

ผลกระทบจากอุตสาหกรรมเหมืองแร่ต่อการเสื่อมสภาพที่ดินจากการปนเปื้อนโลหะหนักและการประเมินความเสี่ยงต่อสุขภาพจากผลผลิตข้าวในพื้นที่ปนเปื้อน

ละไม ศรีสวัสดิ์ ตุลวิทย์ สถาปนจารุ ชลอ จารุสุทธิรักษ์* และ พัฒนา อหุรักษ์พงศธร

ภาควิชาเทคโนโลยีและการจัดการสิ่งแวดล้อม, คณะสิ่งแวดล้อม, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

* ผู้ประสานงานเผยแพร่ (Corresponding Author), E-mail: ecclj@ku.ac.th

วันที่รับบทความ: 3 สิงหาคม 2564; วันที่ทบทวนบทความ: 24 สิงหาคม 2564; วันที่ตอบรับบทความ: 27 สิงหาคม 2564

วันที่เผยแพร่ออนไลน์: 21 กันยายน 2564

บทคัดย่อ: การปนเปื้อนโลหะหนักในพื้นที่เกษตรกรรมอันเนื่องมาจากอุตสาหกรรมเหมืองแร่จัดเป็นภัยคุกคามด้านความปลอดภัยอาหารที่ก่อให้เกิดความเสี่ยงต่อสุขภาพของผู้บริโภค งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาวิธีการประเมินสภาพมลพิษดินของพื้นที่เกษตรกรรมแบบรายแปลงและแบบภาพรวม โดยการวิเคราะห์ค่าดัชนีเชิงธรณีเคมีของ As Cd Cu Pb และ Zn ในดินและประเมินค่าความเสี่ยงต่อสุขภาพจากการบริโภคข้าว ผลการศึกษาพบดินมีการปนเปื้อนของ As Cd Pb และ Zn และพบผลผลิตข้าวที่มีความเสี่ยงสูงจำนวน 6 แปลง จาก 11 แปลงคิดเป็นร้อยละ 55 ผลวิเคราะห์สถิติหลายตัวแปรเพื่อประเมินภาพรวมของพื้นที่พบว่าปริมาณโลหะหนักในดินที่มีการปนเปื้อนสูงเกิดจากกิจกรรมของมนุษย์ ส่วนการจำแนกแปลงนาตามค่าดัชนีความเสี่ยงทางนิเวศพบที่มีความสัมพันธ์กับค่าความเสี่ยงต่อสุขภาพของบริโภคข้าวจากการปนเปื้อนของ As และ Cd ผลการศึกษาบ่งชี้ว่าวิธีการประเมินสภาพมลพิษของแปลงนาสามารถนำไปใช้ในการคัดเลือกพื้นที่เกษตรกรรมที่มีการปนเปื้อนโลหะหนักจากอุตสาหกรรมเหมืองแร่ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

คำสำคัญ: ดัชนีการสะสมเชิงธรณี, การประเมินความเสี่ยงต่อสุขภาพ, โลหะหนัก, มลพิษทางดิน

Impact of Mining Industry on Agricultural Land Degradation from Heavy Metal Contamination and Health Risk Assessment of Rice Crops in Contaminated Paddy Fields

Lamai Srisawat, Tunlawit Satapanajaru, Chalor Jarusutthirak* and Patana Anurakpongsatorn

Department of Environmental Technology and Management, Faculty of Environment, Kasetsart University

* Corresponding author, E-mail: ecclj@ku.ac.th

Received: 3 August 2021; Revised: 24 August 2021; Accepted: 27 August 2021

Online Published: 21 September 2021

Abstract: Heavy metal contamination in agricultural soils nearby the old mining industries has threatened food safety for human health. This research aimed to develop a new methodology for soil pollution assessment of individual and holistic agricultural areas. Geochemical index of heavy metals including As, Cd, Cu, Pb, and Zn, in selected paddy fields was evaluated together with health risk assessment of those heavy metals in rice grains. The results showed that soil in the studied areas was contaminated with As, Cd, Pb, and Zn. Rice harvested from 6 out of 11 paddy fields, corresponding to 55%, employed health risk at a high level. Multivariate analysis indicated that anthropogenic activity was a major source of soil pollution in a highly contaminated area. The classification of paddy fields based on potential ecological risk index (RI) was found to be related to the health risk assessment of As and Cd contaminating in rice grains. It was concluded that the proposed soil pollution assessment method was efficiently used to identify suitable agricultural areas in heavy metal contaminated zones adjacent to the old mining industries for safe rice crops.

Keywords: Geo-accumulation index; Health risk assessment; Heavy metals; Soil pollution



1. บทนำ

อุตสาหกรรมเหมืองแร่ก่อให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม สังคมและสุขภาพในหลายมิติ ทั้งมิติด้านสิ่งแวดล้อม ทรัพยากรธรรมชาติ ระบบนิเวศที่มีความสำคัญต่อความหลากหลายทางชีวภาพและการเป็นแหล่งอาหาร รวมไปถึงมิติด้านเศรษฐกิจสังคมในส่วนของที่อยู่อาศัยของคนในชุมชน และพื้นที่เกษตรกรรม ซึ่งอาจนำไปสู่การปนเปื้อนของโลหะหนักในผลผลิตจากพื้นที่ปนเปื้อน มลพิษทางดินในพื้นที่เกษตรกรรมเป็นผลกระทบอย่างต่อเนื่องของอุตสาหกรรมเหมืองแร่ที่ส่งผลกระทบต่อความปลอดภัยของอาหารและส่งผลเสียต่อสุขภาพของมนุษย์และสิ่งแวดล้อม การเคลื่อนย้ายของโลหะหนักจากดินไปยังระบบพืชอาหารส่งผลต่อการสะสมโลหะหนักในสิ่งมีชีวิตจากการถ่ายทอดตามห่วงโซ่อาหาร [1] โดยทั่วไปโลหะหนัก เช่น สารหนู (As) แคดเมียม (Cd) ทองแดง (Cu) ตะกั่ว (Pb) และสังกะสี (Zn) พบในสภาพธรรมชาติของเปลือกโลกในปริมาณที่จำกัด อย่างไรก็ตามในพื้นที่ที่มีการรบกวนจากกิจกรรมของมนุษย์ เช่น แหล่งอุตสาหกรรมเหมืองแร่ และอื่นๆ ตลอดจนถึงการทำการเกษตรกรรมมักพบปัญหาการปนเปื้อนของมลพิษดังกล่าวสะสมในดินด้วยปริมาณที่สูงจนก่อให้เกิดปัญหาด้านสิ่งแวดล้อม [1-3]

ในการประเมินระดับการปนเปื้อนโลหะหนักในดินมีเกณฑ์การประเมินหลายวิธี เช่น ค่าดัชนีการสะสมเชิงธรณี (Geo-accumulation Index, Igeo) โดยการเปรียบเทียบความเข้มข้นของโลหะหนักที่ศึกษากับโลหะหนักในสภาพธรรมชาติของพื้นที่ [2] ค่าปัจจัยการสะสมตัวของโลหะหนักในดิน (Enrichment Factor, EFs) ซึ่งคำนวณจากอัตราส่วนปริมาณโลหะหนักที่

ศึกษากับปริมาณโลหะหนักในสภาพธรรมชาติของพื้นที่นั้น [3] ตลอดจนการเปรียบเทียบกับค่ามาตรฐานของดิน เช่น มาตรฐานคุณภาพดินในพื้นที่เกษตรของสหภาพยุโรปที่กำหนดปริมาณ Cd Cu Pb และ Zn ในดิน ไม่เกิน 3, 140, 100 และ 300 mg/kg ตามลำดับ [4] ส่วนค่าการปนเปื้อนในเมล็ดข้าวสารตามมาตรฐานของ Codex ซึ่งกำหนด As และ Cd ไม่เกิน 0.2 และ 0.4 mg/kg ตามลำดับ [5] ในขณะที่ค่ามาตรฐานการปนเปื้อนในเมล็ดข้าวสารตามมาตรฐานของประเทศจีนสำหรับ As Cd Cu Pb และ Zn กำหนดมีค่าไม่เกิน 0.15, 0.2, 10, 0.2 และ 50 mg/kg ตามลำดับ [4] นอกจากนี้ การประเมินระดับมลพิษในดินด้วยการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณโลหะหนักในดินและพืชซึ่งมีการศึกษาหลายวิธี เช่น ความสัมพันธ์ระหว่างโลหะหนักที่อยู่ในรูปที่แลกเปลี่ยนได้ (Exchangeable) รูปที่ละลายน้ำ (Soluble) และการสะสมโลหะหนักในพืช ตลอดจนการประเมินค่าความเสี่ยงของการรับสัมผัสโลหะหนักจากดิน และจากการบริโภค น้ำ และอาหาร เป็นต้น [2] อย่างไรก็ตามการประเมินดังกล่าวเป็นเพียงการประเมินปริมาณโลหะหนักในดินของพื้นที่ปนเปื้อนเท่านั้น ยังมิได้มีการศึกษาความสัมพันธ์ของการปนเปื้อนโลหะดังกล่าวในผลผลิตที่อาจส่งผลกระทบต่อความปลอดภัยของผู้บริโภค ซึ่งการศึกษาวិธีการประเมินสภาพการปนเปื้อนโลหะหนักในพื้นที่แปลงนาจากความสัมพันธ์ของค่าดัชนีดินและค่าความเสี่ยงต่อสุขภาพของผลผลิตพืชเพื่อการคัดเลือกพื้นที่ที่เหมาะสมสำหรับการผลิตอาหารที่ปลอดภัยยังมีข้อมูลการศึกษาน้อย การศึกษาที่จึงทำการประเมินมลพิษทางดินจากการปนเปื้อนโลหะหนักที่มีความสัมพันธ์



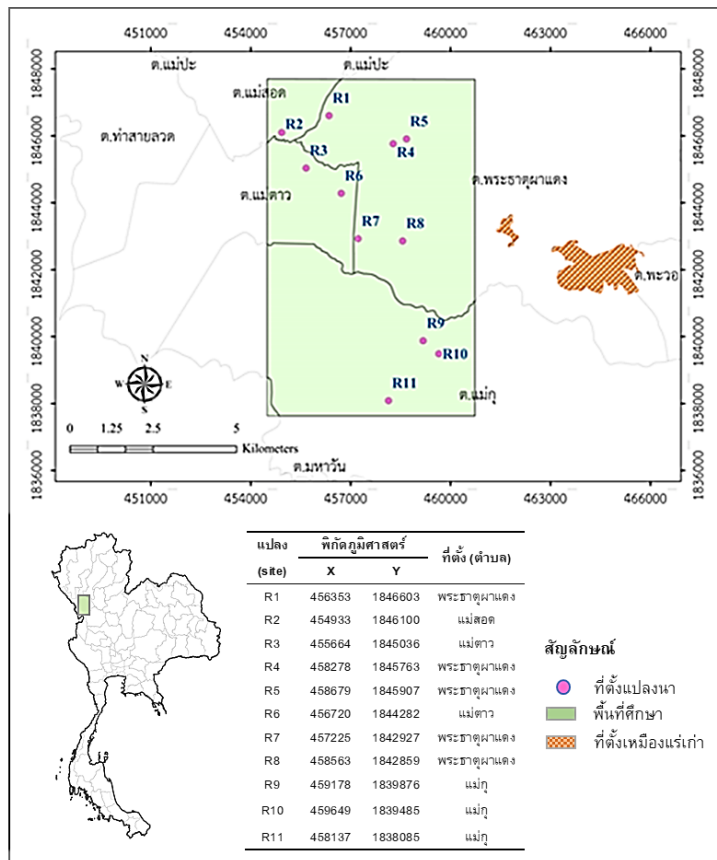
กับความเสี่ยงต่อสุขภาพจากการบริโภคข้าว โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาระบบการตรวจสอบดินเชิงพื้นที่แบบรายแปลงเพื่อประเมินความเหมาะสมของการใช้ประโยชน์แปลงนาในเขตพื้นที่เสี่ยงต่อปัญหาการปนเปื้อนโลหะหนักจากการใช้ประโยชน์ที่ดินที่ตั้งอยู่ใกล้กับอุตสาหกรรมเหมืองแร่เก่า

2. วิธีการดำเนินงานวิจัย

2.1 พื้นที่ศึกษาและการเก็บตัวอย่าง

พื้นที่ศึกษาเป็นพื้นที่เกษตรที่มีขอบเขตใกล้พื้นที่เหมืองแร่สังกะสีเก่า ตั้งอยู่ในพื้นที่ของ อ.แม่สอด

จ. ตาก การศึกษาเชิงพื้นที่โดยคัดเลือกแปลงนาขนาดพื้นที่แปลงละ 25 ตารางเมตร จำนวน 11 แปลง ดังแสดงในรูปที่ 1 ทำการสุ่มตัวอย่างดินและข้าว (*Oryza sativa* L.) ด้วยวิธี Random ในตารางสุ่มขนาด 1 x 1 เมตร แปลงละ 5 ซ้ำ นำตัวอย่างเมล็ดข้าวเปลือกไปเข้าเครื่องสีข้าว แล้วนำเมล็ดข้าวสารไปอบและบด แล้วร่อนผ่านตะแกรงขนาด 1 มม. เก็บตัวอย่างในถุงพลาสติกบรรจุตัวอย่าง ส่วนตัวอย่างดินผึ่งให้แห้งที่อุณหภูมิห้อง (Air Dried) บดแล้วร่อนผ่านตะแกรงขนาด 2 มม. และ 0.07 มม. [2, 6-7]



รูปที่ 1 พื้นที่ศึกษาและพิกัดที่ตั้งแปลงนาที่เก็บตัวอย่าง



2.2 สมบัติทางเคมีและกายภาพของดิน

การวิเคราะห์สมบัติทางเคมีและกายภาพของดินบางประการของดินที่มีผลต่อการเคลื่อนย้ายของโลหะหนักในดินโดยสมบัติทางเคมีดิน ได้แก่ ค่าความกรด-ด่างของดิน (pH) อัตราส่วน 1:1 ของดินต่อน้ำ (ดิน 10 กรัม ในน้ำกรอง 10 มิลลิลิตร) [8] ปริมาณอินทรีย์วัตถุในดิน (Soil Organic Matter; SOM) โดยวิธี Walkley and Black [9] ค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวก (Cation Exchange Capacity; CEC) วิเคราะห์โดยวิธี Ammonium Acetate [10] และส่วนสมบัติทางกายภาพดินวิเคราะห์การกระจายขนาดของอนุภาคดินด้วยวิธีปิเปตต์ [6-7]

2.3 การวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนักในดินและพืช

การวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนักในดินทำโดยการย่อยสลายตัวอย่างดินน้ำหนัก 0.2 ± 0.0001 กรัม ด้วยกรด $\text{HNO}_3:\text{HCl}$ (3:1) โดยเครื่องไมโครเวฟตามวิธี US.EPA. 3051A [11] ส่วนการวิเคราะห์โลหะหนักในตัวอย่างข้าว ทำโดยการซังเมล็ดข้าวบดแห้งหนัก 1 ± 0.0001 กรัม ย่อยสลายตัวอย่างข้าวด้วยกรด $\text{HNO}_3:\text{HClO}_4$ (2:1) โดย Block Digestion technique [12] และวัดปริมาณ Cd Cu Pb และ Zn ของสารละลายที่ได้จากย่อยสลายตัวอย่างดินและเมล็ดข้าวด้วยเครื่อง ICP-OES (Inductively Coupled Plasma-optical Emission) และวัดปริมาณความเข้มข้นของ As ในสารละลายตัวอย่างด้วยเครื่อง HG-AAS (Hydride Generation Atomic Absorption Spectrophotometer) การควบคุมคุณภาพผลการวิเคราะห์ด้วยการประเมินค่า Detection Limit ของวิธีทดสอบ (สำหรับ As Cd Cu Pb และ Zn) ประเมินความถูกต้อง (Accuracy) ด้วยการเทียบกับสารอ้างอิง

(CRM) โดยค่า % Recovery อยู่ในช่วง 80 - 110 และประเมินความเที่ยง (Precision) ด้วยการทดสอบซ้ำ โดยค่าความแตกต่างสัมพัทธ์ (RPD) น้อยกว่า 10%

2.4 การออกแบบแอปพลิเคชัน

การประเมินระดับมลพิษในดินด้วยดัชนีการสะสมเชิงธรณี (Geo-accumulation Index, Igeo) ของโลหะหนัก ทำโดยการเปรียบเทียบความเข้มข้นของโลหะหนักที่ต้องการศึกษากับโลหะหนักในสภาพธรรมชาติ การคำนวณค่าดัชนีการสะสมเชิงธรณี ตามสมการของ Muller ดังสมการที่ (1)

$$I_{geo} = \log_2 \left(\frac{C_n}{1.5B_n} \right) \quad (1)$$

โดยที่ C_n คือปริมาณโลหะหนักในตัวอย่างดิน; B_n คือปริมาณโลหะหนักในสภาพธรรมชาติ โดยค่า B_n ในการศึกษาใช้ค่าความเข้มข้นของโลหะหนักซึ่งประกอบด้วย Cd 0.3 mg/kg, Cu 45 mg/kg, Pb 20 mg/kg, Zn 95 mg/kg และ As 1.8 mg/kg [6,7] ส่วนค่า 1.5 คือค่าคงที่ของปัจจัยการแก้ไขที่ใช้เพื่อลดผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงของตัวแปร ค่าดัชนีการสะสมเชิงธรณีสามารถแบ่งเป็น 7 ระดับ ดังนี้ ระดับที่ 1 ($I_{geo} \leq 0$) เป็นระดับที่ไม่มีการปนเปื้อน ระดับที่ 2 ($0 < I_{geo} < 1$) เป็นระดับที่ไม่มีการปนเปื้อนจนถึงระดับที่มีการปนเปื้อนปานกลาง ระดับที่ 3 ($1 < I_{geo} < 2$) ระดับที่มีการปนเปื้อนปานกลาง ระดับที่ 4 ($2 < I_{geo} < 3$) เป็นระดับที่มีการปนเปื้อนปานกลางจนถึงระดับที่มีการปนเปื้อนสูง ระดับที่ 5 ($3 < I_{geo} < 4$) เป็นระดับที่มีการปนเปื้อนสูง ระดับที่ 6 ($4 < I_{geo} < 5$) เป็นระดับที่มีการปนเปื้อนสูง จนถึงระดับที่มีการปนเปื้อนสูงมาก และระดับที่ 7 ($I_{geo} \geq 5$) เป็นระดับที่มีการปนเปื้อนสูงมาก



2.5 ปัจจัยการสะสมตัวของโลหะหนักในดิน (Enrichment Factor, EF)

การสะสมตัวของโลหะหนักในดิน ประเมินจากค่าปัจจัยการสะสมตัวของโลหะหนักในดิน ซึ่งคำนวณจากอัตราส่วนปริมาณโลหะหนักที่ศึกษาเทียบกับปริมาณโลหะหนักในพื้นที่นั้นๆ [3] ปัจจัยการสะสมตัวของโลหะหนักในดิน คำนวณได้ตามสมการที่ (2)

การศึกษานี้ใช้เหล็กเป็นธาตุอ้างอิงเนื่องจากเป็นธาตุชนิดหนึ่งที่พบมากในเปลือกโลก ค่า $(C_n/C_{Fe})_{sample}$ เป็นอัตราส่วนของความเข้มข้นของโลหะหนักที่ศึกษาเทียบกับธาตุเหล็กในตัวอย่างดิน และค่า $(B_n/B_{Fe})_{background}$ เป็นอัตราส่วนของความเข้มข้นโลหะหนักที่ศึกษาเทียบกับธาตุเหล็กในสภาพธรรมชาติ โดยเปรียบเทียบกับค่าอ้างอิงของโลหะหนักในดินเซลล์ [13] และจำแนกชั้นของค่าปัจจัยการสะสมตัวของโลหะหนักในดินเพื่อบ่งบอกอิทธิพลของกิจกรรมมนุษย์ต่อการสะสมของโลหะหนักในดิน แบ่งเป็น 5 ระดับ ดังนี้ ระดับที่ 1 ($EF < 2$) เป็นระดับที่ไม่ได้รับอิทธิพลจนถึงได้รับอิทธิพลน้อย ระดับที่ 2 ($2 < EF < 5$) เป็นระดับที่ได้รับอิทธิพลปานกลาง ระดับที่ 3 ($5 < EF < 20$) เป็นระดับที่ได้รับอิทธิพลสูง ระดับที่ 4 ($20 < EF < 40$) เป็นระดับที่ได้รับอิทธิพลสูงมากและระดับที่ 5 ($EF > 40$) เป็นระดับที่ได้รับอิทธิพลอย่างรุนแรง

2.6 ค่าปัจจัยการปนเปื้อน (CF) ค่าความเสี่ยงทางนิเวศ (E) และการประเมินค่าดัชนีความเสี่ยงเชิงนิเวศ (Potential Ecological Risk Index, RI)

ค่าปัจจัยการปนเปื้อน (Contamination Factor, CF) เป็นอัตราส่วนระหว่างความเข้มข้นโลหะหนักในตัวอย่างดินกับค่าปริมาณโลหะหนักในสภาพธรรมชาติ (Background) คำนวณตามสมการของ

$$EF = \frac{(C_n/C_{Fe})_{Sample}}{(B_n/B_{Fe})_{Background}} \quad (2)$$

Hakason ดังสมการที่ (3) ค่า E_i เป็นค่าความเสี่ยงทางนิเวศ คำนวณตามสมการของ Hakason ดังสมการที่ (4) โดยที่ T_i เป็นค่าตอบสนองต่อความเป็นพิษของโลหะหนัก (Toxic Response of the Heavy Metal) ดังนี้ $As=10$, $Cd=30$, $Cu=5$, $Pb=5$ และ $Zn=1$ [2] ศักยภาพความเป็นพิษของโลหะหนักต่อความเสี่ยงทางนิเวศ ประเมินตามสมการค่าดัชนีความเสี่ยงทางนิเวศ ดังสมการที่ (5)

$$CF = \frac{C_{metal}}{C_{background}} \quad (3)$$

$$E_i = T_i \times CF_i \quad (4)$$

$$RI = \sum_{i=1}^n E_i \quad (5)$$

ค่าดัชนีความเสี่ยงทางนิเวศ แบ่งระดับเป็น 4 ระดับ ได้แก่ระดับที่ 1 ความเสี่ยงต่ำ ($RI < 150$) ระดับที่ 2 ความเสี่ยงปานกลาง ($150 \leq RI < 300$) ระดับที่ 3 ความเสี่ยงสูง ($300 \leq RI < 600$) และระดับที่ 4 ความเสี่ยงสูงมาก ($RI \geq 600$)

2.7 การประเมินปัจจัยที่ส่งผลต่อการปนเปื้อนโลหะหนักในดิน

วิเคราะห์ปัจจัยการปนเปื้อนโลหะหนักด้วยการวิเคราะห์ด้วยสถิติหลายตัวแปร (Multivariate Analysis) และเปรียบเทียบความสัมพันธ์กับค่า EF และ ค่า I_{geo} การวิเคราะห์ปัจจัยที่ส่งผลต่อการปนเปื้อนโลหะหนักในดินโดยใช้ค่าสถิติการวิเคราะห์



องค์ประกอบหลัก (Principal Components Analysis; PCA) ที่มีการหมุนแกนแบบอโรโทนอนัลด้วยวิธีแวนริแมกซ์ (Varimax Rotation) และทวนสอบผลกับค่าจากการวิเคราะห์กลุ่ม (Cluster analysis; CA) [6]

2.8 การประเมินความเสี่ยงจากการบริโภคข้าว

การศึกษานี้เป็นการประเมินความเสี่ยงของสารในกลุ่มไม่ก่อมะเร็งสำหรับโลหะหนัก โดยการประเมินค่าความเสี่ยง (Risk) ตามสมการที่ (6)

$$\text{Hazard Quotient (HQ)} = \frac{\text{CDI}}{\text{RfD}} \quad (6)$$

โดย $\text{HQ} > 1$ หมายความว่า สถานการณ์การปนเปื้อนของโลหะหนักชนิดนั้นๆ ค่อนข้างรุนแรงจนอาจเป็นอันตรายต่อสุขภาพอนามัยของประชาชน ค่า RfD (Reference Dose) คือปริมาณสารเคมีที่มนุษย์สามารถรับเข้าสู่ร่างกายได้ทุกวัน โดยไม่ทำให้เกิดความผิดปกติใดๆ ต่อสุขภาพอนามัย หรือค่าความเป็นพิษของสารที่ไม่ทำให้เกิดมะเร็ง ($\text{mg kg}^{-1} \text{day}^{-1}$) โดยค่า RfD ของ As Cd Cu Pb Zn มีค่าเป็น 0.0004, 0.001, 0.04, 0.004 และ 0.3 ตามลำดับ[4] ค่า CDI (Chronic Daily Intake) คือ ค่าปริมาณสารเฉลี่ยที่ได้รับในแต่ละวันอย่างต่อเนื่อง ($\text{mg kg}^{-1} \text{day}^{-1}$) โดยปริมาณการได้รับสัมผัสคำนวณตามสมการ USEPA ดังสมการที่ (7)

$$\text{CDI} \left(\frac{\text{mg}}{\text{kg} - \text{day}} \right) = \frac{\text{CF} \times \text{IR} \times \text{EF} \times \text{ED}}{\text{BW} \times \text{AT}} \quad (7)$$

โดยที่ค่า CF คือความเข้มข้นของโลหะหนักในเมล็ดข้าว (mg kg^{-1}) ค่า EF (Exposure Frequency) คือความถี่ของการได้รับในรอบ 1 ปี ในที่นี้กำหนดเป็น 365 วัน/ปี (day-year^{-1}) ค่า ED (Exposure Period)

คือจำนวนปีที่ได้รับสาร กำหนดให้เท่ากับ 60 ปีตลอดช่วงอายุ ค่า BW (Body Weight) คือน้ำหนักตัวเฉลี่ย กำหนดให้เท่ากับ 60 kg และค่า AT (Average Time) คือจำนวนวันทั้งหมดตลอดอายุขัย (Day) และค่า IR (Ingestion Rate) คือ อัตราการบริโภคข้าวของคนไทย เท่ากับ 0.23 kg ต่อคนต่อวัน ประเมินค่าค่าผลรวมความเสี่ยงรวมของโลหะหนัก (Total HQ) ได้ดังสมการที่ (8)

$$\text{Total HQ} = \sum \text{HQ}_i \quad (8)$$

โดยที่ HQ เป็นค่าความเสี่ยงรวมของจากการรับโลหะหนัก As Cd Cu Pb และ Zn เข้าสู่ร่างกายผ่านการบริโภคข้าว ค่า Total HQ มากกว่า 1 แสดงถึงความเสี่ยงในระดับที่อาจเป็นอันตรายต่อสุขภาพอนามัยของผู้บริโภค

3. ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

3.1 สมบัติทั่วไปของดินในพื้นที่เกษตร

การวิเคราะห์สมบัติทั่วไปของดินตรวจสอบจากคุณสมบัติดินของแปลงนาที่คัดเลือกจากพื้นที่เกษตรจำนวน 11 แปลง โดยการเก็บตัวอย่างดินแปลงละ 5 ซ้ำ พบว่าสมบัติดิน ได้แก่ สภาพความเป็นกรดต่างของดิน (pH) มีค่าระหว่าง 6.3 ถึง 8.3 ปริมาณอินทรีย์วัตถุในดิน (SOM) ระดับต่ำถึงสูง (6.1-35.5 g/kg) ในขณะที่ค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวกของดิน (CEC) มีค่าปานกลางถึงสูงโดยมีค่าระหว่าง 12.2 - 28.8 cmol/kg เมื่อพิจารณาสมบัติทางกายภาพพบว่าเป็นดิน (Soil texture) ส่วนใหญ่เป็นดินร่วน ยกเว้นแปลง 4R และ 5R เป็นดินเหนียวและ แปลง R1 และ R6 เป็นดินร่วนเหนียว (ตารางที่ 1)



ตารางที่ 1 สมบัติของดินในแปลงนาและลักษณะการปนเปื้อนโลหะหนักในดิน

สมบัติดิน	ค่าเฉลี่ยของสมบัติดิน ^{1/}										
	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	R9	R10	R11
1. สมบัติดินทั่วไป											
pH	7.6±0.1	6.7±1.4	7.5±0.2	7.3±0.2	7.6±0.1	7.5±0.1	8.0±0.1	8.3±0.1	7.5±0.1	6.3±0.2	7.8±0.2
OM (g/kg)	6.1±1.0	22.8±8.1	10.6±0.7	16.2±1.0	22.2±2.2	20.6±1.1	35.5±1.0	18.3±3.7	9.1±1.1	19.6±1.1	20.1±3.4
CEC (cmol/kg)	19.8±0.7	16.8±1.3	12.2±0.7	27.0±0.6	28.8±4.8	22.8±1.0	16.3±1.8	17.3±1.3	13.7±1.3	13.2±1.1	12.8±2.6
Sand (%)	44.1±0.4	37.5±2.3	42.3±0.7	25.0±0.9	25.0±0.1	30.6±1.3	32.0±1.9	48.8±0.5	46.4±2.3	51.9±0.4	41.7±0.9
Silt (%)	23.2±2.1	37.8±1.5	34.5±0.5	30.5±1.6	33.2±0.7	33.7±3.2	46.9±2.4	31.6±0.6	32.0±1.1	31.8±0.6	33.7±0.6
Clay (%)	32.7±2.0	24.7±1.6	23.2±1.0	44.5±2.0	41.8±0.8	35.8±3.4	21.1±1.0	19.6±0.9	21.6±2.2	16.3±0.8	24.6±0.8
Soil texture ^{2/}	CL	L	L	C	C	CL	L	L	L	L	L
2. ความเข้มข้นโลหะหนักในดิน (mg/kg)											
As	6.1±0.3	19.1±1.4	15.7±1.4	5.1±0.6	2.6±0.6	22.9±5.0	25.9±3.7	17.7±2.9	5.1±1.6	1.7±0.5	0.5±0.1
Cd	0.9±0.2	1.0±0.0	2.5±0.1	2.8±0.6	1.2±0.2	3.0±0.5	39.1±4.1	13.3±0.6	1.4±0.5	0.6±0.1	0.6±0.0
Cu	8.7±0.5	17.0±1.8	14.7±1.3	24.8±2.3	25.3±2.1	22.1±1.8	23.5±2.8	12.8±0.9	13.6±1.7	12.7±1.7	13.2±1.7
Pb	20.0±3.3	19.6±2.3	20.0±0.6	30.2±2.1	29.5±2.4	31.6±2.1	114±7.9	31.8±3.5	13.8±1.1	11.8±1.1	13.9±0.8
Zn	40.8±5.8	73.6±4.1	189±7.9	74.6±6.8	49.2±9.0	139±22.4	3,014±76	413±30	133±28	39.4±3.0	35.0±1.5
3. สัดส่วนธาตุหลักในดิน (%)											
Fe (%)	2.0±0.4	2.8±0.3	2.2±0.2	4.1±0.3	4.2±0.3	4.0±0.2	3.5±0.2	2.5±0.2	1.7±0.2	1.5±0.1	2.0±0.1
4. ค่าดัชนีการสะสมโลหะหนักในดิน (Geo-accumulation Index; Igeo)											
Igeo-As	1.2	2.8	2.5	0.9	-0.1	3.1	3.2	2.7	0.9	-0.7	-2.5
Igeo-Cd	0.9	1.1	2.5	2.6	1.4	2.7	6.4	4.9	1.5	0.3	0.5
Igeo-Cu	-3.0	-2.0	-2.2	-1.4	-1.4	-1.6	-1.5	-2.4	-2.3	-2.4	-2.4
Igeo-Pb	-0.6	-0.6	-0.6	0.0	0.0	0.1	1.9	0.1	-1.1	-1.4	-1.1
Igeo-Zn	-1.8	-1.0	0.4	-0.9	-1.6	-0.1	4.4	1.5	-0.1	-1.9	-2.0
5. ค่าปัจจัยการสะสมตัวของโลหะหนักในดิน (Enrichment Factor; EF)											
EF-As	1.2	2.5	2.5	0.4	0.2	2.1	2.7	2.6	1.1	0.4	0.1
EF-Cd	7.0	5.6	17.8	10.8	4.6	12.1	174.2	85.2	12.7	5.8	5.0
EF-Cu	0.5	0.6	0.7	0.6	0.6	0.6	0.7	0.6	0.8	0.9	0.7
EF-Pb	2.4	1.7	2.1	1.8	1.6	1.9	7.6	3.1	1.9	1.9	1.7
EF-Zn	1.0	1.3	4.2	0.9	0.6	1.7	42.4	8.4	3.8	1.3	0.9
6. ค่าดัชนีความเสี่ยงเชิงนิเวศ (Potential Ecological Risk Intensity; RI)											
RI	128	212	344	315	147	442	4,116	1,446	173	69	70
	ต่ำ	ปานกลาง	สูง	สูง	ต่ำ	สูง	สูงมาก	สูงมาก	ปานกลาง	ต่ำ	ต่ำ

^{1/} ค่าเฉลี่ย ± SD^{2/} Soil Texture (เนื้อดิน) : C: Clay (ดินเหนียว), CL: Clay Loam (ดินร่วนเหนียว), L: Loam (ดินร่วน)



3.2 สภาพมลพิษในดินจากการปนเปื้อนโลหะหนัก

ผลการตรวจวัดความเข้มข้นโลหะหนักในดินของแปลงนาทั้ง 11 แปลง โดยพบความเข้มข้นเฉลี่ยของ As, Cd, Cu, Pb และ Zn ในดินมีค่า 11.1, 6.0, 17.1, 30.5 และ 381.9 mg/kg ตามลำดับ (ตารางที่ 2) โดยความเข้มข้นของ As มีค่าระหว่าง 0.5- 25.9 mg/kg Cd มีค่า 0.6 - 39.1 mg/kg Cu มีค่า 8.7 - 25.3 mg/kg Pb มีค่า 11.8 - 113.5 mg/kg และ Zn มีค่า 35 - 3,013.8 mg/kg เรียงลำดับความเข้มข้นเฉลี่ยของโลหะหนักในดิน Zn > Pb > Cu > As > Cd

จากการเปรียบเทียบกับค่ามาตรฐานการปนเปื้อนในดินพบว่าปริมาณโลหะหนักในดินเกินค่ามาตรฐานของดินในพื้นที่เกษตรโดยปริมาณของ As และ Cd เกินค่ามาตรฐานดินของประเทศไทย [14] และปริมาณของ Cd Pb และ Zn เกินค่ามาตรฐานดินของสหภาพยุโรป และปริมาณ As Cd และ Zn เกินค่ามาตรฐานดินของประเทศไทย ในขณะที่ปริมาณ Cu ในดินมีค่าไม่เกินค่ามาตรฐานของประเทศไทยและสหภาพยุโรป [4] (ตารางที่ 2) แสดงให้เห็นว่าการเสื่อมสภาพของดินเนื่องจากการปนเปื้อนของ As Cd Pb และ Zn มากเกินขีดจำกัด จนอาจเป็นอันตรายต่อสุขภาพอนามัยของมนุษย์ ตลอดจนการเจริญเติบโตของสิ่งมีชีวิตจากการรับสารมลพิษจากดิน

การวิเคราะห์สภาพมลพิษในดิน (Soil Pollution status) เป็นการวิเคราะห์ระดับความรุนแรงของมลพิษทางดินของแปลงนาโดยวิธีวิเคราะห์ค่าดัชนีทางธรณีเคมี ได้แก่ ค่าดัชนีการสะสมเชิงธรณี (Igeo) ค่าการสะสมตัวของโลหะหนักโดยใช้ปัจจัยการสะสมตัวของโลหะหนักในดิน (EF) และค่าดัชนีความเสี่ยงเชิงนิเวศ (RI) ของดินในแปลงนาที่ศึกษา แสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 2 ปริมาณโลหะหนักในดินแปลงนาที่ศึกษา

	ความเข้มข้นโลหะหนัก (mg/kg)				
	As	Cd	Cu	Pb	Zn
1. ดินแปลงนาที่ศึกษา					
Min	0.5	0.6	8.7	11.8	35.0
Max	25.9	39.1	25.3	113.5	3013.8
Mean	11.1	6.0	17.1	30.5	381.9
SD	9.3	11.5	5.8	28.5	879.8
Detection limit	0.05	0.04	0.08	0.06	0.10
2. เกณฑ์มาตรฐาน (Guidelines)					
ไทย	3.9	37	-	400	-
จีน	20	0.6	100	350	300
สหภาพยุโรป	-	3	140	100	300

พบว่าค่าดัชนีการสะสมเชิงธรณี (Igeo) ของตัวอย่างดินทุกแปลงมีค่าดัชนีการสะสมเชิงธรณีของ Cu อยู่ในระดับที่ไม่มีการปนเปื้อน (Igeo <1) ในขณะที่พบการปนเปื้อนของ As Cd Pb และ Zn ในดิน โดยค่าดัชนีการสะสมเชิงธรณีของ As (Igeo-As = -2.5 ถึง 3.2) บ่งบอกระดับการปนเปื้อนของ As อยู่ในระดับที่ไม่มีการปนเปื้อนไปจนถึงมีการปนเปื้อนสูง ส่วนค่าดัชนีการสะสมเชิงธรณีของ Pb (Igeo-Pb = -1.4 ถึง 1.9) แสดงถึง Pb อยู่ในระดับที่ไม่มีการปนเปื้อนถึงมีการปนเปื้อนปานกลาง ส่วนค่าดัชนีการสะสมเชิงธรณีของ Cd (Igeo-Cd = 0.3 ถึง 6.4) แสดงระดับการปนเปื้อนของ Cd อยู่ในระดับปานกลางถึงระดับสูงมาก ในขณะที่ ค่าดัชนีการสะสมเชิงธรณีของ Zn (Igeo-Zn = -2.0 - 4.4) อยู่ในระดับที่ไม่มีการปนเปื้อนไปจนถึงมีการปนเปื้อนสูงมาก



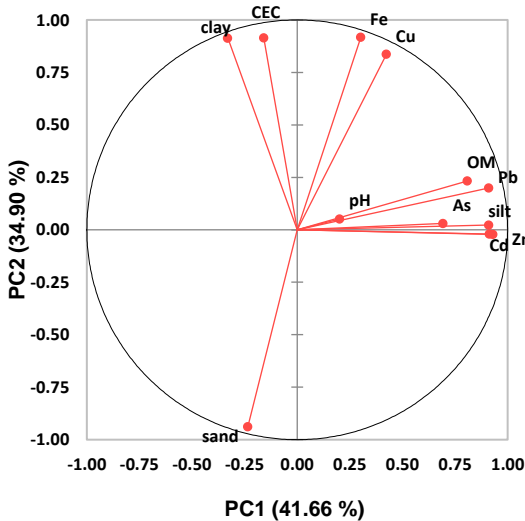
สำหรับผลการประเมินค่า EF (Enrichment Factor) หรือค่าปัจจัยการสะสมตัวของ Cd (EF= 4.6 ถึง 174.2) บ่งชี้ว่า การปนเปื้อนของ Cd ได้รับอิทธิพลจากกิจกรรมมนุษย์อยู่ในระดับปานกลางถึงรุนแรงและ Zn (EF= 0.6 ถึง 42.4) ในดิน แสดงให้เห็นว่าการปนเปื้อนของ Zn ในดินได้รับอิทธิพลจากกิจกรรมมนุษย์อยู่ในระดับน้อยถึงระดับรุนแรง ในขณะที่ปัจจัยการสะสมตัวของ As (EF= 0.1 ถึง 2.7) ในดินพบว่าได้รับอิทธิพลระดับน้อยจนถึงได้รับอิทธิพลปานกลางจากกิจกรรมมนุษย์ ส่วน Pb (EF= 1.6 ถึง 7.6) ในดินได้รับอิทธิพลจากกิจกรรมมนุษย์อยู่ในระดับน้อยถึงระดับสูง ในขณะที่ปัจจัยการสะสมตัวของ Cu ในดินอยู่ในระดับที่ไม่ได้รับอิทธิพลจนถึงได้รับอิทธิพลน้อยจากกิจกรรมมนุษย์ การประเมินค่าดัชนีความเสี่ยงทางนิเวศ (RI) ของแปลงนาที่ศึกษา พบว่ามีค่าระหว่าง 69 ถึง 4,116 โดยสามารถแบ่งแปลงนาได้เป็น 4 กลุ่มตามระดับการปนเปื้อนดินที่มีผลต่อระบบนิเวศ ได้แก่ ระดับต่ำ ระดับปานกลาง ระดับสูง และระดับสูงมาก (ตารางที่ 1)

3.3 การประเมินปัจจัยที่ส่งผลต่อการปนเปื้อนโลหะหนักในดิน

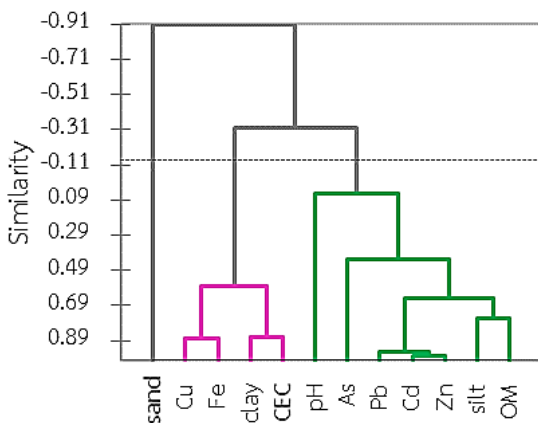
การปนเปื้อนของโลหะหนักในดินอาจมีสาเหตุมาจากปัจจัยทั้งสภาพธรรมชาติและจากกิจกรรมของมนุษย์ การวิเคราะห์ปัจจัยที่ส่งผลต่อการปนเปื้อนโลหะหนักในดินโดยใช้ค่าสถิติการวิเคราะห์องค์ประกอบหลัก (Principal Components Analysis; PCA) ที่มีการหมุนแกนแบบอโรโกนอลด้วยวิธีแวนริแมกซ์ (Varimax Rotation) และทวนสอบผลกับค่าจากการวิเคราะห์กลุ่ม (Cluster Analysis; CA) [6] แสดงในรูปที่ 2 และตารางที่ 3

ผลการศึกษา พบว่า องค์ประกอบที่มีค่าไอเกน (Eigen value) ที่มากกว่า 1 จำนวน 3 องค์ประกอบ โดยมี 2 องค์ประกอบที่สามารถอธิบายตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับปัจจัยการปนเปื้อนโลหะหนักในดินซึ่งมีค่าสัดส่วนความแปรปรวนสะสม 76.56 % องค์ประกอบดังกล่าว ได้แก่ PC1 และ PC2 โดย PC1 สามารถอธิบายความแปรปรวนของตัวแปรได้ 41.66 % ประกอบด้วยตัวแปร As Cd Pb และ Zn ซึ่งมีความสัมพันธ์ในทิศทางเดียวกับ OM และ silt เนื่องจากอินทรีย์วัตถุในดินสามารถดูดซับโลหะหนักได้ดี ทำให้เป็นแหล่งสะสม As Cd Pb และ Zn ส่วน PC2 สามารถอธิบายความแปรปรวนของตัวแปรได้ 34.9 % โดยพบว่าค่า CEC มีความสัมพันธ์ในทิศทางเดียวกับ Cu Fe และ clay แต่มีความสัมพันธ์ในทิศทางตรงกันข้ามกับ sand สามารถอธิบายได้ว่า ตัวอย่างดินประเภท clay ซึ่งมีค่า CEC สูง มีความสามารถในการดูดซับโลหะหนักที่มีประจุบวก ทำให้มีการตรวจพบค่า Cu Fe สูง ซึ่งตรงกันข้ามกับตัวอย่างดินประเภท sand ที่มีค่า CEC ต่ำ และเมื่อทวนสอบความสอดคล้องของตัวแปรระหว่างผลการวิเคราะห์ PCA กับผลการวิเคราะห์ CA (รูปที่ 3) พบว่าตัวแปรโลหะหนักมีความสอดคล้องในแนวเดียวกัน และมีความสอดคล้องกับค่า EF จากผลการวิเคราะห์ดังกล่าวบ่งชี้ว่า Cu ที่พบในดินเกิดจากสภาพธรรมชาติ ในขณะที่การปนเปื้อนของ As Cd Pb และ Zn เกิดจากทั้งสภาพธรรมชาติและกิจกรรมของมนุษย์ เมื่อพิจารณาค่าความสอดคล้องระหว่างค่า Igeo-Cd และ Igeo-Zn และค่า EF แสดงให้เห็นว่าระดับการปนเปื้อนของ Cd และ Zn สูงการปนเปื้อนเกิดจากกิจกรรมของมนุษย์

Variables (axes PC1 and PC2: 76.56 %)



รูปที่ 2 ปัจจัยที่ส่งผลต่อการปนเปื้อนโลหะหนักในดินจากการวิเคราะห์องค์ประกอบหลัก (PCA)



รูปที่ 3 การวิเคราะห์ตัวแปรที่มีผลต่อการปนเปื้อนโลหะหนักในดินด้วยวิธี Hierarchical Cluster Analysis

ตารางที่ 3 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบหลักสำหรับการวิเคราะห์ปัจจัยที่ส่งผลต่อการปนเปื้อนโลหะหนัก

ตัวแปร	ค่าถ่วงน้ำหนักปัจจัย (Factor Loadings)		
	PC1	PC2	PC3
As	0.694	0.030	0.161
Cd	0.914	-0.020	0.299
Cu	0.424	0.836	-0.126
Pb	0.911	0.199	0.242
Zn	0.931	-0.022	0.208
Fe	0.302	0.917	0.037
sand	-0.235	-0.938	0.054
silt	0.911	0.023	-0.238
clay	-0.330	0.913	0.093
pH	0.202	0.052	0.913
OM	0.809	0.233	-0.178
CEC	-0.159	0.914	0.118

3.4 ระดับการปนเปื้อนโลหะหนักในเมล็ดข้าวและค่าความเสี่ยงต่อสุขภาพจากการบริโภค

จากการวิเคราะห์ระดับการปนเปื้อนโลหะหนักในเมล็ดข้าวที่ได้จากแปลงนาที่ศึกษาพบว่าความเข้มข้นเฉลี่ยในเมล็ดข้าวของ $Zn > Cu > Cd > As \cong Pb$ โดยปริมาณ As มีค่า 0.03 - 0.36 mg/kg Cd มีค่า <0.03 - 0.46 mg/kg Cu มีค่า 0.46 - 1.82 mg/kg Pb มีค่าระหว่าง <0.04 - 0.34 mg/kg และ Zn มีค่า 14.83-25.45 mg/kg เมื่อเทียบค่ามาตรฐานของโลหะหนักในเมล็ดข้าว [4] พบว่าเมล็ดข้าวมีการปนเปื้อนของ As Cd และ Pb เกินค่ามาตรฐานของโลหะหนักในเมล็ดข้าวตามมาตรฐานของประเทศจีน และพบปริมาณ As และ Cd ในเมล็ดข้าวสารเกินค่ามาตรฐาน



ของ WHO/FAO: Codex (CXS 193-1995) [5] แสดงดังตารางที่ 4 สำหรับผลการประเมินความเสี่ยงต่อสุขภาพของผู้บริโภคจากพิษของโลหะหนัก (As Cd Cu Pb และ Zn) โดยพิจารณาค่า Hazard Quotient (HQ) ของผลผลิตข้าวจากแปลงนาทั้ง 11 แปลงพบว่าแปลงนาส่วนใหญ่ให้ผลผลิตข้าวที่มีความเสี่ยงต่อสุขภาพของผู้บริโภค ยกเว้นแปลง R1 R4 R5 R10 และ R11 และจากผลการศึกษาพบแปลงนาที่มีค่าความเสี่ยงรวมสูง (Total HQ >1) จำนวน 6 แปลง ซึ่งคิดเป็น 55% ของแปลงนาทั้งหมด โดยแปลงนา 5 แปลง ได้แก่ R2 R3 R6 R7 และ R8 มีค่าความเสี่ยงสูงจากการสะสมของ As ในเมล็ดข้าว และมี 4 แปลง ได้แก่ R6 R7 R8 และ R9 มีค่าความเสี่ยงสูงจากการสะสมของ Cd ในเมล็ดข้าว แสดงให้เห็นว่าการใช้ประโยชน์ด้านการเพาะปลูกข้าวในแปลงนาที่ดินมีการปนเปื้อนโลหะสูงมีโอกาให้เกิดการปนเปื้อนในเมล็ดข้าวซึ่งมีความเสี่ยงต่อสุขภาพของผู้บริโภค

3.5 ประเมินสภาวะมลพิษดินต่อค่าความเสี่ยงจากการบริโภคข้าวของแปลงนา

ในพื้นที่เกษตรที่มีการผลิตพืชอาหารปัจจัยด้านดินมีความสำคัญต่อคุณภาพผลผลิตที่มีความปลอดภัยต่อผู้บริโภค การประเมินสภาวะมลพิษดินของแปลงนาจากค่าตัวชี้วัดด้านดินและพืช โดยค่าดัชนีด้านธรณีเคมีที่ใช้เป็นตัวชี้วัดระดับมลพิษดิน ได้แก่ ค่าดัชนีการสะสมโลหะหนักในดิน (Igeo) ค่าดัชนีความเสี่ยงทางนิเวศ (Potential Ecological Risk Index: RI) เป็นต้น [2] ส่วนดัชนีด้านพืชที่ใช้ประเมินสภาพการปนเปื้อนด้วยค่าความเสี่ยงต่อสุขภาพจากการบริโภคเมล็ดข้าวเนื่องจากค่า RI เป็นค่าที่แสดงความเสี่ยงทางนิเวศของระดับโลหะหนักในดินต่อสิ่งมีชีวิตจึงนำมาใช้ใน

ตารางที่ 4 ความเข้มข้นของโลหะหนักในเมล็ดข้าว

แปลงนา	ความเข้มข้นโลหะหนักในเมล็ดข้าว(mg/kg)				
	As	Cd	Cu	Pb	Zn
R1	<0.05	<0.03	1.19	0.10	14.83
R2	0.36	0.10	1.82	0.04	20.52
R3	0.31	0.04	1.11	<0.04	20.82
R4	<0.05	0.06	0.71	<0.04	18.30
R5	<0.05	<0.03	0.88	<0.04	16.50
R6	0.32	0.27	1.26	<0.04	20.21
R7	0.14	0.46	1.36	0.34	23.59
R8	0.20	0.22	0.95	<0.04	25.45
R9	0.05	0.21	1.18	<0.04	21.25
R10	<0.05	<0.03	1.24	<0.04	19.36
R11	<0.05	<0.03	0.46	<0.04	19.46
Min	<0.05	<0.03	0.46	<0.04	14.83
Max	0.36	0.46	1.82	0.34	25.45
Detection limit	0.05	0.03	0.06	0.04	0.07
เกณฑ์มาตรฐาน (Guidelines)					
ประเทศจีน	0.15	0.2	10	0.2	50
สหภาพยุโรป	-	0.2	-	-	-
WHO/FAO	0.2	0.4	-	-	-

การจำแนกแปลงนาตามชั้นของ RI (ตารางที่ 1) สามารถแบ่งแปลงนาออกเป็น 4 กลุ่ม ได้แก่ กลุ่มที่ 1 คือแปลงนาที่ดินมีการปนเปื้อนต่ำ กลุ่มที่ 2 คือแปลงนาที่ดินมีการปนเปื้อนปานกลาง กลุ่มที่ 3 คือแปลงนาที่ดินมีการปนเปื้อนสูง และกลุ่มที่ 4 คือแปลงนาที่ดินมีการปนเปื้อนสูงมาก ตารางที่ 5 แสดงผลการศึกษาความเสี่ยงต่อสุขภาพจากการบริโภคข้าวที่ปลูกในแปลงนาที่มีสภาพการปนเปื้อนของดินในระดับปานกลางถึงสูงมาก (กลุ่มที่ 2 กลุ่มที่ 3 และกลุ่มที่ 4) พบว่าในแปลงนาเกือบทุกแปลง ให้ค่าความเสี่ยงรวมมากกว่า 1 (Total HQ > 1) แสดงถึง



ตารางที่ 5 ระดับความเสี่ยงต่อสุขภาพจากการบริโภคข้าวปนเปื้อนโลหะหนักของกลุ่มแปลงนา 4 กลุ่ม

แปลง	Hazard quotient (HQ) ^{1/}					Total HQ
	As	Cd	Cu	Pb	Zn	
กลุ่มที่ 1 แปลงนาที่ดินมีการปนเปื้อนต่ำ (R1 R5 R10 R11)						
R1	0.00 ± 0.00	0.00 ± 0.00	0.16 ± 0.03	0.12 ± 0.03	0.25 ± 0.02	0.53 ± 0.05
R5	0.00 ± 0.00	0.00 ± 0.00	0.12 ± 0.06	0.00 ± 0.00	0.28 ± 0.02	0.33 ± 0.08
R10	0.00 ± 0.00	0.00 ± 0.00	0.17 ± 0.03	0.00 ± 0.00	0.32 ± 0.04	0.49 ± 0.08
R11	0.00 ± 0.00	0.00 ± 0.00	0.06 ± 0.02	0.00 ± 0.00	0.32 ± 0.02	0.39 ± 0.03
กลุ่มที่ 2 แปลงนาที่ดินมีการปนเปื้อนปานกลาง (R2 R9)						
R2	3.94 ± 1.24	0.48 ± 0.18	0.25 ± 0.06	0.03 ± 0.03	0.34 ± 0.02	5.03 ± 1.08
R9	0.00 ± 0.00	1.03 ± 0.26	0.16 ± 0.00	0.00 ± 0.00	0.35 ± 0.02	1.54 ± 0.28
กลุ่มที่ 3 แปลงนาที่ดินมีการปนเปื้อนสูง (R3 R4 R6)						
R3	3.47 ± 0.99	0.20 ± 0.21	0.15 ± 0.02	0.00 ± 0.00	0.35 ± 0.02	4.16 ± 1.24
R4	0.00 ± 0.00	0.28 ± 0.19	0.10 ± 0.02	0.00 ± 0.00	0.31 ± 0.02	0.68 ± 0.22
R6	3.60 ± 0.61	1.35 ± 0.44	0.17 ± 0.01	0.00 ± 0.00	0.34 ± 0.02	5.46 ± 1.07
กลุ่มที่ 4 แปลงนาที่ดินมีการปนเปื้อนสูงมาก (R7 R8)						
R7	1.53 ± 0.45	2.28 ± 0.49	0.18 ± 0.07	0.42 ± 0.10	0.39 ± 0.02	4.80 ± 0.77
R8	2.18 ± 0.51	1.08 ± 0.50	0.13 ± 0.04	0.00 ± 0.00	0.42 ± 0.02	3.80 ± 0.95

^{1/} ค่าเฉลี่ย ± SD

ความเสี่ยงระดับสูง ยกเว้นแปลงนา R4 เมื่อพิจารณาความเสี่ยงจากโลหะหนักแต่ละชนิด พบว่าแปลงนา R6 R7 และ R8 มีค่าความเสี่ยงต่อสุขภาพสูงเนื่องจากการปนเปื้อนทั้ง As และ Cd แปลง R2 และ R3 มีค่าความเสี่ยงต่อสุขภาพสูงเนื่องจากการปนเปื้อน As ส่วนแปลงนา R9 มีค่าความเสี่ยงต่อสุขภาพสูงจากการบริโภคเมล็ดข้าวที่ปนเปื้อน Cd ทั้งนี้พบว่ามีความสัมพันธ์ของการจัดชั้นของดินตามค่า RI กับค่าปนเปื้อนในเมล็ดข้าว โดยดินมีการปนเปื้อนสูงมีโอกาสตรวจพบการปนเปื้อนโลหะหนักในเมล็ดข้าวสูง แปลงนาที่ดินมีการปนเปื้อนต่ำ (กลุ่มที่ 1) พบค่าความเสี่ยงรวม (Total HQ) มีค่า

น้อยกว่า 1 ทุกแปลง โดยทุกแปลงในกลุ่ม 1 มีค่าความเสี่ยงแยกธาตุของ As Cd Cu Pb และ Zn น้อยกว่า 1 (HQ < 1) แสดงดังตารางที่ 5 ส่วนแปลงนาที่ดินปนเปื้อนโลหะหนักปานกลางถึงสูงมาก (แปลงนาในกลุ่มที่ 2 กลุ่มที่ 3 และกลุ่มที่ 4) พบว่าเกือบทุกแปลงมีค่าความเสี่ยงสูงต่อสุขภาพโดยเฉพาะจาก As และ Cd ยกเว้น แปลง R4 ทั้งนี้เนื่องจากลักษณะเนื้อดินที่เป็นดินเหนียวและมีค่า CEC สูง ซึ่งมีผลต่อการเคลื่อนย้ายของธาตุโลหะหนักไปสะสมในส่วนของเมล็ดข้าวต่ำกว่าดินร่วนและร่วนเหนียว จากผลการศึกษาชี้ให้เห็นความแตกต่างของการดูดสะสมของโลหะหนักของข้าวนอกจากขึ้นกับระดับความรุนแรง



ของการปนเปื้อนของโลหะหนักในดินแล้วยังขึ้นกับสมบัติดินซึ่งเป็นปัจจัยที่มีผลต่อการเคลื่อนย้ายของโลหะหนักในระบบของดินและพืช

4. บทสรุป

การปนเปื้อนโลหะหนักในดินของพื้นที่ปลูกข้าวบริเวณอุตสาหกรรมเหมืองแร่เก่าส่งผลกระทบต่อการเสื่อมสภาพของที่ดินและการปนเปื้อนโลหะหนักในผลผลิตข้าว ผลการศึกษาพบว่าดินแปลงนา มีระดับการปนเปื้อนของโลหะหนักที่แตกต่างกัน โดยลำดับความรุนแรงของการปนเปื้อนโลหะหนักในดิน ได้แก่ $Cd > Zn > Pb > As$ จากการวิเคราะห์สภาพการปนเปื้อนโลหะหนักในแปลงนาด้วยวิธีการประเมินระดับมลพิษทางดินและความเสี่ยงต่อสุขภาพจากการบริโภคข้าว พบว่าระดับความรุนแรงของสภาพการปนเปื้อนมีความสอดคล้องกันระหว่างค่าดัชนีด้านธรณีเคมี (Geochemical index) ได้แก่ ค่าดัชนีการสะสมเชิงธรณี (Igeo) ค่าปัจจัยการสะสมตัวของโลหะหนักในดิน (EF) ค่าดัชนีความเสี่ยงเชิงนิเวศ (RI) กับค่าความเสี่ยงด้านสุขภาพจากการบริโภคข้าว การศึกษาแปลงนาที่มีระดับการปนเปื้อนต่ำถึงสูง 11 แปลง พบผลผลิตข้าวปนเปื้อน จากแปลงนา 6 แปลง คิดเป็นร้อยละ 55 การจำแนกพื้นที่ด้วยค่าดัชนีความเสี่ยงเชิงนิเวศเป็น 4 กลุ่มตามระดับความเสี่ยงจากการปนเปื้อนมลพิษ มีความสอดคล้องกับระดับความเสี่ยงต่อสุขภาพของการบริโภคข้าวโดยพบว่าแปลงนาที่มีระดับการปนเปื้อนปานกลางถึงสูงมากให้ผลผลิตข้าวที่มีค่าความเสี่ยงต่อสุขภาพของผู้บริโภค (Total HQ > 1) ดังนั้นวิธีการประเมินพื้นที่เกษตรกรรมที่ปนเปื้อนโลหะหนักด้วยค่าดัชนีด้านธรณีเคมีสามารถใช้ใน

การประเมินพื้นที่เกษตรกรรมเพื่อการผลิตอาหารที่ปลอดภัยจากการปนเปื้อนโลหะหนักได้ อย่างไรก็ตามก็ควรศึกษาแนวทางที่เหมาะสมในการฟื้นฟูพื้นที่เกษตรกรรมที่ปนเปื้อนโลหะหนัก เพื่อประโยชน์ในการเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตอาหารที่ปลอดภัยจากพื้นที่เกษตรกรรมที่ปนเปื้อนโลหะหนักต่อไป

5. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณ สำนักงานพัฒนาการวิจัยการเกษตร (องค์การมหาชน) ที่สนับสนุนทุนวิจัย

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] P. Zhuang, Z. Li, B. Zou, H. Xia and G. Wang, Heavy metal contamination in soil and soybean near the Dabaoshan mine, South China, *Pedosphere*, 2013, 23(3), 298-304.
- [2] H. Rajkumar, P.K. Naik and M.S. Rishi, Evaluation of heavy metal contamination in soil using geochemical indexing approaches and chemometric techniques, *International Journal of Environmental Science and Technology*, 2019, 16(11), 7467-7486.
- [3] N. Adimalla, H. Qian and H. Wang, Assessment of heavy metal (HM) contamination in agricultural soil lands in northern Telangana, India: An approach of spatial distribution and multivariate statistical analysis, *Environmental Monitoring Assess*, 2019, 191(4), 246.



- [4] Z. Wang, X. Zeng, M. Geng, C. Chen, J. Cai, X. Yu, Y. Hou and H. Zhang, Health risks of heavy metals uptake by crops grown in a sewage irrigation area in China, *Polish Journal of Environmental Studies*, 2015, 24(3),1379-1386.
- [5] <http://www.fao.org/fao-who-codexalimentarius/codex-texts/list-standards/en/>. (Accessed on 25 June 2021)
- [6] B.A. Fonge, M.T. Larissa, A.M. Egbe, Y.A. Afanga, N.G. Fru and V.M. Ngole-Jeme, An assessment of heavy metal exposure risk associated with consumption of cabbage and carrot grown in a tropical Savannah region, *Sustainable Environment*, 2021, 7(1), 1-19.
- [7] Land Development Department of Thailand, Analytical manual for soil, water, fertilizer, plant and soil improvement materials, LDD, Thailand, 2004. (in Thai)
- [8] M. Peech, Soil pH by glass electrode pH meter, American Society of Agronomy, Inc., WI, USA, 1965.
- [9] A. Walkley and I.A. Black., Chromic and titration method for determination of soil organic matter, *Soil Science Society of America: Proceedings*, 1947, 63, 257.
- [10] H.D. Chapman and M.R. Carter, *Methods of soil analysis: part 2*, American Society of Agronomy, Inc., WI, USA, 1996.
- [11] U.S. EPA Method 3051A (SW-846), Microwave assisted acid digestion of sediments, sludges, soils, and oils, Washington D.C., USA, 2007.
- [12] Z. Hseu, Evaluating heavy metal contents in nine composts using four digestion methods, *Bioresource Technology*, 2004, 5, 53–59.
- [13] K.K. Turekian and K.H. Wedepohl, Distribution of the elements in some major units of the earths crust, *Geological Society of America Bulletin*, 1961, 72(2), 175-192.
- [14] Pollution Control Department of Thailand, Soil quality standards for habitat and agriculture, Ministry of Natural Resources and Environment of Thailand, 2004.