



การปนเปื้อนของตะกั่ว โครเมียม ทองแดง และสังกะสี ในตะกอนดินคลองปากบาง และพื้นที่รองรับน้ำทิ้ง ตำบลป่าตอง จังหวัดภูเก็ต

The Contamination of Lead, Chromium, Copper and Zinc in Sediment at Pak Bang Cannel and Catchment Area, Patong dDistrict, Phuket Province

ธงชัย สุธีรศักดิ์, เพ็ญศิริ เอกจิตต์, กนกพร เมืองมูล, นุรฮัสมีนา สาล่าห์ และ อนัญญา ละไม

Thongchai Suteerasak^{*}, Pensiri AkkaJit, Kanokporn Muangmool, Nurasmeena Salaeh and Anunya Lamai

คณะเทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตภูเก็ต

Faculty of Technology and Environment, Prince of Songkla University, Phuket Campus

Received : 24 December 2019

Revised : 3 April 2020

Accepted : 15 April 2020

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินการปนเปื้อนของตะกั่ว โครเมียม ทองแดง และสังกะสี ในตะกอนดินของคลองปากบางและพื้นที่รองรับน้ำทิ้งคลองปากบางที่เชื่อมต่อกับหาดป่าตอง จังหวัดภูเก็ต ตัวอย่างตะกอนดินถูกเก็บขึ้นมา 3 จุดเก็บตัวอย่างตามแนวคลองปากบาง และ 11 จุดเก็บตัวอย่างในพื้นที่รองรับน้ำทิ้งคลองปากบาง ส่วนการเตรียมตัวอย่างและการวิเคราะห์ผลปริมาณโลหะหนักอาศัยวิธีการวิเคราะห์ทางธรณีเคมี การประเมินผลการปนเปื้อนของโลหะหนักทั้ง 4 พิจารณาจากปริมาณโลหะหนักที่สะสมอยู่ในตะกอนดินเปรียบเทียบกับเกณฑ์คุณภาพตะกอนดิน (SQGs) และใช้ตัวชี้วัดคุณภาพตะกอนดินเพิ่มเติม 6 ชนิด ได้แก่ ดัชนีการสะสมทางภูมิศาสตร์ (I_{geo}), ค่าเฉลี่ยปัจจัยการเสริม (EF), ปัจจัยการปนเปื้อนเฉลี่ย (CF), ดัชนีการสะสมพิษ (PLI), ดัชนีความเสี่ยงทางนิเวศวิทยาแฝงเร้น (RI) และดัชนีมลพิษของตะกอนดิน (SPI) มาประเมินผลการปนเปื้อนในสิ่งแวดล้อม ผลที่ได้พบว่ามีปริมาณทองแดงและสังกะสีที่สะสมอยู่ในตะกอนดินจากคลองปากบางในช่วงต้นและกลางคลองที่เกินเกณฑ์คุณภาพตะกอนดิน (SQGs) นอกจากนี้ผลจากตัวชี้วัดอื่นสะท้อนให้เห็นถึงการปนเปื้อนระดับปานกลางของโลหะหนักทั้งสองด้วยเช่นกัน ทั้งนี้ไม่พบการปนเปื้อนของโลหะหนักทั้ง 4 ชนิดในพื้นที่รองรับน้ำทิ้ง อย่างไรก็ตามผลจากการวิเคราะห์ทางสถิติแสดงให้เห็นถึงความเกี่ยวพันกันของโลหะหนักทั้ง 4 ชนิดด้วยนัยสำคัญที่อาจเกี่ยวพันกันแบบผกผันกับปัจจัยที่มาจากกิจกรรมต่างๆของมนุษย์ในพื้นที่

คำสำคัญ : การประเมินโลหะหนัก ; ตะกอนดิน ; การปนเปื้อน ; คลองปากบาง ; จังหวัดภูเก็ต

*Corresponding author. Email : thongchai.s@phuket.psu.ac.th



Abstract

The objective of this research is to assess the contamination of lead (Pb), chromium (Cr), copper (Cu) and zinc (Zn) in the sediments of Pak Bang canal and at the drainage areas of Pak Bang canal which connected to Patong Beach, Phuket province. Sediment samples were collected at 3 sampling points along the Pak Bang canal and 11 sampling points along the Pak Bang canal. Sample preparation and heavy metal analysis were determined according to geochemistry methods. The contamination of the four heavy metals was evaluated based on the amount of heavy metals accumulated in the sediment as compared to the sediment quality criteria (SQGs) and using other 6 sediment quality indicators included geoaccumulation index (I_{geo}), enrichment factor (EF), contamination Factor (CF), pollution load index (PLI), potential ecological risk index (RI) and sediment Pollution Index (SPI) to determine the environmental pollution. The results showed that Cu and Zn concentrations of the sediments at the upstream and middle stream of Pak Bang canal exceed the SQGs level. Other sediment quality indicators reflected the intermediate level of metal contamination, however, no contamination of all 4 heavy metals was found in the drainage area. Statistically significant relationship among the four heavy metals may be inversely related to factors from various human activities in the area.

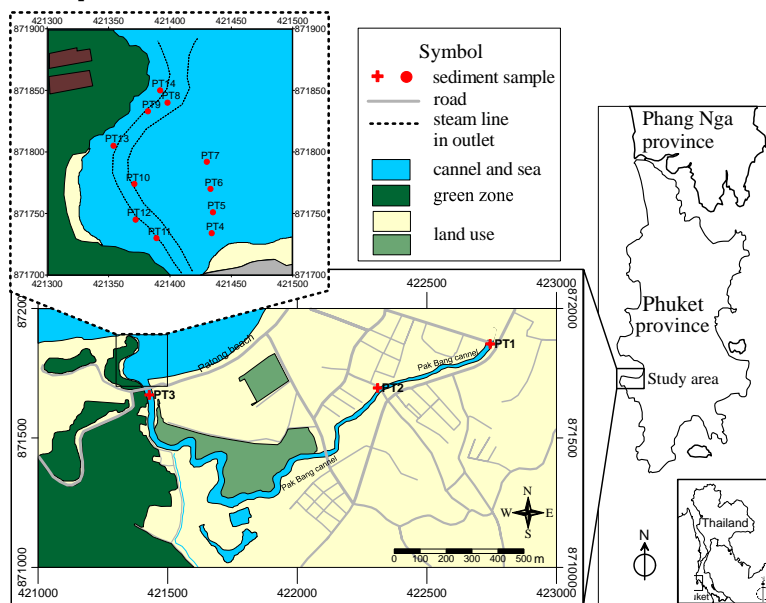
Keyword : heavy metal assessment ; sediment ; contamination ; Pragma canal ; Phuket province

บทนำ

ปัจจุบันปัญหาการปนเปื้อนของโลหะหนักในสิ่งแวดล้อมเป็นสิ่งที่สามารถพบได้ในธรรมชาติ โดยต้นกำเนิดของโลหะหนักดังกล่าวมาจากการผุพังย่อยสลายของวัสดุต่างๆทางธรรมชาติและมาจากการปล่อยของเสียหรือสิ่งปฏิกูลต่างๆที่มาจากกิจกรรมต่างๆของมนุษย์ อย่างไรก็ตามปัญหาที่พบในปัจจุบันที่เกี่ยวข้องกับการปนเปื้อนของโลหะหนักในธรรมชาติส่วนมากมีที่มาจากกิจกรรมต่างๆของมนุษย์ทั้งสิ้น โลหะหนักที่มาจากกิจกรรมต่างๆของมนุษย์มีอยู่มากมาย แต่โลหะหนักที่ส่งผลกระทบต่อสุขภาพการดำรงชีวิตของมนุษย์อย่างเด่นชัด ได้แก่ สารหนู (As) ตะกั่ว (Pb) โครเมียม (Cr) ทองแดง (Cu) นิกเกิล (Ni) สังกะสี (Zn) แคดเมียม (Cd) และดีบุก (Sn) เป็นต้น ปัจจุบันมีหลายงานวิจัยที่ศึกษาและประเมินการปนเปื้อนของโลหะหนักในสิ่งแวดล้อม เช่นงานวิจัยของ Ikenaka *et al.* (2010), Adekoya *et al.* (2006), Duncan *et al.* (2018), Salah *et al.* (2012) และ Musika *et al.* (2013) เป็นต้น ตัวอย่างงานวิจัยการตรวจหาการปนเปื้อนของโลหะหนักในในพื้นที่ต่างๆของประเทศไทย เช่นงานของ Srithawirat & Thananoppakul (2016) พบการปนเปื้อนโลหะหนักในดินอุทยานแห่งชาติภูหินร่องกล้าโดยดินที่อยู่ในพื้นที่ที่ติดถนนมีปริมาณโลหะหนักมากกว่าดินในพื้นที่ห่างจากถนน มีค่าเฉลี่ยของ Fe, Cu, Cd และ Zn อยู่ในช่วง 74,957-76,350 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม 195-446 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม 27-35 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม และ 1,186-2,450 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ งานของ Meesuk (1999) พบความเข้มข้น Pb, Zn, Hg, Cd และ As สูงในตะกอนดินจากทะเลสาบสงขลาบริเวณใกล้ปากคลองคูตะเกา งานวิจัยของ Buajan & Pumijumng (2010) พบปริมาณโลหะหนัก Zn > Pb > Cu > Cd ในตะกอนดินป่าชายเลนที่ป่าชายเลน อำเภอบางหญ้าแพรก ปากแม่น้ำท่าจีน จังหวัดสมุทรสาคร รวมถึงงานของ Rermdumri *et al.* (2009) พบปริมาณโลหะหนักในน้ำและตะกอนดินบริเวณชายฝั่งทะเลของอ่าวไทยตอนบนที่ทะเลจังหวัดเพชรบุรี สมุทรสงคราม สมุทรสาคร สมุทรปราการ ชลบุรี ระยอง จันทบุรี จนถึงจังหวัดตราด เรียงลำดับจากมากไปน้อย คือ ทองแดง สังกะสี ตะกั่ว และ

แคดเมียม และส่วนงานวิจัยที่เกี่ยวกับการประเมินการปนเปื้อนโลหะหนักในตะกอนดินของพื้นที่จังหวัดภูเก็ต เช่นงานของ Suteerasak & Bhongsuwan (2008) ที่พบต้นเหตุของการปนเปื้อนโลหะหนัก ดีบุก ตะกั่ว และสังกะสี ในคลองบางใหญ่ มาจากกิจกรรมเหมืองแร่ดีบุกในอดีต ซึ่งหลังจากเวลาผ่านไปประมาณ 10 ปี ยังคงพบการปนเปื้อนของ ตะกั่วและสังกะสี ในตะกอนดินท้องน้ำคลองบางใหญ่เช่นเดิม แต่มีปริมาณโลหะหนักดังกล่าวลดลงดังที่พบในงานวิจัยของ Suteerasak *et al.* (2019) ซึ่งความเข้มข้นของโลหะหนักดังกล่าวมีการลดปริมาณการสะสมตัวลงตามเวลา ดังที่พบได้จากการแนวโน้ม การลดลงของความเข้มข้นโลหะหนักดังกล่าวในพื้นที่รองรับน้ำทั้งคลองบางใหญ่จากอดีตจนถึงปัจจุบัน (Suteerasak & Akkajit, 2018)

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์หลัก 2 ประเด็น ประเด็นแรกเป็นการวิเคราะห์ปริมาณตะกั่ว โครเมียม ทองแดง และสังกะสี ที่สะสมอยู่ในตะกอนดินท้องน้ำคลองปากบางและพื้นที่รองรับน้ำทั้งคลองปากบาง ตำบลป่าตอง จังหวัดภูเก็ต ประเด็นที่สองเป็นการประเมินการปนเปื้อนของโลหะหนักทั้ง 4 ชนิดในตะกอนดินของพื้นที่ศึกษา ด้วยตัวชี้วัดการปนเปื้อนสากล ได้แก่ เกณฑ์คุณภาพตะกอนดิน (SQGs) ค่าดัชนีการสะสมตัวของโลหะหนักในตะกอนดิน (EF) ค่าดัชนีการสะสมตัวทางธรณี (I_{geo}) ปัจจัยการปนเปื้อน (CF) ดัชนีการระดมพิษ (PLI) และค่าดัชนีความเสี่ยงนิเวศแฝงเร้น (RI) ดัชนีมลพิษของตะกอนดิน (SPI) เพื่อให้ทราบถึงระดับการปนเปื้อนของโลหะหนักในพื้นที่ที่ศึกษาว่ามีการปนเปื้อนหรือไม่ มากน้อยเพียงใด ซึ่งผลที่ได้จะนำไปสู่การจัดการและวางมาตรการป้องกันผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมในอนาคตต่อไป



ภาพที่ 1 พื้นที่ศึกษคลองปากบางและพื้นที่รองรับน้ำทั้ง ในตำบลป่าตอง จังหวัดภูเก็ต

วิธีดำเนินการวิจัย

1. พื้นที่ศึกษา

คลองปากบางตั้งอยู่ในพื้นที่ทางตอนใต้ของเขตเทศบาลตำบลป่าตอง โดยตัวลำคลองเป็นส่วนหนึ่งของลุ่มน้ำป่าตอง มีความยาวประมาณ 2,002 เมตร และมีความลึกเฉลี่ยประมาณ 6 เมตร ดังแสดงในภาพที่ 1 ลักษณะของคลองปากบาง ในช่วงต้นและกลางของลำคลองได้ถูกปรับสภาพของสองฝั่งคลองด้วยคอนกรีต มีความกว้างคลองต้นน้ำโดยเฉลี่ย 4 เมตร ปลายน้ำกว้างเฉลี่ย 2 เมตร ในส่วนของพื้นที่ท้ายคลองมีลักษณะเป็นแนวท่อน้ำธรรมชาติทอดตัวคดเคี้ยวตามสภาพพื้นที่ ซึ่งผลจากการไหลของน้ำตามลักษณะภูมิประเทศของภูเก็ต กล่าวคือ มีน้ำไหลระบายลงมาจากภูเขาและมาสะสมอยู่ในที่

ลุ่มต่ำ ซึ่งอยู่ระหว่างที่ราบตอนใต้กับหาดทราย จากนั้นจึงไหลระบายลงสู่อ่าวป่าตองบริเวณคลองปากบาง ทั้งนี้เดิมทีเส้นทางของลำคลองปากบางทอดตัวโดยรอบอ่าวป่าตอง โดยเริ่มจากน้ำตกวังซ้ออันไหลมารวมกันที่คลองสาขาก่อนรวมกันเป็นคลองปากบางและไหลสู่ปากอ่าวทอดยาวมาทางทิศตะวันออกและทิศใต้ จากนั้นลำคลองเกิดการเปลี่ยนทิศทางการไหลไปทางทิศตะวันตกเฉียงเหนือและสิ้นสุดลำคลองที่พื้นที่ปากคลองบริเวณจุดสิ้นสุดของหาดป่าตอง อย่างไรก็ตาม ผลจากการขยายตัวของพื้นที่เมืองและการปรับสภาพพื้นที่ของเมืองป่าตองส่งผลให้ต้นคลองปากบางที่พบเห็นเป็นลักษณะของจุดที่รองรับน้ำที่ระบายมาจากพื้นที่เมืองทางตอนน้ำขึ้นและน้ำจากพื้นผิวดิน ซึ่งน้ำที่มาทางตอนน้ำขึ้นบางส่วนได้มีการบำบัดคุณภาพน้ำเป็นที่เรียบร้อยแล้ว

2. วิธีการเตรียมตัวอย่างและการวิเคราะห์

พื้นที่สำหรับเก็บตัวอย่างตะกอนดินในพื้นที่ศึกษาแบ่งออกเป็น 2 พื้นที่ คือ ในคลองปากบางและพื้นที่รองรับน้ำที่คลองปาก พื้นที่แรกที่เก็บตัวอย่างเป็นการเก็บตะกอนดินที่ก้นน้ำในคลองปากบาง 3 จุดเก็บตัวอย่าง ส่วนพื้นที่ที่สองเป็นการเก็บตัวอย่างตะกอนดินพื้นที่รองรับน้ำที่คลองปากบาง 11 จุดเก็บตัวอย่าง ดังแสดงจุดเก็บตัวอย่างทั้งหมดในภาพที่ 1 ในแต่ละจุดเก็บตัวอย่างเก็บตะกอนดินด้วยเครื่องเก็บตะกอนแบบ Petersen Grap Sample พร้อมกับการเก็บพิกัดตำแหน่งด้วยเครื่อง GPS (Garmin รุ่น etrex) การเก็บตัวอย่างตะกอนดินเก็บในช่วงปลายเดือนมีนาคม 2562 แต่ละจุดเก็บตัวอย่างเก็บตะกอนดินขึ้นมา 3 ครั้ง ที่พื้นผิวที่ก้นน้ำจนถึงความลึกประมาณ 10 เซนติเมตร (Suteerasak *et al.*, 2019) และท้ายสุดเก็บตัวอย่างตะกอนดินทั้งหมดแช่ในถังน้ำแข็งก่อนนำไปนำไปเตรียมตัวอย่างในลำดับถัดไป ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างเริ่มจากนำตะกอนดินที่เก็บได้มาอบไล่ความชื้นด้วยอุณหภูมิประมาณ 60-80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 48 ชั่วโมง จากนั้นนำตัวอย่างตะกอนดินที่อบแล้วเข้าไปเก็บในตู้ดูดความชื้นเป็นเวลา 24 ชั่วโมง นำตัวอย่างตะกอนดินมาคัดแยกขนาดด้วยตะแกรงร่อนแยกขนาด 150 ไมครอน ซึ่งในงานวิจัยนี้ใช้เฉพาะตะกอนดินที่มีขนาดอนุภาคเล็กกว่า 150 ไมครอน การวิเคราะห์โลหะหนักด้วยวิธีการทางธรณีเคมี (Suteerasak, 2017) เริ่มต้นจากการนำตะกอนดินตัวอย่างที่ปราศจากความชื้น 0.2 กรัม ใส่ในภาชนะที่ใช้ได้กับไมโครเวฟที่สะอาดและแห้ง จากนั้นนำมาย่อยให้เป็นสารละลายด้วยวิธีการ aqua regia ที่เป็นการละลายตัวอย่างตะกอนดินด้วยสารละลายผสมของกรด โดยเติมสาร H_2SO_4 จำนวน 4 มิลลิลิตร (96%) และ H_3PO_4 จำนวน 3 มิลลิลิตร (85%) ลงไป (Potts *et al.*, 1992) ทั้งนี้กระบวนการย่อยตะกอนให้เป็นสารละลายดังกล่าวต้องอาศัยความร้อนจากเครื่องไมโครเวฟ (microwave) โดยตั้งค่าอุณหภูมิที่ 220 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 นาที นำตัวอย่างสารละลายออกมาพักให้เย็นลงและเติมสาร HNO_3 จำนวน 6 มิลลิลิตร (65%) และ HF_4 จำนวน 12 มิลลิลิตร (40%) และย่อยอีกครั้งที่อุณหภูมิเดียวกันเป็นเวลา 20 นาที สุดท้ายนำส่วนผสมที่ถูกย่อยมารองด้วยกระดาษกรอง Whatman เบอร์ 42 นำตัวอย่างตะกอนดินในรูปของสารละลายไปวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนักด้วยเครื่อง ICP-OES (Perkin Elmer Optima, 4300 DV/Perkin Elmer Optima 800) และนำผลการตรวจวัดมาเปรียบเทียบกับค่าความเข้มข้นมาตรฐานคุณภาพตะกอนดิน (Sediment Quality Guidelines: SQGs) และคำนวณค่าดัชนีชี้วัดการปนเปื้อนในสิ่งแวดล้อมเพื่อประเมินการปนเปื้อนของโลหะหนักในสิ่งแวดล้อม

3. การประเมินการปนเปื้อนของตะกั่ว โครเมียม ทองแดง และสังกะสี

การประเมินการปนเปื้อนของโลหะหนักในงานวิจัยนี้เลือกประเมินการปนเปื้อนโลหะหนักเฉพาะธาตุตะกั่ว โครเมียม ทองแดง สังกะสีในพื้นที่ศึกษากับเกณฑ์คุณภาพตะกอนดิน (SQGs) นอกจากนี้ยังการประเมินการปนเปื้อนในสิ่งแวดล้อมโดยใช้ตัวชี้วัด 6 ชนิด ได้แก่ ปัจจัยการสะสมของโลหะหนัก (EF) ดัชนีการสะสมทางภูมิศาสตร์ (I_{geo}) ปัจจัยการปนเปื้อน (CF) ดัชนีการสะสมพิษ (PLI) ดัชนีความเสี่ยงเชิงนิเวศน์แฝงเร้น (RI) และดัชนีมลพิษของตะกอนดิน (SPI)

3.1 เกณฑ์คุณภาพตะกอนดิน (SQGs)

เกณฑ์คุณภาพตะกอนดิน (Sediment quality Guidelines; SQGs) เป็นค่าความเข้มข้นของโลหะหนักในตะกอนดินที่อยู่ในระดับที่ไม่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม โดยการเปรียบเทียบความเข้มข้นของโลหะหนักที่วัดได้ในตัวอย่างตะกอนดินจากพื้นที่ศึกษากับความเข้มข้นของโลหะหนัก (Varol & Sen, 2012 ; Suteerasak *et al.*, 2019) โดยแบ่งเป็นความเข้มข้นโลหะหนักที่คาดว่าจะไม่มีความเป็นพิษต่อสัตว์น้ำดินหากพบในปริมาณน้อย (Threshold Effects Concentration, TEC) และความเข้มข้นของโลหะหนักที่คาดว่าจะพบความเป็นพิษต่อสัตว์น้ำดินหากพบในปริมาณมาก (Probable Effects Concentration, PEC) ซึ่งในงานวิจัยนี้ใช้เกณฑ์ของ TEC ที่กำหนดโดยกรมควบคุมมลพิษที่ประกาศใช้ในปี พ.ศ. 2558 และเป็นเกณฑ์เดียวกับ Pollution Control Department (2012) โดยมีค่าความเข้มข้นสังกะสีไม่เกิน 80 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม โครเมียมไม่เกิน 45.5 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ทองแดงไม่เกิน 21.5 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม และตะกั่วไม่เกิน 36 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม

3.2 ปัจจัยการสะสมของโลหะหนัก (EF)

ปัจจัยการสะสมของโลหะหนัก (Enrichment factor; EF) เป็นหนึ่งในตัวชี้วัดที่พบค่อนข้างมากในการใช้ตรวจสอบคุณภาพตะกอนดิน (ตัวอย่างเช่นในงานวิจัยของ Duncan *et al.* (2018), Salah *et al.* (2012), Musika *et al.* (2013) โดยการประเมินค่าการสะสมตัวของโลหะหนักในตะกอนดินสามารถใช้เป็นตัวบ่งชี้ถึงอิทธิพลของกิจกรรมต่างๆ ของมนุษย์ที่ส่งผลต่อการสะสมตัวของโลหะหนักในสิ่งแวดล้อม (Hu *et al.*, 2013) มีสมการการคำนวณคือ

$$EF = \frac{[X/AI]_{\text{sample}}}{[X/AI]_{\text{background}}} \quad (1)$$

โดยที่ $[X/AI]_{\text{sample}}$ เป็นอัตราส่วนระหว่างความเข้มข้นโลหะหนักแต่ละชนิดที่ตรวจวัดได้และปริมาณธาตุอะลูมิเนียมในตัวอย่างที่ต้องการวิเคราะห์ ส่วน $[X/AI]_{\text{background}}$ เป็นอัตราส่วนความเข้มข้นของโลหะหนักและปริมาณอะลูมิเนียมที่อยู่ในหินท้องถิ่นของพื้นที่ศึกษา (Turekian & Wedepohl, 1961) โดยค่าความเข้มข้นของ Pb Zn Cu และ Cr ในหินท้องถิ่นที่เป็นต้นกำเนิดตะกอนดินมีค่าเท่ากับ 10 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม 20 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม 80 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม และ 22 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ (Garson *et al.*, 1975) ทั้งนี้ค่า EF สามารถแบ่งเป็นช่วงค่าที่สัมพันธ์กับระดับการสะสมตัวของโลหะหนักดังนี้ ค่า EF น้อยกว่า 2 แทนถึงการไม่ได้รับอิทธิพลไปจนถึงได้รับอิทธิพลจากกิจกรรมของมนุษย์ ค่า EF ช่วง 2 ถึง 5 แทนถึงการได้รับอิทธิพลจากกิจกรรมของมนุษย์ระดับปานกลาง ค่า EF ช่วง 5 ถึง 20 แทนการได้รับอิทธิพลจากกิจกรรมของมนุษย์อย่างมีนัยสำคัญ ค่า EF ช่วง 20 ถึง 40 แทนการได้รับอิทธิพลจากกิจกรรมของมนุษย์มาก ค่า EF ที่มากกว่า 40 สะท้อนถึงการได้รับอิทธิพลจากกิจกรรมของมนุษย์อย่างรุนแรงมาก (Barbieri, 2016 ; Sakan *et al.*, 2009)

3.3 ดัชนีการสะสมทางภูมิศาสตร์ (I_{geo})

ดัชนีการสะสมทางภูมิศาสตร์ (Geoaccumulation index; I_{geo}) เป็นหนึ่งในตัวชี้วัดที่ใช้ประเมินการเกิดมลภาวะหรือการปนเปื้อนในตะกอนดินที่บ่งบอกถึงคุณภาพของสิ่งแวดล้อม โดยการเปรียบเทียบความเข้มข้นของโลหะหนักในตะกอนดินกับโลหะหนักในธรรมชาติ (Muller, 1969 ; Müller, 1981) รวมถึงสามารถใช้ในการประเมินการปนเปื้อนในดินได้เช่นกัน (Loska *et al.*, 2004) ซึ่งค่า I_{geo} สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2)

$$I_{geo} = \log_2 \left(\frac{C_n}{1.5B_n} \right) \quad (2)$$

โดย C_n คือ ความเข้มข้นของโลหะหนักในตะกอนดินที่ต้องการศึกษา และ B_n เป็นความเข้มข้นของโลหะหนักในหิน โดยค่าความเข้มข้นโลหะหนัก Pb, Zn, Cu และ Cr ที่เป็นหินท้องถิ่นต้นกำเนิดตะกอนดิน (Garson *et al.*, 1975) ส่วนค่าคงที่ 1.5 คือค่าคงที่ของปัจจัยการแก้ไขพื้นที่หลังที่ใช้เพื่อลดผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงของตัวแปร lithogenic variation ทั้งนี้สามารถแบ่งช่วงค่าของ I_{geo} ตามระดับของการปนเปื้อนได้ 7 ระดับ ระดับแรก ค่า I_{geo} ต่ำกว่า 0 แทนถึงการไม่มีการปนเปื้อน ถัดมา $0 \leq I_{geo} < 1$ แทนการไม่ปนเปื้อนถึงการปนเปื้อนในระดับปานกลาง ช่วงค่าของ $1 < I_{geo} < 2$ แทนการปนเปื้อนในระดับปานกลาง ช่วงค่าของ $2 < I_{geo} < 3$ แทนการปนเปื้อนในระดับปานกลางไปจนถึงปนเปื้อนสูง ช่วงค่าของ $3 < I_{geo} < 4$ แทนการปนเปื้อนในระดับสูง ช่วงค่าของ $4 < I_{geo} < 5$ แทนระดับการปนเปื้อนหนักสูงไปจนถึงปนเปื้อนสูงมาก และสุดท้ายช่วงค่าของ I_{geo} ที่มากกว่า 5 สะท้อนถึงการปนเปื้อนโลหะหนักที่สูงมาก (Barbieri, 2016 ; Varol & Sen, 2012) ตัวอย่างงานวิจัยที่ใช้ค่า I_{geo} ประเมินการปนเปื้อน ได้แก่ Wojciechowska *et al.* (2019), Duncan *et al.* (2018), Salah *et al.* (2012) และ Musika *et al.* (2013) เป็นต้น

3.4 ปัจจัยการปนเปื้อน (CF)

ปัจจัยการปนเปื้อน (Contamination factor; CF) เป็นตัวชี้วัดมลพิษทางตะกอนดินในสภาพแวดล้อมโดยใช้อัตราส่วนของโลหะหนักแต่ละชนิดและโลหะหนักดังกล่าวในหินท้องถิ่น เพื่อประเมินระดับการปนเปื้อนในสภาพแวดล้อมต่างๆ (Kadhun *et al.*, 2015) มีสมการในการคำนวณดังสมการที่ (3)

$$CF = \frac{C_m(\text{sample})}{C_m(\text{background})} \quad (3)$$

เมื่อ C_m (sample) เป็นความเข้มข้นของโลหะหนักแต่ละชนิดในตะกอน และ C_m (background) เป็นความเข้มข้นของโลหะหนักในหิน (Turekian and Wedepohl, 1961) โดยค่าความเข้มข้นโลหะหนัก Pb Zn Cu และ Cr ในหินท้องถิ่นต้นกำเนิดตะกอนดิน (Garson *et al.*, 1975) ทั้งนี้ค่าปัจจัยการปนเปื้อน แบ่งออกเป็น 4 ระดับ โดยที่ $CF < 1$ หมายถึงการปนเปื้อนต่ำ $1 \leq CF < 3$ คือการปนเปื้อนในระดับปานกลาง $3 \leq CF < 6$ คือการปนเปื้อนมาก และ $CF > 6$ เป็นการปนเปื้อนที่สูงมาก (Hakanson *et al.*, 1980) ตัวอย่างเช่นที่ใช้ในงานวิจัยของ Salah *et al.* (2012), Decena *et al.* (2018), Anbuselvan *et al.* (2017) และ Wojciechowska *et al.* (2019) เป็นต้น

3.5 ดัชนีภาระมลพิษ (PLI)

ดัชนีภาระมลพิษ (Pollution load index; PLI) เป็นตัวชี้วัดที่ใช้สำหรับประเมินการเสื่อมสภาพของระบบนิเวศทางน้ำเนื่องจากโลหะหนักในพื้นที่ซึ่งมีความเกี่ยวข้องกับระบบนิเวศทางน้ำ โดยสามารถระบุแนวโน้มของการเสื่อมสภาพของระบบนิเวศและระดับมลพิษของระบบนิเวศทางน้ำในแต่ละช่วงเวลาที่ต้องการศึกษา (Tomlinson *et al.*, 1980) ทั้งนี้ตัวชี้วัดดังกล่าวคิดจากจำนวนชนิดของโลหะหนัก n ชนิด ในลักษณะของรากที่ n ของผลคูณค่าปัจจัยการปนเปื้อน (CF) ของโลหะหนักแต่ละตัว มีสมการคำนวณดังแสดงในสมการที่ (4)

$$PLI = (CF_1 \times CF_2 \times CF_3 \times \dots \times CF_n)^{1/n} \quad (4)$$

เมื่อ n เป็นจำนวนของโลหะหนักทั้งหมดที่ต้องการประเมิน โดยมาเกณฑ์ในการประเมินของค่า PLI คือ ค่า PLI ช่วง 0 ถึง 1 แทนถึงคุณภาพตะกอนดินที่มีสมบรูณ์ และค่า PLI มากกว่า 1 หมายถึงเกิดการเสื่อมสภาพของพื้นที่หรือระบบนิเวศทางน้ำ (Tomlinson *et al.*, 1980) ปัจจุบันมีหลายงานวิจัยที่ใช้ตัวชี้วัดดังกล่าวในการประเมินคุณภาพของระบบนิเวศทางน้ำ ดังเช่นที่พบในงานวิจัยของ Wojciechowska *et al.* (2019), Duncan *et al.* (2018), Chandrasekaran *et al.* (2015) และ Salah *et al.* (2012)

3.6 ดัชนีความเสี่ยงเชิงนิเวศน์แฝงเร้น (RI)

ดัชนีความเสี่ยงเชิงนิเวศน์แฝงเร้น (Potential ecological risk index; RI) เป็นตัวชี้วัดชนิดหนึ่งที่ใช้ประเมินความเสี่ยงทางนิเวศวิทยาของมลพิษโลหะหนักในตะกอน (Li *et al.*, 2012) การคำนวณค่า RI ดังกล่าวอาศัยการคิดคำนวณจากผลรวมของปัจจัยเสี่ยงเนื่องจากโลหะหนักทั้งหมดในตัวอย่างตะกอนดินที่เรียกว่า ค่าปัจจัยเสี่ยงทางนิเวศ (Ei) ของโลหะหนักจำนวน i ชนิด มีสมการคำนวณดังสมการที่ (5)

$$RI = \sum Ei \quad (5)$$

ในส่วนของค่า E_i ดังกล่าวเป็นผลลัพธ์จากผลคูณของค่าปัจจัยการตอบสนองที่เป็นพิษของโลหะ (T_i) กับค่าปัจจัยมลพิษของโลหะหนัก (F_i) ดังแสดงในสมการที่ (6)

$$E_i = T_i \times F_i \quad (6)$$

ทั้งนี้ค่า T_i ของโลหะหนักแต่ละชนิดอาจมีค่าที่เท่ากันหรือไม่เท่ากัน เช่น ค่า T_i ของ Cu, Ni, Co และ Pb ต่างก็มีค่าเท่ากันเท่ากับ 5 แต่ค่า T_i ของ Cr เท่ากับ 2 และค่า T_i ของ Zn และ Mn เท่ากันคือ 1 ในส่วนของค่า F_i นั้นคำนวณจากสมการที่ (7)

$$F_i = \frac{C_i}{C_b} \quad (7)$$

เมื่อ C_i คือค่าความเข้มข้นของโลหะหนักที่พบในตัวอย่างตะกอน C_b คือ ความเข้มข้นโลหะหนักในหินท้องถิ่น (Decena *et al.*, 2018) โดยค่าความเข้มข้นโลหะหนัก Pb Zn Cu และ Cr ของหินท้องถิ่นต้นกำเนิดตะกอนดิน (Garson *et al.*, 1975) ที่ระบุไว้ก่อนหน้านี้ ในส่วนของการประเมินผลลัพธ์ของค่า RI สามารถแบ่งเป็นช่วงค่าต่างๆดังต่อไปนี้ ค่า RI น้อยกว่า 150 หมายถึงมีความเสี่ยงทางนิเวศวิทยาต่ำ ค่า RI ช่วง 150 ถึง 300 หมายถึงมีความเสี่ยงทางนิเวศวิทยาในระดับปานกลาง ค่า RI ช่วง 300 ถึง 600 หมายถึงความเสี่ยงทางนิเวศวิทยาระดับมาก และค่า RI มากกว่าหรือเท่ากับ 600 หมายถึงมีความเสี่ยงทางนิเวศวิทยาที่สูงมากสำหรับตะกอน (Hakanson *et al.*, 1980) โดยตัวชี้วัดดังกล่าวนี้เป็นอีกตัวชี้วัดที่ใช้ประเมินผลกระทบทางนิเวศวิทยาในหลายงานวิจัยเช่นกันดังที่พบได้ในงานวิจัยของ Turekian & Wedepohl (1961), Khongsang *et al.* (2018) และ Wojciechowska *et al.* (2019) เป็นต้น

3.7 ดัชนีมลพิษของตะกอนดิน (SPI)

ดัชนีมลพิษของตะกอนดิน (Sediment Pollution Index; SPI) เป็นตัวชี้วัดสุดท้ายที่ใช้ในงานวิจัยนี้ ซึ่งตัวชี้วัดนี้สามารถสะท้อนถึงมลภาวะหรือความปนเปื้อนของตะกอนดินเนื่องจากโลหะหนักกว่ามีการปนเปื้อนในภาพรวมของโลหะหนัก

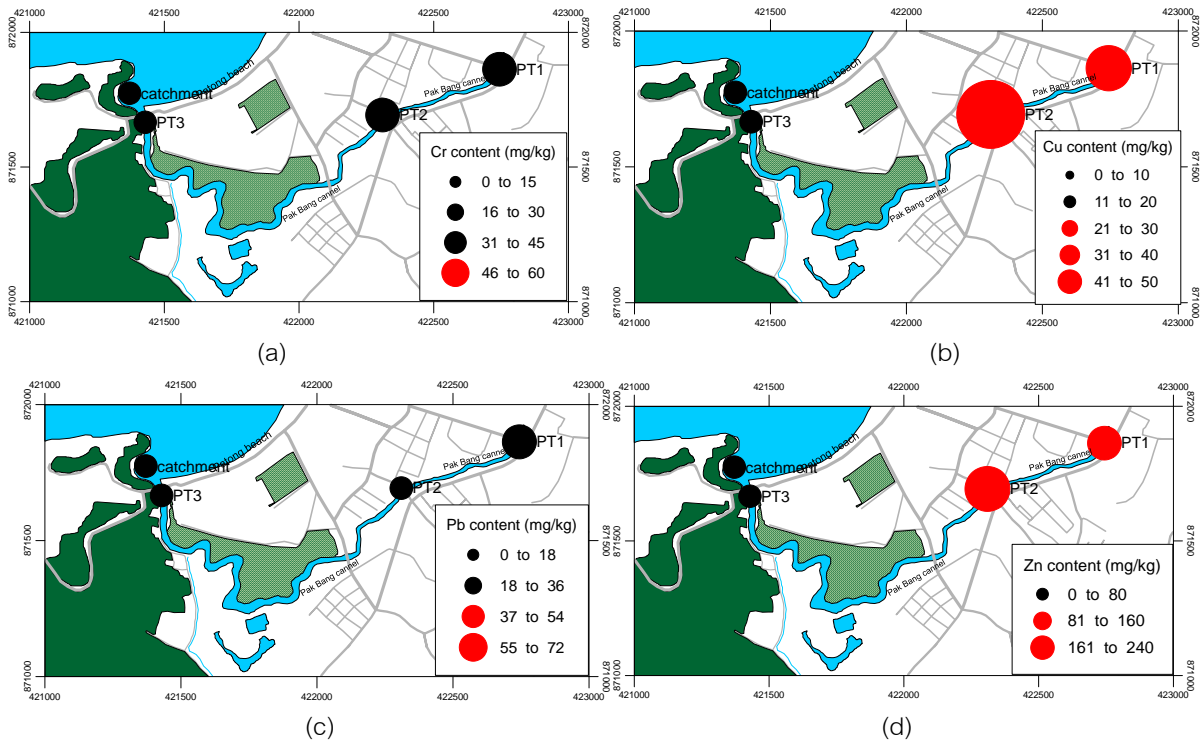
ทั้งหมดทุกชนิดอยู่ในระดับใด การคำนวณผลลัพธ์มาจากการใช้ความเข้มข้นโลหะหนักทุกชนิดมาคิดร่วมกัน (Singh *et al.*, 2002 ; Liang *et al.*, 2015) มีสมการคำนวณดังสมการที่ (8)

$$SPI = \frac{\sum \left[\frac{C_n \times W_m}{B_n} \right]}{\sum W_m} \quad (8)$$

เมื่อค่า C_n เป็นปริมาณโลหะหนักในตัวอย่าตะกอนดินและ B_n เป็นปริมาณโลหะหนักในวัสดุธรรมชาติ ซึ่งในที่นี้มาจากหินตะกอนในพื้นที่ (Garson *et al.*, 1975) ส่วนค่า W_m เป็นค่าน้ำหนักความเป็นพิษของโลหะหนักแต่ละชนิด ซึ่งความเป็นพิษของสังกะสีใช้ค่าน้ำหนักเท่ากับ 1 ทองแดงใช้ค่าน้ำหนักเท่ากับ 2 โครเมียมใช้ค่าน้ำหนักเท่ากับ 1 ส่วนตะกั่วใช้ค่าน้ำหนักเท่ากับ 5 (Singh *et al.*, 2002) ในส่วนของการประเมินความเป็นมลพิษที่สัมพันธ์กับระดับการปนเปื้อน แบ่งได้เป็นหลายช่วงค่า กล่าวคือ ค่า SPI ที่อยู่ในช่วง 0 ถึง 2 บ่งบอกถึงตะกอนดินที่มาจากธรรมชาติ ค่า SPI ช่วง 2 ถึง 5 บ่งบอกถึงการปนเปื้อนระดับต่ำในตะกอนดิน ค่า SPI ช่วง 5 ถึง 10 บ่งบอกถึงการปนเปื้อนระดับปานกลางในตะกอนดิน ส่วนค่า SPI ช่วง 10 ถึง 20 บ่งบอกถึงการปนเปื้อนระดับสูงในตะกอนดิน และสุดท้ายค่า SPI ที่มากกว่า 20 บ่งบอกถึงการปนเปื้อนรุนแรงในตะกอนดิน (Suteerasak *et al.*, 2019 ; Dahri *et al.*, 2018 ; Khongsang *et al.*, 2018)

4. การวิเคราะห์ผลด้วยระเบียบวิธีทางสถิติ

การวิเคราะห์องค์ประกอบ (Factor Analysis) เป็นเครื่องมือทางสถิติที่ใช้วิเคราะห์ผลความสัมพันธ์ของตัวแปรหลายตัวแปรชนิดหนึ่งที่อยู่ภายใต้การวิเคราะห์พหุตัวแปร (Multivariate analysis) ซึ่งอาศัยการวิเคราะห์องค์ประกอบที่เกี่ยวข้องกับตัวแปรที่สัมพันธ์และส่งผลกระทบต่อข้อมูล ปัจจุบันใช้ค่อนข้างมากในหลายงานวิจัย (Yalcin *et al.*, 2016 ; Gergen & Harmanescu, 2012 ; Zhiyuan *et al.* 2011 ; Moura *et al.*, 2010) โดยอาศัยผลการวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนักแต่ละชนิด นำมาจับกลุ่มกันตามความสัมพันธ์กันของกลุ่มข้อมูลโลหะหนักที่สะท้อนถึงตัวแปร (หรือองค์ประกอบ) ร่วมของกลุ่มข้อมูล นำไปสู่บทสรุปต้นกำเนิดของโลหะหนักที่สร้างปัญหาการปนเปื้อนโลหะหนักในสิ่งแวดล้อม การวิเคราะห์องค์ประกอบในที่นี้เริ่มจากการสร้างเมตริกซ์สหสัมพันธ์ของตัวแปรโลหะหนักทุกคู่เพื่อจัดกลุ่มตัวแปรโดยดูจากสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Pearson Correlation Coefficient, R) ซึ่งตัวแปรโลหะหนักที่นำมาพิจารณาควรมีความสัมพันธ์ระหว่างคู่ตัวแปรค่อนข้างสูง (มีค่า R มากกว่า 0.5) จากนั้นทำการสกัดองค์ประกอบโดยใช้วิธีการวิเคราะห์ด้วยการวิเคราะห์องค์ประกอบหลัก (Principle Component Analysis: PCA) ซึ่งในการวิเคราะห์จำนวนองค์ประกอบที่มีความสัมพันธ์กับข้อมูลพิจารณาจากค่า Eigenvalue ที่มากกว่า 1 และสุดท้ายเป็นการแปลความว่าองค์ประกอบหรือตัวแปรปัญหานั้นๆ ประกอบด้วยตัวแปรอะไรบ้าง (Pinyo, 2018) ในงานวิจัยนี้การวิเคราะห์แบบพหุตัวแปรทำเพื่อหาองค์ประกอบร่วมที่สามารถอธิบายเชื่อมโยงความสัมพันธ์ระหว่างโลหะหนักทั้ง 4 ชนิดในตะกอนดิน ผลที่ได้อาจบ่งชี้ถึงแหล่งกำเนิดมลพิษและโลหะหนักได้ดังที่พบได้ในหลายงานวิจัย (Decena *et al.*, 2018 ; Tholkappian *et al.*, 2017 ; Ma *et al.*, 2016)

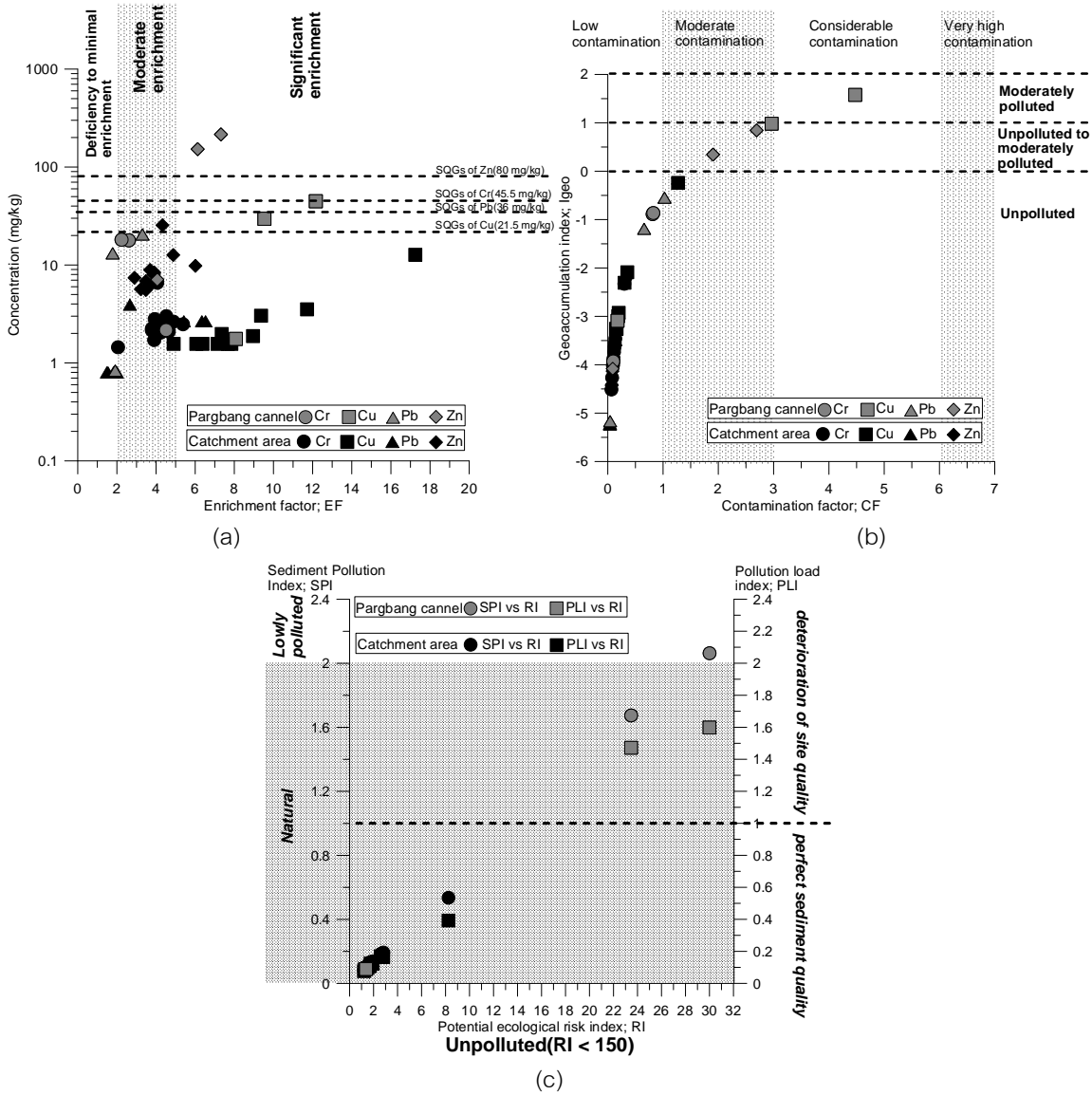


ภาพที่ 2 ความเข้มข้นโลหะหนัก (ในหน่วยมิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้ง) ของ (a) โครเมียม (b) ทองแดง (c) ตะกั่ว (d) สังกะสี ในตะกอนดินขนาดอนุภาคเล็กกว่า 150 ไมครอน ที่จำแนกเทียบกับเกณฑ์คุณภาพตะกอนดิน (SQGs) โดยสีแดงบ่งบอกถึงความเข้มข้นโลหะหนักที่มากกว่าเกณฑ์คุณภาพตะกอนดิน

ผลการวิจัย

ผลการตรวจวัดปริมาณโครเมียมในตะกอนดินอนุภาคเล็กกว่า 150 ไมครอนตามเส้นทางคลองปากบาง พบว่า ในตะกอนดินดังกล่าวมีโครเมียมอยู่ในช่วง 2.2 ถึง 18.1 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้ง (จากตะกอนดินแห้ง 0.2 กรัม) ตำแหน่งที่พบโครเมียมมากที่สุดคือ PT 2 (18.1 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้ง) ดังแสดงในภาพที่ 2a ความเข้มข้นโครเมียมของตะกอนดินขนาดเล็กลงกว่า 150 ไมครอน ในพื้นที่รับน้ำคลองปากบางมีค่าอยู่ในช่วง 1.4 ถึง 6.6 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้ง จากตะกอนดินแห้ง 0.2 กรัม) โดยตำแหน่งที่พบโครเมียมมากที่สุดคือ PT14 (6.6 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้ง) และมีความเข้มข้นโครเมียมเฉลี่ยข้อมูลทั้งพื้นที่ เท่ากับ 2.7 ± 1.4 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้ง

ส่วนผลจากการวิเคราะห์ปริมาณทองแดงในตะกอนดินขนาดอนุภาคเล็กกว่า 150 ไมครอน ตามเส้นทางคลองปากบาง พบว่า มีความเข้มข้นทองแดงอยู่ในช่วง 1.8 ถึง 44.8 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้ง (จากตะกอนดินแห้ง 0.2 กรัม) โดยตำแหน่งที่พบทองแดงมากที่สุด PT2 (44.8 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้ง) ดังแสดงในภาพที่ 2b ส่วนทองแดงในพื้นที่รับน้ำคลองปากบางมีค่าอยู่ในช่วง 1.6 ถึง 12.7 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้ง (จากตะกอนดินแห้ง 0.2 กรัม)พบทองแดงที่สุดในตัวอย่าง PT14 (12.7 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้ง) และมีค่าเฉลี่ยของทั้งพื้นที่ 3.0 ± 3.3 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้ง



ภาพที่ 3 กราฟการประเมินการปนเปื้อนโลหะหนัก (a) ปัจจัยการสะสมของโลหะหนัก กับ เกณฑ์คุณภาพตะกอนดิน SQGs (b) ปัจจัยการปนเปื้อน กับ ดัชนีการสะสมทางภูมิศาสตร์ และ (c) ดัชนีความเสี่ยงเชิงนิเวศน์แฝงเร้น กับดัชนีมลพิษของตะกอนดินและดัชนีภาระมลพิษ

จากการตรวจวัดและวิเคราะห์ปริมาณตะกั่วในตะกอนดินตามเส้นทางคลองปากบาง พบว่า ตะกั่วในตะกอนดินอนุภาคเล็กกว่า 150 ไมครอนมีความเข้มข้นอยู่ในช่วงระหว่าง 0.8 ถึง 20.5 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้ง (จากตะกอนดินแห้ง 0.2 กรัม) โดยตำแหน่งที่ พบปริมาณตะกั่วมากที่สุดคือต้นคลอง PT 1 (20.5 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้ง) ดังแสดงในภาพที่ 2c ในส่วนของพื้นที่รับน้ำคลองปากบาง พบปริมาณตะกั่วอยู่ในช่วง 5.6 ถึง 25.5 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้ง (จากตะกอนดินแห้ง 0.2 กรัม) โดยตำแหน่งที่พบตะกั่วมากที่สุด คือ PT 14 (25.5 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้ง) ซึ่งมีความเข้มข้นของตะกั่วเฉลี่ยทั้งพื้นที่ 2.1 ± 1.1 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้ง

สุดท้ายผลการวิเคราะห์หึ่งกะสีในตะกอนดินอนุภาคเล็กกว่า 150 ไมครอนตามเส้นทางคลองปากบาง พบว่า มีสังกะสีในตะกอนดินมากกว่าโลหะหนักทั้ง 3 ชนิด โดยมีค่าอยู่ในช่วง 7.1 ถึง 215.4 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้ง (จากตะกอน

ดินแห้ง 0.2 กรัม) และตำแหน่งที่พบสังกะสีมากที่สุดคือ PT2 (215.4 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้ง) ดังแสดงในภาพที่ 2d ส่วนความเข้มข้นของสังกะสีในตะกอนดินพื้นที่รับน้ำคลองปากบางมีค่าอยู่ในช่วง 5.6 ถึง 25.5 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม น้ำหนักแห้ง (จากตะกอนดินแห้ง 0.2 กรัม) โดยจุดที่พบสังกะสีมากที่สุดยังคงเป็นจุด PT14 ซึ่งมีความเข้มข้นสังกะสี 25.5 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม น้ำหนักแห้ง และมีค่าความเข้มข้นเฉลี่ยทั้งพื้นที่ เท่ากับ 9.5 ± 5.7 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม น้ำหนักแห้ง

วิจารณ์ผลการวิจัย

การประเมินการปนเปื้อนของโครเมียม ทองแดง ตะกั่ว สังกะสี ในตะกอนดินขนาดอนุภาคเล็กกว่า 150 ไมครอนของคลองปากบาง ด้วยเกณฑ์คุณภาพตะกอนดินของโลหะหนักแต่ละชนิด (ภาพที่ 2) พบว่า ค่าความเข้มข้นของโครเมียมและตะกั่วในตะกอนดินทุกจุดเก็บตัวอย่างในคลองปากบางมีค่าไม่เกินเกณฑ์คุณภาพตะกอนดิน ส่วนผลความเข้มข้นของทองแดง พบว่า ตัวอย่างตะกอนดินในเก็บจากจุด PT1 และ PT2 ซึ่งเป็นพื้นที่ต้นและกลางคลอง (ตามลำดับ) ต่างมีค่าสูงกว่าที่เกณฑ์คุณภาพตะกอนดินกำหนดไว้ที่ 21.5 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม น้ำหนักแห้ง โดยมีค่าอยู่ที่ 29.6 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม น้ำหนักแห้งและ 44.8 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม น้ำหนักแห้ง ตามลำดับ ส่วนผลการประเมินปริมาณสังกะสีในตะกอนดินดังกล่าว พบว่า จุดที่ PT1 และ PT2 ต่างมีค่าเกินเกณฑ์คุณภาพตะกอนดิน (ที่ 80 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม) ทั้งสิ้นโดยมีค่าอยู่ที่ 152.3 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม น้ำหนักแห้ง และ 2.15.4 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม น้ำหนักแห้ง ตามลำดับ อย่างไรก็ตามผลปริมาณโลหะหนักทั้ง 4 ในพื้นที่รองรับน้ำทิ้งเมื่อเทียบกับเกณฑ์คุณภาพตะกอนดินพบว่า ล้วนแล้วแต่ไม่เกินเกณฑ์คุณภาพตะกอนดินทั้งสิ้น ดังแสดงผลในรูป 3a

การประเมินการปนเปื้อนของโครเมียม ทองแดง ตะกั่ว สังกะสี ในตะกอนดินของคลองปากบางและพื้นที่รับน้ำทิ้งเนื่องจากกิจกรรมต่างๆของมนุษย์ด้วยค่า EF แสดงดังภาพที่ 3a พบว่า ค่า EF ของโครเมียมที่พบจากตัวอย่างตะกอนดินคลองปากบางและพื้นที่รองรับน้ำทิ้งทั้งหมดกระจายตัวอยู่ในช่วง 2 ถึง 5 ซึ่งบ่งชี้ถึงการได้รับอิทธิพลจากกิจกรรมของมนุษย์ระดับปานกลาง ส่วนค่า EF ของทองแดงที่มาจากทั้งสองพื้นที่พบการกระจายตัวอยู่ในช่วง 5 ถึง 20 ซึ่งแสดงผลของการได้รับอิทธิพลจากกิจกรรมของมนุษย์อย่างมีนัยสำคัญมาก ในส่วนของการประเมินผลการปนเปื้อนของตะกั่วด้วยค่า EF พบว่าค่าดังกล่าวกระจายตัวอยู่ทั้ง 3 ช่วงค่าการประเมิน โดยค่า EF ของตะกอนดินตำแหน่งกลางคลองปากบางและท้ายคลองมีค่าน้อยกว่า 2 นั้นหมายความว่าตะกั่วที่พบดังกล่าวอาจได้รับอิทธิพลมาจากกิจกรรมของมนุษย์เพียงเล็กน้อย ต่างกับตัวอย่างที่พบช่วงต้นคลองและพื้นที่รับน้ำทิ้งที่ได้รับอิทธิพลมาจากกิจกรรมของมนุษย์ในระดับปานกลางไปจนถึงการได้รับอิทธิพลจากกิจกรรมของมนุษย์อย่างมีนัยสำคัญ และสุดท้ายค่า EF ของสังกะสีพบการกระจายตัวใน 2 ช่วงค่าการประเมิน (อยู่ในช่วง 2-20) โดยช่วงต้นจนถึงกลางคลอง รวมถึงบางตำแหน่งของพื้นที่รับน้ำทิ้งนั้นแสดงถึงการได้รับอิทธิพลจากกิจกรรมของมนุษย์อย่างมีนัยสำคัญ อย่างไรก็ตามผลจากพื้นที่รับน้ำส่วนใหญ่แสดงถึงการได้รับอิทธิพลจากกิจกรรมของมนุษย์ในระดับปานกลางเท่านั้น

ในส่วนของผลการประเมินการปนเปื้อนของโลหะหนักทั้ง 4 ชนิดใน 2 พื้นที่ด้วยค่า I_{geo} ดังแสดงในภาพที่ 3b พบว่า ผลของค่า I_{geo} ของโลหะหนักทั้ง 4 ชนิดที่วิเคราะห์จากตะกอนดินในพื้นที่ท้ายคลองและพื้นที่รองรับน้ำทิ้งทั้งหมดมีค่าน้อยกว่าศูนย์ ซึ่งสะท้อนให้เห็นถึงการไม่พบการปนเปื้อนของโครเมียม ทองแดง ตะกั่ว และสังกะสีในตะกอนดินของพื้นที่ดังกล่าว ส่วนผลของตะกอนดินจากพื้นที่ต้นและกลางคลองปากบางเมื่อวิเคราะห์ด้วยค่า I_{geo} พบว่ามีเพียง ทองแดงและสังกะสีเท่านั้นที่มีค่ามากกว่าศูนย์ โดยพบทองแดงอยู่ในช่วงที่มีการปนเปื้อนในระดับปานกลาง แต่ในกรณีของสังกะสีพบการปนเปื้อนในระดับต่ำไปจนถึงปานกลาง ส่วนโครเมียมและตะกั่วไม่พบการปนเปื้อนสอดคล้องกับผลที่พบได้จากการ

ประเมินด้วยเกณฑ์คุณภาพตะกอนดิน (SQGs) ของโลหะหนักแต่ละชนิด (ภาพที่ 2a และ 2c) หากเปรียบเทียบผลของค่า I_{geo} ดังกล่าวร่วมกับค่า CF ดังแสดงในภาพที่ 3b พบว่าผลของค่า CF ของโลหะหนักทั้ง 4 ชนิดที่วิเคราะห์จากตะกอนดินในพื้นที่ท้ายคลองและพื้นที่รองรับน้ำทิ้งเกือบทั้งหมดพบอยู่ในช่วงที่มีการปนเปื้อนต่ำ ยกเว้นหนึ่งตัวอย่างในพื้นที่รองรับน้ำทิ้งที่มีค่า CF ของทองแดงตกอยู่ในช่วงที่มีการปนเปื้อนระดับปานกลาง ส่วนค่า CF ของตะกอนดินในพื้นที่ต้นและกลางคลองปากบางพบการกระจายตัวของระดับการปนเปื้อนที่เหมือนกับค่า I_{geo} กล่าวคือ พบทองแดงอยู่ในช่วงที่มีการปนเปื้อนมาก แต่ในกรณีของสังกะสีพบการปนเปื้อนในระดับปานกลาง ส่วนโครเมียมและตะกั่วไม่พบการปนเปื้อน การประเมินการปนเปื้อนและความเป็นพิษที่เกิดขึ้นกับระบบนิเวศและสิ่งแวดล้อมในภาพรวมปริมาณโลหะหนักทั้ง 4 ชนิดในตะกอนดินจากคลองปากบางและพื้นที่รองรับน้ำทิ้ง อาศัยการประเมินผลด้วยตัวชี้วัด 3 ชนิด ได้แก่ ค่าดัชนีมลพิษของตะกอนดิน (SPI) ค่าดัชนีภาระมลพิษ (PLI) และค่าดัชนีความเสี่ยงเชิงนิเวศน์แฝงเร้น (RI) ดังแสดงในภาพที่ 3c ผลที่ได้พบว่าภาพรวมของโลหะหนักทั้ง 4 ชนิดในตะกอนดินจากพื้นที่ท้ายคลองและพื้นที่รองรับน้ำทิ้ง ทั้งหมดแสดงผลในระดับที่ไม่ปนเปื้อนและมีความเสี่ยงต่อระบบนิเวศต่ำ (จากค่า RI) และมีคุณภาพของตะกอนดินอยู่ในระดับที่พบได้กับตะกอนดินจากธรรมชาติ (จากค่า SPI และ PLI) ส่วนผลการประเมินจากตัวชี้วัดทั้งสามของตัวอย่างตะกอนดินจากพื้นที่ต้นคลองและกลางคลองปากบาง พบว่า ผลของค่า RI สะท้อนถึงการไม่ปนเปื้อนของโลหะหนักและมีความเสี่ยงต่อระบบนิเวศต่ำ แต่พบสัญญาณบ่งชี้ถึงการเสื่อมสภาพของพื้นที่หรือระบบนิเวศทางน้ำ (จากค่า PLI) อย่างไรก็ตามหากพิจารณาคุณภาพตะกอนดินจากค่า SPI พบว่า มีเฉพาะตัวอย่างตะกอนจากจุดเก็บตัวอย่างต้นน้ำเท่านั้นที่มีระดับการปนเปื้อนต่ำ ส่วนคุณภาพตะกอนดินจากจุดเก็บกลางคลองปากบางยังคงอยู่ในระดับที่พบได้กับตะกอนดินจากธรรมชาติ

ตารางที่ 2 สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างคูโลหะหนักในตะกอนดินจากคลองปากบางและพื้นที่รองรับน้ำทิ้ง ตำบลป่าตอง จังหวัดภูเก็ต

	Cr	Cu	Pb	Zn
Cr	1.00			
Cu	0.97	1.00		
Pb	0.95	0.87	1.00	
Zn	0.97	0.99	0.89	1.00

พิจารณาความสัมพันธ์กันระหว่างคูโลหะหนักแต่ละชนิดจากค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์กันระหว่างแต่ละคูโลหะหนัก (ตารางที่ 2) พบว่า คูโลหะหนักแต่ละคูมีความสัมพันธ์กันชัดเจนในทิศทางเดียวกัน โดยเป็นความสัมพันธ์ในเชิงแปรผันตรงซึ่งกันและกัน ความสัมพันธ์กันที่เห็นได้ชัดเจนที่สุดคือความสัมพันธ์ระหว่างทองแดงและสังกะสีมีความสัมพันธ์กันมากถึง 99 เปอร์เซ็นต์ รองลงมาคือ ทองแดงกับโครเมียมและสังกะสีกับโครเมียมที่มีเปอร์เซ็นต์ความสัมพันธ์กัน 97 เปอร์เซ็นต์ ส่วนความสัมพันธ์กันของตะกั่วกับโครเมียม (95%) สังกะสี (89%) และทองแดง (57%) ต่างก็มีความสัมพันธ์กันที่ชัดเจนตามเปอร์เซ็นต์ความสัมพันธ์ที่ลดลงตามลำดับ

ตารางที่ 3 ค่า Eigenvalue ของเมตริกซ์ความสัมพันธ์ของกลุ่มองค์ประกอบ 4 กลุ่มที่เกี่ยวข้องกับโลหะหนัก

Value Number	Eigenvalue	%Total variance	Cumulative eigenvalue	Cumulative %
1	3.821	95.530	3.821	95.530
2	0.160	4.002	3.981	99.532
3	0.016	0.399	3.997	99.931
4	0.003	0.069	4.000	100.00

ตารางที่ 4 ความสัมพันธ์ในกลุ่มตัวแปรโลหะหนักทั้ง 4 ชนิดกับ 4 องค์ประกอบ

Variable	Component 1	Component 2	Component 3	Component 4
Cr	-0.9969	0.0217	-0.0671	0.0355
Cu	-0.9802	-0.1899	-0.0457	-0.0329
Pb	-0.9466	0.3215	0.0194	-0.0163
Zn	-0.9853	-0.1419	0.0948	0.0126

จากความสัมพันธ์กันระหว่างแต่ละคู่ตัวแปรโลหะหนักที่ได้นำเสนอก่อนหน้านี้ เมื่อนำมาวิเคราะห์ความสัมพันธ์ร่วมกันด้วยการวิเคราะห์องค์ประกอบหลัก (PCA) โดยกำหนดจำนวนองค์ประกอบเท่ากับจำนวนตัวแปรโลหะหนัก 4 ชนิด ผลที่ได้พบว่า ค่า Eigenvalue ที่มีค่ามากกว่า 1 (Pinyo, 2018) มีเพียงองค์ประกอบที่ 1 ซึ่งมีค่า Eigenvalue เกินกว่า 1 มีค่าเท่ากับ 3.821 คิดเป็นค่าเปอร์เซ็นต์ความแปรปรวนได้ 95.53 เปอร์เซ็นต์ ส่วนค่า Eigenvalue ขององค์ประกอบที่เหลือต่างมีค่าน้อยกว่า 1 ทั้งหมด ดังแสดงผลในตารางที่ 3 พิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรโลหะหนักทั้งสี่และองค์ประกอบจากการวิเคราะห์องค์ประกอบหลักพบว่า องค์ประกอบที่ 1 มีความสัมพันธ์ที่ชัดเจนกับตัวแปรโลหะหนักทั้ง 4 (ตารางที่ 4) ด้วยเปอร์เซ็นต์ความสัมพันธ์ระหว่าง 94.66 ถึง 99.69 เปอร์เซ็นต์ และมีความสัมพันธ์มากที่สุดกับโครเมียม อย่างไรก็ตามความสัมพันธ์ที่พบระหว่างองค์ประกอบที่ 1 กับตัวแปรโลหะหนักทั้งหมดแสดงผลความสัมพันธ์แบบแปรผกผันกัน ทั้งนี้สันนิษฐานว่าองค์ประกอบที่ 1 ที่สัมพันธ์กับโลหะหนักดังกล่าวอาจมีความเกี่ยวข้องกับกิจกรรมของมนุษย์ดังที่แสดงผลการประเมินการปนเปื้อนของโลหะหนักทั้ง 4 ชนิดในหัวข้อก่อนหน้านี้

สรุปผลการวิจัย

ปริมาณโครเมียมและตะกั่วในตะกอนดินทุกจุดเก็บตัวอย่างในคลองปากบางมีค่าไม่เกินเกณฑ์คุณภาพตะกอนดิน ส่วนทองแดงและสังกะสีมีความเข้มข้นสูงกว่าที่เกณฑ์คุณภาพตะกอนดิน เมื่อพิจารณาตัวชี้วัดอื่นๆพบว่าการปนเปื้อนของทองแดงและสังกะสีในพื้นที่คลองปากบางตรงกับผลการประเมินด้วยค่า I_{geo} และค่า CF ซึ่งค่า EF ก็สะท้อนให้เห็นถึงความเกี่ยวข้องกับกิจกรรมของมนุษย์ได้อย่างมีนัยสำคัญเช่นกัน อย่างไรก็ตามไม่มีโลหะหนักใดในพื้นที่รองรับน้ำทิ้งที่เกินเกณฑ์คุณภาพตะกอนดิน และไม่พบการปนเปื้อนในระบบนิเวศและสิ่งแวดล้อมจากโลหะหนักทั้ง 4 เช่นกัน

จากการพิจารณาการปนเปื้อนด้วยค่า RI และ SPI พบการไม่ปนเปื้อนและการมีความเสี่ยงต่อระบบนิเวศต่ำจากโลหะหนักทั้ง 4 ชนิดในพื้นที่ทั้งสองแห่ง ยกเว้นตัวอย่างจากต้นคลอง PT1 ที่มีค่า SPI เกินเกณฑ์เล็กน้อย ส่วนผลของค่า PLI นั้นแบ่งคุณภาพของตะกอนดินที่ชัดเจนระหว่างตะกอนดินในพื้นที่ต้นคลองและพื้นที่รองรับน้ำทิ้ง ซึ่งสอดคล้องกับผลการประเมิน



การปนเปื้อนโลหะหนักในตัวในสองพื้นที่ที่ได้กล่าวไว้ก่อนหน้านี้ ทั้งนี้ผลของการเพิ่มขึ้นและลดลงของโลหะหนักทั้ง 4 ในตะกอนดินของทั้งสองพื้นที่อย่างมีนัยสำคัญ รวมถึงผลที่แสดงถึงความสัมพันธ์แบบผกผันกันกับปัจจัยบางอย่าง (องค์ประกอบที่ 1) อาจสะท้อนให้เห็นถึงความเกี่ยวพันกับกิจกรรมของมนุษย์ที่เป็นต้นกำเนิดของโลหะหนักดังกล่าวในพื้นที่รอบๆคลองปากบางได้เช่นกัน

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยชิ้นนี้สามารถดำเนินงานสำเร็จได้ลุล่วงด้วยดี ขอขอบคุณคณะเทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตภูเก็ต ที่ได้ให้การสนับสนุนอุปกรณ์และทุนวิจัยระดับบัณฑิตศึกษา “การศึกษาการปนเปื้อนของโลหะหนักในตะกอนดินท้องน้ำและพื้นที่รองรับน้ำทิ้ง ในจังหวัดภูเก็ต” สำหรับการดำเนินการวิจัย ขอขอบคุณ ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตหาดใหญ่ สำหรับการอำนวยความสะดวกและสนับสนุนเครื่องมือและอุปกรณ์สำหรับการวิเคราะห์โลหะหนักในตะกอนดินที่เป็นประโยชน์ต่อการดำเนินงานวิจัยนี้

เอกสารอ้างอิง

- Adekoya, J.A., Williams, A.B. & Ayejuyo, O.O. (2006). Distribution of heavy metals in sediments of Igbede, Ojo and Ojora rivers of Lagos, Nigeria. *Environmentalist*, 26 (4), 277–280.
- Anbuselvan, N., Senthil, N.D. & Sridharan, M. (2018). Heavy metal assessment in surface sediments off Coromandel Coast of India: Implication on marine pollution, *Marine Pollution Bulletin*, 131, 712–726.
- Barbieri, M. (2016) The Importance of Enrichment Factor (EF) and Geoaccumulation Index (Igeo) to Evaluate the Soil Contamination. *J Geol Geophys*, 5 (237), 1-4.
- Buajan, S. & Pumijumnong, N. (2010). Distribution of Heavy Metals in Mangrove Sediment Atthe Tha Chin Estuary, Samutsakhon Province, Thailand. *J. Environ. Res.*, 32(2), 61-77.
- Chandrasekaran, A., Mukesh Babu, M.V., Sabarathinam, C. & Rajendran, S. (2015) Assessment of heavy metal distribution pattern in the sediments of Tamirabarani river and estuary, east coast of Tamil Nadu, India, *Environ Earth Sci.*, 73, 2441-2452.
- Decena, S.C.P., Arguelles, M.S. & Robel. L.P. (2018). Assessing Heavy Metal Contamination in Surface Sediments in an Urban River in the Philippines. *Pol. J. Environ. Stud.*, 27(5), 1983-1995.
- Duncan, A., Vries, N. & Nyarko, K. (2018). Assessment of Heavy Metal Pollution in the Sediments of the River Pra and Its Tributaries. *Water Air Soil Pollut.*, 229(272), 1-10.
- Garson, M.S., Young, B., Mitchell, A.H.G., Tait, B.A.R., Bateson, J.H., Cogger, N., Johnson, R.L., Prewett, W.G. & Stephens, E.A. (1975). The Geology of the Tin Belt in Peninsular Thailand around Phuket, Phangnga and Takua Pa, first ed. HMSO, London.
- Gergen, I. & Harmanescu, M. (2012). Application of principal component analysis in the pollution assessment with heavy metals of vegetable food chain in the old mining areas. *Chem Cent J.*, 6(156), 1-13.
- Hakanson, L. (1980). An ecological risk index for aquatic pollution control. A sedimentological approach. *Water Res.*, 14, 975-1001.



- Hu, Y., Liu, X., Bai, J., Shih, K., Zeng, E.Y. & Cheng, H. (2013). Assessing heavy metal pollution in the surface soils of a region that had undergone three decades of intense industrialization and urbanization. *Environ. Sci. Pollut. Res.*, 20(9), 6150-6159.
- Ikenaka, Y., Nakayama, S.M.M., Muzandu, K., Choongo, K., Teraoka, H., Mizuno, N. & Ishizuka, M. (2010) Heavy metal contamination of soil and sediment in Zambia. *African Journal of Environmental Science and Technology*, 4 (11), 729-739.
- Kadhum, S.A., Ishak, M.Y. & Zulkifli, S.Z. (2015). Evaluation and assessment of baseline metal contamination in surface sediments from the Bernam River, Malaysia. *Environ. Sci. Pollut. Res.*, 23(7), 6312-6321.
- Khongsang, A., Suteerasak, T. & Chongsrirattanakun, W. (2018). Contamination of Heavy Metals in Sediment, Polychaetes and Cockles in the Bang Yai River Estuary, Phuket Province. *KMUTT Research and Development Journal*, 41 (4), 439-454. (in Thai)
- Li, X., Liu, L., Wang, Y., Luo, G., Chen, X., Yang, X., Gao, B. & He, X. (2012). Integrated assessment of heavy metal contamination in sediments from a coastal industrial basin, NE China. *PLoS ONE.*, 7(6), 1-10.
- Liang, A., Wang, Y., Guo, H., Bo, L., Zhang, S. & Bai, Y. (2015) Assessment of Pollution and identification of sources of heavy metals in the sediments of Changshou Lake in a branch of the Three Gorges Reservoir. *Environmental Science and pollution research*, 22, 16067-16076.
- Loska, K., Wiechurła, D. & Korus, I. (2004). Metal contamination of farming soils affected by industry. *Environ. Int.*, 30, 159-165.
- Ma, X., Zuo, H., Tian, M., Zhang, L., Meng, J., Zhou, X., Min, N., Chang, X. & Liu, Y. (2016). Assessment of heavy metals contamination in sediments from three adjacent regions of the Yellow River using metal chemical fractions and multivariate analysis techniques. *Chemosphere*, 144, 264-272.
- Meesuk, P. (1999). The Determination of Arsenic and Heavy Metals in Bottom Sediments from Songkhla Lake. *Thaksin. J.*, 2(2), 77-82.
- Moura, M.C.S. de., Moita, G.C. & Neto, J.M.M. (2010). Analysis and assessment of heavy metals in urban surface soils of Teresina, Piauí State, Brazil: a study based on multivariate analysis. *Comunicata Scientiae*, 1(2), 120-127.
- Musika, C., Wongsudawan, W. & Munhaphon, A. (2013). Distribution and Accumulation of Heavy Metals in Sediments of the Inner Gulf of Thailand. *In Proceedings The 4th Marine Science Conference.* (569-580) Thailand. (in Thai)
- Muller, G. (1969). Index of geo-accumulation in sediments of the Rhine River. *Geol. J.*, 2 (3), 108-118.
- Müller, G. (1981). The heavy metal pollution of the sediments of Neckars and its tributary: A Stocktaking. *Chem. Ztg.*, 105, 157-164.



- Pollution Control Department. (2012). The study report: Determination of sediment quality standards in surface water source. Bureau of Waste Management and Hazardous Substances, *Pollution Control Department*, Bangkok. (in Thai)
- Potts, P.J. (1992). A handbook of silicate rock analysis. *Glasow, Blackie & Son Ltd.* London.
- Pinyo, T. (2018). Techniques for interpreting the results of factor analysis in research work. *Panyapiwat Journal*, 10(Special), 292-304. (in Thai)
- Rermumri, S., Kareas, S. & Wongsontam, K. (2009). Heavy Metals Contamination in Seawater and Sediment in the Upper Gulf of Thailand. *In Proceedings of 47th Kasetsart University Annual Conference.* (pp 221-228) Thailand. (in Thai)
- Sakan, S.M., Đordevic, D.S., Manojlovic, D.D. & Predrag, P.S. (2009). Assessment of heavy metal pollutants accumulation in the Tisza river sediments. *J. Environ. Manage.* , 90, 3382-3390.
- Salah, E.A.M., Zaidan, T.A. & Al-Rawi, A.S. (2012). Assessment of Heavy Metals Pollution in the Sediments of Euphrates River, Iraq. *Journal of Water Resource and Protection*, 4(12), 1009-1023.
- Singh, M., Muller, G. & Singh, I.B. (2002). Heavy metals in freshly deposited stream sediments of rivers associated with urbanisation of the gana plain, india. *Water Ai and Soil Pollution*, 141, pp. 35-54.
- Srihawirat, T. & Thananoppakul, K. (2016). Heavy metal contamination of soil in Phu Hin Rong Kla National Park. *In Proceeding The 17th Graduate Studies of Northern Rajabhat University Network Conference.* (pp. 2727-2734). Thailand (in Thai)
- Suteerasak, T. & Bhongsuwan, T. (2008). Contamination of Heavy Metals Al, As, Cu, Cr, Mn, Ni, Pb, Sn, Zn and Fe in Sediment from Bang-Yai River in Phuket Province. *KMUTT Research and Development Journal*, 31 (4), 767-779. (in Thai)
- Suteerasak, T. (2017). Applied Physics with Sediment Analysis. Phuket Center print, Phuket. (in Thai)
- Suteerasak, T. & Akkajit, P. (2018). Using the Grain Size and Concentration of Pb and Zn in Sediments to Identify the Layer of Sediment from Tsunami in 2547 B.E. (2004 C.E.) in the Bang Yai Estuary, Phuket Bay. *Thammasart Science and Technology Journal*, 26(3), 459-475. (in Thai)
- Suteerasak, T., Akkajit, P. Chitchiew, N., Ponggannicha, K. & Chongsrirattanakun, W. (2019). Assessment Contamination of Copper, Lead and Zinc in Sediment at Bang Yai Canal, Phuket Province. *Burapha Science Journal*, 24(1), 340-358. (in Thai)
- Tholkappian, M., Ravisankar, R., Chandrasekaran, A., Jebakumar, J.P.P., Kanagasabapathy, K.V., Prasad, M.V.R. & Satapathy, K.K. (2018). Assessing heavy metal toxicity in sediments of Chennai Coast of Tamil Nadu using Energy Dispersive X-Ray Fluorescence Spectroscopy (EDXRF) with statistical approach. *Toxicology Reports*, 5, 173-182.
- Tomlinson, D.L., Wilson, J.G., Harris, C.R. & Jeffrey, D.W. (1980) Problems in the assessment of heavy-metal levels in estuaries and the formation of a pollution index. *Helgol. Wiss. Meeresunlter*, 33(1-4), 566-575.



- Turekian, K.K. & Wedepohl, K.H. (1961). Distribution of the elements in some major units of the earth's crust. *Geol. Soc. Am. Bull.* , 72(2), 175-192.
- Varol M. & Sen, B. (2012) Assessment of nutrient and heavy metal contamination in surface water and sediments of the upper Tigris River, Turkey. *Catena.*, 92(1), 1-10.
- Wojciechowska, E., Nawrot, N., Walkusz-Miotk, J., Matej-Lukowicz, K. and Pazdro, K. (2019). Heavy Metals in Sediments of Urban Streams: Contamination and Health Risk Assessment of Influencing Factors. *Sustainability*, 11(3), 563-577.
- Yalcin, F., Kilic, S., Nyamsari, D.G., Yalcin, M.G. & Kilic, M. (2016). Principal Component Analysis of Integrated Metal Concentrations of Bogacayi Riverbank Sediments in Turkey. *Pol. J. Environ. Stud.* , 25(2), 471-485.
- Zhiyuan, W., Dengfeng, W., Huiping, Z. & Zhiping, Q. (2011). Assessment of Soil Heavy Metal Pollution with Principal Component Analysis and Geoaccumulation Index. *Procedia Environmental Sciences*, 10, 1946 – 1952.