การประเมินความเป็นพิษของโลหะหนักระดับเซลล์ในกบนา (*Hoplobatrachus rugulosa*) บริเวณรอบพื้นที่ฝังกลบขยะอิเล็กทรอนิกส์

Cytotoxic Evaluation of Heavy Metal in Frog (*Hoplobatrachus rugulosa*) around Electronic Waste Landfill Area

พรภิไล ถนอมสงัด, รัชชุดา จันทร์ทรง และลำใย ณีรัตนพันธุ์*

ภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

ตำบลในเมือง อำเภอเมือง จังหวัดขอนแก่น 40002

สมบัติ อัปมระภา

สถาบันวิจัยวลัยรุกเวช มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

ตำบลขามเรียง อำเภอกันทรวิชัย จังหวัดมหาสารคาม 44150

บัณฑิตย์ เต็งเจริญกุล

ภาควิชาอายุรศาสตร์ คณะสัตวแพทยศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

ตำบลในเมือง อำเภอเมือง จังหวัดขอนแก่น 40002

Pornpilai Thanomsangad, Ratchuda Junsong and Lamyai Neeratanaphan*

Department of Environmental Science, Faculty of Science, Khon Kaen University,

Nai Muang, Muang, Khon Kaen 40002

Sombat Appamaraka

Walai Rekawej Botanical Research Institute, Mahasarakham University,

Khamriang, Kantarawichai, Maha Sarakham 44000

Bundit Tengjaroenkul

Department of Veterinary Medicine, Faculty of Veterinary Medicine, Khon Kaen University,

Nai Muang, Muang, Khon Kaen 40002

บทคัดย่อ

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อตรวจวัดปริมาณโลหะหนัก (As, Pb, Cd, Cr, Cu, Fe, Mn, Ni และ Zn) ในแหล่งน้ำ ดิน และกบนา รวมถึงประเมินความผิดปกติของโครโมโซมกบนา (*Hoplobatrachu rugulosa*) บริเวณ

***ผู้รับผิดชอบบทความ :** hlamya@kku.ac.th **doi:** 10.14456/tstj.2018.14

พื้นที่ฝังกลบขยะอิเล็กทรอนิกส์ วิเคราะห์โลหะหนักด้วยเครื่อง Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectrometry (ICP-OES) และประเมินความผิดปกติของโครโมโซมกบนาจากเซลล์ไขกระดูก ปริมาณโลหะหนักในแหล่งน้ำ 6 แหล่ง พบโลหะหนักที่มีค่าเกินมาตรฐานคุณภาพน้ำผิวดิน ได้แก่ Pb มีค่าเกินมาตรฐาน 3 แหล่ง Cd มีค่าเกินมาตรฐาน 3 แหล่ง Cr มีค่าเกินมาตรฐาน 1 แหล่ง Cu มีค่าเกินมาตรฐาน 3 แหล่ง Mn มีค่าเกินมาตรฐาน 3 แหล่ง Ni มีค่าเกินมาตรฐาน 2 แหล่ง และ Zn มีค่าเกินมาตรฐาน 2 แหล่ง ส่วนตัวอย่างดินที่เก็บ 23 จุดรอบพื้นที่ฝังกลบขยะอิเล็กทรอนิกส์ พบโลหะหนักที่มีค่าเกินมาตรฐานคุณภาพดิน ได้แก่ As มีค่าเกินมาตรฐาน 3 จุด และ Pb มีค่าเกินมาตรฐาน 3 จุด และในกบนา 5 ตัวอย่าง ตรวจพบ Pb มีค่าเฉลี่ยเกินมาตรฐาน ผลการศึกษาโครโมโซมกบนาพบว่าจำนวนโครโมโซมดิพลอยด์เท่ากับ 26 แท่ง ($2n = 26$) มีลักษณะความผิดปกติของโครโมโซม 7 รูปแบบ คือ single chromatid gap (SCG) single chromatid break (SCB) isochromatid gap (ISCG) isochromatid break (ISCB) deletion (D) fragmentation (F) และ centromere break (CB) โดยรูปแบบความผิดปกติที่พบมากที่สุด คือ SCG และจำนวนเซลล์ที่มีความผิดปกติของโครโมโซมพบร้อยละ 38.8

คำสำคัญ : ขยะอิเล็กทรอนิกส์; โลหะหนัก; ความผิดปกติของโครโมโซม; กบนา

Abstract

The objective of this study was to investigate the concentrations of heavy metals (As, Pb, Cd, Cr, Cu, Fe, Mn, Ni and Zn) in water, soil and frog (*Hoplobatrachu rugulosa*) samples including chromosomal aberrations in *H. rugulosa* around electronic waste landfill area. Heavy metals were measured by using inductively coupled plasma optical emission spectrometry (ICP-OES). Assessment of chromosomal aberrations of *H. rugulosa* prepared from bone marrow. The concentrations of heavy metals in 6 water sample sites were found Pb in 3 water sample sites, Cd in 3 water sample sites, Cr in 1 water sample site, Cu in 3 water sample sites, Mn in 3 water sample sites, Ni in 2 water sample sites and Zn in 2 water sample sites that were all exceed the water standards. Total 23 soil sample sites around electronic waste landfill area were found As in 3 soil sample sites and Pb in 3 soil sample sites that were exceed the soil standards. The Pb concentration in 5 frog samples were exceeds the standard. The diploid chromosome number of *H. rugulosa* was $2n=26$. There were 7 types of chromosomal aberrations of *H. rugulosa* around the electronic waste landfill including single chromatid gap (SCG), single chromatid break (SCB), isochromatid gap (ISCG), isochromatid break (ISCB), deletion (D), fragmentation (F), and centromere break (CB). The most common chromosomal aberration was SCG. The percentage of cells with chromosomal aberrations was 38.8 %.

Keywords: electronic waste; heavy metal; chromosomal aberration; frog

1. บทนำ

ปัจจุบันขยะมูลฝอยเป็นปัญหาที่สำคัญและนับวันยิ่งมีแนวโน้มทวีความรุนแรงมากขึ้น สาเหตุเนื่องมาจากการเพิ่มขึ้นของปริมาณขยะมูลฝอยทุกปีตามอัตราการเพิ่มขึ้นของจำนวนประชากร การขยายตัวทางเศรษฐกิจ ความก้าวหน้าอย่างรวดเร็วทางเทคโนโลยี ทำให้มีอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ใหม่เกิดขึ้นมากมาย เพื่อตอบสนองความต้องการและอำนวยความสะดวกสบายในการใช้ชีวิตประจำวันของมนุษย์ เช่น โทรทัศน์ เครื่องปรับอากาศ ตู้เย็น เครื่องซักผ้า คอมพิวเตอร์ เครื่องเล่นวีซีดี/ดีวีดี โทรศัพท์มือถือ กล้องถ่ายรูปดิจิตอล ฯลฯ เมื่ออุปกรณ์เหล่านี้เสื่อมสภาพ ตกรุ่น หรือสิ้นอายุการใช้งานจะกลายเป็นขยะที่เรียกว่าขยะอิเล็กทรอนิกส์ [1] สำหรับสถานการณ์ขยะอิเล็กทรอนิกส์ในประเทศไทยนั้น ปริมาณขยะอิเล็กทรอนิกส์ได้เพิ่มสูงขึ้นทุกปี กรมควบคุมมลพิษรายงานว่า ในปี พ.ศ. 2557 ปริมาณขยะมูลฝอยชุมชนที่เกิดขึ้นทั่วประเทศประมาณ 26.19 ล้านตัน คาดการณ์ปริมาณของเสียอันตรายจากชุมชนประมาณ 576,316 ตัน เพิ่มขึ้นจากปี พ.ศ. 2556 จำนวน 13,482 ตัน โดยของเสียอันตรายจากชุมชนส่วนใหญ่เป็นซากผลิตภัณฑ์เครื่องใช้ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ประมาณ 376,801 ตัน หรือร้อยละ 65.4 [2] ปัญหาที่สำคัญของขยะอิเล็กทรอนิกส์เหล่านี้ คือองค์ประกอบของสารเคมีที่มีพิษตกค้างยาวนานและสะสมในสิ่งมีชีวิต โดยเฉพาะโลหะหนัก เช่น ปรอท (Hg) ตะกั่ว (Pb) สารหนู (As) นิกเกิล (Ni) โครเมียม (Cr) และแคดเมียม (Cd) เป็นต้น หากไม่มีการจัดการที่ถูกต้องภายหลังเลิกใช้อาจส่งผลให้มีการรั่วไหลของสารพิษสู่สิ่งแวดล้อมได้ [3]

พื้นที่ฝังกลบขยะอิเล็กทรอนิกส์ ตำบลโคกสะอาด อำเภอฆ้องชัย จังหวัดกาฬสินธุ์ เป็นสถานที่ทิ้งขยะอิเล็กทรอนิกส์ที่ใหญ่ที่สุดในประเทศไทย และชาวบ้านส่วนใหญ่มีอาชีพค้าและคัดแยกขยะอิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งจะนำเศษซากขยะอิเล็กทรอนิกส์ที่เหลือจากการขายหรือคัดแยกเหล่านี้ไปทิ้งกองไว้อย่างไม่ถูกต้องตามหลักวิชาการ ก่อให้เกิดการรั่วไหลของสารพิษสู่สิ่งแวดล้อม เพ็ญโฉม และคณะ [4] ได้ตรวจวัดการปนเปื้อนของโลหะหนักในดินบริเวณพื้นที่ฝังกลบขยะ พบปริมาณตะกั่วมากถึง 79,520 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ซึ่งเกินมาตรฐานคุณภาพดินที่ใช้ประโยชน์เพื่อการอยู่อาศัยและเกษตรกรรม สมบัติของโลหะหนักเป็นสารที่มีความเสถียรจึงไม่สามารถสลายตัวได้ในกระบวนการธรรมชาติ ก่อให้เกิดผลกระทบในระยะยาวเมื่อปนเปื้อนเข้าสู่สิ่งแวดล้อม ทั้งในดิน แหล่งน้ำ และตะกอนดิน อีกทั้งยังสามารถสะสมในสิ่งมีชีวิตและถ่ายทอดตามลำดับขั้นในห่วงโซ่อาหาร [5] เมื่อสิ่งมีชีวิตได้รับสารพิษเข้าสู่ร่างกายในปริมาณมากอาจทำให้เสียชีวิต หรือการได้รับในปริมาณเล็กน้อยเป็นระยะเวลานานจะเกิดการสะสมจนก่อให้เกิดความผิดปกติในร่างกายได้ ความเป็นพิษของโลหะหนักสามารถทำลายระบบประสาท ทำลายเซลล์สมอง เปลี่ยนแปลงการทำงานของเอนไซม์ที่สำคัญหลายชนิด และเกิดผลเสียกับอวัยวะในร่างกาย [6] นอกจากนี้ยังมีผลต่อกระบวนการทำงานของร่างกาย โดยโลหะหนักที่ถูกลำเลียงเข้าสู่เซลล์นั้นจะมีผลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสมบัติการเลือกผ่านของเยื่อหุ้มเซลล์ จับกับหมู่ฟอสเฟตของ ADP หรือ ATP และแทนที่ไอออนที่สำคัญในเซลล์ อาจส่งผลทำให้เกิดความผิดปกติทางพันธุกรรมได้ [7]

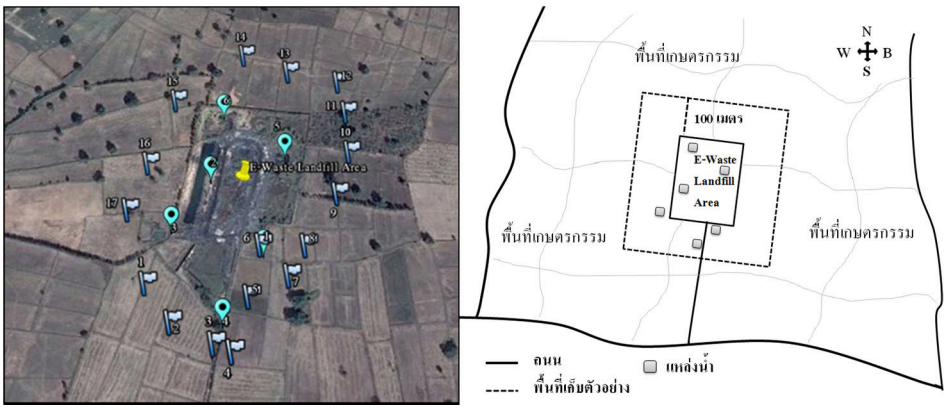
กบนา (*Hoplobatrachus rugulosa*) เป็นสัตว์สะเทินน้ำสะเทินบก อาศัยอยู่ในพื้นที่ราบลุ่มหรือบริเวณใกล้แหล่งน้ำขัง เช่น หนอง คลอง บึง นาข้าว เมื่อมีการผสมพันธุ์ตัวเมียจะวางไข่ในแอ่งน้ำขัง หลังจากเข้าสู่ระยะลูกอ๊อดจะอาศัยอยู่ในน้ำ มีนิสัยการกินอาหารแบบผู้ล่า โดยกินลูกอ๊อดชนิดอื่น รวมทั้งลูกอ๊อดชนิดเดียวกันที่มีขนาดเล็กกว่า และในระยะตัวเต็ม

วัยจะกินแมลงเป็นอาหาร จึงเป็นสิ่งมีชีวิตที่มีโอกาสได้รับสารพิษ และเกิดการสะสมในร่างกาย นอกจากนี้กบนายังมีความสำคัญต่อระบบนิเวศทางธรรมชาติโดยเป็นอาหารของสัตว์หลายชนิด รวมถึงมนุษย์ [8] ปัจจุบันการศึกษาผลกระทบของพื้นที่ฝังกลบขยะอิเล็กทรอนิกส์ต่อสิ่งแวดล้อม การสะสมของโลหะหนักและความเป็นพิษต่อระบบพันธุกรรมในสิ่งมีชีวิตยังมีจำนวนน้อย ดังนั้น การศึกษานี้จึงได้ศึกษาการปนเปื้อนของโลหะหนักในสิ่งแวดล้อมและการสะสมในกบนา รวมถึงผลกระทบจากโลหะหนักต่อสิ่งมีชีวิต โดยการประเมินความผิดปกติของโครโมโซมกบนาในบริเวณพื้นที่ฝังกลบขยะอิเล็กทรอนิกส์ การศึกษาเหล่านี้จะทำให้ได้องค์ความรู้ในเรื่องการสะสมและความเป็นพิษของโลหะหนักที่มีต่อระบบพันธุกรรมของสิ่งมีชีวิตที่อาศัยอยู่ในสิ่งแวดล้อมที่ได้รับมลพิษจากกิจกรรมของมนุษย์ และนำไปสู่การวางแผนการจัดการและพัฒนาคุณภาพสิ่งแวดล้อมต่อไป

2. วิธีดำเนินการศึกษา

2.1 พื้นที่ศึกษาและจุดเก็บตัวอย่าง

ดำเนินการศึกษาในพื้นที่ฝังกลบขยะอิเล็กทรอนิกส์ ตำบลโคกสะอาด อำเภอฆ้องชัย จังหวัดกาฬสินธุ์ มีพื้นที่ทั้งหมด 23 ไร่ และบริเวณรอบพื้นที่ฝังกลบระยะห่าง 100 เมตร ที่คาดว่าจะได้รับผลกระทบจากน้ำชะมูลฝอย [9] โดยสุ่มเก็บตัวอย่างน้ำใน 6 แหล่ง ตัวอย่างดิน 23 จุด และกบนา 5 ตัว (รูปที่ 1)



รูปที่ 1 พื้นที่ศึกษาและจุดเก็บตัวอย่าง

2.2 โลหะหนักในน้ำ ดิน และสะสมในกบนา

2.2.1 ปริมาณโลหะหนักที่ปนเปื้อนในน้ำ

ปิเปตน้ำตัวอย่าง 25 มิลลิลิตร ใส่ในบิกเกอร์ และเติมกรดไนตริก 1.25 มิลลิลิตร จากนั้นนำไปย่อยในอ่างควบคุมอุณหภูมิที่ 90±5 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที เมื่อครบเวลานำออกมาทิ้งให้เย็น และปรับปริมาตรให้เป็น 25 มิลลิลิตร ด้วยน้ำกลั่นปราศจากไอออน แล้วกรองด้วยกระดาษกรองเบอร์ 1 นำตัวอย่างที่ได้ไปตรวจวัดปริมาณโลหะหนักด้วยเครื่อง ICP-OES

2.2.2 ปริมาณโลหะหนักที่ปนเปื้อนในดิน

นำตัวอย่างดินมาตากให้แห้ง บดและร่อนในตะแกรงขนาด 500 ไมโครเมตร จากนั้นชั่งตัวอย่างดิน 1 กรัม ใส่ในขวดย่อยก้นกลม เติมกรดไฮโดรคลอริก 15 มิลลิลิตร กรดไนตริกเข้มข้น 5 มิลลิลิตร และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 10 มิลลิลิตร นำไปย่อยโดยใช้ชุดย่อยดิน เป็นเวลา 2 ชั่วโมง เมื่อครบเวลาทิ้งให้เย็น และปรับปริมาตรให้เป็น 25 มิลลิลิตร ด้วยน้ำกลั่นปราศจากไอออน จากนั้นกรอง

ด้วยกระดาษกรองเบอร์ 42 นำตัวอย่างที่ได้ไปตรวจวัดปริมาณโลหะหนักด้วยเครื่อง ICP-OES

2.2.3 ปริมาณโลหะหนักที่สะสมในกบนา

ชั่งตัวอย่างเนื้อเยื่อของกบนา 1 กรัม ใส่ในบิกเกอร์ เติมกรดไนตริก 7 มิลลิลิตร และเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 1 มิลลิลิตร รอจนเกิดปฏิกิริยาสมบูรณ์ จากนั้นนำไปย่อยในอ่างควบคุมอุณหภูมิที่ 90±5 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง เมื่อครบเวลานำออกมาทิ้งให้เย็น และปรับปริมาตรเป็น 25 มิลลิลิตร ด้วยน้ำกลั่นปราศจากไอออน แล้วกรองด้วยกระดาษกรองเบอร์ 1 นำตัวอย่างไปตรวจวัดปริมาณโลหะหนักด้วยเครื่อง ICP-OES

2.3 การเตรียมโครโมโซมกบนา และการประเมินความผิดปกติของโครโมโซม

เตรียมโครโมโซมกบนาโดยวิธีทางตรงจากเซลล์ไขกระดูกขา ดังนี้ คือ ฉีดโคลซีซิน (colchicine) ความเข้มข้น 0.05 % เข้าบริเวณช่องท้องของกบนา ปริมาณ 1 มิลลิลิตรต่อน้ำหนักตัว 100 กรัม เป็นเวลา 6-8 ชั่วโมง เมื่อครบเวลานำกบนามาผ่าเพื่อนำส่วนของไขกระดูกขามาบดตัดให้ละเอียดในจานเพาะเชื้อ จากนั้นเติมสารละลายโพแทสเซียมคลอไรด์ 6-8 มิลลิลิตร บ่มที่อุณหภูมิห้องนาน 30 นาที เมื่อครบเวลานำไปปั่นเหวี่ยงที่ความเร็ว 2,000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 10 นาที จากนั้นดูดสารละลายส่วนใสทิ้ง แล้วเติมน้ำยาตรึงเซลล์ (ที่มีส่วนผสมของเมทานอล 3 ส่วนต่อกรดอะซิติก 1 ส่วน) 7 มิลลิลิตร นำไปหมุนเหวี่ยงที่ความเร็ว 2,000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 10 นาที และดูดสารละลายส่วนใสทิ้ง ทำซ้ำ 3-4 ครั้ง จนได้ตะกอนเซลล์สีขาว [10] จากนั้นหยดเซลล์บนแผ่นสไลด์ แล้วนำไปย้อมด้วยสีจิมซ่า (Giemsa stain) ความเข้มข้น 20 % pH 6.8 เป็นเวลา 30 นาที [11] นำแผ่นสไลด์ที่ย้อมสีแล้วมาตรวจสอบโครโมโซมภายใต้กล้องจุลทรรศน์แบบธรรมดา กำลังขยาย 100 เท่า และบันทึกภาพ ในการตรวจดูความผิดปกติเลือกเฉพาะเซลล์ที่อยู่ในระยะเมทาเฟสจำนวน 50 เซลล์ต่อกบนา 1 ตัว เพื่อนำมาศึกษาชนิด ขนาด ความผิดปกติของโครโมโซม และนับจำนวนความผิดปกติของโครโมโซมที่เกิดขึ้นทั้งหมด

3. ผลการศึกษาและวิจารณ์

3.1 การปนเปื้อนของโลหะหนักในน้ำ ดิน และสะสมในกบนา

3.1.1 ปริมาณโลหะหนักที่ปนเปื้อนในน้ำ

ผลการตรวจวัดปริมาณโลหะหนักที่ปนเปื้อนในแหล่งน้ำ 6 แหล่ง ดังตารางที่ 1 เมื่อเปรียบเทียบกับค่ามาตรฐานคุณภาพน้ำผิวดิน พบว่า As มีค่าอยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน Pb มีค่าเกินมาตรฐาน 3 แหล่ง Cd มีค่าเกินมาตรฐาน 3 แหล่ง Cr มีค่าเกินมาตรฐาน 1 แหล่ง Cu มีค่าเกินมาตรฐาน 3 แหล่ง Mn มีค่าเกินมาตรฐาน 3 แหล่ง Ni มีค่าเกินมาตรฐาน 2 แหล่ง และ Zn มีค่าเกินมาตรฐาน 2 แหล่ง นอกจากนี้ยังพบ Fe ซึ่งไม่มีการกำหนดค่ามาตรฐานการปนเปื้อนไว้ โดยแหล่งน้ำที่มีค่าโลหะหนักเกินมาตรฐาน พบว่าเป็นแหล่งน้ำที่อยู่ในพื้นที่ฝังกลบขยะอิเล็กทรอนิกส์ (จุดเก็บตัวอย่าง 2, 5 และ 6) ซึ่งได้รับผลกระทบโดยตรงจากน้ำชะมูลฝอย และพบ Mn ในน้ำจากนาข้าว (จุดเก็บตัวอย่าง 1) มีค่าเกินมาตรฐาน ซึ่งนาข้าวจุดนี้เป็นบริเวณที่อยู่ติดกับพื้นที่ฝังกลบ และพื้นที่ฝังกลบบริเวณนั้นเป็นที่เนินสูงกว่านาข้าว ทำให้มีการไหลของน้ำชะมูลฝอยลงสู่นาข้าว

3.1.2 ปริมาณโลหะหนักที่ปนเปื้อนในดิน

ผลการตรวจวัดปริมาณโลหะหนักที่ปนเปื้อนในดิน 23 จุด ดังตารางที่ 2 เมื่อเปรียบเทียบกับค่ามาตรฐานคุณภาพดินที่ใช้ประโยชน์เพื่อการอยู่อาศัยและเกษตรกรรม พบว่า Cd, Cr, Mn และ Ni มีค่าอยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน As มีค่าเกินมาตรฐาน 3 จุด

และ Pb มีค่าเกินมาตรฐาน 3 จุด นอกจากนี้ยังพบ Cu, Fe และ Zn ซึ่งไม่มีการกำหนดค่ามาตรฐานการปนเปื้อนไว้ โดยจุดที่มีค่าโลหะหนักเกินมาตรฐานพบว่าเป็นดินที่อยู่ในพื้นที่ฝังกลบ และดินในนาข้าวซึ่งเป็นจุดเดียวกันกับที่พบ Mn ในน้ำนาข้าวเกินค่ามาตรฐาน (จุดเก็บตัวอย่าง 6) จึงสอดคล้องว่านาข้าวในบริเวณนี้อาจได้รับผลกระทบโดยตรงจากน้ำชะมูลฝอย

ตารางที่ 1 ปริมาณโลหะหนักที่ปนเปื้อนในแหล่งน้ำบริเวณพื้นที่ฝังกลบขยะอิเล็กทรอนิกส์

จุดเก็บตัวอย่าง	ปริมาณโลหะหนักในแหล่งน้ำบริเวณพื้นที่ฝังกลบขยะอิเล็กทรอนิกส์ (มิลลิกรัมต่อลิตร)								
	As	Pb	Cd	Cr	Cu	Fe	Mn	Ni	Zn
จุดที่ 1	0.007	0.009	0.002	0.001	0.051	10.599	3.268*	0.018	0.272
จุดที่ 2	0.009	0.206*	0.040*	ND	0.647*	0.270	2.780*	0.335*	4.289*
จุดที่ 3	0.007	0.007	ND	0.004	0.063	0.276	0.567	0.015	0.264
จุดที่ 4	0.006	ND	ND	0.001	0.018	1.594	0.852	0.011	0.233
จุดที่ 5	0.008	0.183*	0.007*	ND	1.083*	0.420	0.211	0.054	0.543
จุดที่ 6	0.008	2.106*	0.179*	0.061*	69.759*	8.738	11.585*	1.394*	19.008*
ค่ามาตรฐาน [ก]	0.01	0.05	0.005,0.05	0.05	0.1	-	1.0	0.1	1.0

[ก] มาตรฐานคุณภาพน้ำในแหล่งน้ำผิวดินประเภทที่ 3 การใช้ประโยชน์เพื่อการอุปโภคบริโภค และเกษตรกรรม ตามพระราชบัญญัติส่งเสริมและรักษาคุณภาพสิ่งแวดล้อม พ.ศ. 2535 เรื่องกำหนดคุณภาพน้ำผิวดิน; * หมายถึง ปริมาณโลหะหนักที่พบมีค่าเกินมาตรฐาน; ND = Not detected (<LOD) ได้แก่ As = 0.006, Cd = 0.001, Cr = 0.001, Cu = 0.002, Fe = 0.002, Mn = 0.002, Ni = 0.001, Pb = 0.005 และ Zn = 0.001

3.1.3 ปริมาณโลหะหนักที่สะสมในกบนา

ผลการตรวจวัดปริมาณโลหะหนักที่สะสมในกบนา 5 ตัวอย่าง ดังตารางที่ 3 เมื่อเปรียบเทียบกับค่ามาตรฐานอาหารปนเปื้อน พบว่า As, Cd, Cr, Cu และ Zn มีค่าอยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน โดยพบ Pb มีค่าเกินมาตรฐาน นอกจากนี้ยังพบ Fe, Mn และ Ni ซึ่งไม่มีการกำหนดค่ามาตรฐานการปนเปื้อนไว้ ปริมาณโลหะหนักเหล่านี้แสดงให้เห็นว่ากบนาได้รับโลหะหนักที่ปนเปื้อนในสิ่งแวดล้อม ทั้งในน้ำและในดินบริเวณพื้นที่ฝังกลบขยะอิเล็กทรอนิกส์

จากการสำรวจพื้นที่ฝังกลบขยะอิเล็กทรอนิกส์ ตำบลโคกสะอาด อำเภอฆ้องชัย จังหวัดกาฬสินธุ์ พบว่ามีการทิ้งขยะแบบเทกองกลางแจ้ง และมีการเผาขยะ ส่งผลให้มีการรั่วไหลของโลหะหนักสู่สิ่งแวดล้อม สอดคล้องกับการตรวจวัดโดยสำนักงานสิ่งแวดล้อมภาคที่ 10 พบปริมาณโลหะหนักในดินบริเวณพื้นที่ฝังกลบขยะมีค่าเกินมาตรฐานที่กำหนด เช่น Pb 2,636 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม อีกทั้งยังพบการปนเปื้อนของ As, Cd, Cr, Cu, Mn, Ni และ Zn [12] สอดคล้องกับการศึกษาของ Guo และคณะ [13] ที่ได้ประเมินผลกระทบจากกิจกรรมรีไซเคิลขยะอิเล็กทรอนิกส์ที่ศูนย์กลางของภูมิภาค Guiyu เมือง Guangdong ประเทศจีน พบการปนเปื้อนของโลหะหนักในน้ำผิวดิน และตะกอนดินจากแม่น้ำ Lianjiang และ Luo และคณะ [14] พบการปนเปื้อนของโลหะหนักในดินบริเวณพื้นที่ที่มีกิจกรรมการเผาขยะ มีความ

ตารางที่ 2 ปริมาณโลหะหนักที่ปนเปื้อนในดินบริเวณพื้นที่ฝังกลบขยะอิเล็กทรอนิกส์

จุดเก็บตัวอย่าง	ปริมาณโลหะหนักในดินบริเวณพื้นที่ฝังกลบขยะอิเล็กทรอนิกส์ (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)								
	As	Pb	Cd	Cr	Cu	Fe	Mn	Ni	Zn
จุดที่ 1	1.235	6.931	0.371	17.711	18.197	3617.716	19.645	3.502	72.300
จุดที่ 2	1.018	21.025	0.793	24.760	85.744	6650.765	32.638	7.657	79.493
จุดที่ 3	1.574	17.735	0.905	23.413	55.138	saturated	65.048	6.941	73.189
จุดที่ 4	1.289	11.086	0.578	8.117	41.383	4656.635	30.910	3.038	85.181
จุดที่ 5	2.055	358.791	4.298	11.769	2623.067	4074.335	137.057	36.364	844.396
จุดที่ 6	4.177*	1306.590*	6.002	17.472	6431.005	3555.983	118.428	55.024	928.630
จุดที่ 7	0.741	10.267	0.563	14.228	12.380	3081.714	15.764	3.396	97.425
จุดที่ 8	1.001	6.046	0.496	17.128	8.576	3360.153	10.849	2.893	87.616
จุดที่ 9	1.419	5.722	0.640	17.974	7.690	4648.580	17.680	3.088	78.666
จุดที่ 10	1.135	5.801	0.645	15.033	5.801	3553.801	51.835	4.339	69.632
จุดที่ 11	0.868	4.992	0.524	10.667	5.698	2735.025	11.088	1.931	57.397
จุดที่ 12	1.273	5.309	0.694	16.769	6.252	4092.621	62.553	6.731	63.481
จุดที่ 13	1.246	3.321	0.372	10.666	5.804	3471.878	20.796	2.098	69.274
จุดที่ 14	1.486	4.960	0.591	19.212	16.150	5287.078	41.599	3.700	73.001
จุดที่ 15	1.284	4.837	0.513	16.301	24.382	3478.293	12.995	7.831	92.728
จุดที่ 16	1.295	3.825	0.391	11.396	7.840	3624.457	20.033	2.345	68.137
จุดที่ 17	1.409	3.213	0.415	14.979	3.459	3938.755	40.333	2.590	68.770
จุดที่ 18 ในพื้นที่ฝังกลบ	12.908*	6361.358*	16.557	35.755	saturated	saturated	223.649	57.854	2104.470
จุดที่ 19 ในพื้นที่ฝังกลบ	6.198*	7719.163*	14.206	34.224	saturated	5193.294	272.952	77.989	1566.709
จุดที่ 20 ในพื้นที่ฝังกลบ	1.076	168.990	0.649	13.940	828.638	3318.464	21.992	5.442	151.782
จุดที่ 21 ในพื้นที่ฝังกลบ	1.433	20.646	0.667	19.185	90.358	5406.120	35.258	4.011	74.959
จุดที่ 22 ในพื้นที่ฝังกลบ	1.342	98.152	0.886	12.445	325.886	3833.313	83.216	6.597	154.581
จุดที่ 23 ในพื้นที่ฝังกลบ	1.437	304.454	4.140	12.017	2428.436	3494.275	109.335	20.487	423.248
ค่ามาตรฐาน [ข]	≤3.9	≤400	≤37	≤300	-	-	≤1800	≤1600	-

[ข] มาตรฐานคุณภาพดินที่ใช้ประโยชน์เพื่อการอยู่อาศัยและเกษตรกรรม ตามพระราชบัญญัติส่งเสริมและรักษาคุณภาพสิ่งแวดล้อม พ.ศ. 2535 เรื่องกำหนดคุณภาพดิน; * หมายถึง ปริมาณโลหะหนักที่พบมีค่าเกินมาตรฐาน; ND = Not detected (<LOD) ได้แก่ As = 0.006, Cd = 0.001, Cr = 0.001, Cu = 0.002, Fe = 0.002, Mn = 0.002, Ni = 0.001, Pb = 0.005 และ Zn = 0.001

เข้มข้นของ Cd, Cu, Pb และ Zn สูงสุด ดินใกล้นาข้าวและพืชสวนพบ Cd และ Pb ค่อนข้างสูง และในเนื้อเยื่อผักที่บริโภคได้ส่วนมากพบ Cd และ Pb เกินค่าสูงสุดที่สามารถยอมรับได้ในอาหารของประเทศจีน โลหะหนักเหล่านี้สามารถถูกถ่ายทอดและสะสมในสิ่งมีชีวิต [15,16]

โลหะที่สะสมในกบนานั้นสามารถแบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม คือ กลุ่มที่จำเป็นต่อร่างกาย ได้แก่ Fe, Zn, Mn, Cu, Ni และ Cr ซึ่งเป็นองค์ประกอบสำคัญของโปรตีนและเอนไซม์หลายประเภท สิ่งมีชีวิตจำเป็นต้องบริโภคโลหะเหล่านี้ในสัดส่วนที่เพียงพอต่อร่างกาย และกลุ่มที่ไม่จำเป็นต่อร่างกาย ได้แก่ Pb, Cd

และ As นั้นไม่มีความจำเป็นต่อการดำรงชีพของสิ่งมีชีวิต [17] โลหะทั้งสองกลุ่มอาจก่อให้เกิดพิษต่อสิ่งมีชีวิตได้หากสะสมในปริมาณมากเกินความจำเป็น ความเป็นพิษของโลหะมักเกิดจากการที่โลหะไปยับยั้งการทำงานของโปรตีนและเอนไซม์สำคัญ หรือไปกระตุ้นให้เกิดอนุมูลอิสระภายในเซลล์ ซึ่งอนุมูลอิสระเหล่านี้จะมีฤทธิ์ทำลายสารอินทรีย์ที่เป็นโครงสร้างสำคัญของเซลล์ เช่น DNA หรือเยื่อหุ้มเซลล์ [18]

ตารางที่ 3 ปริมาณโลหะหนักที่สะสมในกบนาบริเวณพื้นที่ฝังกลบขยะอิเล็กทรอนิกส์

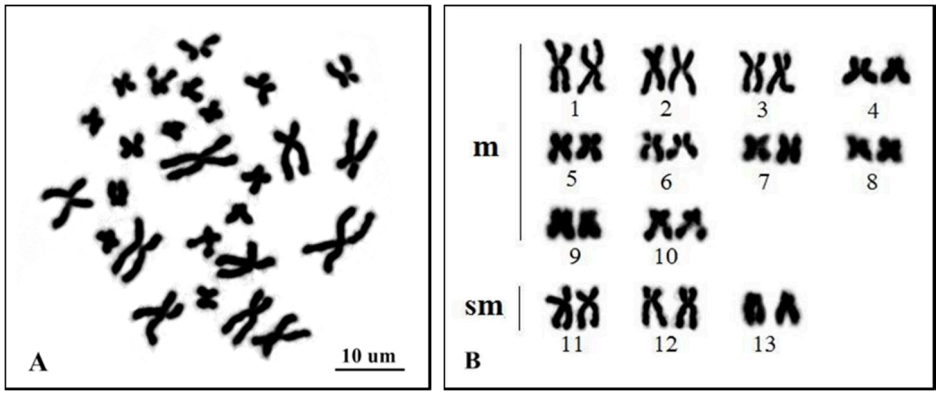
ตัวอย่างกบนา	ปริมาณโลหะหนักที่สะสมในกบนาบริเวณพื้นที่ฝังกลบขยะอิเล็กทรอนิกส์ (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)								
	As	Pb	Cd	Cr	Cu	Fe	Mn	Ni	Zn
กบ 1	ND	0.651	0.002	0.630	0.451	8.735	0.504	0.394	12.352
กบ 2	ND	1.527	0.020	1.322	0.383	6.079	1.031	1.828	24.662
กบ 3	0.055	3.006	ND	0.237	0.463	7.581	0.416	0.122	13.299
กบ 4	ND	0.859	0.006	1.115	0.528	15.719	0.989	1.527	25.361
กบ 5	ND	0.574	ND	0.643	0.318	25.459	1.042	0.214	11.503
ค่าเฉลี่ย	0.055	1.323*	0.009	0.789	0.429	12.715	0.796	0.817	17.435
มาตรฐาน [ค]	2	1	0.05	2	20	-	-	-	100

[ค] มาตรฐานอาหารปนเปื้อน ตามประกาศกระทรวงสาธารณสุข ฉบับที่ 98 พ.ศ. 2529; * หมายถึง ปริมาณโลหะหนักที่พบมีค่าเกินมาตรฐาน; ND = Not detected (<LOD) ได้แก่ As = 0.006, Cd = 0.001, Cr = 0.001, Cu = 0.002, Fe = 0.002, Mn = 0.002, Ni = 0.001, Pb = 0.005 และ Zn = 0.001

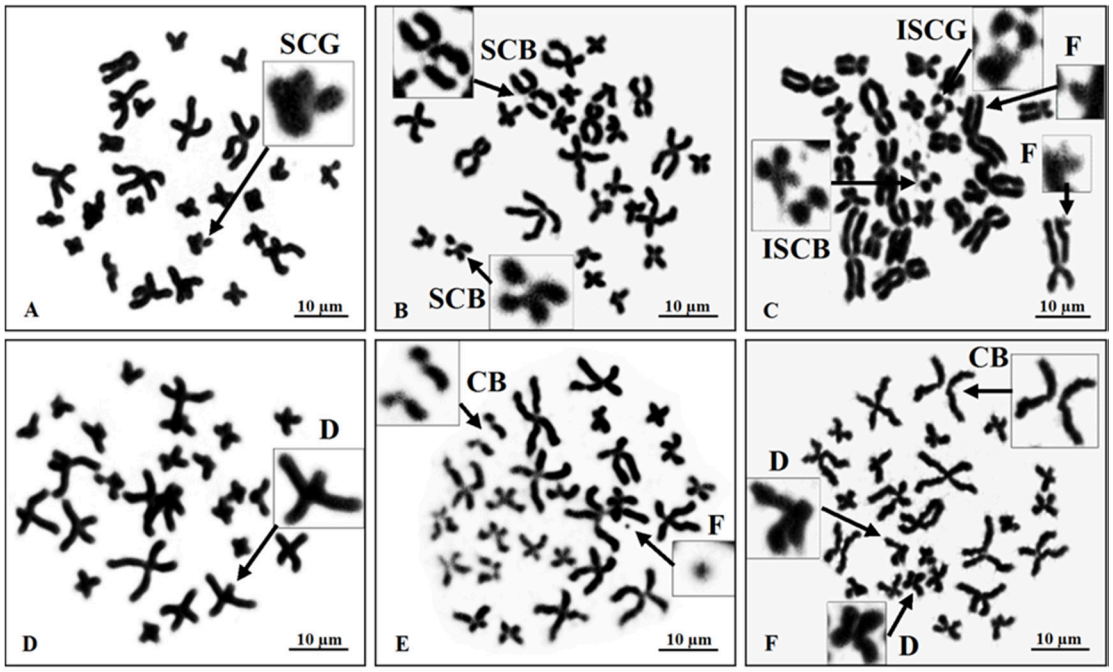
3.2 การประเมินความผิดปกติของโครโมโซมกบนา

ผลการศึกษาพันธุศาสตร์เซลล์ของโครโมโซมกบนา พบว่ากบนามีจำนวนโครโมโซมดิพลอยด์เท่ากับ 26 แท่ง ($2n = 26$) ประกอบด้วยโครโมโซม 2 ชนิด คือ โครโมโซมชนิดเมทาเซนทริก (metacentric chromosome, m) และซับเมทาเซนทริก (sub-metacentric chromosome, sm) โครโมโซมมี 2 ขนาด คือ โครโมโซมขนาดใหญ่ 5 คู่ ได้แก่ คู่ที่ 1, 2, 3, 11 และ 12 ประกอบด้วยโครโมโซมชนิดเมทาเซนทริก 3 คู่ และซับเมทาเซนทริก 2 คู่ และโครโมโซมขนาดเล็ก 8 คู่ ได้แก่ คู่ที่ 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10 และ 13 ประกอบด้วยโครโมโซมชนิดเมทาเซนทริก 7 คู่ และซับเมทาเซนทริก 1 คู่ (รูปที่ 2) สอดคล้องกับการศึกษาของ ธวัช [19]

การประเมินความผิดปกติของโครโมโซมกบนาจำนวน 5 ตัวอย่าง ในบริเวณพื้นที่ฝังกลบขยะอิเล็กทรอนิกส์ พบลักษณะความผิดปกติของโครโมโซมทั้งหมด 7 รูปแบบ คือ single chromatid gap (SCG), single chromatid break (SCB), isochromatid gap (ISCG), isochromatid break (ISCB), deletion (D), fragmentation (F) และ centromere break (CB) (รูปที่ 3) จำนวนความผิดปกติของแต่ละรูปแบบ เท่ากับ 51, 20, 26, 7, 25, 28 และ 21 ตำแหน่ง ตามลำดับ โดยรูปแบบความผิดปกติที่พบมากที่สุด คือ SCG มีจำนวนเซลล์ที่มีความผิดปกติของโครโมโซมทั้งหมด 97 เซลล์ คิดเป็นร้อยละ 38.8 ของจำนวนเซลล์ที่ศึกษาทั้งหมด (ตารางที่ 4)



รูปที่ 2 โครโมโซมกบนาระยะเมทาเฟสและคาริโอไทป์ (2*n* = 26)



รูปที่ 3 ลักษณะความผิดปกติของโครโมโซมแบบ single chromatid gap (SCG), single chromatid break (SCB), isochromatid gap (ISCG), isochromatid break (ISCB), deletion (D), fragmentation (F) และ centromere break (CB)

ความผิดปกติของโครโมโซมกบนาที่อาศัยอยู่ในบริเวณพื้นที่ฝังกลบขยะอิเล็กทรอนิกส์ แสดงให้เห็นถึงความเป็นพิษของโลหะหนักที่มีการสะสมในร่างกาย โดยเฉพาะตะกั่วที่พบเกินค่ามาตรฐานในกบนา ความเป็นพิษของตะกั่วมีผลรบกวนกิจกรรมของเอนไซม์ในร่างกาย ซึ่งอาจส่งผลต่อการจำลองตัวเอง การแปลรหัส และการซ่อมแซมตัวเองของสารพันธุกรรม ก่อให้เกิดการกลายพันธุ์หรือการแตกหักของโครโมโซม [20] สอดคล้องกับการศึกษาของ Cestari และคณะ [21] พบว่าตะกั่วก่อให้เกิดความ

เสียหายของดีเอ็นเอและเกิดความผิดปกติของโครโมโซมในปลา (*H. malabaricus*) นอกจากนี้การศึกษาในสภาวะการทดลองยังพบว่าสารหนูก่อให้เกิดความผิดปกติของโครโมโซมปลานิล [22] สอดคล้องกับการศึกษาของ Suttichiya และคณะ [23] พบว่ากบนา (*H. rugulosus*) และ Intamat และคณะ [24] พบว่ากบหนอง (*Fejervarya limnocharis*) ที่ได้รับสารหนูจากการปนเปื้อนบริเวณเหมืองแร่ทองคำมีความผิดปกติของโครโมโซม และโครเมียมยังมีสมบัติเป็นสารก่อมะเร็ง สามารถทำให้ดีเอ็นเอของสิ่งมีชีวิตเสียหายได้ [25] ในสภาวะสิ่งแวดล้อมที่มีการปนเปื้อนของน้ำชะมูลฝอย สิ่งมีชีวิตมักจะได้รับสารพิษเข้าสู่ร่างกายมากกว่าหนึ่งชนิด ซึ่งสารพิษชนิดหนึ่งอาจมีผลต่อการเกิดพิษของสารพิษอีกชนิดหนึ่งได้ เช่น การตอบสนองแบบรวมของการออกฤทธิ์ การตอบสนองแบบเสริมฤทธิ์ และการตอบสนองแบบต้านฤทธิ์ ฯลฯ อาจทำให้ความรุนแรงของพิษนั้นเพิ่มมากขึ้นได้ [26] สอดคล้องกับการศึกษาของ พิมลพร และคณะ [27] ประเมินความผิดปกติของโครโมโซมปลาช่อน (*Channa striata*) ในแหล่งน้ำที่ได้รับผลกระทบจากน้ำชะมูลฝอยบริเวณพื้นที่ฝังกลบมูลฝอย พบว่าร้อยละการแตกหักของโครโมโซมต่อเซลล์มากกว่าปลาช่อนในแหล่งน้ำที่ไม่ได้รับผลกระทบ มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$) นอกจากนี้ Phoonaploy และคณะ [28] พบว่ากบหนองในพื้นที่ที่ได้รับผลกระทบจากน้ำชะมูลฝอยมีความผิดปกติของโครโมโซมมากกว่ากบหนองในพื้นที่ที่ไม่ได้รับผลกระทบ มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) จากการศึกษาเหล่านี้แสดงให้เห็นว่าโลหะหนักที่ปนเปื้อนในสิ่งแวดล้อม สามารถส่งผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิตที่อาศัยอยู่ในบริเวณนั้นได้ อีกทั้งกบนายังเป็นอาหารของมนุษย์ ดังนั้นการบริโภคกบนาจะทำให้โลหะหนักถูกถ่ายทอดเข้าสู่มนุษย์ตามห่วงโซ่อาหารได้

ตารางที่ 4 ความผิดปกติของโครโมโซมกบนาบริเวณพื้นที่ฝังกลบขยะอิเล็กทรอนิกส์

กบนา (*H. rugulosus*) (ตัวที่)	จำนวนความผิดปกติของโครโมโซม (ตำแหน่ง)							จำนวนความผิดปกติของโครโมโซมทั้งหมด (ตำแหน่ง)	จำนวนเซลล์ที่พบความผิดปกติ (เซลล์)	ร้อยละของเซลล์ที่มีความผิดปกติของโครโมโซม
	SCG	SCB	ISCG	ISCB	D	F	CB			
1	10	4	2	2	4	2	9	33	19	38.0
2	13	4	6	2	3	4	4	36	19	38.0
3	6	2	1	0	9	7	2	27	20	40.0
4	14	5	2	1	4	6	2	34	22	44.0
5	8	5	6	2	5	9	4	39	17	34.0
รวม	51	20	26	7	25	28	21	169	97	38.8

4. สรุปผลการศึกษา

การศึกษานี้แสดงให้เห็นผลกระทบของพื้นที่ฝังกลบขยะอิเล็กทรอนิกส์ที่มีการจัดการอย่างไม่ถูกต้องตามหลักวิชาการ ก่อให้เกิดการรั่วไหลของโลหะหนักสู่สิ่งแวดล้อม ส่งผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิตที่อาศัยอยู่ในบริเวณนั้น กบนาเป็นสิ่งมีชีวิตที่มีความอ่อนไหวต่อสิ่งแวดล้อมที่ปนเปื้อนสารพิษ แสดงให้เห็นถึงการได้รับโลหะหนักและการสะสมจนก่อให้เกิดความผิดปกติของโครโมโซม ซึ่งมีความสำคัญต่อการถ่ายทอดลักษณะพันธุกรรมของสิ่งมีชีวิต อีกทั้งกบนายังเป็นอาหารของ

มนุษย์ ดังนั้นการบริโภคกบนาจะทำให้โลหะหนักถูกถ่ายทอดเข้าสู่มนุษย์ตามห่วงโซ่อาหารได้ การศึกษาต่อไปควรมีการศึกษาความเป็นพิษของโลหะหนักระดับดีเอ็นเอในกบนา รวมถึงผลกระทบของโลหะหนักต่อสิ่งมีชีวิตชนิดอื่นที่อาศัยอยู่ในบริเวณพื้นที่ฝังกลบขยะอิเล็กทรอนิกส์

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ ทุนวิจัยสำหรับคณาจารย์บัณฑิตศึกษา ประจำปีการศึกษา 2559 และศูนย์วิจัยด้านการจัดการสิ่งแวดล้อมและสารอันตราย มหาวิทยาลัยขอนแก่น ที่ให้การสนับสนุนทุนวิจัย

6. รายการอ้างอิง

[1] โมกข์ ตันติปาลกุล, 2559, สภาพการณ์ในการจัดการขยะอิเล็กทรอนิกส์ของภาครัฐและประชาชนในเขตกรุงเทพมหานคร, ว.ระบบสารสนเทศด้านธุรกิจ 2: 16-24.

[2] กรมควบคุมมลพิษ กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม, รายงานสถานการณ์มลพิษของประเทศไทยปี 2557, แหล่งที่มา : http://www.pcd.go.th/public/News/Files/Draft580318-1.pdf, 1 กุมภาพันธ์ 2560.

[3] อรวรรณ พู่พิสุทธิ์ และศุลีพร แสงกระจ่าง, 2553, ความเป็นพิษของขยะอิเล็กทรอนิกส์, ว.พิษวิทยาไทย 25: 67-76.

[4] เพ็ญโฉม แซ่ตั้ง, สุกรานต์ โรจนไพรวงศ์, วลัยพร มุขสุวรรณ และสุภาวดี ประทุมชาติ, 2552, รายงานการศึกษาเชิงปฏิบัติการเบื้องต้นเพื่อศึกษาผลกระทบและแสวงหาแนวทางการจัดการขยะอย่างมีส่วนร่วม กรณีตำบลโคกสะอาด อำเภอฆ้องชัย จังหวัดกาฬสินธุ์, มูลนิธิเอเชีย (ประเทศไทย), กรุงเทพฯ, 132 น.

[5] Ha, N.N., Agusa, T., Ramu, K., Tu, N.P.C., Murata, S., Bulbule, K.A., Parthasaraty, P., Takahashi, S., Subramanian, A. and Tanabe, S., 2009, Contamination by trace elements at e-waste recycling sites in Bangalore, India, Chemosphere 76: 9-15.

[6] An, Y., Gao, Z., Wang, Z., Yang, S., Liang, J., Feng, Y., Kato, K., Nakano, M., Okada, S. and Yamanaka, K., 2004, Immunohisto-chemical analysis of oxidative DNA damage in arsenic related human skin sample from arsenic contaminated area of Chaina, Cancer Lett. 214: 11-18.

[7] Patra, M., Bhowmik, N., Bandopadhyay, B. and Sharma, A., 2004, Comparison of mercury, lead and arsenic with respect to genotoxic effects on plant systems and the development of genetic tolerance, Environ. Exp. Bot. 52: 199-223.

[8] วิโรจน์ นุตพันธ์, 2544, สัตว์สะเทินน้ำสะเทินบกในประเทศไทย, สำนักพิมพ์บ้านและสวน, กรุงเทพฯ, 192 น.

[9] Ideriah, T.J.K., Harry, F.O., Stanley, H.O. and Igbara, J.K., 2010, Heavy metal contamination of soils and vegetation around solid waste dumps in Port Harcourt, Nigeria, J. Appl. Sci. Environ. Manage. 14: 101-109.

[10] อมรา คัมภิรานนท์, 2546, พันธุศาสตร์เซลล์, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ, 308 น.

[11] Rooney, D.E., 2001, Human Cytogenetics: Constitutional Analysis: A Practical Approach, Oxford University Press, London, 282 p.

[12] สุจิตรา วาสนาดารงดี, 2558, สถานการณ์ปัญหาขยะอิเล็กทรอนิกส์, เอกสารประกอบการเสวนาวิชาการ เรื่อง ขยะอิเล็กทรอนิกส์ : จัดการอย่างไรให้ปลอดภัย, สถาบันวิจัยสภาวะแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ, 18 น.

[13] Guo, Y., Huang, C., Zhang, H. and Dong, Q., 2009, Heavy metal contamination from electronic waste recycling at Guiyu, Southeastern China, J. Environ. Qual. 38: 1617-1626.

[14] Luo, C., Liu, C., Wang, Y., Liu, X., Li, F., Zhang, G. and Li, X., 2011, Heavy metal contamination in soils and vegetables near an e-waste processing site, South China, J. Hazard. Mater. 186: 481-490.

[15] ปิยมาภรณ์ ดวงมนตรี, 2545, การสะสมโลหะหนักในสิ่งมีชีวิตผ่านลำดับขั้นการบริโภคในแหล่งน้ำ, วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยขอนแก่น, ขอนแก่น, 97 น.

[16] Salem, B.Z., Capelli, N., Ayadi, H. and Aleya, L., 2014, Seasonal variation of heavy metal in water, sediment and roach tissue in a landfill draining system pond, Ecol. Eng. 69: 25-37.

[17] Maret, W., 2016, The metals in the biological periodic system of the elements: Concepts and conjectures, Int. J. Mol. Sci. 17: 66-74.

[18] เมธา มีแต้ม, 2554, กลไกระดับเซลล์ในการลดพิษจากโลหะ, แหล่งที่มา : http://www.etm.sc.mahidol.ac.th/a18.shtml, 1 กุมภาพันธ์ 2560.

[19] ธวัช ดอนสกุล, 2550, คาริโอไทป์ของเซลล์ตับในสัตว์สะเทินน้ำสะเทินบก 7 ชนิดที่พบในประเทศไทย, รายงานการวิจัย, มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ, กรุงเทพฯ, 84 น.

[20] Goyer, R.A. and Moore, J.F., 1974 Cellular effects of lead, Adv. Exp. Med. Biol. 48: 447-462.

[21] Cestari, M.M., Lemos, P.M.M., Ribeiro, C.A.D., Costa, J., Pelletier, E., Ferraro, M.V.M., Mantovani, M.S. and Fenocchio, A.S., 2004, Genetic damage induced by trophic doses of lead in the neotropical fish *Hoplias malabaricus* (Characiformes, Erythrinidae) as revealed by the comet assay and chromosomal aberrations, Genet. Mol. Biol. 27: 270-274.

[22] สมศักดิ์ อินทมาต, 2559, การสะสมสารพิษของสารหนูที่มีต่อเซลล์สัตว์น้ำบริเวณรอบเหมืองแร่ทองคำ, วิทยานิพนธ์ปริญญาเอก, มหาวิทยาลัยขอนแก่น, ขอนแก่น, 117 น.

[23] Suttichiya, A., Khammanichanh, A., Patawang, I., Sriuttha, M., Tanamtong, A. and Neeratanaphan, L., 2016, Chromosome aberrations of east asian bullfrog *(Hoplobatrachus rugulosus)* around a gold mine area with arsenic contamination, Environ. Asia 9: 60-69.

[24] Intamat, S., Phoonaploy, U., Sriuttha, M., Patawang, I., Tanomtong, A. and Neeratanaphan, L., 2016, Cytotoxic evaluation of rice field frogs (*Fejervarya limnocharis*) from gold mine area with arsenic contamination, Nucleus 59: 181-189.

[25] Irwin, R.J., 1997, Environmental Contaminants Encyclopedia Chromium VI

(Hexavalent Chromium) Entry, National Park Service, Colorado, 43 p.

[26] ฐิติยา แซ่ปัง, 2551, พิษวิทยาสิ่งแวดล้อม, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ, 188 น.

[27] พิมลพร พรมสิทธิ์, ลำใย ณีรัตนพันธุ์ และอลงกลด แทนออมทอง, 2557, การประเมินความผิดปกติของโครโมโซมปลาช่อน (*Channa striata*) ในแหล่งน้ำที่ได้รับผลกระทบจากน้ำชะมูลฝอย, ว.วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยมหาสารคาม 10(ฉบับพิเศษ): 692-699.

[28] Phoonaploy, U., Intamat, S., Tengjaroenkul, B., Sriuttha, M., Tanamtong, A. and Neeratanaphan, L., 2016, Evaluation of abnormal chromosomes in rice field frogs (*Fejervarya limnocharis*) from reservoirs affected by leachate with cadmium, chromium and lead contamination, Environ. Asia 9: 26-38.