metals in contaminated farmland soils. Advances in Biological Sciences Research 3: 379-387.

Zhang, Q., R. Yu, S. Fu, Z. Wu, H.Y.H. Chen and H. Liu. 2019. Spatial heterogeneity of heavy metal contamination in soils and plants in Hefei, China. Scientific Reports 9(1): 1049, doi:10.1038/s41598-018-36582-y.