

ลักษณะการปนเปื้อนของโลหะหนักในพื้นที่ชุมชน คัดแยกขยะอิเล็กทรอนิกส์ กรุงเทพมหานคร

ดร. ศีลาวุธ ดำรงศิริ *



บทนำ

ขยะอิเล็กทรอนิกส์ (Electronic waste, E-waste) หรือซากผลิตภัณฑ์เครื่องใช้ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ (Waste Electrical and Electronic Equipment: WEEE) มีปริมาณเพิ่มมากขึ้นทุก ๆ ปี ตามปริมาณการอุปโภคที่เพิ่มขึ้นตามจำนวนประชากรและอายุการใช้งานที่สั้นของอุปกรณ์ ขยะอิเล็กทรอนิกส์เหล่านี้มีโลหะที่สามารถนำมารีไซเคิลได้หลายชนิด เช่น ทองแดง ตะกั่ว และเหล็ก ทำให้เกิดการประกอบอาชีพการคัดแยกเอาโลหะเหล่านั้นออกมาขายในหลายประเทศรวมทั้งในประเทศไทย การแยกโลหะมีค่าจากขยะอิเล็กทรอนิกส์ในประเทศกำลังพัฒนาส่วนใหญ่ถูกจัดการโดยกลุ่มบุคคลทั่วไปในระดับครัวเรือน หรือโรงแยกชิ้นส่วนขนาดเล็ก ซึ่งไม่ได้กระทำโดยวิธีการจัดการที่เป็นมาตรฐาน ทั้งนี้ แหล่งคัดแยกขยะอิเล็กทรอนิกส์ขนาดใหญ่ที่สุดตั้งอยู่ในประเทศจีน ในเมือง Guiyu และเมือง Longtang ในจังหวัด Guangdong และเมือง Taizhou จังหวัด Zhejiang (Puckett, 2003; Robinson, 2009) สำหรับในประเทศไทย มีชุมชนที่ประกอบอาชีพคัดแยกขยะอิเล็กทรอนิกส์กระจายอยู่หลายแห่งทั่วประเทศ เช่น พื้นที่ชนบทอย่างอำเภอหนองชัย จังหวัดกาฬสินธุ์ (เพ็ญโฉม แซ่ตั้ง และคณะ, 2552) และชุมชนที่ตั้งอยู่ใจกลางเมืองของกรุงเทพมหานครอย่าง "ชุมชนเสื่อใหญ่" ซึ่งอยู่ในซอยรัชดาภิเษก 36 เขตจตุจักร (ศีลาวุธ ดำรงศิริ, 2558)

* สถาบันวิจัยสถานะแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

การตรวจสอบการปนเปื้อนของโลหะหนักในดินในพื้นที่คัดแยกขยะอิเล็กทรอนิกส์ที่ชุมชนเสื่อใหญ่จากการศึกษาที่ผ่านมา พบว่าโลหะหนักที่ปนเปื้อนสูง ได้แก่ ทองแดง ตะกั่ว สังกะสี และนิกเกิล (สีลาขุ คำรังศิริ, 2558) โดยอ้างอิงกับค่า Intervention value (VROM, 2009) โดยปกป้องถึงระดับการปนเปื้อนที่สูงและควรได้รับการพิจารณาเพื่อการบำบัด และพบว่าความเข้มข้นของทองแดง ตะกั่ว และนิกเกิล ทั้งในส่วนของดินฝุ่น (ขนาดอนุภาค <0.063 มิลลิเมตร) และดินหยาบ (ขนาดอนุภาค 0.063–2 มิลลิเมตร) (การแบ่งขนาดดินตามเกณฑ์ของ Wentworth, 1922) มีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p=0.05$) ส่วนความเข้มข้นของสังกะสีในส่วนของดินฝุ่น พบว่ามีค่ามากกว่าในดินหยาบทุกตัวอย่างอย่างมีนัยสำคัญ ($p=0.05$) (สีลาขุ คำรังศิริ, 2559) ซึ่งคาดว่า การปนเปื้อนไม่ได้เป็นไปแค่เพียงในลักษณะของการสะสมบนผิวเม็ดดิน แต่อาจเป็นไปในลักษณะที่เม็ดดินบางส่วนนั้นเองเป็นเศษโลหะ ซึ่งเกิดจากการถูกกัดกร่อนหรือชะละลายผ่านกระบวนการต่างๆ ในธรรมชาติจนมีขนาดเล็กลงจนเป็นฝุ่น หรือละลายออกมาที่ละน้อยจนปนเปื้อนไปยังดินฝุ่น โดยดินฝุ่นนี้เองเป็นส่วนหนึ่งของฝุ่นละอองที่นับเป็นสาเหตุหลักที่จะส่งผลกระทบต่อสุขภาพของคนในพื้นที่ ทั้งนี้ การประเมินความเสี่ยงต่อสุขภาพเฉพาะในส่วนของการปนเปื้อนเข้าสู่ร่างกายผ่านทางปาก พบว่าทองแดงซึ่งเป็นโลหะที่เป็นพิษน้อยกลับมีค่า Chronic daily intake (CDI) เกินกว่ามาตรฐานต่างๆ ที่กำหนดไว้มาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งกับเด็ก ส่วนตะกั่ว นั้นพบว่ามีค่า CDI ที่สูงและเกินระดับที่กำหนดไว้ในบางมาตรฐาน

แม้อันตรายจากโลหะหนักที่ปนเปื้อนอยู่ในดินในพื้นที่เมืองอย่างชุมชนเสื่อใหญ่ จะก่อให้เกิดความเสี่ยงหลักๆ แต่เพียงการรับเอาสารพิษเข้าสู่ร่างกายผ่านทางปาก และไม่พบการแพร่กระจายไปยังพื้นที่ข้างเคียง แต่ในกรณีศึกษาอื่นๆ พบการปนเปื้อนไปสู่พื้นที่รอบด้าน (Leung et al., 2006; Jun-hui and Hang, 2009; Zhang et al., 2014; Wu et al., 2015) รวมถึงภาคเกษตรกรรม จนปนเปื้อนไปยังผลิตภัณฑ์การเกษตร (Fu et al., 2008; Jun-hui and Hang, 2009; Li et al., 2011b; Luo et al., 2011; Zhenget al., 2013; Zhuang et al., 2013) นอกจากนี้ การศึกษารูปแบบของโลหะหนักเหล่านี้ในพื้นที่เผาขยะและกองซาก พบว่าส่วนมากอยู่ในรูปคงตัว (Luo et al. 2011) จากประเด็นต่างๆ ข้างต้นทำให้เกิดเป็นคำถามขึ้นมาว่า เศษโลหะเหล่านี้เกิดการเปลี่ยนแปลงไปอย่างไรจนไปสะสมอยู่ในพืชได้ ดังนั้นรูปแบบของโลหะหนักที่ปนเปื้อนอยู่ในเม็ดดินเหล่านั้น จึงเป็นประเด็นหนึ่งที่น่าสนใจศึกษาโดยเฉพาะอย่างยิ่ง เมื่อผลการศึกษาพบว่าความเข้มข้นของโลหะหนักในเม็ดดินฝุ่นและเม็ดดินหยาบมีค่าใกล้เคียงกัน ซึ่งหากมีสาเหตุจากการเปลี่ยนแปลงรูปแบบผ่านกลไกต่างๆ ตามธรรมชาติตามที่คาดไว้ (สีลาขุ คำรังศิริ, 2559) โลหะหนักเหล่านั้นก็น่าจะอยู่ในรูปแบบที่แตกต่างกัน การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อสำรวจรูปแบบของโลหะหนัก (Cu, Zn, Pb, Ni) ที่ปนเปื้อนอยู่ในเม็ดดินขนาดเล็กและใหญ่ ในพื้นที่คัดแยกขยะอิเล็กทรอนิกส์ ชุมชนเสื่อใหญ่

วิธีการศึกษา

พื้นที่ศึกษา การเก็บตัวอย่าง และการเก็บรักษา

ดินตัวอย่างเป็นดินตัวอย่างชุดเดียวกับการศึกษาของ สีลาขุ คำรังศิริ (2559) ซึ่งเป็นการเก็บตัวอย่างแบบผสม โดยเก็บตัวอย่างดินจากหลายๆ จุดในแต่ละบริเวณที่กำหนดไว้มาผสมกัน โดยเก็บตัวอย่างผิวดินที่ความลึกไม่เกิน 10 เซนติเมตร ใส่ถุงพลาสติกปิดสนิทเพื่อนำมาจัดเตรียมในห้องปฏิบัติการ จุดเก็บตัวอย่างแสดงได้ดังรูปที่ 1 โดย A เป็นตัวอย่างดินที่ไม่ปนเปื้อน และ B เป็นตัวอย่างดินที่ปนเปื้อน

การศึกษานี้ได้แยกดินออกเป็น 2 ส่วน คือ เม็ดดินหยาบและเม็ดดินละเอียด โดยในที่นี้ ดิน หมายถึง วัสดุเนื้อดินที่มีขนาดเล็กกว่า 2 มิลลิเมตร ซึ่งจะประกอบไปด้วย ทราย (sand) ทรายแป้ง (silt) และ ดินเหนียว (clay) ซึ่งเม็ดดินที่มีขนาดใหญ่กว่า 0.063 มิลลิเมตร จะเรียกว่า ทราย โดยในที่นี้จะเรียกว่า “เม็ดดินหยาบ” และเม็ดดินที่เล็กกว่า 0.063 มิลลิเมตร เป็นส่วนของทรายแป้งและดินเหนียว โดยในที่นี้จะเรียกว่า “เม็ดดินละเอียด” (การแบ่งขนาดดินตามเกณฑ์ของ Wentworth, 1922) โดยการเตรียมตัวอย่างดินในการศึกษานี้ประยุกต์มาจาก Guideline on Laboratory Analysis of Potentially Contaminated Soils (NEPC, 2011) ซึ่งมีวัตถุประสงค์เพื่อทำการแยกเศษหินกรวดหรือใบไม้และวัสดุอื่นๆ ที่ไม่ใช่ดินออกแล้วจึงนำตัวอย่างดินไปลดขนาดและผสมตัวอย่างให้เป็นเนื้อเดียวกัน (Homogenising)

โดยมีขั้นตอนคือ 1) แยกเศษวัสดุอื่น ๆ ที่ไม่ใช่ดินออกโดยการใช้มือ 2) อบในตู้อบที่สะอาดที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส จนตัวอย่างจะแห้ง 3) ลดขนาดตัวอย่าง (Grinding) ด้วยการบดด้วยภาชนะที่สะอาด 4) นำตัวอย่างที่บดแล้วไปร่อนด้วย ตะแกรง (Sieving) ที่ขนาดช่องเปิด 2 มิลลิเมตร เพื่อคัดเอาตัวอย่างเฉพาะที่มีขนาดเล็กกว่า 2 มิลลิเมตรเก็บไว้ 5) นำตัวอย่างดินที่ได้มาผ่านการร่อนซ้ำด้วยตะแกรง (Sieving) ที่ขนาดช่องเปิด 0.063 มิลลิเมตร เพื่อคัดแยกเอาตัวอย่าง ที่มีขนาดเล็กกว่า 0.063 มิลลิเมตร และตัวอย่างดินขนาด 0.063–2 มิลลิเมตร ออกจากกัน 6) เก็บตัวอย่างไว้ในภาชนะ ที่ปิดมิดชิดเพื่อป้องกันการปนเปื้อน



รูปที่ 1 จุดเก็บตัวอย่างดินในพื้นที่ศึกษา

การศึกษารูปแบบของโลหะหนักด้วยการสกัดแบบ BCR

โลหะหนักที่ศึกษา ได้แก่ ทองแดง ตะกั่ว สังกะสี และนิกเกิล การวิเคราะห์หาปริมาณโลหะหนักและรูปแบบโลหะหนักจะใช้วิธีการสกัดด้วยเทคนิคการสกัดลำดับส่วน (Sequential extraction) ซึ่งทุกการทดลองจะทำ 3 ซ้ำ การสกัดลำดับส่วนถูกประยุกต์ใช้เพื่อศึกษาสัดส่วนของโลหะหนักในรูปแบบต่างๆ ซึ่งสามารถชี้บ่งชี้ความเป็นไปได้ของการแพร่กระจายของโลหะหนักต่างๆ ภายใต้สภาพแวดล้อมต่างๆ กัน โดยในที่นี้ได้เลือกใช้วิธีที่ถูกพัฒนาขึ้นโดย European Community Bureau of Reference หรือ นิยมเรียกสั้นๆ ว่า วิธีสกัดแบบ BCR ทั้งนี้ วิธีการสกัดลำดับส่วนแบบ BCR นี้ ได้รับการทดสอบแล้วว่าสามารถใช้กับโลหะหนักทั้ง 4 ชนิดนี้ได้ และสำหรับปริมาณโลหะหนักรวมจะพิจารณาจากผลที่ได้จากการสกัดแบบ BCR แต่ละส่วนรวมกัน โดยมีวิธีการโดยย่อ คือ

การสกัดลำดับที่ 1 (โลหะหนักในรูปแบบที่ชะละลายออกมาได้ง่าย) ทำการสกัดด้วยสารละลาย Acetic Acid 0.11 โมลาร์ โดยเขย่าให้ผสมกันเป็นเวลา 16 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิห้อง **การสกัดลำดับที่ 2** (โลหะหนักในรูปแบบที่จับอยู่กับออกไซด์ของเหล็กและแมงกานีส) ทำการสกัดด้วยสารละลาย Hydroxylamine hydrochloride 0.1 โมลาร์ ที่ปรับเป็น pH 2 ไว้แล้วด้วยกรดไนตริกโดยเขย่าเป็นเวลา 16 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิห้อง **การสกัดลำดับที่ 3** (โลหะหนักในรูปแบบที่จับอยู่กับสารอินทรีย์) สกัดโดยใช้สารละลาย 30% H_2O_2 โดยทิ้งไว้ให้เกิดปฏิกิริยา 1 ชั่วโมง โดยเขย่าด้วยมือเบาๆ เป็นบางครั้ง จากนั้นนำไปให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 85 องศาเซลเซียส 1 ชั่วโมง จากนั้นเติมสารละลาย Ammonium Acetate 1.0 โมลาร์ ที่ปรับเป็น pH 2 ไว้แล้วด้วยกรดไนตริก และนำไปเขย่าเป็นเวลา 16 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิห้อง **การสกัดลำดับที่ 4** (โลหะหนักในรูปแบบที่คงตัว) การสกัดลำดับนี้เป็นลำดับสุดท้ายโดยการย่อยด้วยกรดร้อน ซึ่งตามวิธีมาตรฐานนั้นมีการใช้กรดไฮโดรฟลูออริก (Hydrofluoric) ร่วมด้วย แต่เนื่องจากความเป็นอันตรายอย่างมากของกรดดังกล่าวรวมถึงความเสี่ยงต่อการเสียหายของอุปกรณ์วิเคราะห์ขั้นสูง ดังนั้นการย่อยในลำดับนี้จะใช้การย่อยดินด้วยวิธีมาตรฐาน EPA 3051A ซึ่งเป็นการย่อยด้วยสารละลายกรด Aqua regia ที่ผสมขึ้นจากกรดไนตริกเข้มข้น 3 มิลลิลิตร และกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 9 มิลลิลิตร และให้ความร้อนโดยใช้เครื่อง Microwave Digester ที่อุณหภูมิ 175 องศาเซลเซียส ซึ่งจะสามารถย่อยสารต่างๆ ที่เกิดจากการปนเปื้อนออกมาได้ทั้งหมด

ผลการศึกษา

ผลการศึกษารูปแบบของโลหะหนักในดินปนเปื้อนจากการคัดแยกขยะอิเล็กทรอนิกส์

โลหะหนักในรูปแบบต่างๆ จากการสกัดลำดับส่วนด้วยวิธีแบบ BCR สามารถแบ่งรูปแบบของโลหะหนักออกมาได้ 4 รูปแบบ ได้แก่ 1) รูปแบบที่ชะละลายออกมาได้ 2) รูปแบบที่จับอยู่กับออกไซด์ของเหล็กและแมงกานีส 3) รูปแบบที่จับอยู่กับสารอินทรีย์ และ 4) รูปแบบที่คงตัว โดยความคงตัวของโลหะหนักในรูปแบบต่างๆ นั้นเพิ่มขึ้นเป็นลำดับ

การสกัดลำดับส่วนสามารถใช้อธิบายถึงความเป็นไปได้ในการเคลื่อนตัวของโลหะหนักผ่านการพิจารณารูปแบบของโลหะหนักแบบต่างๆ ที่สามารถถูกปลดปล่อยออกมาภายใต้สภาพแวดล้อมต่างๆ กัน (Filgueiras et al, 2002) ได้แก่ โลหะหนักที่อยู่ในรูปแบบที่ชะละลายออกมาได้ง่าย (F1) ซึ่งอยู่ในรูปไอออนที่ปะปนอยู่ในน้ำในดิน และในรูปแบบที่จับอยู่กับคาร์บอเนตซึ่งสามารถถูกชะออกมาได้โดยง่ายด้วยการแลกเปลี่ยนไอออน หรือในสภาพแวดล้อมที่เป็นกรดอ่อนๆ เช่น ฝนกรด หรือกรดที่เกิดจากการย่อยสลายซากอินทรีย์ในสภาวะไร้อากาศที่ทำให้คาร์บอเนตเกิดการสลายตัว เป็นต้น โลหะหนักที่อยู่ในรูปแบบที่จับอยู่กับออกไซด์ของเหล็กและแมงกานีส (Fe and Mn oxide bound, F2) ซึ่งเป็นออกไซด์ที่มีอยู่มากในสภาพแวดล้อมบนพื้นผิวโลก เช่น ในดินและตะกอนต่างๆ ซึ่งเป็นส่วนสำคัญที่โลหะหนักมักไปจับติดอยู่โดยกลไกต่างๆ ได้แก่ การแลกเปลี่ยนประจุ การตกตะกอนร่วม การเกิดสารประกอบเชิงซ้อนบนพื้นผิว และการดูดซับทั้งบนพื้นผิวและรูพรุน ซึ่งออกไซด์ของเหล็กและแมงกานีสเหล่านี้จะเสถียรสภาพและทำให้โลหะหนักหลุดออกมาได้เมื่อสภาพแวดล้อมอยู่ในสภาวะไร้อากาศ โลหะหนักที่อยู่ในรูปแบบที่จับอยู่กับวัตถุดิบอินทรีย์ต่างๆ (organic bound, F3) ผ่านการสะสมผ่านห่วงโซ่อาหาร หรือการเกิดสารประกอบเชิงซ้อน ซึ่งโลหะหนักในรูปแบบนี้จะสามารถหลุดออกมาได้เมื่อเกิดการย่อยสลายสารอินทรีย์เหล่านั้นในสภาพมีอากาศ นอกจากนี้โลหะหนักในกลุ่มนี้ยังรวมถึงโลหะหนักในรูปแบบซัลไฟด์ด้วย โลหะหนักที่

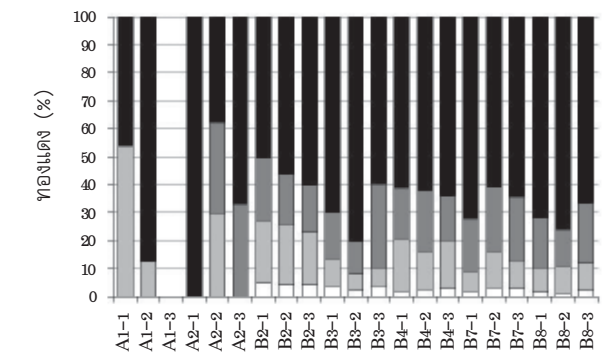
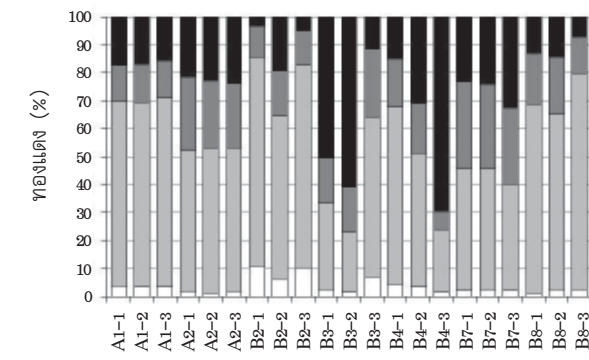
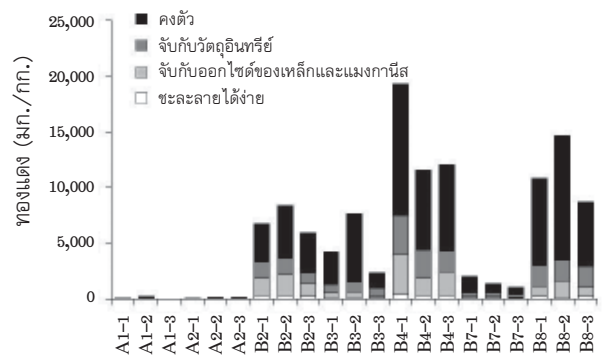
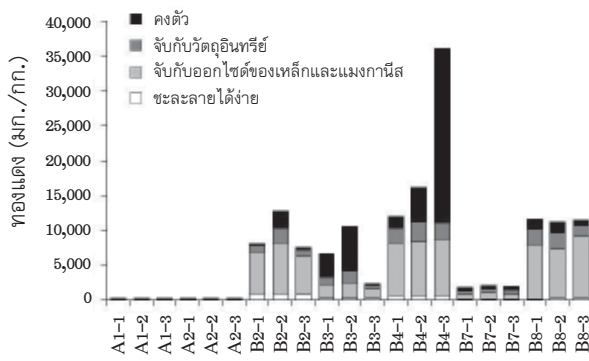
อยู่ในรูปที่คงตัว (F4) เป็นโลหะที่หลีกเลี่ยงจากการสกัดต่างๆ ข้างต้น ซึ่งมีกอยู่ในรูปของหินแร่ แต่ในที่นี้คาดว่าอยู่ในรูปของชั้นโลหะที่เกิดขึ้นจากการคัดแยกขยะอิเล็กทรอนิกส์ โลหะในรูปนี้คงตัวและยากต่อการถูกชะละลาย

ผลการสกัดลำดับส่วนของทองแดง ตะกั่ว สังกะสี และนิกเกิล แสดงไว้ดังรูปที่ 2, 3, 4 และ 5 ตามลำดับ โดยผลการทดลองไม่พบความแตกต่างที่เด่นชัดของรูปแบบของทองแดง ตะกั่ว และสังกะสีในดินปนเปื้อนและดินไม่ปนเปื้อน รูปแบบของทองแดงในเม็ดดินหยาบส่วนมากอยู่ในรูปคงตัว (มากกว่า 60%) ในขณะที่รูปแบบของทองแดงในเม็ดดินละเอียดส่วนมากอยู่ในรูปที่จับอยู่กับออกไซด์ของเหล็กและแมงกานีส ทั้งนี้ สัดส่วนของทองแดงในรูปที่ชะละลายได้ง่ายมีค่าน้อยมากทุกๆ ตัวอย่าง

ตะกั่วในเม็ดดินหยาบกระจายอยู่ในรูปที่จับอยู่กับออกไซด์ของเหล็กและแมงกานีส รูปที่จับกับวัตถุอินทรีย์และรูปคงตัว ในขณะที่ตะกั่วในรูปที่จับอยู่กับออกไซด์ของเหล็กและแมงกานีส มีสัดส่วนเพิ่มขึ้นมากจนกลายเป็นรูปแบบหลักในเม็ดละเอียด ส่วนตะกั่วในรูปที่ชะละลายได้ง่ายมีค่าต่ำมากหรือตรวจไม่พบในบางตัวอย่าง (< 2 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)

สังกะสีในดินหยาบกระจายตัวอยู่ในทุกรูปแบบ โดยพบในรูปที่ชะละลายได้ง่ายและรูปคงตัว มากกว่าในรูปที่จับอยู่กับออกไซด์ของเหล็กและแมงกานีสและรูปที่จับกับวัตถุอินทรีย์ โดยสังกะสีในเม็ดดินละเอียดจะอยู่ในรูปที่จับอยู่กับออกไซด์ของเหล็กและแมงกานีสเป็นหลัก

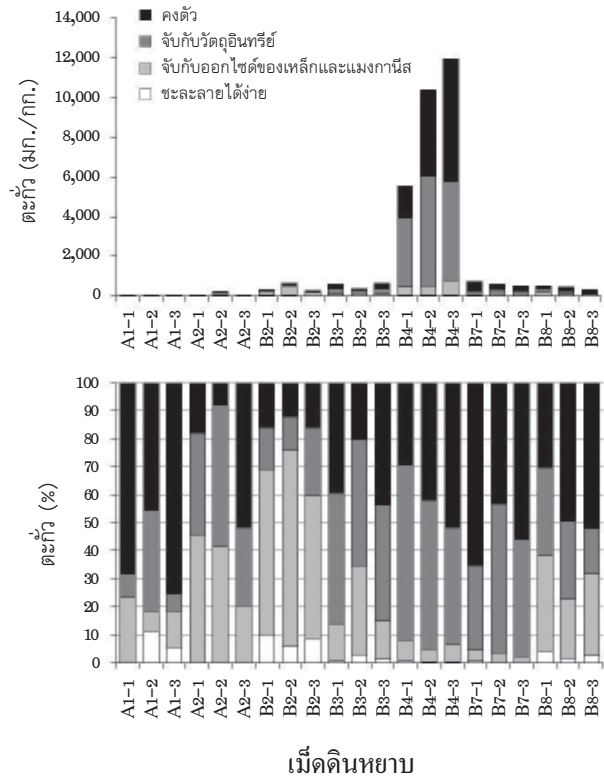
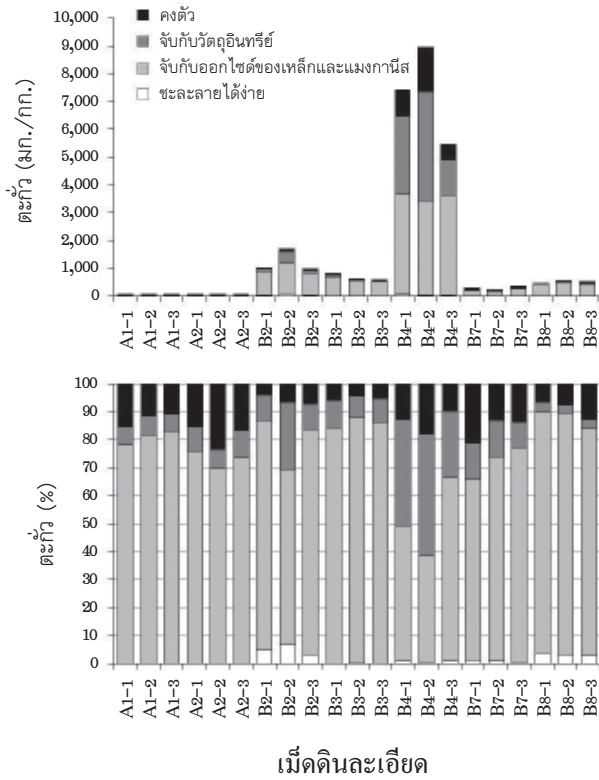
นิกเกิลในรูปที่ชะละลายได้ง่ายมีค่าน้อยมากคล้ายกับทองแดงและตะกั่ว รูปแบบของนิกเกิลในดินไม่ปนเปื้อนในเม็ดดินหยาบอยู่รูปคงตัวทั้งหมด ส่วนในดินละเอียดส่วนมากอยู่ในรูปคงตัว และรูปที่จับอยู่กับออกไซด์ของเหล็กและแมงกานีส ทั้งนี้ ตรวจไม่พบนิกเกิลในรูปที่ชะละลายได้ง่าย (< 2 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม) ส่วนในดินปนเปื้อน นิกเกิลในเม็ดดินหยาบส่วนมากอยู่ในรูปคงตัว และกระจายตัวอยู่ในรูปอื่นๆ เล็กน้อย ส่วนในเม็ดดินละเอียดมีสัดส่วนของนิกเกิลในรูปที่จับอยู่กับออกไซด์ของเหล็กและแมงกานีสเพิ่มขึ้นมาก จนใกล้เคียงกับรูปคงตัวจนกลายเป็นรูปแบบหลัก



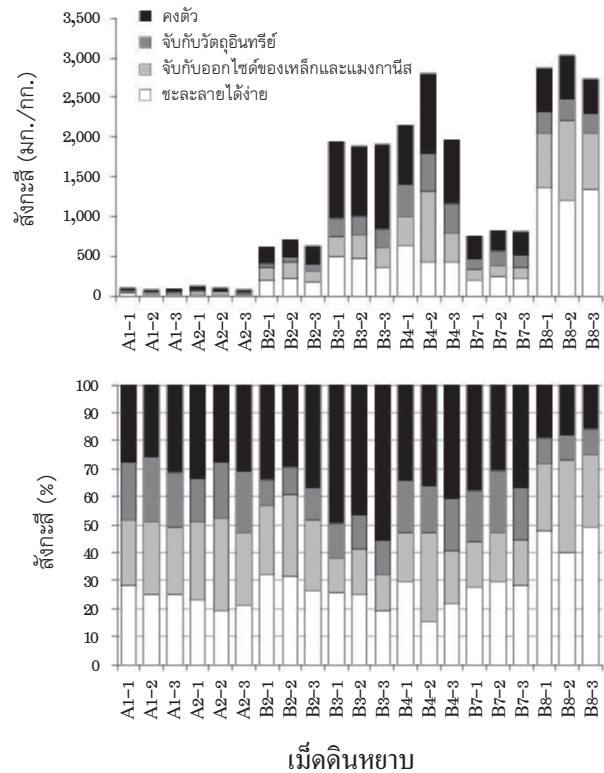
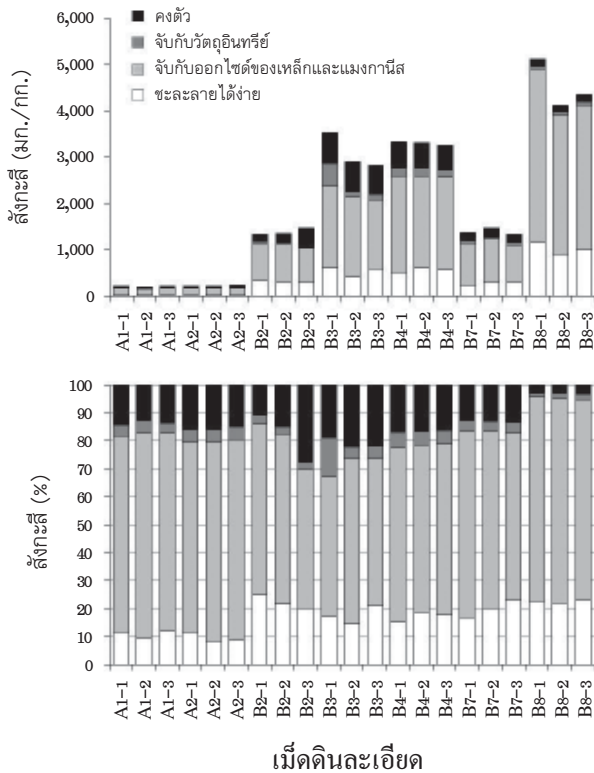
เม็ดดินละเอียด

เม็ดดินหยาบ

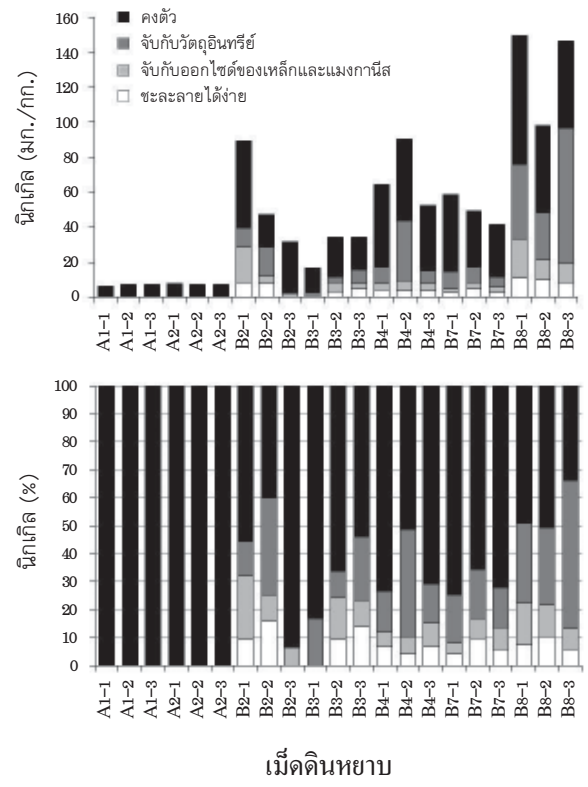
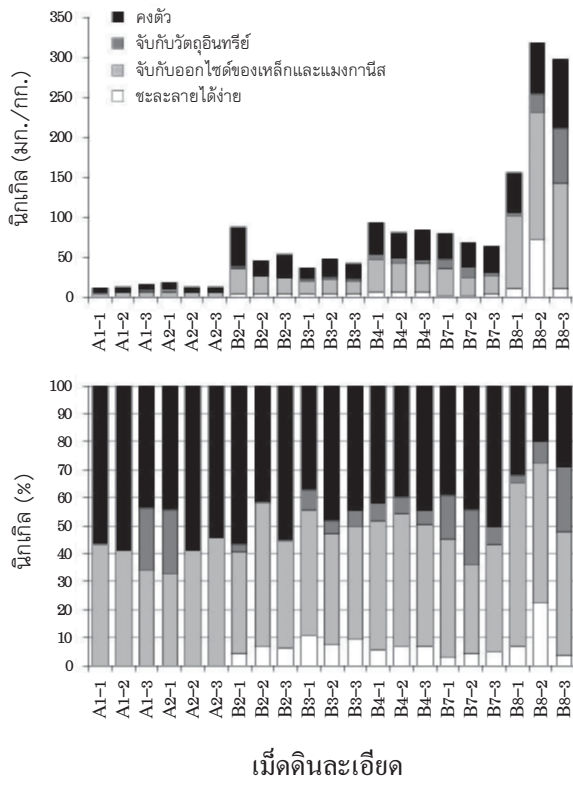
รูปที่ 2 ผลการสกัดลำดับส่วนแบบ BCR ของทองแดง
รูปบนแสดงผลแบบความเข้มข้น รูปล่างแสดงผลแบบเปอร์เซ็นต์



รูปที่ 3 ผลการสกัดลำดับส่วนแบบ BCR ของตะกั่ว
 รูปแบบแสดงผลแบบความเข้มข้น รูปแบบแสดงผลแบบเปอร์เซ็นต์



รูปที่ 4 ผลการสกัดลำดับส่วนแบบ BCR ของสังกะสี
 รูปแบบแสดงผลแบบความเข้มข้น รูปแบบแสดงผลแบบเปอร์เซ็นต์



รูปที่ 5 ผลการสกัดลำดับส่วนแบบ BCR ของนิกเกิล
 รูปบนแสดงผลแบบความเข้มข้น รูปล่างแสดงผลแบบเปอร์เซ็นต์

อภิปรายผลการศึกษา ถึงรูปแบบของโลหะหนักในดิน

ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าโลหะหนักที่ศึกษา กระจายตัวอยู่ในรูปคางัวและรูปที่จับกับวัตถุอินทรีย์ในเมื่อดินหยาบมากกว่าในเมื่อดินละเอียด ในขณะที่โลหะหนักเหล่านี้ในรูปที่จับอยู่กับออกไซด์ของเหล็กและแมงกานีสจะเพิ่มขึ้นมากจนกลายเป็นรูปแบบหลักรูปแบบหนึ่ง หรือเป็นรูปแบบที่มากที่สุด ในเมื่อดินละเอียด ทองแดง ตะกั่ว และนิกเกิลในรูปที่ละลายได้ง่ายมีปริมาณน้อยหรือตรวจไม่พบในบางตัวอย่าง ในขณะที่สังกะสีในรูปนี้กลับมีปริมาณที่สูงกว่าโลหะอื่นๆ อย่างเห็นได้ชัด แสดงให้เห็นว่าสังกะสีเป็นโลหะหนักที่ถูกชะได้ง่ายตามธรรมชาติ ซึ่งน่าจะเป็นผลให้สังกะสีในรูปที่ละลายได้ง่ายในดินปนเปื้อน มีค่าสูงกว่าในดินไม่ปนเปื้อน ซึ่งสอดคล้องกับการแข่งขันดูดซับ (Competitive adsorption) ของโลหะต่างๆ โดยเมื่อโลหะหนักในรูปที่ละลายได้ง่ายถูกปลดปล่อยออกสู่น้ำในดิน (Soil solution) โลหะเหล่านี้จะถูกดูดซับโดยวัตถุเนื้อดินต่างๆ ผ่านกลไกการดูดซับต่างๆ ซึ่งพื้นผิวสัมผัสที่เกิดการดูดซับมากที่สุดในดินคือพื้นผิวของแร่ต่างๆ ในดินนั้นๆ (Bradl, 2004) ทั้งนี้ โดยทั่วไปแล้วความสามารถในการดูดซับของสังกะสีบนพื้นผิวแร่ต่างๆ มีค่าต่ำกว่าตะกั่ว และทองแดง (Smith, 1999) ในขณะที่ความเข้มข้นของทองแดงในดินปนเปื้อนในการศึกษานี้มีค่าสูงกว่าสังกะสีมาก ดังนั้น สังกะสีจึงถูกดูดซับบนพื้นผิวได้ไม่มาก เมื่อเทียบกับทองแดง และตะกั่ว

โดยทั่วไป รูปแบบของโลหะหนักในดินปนเปื้อนจากสาเหตุต่างๆ อาทิ หางแร่เหมืองทอง (Konradi et al., 2005) โรงแต่งแร่ตะกั่วและสังกะสี (Waterlot et al., 2013) เหมืองสังกะสี (Sriprachote et al., 2014) เหมืองตะกั่ว (Poopa et al., 2015) และการปนเปื้อนจากกิจกรรมต่างๆ ในเมืองหลวง (Acosta et al., 2015) แสดงให้เห็นถึงการเพิ่มขึ้นของโลหะหนักในรูปที่ไม่คางัว โดยเฉพาะอย่างยิ่งในรูปที่จับอยู่กับออกไซด์ของเหล็กและแมงกานีส และรูปที่ละลายได้ง่าย ในกรณีเหล่านี้ โลหะหนักเคลื่อนตัวจากต้นกำเนิดในรูปที่ไม่คางัว และเกิดการตกตะกอนหรือจับกับวัตถุเนื้อดินต่างๆ (แร่ดินเหนียว ออกไซด์ของเหล็กและแมงกานีส และอินทรีย์วัตถุ) ในพื้นที่ใกล้เคียงที่ถูกพัดพาไปถึง ดังนั้น จึงทำให้ดินปนเปื้อนเหล่านี้มีสัดส่วนของโลหะหนักในรูปที่ไม่คางัวเพิ่มมากขึ้น

อย่างไรก็ตาม สัดส่วนของโลหะหนักในดินเปลี่ยนจากการคัดแยกขยะอิเล็กทรอนิกส์ในการศึกษานี้ โดยทั่วไปแล้ว คล้ายกับดินที่ยังไม่ปนเปื้อน ซึ่งหมายความว่า โลหะหนักที่ปนเปื้อนไม่ได้มีแค่รูปที่ไม่คงตัวแต่ปรากฏในทุกๆ รูปแบบ รวมถึงรูปที่ไม่คงตัวด้วย เมื่อพิจารณาถึงการปนเปื้อนในพื้นที่ศึกษา เศษซากของขยะอิเล็กทรอนิกส์จะถูกทิ้งไว้ตามข้างทาง ตลอดแนวและตามพื้นที่ทิ้งร้าง การปนเปื้อนของโลหะหนักเชื่อว่าเริ่มจากเศษขยะอิเล็กทรอนิกส์ที่ร่วงหล่นลงบนพื้นดิน โดยตรง ซึ่งในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เหล่านี้มีโลหะหนักหลายชนิดเป็นองค์ประกอบ (Brigden et al., 2005; Wu et al., 2008; Hino et al., 2009; Man et al., 2013) และโดยทั่วไปน่าจะอยู่ในรูปคงตัว (Luo et al., 2011) ความเข้มข้นของโลหะหนักในเม็ดดินละเอียดที่สูง และสัดส่วนของในรูปไม่คงตัวที่สูงขึ้นในเม็ดดินละเอียด แสดงให้เห็นถึงว่ามันถูกปลดปล่อยออกมาจากขยะอิเล็กทรอนิกส์เหล่านั้นผ่านกระบวนการต่างๆ ตามธรรมชาติ และกระจายตัวไปสะสมอยู่ตามวัตถุเนื้อดินต่างๆ ทั้งนี้ กลไกการกระจายตัวนี้เป็นแบบเดียวกับการกระจายตัวของโลหะหนักในดินตามธรรมชาติ ซึ่งมีที่มาจากแร่ ซึ่งเมื่อเป็นไปตามกระบวนการดังกล่าว การปนเปื้อนของโลหะหนักทุกๆ รูปแบบในดินจึงเพิ่มขึ้น

สรุปผลการศึกษา

เมื่อนำผลการวิจัยต่างๆ ที่ได้พบทวนมาและผลจากการศึกษานี้มาพิจารณาร่วมกัน จึงได้ภาพการเปลี่ยนแปลงรูปแบบของโลหะหนักที่ปนเปื้อนในพื้นที่คัดแยกขยะอิเล็กทรอนิกส์ กล่าวคือ การปนเปื้อนเริ่มต้นจากเศษโลหะและวัสดุต่างๆ ที่เกิดจากการคัดแยกซึ่งส่วนมากเป็นวิธีทางกายภาพ ทำให้พบการปนเปื้อนของโลหะหนักในรูปดั้งเดิมของมัน ซึ่งน่าจะอยู่ในรูปคงตัวเป็นหลัก และเมื่อเกิดการทับถมสะสมผ่านระยะเวลายาวนาน จะเกิดการเปลี่ยนแปลงอันเป็นผลจากปฏิกิริยาต่างๆ ในธรรมชาติ โลหะหนักในรูปที่คงตัวจึงถูกกัดกร่อนชะละลายออกไปสะสมอยู่ในวัสดุเนื้อดินต่างๆ ตามแต่ลักษณะของดิน รวมถึงเกิดการลดขนาดของเศษโลหะและวัสดุต่างๆ ดังผลการทดลองในดินละเอียดที่จะพบว่าเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปแบบอย่างชัดเจนโดยไปสะสมอยู่ในรูปที่จับกับออกไซด์ของเหล็กและแมงกานีสในปริมาณมาก นอกจากนี้ผลการศึกษายังแสดงให้เห็นว่าโลหะหนักแต่ละชนิดมีการสะสมอยู่ในรูปที่ต่างกันไป

ตามแนวทางการกระจายตัวนี้เองทำให้โลหะหนักในดินปนเปื้อนเพิ่มขึ้น ทั้งในรูปคงตัวและไม่คงตัว การศึกษานี้พบว่ารูปแบบของทองแดง ตะกั่ว และนิกเกิลในเม็ดดินหยาบ ส่วนมากอยู่ในรูปคงตัว ตามด้วยรูปที่จับกับวัตถุอินทรีย์ในสัดส่วนที่น้อยกว่า รูปแบบของสังกะสีในเม็ดดินหยาบแตกต่างจากทองแดง ตะกั่ว และนิกเกิล โดยกระจายตัวอยู่ในรูปต่างๆ ทั้งหมด ในเม็ดดินละเอียด โลหะหนักในรูปที่จับกับออกไซด์ของเหล็กและแมงกานีสจะมีปริมาณเพิ่มขึ้นจนกลายเป็นรูปแบบหลักของโลหะหนักที่ปนเปื้อน ทั้งนี้ ทองแดง ตะกั่ว และนิกเกิลในรูปที่ชะละลายได้ง่ายมีสัดส่วนที่น้อยมากหรือตรวจไม่พบ แต่สำหรับสังกะสีมีปริมาณมากกว่าโลหะอื่นๆ อย่างชัดเจน ซึ่งแสดงถึงลักษณะสมบัติที่ชะละลายได้ง่ายของมัน

ทั้งนี้ การที่พบว่าโลหะหนักที่สะสมในดินละเอียดอยู่ในรูปที่จับกับออกไซด์ของเหล็กและแมงกานีสเป็นหลัก ซึ่งเกิดการปลดปล่อยออกมาได้เมื่ออยู่ในสภาพไร้อากาศ ทำให้นำเป็นห่วงว่าอาจเกิดการปลดปล่อยกลับออกมาเมื่อดินเหล่านี้ถูกพัดพาไปสะสมอยู่ในท่อระบายน้ำซึ่งรายล้อมอยู่ในพื้นที่ที่มีลักษณะเป็นเมือง จึงเป็นประเด็นที่น่าติดตามศึกษาต่อไป

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ดำเนินการภายใต้การสนับสนุนงบประมาณจากกองทุนรัชดาภิเษกสมโภช ประจำปีงบประมาณ 2556 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย (CU-56-855-SD) และโครงการแผนพัฒนาวิชาการ จุฬาฯ สร้างเสริมพลังจุฬาฯ ก้าวสู่ศตวรรษที่ 2

เอกสารอ้างอิง

- เพ็ญโฉม แซ่ตั้ง, สุภรนต์ โจรนไพรวงศ์, วลัยพร मुखสุวรรณ, สุภาวดี ประทุมชาติ. การศึกษาเชิงปฏิบัติการเบื้องต้นเพื่อศึกษาผลกระทบและแสวงหาแนวทางการจัดการขยะอย่างมีส่วนร่วม กรณีตำบลโคกสะอาด อำเภอเมืองชัย จังหวัดกาฬสินธุ์, 2552.
- สีลาวัณย์ ดำรงศิริ (2558). การปนเปื้อนโลหะหนักในดินในพื้นที่ชุมชนคัดแยกขยะอิเล็กทรอนิกส์ กรุงเทพมหานคร. *วารสารสิ่งแวดล้อม*, ปีที่ 19 ฉบับที่ 3. 27-39.
- สีลาวัณย์ ดำรงศิริ (2559). โลหะหนักในสิ่งแวดล้อม และความเสี่ยงต่อสุขภาพในชุมชนคัดแยกขยะอิเล็กทรอนิกส์ “ชุมชนเสื้อใหญ่” เขตจตุจักร. *วารสารสิ่งแวดล้อม*, ปีที่ 20 ฉบับที่ 1. 87-97.
- Acosta, J.A., Gabarron, M., Faz, A., Martinez-Martinez, S., Zornoza, R., and Arocena, J.M. Influence of population density on the concentration and speciation of metals in the soil and street dust from urban areas. *Chemosphere* 134 (2015):328-337.
- Bradl, H.B. Adsorption of heavy metal ions on soils and soils constituents. *Journal of Colloid and Interface Science* 277 1 (2004): 1-18.
- Brigden, K., Labunska, I., Santillo, D., Allsopp, M. Recycling of electronic wastes in China and India: Workplace and Environmental Contamination. Greenpeace International, The Netherlands (2005)
- Filgueiras, A.V., Lavilla, I., and Bendicho, C. Chemical sequential extraction for metal partitioning in environmental solid samples. *Journal of Environmental Monitoring* 4 (2002): 823-857.
- Fu, J., Zhou, Q., Liu, J., Liu, W., Wang, T., Zhang, Q. Jiang, G. High levels of heavy metals in rice (*Oryza sativa* L.) from a typical E-waste recycling area in southeast China and its potential risk to human health. *Chemosphere* 71 7 (2008): 1269-1275.
- Hino, T., Agawa, R., Moriya, Y., Nishida, M., Tsugita, Y., Araki, T. Techniques to separate metal from waste printed circuit boards from discarded personal computers. *Journal of Material Cycles and Waste Management* 11 (2009): 42-54.
- Jun-Hui, Z.J., Hang, M. Eco-toxicity and metal contamination of paddy soil in an e-wastes recycling area. *Journal of Hazardous Materials* 165 (2009) 744-750.
- Konradi, E.A., Frentiu, T., Ponta, M., Cordos, E. Use of Sequential Extraction to Assess Metal Fractionation in Soils from Bozanta Mare, Romania. *Acta Universitatis Cibiniensis Seria F Chemia* 8(2005-2):5-12.
- Leung, A., Cai, Z.W., Wong, M.H. Environmental contamination from electronic waste recycling at Guiyu, Southeast China. *Journal of Material Cycles and Waste Management* (2006) 8:21-33.
- Li, J., Duan, H., Shi, P. Heavy metal contamination of surface soil in electronic waste dismantling area: site investigation and source-apportionment analysis. *Waste Management & Research* 29 7 (2011b): 727-738.
- Luo, C., Liu, C., Wang, Y., Liu, X., Li, F., Zhang, G. & Li, X. Heavy metal contamination in soils and vegetables near an e-waste processing site, South China. *Journal of Hazardous Materials* 186 (2011): 481-490.
- NEPC (National Environment Protection Council) (Australian). NEPM Schedule B(3) Guideline on Laboratory Analysis of Potentially Contaminated Soils, (2011).

- Man, M., Naidu, R., Wong, M.H. Persistent toxic substances released from uncontrolled e-waste recycling and actions for the future. *Science of the Total Environment* 463-464 (2013): 1133-1137.
- Poopa, T., Pavasant, P., Kanokkantapong.V., Panyapinyopol, B. Fractionation and Mobility of Lead in Klity Creek Riverbank Sediments, Kanchanaburi, Thailand. *Applied Environmental Research* 37 1(2015): 1-10.
- Puckett, J., Smith T., Byster, L., Westerrelt, S., Gutierrez, R., Davis, S. Hussain, A. *Exporting Harm: The High-Tech Trashing of Asia*. Diane Pubublishing Co., Darby, 2003.
- Robinson, B.H. E-waste: An assessment of global production and environmental impact. *Science of the Total Environment* 408 (2009): 183-191.
- Smith, K.S. Metal sorption on mineral surface: An overview with examples relating to mineral deposits. *The environment geochemistry of mineral deposits, Part A: Processes, techniques, and health issues. Reviews in economic geology* 6A (1999): 161-182
- Sriprachote, A., Pengprecha, S., Pengpre- cha, P., Kanyawongha, P., Ochiai, K,Matoh, T.Assessment of cadmium and zinc contamination in the soils around PhaTe Village, Mae Sot District, Tak Province, Thailand. *Applied Environmental Research* 36 4 (2014): 67-79.
- VROM. *Soil Remediation Circular 2009*, Ministry of Housing, Spatial Planning and the Environment (Netherlands). 2009.
- Waterlot, C., Bidar, G., Pelfrene, A., Roussel, H., Fourier, H.,Douay, F.Contamination, Fractionation and Availability of Metals in Urban Soils in the Vicinity of Former Lead and Zinc Smelters, France.*Pedosphere* 23 2 (2013): 143-159.
- Wentworth, C.K. A Scale of Grade and Class Terms for Clastic Sediments. *The Journal of Geology* 30 5 (1922): 377-392.
- Wu, B.Y., Chan, Y.C., Middendorf, A., Gu, X., Zhong, H.W. Assessment of toxicity potential of metallic elements in discarded electronics: A case study of mobile phones in China. *Journal of Environmental Sciences* 20 (2008): 1403-1408.
- Wu, Q., Leung, J. Y. S., Geng, X., Chen, S., Huang, X., Li, H., Huang, Z., Zhu, L., Chen, J. and Lu, Y. Heavy metal contamination of soil and water in the vicinity of an abandoned e-waste recycling site: Implications for dissemination of heavy metals. *Science of the Total Environment* 506-507 (2015): 217-225.
- Zhang, Q., Ye, J., Chen, J., Xu, H., Wang, C. & Zhao, M. Risk assessment of polychlorinated biphenyls and heavy metals in soils of an abandoned e-waste site in China. *Environmental Pollution* 185 (2014): 258-265.
- Zheng, J., Chen, K.-h., Yan, X., Chen, S.-J., Hu, G.-C., Peng, X.-W., Yuan, J.-g., Mai, B.-X., Yang, Z.-Y. Heavy metals in food, house dust, and water from an e-waste recycling area in South China and the potential risk to human health. *Ecotoxicology and Environmental Safety* 96 (2013): 205-212.
- Zhuang, P., Li, Z.-A., Zou, B., Xia, H.-P., Wang, G. Heavy Metal Contamination in Soil and Soybean near the Dabaoshan Mine, South China. *Pedosphere* 23 3 (2013): 298-304.

