

รูปฟอร์มทางเคมีของตะกั่วและแคดเมียมในดินปนเปื้อนสังเคราะห์*

Chemical speciation of Pb and Cd in artificially contaminated soils

ดาวรุ่ง สังข์ทอง (Daoroon Sungthong)**

วิทยากรณ์ คงอยู่ (Witthayaporn Kongyoo)***

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษารูปฟอร์มของตะกั่วและแคดเมียมในดินปนเปื้อนสังเคราะห์ โดยใช้วิธีการสกัดเป็นลำดับขั้นแบบบีชีอาร์ดัดแปลง ซึ่งมีขั้นตอนการสกัดแบ่งออกเป็น 4 ขั้นตอน ทำให้สามารถแยกรูปฟอร์มของตะกั่วและแคดเมียมออกเป็นรูปฟอร์มต่าง ๆ ได้แก่ รูปฟอร์มที่ละลายในน้ำและสกัดได้ด้วยกรดหรือรูปฟอร์มที่แลกเปลี่ยนได้ (Water and acid-soluble/Exchangeable fraction, EXC) รูปฟอร์มที่ถูกรีดิวซ์ได้ง่าย (Easily reducible fraction, RED) รูปฟอร์มที่ถูกออกซิไดซ์ได้ (Oxidizable fraction, OXI) และรูปฟอร์มที่คงเหลือจากการสกัด (Residual fraction, RESD) นอกจากนี้ได้ตรวจวัดปริมาณของตะกั่วและแคดเมียมในรูปเสมือนทั้งหมด (Pseudo-total metal content, Pseudo-T) โดยใช้วิธีย่อยด้วยกรดผสม ผลการศึกษาพบว่าดินปนเปื้อนสังเคราะห์มีลำดับการกระจายตัวของสัดส่วนปริมาณตะกั่วแต่ละรูปฟอร์มคือ $RED > EXC \approx RESD > OXI$ ส่วนลำดับการกระจายตัวของสัดส่วนปริมาณแคดเมียมแต่ละรูปฟอร์มคือ $EXC > RED > OXI > RESD$ นอกจากนี้ยังพบว่าสามารถพยากรณ์ปริมาณตะกั่วรูปฟอร์มต่าง ๆ ได้จากปริมาณตะกั่วเสมือนทั้งหมดในดินปนเปื้อนสังเคราะห์ (Pseudo-T Pb) ด้วยสมการดังนี้ $EXC = (0.148 \times \text{Pseudo-T Pb}) - 93.73$ ($R^2 = 0.926$) $RED = (0.936 \times \text{Pseudo-T Pb})$ ($R^2 = 1.000$) $OXI = (0.025 \times \text{Pseudo-T Pb}) - 10.49$ ($R^2 = 0.987$) และสามารถพยากรณ์ปริมาณแคดเมียมรูปฟอร์มต่าง ๆ ได้จากปริมาณแคดเมียมเสมือนทั้งหมดในดินปนเปื้อนสังเคราะห์ (Pseudo-T Cd) ด้วยสมการดังนี้ $EXC = (0.681 \times \text{Pseudo-T Cd}) - 68.99$ ($R^2 = 0.996$) $RED = (0.310 \times \text{Pseudo-T Cd})$ ($R^2 = 0.934$) $OXI = (0.006 \times \text{Pseudo-T Cd})$ ($R^2 = 0.947$)

คำสำคัญ: การสกัดเป็นลำดับขั้นแบบบีชีอาร์ดัดแปลง, รูปฟอร์มทางเคมี, โลหะหนัก, ดินปนเปื้อนสังเคราะห์

* บทความวิจัยนี้จัดทำขึ้นเพื่อเผยแพร่ผลงานวิจัยบางส่วนในรายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์เรื่อง “การใช้วิธีการสกัดเป็นลำดับขั้นแบบบีชีอาร์ดัดแปลงเพื่อศึกษารูปฟอร์มของตะกั่วและแคดเมียมในดินปนเปื้อนสังเคราะห์”

This research article was prepared to publicize a part of research in the research report entitled “Use of the modified BCR sequential extraction procedure for the speciation of Pb and Cd in artificially contaminated soils”

** ดร. อาจารย์ประจำภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร

Lecturer, Ph.D., Department of Environmental Science, Faculty of Science, Silpakorn University, Tel: 081 900 7223, Email: dao_roong@hotmail.com

*** นักศึกษาระดับปริญญาโท สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร

Graduate student, Department of Environmental Science, Faculty of Science, Silpakorn University

Abstract

This research was conducted to study the speciation of lead (Pb) and cadmium (Cd) in artificially contaminated soils using the modified BCR sequential extraction procedure. This extraction procedure consisted of 4 steps in which the speciation of Pb and Cd could be distributed into different fractions including water and acid-soluble/exchangeable fraction (EXC), easily reducible fraction (RED), oxidizable fraction (OXI) and residual fraction (RES). The pseudo-total metal contents (Pseudo-T) of Pb and Cd in the artificially contaminated soils were also determined using the digestion with aqua regia. Based on the results, the distributing fractionation of Pb in the artificially contaminated soils followed the order: $RED > EXC \approx RESD > OXI$, while the distributing fractionation of Cd followed the order: $EXC > RED > OXI > RESD$. Additionally, it was found that the amount of Pb in each fraction could be predicted using the amount of pseudo-total Pb content (Pseudo-T Pb) with the following equations: $EXC = (0.148 \times \text{Pseudo-T Pb}) - 93.73$ ($R^2 = 0.926$), $RED = (0.936 \times \text{Pseudo-T Pb})$ ($R^2 = 1.000$) and $OXI = (0.025 \times \text{Pseudo-T Pb}) - 10.49$ ($R^2 = 0.987$). Similarly, the amount of Cd in each fraction could be predicted using the amount of pseudo-total Cd content (Pseudo-T Cd) with the following equations: $EXC = (0.681 \times \text{Pseudo-T Cd}) - 68.99$ ($R^2 = 0.996$), $RED = (0.310 \times \text{Pseudo-T Cd})$ ($R^2 = 0.934$) and $OXI = (0.006 \times \text{Pseudo-T Cd})$ ($R^2 = 0.947$).

Keywords: Modified BCR sequential extraction, Chemical speciation, Heavy metals, Artificially contaminated soils

บทนำ

ดินจัดเป็นทรัพยากรธรรมชาติที่มีความสำคัญอย่างมากต่อการดำรงชีวิตของมนุษย์และการเจริญเติบโตของทั้งพืชและสัตว์ เนื่องจากดินเป็นแหล่งกำเนิดและเป็นแหล่งผลิตปัจจัยสำคัญที่เกี่ยวข้องกับการดำรงชีวิต อันได้แก่ อาหาร เครื่องนุ่งห่ม ที่อยู่อาศัย และยารักษาโรค ซึ่งสิ่งเหล่านี้ล้วนมีส่วนเกื้อหนุนต่อสิ่งมีชีวิตและทำให้สิ่งมีชีวิตสามารถดำรงอยู่ในโลกได้ ปัจจุบันเมื่อความก้าวหน้าทางวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีมีมากขึ้น ประกอบกับจำนวนประชากรที่เพิ่มสูงขึ้น ส่งผลให้มีการขยายตัวของพื้นที่อุตสาหกรรมและพื้นที่ที่อยู่อาศัย นอกจากนี้ยังมีการทำการเกษตรแบบเข้มข้นโดยใช้สารเคมีกำจัดศัตรูพืชและปุ๋ยวิทยาศาสตร์ เพื่อเพิ่มผลผลิตทางการเกษตรให้ทันต่อความต้องการของผู้บริโภคที่สูงขึ้น ซึ่งการดำเนินกิจกรรมต่าง ๆ เหล่านี้ทำให้ทรัพยากรดินที่เคยอุดมสมบูรณ์เกิดความเสื่อมโทรม และมีความเสี่ยงต่อการปนเปื้อนของสารพิษ

การปนเปื้อนของโลหะหนัก (Heavy metals) ในดิน จัดเป็นปัญหาหนึ่งที่นับวันจะทวีความรุนแรงเพิ่มมากขึ้น และมักมีสาเหตุที่สำคัญมาจากการทำเหมืองแร่ การดำเนินงานของอุตสาหกรรมบางประเภท การใช้ประโยชน์ผลิตภัณฑ์สังเคราะห์บางชนิด (สารเคมีกำจัดศัตรูพืช สี และแบตเตอรี่) การกำจัดของเสียอุตสาหกรรมอย่างไม่ถูกวิธี และการนำกากตะกอนจากการบำบัดน้ำเสียไปใช้ประโยชน์ในพื้นที่ดิน เป็นต้น โดยชนิดของโลหะ

หนักที่มักพบเป็นปัญหาการปนเปื้อนในดิน ได้แก่ปรอท (Mercury, Hg) แคดเมียม (Cadmium, Cd) ตะกั่ว (Lead, Pb) นิกเกิล (Nickel, Ni) ทองแดง (Copper, Cu) สังกะสี (Zinc, Zn) โครเมียม (Chromium, Cr) แมงกานีส (Manganese, Mn) อาร์เซนิก (Arsenic, As) โมลิบดีนัม (Molybdenum, Mo) ซีลีเนียม (Selenium, Se) และโบรอน (Boron, B) (USDA & NRCS, 2000) อย่างไรก็ตาม การปนเปื้อนของโลหะหนักในดินอาจเกิดขึ้นได้เองตามธรรมชาติ แต่ปริมาณการปนเปื้อนดังกล่าวมักไม่ค่อยพบถึงในระดับที่เป็นพิษ

การปนเปื้อนของโลหะหนักในดินอาจก่อให้เกิดความเสี่ยงและความเป็นอันตรายต่อมนุษย์และระบบนิเวศได้ เช่น การปนเปื้อนของโลหะหนักในพื้นที่เกษตรกรรมอาจส่งผลให้มีการปนเปื้อนของโลหะหนักในผลผลิตเมื่อนำมาบริโภคอาจก่อให้เกิดอันตรายได้ นอกจากนี้โลหะหนักที่ปนเปื้อนในดินอาจถูกชะล้าง (Leaching) โดยกระบวนการทางธรรมชาติหรือโดยการกระทำของมนุษย์ที่สภาวะต่าง ๆ ทำให้โลหะหนักถูกปลดปล่อยสู่แหล่งน้ำใต้ดินและแหล่งน้ำผิวดิน ก่อให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและระบบนิเวศในวงกว้างได้ในที่สุด ดังนั้นจึงมีความจำเป็นต้องมีการตรวจติดตามและตรวจวัดปริมาณการปนเปื้อนของโลหะหนักในดินอย่างสม่ำเสมอ (ยุวดี เชี่ยววัฒนา และคณะ, 2545)

แม้ว่าปริมาณโลหะหนักทั้งหมดในดิน (Total metal concentration) จะเป็นตัวบ่งชี้ที่ดีถึงระดับความรุนแรงและความมากน้อยของการปนเปื้อน แต่ข้อมูลดังกล่าวไม่เพียงพอต่อการประเมินถึงศักยภาพของความเป็นอันตรายต่อสิ่งแวดล้อม กล่าวคือ ปริมาณโลหะหนักทั้งหมดดังกล่าวไม่สามารถบ่งชี้ถึงปริมาณโลหะหนักที่พร้อมใช้ทางชีวภาพ (Bioavailability of heavy metal) หรือบอกถึงปริมาณโลหะหนักที่มีศักยภาพในการเคลื่อนที่ (Mobility of heavy metal) สู่สิ่งแวดล้อมโดยรอบได้ (Karmer & Allen, 1988; ยุวดี เชี่ยววัฒนา และคณะ, 2545) ซึ่งปริมาณโลหะหนักที่พร้อมใช้ทางชีวภาพและมีศักยภาพในการเคลื่อนที่สู่สิ่งแวดล้อมเหล่านี้มักขึ้นอยู่กับรูปฟอร์มทางเคมี (Chemical speciation) และการเกาะจับอยู่กับอนุภาคดิน ด้วยเหตุนี้จึงควรตรวจวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนักในรูปฟอร์มต่าง ๆ นอกเหนือจากการตรวจวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนักทั้งหมด เพื่อประเมินระดับความรุนแรงของการปนเปื้อนและผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมที่อาจเกิดขึ้นได้อย่างครอบคลุม (Fuentes et al., 2004; Wang, Li, Ma, Qian, & Zhai, 2006) โดยโลหะหนักที่ถูกตรึงอยู่อย่างหลวม ๆ กับอนุภาคดิน เช่น รูปฟอร์มที่ละลายได้ง่าย (Soluble form) รูปฟอร์มที่แลกเปลี่ยนได้ (Exchangeable form) และรูปฟอร์มที่ถูกตรึงอยู่กับอนุภาคดิน (Adsorbed form) มีแนวโน้มที่จะเกิดการเคลื่อนที่และแพร่กระจายสู่สิ่งแวดล้อมได้ง่าย ส่วนรูปฟอร์มที่ถูกตรึงอยู่กับอินทรีย์วัตถุหรือถูกตรึงอยู่ในโครงสร้างผลึกของอนุภาคดินจะเคลื่อนที่ออกสู่สิ่งแวดล้อมได้ยาก

วิธีวิเคราะห์รูปฟอร์มของโลหะหนักสามารถทำได้ในหลายวิธี ทั้งโดยใช้การสกัดแบบขั้นตอนเดียว (Single extraction) และการสกัดเป็นลำดับขั้น (Sequential extraction) ซึ่งวิธีการสกัดเป็นลำดับขั้นนี้ได้ถูกนำไปใช้ศึกษารูปฟอร์มของโลหะหนักที่ปนเปื้อนในพื้นที่ดินประเภทต่าง ๆ มากมาย เช่น ในพื้นที่เหมืองตะกั่ว (อภิญา พัดพิน, 2551; Li & Thornton, 2001) พื้นที่เกษตรกรรม (ยุวดี เชี่ยววัฒนา และคณะ, 2545; Wong, Li, Zhang, Qi, & Min, 2002) รวมถึงมีการศึกษาถึงรูปฟอร์มของโลหะหนักในกากตะกอนจากการบำบัดน้ำเสีย (สุพจน์ หมอয়াไทย และ ศุภเกียรติ ศรีพนมธนากร, 2548; Perez-Cid, Lavilla, & Bendicho, 1996) ในฝุ่นสำนักงาน (Jaradat, 2002) และในดินตะกอน (เบญจลักษณ์ พลายุโก, 2546; สุมาลี นิลพฤกษ์, 2551; อภิญา พัดพิน, 2551) เป็นต้น

สำหรับงานวิจัยนี้ได้ศึกษาถึงรูปฟอร์มของตะกั่วและแคดเมียมในดินปนเปื้อนสังเคราะห์ที่ระดับความเข้มข้นต่าง ๆ กัน เนื่องจากพิจารณาเห็นว่าตะกั่วและแคดเมียมเป็นสารมลพิษสำคัญที่อาจพบปนเปื้อนอยู่ในดิน และมีความเป็นพิษสูง (Onweremadu & Duruigbo, 2007) โดยการใช้การสกัดเป็นลำดับขั้นแบบบีซีอาร์ (European Community Bureau of Reference, BCR) ซึ่งเป็นวิธีที่สามารถสกัดรูปฟอร์มของโลหะหนักออกเป็น 4 รูปคือ รูปฟอร์มที่ละลายในน้ำและสกัดได้ด้วยกรดหรือรูปฟอร์มที่แลกเปลี่ยนได้ (Water and acid-soluble/Exchangeable fraction, EXC) รูปฟอร์มที่ถูกรีดิวซ์ได้ง่าย (Easily reducible fraction, RED) รูปฟอร์มที่ถูกออกซิไดซ์ได้ (Oxidizable fraction, OXI) และรูปฟอร์มที่คงเหลือจากการสกัด (Residual fraction, RESD) เพื่อนำมาใช้เป็นข้อมูลในการประเมินระดับความรุนแรงของการปนเปื้อนและประเมินระดับความรุนแรงของผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมที่อาจเกิดขึ้น หากดินมีการปนเปื้อนด้วยตะกั่วและแคดเมียมที่ระดับความเข้มข้นต่าง ๆ

การดำเนินการวิจัย

1. การเก็บและเตรียมตัวอย่างดินที่ใช้ในการศึกษา

ดินตัวอย่างที่ใช้ในการศึกษาค้างนี้เป็นดินจากพื้นที่เกษตรกรรมบริเวณหมู่ที่ 4 ตำบลธรรมศาลา อำเภอเมือง จังหวัดนครปฐม โดยการเก็บตัวอย่างใช้วิธีเก็บตัวอย่างดินรวม (Composite sample) และทำการเก็บตัวอย่างดินแบบสุ่มด้วยสว่านเจาะดิน (Soil auger) หลังจากนั้นผึ่งดินให้แห้งในที่ร่ม (Air dried) และบดให้ละเอียด แล้วร่อนผ่านตะแกรงที่มีขนาดช่อง 2 มิลลิเมตร และผสมคลุกเคล้าให้เข้ากันดีและเก็บใส่ถุงพลาสติกเพื่อใช้ในการเตรียมดินปนเปื้อนสังเคราะห์

2. การเตรียมดินปนเปื้อนสังเคราะห์

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาถึงการปนเปื้อนของตะกั่วและแคดเมียม โดยเตรียมดินปนเปื้อนสังเคราะห์ 3 ประเภท ได้แก่ ดินปนเปื้อนด้วยตะกั่วเพียงอย่างเดียว (CS-Pb) ดินปนเปื้อนด้วยแคดเมียมเพียงอย่างเดียว (CS-Cd) และดินปนเปื้อนด้วยตะกั่วและแคดเมียม (CS-Pb+Cd) โดยดินแต่ละประเภทถูกทำให้ปนเปื้อนด้วยการเติมตะกั่วไนเตรต ($Pb(NO_3)_2$) และแคดเมียมไนเตรต ($Cd(NO_3)_2 \cdot 4H_2O$) เพื่อให้มีระดับการปนเปื้อนในดินที่แตกต่างกัน จำนวน 4 ระดับ มีรายละเอียดดังตารางที่ 1 และ 2

ตารางที่ 1 ความเข้มข้นของตะกั่วในดินปนเปื้อนสังเคราะห์ที่ทำการศึกษา

ความเข้มข้นของตะกั่วที่ศึกษา (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)	เกณฑ์การปนเปื้อน (Stehouwer, 1999)	
	ปริมาณตะกั่วในดิน (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)	ระดับการปนเปื้อน
400	150 – 400	ต่ำ
750	400 – 1,000	ปานกลาง
1,500	1,000 – 2,000	สูง
4,500	>2,000	สูงมาก

ตารางที่ 2 ความเข้มข้นของแคดเมียมในดินปนเปื้อนสังเคราะห์ที่ทำการศึกษา

ความเข้มข้นของแคดเมียมที่ศึกษา (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)	ระดับการปนเปื้อน
37	ต่ำ
810	ปานกลาง
1,500	สูง
4,500	สูงมาก

การกำหนดปริมาณความเข้มข้นของตะกั่วในดินที่มีการปนเปื้อนในระดับต่ำ (400 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม) และระดับปานกลาง (750 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม) เป็นการกำหนดตามมาตรฐานคุณภาพดินที่ใช้ประโยชน์เพื่อการอยู่อาศัยและเกษตรกรรม และมาตรฐานคุณภาพดินที่ใช้ประโยชน์เพื่อการอื่นนอกเหนือจากเพื่อการอยู่อาศัยและเกษตรกรรม ตามลำดับ ซึ่งกำหนดโดย คณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ (2547) ส่วนความเข้มข้นในระดับสูง (1,500 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม) และระดับสูงมาก (4,500 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม) เป็นการกำหนดปริมาณการปนเปื้อนเพื่อให้สอดคล้องกับเกณฑ์การประมาณระดับการปนเปื้อนของตะกั่วที่เสนอโดย Stehouwer (1999)

สำหรับการกำหนดปริมาณความเข้มข้นของแคดเมียมในดินที่มีการปนเปื้อนในระดับต่ำ (37 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม) และระดับปานกลาง (810 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม) เป็นการกำหนดตามมาตรฐานคุณภาพดินที่ใช้ประโยชน์เพื่อการอยู่อาศัยและเกษตรกรรม และมาตรฐานคุณภาพดินที่ใช้ประโยชน์เพื่อการอื่นนอกเหนือจากเพื่อการอยู่อาศัยและเกษตรกรรม ตามลำดับ ซึ่งกำหนดโดย คณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ (2547) เช่นเดียวกัน ส่วนความเข้มข้นในระดับสูง (1,500 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม) และระดับสูงมาก (4,500 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม) เป็นการกำหนดปริมาณการปนเปื้อนเพื่อให้สอดคล้องกับปริมาณการปนเปื้อนของตะกั่ว เนื่องจากไม่พบว่ามีเกณฑ์การประมาณระดับการปนเปื้อนของแคดเมียมในดินไว้

ในการเตรียมตัวอย่างดินปนเปื้อนที่ระดับความเข้มข้นต่าง ๆ ดังกล่าว เตรียมโดยนำตัวอย่างดินก่อนการปนเปื้อนที่ได้จากข้อ 1. บรรจุลงในถุงพลาสติกซิปล็อค จำนวน 12 ถุง ถุงละประมาณ 1 กิโลกรัม จากนั้นละลายตะกั่วไนเตรต และแคดเมียมไนเตรต ปริมาณตามที่ระบุในตารางที่ 3 ในน้ำกลั่น ปริมาตร 300 มิลลิลิตร แล้วนำไปผสมกับตัวอย่างดินที่เตรียมไว้ในแต่ละถุง บ่มดินทิ้งไว้ในถุงพลาสติกซิปล็อคดังกล่าวเป็นระยะเวลา 14 วัน ที่อุณหภูมิห้อง เมื่อครบ 14 วันแล้ว เปิดปากถุงไว้ประมาณ 2 สัปดาห์ เพื่อผึ่งดินปนเปื้อนให้แห้ง หลังจากนั้นนำมาบดให้ละเอียด แล้วร่อนผ่านตะแกรงที่มีขนาดช่อง 2 มิลลิเมตร และผสมคลุกเคล้าให้เข้ากัน และนำไปใช้ในการวิเคราะห์รูปฟอร์มทางเคมีต่าง ๆ

ตารางที่ 3 ระดับความเข้มข้นและปริมาณสารปนเปื้อนแต่ละชนิดที่ใช้เพื่อสังเคราะห์ดินปนเปื้อน

ประเภทดินปนเปื้อน	ความเข้มข้นของสารปนเปื้อน (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)		ปริมาณสารปนเปื้อนที่เติม (กรัม)	
	Pb	Cd	Pb(NO ₃) ₂	Cd(NO ₃) ₂ ·4H ₂ O
CS-Pb400	400	-	0.6394	-
CS-Pb750	750	-	1.1988	-
CS-Pb1500	1,500	-	2.3977	-
CS-Pb4500	4,500	-	7.1931	-
CS-Cd37	-	37	-	0.1015
CS-Cd810	-	810	-	2.2228
CS-Cd1500	-	1,500	-	4.1162
CS-Cd4500	-	4,500	-	12.3487
CS-Pb400+Cd37	400	37	0.6394	0.1015
CS-Pb750+Cd810	750	810	1.1988	2.2228
CS-Pb1500+Cd1500	1,500	1,500	2.3977	4.1162
CS-Pb4500+Cd4500	4,500	4,500	7.1931	12.3487

1. การวิเคราะห์รูปฟอร์มของตะกั่วและแคดเมียมในดินปนเปื้อนสังเคราะห์

การวิเคราะห์รูปฟอร์มของตะกั่วและแคดเมียมในดินปนเปื้อนสังเคราะห์ ศึกษาโดยใช้วิธีการสกัดเป็นลำดับขั้นแบบบิซอร์ดีดแปลง (Modified BCR sequential extraction procedure) (Rauret et al., 1999) ซึ่งทำการวิเคราะห์ซ้ำในตัวอย่างเดียวกัน (Replicate) 3 ซ้ำ และมีการทำแบลนด์ควบคู่ไปด้วย (ไม่มีตัวอย่างดิน) โดยมีรายละเอียดของวิธีสกัดเป็นลำดับขั้นดังนี้

1.1 รูปฟอร์มที่ละลายในน้ำและสกัดได้ด้วยกรดหรือรูปฟอร์มที่แลกเปลี่ยนได้

ซึ่งตัวอย่างดินปนเปื้อนสังเคราะห์จำนวน 1.0 กรัม ใส่ลงในหลอดปั่นพลาสติกฝาเกลียว (Centrifuge tube) ขนาด 50 มิลลิลิตร เติมสารละลายกรดอะซิติก (Acetic acid) ความเข้มข้น 0.11 โมลาร์ จำนวน 40 มิลลิลิตร นำไปเขย่าบนเครื่องเขย่าสารแนวนอน (Orbital shaker) ที่ความเร็ว 200 รอบต่อนาที (Revolutions per minute, RPM) เป็นเวลา 16 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิห้อง หลังจากนั้นปั่นแยกตะกอนและของเหลวโดยนำหลอดปั่นมาใส่ในเครื่องหมุนเหวี่ยงสารให้ตกตะกอน (Centrifuge) หมุนเหวี่ยงที่ความเร็ว 4,000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 20 นาที แล้วถ่ายของเหลวเหนือตะกอน (Supernatant) กรองผ่านชุดกรองบูชเนอร์ โดยใช้กระดาษกรอง Whatman เบอร์ 42 และถ่ายสารละลายที่กรองได้ ลงในขวดปรับปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร ปิเปตกรดไนตริกเข้มข้น (ร้อยละ 65) ลงไป 2 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรสุดท้ายเป็น 100 มิลลิลิตร ด้วยน้ำกลั่น นำตัวอย่างที่ปรับปริมาตรแล้วเก็บในขวดยาน้ำพลาสติกทรงเหลี่ยม เพื่อวิเคราะห์หาปริมาณตะกั่วและแคดเมียมด้วยเครื่อง AAS หลังจากนั้นล้างตะกอนที่เหลือค้างอยู่ในหลอดปั่นโดยเติมน้ำกลั่นลงไป 20 มิลลิลิตร และนำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าที่ความเร็ว 200 รอบต่อนาที เป็นเวลา 15 นาที จากนั้นนำหลอดปั่นมาหมุนเหวี่ยงที่

ความเร็ว 4,000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 20 นาที แล้วถ่ายของเหลวเหนือตะกอนทิ้งไป ส่วนตะกอนที่เหลือค้างอยู่ให้เก็บไว้เพื่อทำการสกัดในขั้นตอนที่ 3.2

1.2 รูปที่ถูกรีดิวซ์ได้ง่าย

นำตะกอนได้จากขั้นตอนที่ 3.1 มาสกัด โดยเติมสารละลายไฮดรอกซิลแอมโมเนียมคลอไรด์ ($\text{NH}_2\text{OH}\cdot\text{HCl}$) ความเข้มข้น 0.5 โมลาร์ จำนวน 40 มิลลิลิตร นำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าสารแนวนอนที่ความเร็ว 200 รอบต่อนาที เป็นเวลา 16 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิห้อง จากนั้นปั่นแยกตะกอนและของเหลว ตลอดจนล้างตะกอนตามที่กล่าวไว้ในขั้นตอนที่ 3.1 ส่วนตะกอนที่เหลือค้างอยู่ให้เก็บไว้เพื่อทำการสกัดในขั้นตอนที่ 3.3

1.3 รูปที่ถูกออกซิไดซ์ได้

นำตะกอนที่ได้จากขั้นตอนที่ 3.2 มาสกัด โดยเติมสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) ความเข้มข้น 8.8 โมลาร์ ที่ pH 2 จำนวน 10 มิลลิลิตร คลายฝาหลอดปั่นเล็กน้อย ตั้งหลอดปั่นทิ้งไว้ในตู้ดูดควันที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 1 ชั่วโมง 30 นาที และเขย่าด้วยมือเป็นครั้งคราว จากนั้นนำหลอดปั่นใส่ในอ่างควบคุมอุณหภูมิ ที่อุณหภูมิประมาณ 85 องศาเซลเซียส เปิดฝาหลอดปั่น เพื่อให้ปริมาตรของของเหลวในหลอดปั่นลดลงเหลือประมาณ 2 มิลลิลิตร หลังจากนั้นนำหลอดปั่นออกจากอ่างควบคุมอุณหภูมิ ตั้งหลอดปั่นทิ้งไว้ในตู้ดูดควันจนมีอุณหภูมิใกล้เคียงกับอุณหภูมิห้อง แล้วจึงเติมสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เพิ่มอีก จำนวน 10 มิลลิลิตร คลายฝาหลอดปั่นเล็กน้อย ตั้งหลอดปั่นทิ้งไว้ในตู้ดูดควัน ที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 1 ชั่วโมง 30 นาที และเขย่าด้วยมือเป็นครั้งคราว จากนั้นนำหลอดปั่นไปใส่ในอ่างควบคุมอุณหภูมิ ที่อุณหภูมิประมาณ 85 องศาเซลเซียส เปิดฝาหลอดปั่นเพื่อให้ปริมาตรของของเหลวในหลอดปั่นลดลงเหลือประมาณ 1 มิลลิลิตร หลังจากนั้นนำหลอดปั่นออกจากอ่างควบคุมอุณหภูมิ ตั้งทิ้งไว้จนมีอุณหภูมิใกล้เคียงกับอุณหภูมิห้อง และเติมสารละลายแอมโมเนียมอะซิเตต (NH_4OAc) ความเข้มข้น 1 โมลาร์ ที่ pH 2 จำนวน 50 มิลลิลิตร นำหลอดปั่นเขย่าบนเครื่องเขย่าสารแนวนอนที่ความเร็ว 200 รอบต่อนาที เป็นเวลา 16 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิห้อง จากนั้นปั่นแยกตะกอนและของเหลว ตลอดจนล้างตะกอนตามที่กล่าวไว้ในขั้นตอนที่ 3.1 ส่วนตะกอนที่เหลือค้างอยู่ให้เก็บไว้เพื่อทำการสกัดในขั้นตอนที่ 3.4

1.4 รูปที่คงเหลือจากการสกัด

นำตะกอนที่ได้จากขั้นตอนที่ 3.3 มาถ่ายลงในหลอดย่อย (Digestion tube) ขนาด 250 มิลลิลิตร โดยล้างด้วยน้ำกลั่นปริมาตร 30 มิลลิลิตร จากนั้นนำสารละลายดินมาสกัดโดยการย่อย (Digestion) ด้วยกรดผสมระหว่างกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น ร้อยละ 37 และกรดไนตริกความเข้มข้นร้อยละ 65 ในอัตราส่วนเท่ากับ 3 : 1 โดยปริมาตร (Wuana, Okieimen, & Imborvungu, 2010; Matthews-Amune, Omono, & Kakulu, 2012) โดยในการวิเคราะห์ครั้งนี้ใช้สารละลายกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น จำนวน 18 มิลลิลิตร และสารละลายกรดไนตริกเข้มข้น จำนวน 6 มิลลิลิตร เติมนลงในสารละลายดินที่อยู่ในหลอดย่อย ทำแบลงค์ควบคู่ไปด้วย (หลอดย่อยบรรจุน้ำกลั่น ปริมาตร 30 มิลลิลิตร ไม่มีตัวอย่างสารละลายดิน) นำหลอดย่อยตัวอย่างใส่ในเครื่องย่อย (Block digestion unit) ต้มย่อยตัวอย่างที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส จนตัวอย่างมีลักษณะเกือบแห้ง ส่วนแบลงค์ (Blank) มีปริมาตรเหลืออยู่ประมาณ 2 มิลลิลิตร นำตัวอย่างออกจากเครื่องย่อย แล้วตั้งทิ้งไว้ให้ตัวอย่างเย็นลงจนมีอุณหภูมิใกล้เคียงกับอุณหภูมิห้อง จากนั้นเติมน้ำกลั่นลงไป 20 มิลลิลิตร แล้วต้มตัวอย่าง

อีกครั้งที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที นำตัวอย่างออกจากเครื่องย่อย แล้วตั้งทิ้งไว้ให้เย็นลง กรองด้วยชุดกรองบูชเนอร์ โดยใช้กระดาษกรอง Whatman เบอร์ 42 และปรับปริมาตรตัวอย่างที่กรองได้เป็น 100 มิลลิลิตร ด้วยน้ำกลั่นในขวดปริมาตร

2. การวิเคราะห์ปริมาณตะกั่วและแคดเมียมเสมือนทั้งหมด

การวิเคราะห์ปริมาณตะกั่วและแคดเมียมเสมือนทั้งหมด ใช้วิธีย่อยด้วยกรดผสมระหว่าง กรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น ร้อยละ 37 และกรดไนตริกความเข้มข้นร้อยละ 65 ในอัตราส่วน เท่ากับ 3 : 1 โดยปริมาตร (Wuana et al., 2010; Matthews-Amune et al., 2012) เช่นเดียวกับการวิเคราะห์รูปฟอร์มของตะกั่วและแคดเมียมในรูปคงเหลือจากการสกัด (RESD) แต่ใช้ปริมาณกรดรวมทั้งหมดเพิ่มมากขึ้น และวิเคราะห์ตัวอย่างละ 3 ซ้ำ พร้อมกับมีการทำแบลนด์ควบคู่ไปด้วย (ไม่มีตัวอย่างดิน) โดยมีรายละเอียดของการวิเคราะห์ดังนี้

ชั่งตัวอย่างดินให้มือน้ำหนัก 1.0 กรัม ใส่ลงในหลอดย่อยตัวอย่าง ขนาด 250 มิลลิลิตร จากนั้นเติมกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น จำนวน 18 มิลลิลิตร และกรดไนตริกเข้มข้น จำนวน 6 มิลลิลิตร ลงในหลอดย่อย ต้มย่อยตัวอย่าง ที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส จนตัวอย่างมีลักษณะเกือบแห้ง ส่วนแบลนด์มีปริมาตรเหลืออยู่ประมาณ 2 มิลลิลิตร นำตัวอย่างออกจากเครื่องย่อย แล้วรอให้ตัวอย่างเย็นลงจนมีอุณหภูมิใกล้เคียงอุณหภูมิห้อง เติมกรดเพิ่มอีก โดยเติมกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น จำนวน 9 มิลลิลิตร และกรดไนตริกเข้มข้น จำนวน 3 มิลลิลิตร ต้มย่อยตัวอย่างต่อที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส จนตัวอย่างมีลักษณะเกือบแห้ง ส่วนแบลนด์มีปริมาตรเหลืออยู่ประมาณ 2 มิลลิลิตร นำตัวอย่างออกจากเครื่องย่อย แล้วตั้งทิ้งไว้ให้ตัวอย่างเย็นลง ทำซ้ำขั้นตอนการเติมกรดเพิ่มอีก 1 ครั้ง หลังจากนั้นเติมน้ำกลั่นลงไป 20 มิลลิลิตร และต้มตัวอย่างที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที นำตัวอย่างออกจากเครื่องย่อย ตั้งทิ้งไว้ให้ตัวอย่างเย็นลง แล้วกรองด้วยชุดกรองบูชเนอร์ โดยใช้กระดาษกรอง Whatman เบอร์ 42 และปรับปริมาตรเป็น 100 มิลลิลิตร ด้วยน้ำกลั่นในขวดปริมาตร

3. การวิเคราะห์หาปริมาณตะกั่วและแคดเมียมด้วยเครื่อง AAS

นำตัวอย่างที่ผ่านการสกัดด้วยวิธีสกัดเป็นลำดับขั้นในขั้นตอนที่ 3 และตัวอย่างที่ผ่านการย่อยด้วยกรดในขั้นตอนที่ 4 มาวิเคราะห์หาปริมาณตะกั่วและแคดเมียมด้วยเครื่อง Atomic Absorption Spectroscopy (AAS) โดยใช้ Flame Atomization Technique ที่ความยาวคลื่น 283.3 และ 228.8 นาโนเมตร ตามลำดับ และรายงานข้อมูลผลการวิเคราะห์โดยใช้น้ำหนักดินในสถานะไม่มีความชื้นเป็นน้ำหนักอ้างอิง (Oven-dry Basis)

ผลการวิจัยและอภิปรายผล

1. ปริมาณตะกั่วและแคดเมียมแต่ละรูปฟอร์มในดินปนเปื้อนสังเคราะห์

ปริมาณตะกั่วและแคดเมียมที่พบในรูปฟอร์มต่าง ๆ ได้แก่ รูปฟอร์มที่ละลายในน้ำและสกัดได้ด้วยกรดหรือรูปฟอร์มที่แลกเปลี่ยนได้ (EXC) รูปฟอร์มที่ถูกรีดิวซ์ได้ง่าย (RED) รูปฟอร์มที่ถูกออกซิไดซ์ได้ (OXI) และรูปที่คงเหลือจากการสกัด (RESD) ในดินปนเปื้อนสังเคราะห์ แสดงดังตารางที่ 4 และ 5

เมื่อพิจารณาร้อยละการกลับคืน (%Recovery, %R) ของปริมาณตะกั่วและแคดเมียมในดินปนเปื้อนสังเคราะห์ที่สกัดโดยวิธีสกัดเป็นลำดับขั้น จะเห็นได้ว่าร้อยละการกลับคืนของตะกั่ว และแคดเมียมในดินปนเปื้อนสังเคราะห์ที่ระดับความเข้มข้นต่าง ๆ อยู่ในช่วงร้อยละ 95.58 – 114.05 และร้อยละ 93.59 – 103.33 ตามลำดับ คิดเป็นร้อยละการกลับคืนเฉลี่ยของตะกั่ว และแคดเมียมเท่ากับร้อยละ 107.97 และร้อยละ 100.60 ตามลำดับ

แสดงให้เห็นว่าผลรวมของปริมาณโลหะหนักรูปฟอร์มต่าง ๆ ที่สกัดด้วยวิธีการสกัดเป็นลำดับขั้นมีความสอดคล้องกับปริมาณตะกั่วและแคดเมียมเสมือนทั้งหมดที่วิเคราะห์ด้วยวิธีการย่อยด้วยกรดผสม

นอกจากนี้เมื่อคำนวณสัดส่วนปริมาณตะกั่วและแคดเมียมในดินปนเปื้อนสังเคราะห์ทั้งในดินปนเปื้อนด้วยตะกั่วเพียงอย่างเดียวและดินปนเปื้อนด้วยตะกั่วและแคดเมียมพบว่า ปริมาณตะกั่วในรูปฟอร์มที่ถูกรีดิวซ์ได้ง่าย (RED) มีปริมาณมากที่สุด (ร้อยละ 83 – 91) รองลงมาคือรูปฟอร์มที่ละลายในน้ำและสกัดได้ด้วยกรดหรือรูปฟอร์มที่แลกเปลี่ยนได้ (EXC) และรูปที่คงเหลือจากการสกัด (RES) ซึ่งมีสัดส่วนเฉลี่ยใกล้เคียงกัน (ร้อยละ <1 – 13 และ 2 – 11 ตามลำดับ) ส่วนรูปฟอร์มที่ถูกออกซิไดซ์ได้ (OXI) พบเป็นสัดส่วนที่น้อยที่สุด (ร้อยละ <1 – 2) สำหรับปริมาณแคดเมียมในดินปนเปื้อนสังเคราะห์พบอยู่ในรูปฟอร์มที่ละลายในน้ำและสกัดได้ด้วยกรดหรือรูปฟอร์มที่แลกเปลี่ยนได้ (EXC) มากที่สุด (ร้อยละ 38 – 71) รองลงมาคือ รูปฟอร์มที่ถูกรีดิวซ์ได้ง่าย (RED) (ร้อยละ 28 – 62) และรูปฟอร์มที่ถูกออกซิไดซ์ได้ (OXI) (ร้อยละ <1 – 1) ส่วนรูปที่คงเหลือจากการสกัด (RES) มีสัดส่วนน้อยที่สุด (น้อยกว่าร้อยละ 1) ดังรูปที่ 1 ซึ่งจะเห็นได้ว่าแคดเมียมมีสัดส่วนของรูปฟอร์มที่ละลายในน้ำและสกัดได้ด้วยกรดหรือรูปฟอร์มที่แลกเปลี่ยนได้ (EXC) มากกว่าตะกั่ว ดังนั้นแคดเมียมจึงมีแนวโน้มที่จะเกิดการเคลื่อนย้ายและแพร่กระจายสู่สิ่งแวดล้อมได้ง่ายกว่าตะกั่ว

ตารางที่ 4 ค่าเฉลี่ยปริมาณตะกั่วแต่ละรูปฟอร์มในดินปนเปื้อนสังเคราะห์

ตัวอย่างดิน	ความเข้มข้น (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)						%R
	EXC	RED	OXI	RES	SUM	Pseudo-T	
CS-Pb400	<6.00 ^{LOD}	367.17±2.31	<6.00 ^{LOD}	43.68±0.5	410.85	429.85±1.41	95.58
				2			
CS-Pb750	16.12±1.0	716.57±4.66	6.99±0.68	50.58±0.8	790.26	737.98±7.56	107.0
	0			0			9
CS-Pb1500	66.73±1.8	1397.28±2.5	26.77±2.0	67.13±1.3	1557.9	1456.04±11.	107.0
	0	1	6	8	2	07	0
CS-Pb4500	467.62±3.	4119.27±19.	94.92±5.1	98.69±5.7	4780.5	4380.83±10.	109.1
	99	31	4	4	0	51	2
CS-Pb400+Cd37	<6.00 ^{LOD}	414.72±1.97	<6.00 ^{LOD}	48.90±0.6	463.62	415.39±1.44	111.6
				7			1
CS-Pb750+Cd810	22.03±2.7	733.03±7.15	8.52±2.35	55.15±0.2	818.73	750.38±23.2	109.1
	3			1		4	7
CS-Pb1500+Cd1500	76.12±1.2	1417.38±9.1	17.45±1.3	85.75±2.5	1596.7	1463.51±9.7	110.1
	0	3	4	9	0	7	0
CS-Pb4500+Cd4500	655.70±3.	4020.70±30.	101.66±5.	110.93±2.	4888.9	4286.80±45.	114.0
	34	84	49	47	9	23	5

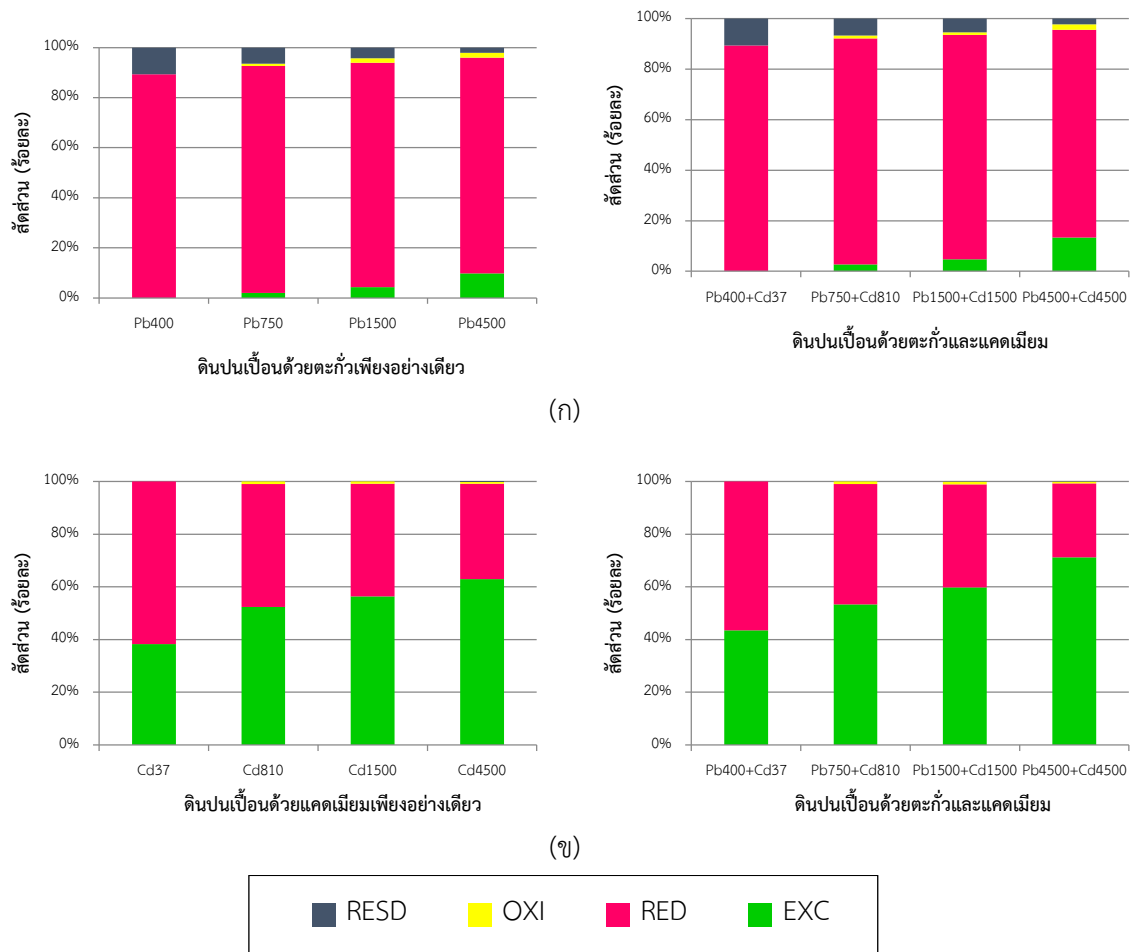
- หมายเหตุ: 1. LOD = Limit of detection
2. SUM หมายถึง ผลรวมของทุกรูปฟอร์มที่สกัดได้จากวิธีการสกัดเป็นลำดับขั้นตามลำดับ (SUM = EXC + RED + OXI + RESD)
3. Pseudo-T หมายถึง ปริมาณเสมือนทั้งหมดที่วิเคราะห์โดยใช้การย่อยด้วยกรดผสม
4. %R (%Recovery) = (SUM/Pseudo-T) × 100

ตารางที่ 5 ค่าเฉลี่ยปริมาณแคดเมียมแต่ละรูปฟอร์มในดินปนเปื้อนสังเคราะห์

ตัวอย่างดิน	ความเข้มข้น (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)						%R
	EXC	RED	OXI	RESD	SUM	Pseudo-T	
CS-Cd37	13.59±0.42	21.91±0.57	<0.60 ^{LOD}	<0.60 ^{LOD}	35.50	34.63±0.93	102.50
CS-Cd810	382.94±1.77	341.02±7.26	6.63±0.17	<0.60 ^{LOD}	730.59	713.82±22.48	102.35
CS-Cd1500	767.78±2.87	580.88±9.43	11.66±0.00	<0.60 ^{LOD}	1360.32	1316.43±12.38	103.33
CS-Cd4500	2636.10±39.86	1518.40±12.03	30.51±0.75	2.07±0.06	4187.08	4068.43±26.68	102.92
CS-Pb400+Cd37	14.38±0.05	18.72±0.70	<0.60 ^{LOD}	<0.60 ^{LOD}	33.10	35.37±0.12	93.59
CS-Pb750+Cd810	401.13±5.60	344.02±8.98	6.71±0.21	<0.60 ^{LOD}	751.86	729.07±10.69	103.13
CS-Pb1500+Cd1500	811.33±3.24	530.94±3.39	12.27±0.99	1.23±0.57	1355.77	1355.94±11.80	99.99
CS-Pb4500+Cd4500	2776.57±19.39	1094.84±11.86	23.27±0.57	1.65±0.21	3896.33	4017.86±55.10	96.98

- หมายเหตุ: 1. LOD = Limit of detection
2. SUM หมายถึง ผลรวมของทุกรูปฟอร์มที่สกัดได้จากวิธีการสกัดเป็นลำดับขั้นตามลำดับ (SUM = EXC + RED + OXI + RESD)
3. Pseudo-T หมายถึง ปริมาณเสมือนทั้งหมดที่วิเคราะห์โดยใช้การย่อยด้วยกรดผสม

$$4. \%R (\%Recovery) = (SUM/Pseudo-T)$$



รูปที่ 1 สัดส่วนการกระจายของปริมาณตะกั่วและแคดเมียมในแต่ละรูปฟอร์ม

(ก) สัดส่วนของปริมาณตะกั่วในแต่ละรูปฟอร์ม (ข) สัดส่วนของปริมาณแคดเมียมในแต่ละรูปฟอร์ม

2. ปริมาณตะกั่วและแคดเมียมเสมือนทั้งหมดในดินปนเปื้อนสังเคราะห์

ผลการวิเคราะห์ปริมาณตะกั่วและแคดเมียมเสมือนทั้งหมดในดินปนเปื้อนสังเคราะห์ประเภทต่าง ๆ แสดงดังตารางที่ 6 และเมื่อเปรียบเทียบปริมาณตะกั่วเสมือนทั้งหมดของดินปนเปื้อนตะกั่วเพียงอย่างเดียวกับปริมาณตะกั่วเสมือนทั้งหมดของดินที่ปนเปื้อนด้วยตะกั่วและแคดเมียมที่ระดับความเข้มข้นของตะกั่วเดียวกันพบว่า ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 (ยกเว้น Pb400 กับ Pb400+Cd37) แสดงให้เห็นว่าปริมาณแคดเมียมในดินไม่ส่งผลต่อปริมาณของตะกั่วในดิน และเมื่อเปรียบเทียบปริมาณแคดเมียมเสมือนทั้งหมดของดินปนเปื้อนแคดเมียมเพียงอย่างเดียวกับปริมาณแคดเมียมเสมือนทั้งหมดของดินที่ปนเปื้อนด้วยตะกั่วและแคดเมียม จะเห็นได้ว่าดินปนเปื้อนสังเคราะห์ที่ระดับความเข้มข้นของแคดเมียมเดียวกันมีปริมาณแคดเมียมไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่าปริมาณตะกั่วในดินก็ไม่ส่งผลต่อปริมาณของแคดเมียมในดินเช่นกัน

ตารางที่ 6 ปริมาณตะกั่วและแคดเมียมเสมือนทั้งหมดในดินปนเปื้อนสังเคราะห์

ประเภทดินปนเปื้อน	ปริมาณโลหะหนักเสมือนทั้งหมด (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)	
	ตะกั่ว (Pb)	แคดเมียม (Cd)
CS-Pb400	429.85 ^b ±1.41	-
CS-Pb750	737.98 ^c ±7.56	-
CS-Pb1500	1456.04 ^d ±11.07	-
CS-Pb4500	4380.83 ^e ±10.51	-
CS-Cd37	-	34.63 ^a ±0.93
CS-Cd810	-	713.82 ^b ±22.48
CS-Cd1500	-	1316.43 ^c ±12.38
CS-Cd4500	-	4068.43 ^d ±26.68
CS-Pb400+Cd37	415.39 ^a ±1.44	35.37 ^a ±0.12
CS-Pb750+Cd810	750.38 ^c ±23.24	729.07 ^b ±10.69
CS-Pb1500+Cd1500	1463.51 ^d ±9.77	1355.94 ^c ±11.80
CS-Pb4500+Cd4500	4286.80 ^e ±45.23	4017.86 ^d ±55.10

- หมายเหตุ: 1. ตัวอักษรภาษาอังกฤษที่เหมือนกันในแต่ละสดมภ์ หมายถึง ค่าเฉลี่ยไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 ตามวิธี Dunnett's T3 Multiple Comparison test
2. ตัวอักษรภาษาอังกฤษที่ต่างกันในแต่ละสดมภ์ หมายถึง ค่าเฉลี่ยมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 ตามวิธี Dunnett's T3 Multiple Comparison test
3. - หมายถึง ไม่วิเคราะห์

3. ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณตะกั่วและแคดเมียมเสมือนทั้งหมดกับปริมาณตะกั่วและแคดเมียมรูปฟอร์มต่าง ๆ ในดินปนเปื้อนสังเคราะห์

จากการวิเคราะห์ทางสถิติโดยใช้การวิเคราะห์สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Pearson correlation coefficient) และพิจารณาลักษณะความสัมพันธ์จากสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์แบบเพียร์สัน (Pearson product moment correlation, r) ถ้าปริมาณตะกั่วหรือปริมาณแคดเมียมที่สกัดด้วยวิธีการสกัดเป็นลำดับขั้นมีความสัมพันธ์กับปริมาณตะกั่วเสมือนทั้งหมดหรือปริมาณแคดเมียมเสมือนทั้งหมดจะทำการวิเคราะห์การถดถอยอย่างง่าย (Simple regression analysis) เพื่อสร้างสมการสำหรับการพยากรณ์ปริมาณตะกั่วหรือแคดเมียมในแต่ละรูปฟอร์มจากปริมาณตะกั่วหรือปริมาณแคดเมียมเสมือนทั้งหมด ซึ่งจากการวิเคราะห์ความสัมพันธ์พบว่าปริมาณตะกั่วและแคดเมียมเสมือนทั้งหมดมีความสัมพันธ์กับปริมาณตะกั่วและแคดเมียมรูปฟอร์มต่าง ๆ ในดินปนเปื้อนสังเคราะห์ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ที่ระดับนัยสำคัญ 0.01 และสามารถพยากรณ์ปริมาณตะกั่วและแคดเมียมรูปฟอร์มต่าง ๆ ได้ ดังสมการในตารางที่ 7 และตารางที่ 8

ตารางที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณตะกั่วเสมือนทั้งหมดกับปริมาณตะกั่วรูปฟอร์มต่าง ๆ ในดินปนเปื้อนสังเคราะห์

รูปฟอร์ม	ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (r)	สมการ
EXC	0.968**	$EXC = (0.148 \times \text{Pseudo-T Pb}) - 93.73$
RED	1.000**	$RED = (0.936 \times \text{Pseudo-T Pb})$
OXI	0.994**	$OXI = (0.025 \times \text{Pseudo-T Pb}) - 10.49$

หมายเหตุ: ** หมายถึง ตัวแปรมีความสัมพันธ์กันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ที่ระดับนัยสำคัญ 0.01

ตารางที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณแคดเมียมเสมือนทั้งหมดกับปริมาณแคดเมียมรูปฟอร์มต่าง ๆ ในดินปนเปื้อนสังเคราะห์

รูปฟอร์ม	ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (r)	สมการ
EXC	0.998**	$EXC = (0.681 \times \text{Pseudo-T Cd}) - 68.99$
RED	0.971**	$RED = (0.310 \times \text{Pseudo-T Cd})$
OXI	0.977**	$OXI = (0.006 \times \text{Pseudo-T Cd})$

หมายเหตุ: **หมายถึง ตัวแปรมีความสัมพันธ์กันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ที่ระดับนัยสำคัญ 0.01

สรุปผลการศึกษา

1. ปริมาณตะกั่วและแคดเมียมแต่ละรูปฟอร์มในดินปนเปื้อนสังเคราะห์

ดินปนเปื้อนสังเคราะห์มีลำดับการกระจายตัวของสัดส่วนปริมาณตะกั่วรูปฟอร์มต่าง ๆ จากมากไปจนถึงน้อย ได้แก่ $RED > EXC \approx RESD > OXI$ ส่วนแคดเมียมแต่ละรูปฟอร์มมีลำดับการกระจายตัวของสัดส่วนปริมาณแคดเมียมจากมากไปจนถึงน้อย ได้แก่ $EXC > RED > OXI > RESD$ จากสัดส่วนของปริมาณตะกั่วและแคดเมียมดังกล่าวแสดงให้เห็นว่า แคดเมียมมีแนวโน้มที่จะเกิดการเคลื่อนย้ายและแพร่กระจายสู่สิ่งแวดล้อมได้ง่ายกว่าตะกั่ว สำหรับร้อยละการนำกลับคืนของวิธีสกัดเป็นลำดับขั้นของปริมาณตะกั่วและแคดเมียมในดินปนเปื้อนสังเคราะห์พบว่า มีค่าเฉลี่ยเท่ากับร้อยละ 107.97 และ 100.60 ตามลำดับ ดังนั้นวิธีการสกัดเป็นลำดับขั้นนี้จึงถือได้ว่ามีความน่าเชื่อถือสูง

2. ปริมาณตะกั่วและแคดเมียมเสมือนทั้งหมดในดินปนเปื้อนสังเคราะห์

ค่าเฉลี่ยปริมาณตะกั่วเสมือนทั้งหมดของดินปนเปื้อนด้วยตะกั่วเพียงอย่างเดียวกับค่าเฉลี่ยปริมาณตะกั่วเสมือนทั้งหมดของดินปนเปื้อนด้วยตะกั่วและแคดเมียมที่ระดับความเข้มข้นของตะกั่วเดียวกันไม่มีความแตกต่างกัน จึงกล่าวได้ว่าปริมาณแคดเมียมในดินไม่ส่งผลต่อปริมาณของตะกั่วในดิน อีกทางหนึ่งค่าเฉลี่ยปริมาณแคดเมียมเสมือนทั้งหมดของดินปนเปื้อนด้วยแคดเมียมเพียงอย่างเดียวกับค่าเฉลี่ยปริมาณแคดเมียมเสมือนทั้งหมดของดินปนเปื้อนด้วยตะกั่วและแคดเมียมที่ระดับความเข้มข้นของแคดเมียมเดียวกันก็ไม่มีความแตกต่างกัน ดังนั้นปริมาณตะกั่วในดินจึงไม่ส่งผลต่อปริมาณของแคดเมียมในดินเช่นกัน

3. ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณตะกั่วและแคดเมียมเสมือนทั้งหมดกับปริมาณตะกั่วและแคดเมียมรูปฟอร์มต่าง ๆ ในดินปนเปื้อนสังเคราะห์

จากการวิเคราะห์ความสัมพันธ์พบว่า ปริมาณตะกั่วและแคดเมียมเสมือนทั้งหมดมีความสัมพันธ์กับ ปริมาณตะกั่วและแคดเมียมรูปฟอร์มต่าง ๆ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ที่ระดับนัยสำคัญ 0.01 และสามารถ พยากรณ์ปริมาณตะกั่วและแคดเมียมรูปฟอร์มต่าง ๆ ได้จากสมการถดถอยเชิงเส้นที่วิเคราะห์ได้

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากกองทุนวิจัยและสร้างสรรค์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัย ศิลปากร ประจำปีงบประมาณ 2557 ผู้วิจัยขอขอบคุณ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร ไว้ ณ โอกาสนี้

เอกสารอ้างอิง

ภาษาไทย

- เบญจลักษณ์ พลายน้อย. (2546). การสกัดตามลำดับส่วนของแคดเมียมและตะกั่วของดินตะกอนชายฝั่งอ่าวเพ จังหวัตรยอง. (วิทยานิพนธ์ปริญญาโท). มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.
- ยุวดี เชี่ยววัฒนา, ดวงใจ นาคะปรีชา, พิชิต พงษ์สกุล, สุรทิน แก้วโรจน์, นงนุช ตันตตินัย, สมลธา หนูคาบแก้ว, อัญชลี สำเนา, นวลนาฏ จันทรเมฆา, ดวงเดือน หินสิน, รุ่งรัตน์ ชมเชย, จรรยา บัวนวม, วีรวรรณ วิวัฒน์, น้ำฝน ทองทวี, วราวุธ ดิยะพงษ์พัฒนา และ โสภณ ปุรวัดน์. (2545). การพัฒนาระบบการ สกัดแบบต่อเนื่องสำหรับการสกัดเป็นลำดับขั้นเพื่อวิเคราะห์ Chemical Speciation ของโลหะหนัก. สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย.
- สุพจน์ หมอยาไทย และ ศุภเกียรติ ศรีพนมธนากร. (2548). รูปแบบของโลหะหนักที่สกัดได้ในมูลสุกรและกาก ตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียของฟาร์มสุกร. สืบค้นจาก <http://www.tlinter.com/story/env/env13.pdf>
- สุมาลี นิลพฤษ. (2551). การวิเคราะห์ปริมาณธาตุในดินตะกอนทะเลน้อย จังหวัดพัทลุง ด้วยวิธีการสกัดแบบ ลำดับขั้น ร่วมกับเทคนิคอะตอมมิคแอบซอร์พชัน และเทคนิคการอาบรังสีนิวตรอนในดินตะกอน. (วิทยานิพนธ์ปริญญาโท). มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, กรุงเทพฯ.
- อภิษฐา พัดพิน. (2551). การสกัดตามลำดับเพื่อประเมินค่าความจำเพาะทางชีวภาพของสารตะกั่วในดินและดิน ตะกอนท้องน้ำบริเวณลำห้วยคลิตี้ จังหวัดกาญจนบุรี. (วิทยานิพนธ์ปริญญาโท). มหาวิทยาลัยนเรศวร, พิษณุโลก.

ภาษาต่างประเทศ

- Fuentes, A., Lloren, M., Saez, J., Soler, A., Aguilar, M. I., Ortuno, J. F. & Meseguer, V. F. (2004). Simple and Sequential Extractions of Heavy Metals from Different Sewage Sludge. *Chemosphere*, 54, 1039-1047. doi:10.1016/j.chemosphere.2003.10.029
- Jaradat, Q. M. (2002). Speciation and composition of indoor dust. *Journal of Saudi Chemical Society*, 6, 27-40.

- Karmer, J. R. & Allen, H. E. (1988). *Metal Speciation*. Michigan: Lewis Publishers.
- Li, X. & Thornton, I. (2001). Chemical partitioning of trace and major elements in soils contaminated by mining and smelting activities. *Applied Geochemistry*, 16(15), 1693-1706. doi:10.1016/S0883-2927(01)00065-8
- Matthews-Amune, Omono, C. & Kakulu, S. (2012). Comparison of Digestion Methods for the Determination of Metal Level in Soils in Itakpe, Kogi State, Nigeria. *International Journal of Pure and Applied Sciences and Technology*, 13(2), 42-48. Retrieved from http://www.ijopaasat.in/yahoo_site_admin/assets/docs/6_IJPAST-461-13N2.32215437.pdf
- Onweremadu, E. U. & Duruigbo, C. I. (2007). Assessment of Cd Concentration of Crude Oil Pollution Arable Soil. *International Journal of Environment Science and Technology*, 4, 409-412. doi:10.1007/BF03326300
- Perez-Cid, B., Lavilla, I. & Bendicho, C. (1996). Analytical assessment of two sequential extraction schemes for metal partitioning in sewage sludge. *Analyst*, 121, 1479-1484. doi:10.1039/AN9962101479
- Rauret, G., Lopez-Sanchez, J. F., Sahuquillo, A., Rubio, R., Davidson, C., Ure, A. & Quevauviller, P. (1999). Improvement of the BCR three step sequential extraction procedure prior to the certification of new sediment and soil reference materials. *Journal of Environmental Monitoring*, 1(1), 57-61. doi: 10.1039/A807854H
- Stehouwer, R. (1999). *Lead in Residential Soils: Sources, Testing, and Reducing Exposure*. Penn. State. Retrieved from <http://extension.psu.edu/plants/crops/esi/lead-in-soil>
- USDA & NRCS. (2000). Heavy Metal Soil Contamination. *Urban Technical No. 3*. Alabama: Soil Quality Institute.
- Wang, C., Li, C. X., Ma, H. T., Qian, J. & Zhai, J. B. (2006). Distribution of extractable fractions of heavy metals in sludge during the wastewater treatment process. *Journal of Hazardous Materials*, 137, 1277-1283. doi:10.1016/j.jhazmat.2006.04.026
- Wong, S. C., Li, X. D., Zhang, G., Qi, S. H. & Min, Y. S. (2002). Heavy metals in agricultural soils of the Pearl River Delta, South China. *Environmental Pollution*, 119, 33-44. doi:10.1016/S0269-7491(01)00325-6
- Wuana, R. A., Okieimen, F. E. & Imborvungu, J. A. (2010). Removal of heavy metals from a contaminated soil using organic chelating acids. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 7(3), 485-496. doi:10.1007/BF03326158