ความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีกับความเข้มข้นทั้งหมดของแคดเมียมและสารหนูในดินนาข้าว: กรณีศึกษาของพื้นที่ ต.แม่ตาว อ.แม่สอด จ.ตาก

Relationships Between Physical and Chemical Properties and Total Cadmium and Arsenic Concentrations in Paddy Soils: A Case Study of Mae Tao Sub-district, Mae Sot District, Tak Province

มนตรี ผลสินธ์ (Montree Ponsin)* ดร. เพ็ญรดี จันทร์ภิวัฒน์ (Dr.Penradee Chanpiwat)**

บทคัดย่อ

การปนเปื้อนแคดเมียมและสารหนูในดินนาข้าวเป็นปัญหาสิ่งแวดล้อมที่สำคัญ เมื่อมีการปนเปื้อนในดินอาจก่อให้เกิดการปนเปื้อนของแคดเมียมและสารหนูในผลผลิตทางการเกษตรได้ ดังนั้น การศึกษานี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของดินที่มีผลต่อความเข้มข้นทั้งหมดของแคดเมียมและสารหนูในดินนาข้าว ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของตัวอย่างดินนาข้าว จำนวน 36 ตัวอย่าง พบค่าเฉลี่ยความเป็นกรด-ด่าง, ความต่างศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชัน และความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวกในดินนาข้าว เท่ากับ 6.8, 228.3 มิลลิโวลต์ และ 12.8 เซนติโมลต่อกิโลกรัม ตามลำดับ ปริมาณอินทรียวัตถุในดินมีค่าเฉลี่ยเท่ากับร้อยละ 1.83 ส่วนความเข้มข้นทั้งหมดของแคดเมียมและสารหนูในดินนาข้าว พบว่ามีค่าสูงกว่ามาตรฐานคุณภาพดินเพื่อการเกษตรกรรมของประเทศไทย (ต้องไม่เกิน 37 และ 3.9 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ) คิดเป็น 2.78 และ 100 เปอร์เซ็นต์ของตัวอย่างทั้งหมด ตามลำดับ ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ทางสถิติแสดงให้เห็นว่าความเข้มข้นของแคดเมียมในตัวอย่างดินนาข้าวไม่มีความสัมพันธ์อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติกับคุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของดิน ในขณะที่ความเข้มข้นทั้งหมดของสารหนูในดินนาข้าว พบว่ามีความสัมพันธ์กับสัดส่วนของอนุภาคดินเหนียวในตัวอย่างดินนาข้าวกลุ่ม 2 (R^2= -0.822) กลุ่ม 3A (R^2=0.822) และกลุ่ม 3B (R^2=0.757) อีกทั้งยังมีสัมพันธ์กับความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวกของตัวอย่างดินนาข้าวกลุ่ม 3A (R^2=0.637) และกลุ่ม 3B (R^2=0.540) ที่ระดับนัยสำคัญ ($p<0.05$)

ABSTRACT

Contamination of cadmium (Cd) and arsenic (As) in agricultural soil especially, paddy soil is one of the important environmental problems. This is due to the fact that both elements can be transferred to the agricultural products and cause negative human health impacts. The objective of this study was to study the relationships between physical and chemical properties of soil and total concentrations of Cd and As in the soils. The results of physical and chemical analyses of 36 soil samples showed the average pH, oxidation-reduction potential and cation exchange capacity of 6.8, 228.3 mV, and 12.8 c mol kg^{-1}, respectively. The average level of organic matter was 1.83%. When total Cd and As in the paddy soil samples were compared to the soil quality standard for agricultural purposes for Cd (37 mg kg^{-1}) and As (3.9 mg kg^{-1}), approximately 2.78% and 100% of all soil samples contained Cd and As higher than the standard. The results of statistical analyses showed no significant relationship between physical and chemical properties of soils and total Cd concentrations in the soil, while significant relationships between the proportion of clay particle and total As were found for the soil samples in Group 2 (R^2=-0.822), Group 3B (R^2=0.822), and Group 3B (R^2=0.757). Furthermore, total As concentrations in soils were well correlated to the cation exchange capacity in soil from Group 3A (R^2=0.637) and Group 3B (R^2=0.540).

คำสำคัญ: แคดเมียม สารหนู ดินนาข้าว

Keywords: Cadmium, Arsenic, Paddy soil

*นิสิตหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

**ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สถาบันวิจัยสภาวะแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทนำ

ปัญหาการปนเปื้อนแคดเมียม (Cd) และสารหนู (As) ในพื้นที่เกษตรกรรมนับเป็นปัญหาสิ่งแวดล้อมที่นักวิจัยทั่วโลกให้ความสนใจอย่างต่อเนื่อง (Liu et al., 2017) ระดับความเข้มข้นของแคดเมียมและสารหนูในดินที่ปนเปื้อนอาจมีค่าสูงถึง 2-10 เท่า จากระดับที่สามารถพบได้ทั่วไปในดิน (0.01-2.0 และ 0.1-55 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม สำหรับแคดเมียมและสารหนู ตามลำดับ) (Bowen, 1979) การปนเปื้อนแคดเมียมและสารหนูในสิ่งแวดล้อมอาจมีสาเหตุมาจากกระบวนการทางธรรมชาติ เช่น การผุพังของวัตถุต้นกำเนิดดิน การระเบิดของภูเขาไฟ และกิจกรรมของมนุษย์ เช่น อุตสาหกรรมการทำเหมืองแร่และหลอมโลหะ รวมไปถึงการใช้ปุ๋ยและยาฆ่าแมลงเพื่อการเกษตรกรรม เป็นต้น (Chibuike and Obiora, 2014; Nordstrom, 2002; Liu et al., 2005) ดังเช่น ผลการศึกษาการปนเปื้อนแคดเมียมและสารหนูในดินเพื่อการเกษตรกรรมโดยรอบเหมืองแร่ในประเทศเทศจีน ที่พบความเข้มข้นของแคดเมียมและสารหนูในดินมีค่าสูงถึง 11.7 และ 35.1 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ (Xue et al., 2017) นอกจากนั้น Adriano (2001) ยังได้รายงานความเป็นไปได้ว่าดินในพื้นที่รอบเหมืองแร่ อาจมีการปนเปื้อนแคดเมียมและสารหนูได้ถึง 1,000 เท่า ของระดับที่สามารถพบได้ทั่วไปในดิน การปนเปื้อนของแคดเมียมและสารหนูในดินนั้นไม่เพียงก่อให้เกิดผลกระทบต่อลักษณะการใช้ประโยชน์ที่ดินเพื่อการเกษตรกรรมเท่านั้น แต่ยังอาจก่อให้เกิดการปนเปื้อนของโลหะหนักอันตรายดังกล่าวลงสู่น้ำใต้ดิน แหล่งน้ำผิวดิน และห่วงโซ่อาหารอีกด้วย (Simmons et al., 2005; Wuana and Okieimen, 2011; Sriprachote et al., 2012) เช่น การสะสมแคดเมียมในพืชอาหาร และการรับสัมผัสแคดเมียมผ่านการบริโภคข้าวที่ปนเปื้อนในประเทศญี่ปุ่นในช่วงศตวรรษที่ 20 จนส่งผลให้เกิดโรคอิไต-อิไต (Itai-itai) และการรับสัมผัสสารหนูผ่านการบริโภคน้ำบาดาลและข้าว ในประเทศกัมพูชา และบังคลาเทศ จนส่งผลให้เกิดโรคมะเร็งผิวหนัง และเกิดจุดสีดำบนฝ่ามือฝ่าเท้า เหล่านี้เป็นตัวอย่างที่แสดงให้เห็นอย่างชัดเจนถึงความเป็นพิษของแคดเมียมและสารหนูต่อสุขภาพมนุษย์ (Chen et al., 2005; Raghunath et al., 1999)

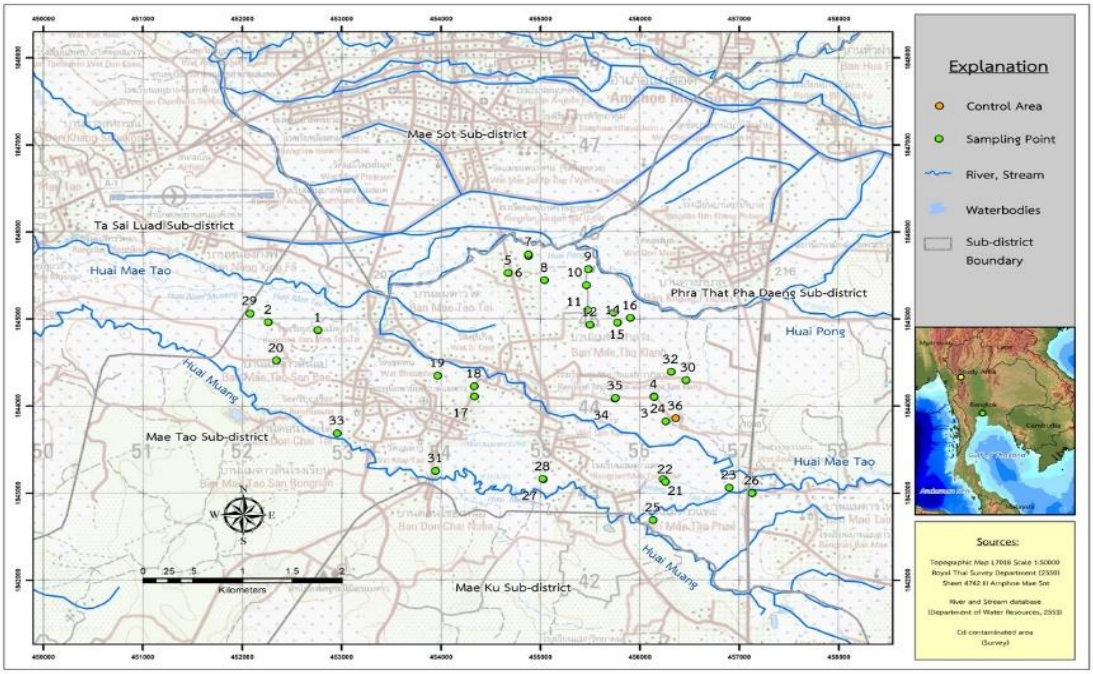
ประเทศไทยมีภาคเกษตรกรรมเป็นหนึ่งในภาคส่วนการผลิตที่สำคัญต่อระบบเศรษฐกิจ และยังมีความสำคัญต่อการผลิตอาหารเพื่อรองรับประชากรทั้งประเทศ (Sriprachote et al., 2012; Swaddiwudhipong et al., 2010; Zarcinas et al., 2004) โดยพบว่าร้อยละ 46.9 ของพื้นที่เกษตรกรรมในประเทศไทยนั้นเป็นพื้นที่นาข้าว (สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร, 2556) ผลการศึกษาระดับความเข้มข้นของแคดเมียมและสารหนูในดินนาข้าวของพื้นที่เพาะปลูกข้าวที่สำคัญแหล่งหนึ่งของประเทศไทย คือ พื้นที่อำเภอแม่สอด จังหวัดตาก มีการศึกษาและรายงานการปนเปื้อนแคดเมียมและสารหนูในดินนาข้าวสูงถึง 284 และ 14.3 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ ซึ่งสูงกว่ามาตรฐานคุณภาพดินเพื่อการเกษตรกรรมของประเทศไทย (ต้องไม่เกิน 37 และ 3.9 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม) ถึง 7.3 และ 3.7 เท่า ตามลำดับ ด้วยเหตุนี้จึงมีรายงานพบการปนเปื้อนแคดเมียมในเมล็ดข้าวสูงถึง 7.7 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ซึ่งสูงเกินกว่าค่ามาตรฐานอาหารของ FAO/WHO (0.4 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม) (Simmons et al., 2005; สำนักวิทยาศาสตร์เพื่อการพัฒนาที่ดิน, 2552) ทั้งนี้ยังมีรายงานการศึกษาถึงปัจจัยที่มีผลต่อการสะสมแคดเมียมและสารหนูในข้าวที่พบว่าการสะสมของแคดเมียมและสารหนูนั้นจะขึ้นอยู่กับปัจจัยแวดล้อมต่าง ๆ ในพื้นที่เพาะปลูกข้าวเป็นสำคัญ เช่น ระดับความเข้มข้นทั้งหมดและรูปฟอร์มทางเคมีของธาตุที่ปนเปื้อน เนื้อดิน (Soil Type) ความต่างศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชัน (Eh) ความเป็นกรด-ด่าง (pH) ความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวกของดิน (CEC) ปริมาณอินทรียวัตถุในดิน (OM) เป็นต้น (Sebastian and Prasad, 2014; Azam et al., 2016)

ด้วยเหตุปัจจัยดังกล่าวข้างต้น การศึกษานี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อ 1) วิเคราะห์คุณสมบัติของดินนาข้าวทางกายภาพ (เนื้อดิน (Soil Type)) และทางเคมี (ความเป็นกรด-ด่าง (pH) ความต่างศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชัน (Eh) ความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวกของดิน (CEC) ปริมาณอินทรียวัตถุในดิน (OM) ความเข้มข้นทั้งหมดของแคดเมียม (Total Cd) และความเข้มข้นทั้งหมดของสารหนู (Total As)) 2) ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของดินนาข้าวที่มีผลต่อความเข้มข้นทั้งหมดของแคดเมียมและสารหนูในดินนาข้าว

วิธีการวิจัย

1) การเก็บและเตรียมตัวอย่างดิน

การศึกษานี้ได้ดำเนินการเก็บตัวอย่างดินนาข้าวแบบสุ่ม (Random Sampling) จากแปลงนาข้าวในพื้นที่ตำบลแม่ตาว อำเภอแม่สอด จังหวัดตาก (รูปที่ 1) เป็นจำนวน 36 พื้นที่ โดยได้ทำการคัดเลือกจุดเก็บตัวอย่างแบบสุ่มทั้งสิ้น 5 จุดต่อ 1 พื้นที่ศึกษา (10×10 ตารางเมตร) ในแต่ละจุดเก็บตัวอย่างได้ดำเนินการเอาสิ่งปกคลุมหน้าดินออก แล้วจึงใช้จอบ พลั่ว และเสียม ขุดเจาะดินให้เป็นหลุมรูปตัว V ที่ระดับความลึกประมาณ 0-15 เซนติเมตร เพื่อเก็บตัวอย่างดินจุดเก็บตัวอย่างละประมาณ 2 กิโลกรัม แล้วจึงนำตัวอย่างดินทั้งหมดมาคลุกเคล้าและผสมรวมให้เป็นตัวอย่างเดียวกัน (Composite Sample) หลังจากนั้นแบ่งตัวอย่างดินออกเป็น 4 ส่วน เท่า ๆ กัน แล้วจึงสุ่มเก็บตัวอย่างดิน 1 ส่วนใส่ในถุงพลาสติกสำหรับการวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของดินในลำดับต่อไป ตัวอย่างดินทั้งหมดได้ถูกนำไปผึ่งในที่ร่มจนแห้งแล้วจึงถูกนำมาบดให้ละเอียดและร่อนผ่านตะแกรงขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 2 มิลลิเมตร หลังจากนั้นจึงถูกนำไปอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง (Tokalioglu et al., 2003) แล้วเก็บไว้ในถุงพลาสติกและเก็บในตู้ปราศจากความชื้นเพื่อวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของดินในลำดับต่อไป (DOA, 2010)



รูปที่ 1 แผนที่แสดงจุดเก็บตัวอย่างดินนาข้าวในตำบลแม่ตาว อำเภอแม่สอด จังหวัดตาก

2) การวิเคราะห์ตัวอย่างดิน

การศึกษานี้ได้ดำเนินการคัดเลือกคุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของดินที่สำคัญและเกี่ยวข้องกับการเพาะปลูก และยังมีรายงานก่อนหน้าที่พบว่าความเข้มข้นทั้งหมดของแคดเมียมและสารหนูในดินขึ้นอยู่กับปัจจัยแวดล้อมต่าง ๆ ในพื้นที่เพาะปลูกข้าวเป็นสำคัญ เช่น เนื้อดิน (Soil Type) ความต่างศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชัน (Eh) ความเป็นกรด-ด่าง (pH) ความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวกของดิน (CEC) ปริมาณอินทรียวัตถุในดิน (OM) เป็นต้น (สารานุกรมไทยสำหรับเยาวชน, 2539; Sebastian and Prasad, 2014; Azam et al., 2016) และได้ดำเนินการวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของดินสรุปได้ดังตารางที่ 1 โดยสารเคมีที่ใช้ในการศึกษานี้ทั้งหมดเป็นสารเคมีประเภทเกรดงานวิเคราะห์ (Analytical grade) โดยได้ดำเนินการทดลองด้วยอุปกรณ์และสารเคมีดังที่แสดงรายละเอียดไว้ในงานวิจัยที่ผ่านมา (Walkley and Allan, 1947; Husain et al., 1995; Makino et al., 2006; DOA, 2010)

ตารางที่ 1 การวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของดิน

คุณสมบัติของดิน	**วิธีวิเคราะห์**	**เอกสารอ้างอิง**
เนื้อดิน (Soil Type)	Hydrometer Method	DOA (2010)
ความต่างศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชัน (Eh)	Glass-electrode Method โดยผสมดินและน้ำอัตราส่วน 1:2.5 แล้ววัดด้วยเครื่อง Oxidation-Reduction Potential (ORP)	Makino et al. (2006)
อินทรียวัตถุ (OM)	Walkley and Black Method	Walkley and Allan (1947)
ความเป็นกรด-ด่าง (pH)	Glass-electrode Method โดยผสมดินและน้ำอัตราส่วน 1:2.5 แล้ววัดด้วยเครื่อง pH meter	Makino et al. (2006)
ความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวก (CEC)	สกัดด้วยสารละลาย 1 N Ammonium Acetate (pH 7.0)	DOA (2010)
ความเข้มข้นทั้งหมดของแคดเมียมและสารหนูในดิน (Total cadmium and arsenic concentrations)	ย่อยตัวอย่างดินด้วย conc. HCl และ conc. HNO_3 ในอัตราส่วน 3:1 แล้วให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส ด้วยเครื่องควบคุมอุณหภูมิหลอดทดลอง (Heating Block) เป็นเวลา 6 ชั่วโมง แล้วจึงนำตัวอย่างไปวิเคราะห์ความเข้มข้นทั้งหมดของแคดเมียมและสารหนูในดินนาข้าว ด้วยเครื่อง Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectrometry (ICP-OES)	Husain et al. (1995)

3) การควบคุมคุณภาพของการย่อยและตรวจวิเคราะห์ความเข้มข้นของแคดเมียมและสารหนูในดิน

การควบคุมคุณภาพในการย่อยตัวอย่างดินเพื่อการวิเคราะห์ความเข้มข้นทั้งหมดของแคดเมียมและสารหนูได้ดำเนินการย่อยสารมาตรฐานดิน ซึ่งได้แก่ Standard Reference Material 1944 (New York/New Jersey Waterway Sediment) ด้วยกระบวนการเดียวกันกับการย่อยตัวอย่างดินเป็นจำนวน 2 ซ้ำ เพื่อตรวจสอบปริมาณร้อยละคืนกลับ (% Recovery) ของวิธีย่อยตัวอย่าง โดยยอมรับค่าร้อยละคืนกลับของการย่อยตัวอย่างที่ความคลาดเคลื่อนไม่เกิน ±15% ของค่าความเข้มข้นของแคดเมียมและสารหนูที่มีอยู่ในสารละลายมาตรฐาน

ส่วนการควบคุมความแม่นยำและความเที่ยงตรงของเครื่องมือวิเคราะห์ ICP-OES ได้ใช้สารละลายมาตรฐาน Standard Reference Material 1643e (Trace Elements in water) ที่ทราบค่าความเข้มข้นทั้งหมดของแคดเมียมและสารหนูในการทดสอบ โดยได้ดำเนินการวิเคราะห์สารละลายมาตรฐานด้วยกระบวนการเดียวกันกับการวิเคราะห์ตัวอย่างและยอมรับค่าความแม่นยำและความเที่ยงตรงของเครื่องมือที่ความคลาดเคลื่อนไม่เกิน ±15% ของค่าความเข้มข้นของแคดเมียมและสารหนูที่มีอยู่ในสารละลายมาตรฐานดังกล่าว

4) การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

การศึกษานี้ใช้โปรแกรมสำเร็จรูปทางสถิติ Statistical Package for the Social Science (SPSS) Version 22 ในการ 1) วิเคราะห์ค่าต่ำสุด ค่าสูงสุด ค่าเฉลี่ย ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของคุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของดิน 2) ทดสอบความแตกต่างทางสถิติของคุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของดิน และ 3) ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นทั้งหมดของแคดเมียมและสารหนูกับปัจจัยต่าง ๆ ของตัวอย่างดินนาข้าว ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ โดยใช้ Pearson's correlation

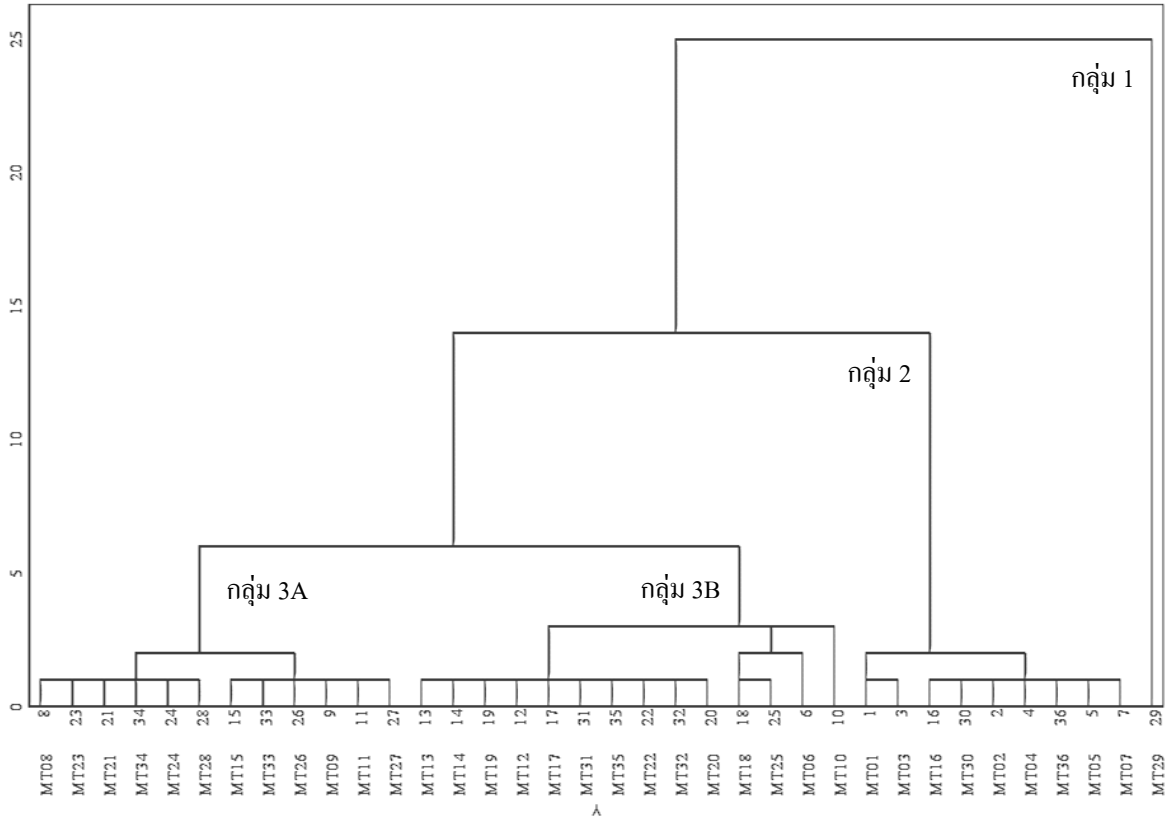
ผลการวิจัย

1) คุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของดินนาข้าว

ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของดินนาข้าวทั้ง 36 พื้นที่ พบว่ามีสัดส่วนของอนุภาคดินทราย (Sand) อยู่ในช่วงร้อยละ 18.20 ถึง 58.40 อนุภาคดินทรายแป้ง (Silt) อยู่ในช่วงร้อยละ 25.0 ถึง 46.0 และอนุภาคดินเหนียว (Clay) อยู่ในช่วงร้อยละ 8.60 ถึง 45.60 ค่าความต่างศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชัน (Eh) มีค่าอยู่ในช่วง 171.4 ถึง 278.8 มิลลิโวลต์ ความเป็นกรด-ด่าง (pH) ของตัวอย่างดินนาข้าวมีค่าอยู่ในช่วง 5.13 ถึง 7.81 ปริมาณอินทรียวัตถุ (OM) ในดินอยู่ในระดับปานกลางถึงสูงปานกลาง (ร้อยละ 0.68 ถึง 3.41) และความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวกในดิน (CEC) มีค่าอยู่ในช่วง 3.32 ถึง 21.42 เซนติโมลต่อกิโลกรัม ในขณะที่ความเข้มข้นของแคดเมียมในตัวอย่างดินนาข้าวมีค่าอยู่ในช่วง 0.20 ถึง 89.87 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ความเข้มข้นเฉลี่ยของแคดเมียมมีค่าเท่ากับ 9.01 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ในส่วนความเข้มข้นของสารหนูทั้งหมดในดินนาข้าวมีค่าอยู่ในช่วง 5.39 ถึง 41.08 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ความเข้มข้นเฉลี่ยของสารหนูทั้งหมดมีค่าเท่ากับ 17.1 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม และเมื่อนำผลการศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของตัวอย่างดินนาข้าวทั้ง 36 ตัวอย่าง มาจัดกลุ่มตัวอย่างที่มีคุณสมบัติคล้ายคลึงกันโดยเทคนิค Hierarchical Cluster Analysis แล้วพบว่า ตัวอย่างดินนาข้าวในการศึกษานี้ สามารถแบ่งออกได้เป็น 4 กลุ่ม คือ กลุ่ม 1 กลุ่ม 2 กลุ่ม 3A และกลุ่ม 3B (รูปที่ 2)

ผลการศึกษาความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติของคุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของดินนาข้าวในแต่ละกลุ่ม พบว่าสัดส่วนของอนุภาคดินเหนียว ค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวกในดิน และปริมาณอินทรียวัตถุในตัวอย่างดินนาข้าวกลุ่ม 1 มีค่าสูงกว่ากลุ่ม 2 กลุ่ม 3A และกลุ่ม 3B อย่างมีนัยสำคัญ โดยมีค่าประมาณ 1.3 ถึง 1.5 เท่า

1.3 ถึง 1.4 เท่า และ 1.7 ถึง 2 เท่า ตามลำดับ สำหรับค่าความต่างศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชันของตัวอย่างดินนาข้าวกลุ่ม 1 และกลุ่ม 2 นั้นพบว่ามีค่าต่ำกว่ากลุ่ม 3B และพบค่าความต่างศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชันของตัวอย่างดินนาข้าวสูงสุดในกลุ่ม 3A ในขณะที่ค่าความเป็นกรด-ด่าง ความเข้มข้นทั้งหมดของแคดเมียมและสารหนูในตัวอย่างดินนาข้าวในกลุ่ม 3A และกลุ่ม 3B มีค่าต่ำกว่ากลุ่ม 2 นอกจากนั้นแล้วยังพบค่าความเป็นกรด-ด่าง ความเข้มข้นทั้งหมดของแคดเมียมและสารหนูที่สูงสุดในกลุ่ม 1 ซึ่งมีค่าสูงกว่ากลุ่ม 2 กลุ่ม 3A และกลุ่ม 3B อย่างมีนัยสำคัญ โดยพบว่าความเข้มข้นทั้งหมดของแคดเมียมและสารหนูในกลุ่มที่ 1 มีค่าสูงกว่ากลุ่ม 2 กลุ่ม 3A และกลุ่ม 3B ประมาณ 6.9 ถึง 22.4 เท่า และ 1.8 ถึง 2.2 เท่า ตามลำดับ นอกจากนั้นแล้วยังพบว่าความเข้มข้นทั้งหมดของแคดเมียมและสารหนูของตัวอย่างดินในกลุ่มที่ 1 มีค่าสูงเกินกว่าเกณฑ์มาตรฐานคุณภาพดินเพื่อการเกษตรกรรมของประเทศไทยถึง 2.4 และ 8.2 เท่า ตามลำดับ ในส่วนของความเข้มข้นทั้งหมดของแคดเมียมและสารหนูของตัวอย่างดินในกลุ่ม 2 กลุ่ม 3A และกลุ่ม 3B เมื่อเปรียบเทียบกับเกณฑ์มาตรฐานคุณภาพดินเพื่อการเกษตรกรรมของประเทศไทย (ต้องไม่เกิน 37 และ 3.9 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม) ซึ่งกำหนดโดยคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ (2547) พบว่าความเข้มข้นทั้งหมดของแคดเมียมมีค่าต่ำกว่ามาตรฐานคุณภาพดินเพื่อการเกษตรกรรมของประเทศไทย ส่วนความเข้มข้นทั้งหมดของสารหนูมีค่าสูงกว่ามาตรฐานคุณภาพดินเพื่อการเกษตรกรรมของประเทศไทย ถึง 4.6 เท่า 3.8 เท่า และ 4.1 เท่า ตามลำดับ



รูปที่ 2 แผนภาพแสดงการจัดกลุ่มตัวอย่างดินนาข้าวตามลักษณะทางกายภาพและเคมีของดินที่มีความคล้ายคลึงกัน

ตารางที่ 2 คุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของดินนาข้าวในพื้นที่ตำบลแม่ตาว อำเภอแม่สอด จังหวัดตาก [ค่าเฉลี่ย ± ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน]

คุณสมบัติดิน	หน่วย	กลุ่มตัวอย่าง			
		1 (n=1)	2 (n=9)	3A (n=12)	3B (n=14)
อนุภาคดินทราย (Sand)	%	19.40	36.60±1.9 (29.20-47.20)	37.25±3.1 (19.40-58.40)	35.70±2.6 (18.20-58.40)
อนุภาคดินทรายแป้ง (Silt)	%	40.0	33.24±1.2 (28.20-40.20)	33.73±1.4 (25.00-40.20)	37.14±1.3 (29.20-46.00)
อนุภาคดินเหนียว (Clay)	%	40.60	30.16±1.5 (24.60-37.60)	29.02±2.8 (8.60-40.60)	27.16±2.4 (14.60-45.60)
ความเป็นกรด-ด่าง (pH)		7.23	6.97±0.09 (6.60-7.32)	6.59±0.18 (5.13-7.81)	6.83±0.10 (6.12-7.25)
ความต่างศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชัน (Eh)	mV	208.5	181.2±2.2 (171.4-188.9)	266.4±3.3 (248.7-278.8)	227.5±3.2 (206.6-245.5)
ความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวก (CEC)	c mol kg^{-1}	17.62	13.22±0.84 (10.11-16.46)	12.81±1.3 (3.32-21.42)	12.11±1.0 (6.30-21.35)
อินทรียวัตถุ (OM)	%	3.41	2.02±0.17 (1.34-2.80)	1.76±0.17 (0.68-3.20)	1.67±0.10 (1.06-2.37)
ความเข้มข้นทั้งหมดของแคดเมียม (Total Cd)	mg kg^{-1}	89.87	12.85±3.6 (3.97-33.56)	4.01±1.1 (0.20-10.72)	4.99±1.9 (0.40-27.53)
ความเข้มข้นทั้งหมดของสารหนู (Total As)	mg kg^{-1}	32.08	17.90±1.1 (10.91-22.81)	14.83±1.4 (5.39-22.25)	16.20±2.2 (7.92-41.08)

2) ความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของดินกับความเข้มข้นทั้งหมดของแคดเมียมและสารหนูในดินนาข้าว

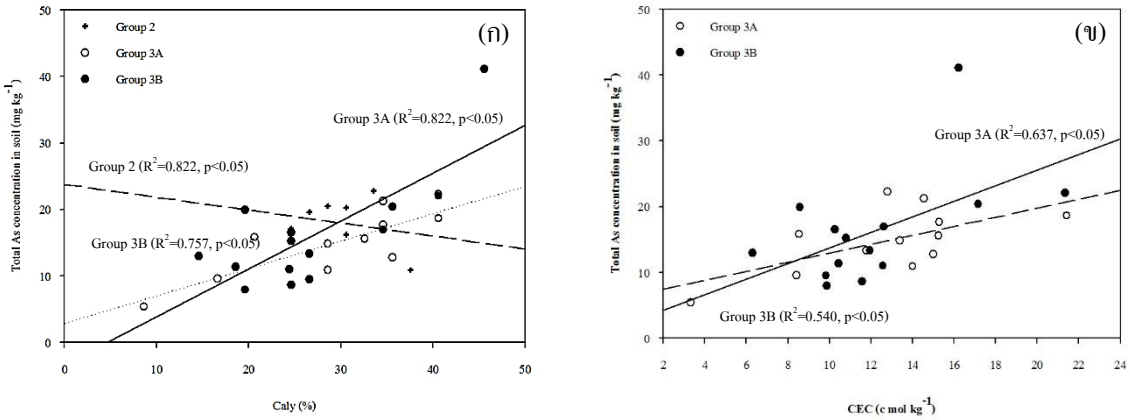
2.1 ความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของดินกับความเข้มข้นทั้งหมดของแคดเมียมในดิน

ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติระหว่างความเข้มข้นทั้งหมดของแคดเมียมในดินและคุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของดิน พบว่าความเข้มข้นทั้งหมดของแคดเมียมในตัวอย่างดินนาข้าวไม่มีความสัมพันธ์อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติกับคุณสมบัติทางกายภาพและเคมีใด ๆ ของดินนาข้าว ($p>0.05$)

2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของดินกับความเข้มข้นทั้งหมดของสารหนูในดิน

ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นทั้งหมดของสารหนูในดินและคุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของดิน (ตารางที่ 3) พบว่าความเข้มข้นทั้งหมดของสารหนูในตัวอย่างดินนาข้าวมีความสัมพันธ์อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติสูงกับสัดส่วนของอนุภาคดินเหนียวในตัวอย่างดินนาข้าวกลุ่ม 2 (R^2=-0.822, $p<0.05$) กลุ่ม 3A (R^2=0.822, $p<0.05$) และกลุ่ม 3B (R^2=0.757, $p<0.05$) (รูปที่ 3 (ก)) เช่นเดียวกับความเข้มข้นทั้งหมดของสารหนูในตัวอย่างดินนาข้าวกลุ่ม 3A และกลุ่ม 3B พบว่ามีความสัมพันธ์อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเชิงบวกสูงกับความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวกในดิน (R^2=0.637, $p<0.05$) และ (R^2=0.540, $p<0.05$) ตามลำดับ (รูปที่ 3 (ข)) ทั้งนี้ยังพบว่าความสามารถในการ

แลกเปลี่ยนประจุบวกในดินมีความสัมพันธ์อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเชิงบวกสูงกับสัดส่วนของอนุภาคดินเหนียวในตัวอย่างดินนาข้าวกลุ่ม 2 (R^2=0.843, $p<0.05$) กลุ่ม 3A (R^2=0.897, $p<0.05$) และกลุ่ม 3B (R^2=0.872, $p<0.05$) ในขณะเดียวกันความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวกยังมีความสัมพันธ์อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเชิงบวกกับปริมาณอินทรียวัตถุในตัวอย่างดินนาข้าวกลุ่ม 2 (R^2=0.680, $p<0.05$) กลุ่ม 3A (R^2=0.941, $p<0.05$) และกลุ่ม 3B (R^2=0.849, $p<0.05$) อีกด้วย



รูปที่ 3 ความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงระหว่าง (ก) สัดส่วนของอนุภาคดินเหนียวและความเข้มข้นทั้งหมดของสารหนู และ (ข) ความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวกและความเข้มข้นทั้งหมดของสารหนู

ตารางที่ 3 ตารางแสดงความสัมพันธ์ (R^2) ระหว่างคุณสมบัติทางกายภาพและเคมีกับความเข้มข้นทั้งหมดของแคดเมียมและสารหนูในดินนาข้าว

Soil Property	Clay (%)			pH			Eh			CEC (c mol kg^{-1})			OM (%)			Total Cd (mg kg^{-1})			Total As (mg kg^{-1})		
	Group 2	Group 3A	Group 3B	Group 2	Group 3A	Group 3B	Group 2	Group 3A	Group 3B	Group 2	Group 3A	Group 3B	Group 2	Group 3A	Group 3B	Group 2	Group 3A	Group 3B	Group 2	Group 3A	Group 3B
Clay	1	1	1																		
pH	-0.169	0.191	0.129	1	1	1															
Eh	-0.163	-0.353	-0.220	-0.028	-0.600	-0.456	1	1	1												
CEC	**0.843***	**0.897****	**0.872****	-0.256	0.042	0.056	-0.331	0.042	-0.154	1	1	1									
OM	**0.680***	**0.764****	**0.676****	-0.639	-0.143	0.019	-0.025	-0.229	-0.389	**0.680***	**0.941****	**0.849****	1	1	1						
Total Cd	0.132	-0.086	0.489	0.176	-0.476	-0.503	-0.430	0.116	-0.160	0.057	0.085	-0.085	0.334	0.334	-0.239	1	1	1			
Total As	-0.167	0.387	0.497	0.576	-0.663	-0.282	-0.372	**0.637***	**0.540***	0.540	0.540	0.297	**0.822***	**-0.822****	**0.757****	0.469	0.544	0.11	1	1	1

หมายเหตุ : * ความสัมพันธ์อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ $p<0.05$

** ความสัมพันธ์อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ $p<0.01$

อภิปรายและสรุปผลการวิจัย

เมื่อเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของดินนาข้าวในการศึกษานี้กับการศึกษาก่อนหน้าในพื้นที่ตำบลแม่ตาว พบว่าความเป็นกรด-ด่างของดินมีค่าอยู่ในช่วงใกล้เคียงกับการศึกษาก่อนหน้าของ Kosolsaksakul et al. (2014) ซึ่งมีค่าความเป็นกรด-ด่าง อยู่ในช่วง 6.5 ถึง 7.5 ในขณะที่ค่าเฉลี่ยร้อยละของปริมาณอินทรียวัตถุในดินนาข้าวในการศึกษานี้ซึ่งมีค่าเท่ากับ 1.8 มีค่าต่ำกว่าผลการศึกษาก่อนหน้าของ Sriprachote et al. (2012) ถึง 3.5 เท่า การลดลงของปริมาณอินทรียวัตถุในการศึกษานี้ อาจเกิดจากการสูญหายไปจากการชะล้างของน้ำเนื่องจากระยะเวลาของการเก็บตัวอย่างนั้นเป็นช่วงที่ไม่มีการเพาะปลูกข้าวและพืชทดแทนชนิดอื่น ๆ ซึ่งส่งผลให้ไม่มีพืชปกคลุมหน้าดินเพื่อลดอัตราการชะละลายของหน้าดินและอินทรียวัตถุในดิน นอกจากนั้นยังพบว่าตัวอย่างดินนาข้าวในการศึกษานี้มีค่าอินทรียวัตุและความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวกสูง ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Akkajt (2015) ที่พบว่าดินที่มีอินทรียวัตถุและสัดส่วนของอนุภาคดินเหนียวสูงมีผลทำให้ความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวกในดินสูงด้วย

เมื่อเปรียบเทียบค่าความเข้มข้นทั้งหมดของแคดเมียมในดินนาข้าวในการศึกษานี้กับมาตรฐานคุณภาพดินเพื่อการเกษตรกรรมและค่าภูมิหลังของแคดเมียมในดินทั่วไปในธรรมชาติของประเทศไทย พบว่าความเข้มข้นเฉลี่ยของแคดเมียมมีค่าต่ำกว่ามาตรฐานคุณภาพดินเพื่อการเกษตรกรรมของประเทศไทย (ต้องไม่เกิน 37 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม) ที่กำหนดโดย คณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ (2547) อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาตัวอย่างดินนาข้าวในกลุ่ม 1 (รูปที่ 2 และตารางที่ 2) พบว่าดินนาข้าวมีความเข้มข้นของแคดเมียมสูงเกินมาตรฐานคุณภาพดินเพื่อการเกษตรกรรมของประเทศไทย ถึง 2.42 เท่า และเมื่อเปรียบเทียบกับค่าภูมิหลังของแคดเมียมในดินทั่วไปในธรรมชาติของประเทศไทย (1.7 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม) ซึ่งรายงานโดยสำนักวิทยาศาสตร์เพื่อการพัฒนาที่ดิน (2555) พบว่าความเข้มข้นเฉลี่ยของแคดเมียมมีค่าสูงกว่าภูมิหลังในดินทั่วไปในธรรมชาติของประเทศไทย ถึง 5.3 เท่า นอกจากนั้นยังพบว่าระดับความเข้มข้นของแคดเมียมสูงสุดในการศึกษานี้ (89.87 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม) มีความสอดคล้องกับการศึกษาก่อนหน้าของ Akkajt (2015) ที่พบว่าความเข้มข้นของแคดเมียมอยู่ในระดับเดียวกัน ซึ่งมีค่าเท่ากับ 81.89 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม การตรวจพบความเข้มข้นของแคดเมียมในดินนาข้าวสูงนั้น เมื่อพิจารณาจากการจำแนกตามระดับพื้นที่ปนเปื้อนแคดเมียมในระดับต่ำ (< 3 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม) พื้นที่ปนเปื้อนแคดเมียมในระดับปานกลาง (3 ถึง 30 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม) และพื้นที่ปนเปื้อนแคดเมียมในระดับสูง (>30 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม) ในพื้นที่ที่กำหนดโดยกรมอุตสาหกรรมพื้นฐานและการเหมืองแร่ (2558) พบว่าตัวอย่างดินที่มีความเข้มข้นของแคดเมียมในดินนาข้าวสูงในตัวอย่างดินนาข้าวกลุ่ม 1 (89.87 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมดิน) นั้นเป็นตัวอย่างดินที่เก็บจากพื้นที่ปนเปื้อนแคดเมียมในระดับสูง (>30 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม) ในส่วนของสารหนูนั้น พบว่าระดับความเข้มข้นสูงสุดในการศึกษานี้ (32.08 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม) เมื่อเปรียบเทียบกับมาตรฐานคุณภาพดินเพื่อการเกษตรกรรมของประเทศไทย (ต้องไม่เกิน 3.9 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม) ซึ่งกำหนดโดยคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ (2547) พบว่ามีค่าสูงเกินมาตรฐานคุณภาพดินเพื่อการเกษตรกรรมของประเทศไทย ถึง 8.2 เท่า และเมื่อเปรียบเทียบกับค่าภูมิหลังของสารหนูในดินทั่วไปในธรรมชาติของประเทศไทย (26 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม) ซึ่งรายงานโดยสำนักวิทยาศาสตร์เพื่อการพัฒนาที่ดิน (2552) พบว่ามีค่าสูงกว่าภูมิหลังของสารหนูในดินทั่วไปในธรรมชาติของประเทศไทย ถึง 1.2 เท่า

ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติระหว่างคุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของดินและความเข้มข้นทั้งหมดของแคดเมียมและสารหนูในดินนาข้าว พบว่าความเข้มทั้งหมดของแคดเมียมในตัวอย่างดินนาข้าวไม่มีความสัมพันธ์อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติกับคุณสมบัติทางกายภาพและเคมีใด ๆ ของดิน ($p>0.05$) ซึ่งในทางทฤษฎีแล้วนั้นความเข้มข้นทั้งหมดของแคดเมียมในดินมักขึ้นกับคุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของดิน เช่น ความเป็นกรด-

ด่าง ความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวกในดิน และปริมาณอินทรียวัตถุ ทั้งนี้อาจเป็นผลมาจากจำนวนตัวอย่างในแต่ละกลุ่มย่อยมีขนาดกลุ่มตัวอย่างไม่เพียงพอในการอธิบายถึงความสัมพันธ์ดังกล่าว และเมื่อเปรียบเทียบกับผลการศึกษาก่อนหน้า พบว่ามีความสอดคล้องกับการศึกษาของ Dragovic et al. (2008) ที่รายงานว่าความเข้มข้นทั้งหมดของแคดเมียมในตัวอย่างดินไม่มีความสัมอย่างมีนัยสัมพันธ์ทางสถิติกับคุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของดิน ในส่วนของความเข้มข้นทั้งหมดของสารหนูในดิน พบว่ามีความสัมพันธ์อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติสูงกับสัดส่วนของอนุภาคดินเหนียวและความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวกของดิน ($p<0.05$) ซึ่งผลที่ได้เป็นไปตามทฤษฎี กล่าวคือ อนุภาคดินเหนียวซึ่งมีประจุเป็นลบที่ผิวอนุภาคจะสามารถจับกับประจุบวกได้สูง ดังนั้นจึงส่งผลทำให้ความเข้นข้นทั้งหมดของสารหนูในตัวอย่างดินนาข้าวมีความเข้มข้นสูงตามไปด้วย ซึ่งสอดคล้องกับ Brady (2010) พบว่า เมื่อดินมีประจุเป็นลบในปริมาณมากจะสามารถดูดซับและแลกเปลี่ยนไอออนบวกไว้ได้สูง นอกจากนั้นแล้วผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ทางสถิติ ยังพบความสัมพันธ์อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติของความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวกและอินทรียวัตถุรวมไปถึงความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวกและสัดส่วนอนุภาคดินเหนียวอีกด้วย ผลการศึกษานี้แสดงให้เห็นว่า เมื่อดินมีอินทรียวัตถุสูงขึ้นค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวกในดินก็จะสูงด้วย ซึ่งอาจจะทำให้สามารถดูดซับและแลกเปลี่ยนไอออนบวกไว้ได้สูงตามไปด้วย

กิตติกรรมประกาศ

ขอบคุณสำนักงานคณะกรรมการอุดมศึกษา (สกอ.) และสำนักพัฒนาบัณฑิตศึกษาและวิจัยด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี (สบว.) สำหรับทุนอุดหนุนโปรแกรมวิจัย และขอขอบคุณสถาบันวิจัยสภาวะแวดล้อมและศูนย์ความเป็นเลิสด้านการจัดการสารและของเสียอันตราย (ศสอ.) จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ได้อำนวยความสะดวกและสนับสนุนในด้านเครื่องมือและอุปกรณ์วิทยาศาสตร์อันเป็นประโยชน์ต่อความสำเร็จของการดำเนินงานวิจัยในครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

กรมอุตสาหกรรมพื้นฐานและการเหมืองแร่. (2558). โครงการสำรวจและวิเคราะห์ผลกระทบจากการทำเหมืองทั้งประเทศเพื่อเสนอแนวทางการแก้ไขปัญหาและการใช้ประโยชน์พื้นที่. กรุงเทพมหานคร: กระทรวงอุตสาหกรรม.

คณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ. (2547). ประกาศคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ ฉบับที่ 25 ในพระราชบัญญัติส่งเสริมและรักษาคุณภาพสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ พ.ศ. 2535 เรื่อง กำหนดมาตรฐานคุณภาพดิน กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม กรุงเทพฯ

สารานุกรมไทยสำหรับเยาวชน. (2539). สารานุกรมไทยสำหรับเยาวชนฯ เล่ม 18 โครงการสารานุกรมไทยสำหรับเยาวชน โดยพระราชประสงค์ในพระบาทสมเด็จพระเจ้าอยู่หัว. กรุงเทพมหานคร.

สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร. (2556). สถิติการเกษตรของประเทศไทย ปี 2556. กรุงเทพมหานคร: กระทรวงการเกษตรและสหกรณ์.

สำนักวิทยาศาสตร์เพื่อการพัฒนาที่ดิน. (2552). รายงานการศึกษา ติดตาม และพัฒนาระบบฐานข้อมูลโลหะหนักในดินปลูกพืชเศรษฐกิจของประเทศไทย. กรมพัฒนาที่ดิน กระทรวงเกษตรและสหกรณ์ กรุงเทพฯ

Adriano, D. C. (2001). Trace elements in terrestrial environments: biogeochemistry, Bioavailability, and risks of metals, Springer New York.

Akkajit, P. (2015). Review of the current situation of Cd contamination in agricultural field in the Mae Sot District, Tak Province, Northwestern Thailand. Applied Environmental Research 37(1): 71-82.

Azam, S. M. G. G., Sarker, T. C. and Naz, S. (2016). Factors affecting the soil arsenic bioavailability, accumulation in rice and risk to human health: A review. Toxicology Mechanisms and Methods 26(8): 565-579.

Bowen, H. J. M. (1979). Environmental chemistry of the elements, Academic Press.

Brady, N. C. and Weil, R. R. (2010). Elements of the nature and properties of soils, Pearson Educational International Upper Saddle River, NJ

Chen, Z., Zhu, Y.-G., Liu, W.-J. and Meharg, A. A. (2005). Direct evidence showing the effect of root surface iron plaque on arsenite and arsenate uptake into rice (Oryza sativa) roots. New Phytologist 165(1): 91-97.

Chibuike, G. and Obiora, S. (2014). Heavy metal polluted soils: Effect on plants and bioremediation methods. Applied and Environmental Soil Science 2014: 1-12.

DOA. (2010). A handbook of soil analysis. Bangkok, Agricultrue Production Science Research and Development Division.

Evangelou, V. P. and Phillips, R. E. 2005. Cation exchange in soils.

Dragović, S., Mihailović, N. and Gajić, B. (2008). Heavy metals in soils: Distribution, relationship with soil characteristics and radionuclides and multivariate assessment of contamination sources. Chemosphere 72(3): 491-495.

Kosolsaksakul, P., Farmer, J.G., Oliver, I.W., and Graham, M.C. (2014). Geochemical associations and availability of cadmium (Cd) in a paddy field system, northwestern Thailand. Environmental Pollution 187: 153-161.

Liu, B., Ai, S., Zhang, W., Huang, D. and Zhang, Y. (2017). Assessment of the bioavailability, bioaccessibility and transfer of heavy metals in the soil-grain-human systems near a mining and smelting area in NW China. Science of the Total Environment 609(Supplement C): 822-829.

Liu, J. G., Zhu, Q. S., Zhang, Z. J., Xu, J. K., Yang, J. C. and Wong, M. H. (2005). Variations in cadmium accumulation among rice cultivars and types and the selection of cultivars for reducing cadmium in the diet. Journal of the Science Food and Agriculture 85(1): 147-153

Nordstrom, D. K. (2002). Worldwide occurrences of arsenic in ground water. Science 296(5576): 2143-2145.

Raghunath, R., Tripathi, R. M., Kumar, A. V., Sathe, A. P., Khandekar, R. N. and Nambi, K. S. V. (1999). Assessment of Pb, Cd, Cu, and Zn exposures of 6- to 10-year-old children in Mumbai. Environmental Research 80(3): 215-221.

Sebastian, A. and Prasad, M. N. V. (2014). Cadmium minimization in rice: A review. Agronomy for Sustainable Development 34(1): 155-173.

Simmons, R. W., Pongsakul, P., Saiyasitpanich, D. and Klinphoklap, S. (2005). Elevated levels of cadmium and zinc in paddy soils and elevated levels of cadmium in rice grain downstream of a zinc mineralized area in Thailand: Implications for Public Health. Environmental Geochemistry and Health 27(5): 501-511.

Sriprachote, A., Kanyawongha, P., Ochiai, K. and Matoh, T. (2012). Current situation of cadmium-polluted paddy soil, rice and soybean in the Mae Sot District, Tak Province, Thailand. Soil Science and Plant Nutrition 58(3): 349-359.

Swaddiwudhipong, W., Limpatanachote, P., Nishijo, M., Honda, R., Mahasakpan, P. and Krintratun, S. (2010). Cadmium-exposed population in Mae Sot District, Tak Province: 3. Associations between urinary cadmium and renal dysfunction, hypertension, diabetes, and urinary stones. Journal of the Medical Association of Thailand Chotmaihet thangphaet 93(2): 231-238.

Tokalioglu, S., Kartal, S. and Birol, G. (2003). Application of a three-stage sequential extraction procedure for the determination of extractable metal contents in highway soils. Turkish Journal of Chemistry 27(3): 333-346.

Wuana, R. A. and Okieimen, F. E. (2011). Heavy metals in contaminated soils: A review of sources, chemistry, risks and best available strategies for remediation. International Scholarly Research Notices 2011: 1-20.

Xue, S., Shi, L., Wu, C., Wu, H., Qin, Y., Pan, W.-S., Hartley, W. and Cui, M. (2017). Cadmium, lead, and arsenic contamination in paddy soils of a mining area and their exposure effects on human HEPG2 and keratinocyte cell-lines. Environmental Research 156: 23-30.

Zarcinas, B. A., Pongsakul, P., McLaughlin, M. J. and Cozens, G. (2004). Heavy metals in soils and crops in southeast Asia 2. Thailand. Environmental Geochemistry and Health 26(3): 359-371.