



การประชุมเสนอผลงานวิจัยระดับชาติ มหาวิทยาลัยสุโขทัยธรรมาธิราช ครั้งที่ 8

The 8th STOU National Research Conferenceการกระจายสัดส่วนและชีวปริมาณออกฤทธิ์ของสารหนูในดิน บริเวณพื้นที่ที่มีการใช้ประโยชน์
ทางด้านเกษตรกรรมที่แตกต่างกันFractionation and Bioavailability of Arsenic in Soil in Different Agricultural
Land Use Areasอภิษฎา ดวงทอง (Apichaya Duangthong)¹ ศีลาวุธ ดำรงศิริ (Seelawut Damrong Siri)²

บทคัดย่อ

บริเวณคลองน้ำฮวย อำเภอวังสะพุง จังหวัดเลย มีสารหนูในดินสูง ลักษณะการใช้พื้นที่เกษตรกรรมที่แตกต่างกัน อาจทำให้ชีวปริมาณออกฤทธิ์ของสารหนูเปลี่ยนแปลงไป การศึกษานี้ดำเนินการบนพื้นที่นาข้าวในที่ราบลุ่ม และสวนยาง บนเนินเขา โดยศึกษาลักษณะทางกายภาพและเคมีของดิน และใช้เทคนิคการสกัดตามลำดับส่วนแบบ Modified Tessier รวมถึงศึกษาชีวปริมาณออกฤทธิ์ของสารหนูในดินโดยการสกัดด้วย EDTA การศึกษาพบว่าดินทั้งสองบริเวณมีลักษณะทางกายภาพและทางเคมีที่คล้ายกัน ยกเว้นดินในที่ราบลุ่มมีความเข้มข้นของสารหนูสูงกว่า สารหนูกระจายสัดส่วนอยู่ในส่วนที่คงตัวมากที่สุด (63–74%) ในขณะที่พบส่วนที่ชะละลายออกมาได้ง่าย และส่วนที่จับอยู่กับคาร์บอนน้อยที่สุด (<2%) สอดคล้องกับผลชีวปริมาณออกฤทธิ์ของสารหนูซึ่งมีค่าที่ต่ำมาก (<7%) ชีวปริมาณออกฤทธิ์ของสารหนูมีความสัมพันธ์กับสารหนูในส่วนที่ชะละลายออกมาได้ง่าย ($R^2=0.95$) โดยพื้นที่เกษตรกรรมทั้งสองบริเวณมีการกระจายสัดส่วนและชีวปริมาณออกฤทธิ์ของสารหนูที่มีค่าใกล้เคียงกัน จึงอาจกล่าวได้ว่าการใช้ประโยชน์ที่ดินทั้งสองบริเวณนี้ไม่ได้ส่งผลต่อการกระจายสัดส่วนรวมถึงชีวปริมาณออกฤทธิ์ของสารหนูในดิน

คำสำคัญ สารหนู พื้นที่เกษตรกรรม การกระจายสัดส่วน ชีวปริมาณการออกฤทธิ์

¹ สหสาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย Apichaya.dt@gmail.com

² นักวิจัย สถาบันวิจัยสภาวะแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย Seelawut.Da@chula.ac.th



การประชุมเสนอผลงานวิจัยระดับชาติ มหาวิทยาลัยสุโขทัยธรรมาธิราช ครั้งที่ 8

The 8th STOU National Research Conference

Abstract

Agricultural areas around Nam Haui canal, Wang Sapung District, Loei Province have been contaminated by arsenic. Different agricultural activity may alter bioavailability of arsenic. This study was conducted in soil sample from paddy on foot hill and rubber plantation on hill. The physical and chemical characteristics of soil were determined. The Modified Tessier sequential extraction was applied. Moreover, the bioavailability of arsenic was investigated by EDTA extraction. The results show that both areas have similar physical and chemical characteristics. However, the concentration of arsenic in paddy soil on foot hill was higher than rubber plantation on hill. The major of arsenic fractionation was residual fraction (63–74%). Conversely, exchangeable fraction and carbonate fraction were least (<2%) conforming to its very low bioavailability (<7%). Good correlations were found between bioavailability and exchangeable fraction of arsenic ($R^2=0.95$). Lastly, the fractionation and bioavailability of arsenic in soil samples from both agricultural activities were similar. Based on this study result, both agricultural activities did not affect to fractionation and bioavailability of arsenic in soil.

Keywords: Arsenic, Agricultural area, Fractionation, Bioavailability



การประชุมเสนอผลงานวิจัยระดับชาติ มหาวิทยาลัยสุโขทัยธรรมาธิราช ครั้งที่ 8

The 8th STOU National Research Conference

บทนำ

สารหนู (As) จัดเป็นธาตุกึ่งโลหะที่ปะปนอยู่ในสายแร่ใต้ดิน จากงานวิจัยที่ผ่านมา พบว่าในพื้นที่เกษตรกรรม บริเวณคลองน้ำฮวย ตำบลเขาหลวง อำเภอวังสะพุง จังหวัดเลย มีค่าภูมิหลังของสารหนูที่ค่อนข้างสูง (จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2555) ซึ่งเป็นลักษณะทางธรรมชาติของพื้นที่ศักยภาพแหล่งแร่ ทั้งนี้ เนื่องจากในพื้นที่เกษตรกรรมดังกล่าวมีการปลูกพืชหมุนเวียนตามฤดูกาล สารหนูในดินจึงสามารถกระจายเข้าสู่ห่วงโซ่อาหาร เมื่อมีการบริโภคอาหารที่มีสารหนูปนเปื้อนจึงอาจส่งผลให้เกิดการสะสมและเป็นอันตรายต่อสุขภาพ โดยปริมาณสารหนูที่มีศักยภาพในการเคลื่อนที่และสะสมในสิ่งมีชีวิตเรียกว่า ชีวปริมาณออกฤทธิ์ (Bioavailability) ของสารหนู และการกระจายสัดส่วน (Fractionation) ของสารหนูในดิน หมายถึงการกระจายตัวของสารหนูอยู่ในส่วนต่างๆ ขององค์ประกอบดิน ซึ่งแตกต่างกันไปตามลักษณะสมบัติของดิน และสภาพแวดล้อมของพื้นที่ รวมถึงสารเคมีต่างๆ ในดิน โดยการศึกษาการกระจายสัดส่วนของสารหนู เป็นการสกัดเอาสารหนูออกจากองค์ประกอบต่างๆ ของดิน โดยใช้สารละลายที่จำเพาะต่อการชะละลายสารหนูในองค์ประกอบต่างๆ ของดิน ออกมาเป็นลำดับ โดยการกระจายสัดส่วนของสารหนูในดินมักเกี่ยวข้องกับชีวปริมาณออกฤทธิ์ของสารหนู

จากข้อมูลดังกล่าวมานำมาสู่การศึกษาการกระจายสัดส่วนและชีวปริมาณออกฤทธิ์ของสารหนูในดินในพื้นที่เกษตรกรรม บริเวณคลองน้ำฮวย ตำบลเขาหลวง อำเภอวังสะพุง จังหวัดเลย ซึ่งการกระจายสัดส่วนของสารหนูในดินจะใช้เทคนิคการสกัดตามลำดับส่วน (Sequential Extraction) โดยใช้วิธี Modified Tessier (Rauret et al., 1989) ซึ่งเป็นวิธีที่นิยมใช้ในการศึกษา เนื่องจากมีความสัมพันธ์กับสภาพแวดล้อม และพบปัญหาการปนเปื้อนระหว่างการวิเคราะห์น้อย โดยการกระจายสัดส่วนที่ได้แบ่งเป็น 5 ส่วน (Fraction) ได้แก่ ส่วนที่ชะละลายออกมาได้ง่าย (F1: Exchangeable Fraction) ซึ่งจะอยู่ในรูปไอออนที่สามารถถูกชะออกมาได้ง่ายด้วยการแลกเปลี่ยนไอออน ส่วนที่จับอยู่กับคาร์บอเนต (F2: Carbonate Fraction) จะสามารถชะออกมาได้หรือในสภาพที่เป็นกรดอ่อนๆ ส่วนที่จับอยู่กับออกไซด์ของเหล็ก (Fe) และแมงกานีส (Mn) (F3: Iron-Manganese oxides Fraction) จะเป็นออกไซด์ที่พบมากในสภาพแวดล้อมบนผิวโลก เช่น ในดิน และตะกอนต่างๆ โดยออกไซด์ของเหล็กและแมงกานีสจะเสถียรในสภาวะที่ไร้ออกซิเจน และทำให้มลสารที่เกาะอยู่หลุดออกมาได้ ส่วนที่จับอยู่กับสารอินทรีย์และซัลไฟด์ (F4: Organic matter and Sulfide Fraction) มลสารในส่วนนี้จะสามารถหลุดออกมาได้เมื่อเกิดการย่อยสลายสารอินทรีย์และซัลไฟด์ในสภาพที่ไม่มีออกซิเจน และส่วนที่คงตัว (F5: Residual Fraction) โดยปกติแล้วจะไม่ถูกชะออกมาในสภาพแวดล้อมปกติ สำหรับการศึกษาชีวปริมาณออกฤทธิ์ของสารหนูในดิน มักใช้เทคนิคการสกัดแบบขั้นตอนเดียว (Single Extraction) ซึ่งสารสกัดที่ใช้โดยทั่วไป มักอยู่ในกลุ่มตัวรีดิวซ์ ตัวออกซิไดซ์ และกรดแก่ (Rauret, 1998) โดยจะมีความจำเพาะต่อมลสารที่จะนำมาสกัด ในที่นี้ใช้วิธีการสกัดด้วย EDTA (Gregori et al., 2003) เนื่องจากมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) สูง สามารถนำมาใช้ในการบ่งบอกชีวปริมาณออกฤทธิ์ของสารหนูในดินได้

จากการทบทวนผลงานวิจัย พบว่าหากมีการเปลี่ยนแปลงของสภาพแวดล้อม เช่น การใช้ประโยชน์ที่ดินในการทำเกษตรกรรมที่ต่างกัน รวมถึงการมีสภาพน้ำขัง จะส่งผลให้ดินเกิดการเปลี่ยนแปลงลักษณะทางกายภาพและเคมี เช่น ค่าพีเอช (pH) สภาพปฏิกิริยารีดอกซ์ (ORP) รวมถึงปริมาณสารอินทรีย์ (OM) เป็นต้น ซึ่งจะส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของการกระจายสัดส่วนของสารหนู และอาจทำให้ชีวปริมาณออกฤทธิ์ของสารหนูเปลี่ยนแปลงตามไปด้วย ดังนั้นการศึกษาศาการกระจายสัดส่วนและชีวปริมาณออกฤทธิ์ของสารหนูในดินในพื้นที่เกษตรกรรมที่แตกต่างกันจึงเป็นประเด็นที่น่าสนใจในการศึกษา หากมีการเปลี่ยนแปลงการกระจายสัดส่วนผ่านกลไกทางธรรมชาติ สารหนูที่พบก็อาจมีการกระจายสัดส่วน



การประชุมเสนอผลงานวิจัยระดับชาติ มหาวิทยาลัยสุโขทัยธรรมาธิราช ครั้งที่ 8

The 8th STOU National Research Conference

รวมถึงชีวปริมาณออกฤทธิ์ที่เปลี่ยนแปลงไป ซึ่งการศึกษาดังกล่าวสามารถใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานในการบริหารจัดการการใช้ประโยชน์ที่ดินในบริเวณพื้นที่ดังกล่าวต่อไป

วัตถุประสงค์

- 1) ผลของการใช้พื้นที่เกษตรกรรมที่แตกต่างกันต่อการกระจายสัดส่วนของสารหนูในดิน
- 2) ความสัมพันธ์ของการกระจายสัดส่วนของสารหนูในดินและชีวปริมาณออกฤทธิ์ของสารหนูในดิน

ระเบียบวิธีวิจัย

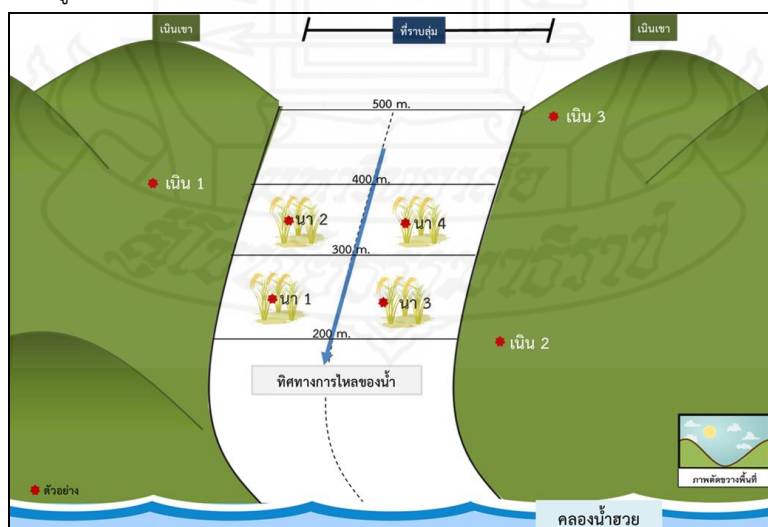
วิธีการศึกษาแบ่งเป็น 3 ขั้นตอน

1) พื้นที่ศึกษา

พื้นที่เกษตรกรรมที่ทำการศึกษา ตั้งอยู่บริเวณคลองน้ำอวย ตำบลเขาหลวง อำเภอสว่างพูน จังหวัดเลย แบ่งออกเป็น พื้นที่ราบลุ่มที่มีการเพาะปลูกข้าว และพื้นที่เนินเขาที่มีการปลูกยางพารา โดยการคัดเลือกพื้นที่เก็บตัวอย่างพิจารณาจากแหล่งข้อมูลพื้นฐาน ข้อมูลการใช้ประโยชน์ที่ดินในพื้นที่ รวมถึงข้อมูลจากการสำรวจภาคสนาม

2) วิธีการเก็บตัวอย่างดิน

2.1 คัดเลือกจุดเก็บตัวอย่างจากพื้นที่ศึกษา ซึ่งแบ่งออกเป็น 2 บริเวณที่มีการทำเกษตรกรรมที่แตกต่างกัน โดยดินบริเวณที่ราบลุ่มที่มีการเพาะปลูกข้าว ส่วนดินบริเวณเนินเขามีการปลูกยางพารา ซึ่งจะเก็บตัวอย่างดินจำนวน 7 จุด โดยดินนาข้าว มีจุดเก็บตัวอย่าง 4 จุด คือ นา 1 นา 2 นา 3 และ นา 4 ส่วนดินปลูกยางพารา มีจุดเก็บตัวอย่าง 3 จุด คือ เนิน 1 เนิน 2 และ เนิน 3 แสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1 ภาพจำลองพื้นที่ในการเก็บตัวอย่าง



การประชุมเสนอผลงานวิจัยระดับชาติ มหาวิทยาลัยสุโขทัยธรรมาธิราช ครั้งที่ 8

The 8th STOU National Research Conference

2.2 เก็บตัวอย่างดิน เก็บตัวอย่างในเดือนกรกฎาคม พ.ศ. 2560 ซึ่งเป็นฤดูฝนที่มีการทำนา การเก็บตัวอย่างดินดินในแต่ละจุดจะทำการเก็บแบบผสม (Composite sample) โดยเก็บดินมาจำนวน 3 ตัวอย่าง นำมารวมกันเป็น 1 ตัวอย่างในถุงซิปล็อคและเก็บรักษาไว้ในที่เย็น

2.3 การเก็บรักษาตัวอย่างดินและการตรวจวิเคราะห์ ดินบริเวณที่ราบลุ่มและดินบริเวณที่เนินเขา มีการแบ่งตัวอย่างดินออกเป็น 2 ส่วน คือ ตัวอย่างดินที่อบแห้ง (Dry sample) ใช้สำหรับตรวจวิเคราะห์ความเข้มข้นของสารหนู (As) ความเข้มข้นของเหล็ก (Fe) ค่าพีเอช (pH) ของดิน ปริมาณอินทรีย์วัตถุ (OM) ในดิน รวมถึงลักษณะเนื้อดิน (Soil texture) และตัวอย่างดินที่ไม่อบแห้ง (Field moist sample) สำหรับตรวจวิเคราะห์สภาพปฏิกิริยารีดอกซ์ (ORP) ความเข้มข้นซัลไฟด์ (Sulfide) การกระจายสัดส่วนของสารหนู (Fractionation) และชีวปริมาณออกฤทธิ์ของสารหนู (Bioavailability) ซึ่งจะเก็บโดยการแช่แข็ง

3) วิธีการศึกษา

3.1 ศึกษาดัชนีต่างๆ ที่เกี่ยวข้อง

ศึกษาคุณสมบัติของดินทั้งทางกายภาพและทางเคมี โดยคุณสมบัติทางกายภาพของดิน คือ ลักษณะเนื้อดิน (Soil Texture) ส่วนคุณสมบัติทางเคมีของดิน ได้แก่ ความเข้มข้นของสารหนู (As) ความเข้มข้นของเหล็ก (Fe) ค่าพีเอช (pH) สภาพปฏิกิริยารีดอกซ์ (ORP) ปริมาณอินทรีย์วัตถุในดิน (OM) และความเข้มข้นซัลไฟด์ (Sulfide) ในดิน โดยมีวิธีการตรวจวัดแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 แสดงดัชนีต่างๆ ที่เกี่ยวข้องและวิธีการตรวจวัด

ดัชนีต่างๆ ที่เกี่ยวข้อง	วิธีการตรวจวัด
1. ลักษณะเนื้อดิน (soil texture)	Hydrometer Method (ASTM, 2002) และจำแนกชนิดของเนื้อดินโดยใช้สามเหลี่ยมโดอะแกรม
2. ความเข้มข้นของสารหนู (As) และเหล็ก (Fe)	U.S.EPA 3051A (U.S.EPA, 2007) โดยใช้เครื่อง Microwave
2.1 การย่อยตัวอย่างดิน	
2.2 การตรวจวัดความเข้มข้นของสารหนูและเหล็ก	U.S.EPA 6010D (U.S.EPA, 2018) โดยใช้เครื่อง ICP-OES
3. ค่าพีเอชของดิน (pH)	U.S.EPA 9045D Soil and Waste pH (U.S.EPA, 2004)
4. สภาพปฏิกิริยารีดอกซ์ (ORP)	ASTM G200-09 (ASTM, 2014) ใช้เครื่องวัดค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า ระหว่างขั้ว
5. ปริมาณอินทรีย์วัตถุในดิน (OM)	Walkley and Black Method (Walkley and Black, 1934)
6. ปริมาณซัลไฟด์ (Sulfide)	ประยุกต์จากวิธีของ Yekta et al. (2012) โดยใช้เครื่อง ISE



การประชุมเสนอผลงานวิจัยระดับชาติ มหาวิทยาลัยสุโขทัยธรรมาธิราช ครั้งที่ 8

The 8th STOU National Research Conference

3.2 ศึกษาการกระจายสัดส่วน (Fractionation) ของสารหนูในดิน

ใช้เทคนิคการสกัดแบบลำดับส่วน (Sequential Extraction) โดยวิธี Modified Tessier (Rauret et al., 1989) มี 5 ขั้นตอน ซึ่งการสกัดในแต่ละขั้นตอนจะใช้สารละลายที่จำเพาะต่อการชะละลายในองค์ประกอบต่างๆ ของดิน ดังแสดงในตารางที่ 2 (ทำการทดลอง 3 ซ้ำ)

ตารางที่ 2 แสดงขั้นตอนและสารเคมีที่ใช้ในการสกัดลำดับส่วนโดยวิธี Modified Tessier

ขั้นตอน	สารเคมีที่ใช้สกัด	ปริมาตร (มล.)	การกระจายสัดส่วน
1	ใช้ดิน 0.8 g เติม 1 M $MgCl_2$	6.4	F1: ส่วนที่ชะละลายออกมาได้ง่าย
2	เติม 1 M CH_3COONa ที่ปรับ pH 5 ด้วย CH_3COOH	35	F2: ส่วนที่จับอยู่กับคาร์บอเนต
3	เติม 0.04 M $NH_2OH \cdot HCl$ + 25% CH_3COOH	35	F3: ส่วนที่จับอยู่กับออกไซด์ของเหล็กและแมงกานีส
4	4.1 เติม 0.02 M HNO_3 + 30% H_2O_2	2.4, 4	F4: ส่วนที่จับอยู่กับสารอินทรีย์และซิลิเกต
	4.2 เติม 0.026 M HNO_3 ใน 30% H_2O_2	2.4	
	4.3 เติม 3.2 M $NaOAc$ ใน 20% HNO_3	4	
5	สกัดด้วย Aqua regia	8	F5: ส่วนที่คงตัว

เมื่อสิ้นสุดการสกัดแต่ละขั้นตอน ให้นำไปหมนเหวี่ยงเพื่อให้ดินและน้ำสกัดแยกส่วนกัน จากนั้นเก็บตัวอย่างน้ำและกรองด้วยตัวกรอง (Syringe filter) ขนาด 0.45 ไมโครเมตร และน้ำสกัดที่ได้ในส่วนนี้จะใช้ในการตรวจวิเคราะห์ความเข้มข้นของสารหนู สำหรับขั้นตอนการล้างตัวอย่างดินที่เหลือ จะใช้น้ำ DI (Deionized water) 7 มล. ปิดฝา เขย่าและนำไปหมนเหวี่ยง 30 นาที ทิ้งน้ำในส่วนนี้ไป จากนั้นนำตัวอย่างหลอดเดิมที่มีตัวอย่างดินอยู่ มาใช้ในการสกัดขั้นตอนต่อไป ทั้งนี้เมื่อพิจารณาการร้อยละการกลับคืน (% Recovery) ของปริมาณสารหนูในดิน พบว่ามีร้อยละการกลับคืนของสารหนู (Pseudo-total As)เฉลี่ยเท่ากับร้อยละ 95.19 เมื่อเทียบกับความเข้มข้นทั้งหมดของสารหนู (Total As)

3.3 ศึกษาชีวปริมาณออกฤทธิ์ (Bioavailability) ของสารหนูในดิน

ใช้เทคนิคการสกัดแบบขั้นตอนเดียว (Single Extraction) ซึ่งใช้วิธีการสกัดด้วย EDTA โดย Gregori et al. (2003) พบว่าการสกัดดินโดยใช้ EDTA 0.05 โมลาร์ เป็นวิธีที่ใช้บ่งบอกความสัมพันธ์ระหว่างชีวปริมาณออกฤทธิ์ของสารหนูในดินแล้วได้ ซึ่งมี R^2 สูงถึง 0.94 โดยมีขั้นตอน คือ เตรียมตัวอย่างดิน 1 กรัมและเติม EDTA 0.05 โมลาร์ ปริมาตร 10 มล. ที่ปรับค่า pH เป็น 7 ด้วย NH_4OH เขย่าเป็นเวลา 30 นาทีที่อุณหภูมิห้อง จากนั้นนำสารละลายที่ได้มากรองด้วย Syringe filter และนำสารละลายที่ได้มาทำการตรวจวิเคราะห์ความเข้มข้นของสารหนูโดยใช้เครื่อง ICP-OES (ทำการทดลอง 3 ซ้ำ)



การประชุมเสนอผลงานวิจัยระดับชาติ มหาวิทยาลัยสุโขทัยธรรมาธิราช ครั้งที่ 8

The 8th STOU National Research Conference

ผลการวิจัย

1. ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของดิน

ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติของดินทั้งทางกายภาพและทางเคมีของตัวอย่างดิน แสดงในตารางที่ 4-1 จากการศึกษา ตัวอย่างดินในบริเวณพื้นที่ราบลุ่มที่และในบริเวณพื้นที่เนินเขา พบว่าดินทั้ง 2 พื้นที่ที่มีคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีที่คล้ายคลึงกัน โดยลักษณะเนื้อดินที่พบส่วนใหญ่ คือ ดินเหนียวและดินร่วนเหนียว ดินมีความเป็นกรด ซึ่งมีค่าพีเอชตั้งแต่ 5 ถึง 6 ส่วนปริมาณอินทรีย์วัตถุมีค่าเฉลี่ยประมาณ 2.4% ซึ่งถือว่ามีความอุดมสมบูรณ์ของดินอยู่ในระดับสูง เนื่องจากมีค่ามากกว่า 2% (สถาบันวิจัยข้าว, 2547) ส่วนค่า ORP พบว่ามีค่าตั้งแต่ +324 ถึง +440 มิลลิโวลต์ ซึ่งเป็นค่าที่สูง บ่งชี้ว่ามือออกซิเจนเป็นตัวรับอิเล็กตรอนในดิน (LePage, 2001) จากข้อมูลดังกล่าวสอดคล้องกับการไม่พบค่าความเข้มข้นซัลไฟด์ในดิน ($LOD < 0.01$ มก./กก.) ซึ่งจะพบที่ค่า ORP น้อยกว่า -100 มิลลิโวลต์ ส่วนความเข้มข้นเหล็กทั้งหมดที่พบในดินมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 27,042 มก./กก. ซึ่งอยู่ในช่วงค่าความเข้มข้นของเหล็กที่พบในดิน (ค่าความเข้มข้นของเหล็กในดินมีค่า 29,000–67,000 มก./กก.) (Prakongkep, 2008) สำหรับความเข้มข้นสารหนูทั้งหมดที่พบในดินมีค่าสูงเกินค่ามาตรฐานในทุกจุด จากข้อมูลพระราชบัญญัติส่งเสริมและรักษาคุณภาพสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ พ.ศ. 2535 ได้กำหนดค่ามาตรฐานของสารหนูในดินที่ใช้ประโยชน์เพื่อการอยู่อาศัยและเกษตรกรรม ต้องมีค่าไม่เกิน 3.9 มก./กก. โดยค่าความเข้มข้นสารหนูมีค่าสูงเกินค่ามาตรฐานคาดว่าเกิดมาจากลักษณะทางธรรมชาติของพื้นที่ศักยภาพแหล่งแร่ อีกทั้งสารหนูยังเป็นองค์ประกอบของหินและแร่ตามธรรมชาติ และเมื่อพิจารณาค่าความเข้มข้นของสารหนูในดินทั้ง 2 บริเวณ พบว่าดินบริเวณพื้นที่ราบลุ่มมีความเข้มข้นของสารหนูมากกว่าดินบริเวณพื้นที่เนินเขาอย่างเห็นได้ชัด ซึ่งคาดว่าจะเกิดจากการพัดพาสะสม หรืออาจรวมถึงผลของยาฆ่าแมลง ซึ่งไม่ทราบที่มาที่แน่ชัด และการที่ดินบริเวณพื้นที่เนินเขามีความเข้มข้นของสารหนูสูงเกินค่ามาตรฐาน โดยมีค่าเฉลี่ยประมาณ 17 มก./กก. คาดว่าเป็นค่าพื้นฐานของดินในบริเวณดังกล่าว

ตารางที่ 3 แสดงคุณสมบัติของดินทั้งทางกายภาพและทางเคมีที่เกี่ยวข้อง

ประเภทดิน	ตัวอย่างดิน	ลักษณะเนื้อดิน	ค่า pH	ปริมาณอินทรีย์วัตถุ (%)	ค่า ORP (mV)	ความเข้มข้น Fe (มก./กก.)	ความเข้มข้น As (มก./กก.)
พื้นที่ราบลุ่ม	A3 (นา 1)	ดินเหนียว	5.28 ± 0.01	2.60	378.50 ± 9.24	$33,127 \pm 1556$	40.95 ± 0.61
	A4 (นา 2)	ดินร่วนเหนียว	6.00 ± 0.02	2.07	324.40 ± 1.80	$27,203 \pm 2067$	36.59 ± 2.75
	B3 (นา 3)	ดินร่วนเหนียว	5.59 ± 0.06	2.18	440.30 ± 9.40	$29,557 \pm 1319$	48.65 ± 0.47
	B4 (นา 4)	ดินเหนียว	5.93 ± 0.16	2.31	359.27 ± 12.75	$22,940 \pm 1954$	35.14 ± 1.46
พื้นที่เนินเขา	C4 (เนิน 1)	ดินเหนียว	5.17 ± 0.04	3.64	441.70 ± 4.21	$27,497 \pm 827$	10.74 ± 2.47
	D1 (เนิน 2)	ดินร่วน	5.73 ± 0.1	1.65	389.13 ± 9.05	$33,190 \pm 2550$	17.98 ± 2.40
	D3 (เนิน 3)	ดินร่วนเหนียว	6.32 ± 0.06	2.31	392.70 ± 7.23	$15,783 \pm 769$	23.83 ± 3.37

หมายเหตุ: คุณสมบัติของดินทั้งทางกายภาพและทางเคมีแสดงผลเป็นค่าเฉลี่ย

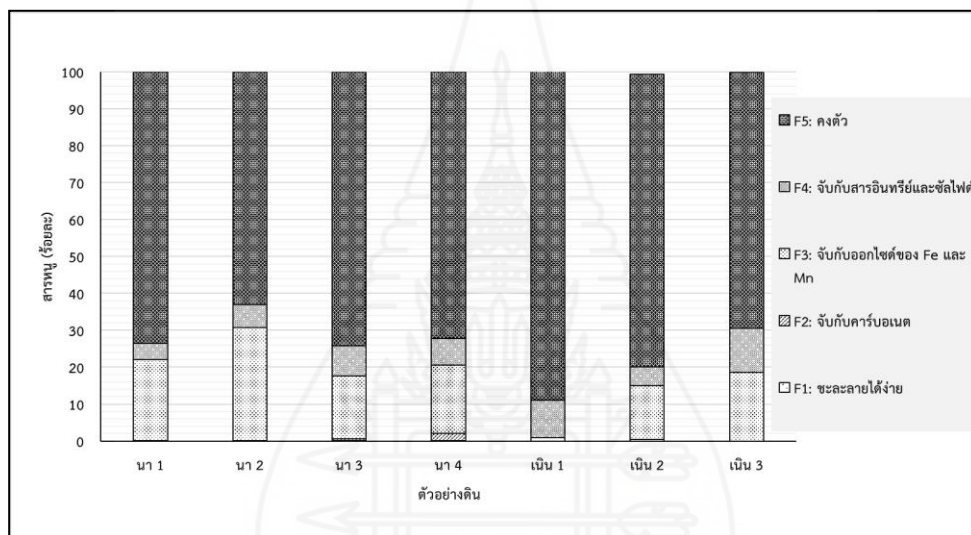


การประชุมเสนอผลงานวิจัยระดับชาติ มหาวิทยาลัยสุโขทัยธรรมาธิราช ครั้งที่ 8

The 8th STOU National Research Conference

2. ผลการศึกษาการกระจายสัดส่วนของสารหนูในดินโดยใช้วิธีการสกัดลำดับส่วนด้วยวิธี Modified Tessier

ผลการศึกษาการกระจายสัดส่วนของสารหนูในดินสามารถแบ่งได้ 5 ส่วน ซึ่งแสดงในรูปที่ 1 ประกอบด้วย ส่วนที่ชะละลายออกมาได้ง่าย (F1) ส่วนที่จับอยู่กับคาร์บอนเนต (F2) ส่วนที่จับอยู่กับออกไซด์ของเหล็กและแมงกานีส (F3) ส่วนที่จับอยู่กับสารอินทรีย์และซิลิเกต (F4) และส่วนที่คงตัว (F5) จากการศึกษาพบว่า สารหนูในดินทั้งบริเวณพื้นที่ราบลุ่ม และบริเวณพื้นที่เนินเขามีการกระจายสัดส่วนอยู่ในส่วนที่คงตัวมากที่สุด (ประมาณร้อยละ 74) รองลงมาคือจับอยู่กับออกไซด์ของเหล็กและแมงกานีส (ประมาณร้อยละ 17) และจับอยู่กับสารอินทรีย์และซิลิเกต (ประมาณร้อยละ 7) ตามลำดับ ในขณะที่สารหนูส่วนที่ชะละลายออกมาได้ง่ายรวมถึงส่วนที่จับอยู่กับคาร์บอนเนตมีปริมาณน้อยมาก (ประมาณร้อยละ 0.31)



รูปที่ 1 ผลการสกัดลำดับส่วนด้วยวิธี Modified Tessier ของสารหนู แสดงผลแบบร้อยละ (%)

3. ผลการศึกษาชีวปริมาณออกฤทธิ์ของสารหนูในดินใช้วิธีการสกัดแบบขั้นตอนเดียว โดยใช้วิธีการสกัดด้วย EDTA

ผลการศึกษาชีวปริมาณออกฤทธิ์ของสารหนูในดินโดยใช้เทคนิคการสกัดแบบขั้นตอนเดียว ซึ่งใช้วิธีการสกัดด้วย EDTA พบว่าความเข้มข้นของสารหนูที่สกัดได้ มีค่าตั้งแต่ร้อยละ 1 ถึง 6 ของความเข้มข้นของสารหนูทั้งหมด ซึ่งค่าที่ได้ถือว่าต่ำมาก

อภิปรายผลการวิจัย

1. ผลของการใช้ประโยชน์ที่ดินต่อคุณสมบัติของดินทั้งทางกายภาพและทางเคมี การกระจายสัดส่วน รวมถึงชีวปริมาณออกฤทธิ์ของสารหนู

หากพิจารณาลักษณะของพื้นที่ ในบริเวณพื้นที่ราบลุ่มมีการเพาะปลูกข้าว คาดการณ์ว่าพื้นที่ดังกล่าวเป็นบริเวณที่มีน้ำขัง และอาจเกิดการหมักหมมของอินทรีย์วัตถุในดิน ประกอบกับการที่ออกซิเจนไม่สามารถส่งผ่านลงมาถึงดินได้เพียงพอ



การประชุมเสนอผลงานวิจัยระดับชาติ มหาวิทยาลัยสุโขทัยธรรมาธิราช ครั้งที่ 8

The 8th STOU National Research Conference

จนมีค่า ORP ต่ำจนเกิดซัลไฟด์ โดยดินในนาข้าวอาจมีค่า ORP ต่ำได้ถึง -200 มิลลิโวลต์ (Gotoh and Yamashita, 1966) จึงอาจพบสารหนูในส่วนที่จับอยู่กับซัลไฟด์ (F4) ได้มากกว่าดินทั่วไป ส่วนบริเวณพื้นที่เนินเขาที่มีการปลูกยางพารา คาดการณ์ว่าเป็นบริเวณที่ไม่มีน้ำขัง น่าจะมีการสัมผัสกับอากาศ มีออกซิเจนเพียงพอ และมีค่า ORP ที่ค่อนข้างสูง ซึ่งคาดการณ์ว่า 2 พื้นที่ดังกล่าวน่าจะมีการแตกต่างกันในเรื่ององค์ประกอบของดิน การกระจายสัดส่วน รวมถึงชีวปริมาณออกฤทธิ์ของสารหนูในดิน

อย่างไรก็ตาม ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติของดินทั้งทางกายภาพและทางเคมีของตัวอย่างดิน พบว่าตัวอย่างดินที่เก็บในบริเวณพื้นที่ราบลุ่มที่และบริเวณพื้นที่เนินเขาส่วนใหญ่มีคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีที่คล้ายคลึงกัน ทั้งลักษณะเนื้อดิน ความเข้มข้นของเหล็ก ค่าพีเอช สภาพปฏิกิริยารีดอกซ์ ปริมาณอินทรีย์วัตถุในดิน รวมถึงความเข้มข้นซัลไฟด์ในดิน แต่มีความแตกต่างกันที่ความเข้มข้นสารหนูทั้งหมดที่พบในดิน และเมื่อศึกษาการกระจายสัดส่วนรวมถึงชีวปริมาณออกฤทธิ์ของสารหนูในดินทั้ง 2 บริเวณ พบว่าการกระจายสัดส่วนของสารหนูในดิน มีสัดส่วนที่ใกล้เคียงกัน อีกทั้งชีวปริมาณออกฤทธิ์ของสารหนูก็มีค่าต่ำพอๆ กัน ซึ่งน่าจะเป็นผลจากการที่ดินในบริเวณพื้นที่ราบลุ่มในพื้นที่ศึกษามีน้ำจากช่องเขาไหลผ่านตลอดเวลา ทำให้ดินมีออกซิเจนที่มากพอ

ดังนั้นจากข้อมูลการศึกษาในข้างต้น อาจสรุปได้ว่าการใช้ประโยชน์ที่ดินใน 2 บริเวณดังกล่าว ทั้งบริเวณพื้นที่ราบลุ่มที่มีการเพาะปลูกข้าวและบริเวณพื้นที่เนินเขาที่มีการปลูกยางพาราไม่ได้มีความแตกต่างกัน และไม่ได้ส่งผลต่อการกระจายสัดส่วนรวมถึงชีวปริมาณออกฤทธิ์ของสารหนูในดิน

2. การกระจายสัดส่วนของสารหนูในดินในพื้นที่ศึกษา

จากผลการศึกษาการกระจายสัดส่วนของสารหนูในดินสามารถแบ่งได้ 5 ส่วน ซึ่งการกระจายสัดส่วนของสารหนูในดิน พบว่าสารหนูอยู่ในส่วนที่คงตัว (F5) มากที่สุดในช่วงต้นนั้น คาดว่าเป็นผลมาจากแหล่งกำเนิดทางธรรมชาติของสารหนูในพื้นที่ ทั้งวัตถุดิบกำเนิดดิน (Parent material) รวมถึงการปะปนอยู่ในสายแร่ใต้ดิน ซึ่งบริเวณที่ศึกษาเป็นพื้นที่ศักยภาพแหล่งแร่ทองคำ สารหนูส่วนใหญ่ มักพบอยู่ในแร่ไพไรต์และอาร์เซนไพไรต์ (สายสวาท สโล, 2554) ซึ่งสารหนูในส่วนนี้เป็นส่วนที่มีความเสถียร สามารถคงตัวในดินได้นาน ส่วนสารหนูที่จับอยู่กับออกไซด์ของเหล็กและแมงกานีส (F3) เป็นส่วนที่พบรองลงมา เนื่องจากออกไซด์ของเหล็กเป็นออกไซด์ที่พบมากในสภาพแวดล้อมบนผิวโลก เช่น ในดิน และตะกอนต่างๆ ซึ่งเป็นส่วนสำคัญที่มลสารจะไปจับโดยใช้กลไกต่างๆ เช่น การแลกเปลี่ยนประจุ การตกตะกอนร่วม หรือการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนบนพื้นผิว โดยการศึกษาของ Kim et al. (2014) พบว่าสารหนูมักจับอยู่กับเหล็กทั้งในรูปแบบที่เป็นผลึก (Crystalline) และไม่เป็นผลึก (Amorphous) ส่วนสารหนูที่จับอยู่กับสารอินทรีย์และซัลไฟด์ (F4) พบเป็นอันดับ 3 โดยในการศึกษานี้ไม่พบซัลไฟด์ สารหนูที่ปรากฏใน F4 นี้จึงเชื่อว่าเป็นสารหนูที่จับอยู่กับสารอินทรีย์ โดย Buzek et al. (2002) อธิบายว่า ธาตุมลสารที่เป็นโลหะหนักในดิน เช่น เหล็ก อลูมิเนียม และแมงกานีส จะฟอร์มประจุบวกระหว่างพื้นผิวของสารอินทรีย์ในดิน (ซึ่งมีประจุลบ) กับสารหนู (ซึ่งมีประจุลบ) ซึ่งทำให้สารหนูจับกับสารอินทรีย์ได้ และสารหนูในส่วนนี้จะมีความเสถียรที่ค่อนข้างสูง ซึ่งจากการวิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมีในดิน พบว่าค่าความเข้มข้นของซัลไฟด์ในดินไม่สามารถตรวจวัดได้ ดังนั้นสารหนูที่พบในส่วนนี้น่าจะจับกับอินทรีย์วัตถุในดิน ส่วนสารหนูส่วนที่ชะละลายออกมาได้ง่าย (F1) รวมถึงส่วนที่จับอยู่กับคาร์บอนเนต (F2) มีปริมาณน้อยมากหรือตรวจไม่พบ อาจเนื่องจากสารหนูในบริเวณพื้นที่ดังกล่าวถูกดูดซับหรือตรึงไว้ในองค์ประกอบต่างๆ ของดิน

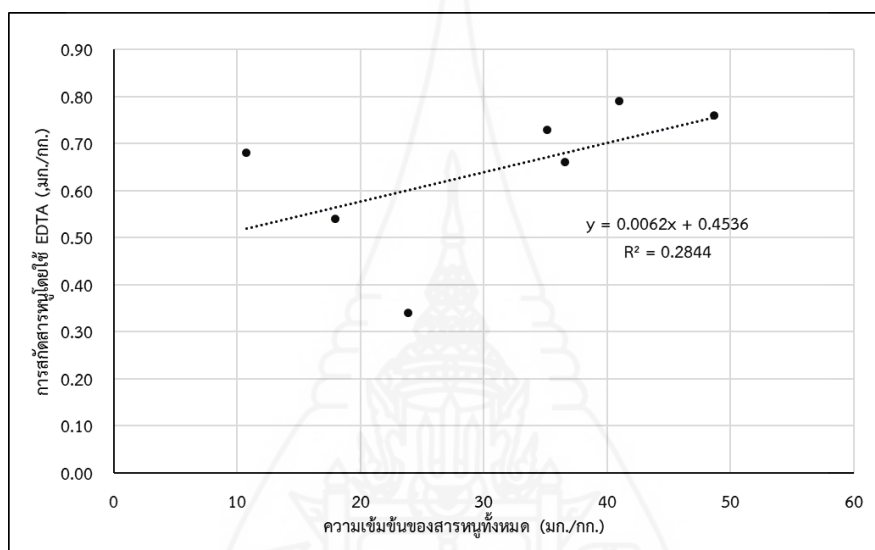


การประชุมเสนอผลงานวิจัยระดับชาติ มหาวิทยาลัยสุโขทัยธรรมาธิราช ครั้งที่ 8

The 8th STOU National Research Conference

3. ชีวปริมาณออกฤทธิ์ของสารหนูกับความเข้มข้นทั้งหมดของสารหนูในดิน

จากผลการศึกษาชีวปริมาณออกฤทธิ์ของสารหนูในดิน พบว่าความเข้มข้นของสารหนูที่สกัดได้มีค่าต่ำมาก และเมื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารหนูที่สกัดได้กับความเข้มข้นของสารหนูทั้งหมดในดิน เมื่อการพิจารณาความสัมพันธ์สหสัมพันธ์ (R^2) พบว่ามีค่าสหสัมพันธ์สหสัมพันธ์อยู่ที่ 0.2844 ซึ่งมีค่าต่ำ ดังแสดงในรูปที่ 2 กล่าวได้ว่าความเข้มข้นของสารหนูที่เพิ่มขึ้นไม่สามารถบ่งบอกถึงชีวปริมาณออกฤทธิ์ของสารหนูในดิน



รูปที่ 2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างวิธีการสกัดด้วย EDTA (มก./กก.) และความเข้มข้นของสารหนูทั้งหมดในดิน (มก./กก.)

4. ชีวปริมาณออกฤทธิ์ของสารหนูกับการกระจายสัดส่วนของสารหนูในดิน

จากผลการศึกษาชีวปริมาณออกฤทธิ์ของสารหนูในดิน พบว่าความเข้มข้นของสารหนูที่สกัดได้มีค่าต่ำมาก และเมื่อพิจารณาควบคู่กับผลการศึกษาการกระจายสัดส่วนของสารหนูในดิน พบว่าสารหนูส่วนที่ชะละลายออกมาได้ง่าย (F1) รวมถึงส่วนที่จับอยู่กับคาร์บอนเนต (F2) มีปริมาณน้อยมาก จึงคาดว่าชีวปริมาณออกฤทธิ์ของสารหนูที่สกัดด้วยวิธี EDTA น่าจะมีความสัมพันธ์กับสารหนูส่วนที่ชะละลายออกมาได้ง่าย (F1) และส่วนที่จับอยู่กับคาร์บอนเนต (F2)

เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างการกระจายสัดส่วน พบเพียงความสัมพันธ์เชิงบวกกับสารหนูส่วนที่ชะละลายออกมาได้ง่าย (F1) เพียงตัวเดียว ดังแสดงในรูปที่ 5-2 พบว่ามีค่าสหสัมพันธ์สหสัมพันธ์ (R^2) อยู่ที่ 0.9528 ซึ่งมีค่าเข้าใกล้ 1 ดังนั้นส่วนที่เป็นชีวปริมาณออกฤทธิ์ของสารหนูหรือปริมาณสารหนูที่มีศักยภาพในการสะสมในสิ่งมีชีวิตในดิน คือ ส่วนที่ชะละลายออกมาได้ง่าย (F1)

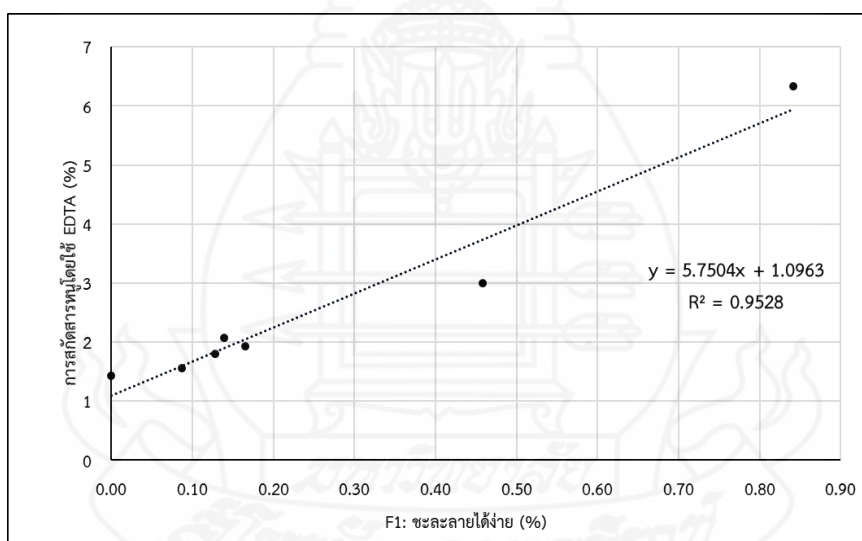
นอกจากนี้การที่ไม่พบความสัมพันธ์กับสารหนูในส่วนอื่นๆ คาดว่าน่าจะเป็นเพราะความเข้มข้นของสารหนูที่สกัดได้นั้นมีค่าต่ำมาก จึงไม่พบความสัมพันธ์กับสารหนูในส่วนที่จับอยู่กับออกไซด์ของเหล็กและแมงกานีส (F3) และส่วนที่คงตัว (F5) ซึ่งมีค่าความเข้มข้นของสารหนูสูง



การประชุมเสนอผลงานวิจัยระดับชาติ มหาวิทยาลัยสุโขทัยธรรมาธิราช ครั้งที่ 8

The 8th STOU National Research Conference

โดยปกติแล้วการศึกษาชีวปริมาณออกฤทธิ์ของธาตุมลสารมักพบว่า มีความสัมพันธ์กับการกระจายสัดส่วนของธาตุมลสาร ในส่วนที่เคลื่อนที่ได้ง่าย (Mobile Fraction) เช่น สัดส่วนที่ชะละลายออกมาได้ง่าย (F1) และส่วนที่จับกับคาร์บอนเนต (F2) โดยการสกัดแบบ Tessier ทั้งนี้ จากการศึกษาของ Wang et al. (2015) ศึกษาการกระจายสัดส่วนของสารหนูในดิน โดยใช้การสกัดลำดับส่วน รวมถึงศึกษาชีวปริมาณออกฤทธิ์ของสารหนูโดยใช้การสกัดแบบขั้นตอนเดียว พบความสัมพันธ์เชิงบวกระหว่างชีวปริมาณออกฤทธิ์กับส่วนที่เคลื่อนที่ได้ง่าย ซึ่งมี R^2 สูงถึง 0.83 ซึ่งผลที่ได้มีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกับการศึกษานี้ นอกจากนี้ยังพบว่ามีความสัมพันธ์เชิงลบกับสารหนูในส่วนที่จับกับเหล็กในฟอร์มต่างๆ รวมถึงสารหนูในส่วนที่คงตัว ซึ่งหมายความว่า สารหนูส่วนที่จับอยู่กับออกไซด์ของเหล็กและแมงกานีส (F3) และส่วนที่คงตัว (F5) ที่พบนั้น ไม่สามารถบ่งบอกถึงชีวปริมาณออกฤทธิ์ของสารหนูในดินได้ สอดคล้องกับการศึกษาของ Liu et al. (2015) ที่พบว่าเหล็กออกไซด์เป็นออกไซด์ที่พบมากในสภาพแวดล้อมบนผิวโลก ทั้งในดินและตะกอนดิน ซึ่งมีบทบาทสำคัญในการลดชีวปริมาณออกฤทธิ์ของสารหนูในข้าว เนื่องจากสารหนูจับกับเหล็กออกไซด์ด้วยพันธะที่แข็งแรง รวมถึงการศึกษาของ Wang et al. (2015) ที่พบว่าสารประกอบออกไซด์ของเหล็กและอลูมิเนียมเป็นปัจจัยที่สำคัญที่สุดในการควบคุมชีวปริมาณออกฤทธิ์และการเคลื่อนที่ของสารหนูในดิน



รูปที่ 3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างวิธีการสกัดด้วย EDTA (%) และการกระจายสัดส่วนในส่วน F1 (%)

ข้อเสนอแนะ

หากมีการศึกษาต่ออาจมีการเพิ่มสภาวะ (condition) ในการศึกษา เช่น เพิ่มการจำลองดินในสภาวะไร้ออกซิเจน เพื่อเปรียบเทียบกับดินในสภาวะปกติ นอกเหนือจากนี้อาจมีการเก็บพืชผลทางการเกษตรในพื้นที่ มาทำการศึกษาโดยตรง เพื่อใช้เป็นข้อมูลในการเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการสกัด



การประชุมเสนอผลงานวิจัยระดับชาติ มหาวิทยาลัยสุโขทัยธรรมาธิราช ครั้งที่ 8

The 8th STOU National Research Conference

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา (สกอ.) และสำนักพัฒนาบัณฑิตศึกษาและวิจัยด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี (สบว.) สำหรับทุนอุดหนุนโปรแกรมวิจัย ขอขอบคุณกองทุนรัชดาภิเษกสมโภช จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย สำหรับทุนสนับสนุนหน่วยปฏิบัติการวิจัยฯ และขอขอบคุณสถาบันวิจัยสภาวะแวดล้อม และศูนย์ความเป็นเลิศด้านการจัดการสารและของเสียอันตราย (ศสอ.) จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ได้อำนวยความสะดวกและสนับสนุนในด้านเครื่องมือและอุปกรณ์วิทยาศาสตร์อันเป็นประโยชน์ต่อความสำเร็จของการดำเนินงานวิจัยในครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

- จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, สถาบันวิจัยสภาวะแวดล้อม. (2555). *โครงการสำรวจการกระจายตัวและแหล่งที่มาของการปนเปื้อนโลหะหนักในเขตพื้นที่แหล่งแร่ทองคำภูทับฟ้า ตำบลเขาหลวง อำเภอวังสะพุง จังหวัดเลย*. กรุงเทพมหานคร: บริษัท จรัสสินทวงศ์ การพิมพ์ จำกัด.
- วิชาการเกษตร, กรม. สถาบันวิจัยข้าว. (2547). *คำแนะนำในการใช้ปุ๋ยเคมีตามค่าการวิเคราะห์ดิน*. กรุงเทพฯ.
- สายสวาท สีลอ. (2554). *เทคนิคการวิเคราะห์สารหนูและพลวงปริมาณน้อยโดยวิธีไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์*. กรุงเทพฯ : สำนักวิเคราะห์วิจัยทรัพยากรธรณี กรมทรัพยากรธรณี.
- ASTM D422-63. (2002). *Standard Test Method for Particle-Size Analysis of Soils*, ASTM International, West Conshohocken, PA.
- ASTM G200-09. (2014). *Standard Test Method for Measurement of Oxidation-Reduction Potential (ORP) of Soil*, ASTM International, West Conshohocken, PA.
- Buzek, F., Cejkova, B., Dousova, B., Jackova, I., Kadlecova, R., and Lnenickova, F. (2013). Mobilization of arsenic from acid deposition-the Elbe River catchment, Czech Republic. *Appl Geochem*, 33, 281-293.
- De Gregori, I., Fuentes, E., Olivares, D., and Pinochet, H. (2004). Extractable copper, arsenic and antimony by EDTA solution from agricultural Chilean soils and its transfer to alfalfa plants (*Medicago sativa* L.). *J Environ Monit*, 6, 38-47.
- Gotoh, S., and Yamashita, K. (1966). Oxidation-reduction potential of a paddy soil in situ with special reference to the production of ferrous iron, manganous manganese and sulfide. *Soil Science and Plant Nutrition*, 12(6), 24-32.
- Kim, E. J., Yoo, J. C., and Baek, K. (2014). Arsenic speciation and bioaccessibility in arsenic-contaminated soils: sequential extraction and mineralogical investigation. *Environmental pollution*, 186, 29-35.
- Kirkham, M. (2006). Cadmium in plants on polluted soils: effects of soil factors, hyperaccumulation, and amendments. *Geoderma*, 137(1-2), 19-32.



การประชุมเสนอผลงานวิจัยระดับชาติ มหาวิทยาลัยสุโขทัยธรรมาธิราช ครั้งที่ 8

The 8th STOU National Research Conference

- Kuo, S. (1996). Phosphorus. In D. L. Sparks, A. L. Page, P. A. Helmke, & R. H. Loeppert (Eds.), *Methods of Soil Analysis Part 3—Chemical Methods*. *Soil Science Society of America, American Society of Agronomy*, 869–919.
- LePage, B. A. (Editors). (2001). *Wetlands : Integrating Multidisciplinary Concepts*. Springer, Netherlands.
- Prakongkep, N., Suddhiprakarn, A., Kheoruenromne, I., Smirk, M., and Gilkes, R. J. (2008). The geochemistry of Thai paddy soils. *Geoderma*, 144(1–2), 310–324.
- Peryea, F. J. (2006). Evaluation of five soil tests for predicting responses of apple trees planted in lead arsenate-contaminated soil. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 33, 243–257.
- Liu, C., Yu, H. Y., Liu, C., Li, F., Xu, X., and Wang, Q. (2015). Arsenic availability in rice from a mining area: is amorphous iron oxide-bound arsenic a source or sink? *Environmental pollution*, 199, 95–101.
- Rauret, G., Rubio, R., and López-Sánchez, J. F. (1989). Optimization of Tessier Procedure for Metal Solid Speciation in River Sediments. *International Journal of Environmental Analytical Chemistry*, 36, 69–83.
- United States Environment Protection Agency. (2004). *Method 9045D Soil and Waste pH*. Available Source
- United States Environment Protection Agency. (2007). “*Method 3051A (SW-846): Microwave Assisted Acid Digestion of Sediments, Sludges, and Oils*,” Revision 1. Washington, DC.
- Wang, Y., Zeng, X., Lu, Y., Su, S., Bai, L., Li, L., and Wu, C. (2015). Effect of aging on the bioavailability and fractionation of arsenic in soils derived from five parent materials in a red soil region of Southern China. *Environmental pollution*, 207, 79–87.
- Walkley, A. and Black, I.A. (1934). An Examination of the Degtjareff Method for Determining Soil Organic Matter and a Proposed Modification of the Chromic Acid Titration Method. *Soil Science*, 37, 29–38. <http://dx.doi.org/10.1097/00010694-193401000-00003>
- Wenzel, W. W., Kirchbaumer, N., Prohaska, T., Stingeder, G., Lombi, E., and Adriano, D. C. (2001). Arsenic fractionation in soils using an improved sequential extraction procedure. *Analytical chimica acta*, 436. 309–323.
- Yekta, S. S., Gustavsson, J., Svensson, B. H., and Skyllberg, U. (2012). Sulfur K-edge XANES and acid volatile sulfide analyses of changes in chemical speciation of S and Fe during sequential extraction of trace metals in anoxic sludge from biogas reactors. *Talanta*, 89, 470–477.