การกระจายสัดส่วนและชีวปริมาณออกฤทธิ์ของสารหนูในดินในพื้นที่เกษตรกรรม บริเวณคลองน้ำฮวย ตำบลเขาหลวง อำเภอวังสะพุง จังหวัดเลย

น.ส.อภิชญา ดวงทอง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม สหสาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม
บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2561

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

FRACTIONATION AND BIOAVAILABILITY OF ARSENIC IN SOIL IN AGRICULTURAL AREA OF NAM HUAI CANAL KAOLUANG SUB-DISTRICT, WANG SAPHUNG DISTRICT, LOEI PROVINCE

Miss Apichaya Duangthong

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Science in Environmental Science
Inter-Department of Environmental Science
Graduate School
Chulalongkorn University
Academic Year 2018
Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การกระจายสัดส่วนและชีวปริมาณออกฤทธิ์ของสารหนูในดินในพื้นที่เกษตรกรรม บริเวณคลองน้ำฮวย ตำบลเขาหลวง อำเภอวังสะพุง จังหวัดเลย
โดย	น.ส.อภิชญา ดวงทอง
สาขาวิชา	วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	ดร.ศีลาวุธ ดำรงศิริ

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

.... คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

(รองศาสตราจารย์ ดร.ธรรมนูญ หนูจักร)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.... ประธานกรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร.ศรีเลิศ โชติพันธรัตน์)

.... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(ดร.ศีลาวุธ ดำรงศิริ)

.... กรรมการ

(ดร.ภุมรินทร์ คำเดชศักดิ์)

.... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย

(รองศาสตราจารย์ ดร.ตุลวิทย์ สถาปนจารุ)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

อภิชญา ดวงทอง : การกระจายสัดส่วนและชีวปริมาณออกฤทธิ์ของสารหนูในดินในพื้นที่เกษตรกรรม บริเวณคลองน้ำฮวย ตำบลเขาหลวง อำเภอวังสะพุง จังหวัดเลย. (FRACTIONATION AND BIOAVAILABILITY OF ARSENIC IN SOIL IN AGRICULTURAL AREA OF NAM HUAI CANAL KAOLUANG SUB-DISTRICT, WANG SAPHUNG DISTRICT, LOEI PROVINCE) อ.ที่ปรึกษาหลัก : ดร.ศีลาวุธ ดำรงศิริ

พื้นที่เกษตรกรรมบริเวณคลองน้ำฮวย อำเภอวังสะพุง จังหวัดเลย เป็นพื้นที่ที่มีการปนเปื้อนสารหนูในดิน ลักษณะการใช้พื้นที่เกษตรกรรมที่แตกต่างกันอาจทำให้การกระจายสัดส่วนและชีวปริมาณออกฤทธิ์ของสารหนูเปลี่ยนแปลงไป การศึกษานี้ได้ดำเนินการในดินบริเวณที่ราบลุ่มที่มีการเพาะปลูกข้าว และดินบริเวณที่เนินเขาที่มีการปลูกยางพารา โดยศึกษาลักษณะทางกายภาพและเคมีของดิน และใช้เทคนิคการสกัดตามลำดับส่วนแบบ Modified Tessier รวมถึงศึกษาชีวปริมาณออกฤทธิ์ของสารหนูในดินโดยการสกัดด้วย EDTA จากการศึกษาพบว่าดินทั้งสองบริเวณมีลักษณะทางกายภาพและเคมีที่คล้ายคลึงกัน คือ ดินมีค่าพีเอชเป็นกรด (พีเอชประมาณ 5) ค่าอีเอชสูง (เฉลี่ย +635.71 มิลลิโวลต์) ปริมาณอินทรียวัตถุสูง (เฉลี่ยร้อยละ 2.47) ยกเว้นความเข้มข้นของสารหนูที่พบว่าดินบริเวณที่ราบลุ่ม (เฉลี่ย 30.71 มก./กก.) สูงกว่าบริเวณเนินเขา (เฉลี่ย 12.32 มก./กก.) ผลการกระจายสัดส่วนพบสารหนูในส่วนที่คงตัว (F5) มากที่สุด (เฉลี่ยร้อยละ 77.07) รองลงมาคือส่วนที่ชะละลายได้ภายใต้สภาพแวดล้อมที่เกิดปฏิกิริยารีดักชัน (F3) (เฉลี่ยร้อยละ 14.77) ในขณะที่พบสารหนูส่วนที่ชะละลายได้ง่าย (F1) ส่วนที่ชะละลายได้ในกรด (F2) และส่วนที่ชะละลายได้ภายใต้สภาพแวดล้อมที่เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน (F4) ต่ำ (เฉลี่ยร้อยละ 0.45 0.24 และ 7.48 ตามลำดับ) และพบว่าชีวปริมาณออกฤทธิ์ของสารหนูก็มีค่าต่ำเช่นเดียวกัน (เฉลี่ยร้อยละ 4.69) อย่างไรก็ตาม ความสัมพันธ์ของชีวปริมาณออกฤทธิ์ของสารหนูกับการกระจายสัดส่วนของสารหนูโดยการวิเคราะห์ความถดถอยมีค่าต่ำ ($R^2<0.6$) อาจกล่าวได้ว่ากิจกรรมทางการเกษตรที่เกิดขึ้นในสองบริเวณไม่ได้ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงการกระจายสัดส่วนและชีวปริมาณออกฤทธิ์ของสารหนูในดินซึ่งส่วนหนึ่งเป็นผลจากลักษณะเฉพาะทางภูมิศาสตร์ การจำลองดินให้อยู่ในสภาวะไร้อากาศดำเนินการเพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงในกรณีที่ดินอยู่ในสภาพไร้อากาศ ภายหลังการจำลองพบว่า ดินมีค่าอีเอชต่ำจนเป็นค่าติดลบ (เฉลี่ย -79.93 มิลลิโวลต์) ค่าพีเอชของดินสูงขึ้นจนมีค่าพีเอชเป็นกลาง และตรวจพบ AVS ในดิน (เฉลี่ย 829.83 มก./กก.) ซึ่งแตกต่างจากดินก่อนการจำลองอย่างมีนัยสำคัญ ($p<0.05$) และเป็นไปตามเป้าหมายของการจำลอง สำหรับผลการกระจายสัดส่วนพบว่าสารหนูในส่วน F5 F4 F1 ลดลง โดย F3 ไม่มีการเปลี่ยนแปลง ในขณะที่พบ F2 มากขึ้น (เฉลี่ยร้อยละ 16) ซึ่งคาดว่าเกิดจากการที่สารหนูถูกดูดซับหรือตกตะกอนไปกับสารประกอบของ Fe^{2+} สอดคล้องกับชีวปริมาณออกฤทธิ์ของสารหนูที่มีค่าสูงขึ้น โดยพบว่ามีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ที่สูงมาก ($R^2=0.92$) จึงสามารถสรุปได้ว่าชีวปริมาณออกฤทธิ์ของสารหนูในงานวิจัยนี้คือ F2 ซึ่งสารหนูในส่วนนี้มีความเสี่ยงที่จะถูกปลดปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อมได้ จากการศึกษาบ่งชี้ได้ว่าชีวปริมาณออกฤทธิ์ของสารหนูจะเพิ่มขึ้นเมื่อดินอยู่ในสภาวะไร้อากาศ ดังนั้นเกษตรกรควรมีการปลูกพืชชนิดอื่นสลับกับการปลูกข้าว หรือเปลี่ยนไปปลูกพืชเศรษฐกิจชนิดอื่น นอกจากนี้ อาจหลีกเลี่ยงโดยการปลูกพืชที่ไม่ใช้ในการบริโภค

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

สาขาวิชา	วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม	ลายมือชื่อนิสิต	....
ปีการศึกษา	2561	ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก	....

5987228420 : MAJOR ENVIRONMENTAL SCIENCE

KEYWORD: Arsenic / Agricultural area / Fractionation / Bioavailability / Anaerobic condition

Apichaya Duangthong : FRACTIONATION AND BIOAVAILABILITY OF ARSENIC IN SOIL IN AGRICULTURAL AREA OF NAM HUAI CANAL KAOLUANG SUB-DISTRICT, WANG SAPHUNG DISTRICT, LOEI PROVINCE . Advisor: Dr. Seelawut Damrongsiri

Agricultural areas around Nam Haui canal, Wang Sapung District, Loei Province have been contaminated by arsenic (As). Different agricultural activity may alter fractionation of As and its bioavailability. 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 As was investigated by EDTA extraction. The results show that both areas had similar physical and chemical characteristics namely the soil was acidic (pH=5), redox potential (Eh) was high (+635.71 mV), and organic matter was high (2.47%). However, the average concentration of As in foot hill's soil (30.71 mg/kg) was higher than hill's soil (12.32 mg/kg). According to the fractionation of As, the residual fraction (F5) is the highest (77.07%) followed by reducible Fraction (F3) (14.77%). While the exchangeable fraction (F1), acid–soluble fraction (F2) and oxidizable fraction (F4) were low concentration (0.45 0.45 and 14.77% respectively) conforming to its very low bioavailability (about 4.69%). However, the correlations between bioavailability and fractionation of As using regression analysis was low (R^2<0.6). This result demonstrated that agricultural activity in both areas have not affected to the fractionation and bioavailability of As in soil which was a consequence of particularity landscape. The anaerobic simulation was carried to investigate the change during anaerobic condition. After this simulation, the soil had low Eh (-79.93 mV), the pH was up to be neutral, and sulfide in soil was developed (829.83 mg/kg), which significantly difference ($p<0.05$) from initial soil which accorded to the goal of simulation. For the fractionation, the F5, F4 and F1 were decreased, F3 was not changed, while the F2 was increased (16%) which may relate to the absorbing or precipitating of As by Fe^{2+} compounds. The increase of F2 correlate with increase of its bioavailability which found the strong correlation coefficient (R^2=0.92). Finally, it could be concluded that the bioavailability of As in soil was the As in F2, which has high ability to be released to the environment. This study indicates that bioavailability of As in soil will be increased in anaerobic condition. Thus, the crop rotation or other crops should be suitable option. Otherwise, the non-food crop maybe another alternative option for agriculture in this contaminated area.

Field of Study:	Environmental Science	Student's Signature ....
Academic Year:	2018	Advisor's Signature ....

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี ด้วยความช่วยเหลืออย่างดีของ ดร.ศีลาวุธ ดำรงศิริ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ที่กรุณาให้คำปรึกษา ให้ความช่วยเหลือ และให้ข้อคิดเห็นต่าง ๆ เกี่ยวกับวิทยานิพนธ์มาโดยตลอด จึงกราบขอบพระคุณไว้ ณ ที่นี้ด้วย

ขอกราบขอบพระคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ในครั้งนี้ ได้แก่ รองศาสตราจารย์ ดร. ศรีเลิศ โชติพันธรัตน์ ที่กรุณาให้ความอนุเคราะห์เป็นประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ รวมถึง ดร.ภุมรินทร์ คำเดชศักดิ์ และรองศาสตราจารย์ ดร.ตุลวิทย์ สถาปนจารุ ที่กรุณาสละเวลาเป็นกรรมการในการสอบวิทยานิพนธ์ พร้อมทั้งให้ข้อคิดเห็น ข้อเสนอแนะ ตลอดจนรายละเอียดต่าง ๆ ในวิทยานิพนธ์ให้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น

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

ขอกราบขอบพระคุณ บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และสหสาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ได้มอบทุนอุดหนุนวิทยานิพนธ์สำหรับงานวิจัยในครั้งนี้

อภิชญา ดวงทอง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

สารบัญ

หน้า

.... ค

บทคัดย่อภาษาไทย .... ค

.... ง

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ .... ง

กิตติกรรมประกาศ .... จ

สารบัญ .... ฉ

สารบัญรูป .... ฌ

สารบัญตาราง .... ฎ

บทที่ 1 บทนำ 1

1.1 ที่มาและความสำคัญ 1

1.2 วัตถุประสงค์เพื่อการวิจัย 3

1.3 สมมติฐาน 3

1.4 ขอบเขตงานวิจัย 3

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ 4

บทที่ 2 ทบทวนวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 5

2.1 ดิน 5

2.1.1 ความหมายและองค์ประกอบของดิน 5

2.2 พื้นที่ศึกษา 11

2.2.1 ลักษณะทางปฐพีวิทยาของพื้นที่ 12

2.2.2 การแพร่กระจายของธาตุโลหะหนักและและธาตุกึ่งโลหะในพื้นที่ 14

2.2.3 ลักษณะการใช้ประโยชน์ที่ดิน 16

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

2.3 สารหนู (Arsenic) 17

2.3.1 แหล่งกำเนิดของสารหนู... 17

2.3.2 การแพร่กระจายของสารหนูในสิ่งแวดล้อม 18

2.3.3 สารประกอบของสารหนูและปฏิกิริยาของสารหนูในธรรมชาติ.................................. 19

2.4 ชีวปริมาณออกฤทธิ์ของสารหนู (Bioavailability of Arsenic) 25

2.4.1 การศึกษาชีวปริมาณออกฤทธิ์ของสารหนูด้วยวิธีการสกัดแบบขั้นตอนเดียว............... 27

2.5 การกระจายสัดส่วน (Fractionation) ของสารหนูในดิน 30

2.5.1 วิธีวิเคราะห์การกระจายสัดส่วนของสารหนูในดิน 31

2.5.2 การศึกษาเกี่ยวกับการกระจายสัดส่วนของสารหนูในพื้นที่ปนเปื้อน 37

บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย... 49

3.1 การเก็บรวบรวมตัวอย่างดิน 49

3.1.1 พื้นที่ศึกษา.. 49

3.1.2 การเก็บตัวอย่าง... 50

3.2 วิธีการศึกษา.. 55

3.2.1 การศึกษาค่าดัชนีต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องในเบื้องต้น.. 55

3.2.2 การศึกษาการกระจายสัดส่วนและชีวปริมาณออกฤทธิ์ของสารหนู............................ 62

3.2.3 การจำลองดินให้อยู่ภายใต้สภาวะไร้อากาศ (Anaerobic) ในห้องปฏิบัติการ 66

3.2.4 การวิเคราะห์ผลด้วยวิธีการทางสถิติ 70

บทที่ 4 ผลและวิจารณ์ผลการศึกษา 72

4.1 ผลการเลือกพื้นที่ศึกษา 72

4.2 ผลการศึกษาดินในนาข้าวและเนินเขาในสภาพพื้นที่จริง (Field condition)........................ 76

4.2.1 คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของดิน 76

4.2.2 การศึกษาชีวปริมาณออกฤทธิ์ของสารหนูในดินโดยการสกัดด้วย EDTA 86

4.2.3 การศึกษาการกระจายสัดส่วนของสารหนูในดินโดยวิธี Modified Tessier................ 88

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

4.3 ดินภายใต้การจำลองให้อยู่ในสภาวะไร้อากาศ (Anaerobic) 93
4.3.1 ผลการจำลองดินให้อยู่ในสภาวะไร้อากาศ 94
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ 104
5.1 สรุปผลการวิจัย 104
5.1.1 ลักษณะพื้นที่ศึกษา 104
5.1.2 การศึกษาดินในนาข้าวและเนินเขาในสภาพพื้นที่จริง (Field condition) 104
5.1.3 ดินภายใต้การจำลองให้อยู่ในสภาวะไร้อากาศ (Anaerobic) 107
5.2 ข้อเสนอแนะสำหรับการทำเกษตรกรรมในพื้นที่ปนเปื้อนสารหนู 109
บรรณานุกรม 110
ประวัติผู้เขียน 159

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

สารบัญรูป

รูปที่ 2-1 ชั้นของดิน (Soil Profile) 6

รูปที่ 2-2 ไดอะแกรมสามเหลี่ยมแสดงสัดส่วนการกระจายตัวของอนุภาคดิน 8

รูปที่ 2-3 แผนที่แสดงขอบเขตพื้นที่เกษตรกรรมที่ทำการศึกษา 12

รูปที่ 2-4 แผนที่แสดงขอบเขตและการกระจายของดินชนิดต่าง ๆ ในพื้นที่เกษตรกรรม 13

รูปที่ 2-5 แผนที่แสดงความเข้มข้นของสารหนูเชิงพื้นที่ในพื้นที่เกษตรกรรม 16

รูปที่ 2-6 (ก) รูปแบบทางเคมีของสารหนูที่มีเลขออกซิเดชัน +3 ที่ค่าพีเอชต่าง ๆ และ (ข) สารหนูที่มีเลขออกซิเดชัน +5 ที่ค่าพีเอชต่าง ๆ 22

รูปที่ 2-7 ไดอะแกรม Eh–pH สำหรับรูปแบบทางเคมีของสารหนู 25

รูปที่ 2-8 กลไกของชีวปริมาณออกฤทธิ์ของมลสารในดิน 26

รูปที่ 2-9 ผลการศึกษาการกระจายสัดส่วนของสารหนูในดินโดยวิธี Tessier 38

รูปที่ 2-10 ผลการศึกษาการกระจายสัดส่วนของสารหนูในดินโดยวิธี Larios 42

รูปที่ 2-11 ผลการศึกษาการกระจายสัดส่วนของสารหนูในดินทั้ง 3 บริเวณ โดยใช้วิธี Wenzel 43

รูปที่ 2-12 ความสัมพันธ์ระหว่างสารหนูในข้าวและสารหนูในส่วน F1 F2 และ F3 45

รูปที่ 3-1 แผนที่แสดงความเข้มข้นของสารหนูเชิงพื้นที่และขอบเขตพื้นที่เกษตรกรรมที่ทำการศึกษา 50

รูปที่ 3-2 ภาพจำลองพื้นที่เก็บตัวอย่าง 51

รูปที่ 3-3 วิธีการเก็บตัวอย่างดิน 55

รูปที่ 4-1 ลักษณะของพื้นที่ ประกอบด้วยพื้นที่ราบลุ่มสลับกับพื้นที่เนินเขา 74

รูปที่ 4-2 การใช้ประโยชน์ที่ดินในการทำเกษตรกรรมต่าง ๆ ในพื้นที่ 74

รูปที่ 4-3 แผนที่แสดงขอบเขตพื้นที่เกษตรกรรมที่ทำการศึกษา บริเวณคลองน้ำฮวย ตำบลเขาหลวง อำเภอวังสะพุง จังหวัดเลย 75

รูปที่ 4-4 แผนที่แสดงความเข้มข้นของสารหนูเชิงพื้นที่ ในพื้นที่เกษตรกรรม 75

รูปที่ 4-5 ชีวปริมาณออกฤทธิ์ของสารหนูเทียบกับความเข้มข้นของสารหนูทั้งหมดในตัวอย่างดินในฤดูร้อน 87

รูปที่ 4-6 ชีวปริมาณออกฤทธิ์ของสารหนูเทียบกับความเข้มข้นของสารหนูทั้งหมดในตัวอย่างดินในฤดูฝน 87

รูปที่ 4-7 การกระจายสัดส่วนของสารหนูบริเวณพื้นที่ราบลุ่ม (A3 A4 B3 และ B4) และบริเวณพื้นที่เนินเขา (C2 C4 D1 และ D3) ในฤดูร้อน แสดงผลในหน่วยร้อยละ (%) 89

รูปที่ 4-8 ผลการกระจายสัดส่วนของสารหนูบริเวณพื้นที่ราบลุ่ม (A3 A4 B3 และ B4) และบริเวณพื้นที่เนินเขา (C2 C4 D1 และ D3) ในฤดูฝน แสดงผลในหน่วยร้อยละ (%) 90

รูปที่ 4-9 ชีวปริมาณออกฤทธิ์ของสารหนูในตัวอย่างดินก่อนและหลังจำลองในสภาวะไร้อากาศแสดงผลในหน่วยร้อยละ (%).. 99

รูปที่ 4-10 เปรียบเทียบผลการสกัดลำดับส่วนของสารหนูในตัวอย่างดินก่อนและหลังจำลองในสภาวะไร้อากาศซึ่งแสดงผลแบบร้อยละ (%) 102

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

สารบัญตาราง

ตารางที่ 2-1 ค่าอีเอชและตัวรับอิเล็กตรอนในดิน 11

ตารางที่ 2-2 คุณสมบัติทางเคมีที่จำเพาะของสารหนู 17

ตารางที่ 2-3 วิธีวิเคราะห์การกระจายสัดส่วนของสารหนูในดินแบบต่าง ๆ 32

ตารางที่ 2-4 การกระจายสัดส่วนโดยวิธี Modified Tessier (Rauret et al., 1989) 47

ตารางที่ 3-1 ค่าพิกัดทางภูมิศาสตร์ของจุดเก็บตัวอย่างดิน บริเวณพื้นที่เกษตรกรรม บริเวณคลองน้ำฮวย ตำบลเขาหลวง อำเภอวังสะพุง จังหวัดเลย 51

ตารางที่ 3-2 คุณภาพของการวิเคราะห์สารหนูทั้งหมดในดิน 59

ตารางที่ 3-3 ขนาดของความสัมพันธ์ 71

ตารางที่ 4-1 คุณสมบัติของดินทั้งทางกายภาพและทางเคมีที่เกี่ยวข้อง 77

ตารางที่ 4-2 (ก) คุณสมบัติทางเคมีของดินก่อนการจำลอง (ข) คุณสมบัติทางเคมีของดินภายหลังจากการจำลองในสภาวะไร้อากาศ 95

ตารางที่ 4-3 ความแตกต่างของการกระจายสัดส่วนของสารหนูในดินก่อนและหลังการจำลองในสภาวะไร้อากาศ 100

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

สารหนู (As) จัดเป็นธาตุกึ่งโลหะ (Metalloids) ที่พบการแพร่กระจายอยู่ทั้งในดินและตะกอนท้องน้ำในพื้นที่เกษตรกรรม บริเวณคลองน้ำฮวย ตำบลเขาหลวง อำเภอวังสะพุง จังหวัดเลย โดยสารหนูเป็นธาตุที่ปะปนอยู่ในสายแร่ใต้ดิน จากการศึกษาโดยมหาวิทยาลัยขอนแก่น (2551) พบว่าสารหนูในบริเวณพื้นที่เกษตรกรรม บริเวณคลองน้ำฮวย มีค่าภูมิหลังค่อนข้างสูง ซึ่งเป็นลักษณะทางธรรมชาติของพื้นที่ศักยภาพแหล่งแร่ที่อยู่ในบริเวณใกล้เคียง นอกจากนี้ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย (2555) ได้มีการศึกษาถึงการกระจายตัวของสารหนูในดินและตะกอนท้องน้ำ ใน 3 ลุ่มน้ำ ได้แก่ ลุ่มน้ำห้วยเหล็ก ลุ่มน้ำห้วยผุก และลุ่มน้ำฮวย ซึ่งครอบคลุมพื้นที่เกษตรกรรม บริเวณคลองน้ำฮวย พบว่ามีค่าความเข้มข้นของสารหนูเกินค่ามาตรฐานเกือบทุกสถานีตรวจวัด (ค่ามาตรฐานของสารหนูในดินที่ใช้ประโยชน์เพื่อการอยู่อาศัยและเกษตรกรรมต้องมีค่าไม่เกิน 3.9 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม) และเมื่อนำข้อมูลจุดเก็บตัวอย่างที่มีปริมาณความเข้มข้นของสารหนูเกินค่ามาตรฐานมาพิจารณาคู่กับลักษณะการใช้ประโยชน์ที่ดิน พบว่าบริเวณพื้นที่เกษตรกรรมหลายแห่งมีความเข้มข้นของสารหนูที่เกินค่ามาตรฐาน

ปัญหาการปนเปื้อนของสารหนูในพื้นที่เกษตรกรรมเป็นปัญหาที่ต้องตระหนัก ซึ่งในพื้นที่เกษตรกรรมดังกล่าว มีการปลูกพืชหมุนเวียนตามฤดูกาล ได้แก่ ข้าว อ้อย ยางพารา ถั่วเหลือง และข้าวโพด การปนเปื้อนสารหนูรวมถึงธาตุมลสารอื่น ๆ ในดินจะทำให้เกิดการแพร่กระจายเข้าสู่ห่วงโซ่อาหาร โดยเริ่มจากการที่พืชดูดซึมธาตุมลสารผ่านทางรากด้วยกระบวนการแลกเปลี่ยนประจุ (Ion absorption) และเข้าไปสะสมในส่วนต่าง ๆ ของพืช จากนั้นเมื่อสิ่งมีชีวิตบริโภคพืชที่มีมลสารปนเปื้อนเข้าไปจะก่อให้เกิดการสะสมในร่างกาย และส่งผลกระทบต่อสุขภาพเมื่อได้รับมลสารที่ปนเปื้อนดังกล่าวติดต่อกันเป็นระยะเวลานาน (อนงค์ ไพจิตรประภาภรณ์, 2540)

สำหรับวิธีการศึกษาที่จะทำให้ทราบว่าธาตุมลสารนั้น ๆ กระจายอยู่ในส่วนใดของดิน คือการศึกษาการกระจายสัดส่วน (Fractionation) ของธาตุมลสารในดิน ซึ่งในดินจะมีการกระจายสัดส่วนที่แตกต่างกัน ตามลักษณะสมบัติของธาตุมลสารนั้น ๆ วัสดุเนื้อดิน รวมถึงสารเคมีต่าง ๆ

ในดิน โดยการศึกษาการกระจายสัดส่วนของสารหนูเป็นการสกัดเอาสารหนูออกมาจากองค์ประกอบต่าง ๆ ของดิน โดยใช้สารละลายที่จำเพาะต่อการชะละลายสารหนูในองค์ประกอบต่าง ๆ ของดินออกมาเป็นลำดับ ซึ่งผลที่ได้ นอกจากจะทำให้ทราบการกระจายสัดส่วนของสารหนูในดินแล้วยังสามารถบ่งชี้ถึงชีวปริมาณออกฤทธิ์ (Bioavailability) ของสารหนูในดินได้อีกด้วย

จากข้อมูลที่กล่าวมาในข้างต้น นำมาสู่การศึกษาการกระจายสัดส่วนและชีวปริมาณออกฤทธิ์ของสารหนูในดินในพื้นที่เกษตรกรรม บริเวณคลองน้ำฮวย ตำบลเขาหลวง อำเภอวังสะพุง จังหวัดเลย ซึ่งการกระจายสัดส่วนของสารหนูในดินจะใช้เทคนิคการสกัดตามลำดับส่วน (Sequential Extraction) ด้วยวิธี Modified Tessier (Rauret et al., 1989) ซึ่งเป็นวิธีที่นิยมใช้ในการศึกษา เนื่องจากมีความสัมพันธ์กับสภาพแวดล้อม และพบปัญหาการปนเปื้อนระหว่างการวิเคราะห์น้อย โดยการกระจายสัดส่วนที่ได้แบ่งเป็น 5 ส่วน (Fraction) ได้แก่ ส่วนที่ชะละลายได้ง่าย (F1: Exchangeable Fraction) ส่วนที่ชะละลายได้ในกรด (F2: Acid-soluble Fraction) ส่วนที่ชะละลายได้ภายใต้สภาพแวดล้อมที่เกิดปฏิกิริยารีดักชัน (F3: Reducible Fraction) ส่วนที่ชะละลายได้ภายใต้สภาพแวดล้อมที่เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน (F4: Oxidizable Fraction) และส่วนที่คงตัว (F5: Residual Fraction) อีกทั้งยังศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างการกระจายสัดส่วนและชีวปริมาณออกฤทธิ์ของสารหนูในดิน โดยใช้เทคนิคการสกัดแบบขั้นตอนเดียว (Single Extraction) โดยใช้วิธีการสกัดด้วย EDTA (Ethylene diamine tetra–acetic acid) ที่ความเข้มข้น 0.05 โมลาร์ (Gregori et al., 2004) ซึ่งพิจารณาจากค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

นอกจากนี้ จากการรวบรวมผลงานวิจัย พบว่าหากมีการเปลี่ยนแปลงของสภาพแวดล้อม เช่น ลักษณะของพื้นที่ การใช้ประโยชน์ของพื้นที่ในการทำเกษตรกรรม รวมถึงการมีสภาพน้ำขังในพื้นที่ จะทำให้ดินเกิดการเปลี่ยนแปลงค่าพีเอช (pH) ค่าอีเอช (Eh) หรือแม้แต่ปริมาณอินทรียวัตถุ (OM) เป็นต้น ซึ่งเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของสภาพแวดล้อม จะส่งผลให้การกระจายสัดส่วนตลอดจนชีวปริมาณออกฤทธิ์ของสารหนูเปลี่ยนแปลงตามไปด้วย ดังนั้นการศึกษาการกระจายสัดส่วนและชีวปริมาณออกฤทธิ์ของสารหนูในดินในพื้นที่เกษตรกรรมจึงเป็นประเด็นที่น่าสนใจ หากมีการเปลี่ยนแปลงการกระจายสัดส่วนผ่านกลไกทางธรรมชาติ สารหนูที่พบก็น่าจะอยู่ในการกระจายสัดส่วนที่แตกต่างกัน ซึ่งการศึกษาดังกล่าวสามารถใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานในการบริหารจัดการการใช้ประโยชน์ที่ดินในบริเวณพื้นที่ดังกล่าวต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์เพื่อการวิจัย

1) ศึกษาปัจจัยทางกายภาพและทางเคมีของดิน ที่มีผลต่อการกระจายสัดส่วนและชีวปริมาณออกฤทธิ์ของสารหนูในดิน

2) ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างการกระจายสัดส่วนกับชีวปริมาณออกฤทธิ์ของสารหนูในดิน

1.3 สมมติฐาน

บริเวณพื้นที่ราบลุ่มที่มีการเพาะปลูกข้าวและบริเวณพื้นที่เนินเขาที่มีการปลูกยางพารามีลักษณะทางกายภาพและทางเคมีของดินที่แตกต่างกัน ส่งผลให้การกระจายสัดส่วนและชีวปริมาณออกฤทธิ์ของสารหนูในดินแตกต่างกัน

1.4 ขอบเขตงานวิจัย

การศึกษาครั้งนี้ดำเนินงานโดยการเก็บตัวอย่างดินจากการออกภาคสนาม และนำมาศึกษาวิจัยในห้องปฏิบัติการ อาคารสถาบันวิจัยสภาวะแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โดยมีขอบเขตของการวิจัยดังนี้

1) พื้นที่เกษตรกรรมบริเวณคลองน้ำฮวย ตำบลเขาหลวง อำเภอวังสะพุง จังหวัดเลย ซึ่งประกอบด้วยบริเวณพื้นที่ราบลุ่มที่มีการปลูกข้าว และบริเวณพื้นที่เนินเขาที่มีการปลูกยางพารา

2) เก็บตัวอย่างดินจากการสำรวจภาคสนาม โดยแบ่งการเก็บตัวอย่างเป็น 2 ช่วง คือ ช่วงฤดูร้อน (เดือนมีนาคม) และช่วงฤดูฝน (เดือนกรกฎาคม)

3) ศึกษาดัชนีต่าง ๆ ของคุณสมบัติดินทั้งทางกายภาพและทางเคมีที่คาดว่าจะเกี่ยวข้องกับการกระจายสัดส่วนและชีวปริมาณออกฤทธิ์ของสารหนูในดิน โดยคุณสมบัติทางกายภาพของดิน คือ ลักษณะเนื้อดิน (Soil Texture) ส่วนคุณสมบัติทางเคมีของดิน ได้แก่ ความเข้มข้นของสารหนู (As) ความเข้มข้นของเหล็ก (Fe) ค่าพีเอช (pH) ค่าอีเอช (Eh) ปริมาณอินทรียวัตถุ (OM) และความเข้มข้นซัลไฟด์ (Acid volatile sulfide; AVS) ในดิน

4) ศึกษาการกระจายสัดส่วนของสารหนูในดินโดยใช้วิธีการสกัดตามลำดับส่วน ซึ่งใช้วิธี Modified Tessier (Rauret et al., 1989)

5) ศึกษาชีวปริมาณออกฤทธิ์ของสารหนูโดยใช้วิธีการสกัดแบบขั้นตอนเดียว ซึ่งใช้การสกัดด้วย EDTA ที่ความเข้มข้น 0.05 โมลาร์ (Gregori et al., 2004)

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1) ทราบถึงการกระจายสัดส่วนและชีวปริมาณออกฤทธิ์ของสารหนูในดิน บริเวณพื้นที่เกษตรกรรม ตลอดจนปัจจัยทางกายภาพและทางเคมีของดินที่ส่งผลต่อการกระจายสัดส่วนและชีวปริมาณออกฤทธิ์ของสารหนู

2) ทราบถึงความสัมพันธ์ระหว่างการกระจายสัดส่วนและชีวปริมาณออกฤทธิ์ของสารหนูในดิน เพื่อใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานในการบริหารจัดการการใช้ประโยชน์ที่ดินในบริเวณพื้นที่ดังกล่าวต่อไป

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

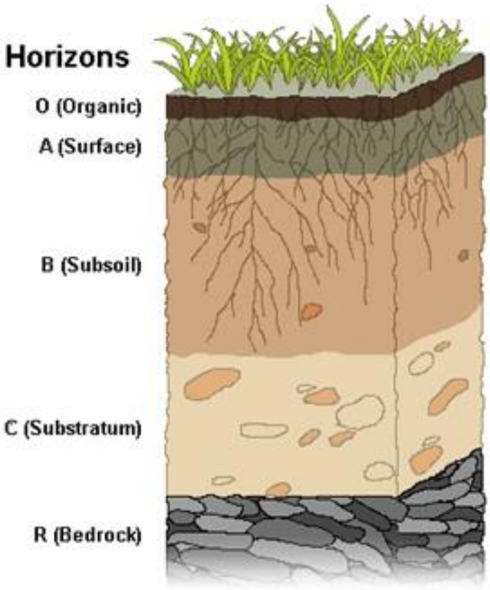
บทที่ 2
ทบทวนวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ดิน

2.1.1 ความหมายและองค์ประกอบของดิน

ดินประกอบด้วยองค์ประกอบหลัก 4 ส่วน คือ (1) อนินทรียวัตถุ (Inorganic Matter) เป็นส่วนที่เกิดจากการสลายตัวผุพังของหินและแร่ เป็นส่วนสำคัญที่ควบคุมลักษณะของเนื้อดิน (2) อินทรียวัตถุ (Organic Matter) ส่วนที่เกิดจากการเน่าเปื่อยผุพังของซากพืชและซากสัตว์ที่ทับถมบนดิน เป็นแหล่งสำคัญของธาตุอาหารพืช อีกทั้งยังเป็นส่วนที่มีอิทธิพลอย่างมากต่อสมบัติต่าง ๆ ของดิน ทั้งทางกายภาพ เคมี และชีวภาพ เช่น โครงสร้างดิน ความร่วนซุย การระบายน้ำ การถ่ายเทอากาศ การดูดซับน้ำและธาตุอาหารของดิน (3) น้ำ (Water) เป็นส่วนที่พบในช่องว่างระหว่างเม็ดดินหรืออนุภาคดิน เป็นตัวช่วยในการละลายธาตุอาหารต่าง ๆ ในดิน และเป็นส่วนสำคัญในการเคลื่อนย้ายอาหารพืชจากรากไปสู่ส่วนต่าง ๆ ของพืช (4) อากาศ (Air) แทรกซึมตามช่องว่างระหว่างเม็ดดินในส่วนที่ไม่มีน้ำอยู่ ก๊าซส่วนใหญ่ที่พบทั่วไปในดิน ได้แก่ ไนโตรเจน (N_2) ออกซิเจน (O_2) และคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) (คณาจารย์ภาควิชาปฐพีวิทยา, 2541)

ดินเป็นทรัพยากรธรรมชาติ เกิดขึ้นจากผลของการแปรสภาพหรือการผุพังของวัตถุต้นกำเนิดดิน (Parent Material) กับอินทรียวัตถุในดินผสมคลุกเคล้ากัน (ศุภมาศ พนิชศักดิ์พัฒนา, 2559) กระบวนการเกิดดินเป็นกระบวนการร่วมระหว่างกระบวนการทางธรณีวิทยา (Geological) กระบวนการทางอุทกวิทยา (Hydrological) และกระบวนการทางชีววิทยา (Biological) ซึ่งจะมีการเปลี่ยนแปลงอยู่เสมอหรือมีลักษณะเป็นพลวัต (Dynamic) ในระหว่างการเกิดดินจะมีการทับถมและพัฒนาเป็นชั้น (Horizons) โดยลักษณะที่มองเห็นเป็นชั้นดินในแนวดิ่ง และมีความแตกต่างกันในแต่ละชั้นดิน เรียกว่า หน้าตัดดิน (Soil Profile) ซึ่งเป็นผลมาจากการเปลี่ยนแปลงของวัตถุต้นกำเนิดดินในระหว่างการกำเนิดดิน ดังแสดงในรูปที่ 2–1



รูปที่ 2-1 ชั้นของดิน (Soil Profile)
ที่มา: (Bhattacharyya, 2015)

1) ชั้นดิน O (O Horizon) เป็นดินชั้นบนสุดที่ประกอบด้วยอินทรียวัตถุและสิ่งมีชีวิตมากที่สุด อีกทั้งยังเป็นชั้นที่มีการอิ่มตัวด้วยน้ำ เมื่อเปรียบเทียบกับชั้นดินอื่น

2) ชั้นดิน A (A Horizon) เป็นดินชั้นบน (Top soil) ที่มีอินทรียวัตถุจากเศษซากพืชหรือรากพืชที่อยู่ในชั้นของหินแร่ที่กำลังสลายตัวและกำลังเกิดการย่อยสลายเป็นฮิวมัส ทำให้เห็นชั้นนี้มีสีเข้ม เป็นชั้นที่อยู่ถัดจากชั้นที่เป็นผิวหน้าดินลงมา มีอินทรียวัตถุปริมาณน้อยกว่าชั้นดิน O

3) ชั้นดิน B (B Horizon) เป็นดินชั้นล่าง (Sub soil) เกิดจากการชะล้างแร่ธาตุต่าง ๆ ของสารละลายต่าง ๆ ที่เคลื่อนตัวผ่านชั้น A ลงมามาสะสมในชั้น B ซึ่งดินในชั้นนี้ส่วนใหญ่จะมีสีน้ำตาลปนแดง เนื่องจากมีการสะสมของเหล็กออกไซด์ (Fe–oxides)

4) ชั้นดิน C (C Horizon) ดินชั้นนี้เป็นชั้นดินที่ได้รับอิทธิพลจากกระบวนการเกิดดินน้อยมาก เกิดจากการผุพังของหินกำเนิดดิน (Parent rock) ไม่มีการตกตะกอนจากการชะล้าง และไม่มีการสะสมของอินทรียวัตถุ

5) ชั้นดิน R (R Horizon) ประกอบด้วยซากปรักหักพังซึ่งเป็นวัตถุต้นกำเนิดดิน (Bedrock)

2.1.2 คุณสมบัติของดิน

คุณสมบัติของดินจำแนกหลัก ๆ ได้เป็น 2 ด้าน คือ คุณสมบัติทางกายภาพ (Physical property) และคุณสมบัติทางเคมี (Chemical property)

2.1.2.1 คุณสมบัติทางกายภาพ (Physical property)

(1) เนื้อดินและโครงสร้างดิน

เนื้อดิน หมายถึง องค์ประกอบเชิงกายภาพของดิน ซึ่งประกอบขึ้นจากของอนุภาคตะกอนหลาย ๆ ขนาด อนุภาคของดินแบ่งตามเกณฑ์สากล ออกเป็นกลุ่มได้ดังนี้

1.1 ทราย (Sand) มีขนาดอนุภาค 2.00–0.05 มิลลิเมตร เนื้อดินมีลักษณะหยาบเนื่องจากประกอบด้วยอนุภาคขนาดใหญ่ จึงมีช่องว่างให้น้ำซึมผ่านอย่างรวดเร็ว

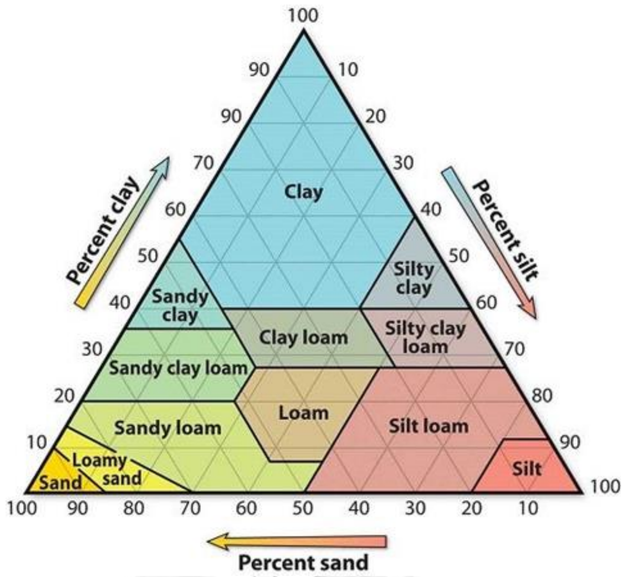
1.2 ทรายแป้ง (Silt) มีขนาดอนุภาค 0.05–0.002 มิลลิเมตร เนื้อดินมีขนาดอนุภาคปานกลางน้ำซึมผ่านได้ไม่รวดเร็วจนเกินไป สามารถเก็บกับความชื้นได้ดี จึงมีความเหมาะสมในการปลูกพืช

1.3 ดินเหนียว (Clay) มีขนาดอนุภาคเล็กกว่า 0.002 มิลลิเมตร เนื้อดินละเอียดมากเนื่องจากประกอบด้วยอนุภาคขนาดเล็กมาก จึงไม่มีน้ำช่องว่างให้น้ำซึมผ่าน ซึ่งส่วนที่เป็นอนุภาคดินเหนียวเป็นส่วนสำคัญที่มีผลต่อคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของดิน ทั้งนี้ (ศุภมาศ พนิชศักดิ์พัฒนา, 2559) พบว่าเนื้อดินที่มีอนุภาคดินเหนียวสูงจะมีการดูดซึมและดึงดูดธาตุมลสารได้ดีกว่าในดินร่วนและดินทราย เนื่องจากในดินเหนียวมีค่าความจุแลกเปลี่ยนประจุบวก (CEC) สูง

จากการศึกษาสัดส่วนการกระจายอนุภาคของดินโดยใช้ไดอะแกรมสามเหลี่ยม แบ่งดินออกเป็น 12 ชนิด ดังแสดงในรูปที่ 2–2 ซึ่งแต่ละด้านแบ่งเป็นร้อยละของดินในแต่ละกลุ่มคือ ร้อยละของทราย ทรายแป้ง และดินเหนียว จากนั้นคำนวณหาค่าร้อยละของดินในแต่ละกลุ่มจากวิธีไฮโดรมิเตอร์ (Hydrometer Analysis) และนำมาลากเส้นทั้ง 3 ลงในไดอะแกรมสามเหลี่ยม เมื่อลากเส้นแล้วตัดกันที่บริเวณใดก็จัดว่าเป็นดินประเภทนั้น (คณาจารย์ภาควิชาปฐพีวิทยา, 2541)

ทั้งนี้การจำแนกดินช่วยให้เข้าใจถึงคุณสมบัติของดินประเภทต่าง ๆ ไม่ว่าจะเป็นความสามารถในการกักเก็บน้ำ ความสามารถในการถ่ายเทอากาศ หรือความสามารถในการดูดซับธาตุอาหารของดินชนิดนั้น ๆ ซึ่งสามารถนำไปใช้ประโยชน์ในทางเกษตรกรรมได้

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University



รูปที่ 2-2 ไดอะแกรมสามเหลี่ยมแสดงสัดส่วนการกระจายตัวของอนุภาคดิน

ที่มา: (Kalev and Toor, 2018)

2.1.2.2 คุณสมบัติทางเคมี (Chemical property)

(1) ค่าพีเอช (pH) ของดิน

ค่าพีเอชของดินขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของไฮโดรเจนไอออน (H^+) ในดิน ซึ่งจะส่งผลต่อสมบัติทางเคมีของดิน การละลาย (Solubility) ของธาตุมลสาร การเจริญเติบโตของพืช รวมถึงกิจกรรมของจุลินทรีย์ในดิน ซึ่งมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงการเคลื่อนที่ (Mobility) ของธาตุโลหะหนักและธาตุกึ่งโลหะในสิ่งแวดล้อม ตลอดจนชีวปริมาณออกฤทธิ์ของธาตุพิษต่าง ๆ (HOODA, 2010) นอกจากนี้ ค่าพีเอชของดินยังสามารถเปลี่ยนแปลงค่าประจุบนพื้นผิวของวัสดุเนื้อดินได้ โดยเมื่อค่าพีเอชของดินต่ำค่าประจุของผิวดินมีแนวโน้มเป็นประจุบวก และในทางตรงข้ามเมื่อค่าพีเอชของดินสูง ค่าประจุของผิวดินจะมีแนวโน้มเป็นประจุลบ อีกทั้งยังส่งผลให้อินทรียวัตถุในดินมีประจุลบเช่นเดียวกับสารหนู ซึ่งถือเป็นการรบกวนการดูดซับของสารหนูในดิน อีกทั้ง Woolson et al. (1971) ได้ศึกษาความสัมพันธ์ของค่าพีเอชต่อการดูดซับสารหนู พบว่าในดินที่มีค่าพีเอชต่ำ ๆ การดูดซับสารหนูบนแคลเซียมออกไซด์อ่อนกว่าเหล็กและอลูมิเนียมออกไซด์ ส่วน Akins and Lewis (1976) พบว่าในดินที่พีเอชเท่ากับ 4 จะพบสารหนูเกาะอยู่กับเหล็กมาก แต่เมื่อดินมีพีเอชเพิ่มขึ้น (ค่าพีเอชตั้งแต่ 6 ถึง 8) จะพบสารหนูเกาะอยู่กับแคลเซียมมาก นอกจากนี้ Carbonell-Barrachina et al. (2000) พบว่าหาก

ดินเป็นกรดจัด (ค่าพีเอชน้อยกว่า 5) จะส่งผลให้การเคลื่อนที่และชีวปริมาณออกฤทธิ์ของสารหนูในดินเพิ่มขึ้นกว่าดินที่มีพีเอชเป็นกลาง (ค่าพีเอชเท่ากับ 7)

(2) อินทรียวัตถุในดิน (Organic Matter)

อินทรียวัตถุในดินเป็นส่วนประกอบสำคัญของดินที่ส่งผลต่อคุณสมบัติทางกายภาพ และคุณสมบัติทางเคมีของดิน โดยผลต่อคุณสมบัติทางกายภาพ คือ อินทรียวัตถุในดินมีความสัมพันธ์กับเนื้อดิน ซึ่งดินที่มีเนื้อละเอียดจะมีอินทรียวัตถุสูงกว่าดินหยาบ เนื่องจากมีการดูดซับไอออนที่เป็นธาตุอาหารพืชได้ดีกว่า มีการระบายอากาศต่ำกว่า ส่งผลให้มีอัตราการสลายตัวของอินทรียวัตถุต่ำ (ศุภมาศ พนิชศักดิ์พัฒนา, 2559) อีกทั้งมีอิทธิพลต่อคุณสมบัติทางเคมีของดิน ในเรื่องการดูดซับประจุบวกในดิน โดยพบว่าดินที่มีปริมาณอินทรียวัตถุสูงจะมีความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวกสูงด้วยเช่นกัน (คณาจารย์ภาควิชาปฐพีวิทยา, 2541) รวมถึงมีความสามารถในการต้านทานต่อการเปลี่ยนแปลงค่าพีเอชของดินได้ดี และยังสามารถปลดปล่อยประจุบวกต่าง ๆ ที่ดูดซับไว้ให้ออกมาเป็นประโยชน์ต่อพืช ตลอดจนช่วยละลายธาตุอาหารบางชนิดให้อยู่ในรูปที่พืชใช้ประโยชน์ได้ นอกจากนี้ดินที่มีปริมาณสารอินทรีย์สูงจะไปเพิ่มกิจกรรมของจุลินทรีย์ในดิน โดยจุลินทรีย์จะมีการย่อยสลายสารอินทรีย์ในดิน ทำให้เกิดการปลดปล่อยพลังงาน การแลกเปลี่ยนอิเล็กตรอนกับตัวรับอิเล็กตรอนในดิน จึงทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลง Redox potential (Eh) (Ryu et al., 2010) รวมถึง Buzek et al. (2013) พบว่าสารอินทรีย์ในดินสามารถดูดซับสารหนูได้โดยใช้ธาตุมลสารที่เป็นโลหะหนัก เช่น เหล็ก (Fe) อลูมิเนียม (Al) และแมงกานีส (Mn) ในการฟอร์มประจุบวกระหว่างพื้นผิวของสารอินทรีย์ (ประจุลบ) กับสารหนู (ประจุลบ) ส่งผลให้พบสารหนูในส่วนที่จับกับสารอินทรีย์และซัลไฟด์ และสารหนูในส่วนนี้จะมีความเสถียรที่ค่อนข้างสูง อินทรียวัตถุในดินจึงมีบทบาทสำคัญในการกำหนดการเคลื่อนที่ (Mobility) การดูดซึม (Sorption) การดูดซับ (Desorption) และชีวปริมาณออกฤทธิ์ของสารหนู (Anawar et al., 2008)

(3) ค่าอีเอช (Redox Potential; Eh)

สภาพออกซิเดชัน–รีดักชันของดิน หรือ ค่า ORP (Oxidation–Reduction Potential) เป็นปฏิกิริยาที่มีการแลกเปลี่ยนอิเล็กตรอน ประกอบด้วยปฏิกิริยาที่มีทั้งการให้และรับอิเล็กตรอน ส่งผลให้เลขออกซิเดชันเปลี่ยนแปลง ซึ่งปฏิกิริยาทั้ง 2 ต้องเกิดขึ้นพร้อมกัน จึงเรียกปฏิกิริยารวมว่าปฏิกิริยารีดอกซ์ (Redox conditions) ซึ่งในการวัดค่า ORP จะใช้เครื่องวัดค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า

ระหว่างขั้ว โดยค่าที่อ่านได้นั้นขึ้นอยู่กับชนิดของหัววัด และต้องแปลงเป็นค่า Redox Potential (ค่า Eh) ซึ่งจะต้องบวกค่า Reference Electrode (Eref) เพิ่มจากค่า ORP ที่วัดได้ ยกตัวอย่างเช่น ค่า Eref ของหัววัดที่เป็น Silver (Ag)/Silver chloride (AgCl) ที่ใช้สารละลาย Potassium chloride (KCl) 1 โมลาร์ ต้องบวกเพิ่ม 236 มิลลิโวลต์ จากค่า ORP ที่วัดได้และค่า Eref ของหัววัด Silver (Ag)/Silver chloride (AgCl) ที่ใช้สารละลาย Saturated Potassium chloride (KCl) หรือ สารละลาย KCl ที่อิ่มตัวนั้นต้องบวกเพิ่ม 197 มิลลิโวลต์ จากค่าที่วัดได้ (Nordstrom and Wilde, 2005) จึงจะถือเป็นค่าที่แท้จริงสำหรับประเมินตัวรับอิเล็กตรอนในดิน เพื่อใช้ในการระบุรูปแบบทางเคมีที่แตกต่างกัน มีหน่วยเป็นโวลต์ หรือ มิลลิโวลต์

หากในดินมีความสามารถในการเกิดปฏิกิริยารีดักชันสูง ค่าอีเอชที่ได้จะเป็นลบ และหากในดินมีความสามารถในการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันสูง ค่าอีเอชที่ได้จะเป็นบวก จุลินทรีย์ที่อยู่ในดินจะมีบทบาทสำคัญเกี่ยวข้องกับตัวรับอิเล็กตรอนที่อยู่ในดิน โดยจุลินทรีย์จะทำให้เกิดการออกซิไดซ์ (Oxidized) สารประกอบอินทรีย์ที่มีธาตุคาร์บอนเป็นองค์ประกอบ ทำให้เกิดการปลดปล่อยพลังงานออกมา และทำให้เกิดปฏิกิริยารีดอกซ์กับตัวรับอิเล็กตรอนที่มีอยู่ในดิน ดินในสภาวะปกติจะมีออกซิเจนเป็นตัวรับอิเล็กตรอน ให้พลังงานสูง จุลินทรีย์ที่ใช้ออกซิเจนเป็นตัวรับอิเล็กตรอนจึงเจริญเติบโตได้อย่างรวดเร็ว และมีบทบาทสำคัญต่อปฏิกิริยาต่าง ๆ บนดิน อย่างไรก็ตาม ในสภาพที่ดินอยู่ในน้ำขัง ออกซิเจนที่ส่งผ่านมายังใต้น้ำและใต้ดินจะถูกจำกัด ทำให้ไม่เพียงพอต่อปฏิกิริยาดังกล่าว ทำให้จุลินทรีย์ที่ใช้สารอื่นรับอิเล็กตรอนได้ เติบโตขึ้นมาแทน โดยสามารถคาดการณ์ได้จากค่าอีเอชของดินที่ลดลงไปตามลำดับ โดยสารอื่น ๆ ที่สามารถเป็นตัวรับอิเล็กตรอนได้ ได้แก่ ไนโตรเจน (ในรูปไนเตรท) แมงกานีส เหล็ก (ในรูปเหล็กออกไซด์) และซัลเฟอร์ (ในรูปซัลเฟต) เป็นต้น (Mitsch and Gosselink, 2015) ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ได้ในตารางที่ 2–1 โดยค่าอีเอชเป็นค่าที่ใช้บ่งชี้ตัวรับอิเล็กตรอนในดิน อีกทั้งยังช่วยคาดการณ์ถึงปฏิกิริยาต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นในดิน

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

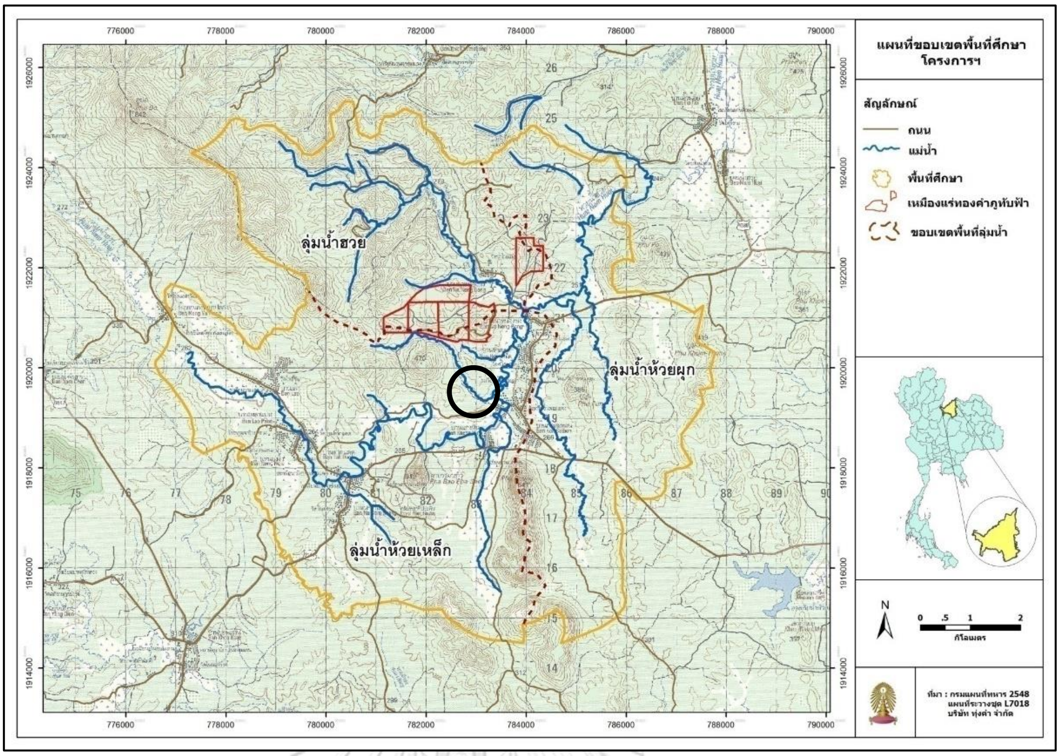
ตารางที่ 2-1 ค่าอีเอชและตัวรับอิเล็กตรอนในดิน

ตัวรับอิเล็กตรอน	รูปออกซิไดซ์	รูปรีดิวซ์	ค่าอีเอช (มิลลิโวลต์)
Oxygen	O_2	H_2O	มากกว่า 250
Nitrogen	NO^{3-} (Nitrate)	N_2O, N_2, NH_4^+	ประมาณ 250
Manganese	Mn^{4+} (Manganic)	Mn^{2+} (Manganous)	ประมาณ 225
Iron	Fe^{3+} (Ferric)	Fe^{2+} (Ferrous)	ตั้งแต่ +100 ถึง –100
Sulfur	SO_4 (Sulfate)	S (Sulfide)	ตั้งแต่ –100 ถึง –200
Carbon	CO_2 (Carbon dioxide)	CH_4 (Methane)	ต่ำกว่า –200

การเปลี่ยนแปลงค่าอีเอชของดินส่งผลให้ตัวรับอิเล็กตรอนดินเปลี่ยนแปลงไป เช่น การลดลงของค่าอีเอชจนต่ำกว่า +100 มิลลิโวลต์ จะส่งผลให้เหล็กออกไซด์ (Fe_2O_3) ที่มีอยู่ในดินละลายออกมา (Hartley and Dickinson, 2010) และตกตะกอนกลับมาเป็นเหล็กซัลไฟด์ (FeS) เมื่อค่าอีเอชมีค่าต่ำกว่า –100 มิลลิโวลต์ ทั้งนี้ ซัลไฟด์ที่เกิดขึ้นอาจมีการตกตะกอนกับโลหะหนักต่าง ๆ ที่อยู่ในดินได้ โดยทั่วไปปฏิกิริยาระหว่างซัลไฟด์กับโลหะต่าง ๆ นั้นเกิดขึ้นรวดเร็วและมีพันธะที่แข็งแรงมาก จึงมักพิจารณาว่าโลหะหนักที่จับกับซัลไฟด์ไม่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม (Yu et al., 2001; Zhang et al., 2014) นอกจากนี้ ค่าอีเอชของดินยังมีอิทธิพลต่อเลขออกซิเดชัน (Oxidation state) รวมถึงการกระจายสัดส่วนของสารหนูในดิน ซึ่งส่งผลต่อการดูดซับ การเคลื่อนที่ ตลอดจนชีวปริมาณออกฤทธิ์ของสารหนูในดิน (Fitz and Wenzel, 2002)

2.2 พื้นที่ศึกษา

พื้นที่ศึกษาเป็นพื้นที่เกษตรกรรม ตั้งอยู่บริเวณคลองน้ำฮวย ตำบลเขาหลวง อำเภอวังสะพุง จังหวัดเลย ตามแผนที่ภูมิประเทศมาตราส่วน 1:50,000 ของกรมแผนที่ทหาร ดังแสดงในรูปที่ 2–3 โดยพื้นที่ดังกล่าวเป็นพื้นที่ศักยภาพทางแร่ ซึ่งมีหลักฐานบ่งชี้จากข้อมูลทางธรณีวิทยา ธรณีวิทยาแหล่งแร่ ธรณีเคมี และธรณีฟิสิกส์ (จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2555)



รูปที่ 2-3 แผนที่แสดงขอบเขตพื้นที่เกษตรกรรมที่ทำการศึกษา

บริเวณคลองน้ำฮวย ตำบลเขาหลวง อำเภอวังสะพุง จังหวัดเลย

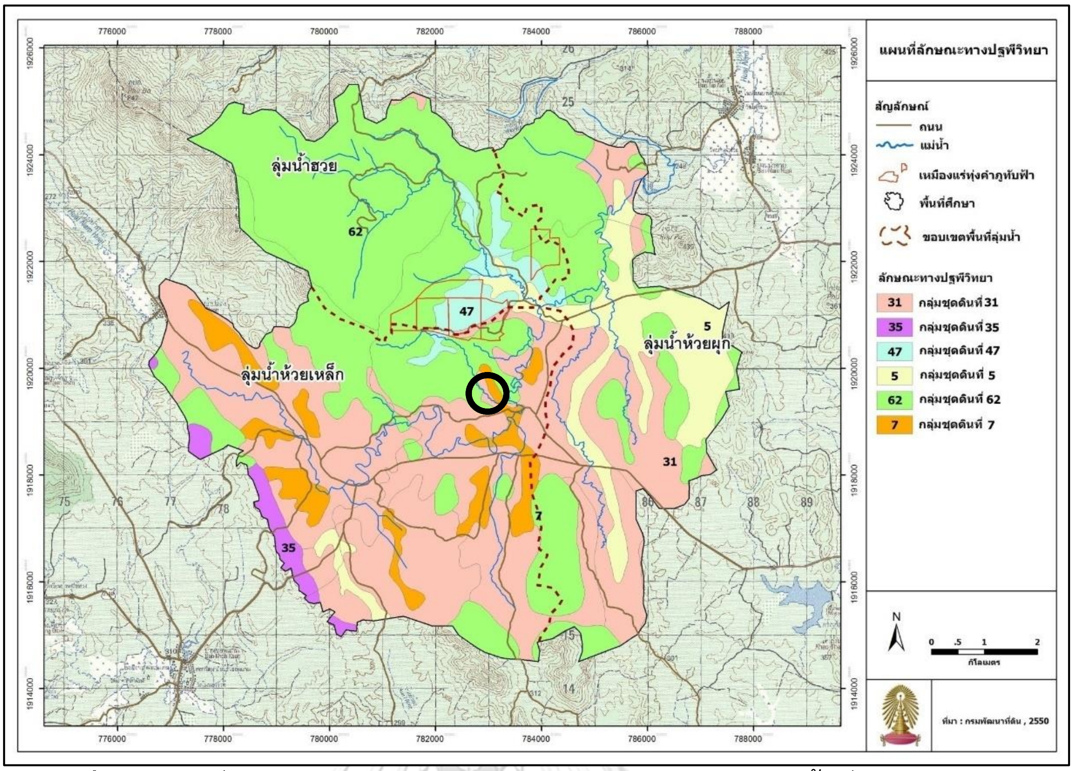
ที่มา: (จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2555)

สภาพภูมิประเทศของพื้นที่โดยรอบเป็นภูเขาสลับหุบเขา และมีทางน้ำสายสั้น ๆ ไหลจากหุบเขาจากทางทิศตะวันตกเฉียงใต้ไปทางทิศตะวันออกเฉียงเหนือลงสู่ทางน้ำ ประกอบด้วยพื้นที่แหล่งแร่หลักซึ่งตั้งอยู่บนยอดเขาภูทับฟ้า ครอบคลุมพื้นที่ประมาณ 1 ใน 5 ทางด้านทิศใต้ของพื้นที่โครงการเหมืองแร่ทองคำ ซึ่งมีการวางตัวแนวทางทิศตะวันออกและตะวันตก ส่วนลุ่มน้ำหลักที่พบในพื้นที่มี 3 ลุ่มน้ำ ได้แก่ ลุ่มน้ำห้วยเหล็ก ลุ่มน้ำห้วยผุก และลุ่มน้ำฮวย

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

2.2.1 ลักษณะทางปฐพีวิทยาของพื้นที่

จากการรวบรวมข้อมูลชุดดินที่จัดทำโดยกรมพัฒนาที่ดินในปี พ.ศ. 2552 มีการจัดทำแผนที่แสดงขอบเขตและการกระจายของดินชนิดต่าง ๆ ครอบคลุมพื้นที่ศึกษาทั้งหมด 78.60 ตารางกิโลเมตร และในพื้นที่ศึกษาสามารถแบ่งกลุ่มชุดดินออกเป็น 3 กลุ่ม ได้แก่ กลุ่มชุดดินที่ 62 กลุ่มชุดดินที่ 31 และกลุ่มชุดดินที่ 7 ดังแสดงในรูปที่ 2–4 ซึ่งมีความสัมพันธ์กับสภาพภูมิประเทศ เพื่อใช้ในการแปลความหมายในเรื่องของการใช้ประโยชน์ในพื้นที่ได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยมีรายละเอียดดังนี้



รูปที่ 2-4 แผนที่แสดงขอบเขตและการกระจายของดินชนิดต่าง ๆ ในพื้นที่เกษตรกรรม บริเวณคลองน้ำฮวย ตำบลเขาหลวง อำเภอวังสะพุง จังหวัดเลย

ที่มา: (จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2555)

- **กลุ่มชุดดินที่ 62** หรือกลุ่มชุดดินพื้นที่ลาดชันเชิงซ้อน (Slope complex: Sc) ชุดดินกลุ่มนี้ประกอบด้วยพื้นที่ภูเขา ซึ่งยังไม่มีการสำรวจและจำแนกดิน เนื่องจากสภาพพื้นที่มีความลาดชันสูง (มากกว่าร้อยละ 35) ดินที่พบในบริเวณดังกล่าวนี้มีทั้งดินลึกและดินตื้น ลักษณะของเนื้อดินและความอุดมสมบูรณ์ตามธรรมชาติแตกต่างกันไปตามชนิดของหินต้นกำเนิดในบริเวณนั้น ไม่เหมาะสมสำหรับการปลูกพืชเนื่องจากอาจเกิดการชะล้างพังทลายของหน้าดิน
- **กลุ่มชุดดินที่ 31** หรือกลุ่มชุดดินเลย (Loei series: Lo) เป็นชุดดินที่เกิดจากการสลายตัวผุพังอยู่กับที่หรือเป็นเศษหินเชิงเขาของหินแกรนิต ดินชั้นบนเป็นดินเหนียวหรือดินร่วนปนดินเหนียว สีน้ำตาลเข้ม ดินเป็นกรดเล็กน้อย (ค่าพีเอชอยู่ในช่วง 6–6.5) ดินชั้นล่างเป็นดินเหนียวสีน้ำตาลปนแดง อาจพบเหล็กและแมงกานีสสะสมในดินชั้นล่าง ดินเป็นกรดเล็กน้อย (ค่าพีเอชอยู่ในช่วง 5–6) ดินมีการระบายน้ำดี มีความอุดมสมบูรณ์ปานกลาง ดินชุดนี้มีความเหมาะสมกับการปลูกพืชไร่ จำพวกอ้อย มันสำปะหลัง ยางพารา

- **กลุ่มชุดดินที่ 7** หรือกลุ่มชุดดินท่าตูม (Tha Tum: Tt) เป็นดินนาที่เกิดจากตะกอนน้ำพัดพามาทับถมกันในบริเวณที่ราบ ดินชั้นบนเป็นดินร่วนหรือดินร่วนเหนียว ดินเป็นกรดเล็กน้อย (ค่าพีเอชอยู่ในช่วง 5–6) ส่วนดินชั้นล่างเป็นดินเหนียวสีเทา พบจุดประสีน้ำตาลเข้มและแดง ดินเป็นกรด (ค่าพีเอชอยู่ในช่วง 4.5–5) มีการระบายน้ำค่อนข้างต่ำ ดินมีความอุดมสมบูรณ์ตามธรรมชาติในระดับปานกลาง มักใช้ประโยชน์ในการปลูกข้าว

2.2.2 การแพร่กระจายของธาตุโลหะหนักและและธาตุกึ่งโลหะในพื้นที่

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย (2555) ได้ทำการศึกษาการกระจายตัวของมลสารในสิ่งแวดล้อมทั้งในแหล่งน้ำผิวดิน น้ำใต้ดิน ตะกอนท้องน้ำ รวมถึงในดิน จากการเก็บตัวอย่างในเดือนกุมภาพันธ์และเดือนพฤษภาคม ในปี พ.ศ. 2555 มีการวิเคราะห์ปริมาณธาตุโลหะหนักและธาตุกึ่งโลหะ ได้แก่ ทองแดง (Cu) ตะกั่ว (Pb) แมงกานีส (Mn) ปรอท (Hg) แคดเมียม (Cd) และสารหนู (As) ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

(1) วิเคราะห์ปริมาณธาตุโลหะหนักและธาตุกึ่งโลหะในแหล่งน้ำผิวดิน จำนวน 30 จุดเก็บตัวอย่าง ใน 3 ลุ่มน้ำ ได้แก่ ลุ่มน้ำห้วยเหล็ก ลุ่มน้ำห้วยผุก และลุ่มน้ำฮวย บริเวณเหมืองแร่ทองคำและบริเวณโดยรอบเหมืองแร่ทองคำ พบว่าสารหนูมีค่าเกินมาตรฐาน 6 จุด

(2) วิเคราะห์ปริมาณธาตุโลหะหนักและธาตุกึ่งโลหะในน้ำใต้ดิน พบสารหนูมีค่าเกินมาตรฐาน 2 จุด ตะกั่วมีค่าเกินมาตรฐาน 3 จุด แมงกานีสมีค่าเกินมาตรฐาน 3 จุด และแคดเมียมมีค่าเกินมาตรฐาน 1 จุด

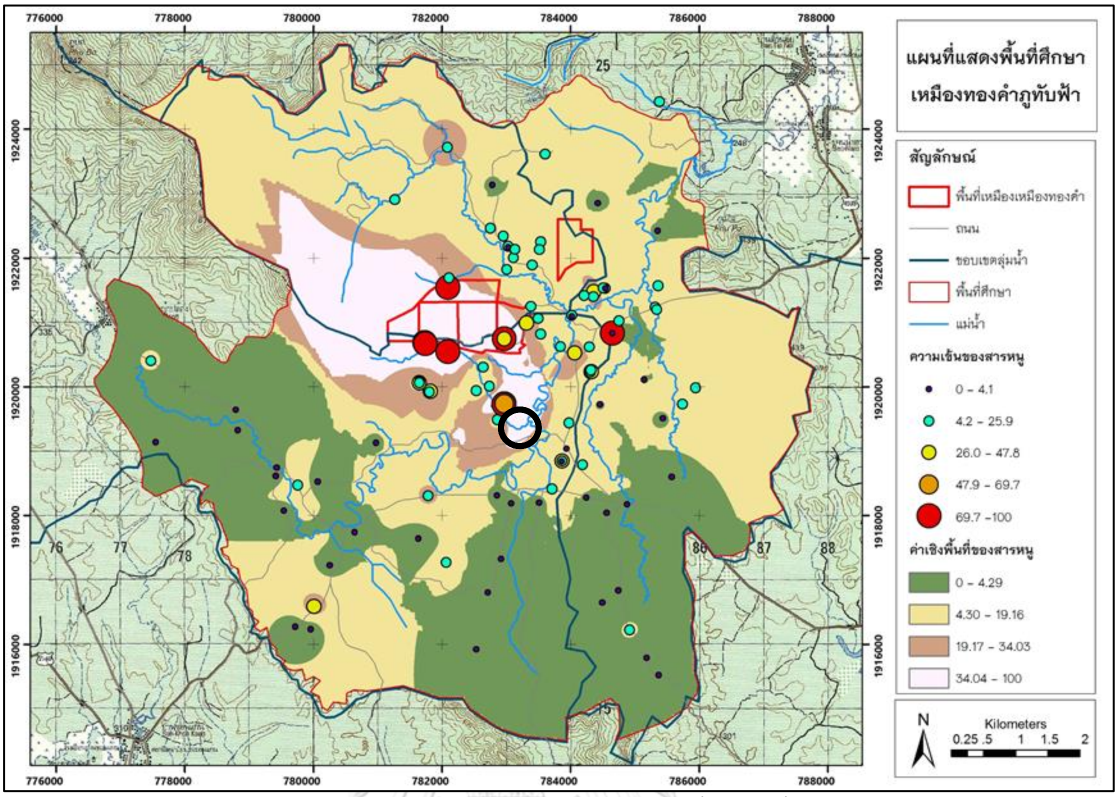
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

(3) วิเคราะห์ปริมาณธาตุโลหะหนักและธาตุกึ่งโลหะในตะกอนท้องน้ำจำนวน 30 จุด โดยจุดเก็บตัวอย่างตั้งอยู่ในบริเวณเหมืองแร่ทองคำ และรอบนอกพื้นที่เหมืองแร่ทองคำทั้ง 3 ลุ่มน้ำ ได้แก่ ลุ่มน้ำฮวย ลุ่มน้ำห้วยผุก และลุ่มน้ำห้วยเหล็ก พบสารหนูเพียงชนิดเดียวที่มีค่าสูงเกินมาตรฐาน 23 จุด อยู่ในบริเวณพื้นที่ที่มีการใช้ประโยชน์ที่ดินในการทำเกษตรกรรม

(4) วิเคราะห์ปริมาณธาตุโลหะหนักและธาตุกึ่งโลหะในดินจำนวน 75 จุด โดยจุดเก็บตัวอย่างอยู่ในบริเวณเหมืองแร่ทองคำ และรอบนอกพื้นที่เหมืองแร่ทองคำทั้ง 3 ลุ่มน้ำ ได้แก่ ลุ่มน้ำฮวย ลุ่มน้ำห้วยผุก และลุ่มน้ำห้วยเหล็ก พบสารหนูมีค่าเกินมาตรฐาน 12 จุด และพบแมงกานีสมีค่าเกินมาตรฐาน 1 จุด ซึ่งเป็นจุดที่อยู่นอกพื้นที่เหมืองแร่ทองคำ และเป็นบริเวณที่มีการใช้ประโยชน์ที่ดินในการปลูกยางพารา

จากข้อมูลการศึกษาในข้างต้น พบว่ามีมลสารเพียงบางชนิดที่ต้องเฝ้าระวัง โดยส่วนใหญ่พิจารณาได้ว่าเป็นค่าภูมิหลังของพื้นที่ (ข้อมูลจากลุ่มน้ำที่ไม่มีเหมือง) แต่อาจได้รับผลกระทบเพิ่มเติมจากกิจกรรมของมนุษย์ โดยเฉพาะสารหนู พบว่ามีค่าความเข้มข้นเกินค่ามาตรฐานเกือบทุกจุด จากข้อมูลพระราชบัญญัติส่งเสริมและรักษาคุณภาพสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ พ.ศ. 2535 ได้กำหนดค่ามาตรฐานของสารหนูในดินที่ใช้ประโยชน์เพื่อการอยู่อาศัยและเกษตรกรรม ต้องมีค่าไม่เกิน 3.9 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม โดยค่าความเข้มข้นของสารหนูในพื้นที่ที่มีค่าเกินมาตรฐานนั้น นับว่าเป็นมลสารสำคัญที่พบการแพร่กระจายอยู่ทั้งในดินและตะกอนท้องน้ำของทั้ง 3 ลุ่มน้ำ ตั้งแต่ก่อนเปิดดำเนินโครงการเหมืองแร่ทองคำ ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาในรายงานการศึกษาก่อนหน้านี้ เมื่อพิจารณาค่าความเข้มข้นของสารหนูในพื้นที่ ดังแสดงในรูปที่ 2–5 พบว่าค่าความเข้มข้นของสารหนูในดินในพื้นที่เกษตรกรรม บริเวณคลองน้ำฮวย ตำบลเขาหลวง อำเภอวังสะพุง จังหวัดเลย มีค่าความเข้มข้นของสารหนูที่เกินค่ามาตรฐานเกือบทุกจุดเก็บตัวอย่าง ซึ่งมีค่าตั้งแต่ 34.04–100 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม (จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2555) ซึ่งถือว่าเป็นปริมาณที่สูง อาจทำให้สารหนูแพร่กระจายเข้าสู่ห่วงโซ่อาหาร และส่งผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิต

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University



รูปที่ 2-5 แผนที่แสดงความเข้มข้นของสารหนูเชิงพื้นที่ในพื้นที่เกษตรกรรม

บริเวณคลองน้ำฮวย ตำบลเขาหลวง อำเภอวังสะพุง จังหวัดเลย

ที่มา: (จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2555)

2.2.3 ลักษณะการใช้ประโยชน์ที่ดิน

จากการศึกษาข้อมูลแผนที่แสดงการใช้ประโยชน์ที่ดินของพื้นที่ศึกษา สามารถแบ่งการใช้ประโยชน์ที่ดินในบริเวณพื้นที่ 3 ลุ่มน้ำ ออกเป็น 5 ประเภทหลัก ได้แก่ พื้นที่ชุมชนและสิ่งปลูกสร้าง พื้นที่เกษตรกรรม พื้นที่ป่าไม้ พื้นที่แหล่งน้ำ และพื้นที่เบ็ดเตล็ด จากการประมวลผลจากระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์ สามารถสรุปข้อมูลได้ว่า พื้นที่ศึกษามีการใช้ประโยชน์ที่ดินด้านเกษตรกรรมมากที่สุด รองลงมาคือ พื้นที่ป่าไม้ พื้นที่ชุมชนและสิ่งปลูกสร้าง ซึ่งพื้นที่เกษตรกรรม คิดเป็นร้อยละ 69.14 ของพื้นที่ทั้งหมด เนื่องจากประชากรส่วนใหญ่ประกอบอาชีพเกษตรกรรมเป็นหลัก พบว่ามีการปลูกยางพารามากที่สุด มีพื้นที่ 18.81 ตารางกิโลเมตร หรือคิดเป็นร้อยละ 23.94 ของพื้นที่ทั้งหมด รองลงมาคือข้าวโพดมีพื้นที่ 16.48 ตารางกิโลเมตร หรือคิดเป็นร้อยละ 20.97 ของพื้นที่ทั้งหมด และอันดับที่สามคือนาข้าวมีพื้นที่ 10.74 ตารางกิโลเมตร หรือคิดเป็นร้อยละ 13.67 ของ

พื้นที่ทั้งหมด นอกจากนั้นยังพบพืชชนิดอื่น ๆ ปะปนอยู่ในพื้นที่ด้วย (จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2555)

2.3 สารหนู (Arsenic)

สารหนูเป็นธาตุกึ่งโลหะ (Metalloids) ที่มีความเป็นพิษและอาจก่อให้เกิดอันตรายต่อสุขภาพ หากได้รับหรือสะสมในปริมาณมาก สารหนูมีสมบัติบางประการคล้ายธาตุโลหะ (Metals) เช่น เป็นของแข็ง มีลักษณะมันวาว จุดเดือดสูง แต่มีความเปราะ แตกหักง่าย และนำไฟฟ้าได้ไม่ดีคล้ายกับธาตุอโลหะ (Non–metal) (ศุภมาศ พนิชศักดิ์พัฒนา, 2559) ซึ่งคุณสมบัติทางเคมีที่จำเพาะของสารหนู แสดงในตารางที่ 2–2

ตารางที่ 2-2 คุณสมบัติทางเคมีที่จำเพาะของสารหนู

คุณสมบัติทางเคมี	รายละเอียด
1. น้ำหนักอะตอม	74.9 g/mol
2. เลขอะตอม	33
3. จุดเดือด	615 °C
4. จุดหลอมเหลว	818 °C
5. เลขออกซิเดชันที่เสถียร	–3, 0, +3 และ +5

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

2.3.1 แหล่งกำเนิดของสารหนู

แหล่งกำเนิดของสารหนูมีทั้งจากทางธรรมชาติ (Geological sources) และจากกิจกรรมของมนุษย์ (Anthropogenic sources) ซึ่งในปัจจุบันปัญหาการปนเปื้อนสารหนูในสิ่งแวดล้อมมีอัตราเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง อีกทั้งยังพบว่ามีปริมาณความเข้มข้นของสารหนูสะสมเพิ่มขึ้นทั้งในดิน น้ำ อากาศ โดยระดับการปนเปื้อนของสารหนูในดินที่พบในแต่ละพื้นที่มีความแตกต่างกัน

แหล่งกำเนิดทางธรรมชาติของสารหนู คือ วัตถุต้นกำเนิดดิน (Nriagu and Azcue, 1994) หรืออาจเกิดจากการชะละลายของหินและแร่ที่มีสารหนูเป็นองค์ประกอบ ซึ่งพบปะปนอยู่ในสายแร่ใต้ดิน โดยค่าภูมิหลังของสารหนูในดินจะเป็นตัวกำหนดประวัติทางธรณีวิทยาของภูมิภาคนั้น ๆ (Wild, 1993) ส่วนสารหนูที่มีที่มาจากกิจกรรมของมนุษย์ ส่วนใหญ่พบว่ามีสาเหตุมาจากการนำสารหนูมาใช้ประโยชน์ ทั้งในภาคการเกษตรและภาคอุตสาหกรรม สำหรับภาคการเกษตรมีการใช้สารหนูเป็น

ส่วนประกอบในเคมีภัณฑ์ทางการเกษตร ได้แก่ ปุ๋ยและสารฆ่าแมลง เช่น Monosodium Methanearsonate (MSMA) และ Disodium Methanearsonate (DAMA) สำหรับในภาคอุตสาหกรรม มีการใช้สารหนูเป็นส่วนประกอบในอุตสาหกรรมหลายประเภท ทั้งอุตสาหกรรมผลิตแก้วและเซมิคอนดักเตอร์ อุตสาหกรรมผลิตแบตเตอรี่รถยนต์ การนำสารหนูไปผสมกับโลหะชนิดอื่น ๆ เพื่อให้ทนทานต่อการผุกร่อน นอกจากนี้ การทำเหมืองแร่ก็เป็นแหล่งกำเนิดการปนเปื้อนที่สำคัญของสารหนู ได้แก่ เหมืองแร่ดีบุก และเหมืองแร่ทองคำ โดยในสายแร่ทองคำส่วนใหญ่จะมีสารหนูในรูปของแร่อาร์เซโนไพไรต์ (Arsenopyrite) เป็นส่วนประกอบประมาณร้อยละ 46 (กรมทรัพยากรธรณี, 2549) ซึ่งสามารถแพร่กระจายสู่สิ่งแวดล้อมได้หากมีการจัดการที่ไม่เหมาะสม

2.3.2 การแพร่กระจายของสารหนูในสิ่งแวดล้อม

การแพร่กระจายของสารหนูในพื้นที่ศึกษาอาจมีสาเหตุได้ทั้งจากสารหนูตามธรรมชาติและการรั่วไหลจากทำเหมืองแร่ ส่งผลให้สารหนูในรูปอาร์เซโนไพไรต์ที่ปนอยู่กับสายแร่ ถูกขุดออกมาในกระบวนการแยกแร่หรือแต่งแร่ก่อนนำไปถลุง เมื่ออาร์เซโนไพไรต์ถูกแยกออกมากับหางแร่และทิ้งไว้ ทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation reaction) กับอากาศและน้ำ ส่งผลให้เกิดการสลายตัวของแร่ที่มีสารหนูเป็นองค์ประกอบ ซึ่งหากเหมืองมีการจัดการที่ไม่ดีพอ ก็จะทำให้เกิดการรั่วไหลออกมาปนเปื้อนสู่สิ่งแวดล้อมภายนอก ทั้งในดินและตะกอนท้องน้ำ การปนเปื้อนของสารหนูในดิน อาจก่อให้เกิดความเสี่ยงและเป็นอันตรายต่อมนุษย์และระบบนิเวศได้ เช่น การปนเปื้อนของสารหนูในพื้นที่เกษตรกรรม อาจส่งผลให้มีการปนเปื้อนของสารหนูในผลผลิตทางการเกษตรในปริมาณที่สูงจนอาจก่อให้เกิดอันตรายได้หากนำมาบริโภค นอกจากนี้ สารหนูที่ปนเปื้อนในดินอาจถูกชะละลาย โดยกระบวนการทางธรรมชาติหรือโดยการกระทำของมนุษย์ที่สภาวะต่าง ๆ อาจทำให้สารหนูถูกปลดปล่อยสู่แหล่งน้ำใต้ดินและน้ำผิวดิน ก่อให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและระบบนิเวศได้ในวงกว้าง (ยุวดี เชี่ยววัฒนา, 2545)

ในประเทศไทยมีการศึกษาถึงระดับเกณฑ์พื้นฐานของโลหะหนักในประเทศไทย ซึ่งนอกเหนือจากโลหะหนักแล้วก็ยังมีการศึกษาถึงระดับเกณฑ์พื้นฐานของสารหนูเช่นเดียวกัน โดยมี 2 การศึกษา ได้แก่ การศึกษาที่ไทยทำร่วมกับออสเตรเลีย (Zarcinas et al., 2004) ซึ่งมีการเก็บตัวอย่างดินในบริเวณพื้นที่เกษตรกรรมทั่วประเทศไทย จำนวน 318 ตัวอย่าง ตลอดจนการศึกษาของกรมพัฒนาที่ดิน (สำนักวิทยาศาสตร์เพื่อการพัฒนาที่ดิน, 2552) ซึ่งมีการเก็บตัวอย่างดินในบริเวณ

พื้นที่เกษตรกรรมทั่วประเทศไทย จำนวน 3,186 ตัวอย่าง โดยทั้ง 2 การศึกษานี้ได้ทำการศึกษาและวิเคราะห์ถึงค่าพื้นฐานของสารหนูในประเทศไทยจากตัวอย่างดินในพื้นที่เกษตรกรรม ซึ่งสามารถนำมาสรุปค่าพื้นฐานของสารหนูอยู่ที่ไม่เกิน 30 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ซึ่งค่าที่ได้ถือว่าเป็นค่าที่สูง ซึ่งกรมพัฒนาที่ดินได้ให้ข้อมูลว่าเกิดจากการที่มีสายแร่ในประเทศไทยหลายแห่ง แต่จากข้อมูลพระราชบัญญัติส่งเสริมและรักษาคุณภาพสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ พ.ศ. 2535 ได้กำหนดค่ามาตรฐานของสารหนูในดินที่ใช้ประโยชน์เพื่อการอยู่อาศัยและเกษตรกรรม ต้องมีค่าไม่เกิน 3.9 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ดังนั้นดินในประเทศไทยหลายแห่งจึงมีค่าเกินมาตรฐาน จากค่าความเข้มข้นสารหนูที่มีค่าสูงเกินค่ามาตรฐานนั้น คาดว่าเป็นผลมาจากลักษณะทางธรรมชาติของพื้นที่ศักยภาพแหล่งแร่ อีกทั้งสารหนูยังเป็นองค์ประกอบของหินและแร่ตามธรรมชาติ

พื้นที่ที่ได้รับผลกระทบจากสารหนูที่สำคัญในประเทศไทย ได้แก อำเภอร่อนพิบูลย จังหวัดนครศรีธรรมราช ในปี พ.ศ. 2530 ซึ่งในอดีตมีการทำเหมืองแรดีบุกที่มีการบริหารจัดการที่ไม่ดี โดยสารหนูที่พบในอำเภอร่อนพิบูลย์ส่วนใหญ่อยู่ร่วมกับสายแร่ดีบุกอยู่ในรูปของอาร์เซโนไพไรต์หรือในรูปอื่นซึ่งมีซัลไฟด์เป็นองค์ประกอบ จากข้อมูลของกรมทรัพยากรธรณี พบว่าในป พ.ศ. 2531 และปี พ.ศ. 2535 มีประชาชนที่อาศัยอยู่ในพื้นที่เป็นโรคผิวหนังมากกว่า 1,000 คน และจากการตรวจเลือดประชาชนที่อาศัยในบริเวณดังกล่าว พบสารหนูสะสมอยู่ในร่างกายเกินมาตรฐานเท่ากับร้อยละ 87 โดยความเข้มข้นของสารหนูที่พบในน้ำใตดินมีค่า 5.11 มิลลิกรัมตอลิตร ในตะกอนทองน้ำมีค่า 212.11–305.00 มิลลิกรัมตอลิตร และในดินมีค่า 168.10–174.80 มิลลิกรัมตอลิตร โดยมีสาเหตุจากกองกากแรที่ปนเปื้อนสารหนูในปริมาณที่สูง ซึ่งเกิดการชะละลายและแพร่กระจายออกสู่สิ่งแวดล้อม (อนงค์ ไพจิตรประภาภรณ์, 2540)

2.3.3 สารประกอบของสารหนูและปฏิกิริยาของสารหนูในธรรมชาติ

2.3.3.1 สารประกอบของสารหนู

สารหนูในธรรมชาติส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปสารประกอบ (Arsenic compounds) ซึ่งสามารถรวมอยู่กับสารอินทรีย์ (Inorganic Arsenic) หรือสารอนินทรีย์ (Organic Arsenic) ได้ พบการสะสมตามพื้นดินและตะกอนท้องน้ำ สารประกอบสารหนูสามารถเปลี่ยนรูปได้ในธรรมชาติ โดยการทำปฏิกิริยากับออกซิเจนหรือโมเลกุลชนิดอื่น ๆ ในดิน น้ำ อากาศ หรือจากจุลินทรีย์ในดินหรือตะกอนดิน สารหนูในธรรมชาติมีเลขออกซิเดชัน (Oxidation–state) 4 สถานะ ได้แก่ As^{-3} As^{0} As^{+3}

และ As^{+5} ซึ่งสามารถเปลี่ยนแปลงได้ขึ้นอยู่กับค่าพีเอชรวมถึงสภาพปฏิกิริยารีดอกซ์ (Marin et al., 1993) โดยสารหนูที่มีบทบาทหลักและมีความสำคัญในงานทางด้านสิ่งแวดล้อม คือ สารหนูที่มีเลขออกซิเดชัน +5 (Arsenate; As^{+5}) และสารหนูที่มีเลขออกซิเดชัน +3 (Arsenite; As^{+3}) ประกอบด้วย

(1) สารประกอบอนินทรีย์ของสารหนู (Inorganic Arsenic)

ดินบริเวณพื้นที่เกษตรกรรมโดยทั่วไปรวมถึงสายแร่ตามธรรมชาติมักพบสารหนูอนินทรีย์เป็นหลัก (Adriano, 2001) ประกอบด้วยสารประกอบสารหนูที่มีเลขออกซิเดชัน +3 (Trivalent compound) และสารประกอบสารหนูที่มีเลขออกซิเดชัน +5 (Pentavalent compound) สารประกอบอนินทรีย์ของสารหนูมีความสามารถในการละลายน้ำได้สูง (Smith et al., 1998) อีกทั้งยังเป็นสารประกอบสารหนูที่พืชสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ มักผสมอยู่กับธาตุโลหะตัวอื่น ๆ อีกทั้งพบว่ามีความเป็นพิษมากกว่าสารหนูอินทรีย์

- **สารประกอบสารหนูที่มีเลขออกซิเดชัน +3 (Trivalent compound)**
  เช่น Arsenic trioxide (As_2O_3) Sodium arsenite ($NaAsO_2$) และ Arsenic trichloride ($AsCl_3$) เป็นต้น
- **สารประกอบสารหนูที่มีเลขออกซิเดชัน +5 (Pentavalent compound)**
  เช่น Arsenic pentoxide (As_2O_5) และ Arsenic acid (H_3AsO_4) โดยสารประกอบสารหนูเวเลนซ์ห้าหรืออาร์เซเนตสามารถแพร่กระจายออกไปได้ระยะไกล แต่ถ้าอยู่ในสภาวะเป็นกลางหรือด่าง สารประกอบสารหนูเวเลนซ์ห้าจะเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (Hydrolysis) ตกตะกอนร่วมกับออกไซด์ของเหล็ก (Fe) และอลูมิเนียม (Al) (Wilson and Hawkins, 1978) และเมื่อสารประกอบสารหนูเวเลนซ์ห้าเคลื่อนที่ผ่านบริเวณที่มีอนุภาคของแร่บางชนิด หรือเคลื่อนผ่านดินโคลน อาจเกิดกระบวนการดูดซับ (Adsorption) กระบวนการคีเลต (Chelation) และเกิดการตกตะกอนได้ หากบริเวณดังกล่าวมีสารประกอบอินทรีย์จำพวกฮิวมิค (Humic) โดยสารหนูจะเข้าจับกับสารอินทรีย์ และเกิดการสะสมหรือเกิดการตกตะกอนของสารหนู (เกษม จันทร์จรูญพงษ์, 2519)

(2) สารประกอบอินทรีย์ของสารหนู (Organic Arsenic)

สารหนูอินทรีย์มักเกี่ยวข้องกับปฏิกิริยาทางชีวเคมีของจุลินทรีย์ อาจเป็นผลโดยตรงจากการกำจัดของเสียที่เกิดจากกระบวนการการเมแทบอลิซึมออกจากเซลล์ของจุลินทรีย์รวมถึงการย่อยสลายสารหนูหรือสารประกอบสารหนูเชิงซ้อน (Adriano, 2001) สามารถแบ่งได้เป็น 2 กลุ่ม ประกอบด้วย

- **สารประกอบสารหนูที่มีเลขออกซิเดชัน +3 (Trivalent compound)**
  เช่น Monosodium methanearsonate (MSMA) และ Disodium methanearsonate (DSMA) ซึ่งเป็นส่วนประกอบในสารกำจัดวัชพืช
- **สารประกอบสารหนูที่มีเลขออกซิเดชัน +5 (Pentavalent compound)**
  เช่น Dimethylarsenic acid Disodium methylarsenate และ 3–Nitro, 4–hydroxypheylsonic acid มักใช้เป็นสารเร่งการเจริญเติบโต ส่วนใหญ่พบในเนื้อสัตว์

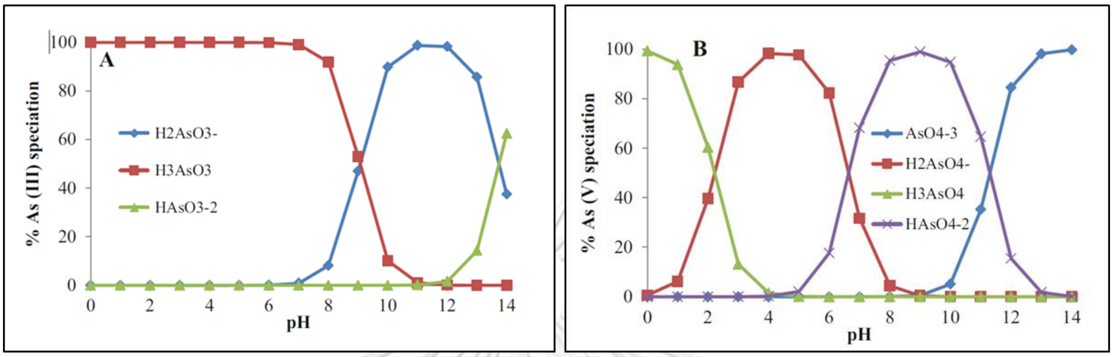
2.3.3.2 ปฏิกิริยาของสารหนูในธรรมชาติ

กระบวนการต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นในดิน สามารถเปลี่ยนแปลงรูปแบบทางเคมีของสารหนูในดินได้ ซึ่งมีส่วนในการกำหนดชีวปริมาณออกฤทธิ์ของสารหนู หรือบ่งบอกถึงความสามารถในการนำสารหนูไปใช้ประโยชน์ได้ในพืช (Kumpiene et al., 2006) ซึ่งกระบวนการต่าง ๆ ทั้งกระบวนการทางชีวภาพและกระบวนการทางกายภาพ เช่น ความสามารถในการตกตะกอน (Precipitation) ความสามารถในการละลาย (Dissolution) ความสามารถในการดูดซับ–คายซับ(Sorption–Desorption) รวมถึงสภาพปฏิกิริยาออกซิเดชัน–รีดักชัน (Oxidation–Reduction potential) เป็นต้น (Vaxevanidou et al., 2012)

เลขออกซิเดชัน (Oxidation state) ของสารหนูมี 4 สถานะ ได้แก่ As^{-3} As^{0} As^{+3} และ As^{+5} ซึ่งสารหนูที่มีเลขออกซิเดชัน +5 เกิดจากกระบวนการออกซิเดชัน (Oxidation reaction) ในขณะที่สารหนูที่มีเลขออกซิเดชัน –3, 0 และ +3 เกิดจากกระบวนการรีดักชัน (Reduction reaction) สารหนูที่มีบทบาทหลักและมีความสำคัญในงานทางด้านสิ่งแวดล้อม คือ สารหนูที่มีเลขออกซิเดชัน +3 ได้แก่ H_3AsO_3 $H_2AsO_3^-$ $HAsO_3^{2-}$ เป็นต้น และสารหนูที่มีเลขออกซิเดชัน +5 ได้แก่ H_3AsO_4 $H_2AsO_4^-$ $HAsO_4^{2-}$ AsO_4^{3-} เป็นต้น โดยปกติแล้วสารหนูที่มีเลขออกซิเดชัน +3 และ +5 มักพบในรูปออกซิแอนไอออน (Oxyanion) สามารถแตกตัวได้หลายรูปแบบขึ้นอยู่กับค่าพีเอชแสดงในรูปที่ 2–6 ซึ่งสารหนูที่มีเลขออกซิเดชัน +3 พบว่าที่ค่าพีเอชน้อยกว่า 7 จะพบสารหนูที่อยู่ในรูป H_3AsO_3 เท่านั้น

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

และที่ค่าพีเอชมากกว่า 7 จะพบสารหนูในรูป H_3AsO_3 และ $H_2AsO_3^-$ ดังแสดงในรูปที่ 2–6 (ก) ส่วนสารหนูที่มีเลขออกซิเดชัน +5 พบว่าที่ค่าพีเอชต่ำกว่า 3 จะพบสารหนูในรูป H_3AsO_4 และ $H_2AsO_4^-$ ส่วนที่ค่าพีเอช 4–5.5 มักพบสารหนูในรูป $H_2AsO_4^-$ และที่ค่าพีเอชมากกว่า 7 จะพบสารหนูในรูป $HAsO_4^{2-}$ และ AsO_4^{3-} ดังแสดงในรูปที่ 2–6 (ข)



(ก) (ข)

รูปที่ 2-6 (ก) รูปแบบทางเคมีของสารหนูที่มีเลขออกซิเดชัน +3 ที่ค่าพีเอชต่าง ๆ และ (ข) สารหนูที่มีเลขออกซิเดชัน +5 ที่ค่าพีเอชต่าง ๆ

ที่มา: (Khalid et al., 2017)

สารหนูที่มีเลขออกซิเดชัน +5 และ+3 มีค่าคงที่ของการแตกตัว (pK_a) ในช่วง 2.20 ถึง 11.53 และ 9.22 ถึง 13.40 ตามลำดับ (Shakoor et al., 2016) ซึ่งค่าคงที่ของการแตกตัวของสารหนูที่มีเลขออกซิเดชัน +3 มีค่าอยู่ในช่วงที่สูงกว่าสารหนูที่มีเลขออกซิเดชัน +5 นอกจากนี้ Wang and Zhao (2009) พบว่าสารหนูที่มีเลขออกซิเดชัน +5 และ +3 สามารถอยู่ร่วมกันได้ในสภาพแวดล้อมทางธรรมชาติภายใต้ภาวะการเกิดออกซิไดซ์ ซึ่งสารหนูที่พบในธรรมชาติส่วนใหญ่จะเป็นสารหนูที่เสถียรหรือมีเลขออกซิเดชันเป็นบวก ซึ่งสามารถเปลี่ยนไปอยู่ในรูปของสารประกอบในรูปอื่นได้ขึ้นอยู่กับสภาพแวดล้อม

ความสามารถในการละลายน้ำของสารหนูในดิน

ค่าพีเอชและค่าอีเอช (Redox potential) มีผลต่อกระบวนการทางเคมีของธาตุมลสารในดินทั้งทางตรงและทางอ้อม อีกทั้งยังสามารถกำหนดพฤติกรรมของธาตุมลสารในดินได้อีกด้วย ผลของค่าพีเอชและค่าอีเอชต่อการเคลื่อนที่ของธาตุมลสารจะมีความซับซ้อนและจำเพาะต่อธาตุมลสารนั้น ๆ

เมื่อสารหนูละลายน้ำแล้วอยู่ในรูปที่มีประจุลบหรือไม่มีประจุ และยังสามารถเคลื่อนที่ได้มากขึ้นเมื่อดินมีค่าพีเอชที่เป็นด่าง (ค่าพีเอชมากกว่า 7) สารหนูที่มีประจุลบมีความสามารถในการดูดซับในคอลลอยด์ดินมากขึ้นเมื่อค่าพีเอชของดินลดลง เนื่องจากคอลลอยด์ดินมีประจุบวก ทั้งนี้ได้แสดงสมการการละลายน้ำของสารประกอบอนินทรีย์ของสารหนูในสมการที่ (1) ถึง (6)

สมการแสดงค่าคงที่สมดุลการละลายน้ำของสารประกอบสารหนูที่มีเลขออกซิเดชัน +5 (Pentavalent compound)

$$H_3AsO_4 + H_2O \leftrightarrow H_2AsO_4^{-} + H_3O^{+} \qquad pK_a = 2.20 \qquad (1)$$

$$H_2AsO_4^{-} + H_2O \leftrightarrow HAsO_4^{2-} + H_3O^{+} \qquad pK_a = 6.97 \qquad (2)$$

$$HAsO_4^{2-} + H_2O \leftrightarrow AsO_4^{3-} + H_3O^{+} \qquad pK_a = 11.53 \qquad (3)$$

สมการแสดงค่าคงที่สมดุลการละลายน้ำของสารประกอบสารหนูที่มีเลขออกซิเดชัน +3 (Trivalent compound)

$$H_3AsO_3 + H_2O \leftrightarrow H_2AsO_3^{-} + H_3O^{+} \qquad pK_a = 9.22 \qquad (4)$$

$$H_2AsO_3^{-} + H_2O \leftrightarrow AsO_3^{2-} + H_3O^{+} \qquad pK_a = 12.13 \qquad (5)$$

$$HAsO_3^{2-} + H_2O \leftrightarrow AsO_3^{3-} + H_3O^{+} \qquad pK_a = 13.4 \qquad (6)$$

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ค่าพีเอชและค่าอีเอชมีผลต่อกระบวนการทางเคมีของสารหนู โดยสารหนูที่มีความเสถียรทางอุณหภูมิมากกว่าในดินที่มีค่าพีเอชปกติ (ค่าพีเอชตั้งแต่ 4 ถึง 8) คือ H_3AsO_3 $H_2AsO_4^{-}$ และ $HAsO_4^{2-}$ (Smith et al., 1998)

กระบวนการเกิดปฏิกิริยารีดอกซ์ (Redox reaction)

กระบวนการเกิดปฏิกิริยารีดอกซ์ แสดงถึงระดับความสามารถในการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันและระดับความสามารถในการเกิดปฏิกิริยารีดักชัน ซึ่งช่วยคาดการณ์ปฏิกิริยาต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นในดินได้โดยจุลินทรีย์ที่อยู่ในดิน ปฏิกิริยารีดอกซ์แบ่งออกเป็น

(1) ปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation reaction)

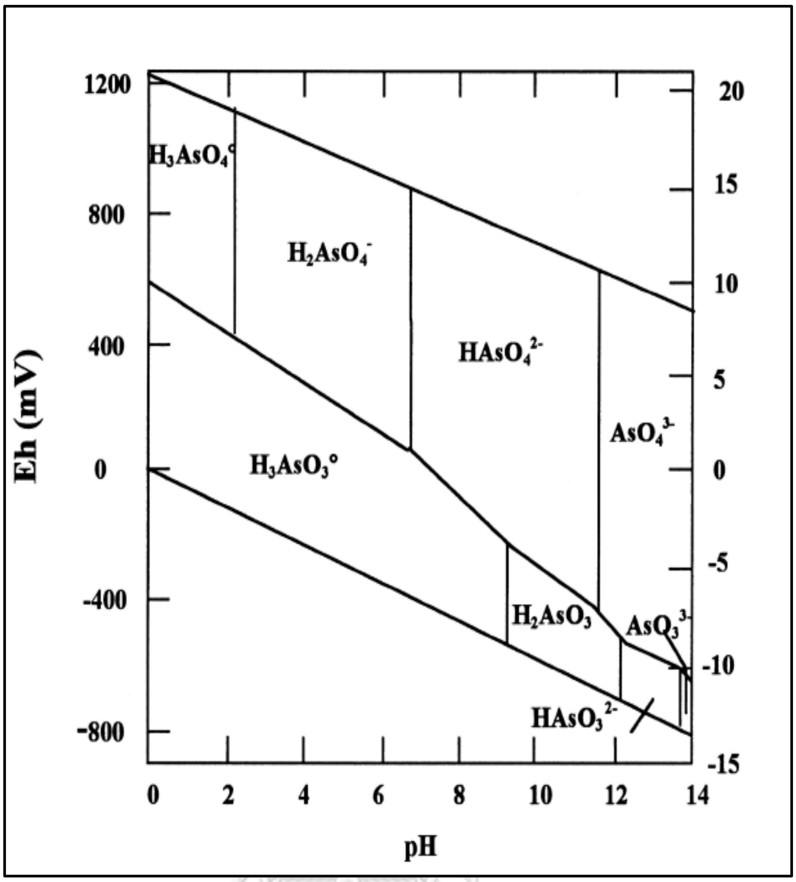
ปฏิกิริยาออกซิเดชัน หรือ ปฏิกิริยาที่โมเลกุลหรืออะตอมมีการสูญเสียอิเล็กตรอน โดยปกติแล้วปฏิกิริยาออกซิเดชันของสารหนูในดินจะเกิดในสภาวะที่ดินมีออกซิเจนเพียงพอ เช่น ดินที่แห้งและได้สัมผัสกับอากาศ ซึ่งจุลินทรีย์ในดินที่ใช้ออกซิเจนเป็นตัวรับอิเล็กตรอนจะเจริญเติบโตได้รวดเร็ว ส่งผลให้สารหนูที่มีเลขออกซิเดชัน +3 เกิดการออกซิไดซ์หรือเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันกับออกซิเจนที่เป็นตัวรับอิเล็กตรอนในดิน ทำให้เกิดสารหนูที่มีเลขออกซิเดชัน +5 ซึ่งมีความเสถียรสูงและสามารถถูกดูดซับโดยองค์ประกอบของดิน พวกออกไซด์ของโลหะรวมถึงสารอินทรีย์ในดินได้ง่าย

(2) ปฏิกิริยารีดักชัน (Reduction reaction)

ปฏิกิริยารีดักชัน หรือ ปฏิกิริยาที่โมเลกุลหรืออะตอมมีการรับอิเล็กตรอน เพื่อให้ตัวมันเองเกิดความเสถียร โดยปกติแล้วปฏิกิริยานี้เกิดจากกระบวนการย่อยสลายในดิน หรือเกิดในสภาวะที่ดินไม่มีออกซิเจน เช่น ดินที่มีสารอินทรีย์อยู่มากและมีน้ำขัง ซึ่งสภาพดังกล่าวทำให้ออกซิเจนถูกใช้จนหมด จุลินทรีย์ในดินที่ใช้สารอื่นรับอิเล็กตรอนได้จะเจริญเติบโตขึ้นมาแทน ส่งผลให้สารหนูที่มีเลขออกซิเดชัน +5 ถูกรีดิวซ์หรือเกิดปฏิกิริยารีดักชัน ทำให้เกิดสารหนูที่มีเลขออกซิเดชัน +3 ซึ่งสามารถแตกตัวได้รวดเร็ว ภายใต้ตัวทำละลายทั้งในสภาวะที่เป็นกรดและด่าง (Boyle and Jonasson, 1973)

ไดอะแกรมของ Eh–pH ของสารหนู

สารหนูในธรรมชาติมักพบในรูปของสารประกอบมากกว่าอยู่ในรูปอิสระ ทั้งนี้เนื่องจากกระบวนการเปลี่ยนแปลงจากปฏิกิริยารีดอกซ์ การเปลี่ยนแปลงลิแกนด์ การเกิดปฏิกิริยาการตกตะกอนหรือการดูดซับของสารหนู โดยค่าพีเอชและค่าอีเอชเป็นปัจจัยสำคัญในการควบคุมการเปลี่ยนแปลงรูปทางเคมีของสารหนู ทำให้สารหนูอยู่ในรูปของสารประกอบต่าง ๆ (Sharma and Sohn, 2009) จากกราฟแสดง Eh–pH ของสารหนู ดังรูปที่ 2–7 สามารถอธิบายได้ว่า ในสภาวะที่ดินมีออกซิเจนหรือสภาวะที่ดินแห้ง (เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน; ค่าอีเอชสูง) จะพบสารหนูในรูปสารประกอบอนินทรีย์ที่มีเลขออกซิเดชัน +5 ซึ่งมีรูปทางเคมี คือ H_3AsO_4 $H_2AsO_4^{-}$ $HAsO_4^{2-}$ และ AsO_4^{3-} แต่ภายใต้สภาวะที่ไม่มีออกซิเจนหรือสภาวะที่ดินมีน้ำขัง (เกิดปฏิกิริยารีดักชัน; ค่าอีเอชต่ำ) จะพบสารหนูในรูปสารประกอบอนินทรีย์ที่มีเลขออกซิเดชัน +3 ซึ่งอยู่ในรูปไอออนลบหรือไม่มีประจุ คือ $H_2AsO_3^{-}$ และ $HAsO_3$



รูปที่ 2-7 ไดอะแกรม Eh–pH สำหรับรูปแบบทางเคมีของสารหนู

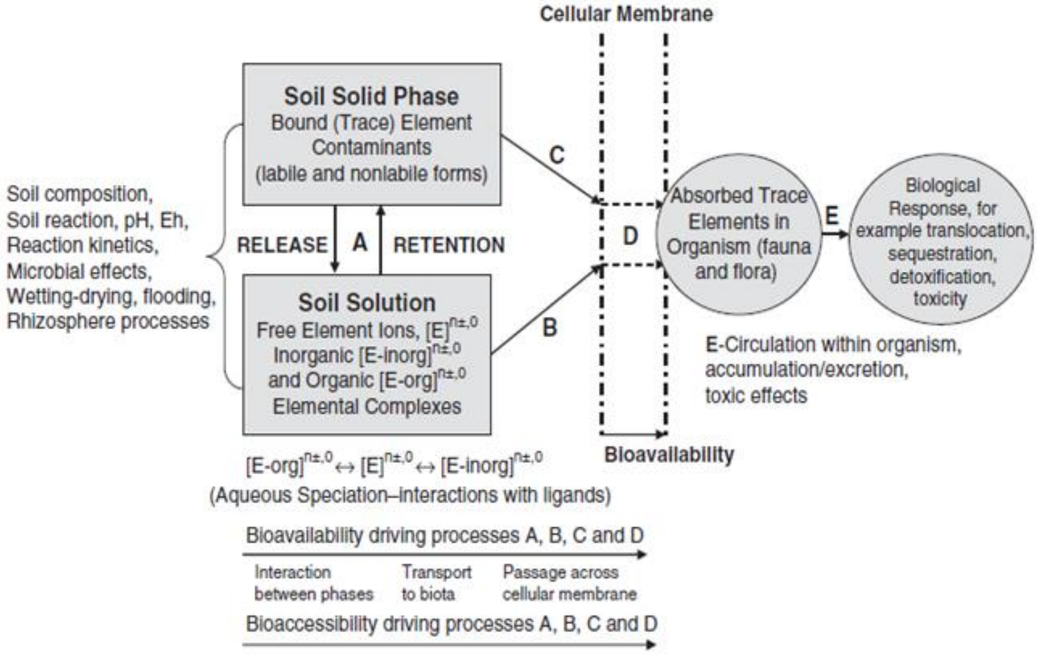
ที่มา: (Akter et al., 2005)

2.4 ชีวปริมาณออกฤทธิ์ของสารหนู (Bioavailability of Arsenic)

การศึกษาปริมาณสารหนูทั้งหมดในดิน (Total As concentration) จะเป็นตัวบ่งชี้ที่ดีในการบ่งบอกถึงระดับความรุนแรงหรือความมากน้อยในการปนเปื้อนของสารหนูในพื้นที่ แต่ข้อมูลดังกล่าวไม่เพียงพอต่อการประเมินศักยภาพของความเป็นอันตรายต่อสิ่งแวดล้อม กล่าวคือ ค่าปริมาณสารหนูทั้งหมดในดินไม่สามารถบ่งชี้ถึงปริมาณสารหนูที่มีชีวปริมาณออกฤทธิ์หรือความพร้อมใช้งานทางชีวภาพได้ อีกทั้งไม่สามารถบ่งบอกถึงปริมาณของสารหนูที่มีศักยภาพในการเคลื่อนที่สู่สิ่งแวดล้อมได้ (ยุวดี เชี่ยววัฒนา, 2545)

ชีวปริมาณออกฤทธิ์ หมายถึง ความสามารถในการใช้ประโยชน์ได้ทางชีวภาพของธาตุ ซึ่ง Adriano (2001) ได้บอกความแตกต่างระหว่าง Availability และ Bioavailability ซึ่ง Availability หมายถึง อัตราและการประเมินค่าที่สารเคมีถูกปล่อยออกมาจากตัวกลาง (ดิน) ในขณะที่ Bioavailability ของสารเคมี คือ การประเมินค่าที่สารเคมีถูกดูดซึมเข้าสู่ตัวรับ ผ่านทางการสัมผัส

หรือการดูดซึมโดยตรง รวมถึงการสัมผัสและการดูดซึมสารเคมีในดินของพืชผ่านทางราก รวมถึงสิ่งมีชีวิตในดินอื่น ๆ โดยจะขึ้นอยู่กับรูปแบบทางเคมีของธาตุชนิดนั้น ๆ รวมถึงความสามารถในการยึดเกาะกับอนุภาคของดิน (Niazi et al., 2011; Shahid et al., 2012; Xiong et al., 2016) ซึ่งความสามารถในการใช้ประโยชน์ได้ทางชีวภาพของธาตุเป็นกระบวนการที่ซับซ้อนและมีพลวัต อีกทั้งยังเป็นตัวควบคุมกระบวนการทางชีวภาพ และกระบวนการทางเคมี (Shahid et al., 2012) ซึ่งขึ้นอยู่กับปัจจัยต่าง ๆ ได้แก่ องค์ประกอบของดิน ปฏิกิริยาในดิน ค่าพีเอช ค่าอีเอช จลนศาสตร์เคมีจุลินทรีย์ในดิน รวมถึงสภาวะดินเปียกและแห้ง เป็นต้น



รูปที่ 2-8 กลไกของชีวปริมาณออกฤทธิ์ของมลสารในดิน

ที่มา: (Semple et al., 2004)

กลไกของชีวปริมาณออกฤทธิ์ของมลสารในดินเป็นกระบวนการที่มลสารมีการเคลื่อนที่ระหว่างส่วนประกอบ (Phase) ต่าง ๆ ของดิน โดยสามารถอธิบายในแต่ละกระบวนการตามแผนภาพในรูปที่ 2–8 ได้ดังนี้

กระบวนการ A: หลังจากมลสารเคลื่อนลงสู่ดินและสัมผัสกับส่วนที่เป็นของแข็งในดิน (Solid phase) จะเกิดการเหนี่ยวนำให้เกิดการเปลี่ยนรูปแบบทางเคมี หรือคงอยู่กับองค์ประกอบของดินโดยการดูดซับหรืออยู่ในรูปของส่วนที่คงตัว (Residual Fraction) จากนั้นมลสารเหล่านั้นจะ

แพร่กระจาย (Redistribution) เข้าสู่ส่วนของน้ำในดิน (Soil Solution) ในรูปสารละลาย หรือดูดซับกับคอลลอยด์ในดิน

กระบวนการ B และ C: สารอินทรีย์และสารอนินทรีย์จะถูกขนส่งไปยังเยื่อหุ้มเซลล์ (Cell membrane) ของรากพืชหรือสัตว์หน้าดินโดยตรง

กระบวนการ D: มลสารเคลื่อนที่เข้าสู่สิ่งมีชีวิต ผ่านทางเยื่อหุ้มเซลล์ของพืชและสัตว์หน้าดิน แสดงให้เห็นถึงการนำไปใช้ทางชีวภาพ (Bioaccessibility) ซึ่งหมายถึง ระดับหรืออัตราที่สารถูกดูดซึม ณ ตำแหน่งออกฤทธิ์ทางชีววิทยา หรือเป็นสภาพพร้อมใช้งาน

กระบวนการ E: หลังจากการดูดซับก็จะเกิดการตอบสนองของสิ่งมีชีวิต ทั้งพืชและสัตว์หน้าดิน เช่น การเคลื่อนย้ายธาตุ (Translocation) และ การขับสารพิษ (Detoxification) ออกจากร่างกาย

2.4.1 การศึกษาชีวปริมาณออกฤทธิ์ของสารหนูด้วยวิธีการสกัดแบบขั้นตอนเดียว

การหาชีวปริมาณออกฤทธิ์ของสารหนูในดิน นิยมใช้การสกัดแบบขั้นตอนเดียว (Single Extraction) ซึ่งมีวิธีการสกัดที่หลากหลาย ใช้สารละลายที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับเงื่อนไขของการสกัด การสกัดแบบขั้นตอนเดียวเป็นวิธีที่สะดวก รวดเร็ว และไม่ซับซ้อน โดยสารละลายที่ใช้ ได้แก่

- สารละลายกรด เช่น Hydrochloric acid (HCl) Sulfuric acid (H_2SO_4)
- สารละลายเกลือ เช่น Ammonium chloride (NH_4Cl) Sodium bicarbonate ($NaHCO_3$)
- สารคีเลต (Chelating agent) เช่น Ethylene diamine tetra–acetic acid (EDTA) (Adriano, 2001)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างสารหนูในดินที่สกัดออกมาด้วยสารละลายต่าง ๆ กับสารหนูในพืช จะพิจารณาความสัมพันธ์จากค่า R^2 ซึ่งช่วยทำให้ทราบว่าสารสกัดชนิดใดสามารถบ่งชี้ถึงชีวปริมาณออกฤทธิ์ของสารหนูได้ดีที่สุด มีตัวอย่างงานวิจัยที่เกี่ยวข้องดังต่อไปนี้

การศึกษาของ Gregori et al. (2004)

ใช้วิธีการสกัดแบบขั้นตอนเดียวโดยใช้วิธีการสกัดด้วย EDTA ความเข้มข้น 0.05 โมลาร์ (ค่าพีเอชเท่ากับ 7) และศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างชีวปริมาณออกฤทธิ์ของสารหนู (As) ทองแดง (Cu) และพลวง (Sb) ในต้นถั่ว (*Medicago sativa* L.)

จากการศึกษาพบว่าการสกัดดินโดยใช้ EDTA ความเข้มข้น 0.05 โมลาร์ เป็นวิธีที่ใช้บ่งบอกความสัมพันธ์ระหว่างชีวปริมาณออกฤทธิ์ของสารหนูในต้นถั่วได้ดีที่สุด ซึ่งมี R^2 สูงถึง 0.94 ในขณะที่ทองแดงและพลวงมีค่า R^2 เท่ากับ 0.92 และ 0.72 ตามลำดับ

การศึกษาของ Peryea (2006)

ใช้วิธีการสกัดแบบขั้นตอนเดียวเปรียบเทียบกัน 5 วิธี คือ (1) Toxicity Characteristic Leaching Procedure (TCLP) (2) สกัดด้วยสารละลาย $NaHCO_3$ ที่ความเข้มข้น 0.5 โมลาร์ (3) วิธี EPA Method 3050 (4) โดยสกัดด้วย Concentrated HCl (5) สกัดด้วยวิธี The Mehlich–3 และศึกษาความสัมพันธ์กับสารหนูในต้นแอปเปิลสายพันธุ์ Fuji/EMILA.26 และ Gala/ EMILA.26

จากการศึกษาพบว่าการสกัดดินโดยใช้วิธี TCLP มีค่า R^2 สูงที่สุด ซึ่งอยู่ในช่วง 0.4–0.6 จึงมีความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสารหนูในดินกับปริมาณสารหนูทั้งในใบและผลของต้นแอปเปิลมากที่สุด อย่างไรก็ตามวิธี TCLP ถูกออกแบบมาเพื่อประเมินการเคลื่อนที่ของ Solid waste ไม่ได้ใช้ประเมินชีวปริมาณออกฤทธิ์ของธาตุมลสารในพืช รองลงมาคือวิธีการสกัดดินโดยใช้ $NaHCO_3$ ที่ความเข้มข้น 0.5 โมลาร์ โดยปกติแล้ววิธีการนี้ใช้สำหรับประเมิน Available Phosphorus ในดิน และเมื่อนำมาสกัดสารหนูในดินพบว่ามีค่า R^2 อยู่ในช่วง 0.2–0.4 ซึ่งเป็นค่าที่ต่ำ ในขณะที่การสกัดด้วยวิธี EPA 3050 วิธี Concentrated HCl และวิธี The Mehlich–3 มีค่า R^2 อยู่ในช่วง 0.0–0.2 ถือเป็นค่าที่ต่ำเช่นเดียวกัน

การศึกษาของ Anawar et al. (2008)

ใช้วิธีการสกัดแบบขั้นตอนเดียวเปรียบเทียบกัน 6 วิธี คือ (1) สกัดด้วย Deionized (DI) water (2) สกัดด้วย Mix acid (ประกอบด้วยสารละลาย HCl ที่ความเข้มข้น 0.05 นอร์มัล และสารละลาย H_2SO_4 ความเข้มข้น 0.025 นอร์มัล) (3) สกัดด้วย CH_3COONa (ใช้สารละลาย Sodium acetate ความเข้มข้น 1 โมลาร์ใน Acetic acid) (4) สกัดด้วย Phosphate (ประกอบด้วยสารละลาย

Na_2HPO_4 ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ และสารละลาย NaH_2PO_4 ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์) (5) สกัดด้วยสารละลาย $NH_2OH.HCl$ (ประกอบด้วย NH_2OH ความเข้มข้น 0.04 โมลาร์ และ HCl ใน Acetic acid ที่ความเข้มข้นร้อยละ 25 โดยปริมาตร) (6) สกัดด้วย Oxalate (acid–ammonium–oxalate ความเข้มข้น 0.2 โมลาร์) รวมถึงศึกษาความสัมพันธ์กับสารหนูในต้นถั่ว (*Medicago sativa* L.)

จากการศึกษาพบว่าการศึกษาชีวปริมาณออกฤทธิ์ของสารหนูโดยวิธีการสกัดดินด้วย CH_3COONa และ Mixed acid พบว่ามีค่า R^2 เท่ากับ 0.69 และ 0.54 ตามลำดับ ซึ่งค่า R^2 ที่ได้มีค่าสูงกว่าการสกัดด้วยวิธีการอื่น ๆ อีกทั้งวิธีการดังกล่าวยังเป็นวิธีการสกัดที่มีความสัมพันธ์ระหว่างสารหนูกับมวลชีวภาพ (Biomass) ของพืชมากที่สุดอีกด้วย

การศึกษาของ Martínez-Sánchez et al. (2011)

ใช้วิธีการสกัดแบบขั้นตอนเดียวเปรียบเทียบกัน 9 วิธี คือ (1) สกัดด้วย Water medium (อัตราส่วน 1:5) (2) สกัดด้วย Nitric acid medium (3) สกัดด้วย Hydrochloric acid medium (Adriano, 2001) (4) สกัดด้วย Complexing–reducing medium (Mehra and Jackson, 1960) (5) สกัดด้วย Oxidizing medium (F3: Oxidizable Fraction ของวิธี BCR) (6) สกัดด้วยสารละลาย $HNaCO_3$ ความเข้มข้น 0.5 โมลาร์ (Olsen, 1954) (7) สกัดด้วยสารละลาย Ammonium acetate (8) สกัดด้วยสารละลาย $(NH_4)_2SO_4$ ที่ความเข้มข้น 0.05 โมลาร์ (9) สกัดด้วย DTPA ที่ความเข้มข้น 0.005 โมลาร์ รวมถึงศึกษาความสัมพันธ์กับสารหนูในพืชดอกจำนวน 5 ชนิด ได้แก่ *Limonium carthaginens, Arthrocnemun macrostachyum, Dittrichia viscosa, Zygophyllum fabago* และ *Glaucium flavum*

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

จากการศึกษาพบว่าการศึกษาชีวปริมาณออกฤทธิ์ของสารหนูโดยใช้วิธีการสกัดดินด้วย Hydrochloric acid และ Oxidizing medium เป็นวิธีที่มีความสัมพันธ์กับสารหนูในรากพืชมากที่สุด ซึ่งมีค่า R^2 เท่ากับ 0.708 และ 0.641 ตามลำดับ ส่วนวิธีการสกัดดินด้วย Complexing–reducing medium และ $HNaCO_3$ ความเข้มข้น 0.5 โมลาร์ เป็นวิธีที่มีความสัมพันธ์กับสารหนูในใบพืชมากที่สุด ซึ่งมีค่า R^2 เท่ากับ 0.334 และ 0.310 ตามลำดับ ซึ่งค่าที่ได้จากการสกัดจะเห็นได้ว่ามีค่าต่ำ แต่เป็นค่าที่สูงที่สุดเมื่อเทียบกับการสกัดด้วยวิธีการอื่น ๆ จึงถือว่าเป็นวิธีที่มีความสัมพันธ์กับสารหนูในใบพืชมากที่สุดในการศึกษานี้

การศึกษาของ Wang et al. (2014)

ใช้การสกัดโดยด้วยวิธี DGT (Diffusive gradients in thin films technique) ซึ่งเป็นเทคนิคการตรวจธาตุหรือสารประกอบในสิ่งแวดล้อม โดยใช้หลักการแพร่ผ่าน Membrane filter เปรียบเทียบกับวิธีการสกัดโดยใช้วิธีการสกัดแบบขั้นตอนเดียว 6 วิธี คือ (1) สกัดด้วยสารละลาย $NaHCO_3$ ความเข้มข้น 0.5 โมลาร์ (2) สกัดด้วยสารละลาย HCl 1 โมลาร์ (3) สกัดด้วยสารละลาย NH_4Cl ความเข้มข้น 1 โมลาร์ (4) สกัดด้วยสารละลาย NH_4F ความเข้มข้น 0.5 โมลาร์ (5) สกัดด้วยสารละลาย NaOH ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ (6) สกัดด้วย H_2SO_4 ความเข้มข้น 0.25 โมลาร์ และศึกษาความสัมพันธ์กับสารหนูในต้นกวางตุ้ง

จากการศึกษาพบว่าการศึกษาชีวปริมาณออกฤทธิ์ของสารหนูโดยวิธี DGT มี R^2 สูงที่สุดคือ 0.83 และการสกัดดินโดยใช้วิธีอื่น ๆ มีค่า R^2 มากกว่า 0.5 ซึ่งอยู่ในช่วงที่สามารถบ่งบอกชีวปริมาณออกฤทธิ์ของสารหนูในต้นกวางตุ้งได้ ยกเว้นการสกัดด้วย NaOH ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ ที่มีค่า R^2 เท่ากับ 0.16 ซึ่งเป็นค่าที่ต่ำมาก ไม่สามารถบ่งบอกชีวปริมาณออกฤทธิ์ของสารหนูในต้นกวางตุ้งได้

จากข้อมูลความสัมพันธ์ระหว่างชีวปริมาณออกฤทธิ์ของสารหนูกับพืชชนิดต่าง ๆ ที่ยกตัวอย่างมาในข้างต้น นำมาสู่การเลือกใช้วิธีการสกัดดินด้วย EDTA ที่ความเข้มข้น 0.05 โมลาร์ (Gregori et al., 2004) ซึ่งพบว่ามีค่า R^2 สูงถึง 0.94 จึงเชื่อว่าวิธีการดังกล่าวเป็นวิธีที่ใช้บ่งบอกความสัมพันธ์ระหว่างชีวปริมาณออกฤทธิ์ของสารหนูในพืชได้ดีที่สุด

2.5 การกระจายสัดส่วน (Fractionation) ของสารหนูในดิน

ปริมาณมลสารที่พร้อมใช้ทางชีวภาพและมีศักยภาพในการเคลื่อนที่สู่สิ่งแวดล้อม มักเกี่ยวข้องกับรูปฟอร์มทางเคมีความสามารถในการยึดเกาะกับอนุภาคของดินโดยการดูดซับ (Adsorption) บนอนุภาคของดิน ซึ่งการดูดซับเป็นกระบวนการที่เกี่ยวข้องกับสารตั้งแต่ 2 ชนิดขึ้นไประหว่างสารที่ทำหน้าที่เป็นตัวดูดซับ (Adsorbent) ซึ่งมีขนาดใหญ่กว่า กับสารชนิดที่เป็นตัวถูกดูดซับ (Adsorbate) ซึ่งมีขนาดเล็กกว่า โดยเป็นกลไกในระดับโมเลกุล

การศึกษาการกระจายสัดส่วน (Fractionation) ของสารหนูในดิน เป็นการศึกษาเพื่อทำให้ทราบว่าสารหนูกระจายอยู่ในองค์ประกอบใดของดิน ซึ่งสารหนูที่พบในสิ่งแวดล้อมที่แตกต่างกัน ก็จะมีการกระจายสัดส่วนในดินต่างกัน ขึ้นอยู่กับลักษณะสมบัติของดิน รวมถึงองค์ประกอบต่าง ๆ ในดิน ซึ่งสามารถเปลี่ยนแปลงได้ตามสภาพแวดล้อม โดยการวิเคราะห์การกระจายสัดส่วนของสารหนูในดิน

ในสภาวะออกซิเดชัน–รีดักชันที่แตกต่างกันจะสามารถบ่งบอกถึงชีวปริมาณออกฤทธิ์ของสารหนูในดินภายใต้สภาพแวดล้อมที่เปลี่ยนแปลงไปได้ (Gleyzes et al., 2002) ซึ่งข้อมูลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิธีวิเคราะห์การกระจายสัดส่วนของสารหนูในดินจะแสดงในหัวข้อ 2.5.1 นอกจากนี้ยังมีข้อมูลแสดงความสัมพันธ์ของการกระจายสัดส่วนของสารหนูในดินและชีวปริมาณออกฤทธิ์ของสารหนูในดินซึ่งแสดงในหัวข้อ 2.5.2

2.5.1 วิธีวิเคราะห์การกระจายสัดส่วนของสารหนูในดิน

วิธีวิเคราะห์การกระจายสัดส่วนของสารหนูในดิน สามารถทำได้โดยการสกัดตามลำดับส่วนเป็นการสกัดเอามลสารออกมาจากองค์ประกอบต่าง ๆ ของดิน โดยใช้สารละลายที่จำเพาะต่อการชะละลายในองค์ประกอบต่าง ๆ ของดินออกมาเป็นลำดับ ในแต่ละขั้นตอนมีวัตถุประสงค์เพื่อจำลองการเปลี่ยนแปลงสภาพแวดล้อมที่อาจส่งผลต่อการยึดเกาะของธาตุ และเมื่อสกัดเสร็จในแต่ละขั้นให้นำสารละลายใสไปตรวจวิเคราะห์ และนำตัวอย่างดินที่เหลือไปใช้สกัดในขั้นต่อไป จากการทบทวนเอกสารพบว่าการสกัดตามลำดับส่วนสามารถทำได้หลายวิธี ซึ่งในแต่ละวิธีก็จะมีขั้นตอนในการสกัดที่แตกต่างกัน ดังแสดงในตารางที่ 2–3

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ 2-3 วิธีวิเคราะห์การกระจายสัดส่วนของสารหนูในดินแบบต่าง ๆ

(1) วิธี Tessier (Tessier et al., 1979)

ขั้นตอนการสกัด	การกระจายสัดส่วนของสารหนู
วิธีการสกัด มี 5 ขั้นตอน (1) สกัดด้วยสารละลาย $MgCl_2$ ความเข้มข้น 1 โมลาร์ ปริมาตร 8 มิลลิลิตร (ค่าพีเอชเท่ากับ 7)	F1: Exchangeable Fraction
(2) สกัดด้วยสารละลาย Na_4OAc ความเข้มข้น 1 โมลาร์ ปริมาตร 8 มิลลิลิตร (ปรับเป็นพีเอช 5 โดยใช้ Acetic acid)	F2: Acid–soluble Fraction
(3) สกัดด้วยสารละลาย $NH_2OH.HCl$ ที่ความเข้มข้น 0.04 โมลาร์ ใน Acetic acid ที่ความเข้มข้นร้อยละ 25 ปริมาตร 20 มิลลิลิตร	F3: Reducible Fraction
(4) สกัดด้วย (4.1) เติมสารละลาย HNO_3 ที่ความเข้มข้น 0.02 โมลาร์ ปริมาตร 3 มิลลิลิตร และ H_2O_2 ที่ความเข้มข้นร้อยละ 30 ปริมาตร 5 มิลลิลิตร (ปรับพีเอชเป็น 2 โดยใช้ HNO_3) (4.2) เติมสารละลาย H_2O_2 ที่ความเข้มข้นร้อยละ 30 ปริมาตร 3 มิลลิลิตร (ปรับพีเอชเป็น 2 โดยใช้ HNO_3) (4.3) เติมสารละลาย NH_4OAc ความเข้มข้น 3.2 โมลาร์ ใน HNO_3 ที่ความเข้มข้นร้อยละ 20 ปริมาตร 5 มิลลิลิตร	F4: Oxidizable Fraction
(5) ย่อยดินด้วย HF + $HClO_4$	F5: Residual Fraction

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตารางที่ 2-3 วิธีวิเคราะห์การกระจายสัดส่วนของสารหนูในดินแบบต่าง ๆ (ต่อ)

(2) วิธี Modified Tessier (Rauret et al., 1989)

ขั้นตอนการสกัด	การกระจายสัดส่วนของสารหนู
วิธีการสกัด มี 5 ขั้นตอน (1) สกัดด้วยสารละลาย $MgCl_2$ ความเข้มข้น 1 โมลาร์ ปริมาตร 8 มิลลิลิตร (ค่าพีเอชเท่ากับ 7)	F1: Exchangeable Fraction
(2) สกัดด้วยสารละลาย NaOAc 1 โมลาร์ (ปรับเป็นพีเอช 5 โดยใช้ Acetic acid) ปริมาตร 50 มิลลิลิตร	F2: Acid–soluble Fraction
(3) สกัดด้วยสารละลาย $NH_2OH.HCl$ 0.04 โมลาร์ ใน Acetic acid ที่ความเข้มข้นร้อยละ 25 ปริมาตร 50 มิลลิลิตร	F3: Reducible Fraction
(4) สกัดด้วย (4.1) เติมสารละลาย HNO_3 ความเข้มข้น 0.02 โมลาร์ ปริมาตร 3 มิลลิลิตร และ H_2O_2 ที่ความเข้มข้นร้อยละ 30 (ปรับพีเอชเป็น 2 โดยใช้ HNO_3) ปริมาตร 5 มิลลิลิตร (4.2) เติมสารละลาย H_2O_2 ที่ความเข้มข้นร้อยละ 30 (ปรับพีเอชเป็น 2 โดยใช้ HNO_3) ปริมาตร 3 มิลลิลิตร (4.3) เติมสารละลาย NH_4OAc 3.2 โมลาร์ ใน HNO_3 ที่ความเข้มข้นร้อยละ 20 ปริมาตร 5 มิลลิลิตร	F4: Oxidizable Fraction
(5) ย่อยดินด้วย Aqua regia	F5: Residual Fraction

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตารางที่ 2-3 วิธีวิเคราะห์การกระจายสัดส่วนของสารหนูในดินแบบต่าง ๆ (ต่อ)

(3) วิธี Lombi (Lombi et al., 2000)

ขั้นตอนการสกัด	**การกระจายสัดส่วนของสารหนู**
วิธีการสกัด มี 8 ขั้นตอน (1) สกัดด้วยสารละลาย NH_4NO_3 ความเข้มข้น 1 โมลาร์	F1: Exchangeable Fraction
(2) สกัดด้วยสารละลาย $(NH_4)_2SO_4$ ความเข้มข้น 0.001 โมลาร์ ปริมาตร 25 มิลลิลิตร	F2: Specifically adsorbed (I)
(3) สกัดด้วยสารละลาย $NH_4H_2PO_4$ ความเข้มข้น 0.05 โมลาร์ ปริมาตร 25 มิลลิลิตร	F3: Specifically adsorbed (II)
(4) สกัดด้วยสารละลาย NH_4F ความเข้มข้น 0.5 โมลาร์ ปริมาตร 25 มิลลิลิตร	F4: Associated to Al
(5) สกัดด้วยสารละลาย $NH_2OH–HCl$ ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ และสารละลาย NH_4OAc ความเข้มข้น 1 โมลาร์	F5: Associated to Mn
(6) สกัดด้วยสารละลาย NH_4–oxalate ความเข้มข้น 0.2 โมลาร์ ปริมาตร 25 มิลลิลิตร	F6: Bound to amorphous Fe oxides
(7) สกัดด้วยสารละลาย NH_4–oxalate ความเข้มข้น 0.2 โมลาร์ ปริมาตร 25 มิลลิลิตร และ Ascorbic acid ที่ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์	F7: Bound to crystalline Fe oxides
(8) ย่อยดินด้วย HNO_3 และ H_2O_2	F8: Residual Fraction

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตารางที่ 2-3 วิธีวิเคราะห์การกระจายสัดส่วนของสารหนูในดินแบบต่าง ๆ (ต่อ)

(4) วิธี Shiowatana (Shiowatana et al., 2001)

ขั้นตอนการสกัด	**การกระจายสัดส่วนของสารหนู**
วิธีการสกัด มี 5 ขั้นตอน (1) สกัดด้วย Deionized water ปริมาตร 30 มิลลิลิตร	F1: Water Soluble–Extractable Fraction
(2) สกัดด้วยสารละลาย $NaHCO_3$ ที่ความเข้มข้น 0.5 โมลาร์ ปริมาตร 30 มิลลิลิตร	F2: Surface adsorbed As Fraction
(3) สกัดด้วยสารละลาย NaOH ที่ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ ปริมาตร 30 มิลลิลิตร	F3: Fe and Al associated As Fraction
(4) สกัดด้วยสารละลาย HCl ที่ความเข้มข้น 1 โมลาร์ ปริมาตร 30 มิลลิลิตร	F4: Carbonate–bound As Fraction
(5) ย่อยดินด้วย HNO_3 และ HF	F5: Residual Fraction

(5) วิธี Wenzel (Wenzel et al., 2001)

ขั้นตอนการสกัด	**การกระจายสัดส่วนของสารหนู**
วิธีการสกัด มี 5 ขั้นตอน (1) สกัดด้วยสารละลาย $(NH_4)_2SO_4$ ที่ความเข้มข้น 0.05 โมลาร์	F1: Non–specific absorbed As Fraction
(2) สกัดด้วยสารละลาย $NH_4H_2PO_4$ ที่ความเข้มข้น 0.05 โมลาร์	F2: Specific absorbed As Fraction
(3) สกัดด้วยสารละลาย NH_4–oxalate buffer ที่ความเข้มข้น 0.2 โมลาร์ (ค่าพีเอชเท่ากับ 3.25)	F3: Amorphous and poorly–crystalline hydrous oxide of Fe and Al Fraction

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตารางที่ 2-3 วิธีวิเคราะห์การกระจายสัดส่วนของสารหนูในดินแบบต่าง ๆ (ต่อ)

(5) วิธี Wenzel (Wenzel et al., 2001) (ต่อ)

ขั้นตอนการสกัด	การกระจายสัดส่วนของสารหนู
(4) สกัดด้วยสารละลาย NH_4–oxalate ความเข้มข้น 0.2 โมลาร์ และ Ascorbic acid ที่ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ (ค่าพีเอชเท่ากับ 3.25)	F4: Well–crystalline hydrous oxide of Fe and Al Fraction
(5) ย่อยด้วย HNO_3 และ H_2O_2	F5: Residual Fraction

(6) วิธี BCR (Baig et al., 2009)

ขั้นตอนการสกัด	การกระจายสัดส่วนของสารหนู
วิธีการสกัด มี 4 ขั้นตอน (1) สกัดด้วยสารละลาย CH_3COOH ความเข้มข้น 0.11 โมลาร์ ปริมาตร 20 มิลลิลิตร	F1: Acid soluble Fraction
(2) สกัดด้วยสารละลาย NH_2OH–HCl ที่ความเข้มข้น 0.5 โมลาร์ ปริมาตร 20 มิลลิลิตร	F2: Reducible Fraction
(3) สกัดด้วย H_2O_2 ที่ความเข้มข้นร้อยละ 30 ปริมาตร 5 มิลลิลิตร ตามด้วยสารละลาย CH_3COONH_4 ความเข้มข้น 1 โมลาร์ (ปรับพีเอชเป็น 2 ด้วย HNO_3) ปริมาตร 20 มิลลิลิตร	F3: Oxidizable Fraction
(4) ย่อยด้วย Aqua regia (HCl:HNO_3 = 3:1)	F4: Residual Fraction

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ 2-3 วิธีวิเคราะห์การกระจายสัดส่วนของสารหนูในดินแบบต่าง ๆ (ต่อ)

(7) วิธี Larios (Larios et al., 2012)

ขั้นตอนการสกัด	การกระจายสัดส่วนของสารหนู
วิธีการสกัด มี 7 ขั้นตอน (1) สกัดด้วย H_2O ปริมาตร 30 มิลลิลิตร	F1: Readily soluble As
(2) สกัดด้วยสารละลาย Na_2HPO_4 ความเข้มข้น 0.5 โมลาร์ (ค่าพีเอชเท่ากับ 8) ปริมาตร 40 มิลลิลิตร	F2: Strongly adsorbed As onto mineral surfaces
(3) สกัดด้วยสารละลาย NH_4F ความเข้มข้น 0.5 โมลาร์ (ค่าพีเอชเท่ากับ 8.2) ปริมาตร 30 มิลลิลิตร	F3: As associated with Al oxyhydroxides
(4) สกัดด้วยสารละลาย $Na_4P_2O_7$ ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ ปริมาตร 10 มิลลิลิตร	F4: As bound to organic matter
(5) สกัดด้วยสารละลาย Ammonium oxalate/oxalic acid ความเข้มข้น 0.2 โมลาร์ (ค่าพีเอชเท่ากับ 3) ปริมาตร 20 มิลลิลิตร	F5: As incorporated into amorphous Fe oxyhydroxides
(6) สกัดด้วย Sodium citrate ความเข้มข้น 0.2 โมลาร์ ตามด้วย Sodium Bicarbonate ที่ความเข้มข้น 0.6 โมลาร์ ตามด้วย Ascorbic acid ความเข้มข้น 0.4 โมลาร์ ปริมาตร 40 มิลลิลิตร (ค่าพีเอชเท่ากับ 8)	F6: As associated with poorly crystalline Fe (hydr)oxides
(7) ย่อยด้วยกรด (ประกอบด้วย HCl ปริมาตร 2.5 มิลลิลิตร และ HNO_3 ปริมาตร 7.5 มิลลิลิตร และ HF ปริมาตร 6 มิลลิลิตร)	FR: As coprecipitated with refractory minerals

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

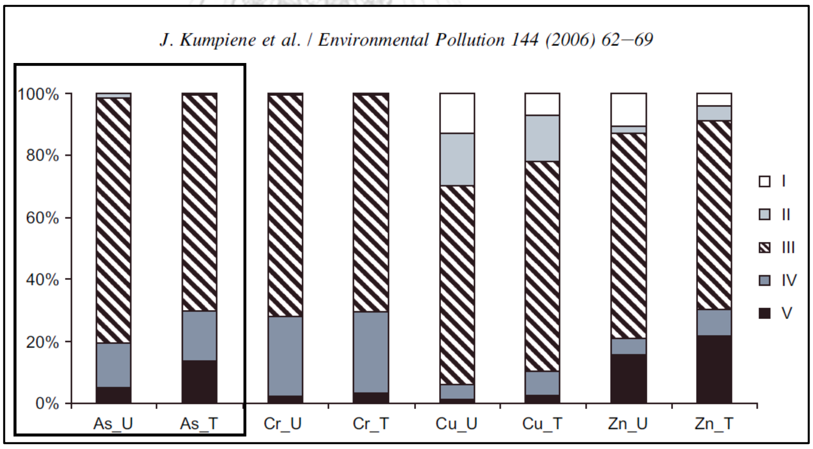
2.5.2 การศึกษาเกี่ยวกับการกระจายสัดส่วนของสารหนูในพื้นที่ปนเปื้อน

โดยปกติแล้วการศึกษาชีวปริมาณออกฤทธิ์ของธาตุมลสารในหลายการศึกษามักพบว่า มีความสัมพันธ์กับการกระจายสัดส่วนของธาตุมลสาร ในส่วนที่เคลื่อนที่ได้ง่าย (Mobile Fraction) เช่น สัดส่วนที่ชะละลายออกมาได้ง่าย (F1) รวมถึงส่วนที่ชะละลายได้ในกรด (F2) โดยสภาพแวดล้อมในพื้นที่

คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของดิน ลักษณะการใช้ประโยชน์ที่ดิน รวมถึงวิธีที่ใช้ในการสกัดก็ส่งผลต่อการกระจายสัดส่วนและชีวปริมาณออกฤทธิ์ของสารหนูเช่นเดียวกัน ซึ่งมีงานวิจัยที่เกี่ยวข้องดังต่อไปนี้

การศึกษาของ Kumpiene et al. (2006)

ศึกษาผลของการเติม Iron grit (Fe^0) ร้อยละ 1 ต่อการกระจายสัดส่วน การชะละลาย ชีวปริมาณออกฤทธิ์ของสารหนูในดิน และทดลองปลูกพืช (ประกอบด้วยหญ้าร้อยละ 90 และพวกสมุนไพรอื่น ๆ อีกร้อยละ 10) โดยใช้ดินที่เติมและไม่เติม Fe^0 เพื่อประเมินประสิทธิภาพของ Fe^0 ในการลดการเคลื่อนที่และลดชีวปริมาณออกฤทธิ์ของสารหนูรวมถึงมลสารอื่น ๆ ในดิน อีกทั้งยังศึกษาความสัมพันธ์กับสารหนูในพืช โดยเก็บตัวอย่างดินบริเวณโรงงานอุตสาหกรรมเคลือบไม้ ซึ่งเป็นพื้นที่ปนเปื้อน Chromated Copper Arsenate (CCA) ประกอบด้วย As_2O_5 ร้อยละ 34 CuO ร้อยละ 17 และ CrO_3 ร้อยละ 27 ในประเทศสวีเดน โดยผลการศึกษาการกระจายสัดส่วนของสารหนูในดินแสดงในรูปที่ 2-9



รูปที่ 2-9 ผลการศึกษาการกระจายสัดส่วนของสารหนูในดินโดยวิธี Tessier โดย U คือ ดินก่อนเติม Fe^0 และ T คือ ดินหลังเติม Fe^0 ซึ่งผลการกระจายสัดส่วนที่ได้แบ่งออกเป็น 5 ส่วน ประกอบด้วย ส่วนที่ I: Exchangeable Fraction ส่วนที่ II: Bound to carbonates (acid–soluble) Fraction ส่วนที่ III: bound to Fe–Mn oxides (reducible) Fraction ส่วนที่ IV: Bound to organic matter (oxidisable) Fraction และส่วนที่ V: Residual Fraction

ที่มา: (Kumpiene et al., 2006)

- ก่อนเติม Fe^0 พบว่าสารหนูส่วนใหญ่อยู่ในส่วน F3 (คิดเป็นร้อยละ 80) รองลงมาคือส่วน F4 (คิดเป็นร้อยละ 18) และ F5 (คิดเป็นร้อยละ 5) ตามลำดับ ซึ่งเป็นจุดเด่นของดินที่ปนเปื้อนสารเคมีที่มักพบสารหนูในส่วน F5 น้อย แต่ส่วนใหญ่จะพบสารหนูอยู่ในส่วน F3 และ F4
- หลังจากเติม Fe^0 พบว่าสารหนูในส่วน F1 ลดลงจาก 6.7 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม เป็นค่าที่ต่ำกว่า Detection limit (ต่ำกว่า 0.02 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม) ส่วน F3 ลดลงเล็กน้อย และพบ F5 เพิ่มขึ้นประมาณร้อยละ 10
- กลไกหลักของการทำให้สารหนูในดินเสถียรคือการดูดซับกับ Fe รวมถึงพวก Oxidized form ของสารหนู เช่น $H_2AsO_4^-$ อาจตกตะกอนร่วมกับ Fe^{3+} ทำให้สารหนูในส่วนที่ชะละลายออกมาได้ง่ายมีค่าลดลง (Doyle et al., 1994; Ritcey, 2005) สามารถสรุปได้ว่า Fe^0 มีบทบาททำให้ชีวปริมาณออกฤทธิ์ของสารหนูลดลงได้ โดยจะตรึงสารหนูไว้ในดินไม่ให้ปลดปล่อยออกมาสู่สิ่งแวดล้อม
- ผลการชะละลายด้วยน้ำ (Water Leaching tests) (Nordtest, 1998) พบว่าก่อนเติม Fe^0 ค่าการชะละลายสารหนูมีค่า 61.6 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม และหลังเติม Fe^0 ค่าการชะละลายสารหนูมีค่า 0.9 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม (ค่าลดลงถึงร้อยละ 99)
- เมื่อทดลองปลูกพืช พบว่าส่วนของปลายยอด (plant shoot) ของพืชที่ปลูกในดินที่ไม่เติม Fe^0 และเติม Fe^0 มีค่าความเข้มข้นสารหนูเท่ากับ 78.6 และ 12.9 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ การเติม Fe^0 ส่งผลให้ค่าความเข้มข้นสารหนูในพืชลดลงซึ่งเป็นผลมาจากสารหนูในส่วนที่ชะละลายได้ง่าย (F1) มีค่าลดลง ทั้งนี้เชื่อว่าสารหนูที่รากพืชดูดซึมเข้ามาได้คือชีวปริมาณออกฤทธิ์ของสารหนู และในดินที่เติม Fe^0 มีมวลชีวภาพของพืช (plant biomass) เพิ่มขึ้นเกือบ 2 เท่าเมื่อเทียบกับดินที่ไม่เติม Fe^0 แสดงว่าการเติม Fe^0 สามารถลดความเป็นพิษของสารหนูในพืชได้

การศึกษาของ Devesa-Rey et al. (2008)

ศึกษาการกระจายสัดส่วนของสารหนูในดินโดยใช้การสกัดตามลำดับส่วนโดยใช้วิธีของ Lombi (Lombi et al., 2000) เปรียบเทียบกับการสกัดแบบขั้นตอนเดียวโดยใช้ (1) วิธี TCLP (EPA Method 1311) ในการประเมินศักยภาพการชะละลายสารหนูใน Microorganism (2) สกัดด้วย HCl ความเข้มข้น 1 โมลาร์ ในการประเมินชีวปริมาณออกฤทธิ์ของสารหนูในพืช (3) วิธี PBET ดัดแปลง Ruby et al. (1996) ในการประเมินชีวปริมาณออกฤทธิ์ของสารหนูในสิ่งมีชีวิตชั้นสูง รวมถึงศึกษา

ลักษณะทางกายภาพและทางเคมีของดิน โดยเก็บตัวอย่างดินตะกอน จำนวน 9 จุด ในพื้นที่โดยรอบแม่น้ำ Anllons ในประเทศสเปน ซึ่งเป็นพื้นที่ที่มีค่าความเข้มข้นสารหนูสูงเนื่องมาจากผลของสภาพแวดล้อมทางธรรมชาติ

จากการศึกษาพบว่าสารหนูที่สะสมอยู่ในดินตะกอนมีการกระจายสัดส่วนของสารหนูอยู่ใน F6: (Residual Fraction) (คิดเป็นร้อยละ 46.0–74.7) > F4: (Bound to amorphous Fe oxides) (คิดเป็นร้อยละ 7.8–28.1) > F5: (Bound to crystalline Fe oxides) (คิดเป็นร้อยละ 8.4–22.3) > F1: (Exchangeable) (คิดเป็นร้อยละ 0.7–7.8) > F2: (Specifically adsorbed) (คิดเป็นร้อยละ 1.0–4.2) > F3: (Associated to Al and organic matter) (คิดเป็นร้อยละ 0.5–2.4) ตามลำดับ

- สารหนูในพื้นที่อยู่ใน F6 มากที่สุด ซึ่งเป็นสัดส่วนที่คงตัวหรือเคลื่อนที่ได้น้อย จึงถือว่ามีโอกาสในการปลดปล่อยสู่สิ่งแวดล้อมได้น้อย รองลงมาคือ F4 และ F5 สามารถบ่งชี้ได้ว่าสารหนูมักเกาะที่ผิวของเหล็กออกไซด์ ซึ่งมีบทบาทสำคัญในการตรึงสารหนูในดิน และหากสภาพแวดล้อมมีการเปลี่ยนแปลงไป เช่น ดินในสภาวะไร้ออกซิเจนจะส่งผลให้ค่าอีเอชและพีเอชของดินเกิดการเปลี่ยนแปลง จะส่งผลให้เหล็กออกไซด์และแมงกานีสออกไซด์บางส่วนเปลี่ยนฟอร์มหรือละลายไป ซึ่งจะทำให้สารหนูถูกปลดปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อม ถัดมาคือ F1 และ F2 เป็นส่วนที่พร้อมปลดปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อมมากที่สุดและถือเป็นชีวปริมาณออกฤทธิ์ของสารหนู นอกจากนี้สารหนูในส่วน F3 ที่พบน้อยที่สุดนั้น Sarkar et al. (2007) ได้อธิบายว่าสารอินทรีย์ในดินไม่ใช่องค์ประกอบหลักที่สารหนูจะมาแย่งเกาะ แต่สารหนูมักเกาะกับเหล็กออกไซด์ในพันธะที่แข็งแรงกว่า
- ผลการสกัดแบบขั้นตอนเดียว โดยศึกษาความเป็นพิษทางชีววิทยาในสิ่งมีชีวิต ประกอบด้วย (1) การจำลองระบบการย่อยอาหาร ใช้การสกัดด้วยวิธี PBET และสกัดด้วย HCl ความเข้มข้น 1 โมลาร์ ซึ่งเป็นวิธีสกัดเพื่อประเมินชีวปริมาณออกฤทธิ์ของสารหนูเมื่อเข้าสู่สิ่งมีชีวิต พบว่าการสกัดด้วยวิธี PBET มีชีวปริมาณออกฤทธิ์ของสารหนูเท่ากับร้อยละ 5.2 และการสกัดด้วย HCl ชีวปริมาณออกฤทธิ์ของสารหนูน้อยกว่าร้อยละ 2 ของความเข้มข้นของสารหนูทั้งหมด (2) การยับยั้งการเจริญเติบโตของแบคทีเรีย (*Vibrio fischeri*) ใช้วิธี TCLP ในการสกัด ซึ่งการวิเคราะห์ผลจะนับหลังจากสารหนูเข้าไปยับยั้งการเรืองแสงของ *Vibrio fischeri* ผลการสกัดคิดเป็นค่าน้อยกว่าร้อยละ 1 ของความเข้มข้นของสารหนูทั้งหมด ซึ่งการสกัดแบบขั้นตอนเดียว พบว่าวิธี

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

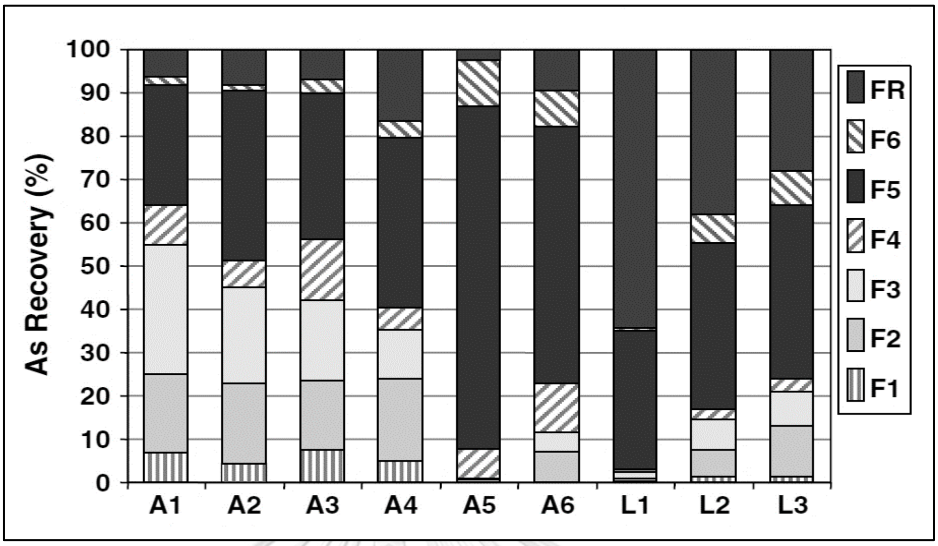
PBET เป็นวิธีที่ใช้ประเมินชีวปริมาณออกฤทธิ์ของสารหนูในสิ่งมีชีวิตได้ดีที่สุดซึ่งพิจารณาจากร้อยละการสกัดสารหนูที่มีค่าสูงกว่าวิธีการอื่น ๆ

การศึกษาของ Larios et al. (2012)

ศึกษาการสกัดตามลำดับส่วนด้วยวิธี Larios และคาดคะเนว่าชีวปริมาณออกฤทธิ์จากการพิจารณาการกระจายสัดส่วนของสารหนูในพื้นที่ คือ F1: (Readily soluble As) + F2: (Strongly adsorbed As onto mineral surfaces) โดยการเก็บตัวอย่างดินบริเวณเหมืองแร่ปนเปื้อนปรอท (Mercury mines) 3 พื้นที่ ได้แก่ La Soterrana La Pena–El Terronal และ Los Rueldos และเหมืองแร่ปนเปื้อนสารหนู (Arsenic mine) 1 พื้นที่ คือ Santa Agueda จากการศึกษาพบว่า

- พื้นที่ La Soterrana: ศึกษา 3 ตัวอย่าง ได้แก่ A1 A2 และ A3 จากรูปที่ 2–10 พบการกระจายสัดส่วนของสารหนูอยู่ใน F1 และ F2 มากที่สุด เนื่องจากพื้นที่ดังกล่าวเป็นบริเวณที่ใกล้เคียงกับกองกักเก็บกากแร่และของเสีย เมื่อมีน้ำฝนไหลผ่านจะส่งผลให้สารหนูมีการเคลื่อนที่และสะสมในตะกอนดิน นอกจากนี้ยังพบว่าดินมีพีเอชเป็นด่างและมีค่าอีเอชที่ต่ำ โดยผลรวมของ F1+F2 มีค่าอยู่ในช่วงร้อยละ 23–25 ซึ่ง F1+F2 ใช้คาดคะเนชีวปริมาณออกฤทธิ์ของสารหนู
- พื้นที่ La Pena–El Terronal: ศึกษา 1 ตัวอย่าง คือ A4 พบว่ามีค่าชีวปริมาณออกฤทธิ์ของสารหนูมากกว่าร้อยละ 24 ของปริมาณสารหนูทั้งหมด (F1 ประมาณร้อยละ 5 และ F2 ประมาณร้อยละ 19) เนื่องจากพื้นที่ดังกล่าวมีลักษณะที่ใกล้กับพื้นที่ La Soterrana อีกทั้งยังพบความสัมพันธ์ระหว่าง As–Mn Oxyhydroxides (R=0.8806)
- พื้นที่ Los Rueldos: ศึกษา 2 ตัวอย่าง ได้แก่ A5 และ A6 โดยพบการกระจายสัดส่วนของสารหนูในส่วน F5 และ F6 มากที่สุด (ประมาณร้อยละ 70–90) ของปริมาณสารหนูทั้งหมด โดยพบว่าบริเวณนี้เป็นกองกักเก็บกากแร่ที่พบแร่ไพไรต์ในปริมาณที่สูง และพบการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของซัลไฟด์ ดินมีพีเอชเป็นกรดสูง ค่าอีเอชสูง รวมถึงมี Fe-oxides อยู่มาก นอกจากนี้ยังพบร้อยละของส่วน F1 และ F2 ในค่าที่ต่ำ แสดงว่าในพื้นที่นี้มีชีวปริมาณออกฤทธิ์ของสารหนูในดินต่ำ
- พื้นที่ Santa Agueda: ศึกษา 3 ตัวอย่าง ได้แก่ L1 L2 และ L3 พบการกระจายสัดส่วนของสารหนูอยู่ใน F5 และ FR มากที่สุด (คิดเป็นร้อยละ 60–95) การที่มีสารหนูใน FR สูงบ่งชี้ว่าเป็นการ

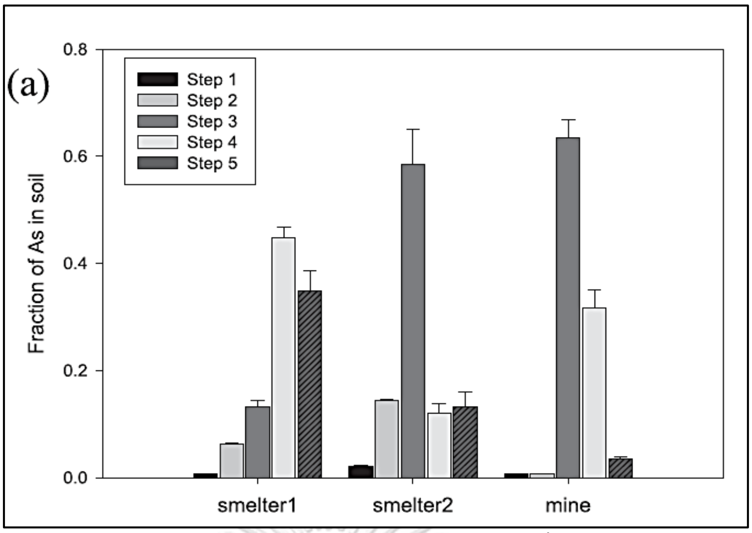
ปนเปื้อนสารหนูโดยธรรมชาติ (แร่) ซึ่งเป็นรูปที่คงตัวในดินได้นาน จึงถือว่ามีความเสี่ยงต่ำที่สารหนูจะแพร่กระจายออกสู่สิ่งแวดล้อม



รูปที่ 2-10 ผลการศึกษาการกระจายสัดส่วนของสารหนูในดินโดยวิธี Larios ใน 4 พื้นที่ศึกษา ได้แก่ พื้นที่ La Soterrana (A1 A2 และ A3) พื้นที่ La Pena–El Terronal (A4) พื้นที่ Los Rueldos (A5 และ A6) และพื้นที่ Santa Agueda (L1 L2 และ L3) ซึ่งผลการกระจายสัดส่วนที่ได้แบ่งออกเป็น 7 ส่วน ประกอบด้วย F1: (Readily soluble As) F2: (Strongly adsorbed As onto mineral surfaces) F3: (As associated with Al oxyhydroxides) F4: (As bound to organic matter) F5: (As incorporated into amorphous Fe oxyhydroxides) F6: (As associated with poorly crystalline Fe (hydr)oxides) และ FR: (As coprecipitated with refractory minerals) ที่มา: (Larios et al., 2012)

การศึกษาของ Kim et al. (2014)

ศึกษาดินปนเปื้อนโดยรอบโรงถลุงแร่ และเหมืองร้าง ในประเทศเกาหลี โดยมีจุดเก็บตัวอย่าง 3 บริเวณ ได้แก่ (1) บริเวณ Smelter–1 (2) บริเวณ Smelter–2 (3) บริเวณ Mine และใช้การสกัดตามลำดับส่วนวิธีของ Wenzel (Wenzel et al., 2001) นอกจากนี้ยังมีการใช้เทคนิค X–ray diffraction (XAS) ในการประเมินเลขออกซิเดชันรวมถึงการฟอร์มพันธะทางเคมีของสารหนูในดิน และใช้เทคนิค X–ray photoelectron spectroscopy (XRF) ในการศึกษาการแพร่กระจายของสารหนูในดินโดยบ่งชี้จากแผนที่ รวมถึงประเมิน Bioaccessibility ของสารหนูศึกษาโดยใช้การสกัดโดยใช้น้ำย่อยที่จำลองขึ้น ซึ่งผลการศึกษาการกระจายสัดส่วนของสารหนูพบว่า



รูปที่ 2-11 ผลการศึกษาการกระจายสัดส่วนของสารหนูในดินทั้ง 3 บริเวณ โดยใช้วิธี Wenzel การกระจายสัดส่วนประกอบด้วย 5 ส่วน คือ Step 1 = F1: Non–specific absorbed As Fraction, Step2 = F2: Specific absorbed As Fraction, Step3 = F3: Amorphous and poorly–crystalline hydrous oxide of Fe and Al Fraction, Step 4 = F4: Well–crystalline hydrous oxide of Fe and Al Fraction, Step 5 = F5: Residual Fraction

ที่มา: (Kim et al., 2014)

- ลักษณะทางกายภาพและทางเคมีของดินในพื้นที่ พบว่า Smelter–1 และ Smelter–2 มีค่าความเข้มข้นของสารหนูในพื้นที่เท่ากับ 700 และ 118 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมตามลำดับ ส่วนค่าพีเอชของดินมีค่า 5.22 และ 6.21 ตามลำดับ ในขณะที่ Mine มีค่าพีเอชเท่ากับ 2.35 แสดงถึงดินมีความเป็นกรดสูง โดยมีสาเหตุมาจากการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของแร่ไพไรต์ในธรรมชาติ ซึ่งเป็นแร่ที่เกิดร่วมกับแร่ซัลไฟด์ในดิน
- จากรูปที่ 2–11 พบว่าตัวอย่างดินในพื้นที่ Smelter–1 พบสารหนูจับอยู่กับ F4 (ประมาณร้อยละ 45) มากกว่า F3 (ประมาณร้อยละ 13) เนื่องจากมี Crystalline oxides ในดินปริมาณมาก ซึ่งตรงข้ามกับตัวอย่างดินจาก Smelter–2 และ Mine ที่พบสารหนูจับอยู่กับ F3 มากที่สุด นอกจากนี้ พื้นที่ Smelter–1 ยังพบ F1 และ F2 (ประมาณร้อยละ 7) และพบ F5 (ประมาณร้อยละ 35) จะเห็นได้ว่าสารหนูที่พบในพื้นที่ Smelter–1 นั้นมี F4 และ F5 มากที่สุด แสดงว่าสารหนูจับกับองค์ประกอบต่าง ๆ ของดินด้วยพันธะที่แข็งแรง อีกทั้งยังมีการเคลื่อนที่ได้น้อยในธรรมชาติ ซึ่งตรงกันข้ามกับตัวอย่างดินในพื้นที่ Smelter–2 ที่พบ F4 และ F5 น้อย (ประมาณ

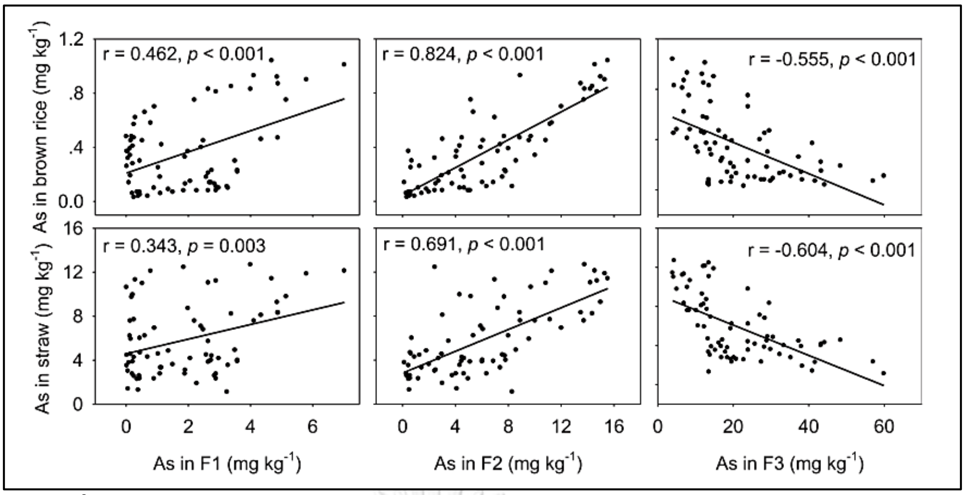
ร้อยละ 12 และ 13 ตามลำดับ) ส่วนดินจาก Mine นั้นพบว่าอยู่ใน F3 มากที่สุด (ประมาณร้อยละ 63) เมื่อเทียบกับปริมาณสารหนูทั้งหมดในดิน รองลงมาพบว่าสารหนูอยู่ในส่วน F4 (ประมาณร้อยละ 32) บ่งชี้ได้ว่าสารหนูในพื้นที่ Smelter–2 และ Mine มีโอกาสในการแพร่กระจายออกสู่สิ่งแวดล้อมได้ง่าย เมื่อเทียบกับพื้นที่ Smelter–1

- หากในดินมี Amorphous Fe และ Crystalline Fe ในปริมาณเท่า ๆ กัน พบว่าสารหนูมักเกาะอยู่กับ Amorphous Fe มากกว่า Crystalline Fe
- เมื่อสารหนูเคลื่อนที่เข้าสู่สิ่งมีชีวิต ปริมาณสารหนูที่สามารถนำไปใช้ทางชีวภาพ หรือ Bioaccessibility ของสารหนู พบว่าพื้นที่ Smelter–1 พบสารหนูที่เกาะกับ Crystalize Scorodite Crystalline Fe–oxides และ Arsenic sulfide (orpiment) เป็นหลัก ส่วนพื้นที่ Smelter–2 พบสารหนูที่เกาะอยู่กับ Amorphous Fe เป็นหลัก ซึ่งความแตกต่างนี้จะส่งผลต่อ Bioaccessibility ของสารหนูโดยสารหนูที่เกาะกับ Amorphous Fe จะมีชีวปริมาณออกฤทธิ์ของสารหนูสูงกว่า Crystalline Fe เนื่องจาก Amorphous form มีความเสถียรต่ำ (Meunier et al., 2010; Niazi et al., 2011) สารหนูในส่วน F3 พบว่าประกอบไปด้วยแร่ Amorphous Fe แร่ Scorodite (Fe–As) บางส่วน และแร่ Jarosite
- สารหนูในส่วน F4 พบว่าประกอบด้วยแร่ Scorodite (Fe–As) และแร่ Muscovite (K–Al–Si–O)
- สารหนูในส่วน F5 พบว่าประกอบด้วยแร่ออพิเมนท์และแร่ไพไรต์
- สามารถสรุปได้ว่าสารหนูที่ไม่ได้อยู่ในรูปที่คงตัว (F5) มักพบเกาะอยู่กับ Amorphous Fe (F3)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

การศึกษาของ Liu et al. (2015)

ใช้วิธีการสกัดตามลำดับส่วนโดยใช้วิธีของ Wenzel (Wenzel et al., 2001) ตลอดจนศึกษาความสัมพันธ์กับสารหนูในต้นข้าว (*Oryza sativa* L.) บริเวณพื้นที่เหมือง ในประเทศจีน จากการศึกษาพบว่าผลการกระจายสัดส่วนประกอบด้วย 5 ส่วน ประกอบด้วย F1: Non–specific absorbed As Fraction, F2: Specific absorbed As Fraction, F3: Amorphous and poorly–crystalline hydrous oxide of Fe and Al Fraction, F4: Well–crystalline hydrous oxide of Fe and Al Fraction และ F5: Residual Fraction



รูปที่ 2-12 ความสัมพันธ์ระหว่างสารหนูในข้าวและสารหนูในส่วน F1 F2 และ F3

ที่มา: (Liu et al., 2015)

- จากรูปที่ 2–12 พบว่าสารหนูในส่วน F1 และ F2 มีความสัมพันธ์เชิงบวกกับสารหนูในข้าว แต่สารหนูในส่วน F3 มีความสัมพันธ์เชิงลบกับสารหนูในข้าว ซึ่งเชื่อว่าเป็นสารหนูที่มีเลขออกซิเดชัน +5
- สารหนูในบริเวณดังกล่าวพบในส่วน F1 และ F2 น้อย (ประมาณร้อยละ 3 และ 10.3) เทียบกับปริมาณสารหนูทั้งหมด ซึ่งสารหนูในส่วนนี้มีความสำคัญต่อกระบวนการทางชีวเคมีของดิน เนื่องจาก 2 ส่วนนี้มีความสัมพันธ์เชิงบวกกับสารหนูในข้าวจึงพิจารณาว่าเป็นชีวปริมาณออกฤทธิ์ของสารหนูในพืช
- นอกจากนี้สารหนูใน F3 F4 และ F5 (ประมาณร้อยละ 27.7 25.1 และ 30.9 เมื่อเทียบกับปริมาณสารหนูทั้งหมดตามลำดับ) จากการศึกษาพบว่าสารหนูทั้ง 3 ส่วนนี้ไม่ใช่ชีวปริมาณออกฤทธิ์ของสารหนูในข้าว ซึ่งผลที่ได้นั้นสอดคล้องกับงานวิจัยก่อนหน้า (Du et al., 2008; Liu et al., 2012; Tang et al., 2007) สารหนูในต้นข้าวยังมีการสะสมที่ราก ลำต้น เมล็ด ตามลำดับ
- เหล็กออกไซด์มีบทบาทสำคัญในการลดชีวปริมาณออกฤทธิ์ของสารหนูในข้าว เนื่องจากสารหนูจับกับเหล็กออกไซด์ด้วยพันธะที่แข็งแรง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

การศึกษาของ Wang et al. (2015)

ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างการกระจายสัดส่วนและชีวปริมาณออกฤทธิ์ของสารหนู ในดินบริเวณพื้นที่เกษตรกรรมที่เป็นพื้นที่ดินแดง ซึ่งมีวัตถุต้นกำเนิดดินในธรรมชาติต่างกัน 5 ชนิดในทางตอนใต้ของประเทศจีน ประกอบด้วย (1) Quaternary red clay (2) Purple sandy shale (3) Limestone (4) Plate shale (5) Granite โดยใช้วิธีของ Wenzel (Wenzel et al., 2001) รวมถึงศึกษาชีวปริมาณออกฤทธิ์ของสารหนูโดยใช้วิธีการสกัดด้วย $NaHCO_3$ ที่ความเข้มข้น 0.5 โมลาร์ ตามเวลาโดยมีการเติม (spiked) สารหนูเข้าไป และทำการทดลองบ่มดินที่ระยะเวลาต่าง ๆ จากการศึกษาพบว่า

- วัตถุต้นกำเนิดดินเป็นสาเหตุของการปนเปื้อนของสารหนูในดินแดง ซึ่งมาจากหินปูน (limestone) ซึ่งพบว่ามีสารหนู และแคดเมียมจำนวนมาก
- พบว่าการกระจายสัดส่วนของสารหนูที่พบจะต่างกันไปตามองค์ประกอบของดินในแต่ละพื้นที่ อีกทั้งยังพบว่าสารประกอบ Fe–Al oxides และค่าพีเอชของดินเป็นปัจจัยที่สำคัญที่สุดในการควบคุมชีวปริมาณการออกฤทธิ์และการเคลื่อนที่ของสารหนู
- ส่วนใหญ่พบสารหนูในส่วนที่คงตัวหรือส่วน F5 เนื่องจากพื้นที่ดังกล่าวเป็นพื้นที่ที่มีการปนเปื้อนสารหนูตามธรรมชาติ ซึ่งสารหนูในส่วนนี้เป็นส่วนที่มีความเสถียร คงตัวอยู่ในดินได้นาน และไม่สามารถถูกชะออกมาได้ในสภาพแวดล้อมปกติ
- เมื่อระยะเวลาเพิ่มขึ้น พบว่าชีวปริมาณออกฤทธิ์ของสารหนูลดลงอย่างมากในช่วง 30 วันแรก อีกทั้งยังพบว่าสารหนูในส่วน F1: (Non–specific absorbed As Fraction) และ F2: (Specific absorbed As Fraction) ลดลง จึงถือว่า F1 และ F2 เป็นฟอร์มหลักของชีวปริมาณออกฤทธิ์ของสารหนู
- การเปลี่ยนแปลงชีวปริมาณออกฤทธิ์ของสารหนูในระหว่างการบ่มขึ้นอยู่กับกระบวนการ Partition หรือการเคลื่อนที่ของสารหนูระหว่างเฟสในดิน (Liang et al., 2014; Tang et al., 2007) ซึ่งการแพร่กระจายของสารหนูในดินสามารถเปลี่ยนแปลงจาก More available forms เป็น Less available forms ได้โดยเวลา
- พบความสัมพันธ์ระหว่างชีวปริมาณออกฤทธิ์กับสารหนูในส่วน F1: (Non–specific absorbed As Fraction) + F2: (Specific absorbed As Fraction) ซึ่งมี R^2 สูงถึง 0.83

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

การศึกษาการกระจายสัดส่วนของมลสารสามารถบ่งบอกถึงศักยภาพของมลสารที่พืชสามารถดูดซึมไปใช้ได้ในพื้นที่จริง สารสกัดที่ใช้กันทั่วไปในการสกัดอยู่ในกลุ่มตัวรีดิวซ์ ตัวออกซิไดซ์ และกรดแก่ โดยเทคนิคนี้เป็นวิธีที่สะดวกและแม่นยำในการตรวจสอบการกระจายสัดส่วนของมลสารที่สะสมในดินและตะกอน สำหรับวิธีวิเคราะห์การกระจายสัดส่วนของสารหนูในดินที่ใช้กันในงานวิจัยมีหลายวิธี ซึ่งวิธีวิเคราะห์การกระจายสัดส่วนของสารหนูในดิน โดยการศึกษาการกระจายสัดส่วนของสารหนูในดินในการศึกษานี้ใช้เทคนิคการสกัดตามลำดับส่วน วิธี Modified Tessier (Rauret et al., 1989) ซึ่งเป็นวิธีที่นิยมใช้ในการศึกษามลสารต่าง ๆ เนื่องจากเป็นวิธีการสกัดที่มีความแม่นยำ พบปัญหาการปนเปื้อนระหว่างวิเคราะห์น้อย และสอดคล้องกับองค์ประกอบของดินรวมถึงเหมาะสมต่อสภาพแวดล้อม สามารถแบ่งการกระจายสัดส่วนของมลสารออกมาได้ 5 ส่วน แสดงในตารางที่ 2–4

ตารางที่ 2-4 การกระจายสัดส่วนโดยวิธี Modified Tessier (Rauret et al., 1989)

Fractionation		
F1	Exchangeable Fraction	ส่วนที่ชะละลายได้ง่าย
F2	Acid-soluble Fraction (Carbonate bound)	ส่วนที่ชะละลายได้ในกรด
F3	Reducible Fraction (Fe-Mn oxide bound)	ส่วนที่ชะละลายได้ภายใต้สภาพแวดล้อมที่เกิดปฏิกิริยารีดักชัน
F4	Oxidizable Fraction (Organically bound +Sulfide bound)	ส่วนที่ชะละลายได้ภายใต้สภาพแวดล้อมที่เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน
F5	Residual Fraction (Residual/Silicate)	ส่วนที่คงตัว

(1) ส่วนที่ชะละลายออกมาได้ง่าย (Exchangeable Fraction) จะอยู่ในรูปไอออนที่สามารถถูกชะออกมาได้ง่ายด้วยการแลกเปลี่ยนไอออน เมื่อความเค็มของน้ำเปลี่ยนไป

(2) ส่วนที่ชะละลายได้ในกรด (Acid-soluble Fraction) (มักอยู่ในรูปที่จับกับคาร์บอเนต) ซึ่งสามารถชะออกมาได้ในสภาพที่เป็นกรดอ่อน ๆ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

(3) ส่วนที่ชะละลายได้ภายใต้สภาพแวดล้อมที่เกิดปฏิกิริยารีดักชัน (Reducible Fraction) (มักอยู่ในรูปที่จับกับเหล็กและแมงกานีสออกไซด์) จะเป็นออกไซด์ที่พบมากในสภาพแวดล้อมบนผิวโลก เช่น ในดิน และตะกอนต่าง ๆ ซึ่งเป็นส่วนสำคัญที่มลสารจะไปจับโดยใช้กลไกต่าง ๆ เช่น การแลกเปลี่ยนประจุ การตกตะกอนร่วม หรือการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนบนพื้นผิว โดยออกไซด์ของเหล็กและแมงกานีสเหล่านี้จะเสียสภาพในสภาวะที่ไร้ออกซิเจน และทำให้มลสารที่เกาะอยู่หลุดออกมาได้

(4) ส่วนที่ชะละลายได้ภายใต้สภาพแวดล้อมที่เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidizable Fraction) (มักอยู่ในรูปที่จับกับสารอินทรีย์รวมถึงซัลไฟด์ในดิน) มลสารในส่วนนี้จะถูกดูดซับไว้ และสามารถหลุดออกมาได้เมื่อเกิดการย่อยสลายสารอินทรีย์และซัลไฟด์ในสภาพที่มีออกซิเจน

(5) ส่วนที่คงตัว (Residual Fraction) เป็นส่วนที่เหลือจากการสกัดต่าง ๆ ในข้างต้น มลสารในส่วนนี้มีความคงตัวสูง โดยปกติแล้วจะไม่สามารถถูกชะออกมาได้ในสภาพแวดล้อมปกติ เว้นแต่จะเจอการชะที่รุนแรง เช่น ในสภาวะฝนกรดที่ดินมีค่าพีเอชน้อยกว่า 4

สำหรับการเก็บตัวอย่างดินเพื่อใช้ศึกษาการกระจายสัดส่วนของสารหนู มีข้อควรคำนึงต่างจากการศึกษาโลหะหนักทั่วไป คือ ต้องคำนึงถึงการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นจากกระบวนการต่าง ๆ ทางชีวภาพ และทางเคมี ซึ่งจะเกิดขึ้นเมื่อสัมผัสกับอากาศเบื้องบน และส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงรูปแบบของสารหนูในตะกอนดิน (OECD, 2002)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

บทที่ 3
วิธีดำเนินการวิจัย

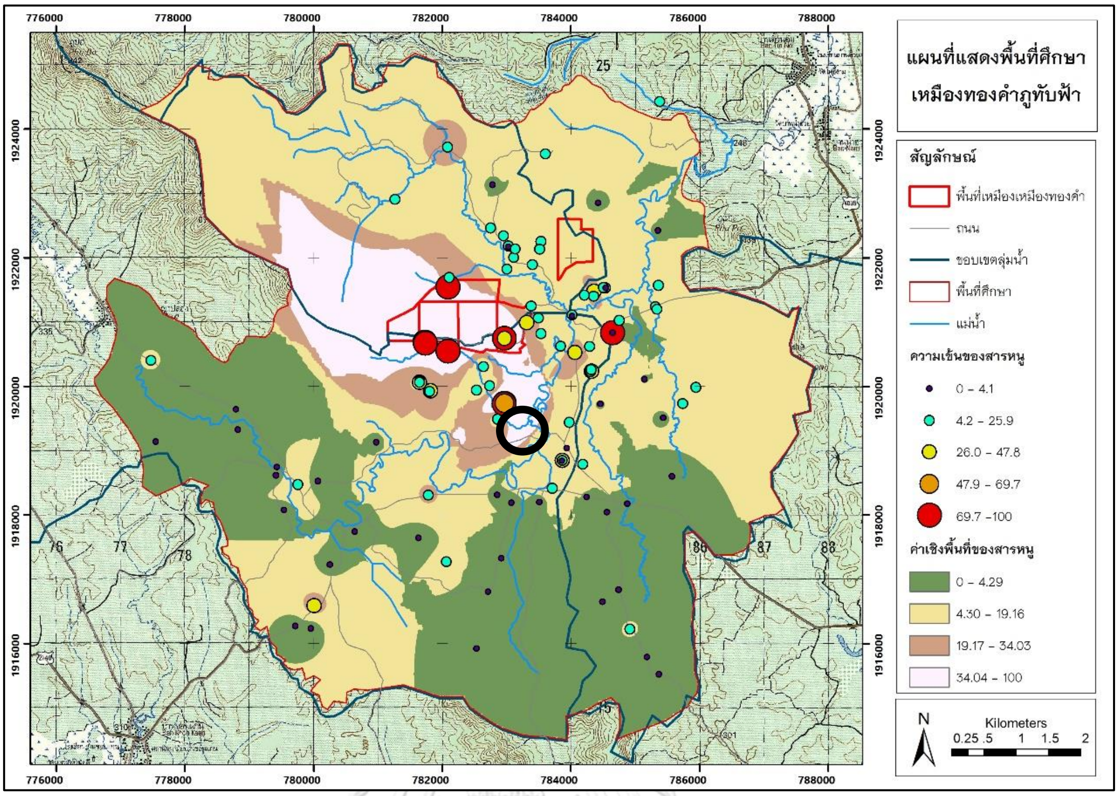
การศึกษาการกระจายสัดส่วนและชีวปริมาณออกฤทธิ์ของสารหนูในดินในพื้นที่เกษตรกรรม บริเวณคลองน้ำฮวย ตำบลเขาหลวง อำเภอวังสะพุง จังหวัดเลย ดำเนินงานโดยเก็บตัวอย่างดินจากจุดต่าง ๆ ที่มีลักษณะพื้นที่ต่างกัน ทั้งบริเวณที่ราบลุ่มที่มีการเพาะปลูกข้าว และบริเวณที่เนินเขาที่มีการปลูกยางพารา รวมถึงศึกษาการกระจายสัดส่วนและชีวปริมาณออกฤทธิ์ของสารหนูในดิน ในกรณีที่ดินมีการเปลี่ยนแปลงของสภาพแวดล้อมจากสภาวะปกติหรือสภาวะที่มีอากาศ (Aerobic) เป็นสภาวะไร้อากาศ (Anaerobic) จากนั้นนำมาวิเคราะห์ดัชนีต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับการกระจายสัดส่วนและชีวปริมาณออกฤทธิ์ของสารหนูในดิน ณ ห้องปฏิบัติการ โดยมีรายละเอียดการศึกษาดังนี้

3.1 การเก็บรวบรวมตัวอย่างดิน

3.1.1 พื้นที่ศึกษา

พื้นที่เกษตรกรรมที่ทำการศึกษา ตั้งอยู่บริเวณคลองน้ำฮวย ตำบลเขาหลวง อำเภอวังสะพุง จังหวัดเลย แบ่งออกเป็น พื้นที่ราบลุ่มที่มีการเพาะปลูกข้าว และพื้นที่เนินเขาที่มีการปลูกยางพารา ซึ่งมีขอบเขตพื้นที่ศึกษาแสดงในรูปที่ 3–1 โดยการคัดเลือกพื้นที่เก็บตัวอย่าง พิจารณาจากแหล่งข้อมูลพื้นฐาน ประกอบด้วย ข้อมูลภูมิประเทศ ข้อมูลความเข้มข้นของสารหนู รวมถึงข้อมูลการใช้ประโยชน์ที่ดินในพื้นที่ อีกทั้งยังมีการพิจารณาจากการสำรวจภาคสนามร่วมด้วย

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

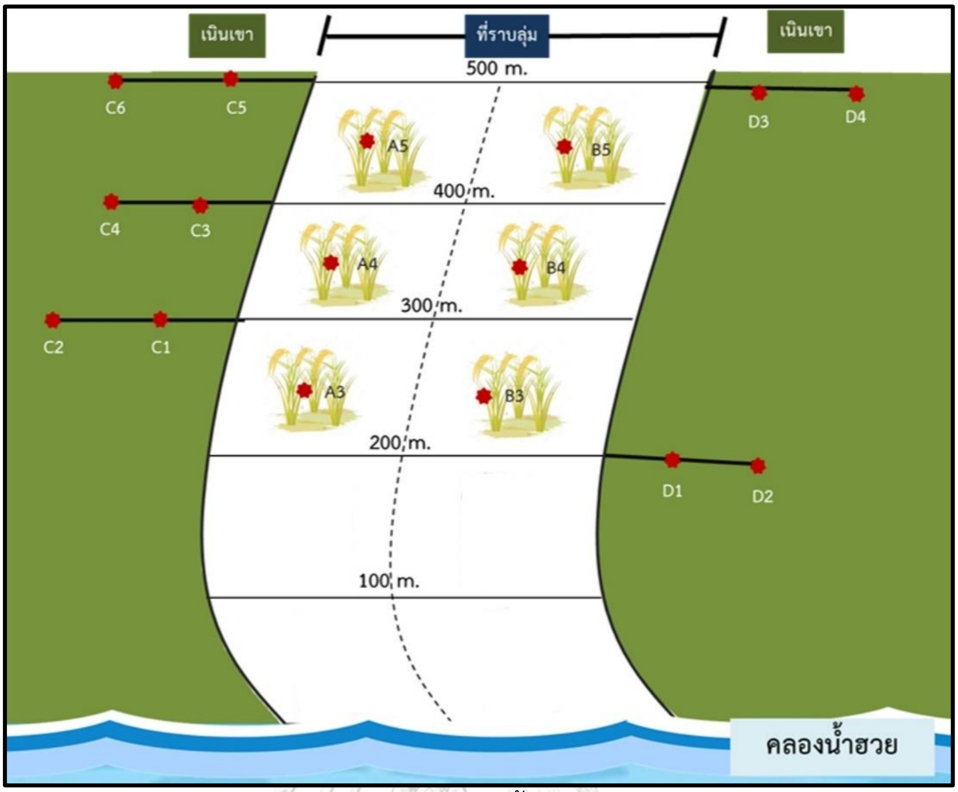


รูปที่ 3-1 แผนที่แสดงความเข้มข้นของสารหนูเชิงพื้นที่และขอบเขตพื้นที่เกษตรกรรมที่ทำการศึกษา (เส้นทึบสีดำ) ที่มา: (จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2555)

3.1.2 การเก็บตัวอย่าง

เมื่อเลือกพื้นที่ในการเก็บตัวอย่างได้แล้ว นำมาสู่การคัดเลือกจุดเก็บตัวอย่างในพื้นที่ ซึ่งแบ่งออกเป็น 2 บริเวณ ประกอบด้วยบริเวณพื้นที่ราบลุ่มที่มีการเพาะปลูกข้าว และบริเวณพื้นที่เนินเขาที่มีการปลูกยางพารา สำหรับการเก็บตัวอย่างดินจะเก็บใน 2 ฤดูกาล คือ ฤดูร้อน (เดือนมีนาคม) และฤดูฝน (เดือนกรกฎาคม) โดยมีภาพจำลองพื้นที่เก็บตัวอย่างแสดงในรูปที่ 3-2 และค่าพิกัดทางภูมิศาสตร์ของจุดเก็บตัวอย่างดินแสดงในตารางที่ 3–1

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University



รูปที่ 3-2 ภาพจำลองพื้นที่เก็บตัวอย่าง

ตารางที่ 3-1 ค่าพิกัดทางภูมิศาสตร์ของจุดเก็บตัวอย่างดิน บริเวณพื้นที่เกษตรกรรม บริเวณคลองน้ำฮวย ตำบลเขาหลวง อำเภอวังสะพุง จังหวัดเลย

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

จุดเก็บตัวอย่างดิน	จำนวนซ้ำ	ตำแหน่ง	ค่าพิกัดทางภูมิศาสตร์	
			X (Easting)	Y (Northing)
1. บริเวณที่ราบลุ่ม				
A3	1	ระยะห่าง 200-300 เมตรจากคลองน้ำฮวย (ฝั่งซ้ายของแนวคันนา)	783168	1919331
	2		783142	1919342
	3		783115	1919355
A4	1	ระยะห่าง 300-400 เมตรจากคลองน้ำฮวย (ฝั่งซ้ายของแนวคันนา)	783089	1919368
	2		783058	1919380
	3		783025	1919397

ตารางที่ 3-1 ค่าพิกัดทางภูมิศาสตร์ของจุดเก็บตัวอย่างดิน บริเวณพื้นที่เกษตรกรรม บริเวณคลองน้ำฮวย ตำบลเขาหลวง อำเภอวังสะพุง จังหวัดเลย (ต่อ)

จุดเก็บตัวอย่างดิน	จำนวนซ้ำ	ตำแหน่ง	ค่าพิกัดทางภูมิศาสตร์	
			X (Easting)	Y (Northing)
1. บริเวณที่ราบลุ่ม				
A5	1	ระยะห่าง 400-500 เมตรจากคลองน้ำฮวย (ฝั่งซ้ายของแนวคันนา)	782994	1919413
	2		782957	1919431
	3		782939	1919464
B3	1	ระยะห่าง 200-300 เมตรจากคลองน้ำฮวย (ฝั่งขวาของแนวคันนา)	782154	1919384
	2		783132	1919388
	3		783110	1919394
B4	1	ระยะห่าง 300-400 เมตรจากคลองน้ำฮวย (ฝั่งขวาของแนวคันนา)	783080	1919405
	2		783053	1919417
	3		783036	1919430
B5	1	ระยะห่าง 400-500 เมตรจากคลองน้ำฮวย (ฝั่งขวาของแนวคันนา)	783012	1919449
	2		782992	1919477
	3		782973	1919511
2. บริเวณเนินเขา				
C1	1	ระยะห่าง 300 เมตรจากคลองน้ำฮวย (เนินเขาฝั่งซ้าย)	783088	1919346
	2		783082	1919342
C2	1	ระยะห่าง 300 เมตรจากคลองน้ำฮวย (เนินเขาฝั่งซ้าย)	783074	1919318
	2		783071	1919316

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตารางที่ 3-1 ค่าพิกัดทางภูมิศาสตร์ของจุดเก็บตัวอย่างดิน บริเวณพื้นที่เกษตรกรรม บริเวณคลองน้ำฮวย ตำบลเขาหลวง อำเภอวังสะพุง จังหวัดเลย (ต่อ)

จุดเก็บตัวอย่างดิน	จำนวนซ้ำ	ตำแหน่ง	ค่าพิกัดทางภูมิศาสตร์	
			X (Easting)	Y (Northing)
C3	1	ระยะห่าง 400 เมตรจากคลองน้ำฮวย (เนินเขาฝั่งซ้าย)	782968	1919394
	2		782965	1919383
C4	1	ระยะห่าง 400 เมตรจากคลองน้ำฮวย (เนินเขาฝั่งซ้าย)	782955	1919367
	2		782953	1919355
C5	1	ระยะห่าง 500 เมตรจากคลองน้ำฮวย (เนินเขาฝั่งซ้าย)	782927	1919428
	2		782912	1919425
C6	1	ระยะห่าง 500 เมตรจากคลองน้ำฮวย (เนินเขาฝั่งซ้าย)	782902	1919406
	2		782880	1919391
D1	1	ระยะห่าง 200 เมตรจากคลองน้ำฮวย (เนินเขาฝั่งขวา)	783181	1919434
	2		783172	1919451
D2	1	ระยะห่าง 200 เมตรจากคลองน้ำฮวย (เนินเขาฝั่งขวา)	783157	1919488
	2		783153	1919545
D3	1	ระยะห่าง 500 เมตรจากคลองน้ำฮวย (เนินเขาฝั่งขวา)	782997	1919535
	2		783007	1919548
D4	1	ระยะห่าง 500 เมตรจากคลองน้ำฮวย (เนินเขาฝั่งขวา)	783032	1919579
	2		783042	1919594

หมายเหตุ: Coordinate System WGS 1984 UTM Zone 47N

การเก็บตัวอย่างบริเวณที่ราบลุ่มที่มีการเพาะปลูกข้าวจะเดินเก็บตัวอย่างดินโดยเดินเป็นแนวเส้นตรงขึ้นไปเริ่มจากบริเวณคลองน้ำฮวย ผ่านบริเวณพื้นที่ที่มีการปลูกอ้อย จากนั้นเมื่อเจอพื้นที่ปลูกข้าวให้เริ่มเก็บตัวอย่างดิน ทั้งนี้เนื่องจากบริเวณพื้นที่ดินนาข้าวมีคันนากั้นตรงกลาง จึงแบ่งการเก็บตัวอย่างออกเป็น 2 แนว คือแนว A และแนว B ในแต่ละจุดจะมีระยะห่าง 100 เมตร ซึ่งจะมีจุดเก็บ

ตัวอย่าง 6 จุด คือ A1 A2 A3 B1 B2 และ B3 ส่วนบริเวณเนินเขาที่มีการปลูกยางพารา มีลักษณะเป็นที่ลาดขึ้นไปทั้ง 2 ฝั่งซ้ายและขวา การเดินเก็บตัวอย่างก็จะเดินจากบริเวณตีนเขาขึ้นไปด้านบนในทั้ง 2 ฝั่ง ประกอบด้วยฝั่ง C (ซ้าย) และฝั่ง D (ขวา) และในแต่ละจุดจะมีระยะห่าง 100 เมตร เช่นเดียวกัน ซึ่งมีจุดเก็บตัวอย่าง 10 จุด คือ C1 ถึง C6 และ D1 ถึง D4 ทั้งนี้จำนวนจุดเก็บตัวอย่างดินในทั้ง 2 บริเวณรวมทั้งหมดเป็น 16 จุด แสดงในรูปที่ 3–2 สำหรับวิธีการเก็บตัวอย่างประกอบด้วยขั้นตอนดังต่อไปนี้

(1) ก่อนการเก็บตัวอย่าง ให้ทำความสะอาดหน้าดินโดยการกวาดเอาเศษวัชพืชบริเวณหน้าดินออก

(2) การเก็บดินแต่ละจุดจะใช้เสียมขุดดินเป็นรูปลิ่ม ให้มีระดับความลึกประมาณ 15 เซนติเมตร

(3) เก็บดินโดยใช้เสียมแซะดินข้างหลุม (ด้านเรียบ) ให้ได้ดินเป็นแผ่นหนาประมาณ 2–3 เซนติเมตร จนถึงก้นหลุม ดังแสดงในรูปที่ 3–3

(4) ตัวอย่างดินที่ได้เก็บรวบรวมใส่ถุง และเก็บตัวอย่างในถังน้ำแข็ง เพื่อนำกลับมาทดลองในห้องปฏิบัติการ

(5) การคอมโพสิตดิน (Composite sample) โดยในแต่ละจุดเก็บตัวอย่างจะเก็บตัวอย่างดินจำนวน 3 ตำแหน่ง และจะนำมารวมเป็น 1 ตัวอย่าง เพื่อเป็นตัวแทนของการศึกษา มีวิธีการดังนี้

(5.1) ดินในฤดูร้อน ทั้งดินนาข้าวและดินปลูกยางพารามีลักษณะเนื้อดินที่ค่อนข้างแห้งและร่วน วิธีการคอมโพสิตดินที่มีลักษณะเนื้อดินดังกล่าว สามารถนำตัวอย่างดินแต่ละจุดมาคลุกเคล้าให้เข้ากัน โดยเทตัวอย่างดินลงบนถุงพลาสติก คลุกเคล้าโดยยกมุมถุงพลาสติกทีละ 2 มุม ที่อยู่ตรงข้ามกัน ทำสลับกันไปมา 20 ครั้ง หลังจากคลุกเคล้าตัวอย่างดินเข้ากันดีแล้วพูนดินให้เป็นกองและทำเครื่องหมายบวก (+) บนยอดกองดิน แบ่งดินออกเป็น 4 ส่วน จากนั้นให้ตักดินออกมา 1 ส่วน เพื่อนำมาใช้ในการศึกษา (กรมพัฒนาที่ดิน, 2561)

(5.2) ดินในฤดูฝน ทั้งดินนาข้าวและดินปลูกยางพารามีลักษณะเนื้อดินที่ค่อนข้างจะเหนียวและค่อนข้างอุ้มน้ำ เนื่องจากน้ำถูกดูดซับหรือเก็บกักเอาไว้บริเวณผิวหน้าดิน ซึ่งเป็นลักษณะปกติของดินที่เก็บในฤดูฝน วิธีการคอมโพสิตดินนั้นจะต้องนำตัวอย่างดินแต่ละจุดมาเทลงในถังและคลุกเคล้าให้เข้ากันโดยการกวนด้วยช้อนหรือทัพพีจนตัวอย่างดินเข้ากันจนเป็นเนื้อเดียวกัน ซึ่ง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

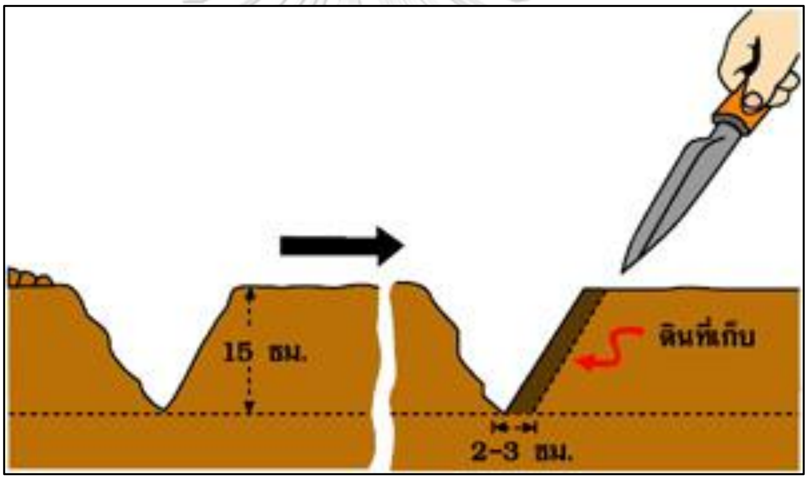
สามารถพิจารณาจากสีของดินจะมีสีน้ำตาลสม่ำเสมอกัน และเมื่อตัวอย่างดินเป็นเนื้อเดียวกันแล้ว ให้นำตัวอย่างดินออกมา 1 ส่วนเพื่อนำมาใช้ในการศึกษา

(6) การเก็บรักษาตัวอย่างดินและการตรวจวิเคราะห์

ดินในฤดูร้อนและฤดูฝน ทั้งดินนาข้าวและดินปลูกยางพารา มีการแบ่งดินออกเป็น 2 ส่วน เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ดัชนีต่าง ๆ คือ

(6.1) <u>ตัวอย่างดินที่อบแห้ง</u> (Dry sample) ใช้สำหรับตรวจวิเคราะห์ความเข้มข้นของสารหนู ความเข้มข้นของเหล็ก ค่าพีเอชของดิน ปริมาณอินทรียวัตถุในดิน รวมถึงลักษณะเนื้อดิน

(6.2) <u>ตัวอย่างดินที่ไม่อบแห้ง</u> (Field moist sample) ซึ่งจะเก็บโดยการแช่แข็ง สำหรับตรวจวิเคราะห์ค่าอีเอช AVS การกระจายสัดส่วน และชีวปริมาณออกฤทธิ์ของสารหนูในดิน



รูปที่ 3-3 วิธีการเก็บตัวอย่างดิน

ที่มา: (อัยย์แลปดอทเอเชีย, 2011)

CHULALONGKORN UNIVERSITY

3.2 วิธีการศึกษา

3.2.1 การศึกษาค่าดัชนีต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องในเบื้องต้น

ศึกษาคุณสมบัติของดินทั้งทางกายภาพและทางเคมี เพื่อประเมินลักษณะของดินในเบื้องต้น เพื่อใช้คัดเลือกตัวอย่างดินในการวิเคราะห์การกระจายสัดส่วนและชีวปริมาณออกฤทธิ์ของสารหนู โดยคุณสมบัติทางกายภาพของดิน คือ ลักษณะเนื้อดิน ส่วนคุณสมบัติทางเคมีของดิน ได้แก่ ความเข้มข้นของสารหนู ความเข้มข้นของเหล็ก ค่าพีเอช ค่าอีเอช ปริมาณอินทรียวัตถุในดิน และ AVS ในดิน ซึ่งมีวิธีในการศึกษาดังนี้

3.2.1.1 คุณสมบัติทางกายภาพของดิน

(1) ลักษณะเนื้อดิน

การวิเคราะห์เนื้อดิน (Soil Texture) ใช้วิธีการของ ASTM D7928–17 Standard test method for particle–size distribution (gradation) of fine–grained soils using the sedimentation (Hydrometer) analysis (ASTM, 2002) โดยการส่งตรวจวิเคราะห์ที่กรมวิชาการเกษตร ซึ่งมีขั้นตอนดังนี้

(1.1) การเตรียมตัวอย่าง

นำดินที่ต้องการวิเคราะห์มาผึ่งให้แห้ง (air dried soil) ที่อุณหภูมิไม่เกิน 60 องศาเซลเซียส บดร่อนผ่านตะแกรงร่อน (Sieve) ขนาด 2 มิลลิเมตร นำส่วนตัวอย่างดินแห้งที่ส่วนที่ผ่านตะแกรงร่อนไปใช้ในขั้นตอนต่อไป และส่วนที่ไม่ผ่านตะแกรงหรือมีขนาดใหญ่กว่า 2 มิลลิเมตร นำไปชั่งน้ำหนักส่วนนี้จะคิดเป็นน้ำหนักกรวด โดยคำนวณเป็นหน่วยร้อยละเทียบกับน้ำหนักดินทั้งหมด

(1.2) ล้างเกลือ

นำส่วนตัวอย่างดินแห้งที่ส่วนที่ผ่านตะแกรงร่อน 10 กรัม เติมสารละลายโซเดียมอะซิเตท (Sodium acetate; NaOAc) ปริมาตร 50 มิลลิลิตร ตั้งในอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ (Water bath) อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที จากนั้นใส่ในเครื่องหมุนเหวี่ยง เมื่อสารละลายแยกชั้นให้ทิ้งน้ำส่วนด้านบนทิ้งไป และถ่ายตัวอย่างดินลงในบีกเกอร์ขนาด 600 มิลลิลิตร เพื่อทำในขั้นต่อไป

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

(1.3) การกำจัดสารอินทรีย์ในดิน

เติมน้ำกลั่นจนท่วมดิน แล้วค่อย ๆ เติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) ลงในบีกเกอร์ทีละน้อย คนให้ผสมกัน ดินที่มีปริมาณอินทรียวัตถุมากจะเกิดฟองก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากสารอินทรีย์ เมื่อฟองก๊าซน้อยลงให้เติม H_2O_2 อีกจนกระทั่งไม่มีฟองเกิดขึ้นอย่างรุนแรง นำตัวอย่างดินตั้งบน Hot plate ใช้อุณหภูมิประมาณ 250 ถึง 400 องศาเซลเซียส เพื่อเร่งให้อินทรียวัตถุสลายตัวจนหมด ซึ่งสังเกตจากพรายแก๊สสีน้ำตาลอมเหลืองรวมถึงสีของดิน และหากอินทรียวัตถุไม่หมดสามารถเติม H_2O_2 จนไม่เกิดปฏิกิริยาขึ้นอีก

(1.4) การทำให้ตัวอย่างดินเกิดการแตกตัว

ถ่ายตัวอย่างดินลงในบีกเกอร์ เติมสารละลายแคลกอน (Calgon Solution) ซึ่งเป็น Dispersion agent หรือ สารที่ทำให้อนภาคดินแตกตัว โดยใช้สารละลายความเข้มข้นร้อยละ 5 ตัวอย่างละ 10 มิลลิลิตร เพื่อช่วยให้อนุภาคดินกระจายอย่างอิสระ และทิ้งไว้เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

(1.5) การแยกอนุภาคทราย

– ถ่ายตัวอย่างดินในถ้วยสแตนเลส และปั่นด้วยเครื่องกวนสารละลาย (Stirrer) เป็นเวลา 5 นาที จากนั้นถ่ายตัวอย่างดินใน Cylender ขนาดความจุ 1,000 มิลลิลิตร ผ่านตะแกรงขนาด 300 mesh ซึ่งอนุภาคทรายแป้งและอนุภาคดินเหนียวจะผ่านลงไปใน Cylender จากนั้นล้างด้วยน้ำกลั่นจนอนุภาคทรายแป้งและอนุภาคดินเหนียวหลุดออกจากอนุภาคทรายจนหมดแล้วจึงปรับปริมาตรเป็น 1,000 มิลลิลิตร

– วัดความหนาแน่นของตัวอย่างดินด้วยไฮโดรมิเตอร์ (Hydrometer) ค่าที่ได้จะเป็นปริมาณอนุภาคทรายแป้งและอนุภาคดินเหนียวรวมกัน

– ส่วนอนุภาคทรายที่แยกได้ ให้นำไปอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง และชั่งน้ำหนัก

(1.6) การแยกอนุภาคดินเหนียว

– ตัวอย่างดินใน Cylender ประกอบด้วยอนุภาคทรายแป้งและอนุภาคดินเหนียว ให้ทำการกวนตัวอย่างและจับเวลาเมื่อเริ่มกวน โดยเมื่อกวนไปเรื่อย ๆ จะเกิดการตกตะกอน ซึ่งขึ้นอยู่กับเวลาและอุณหภูมิที่ความลึกคงที่

– เมื่อถึงเวลาที่กำหนด ให้วัดความหนาแน่นของตัวอย่างดินอีกครั้ง ค่าที่วัดได้จะเป็นปริมาณอนุภาคดินเหนียว เนื่องจากอนุภาคทรายแป้งตกตะกอนไปแล้ว จากนั้นดูดตัวอย่างอนุภาคดินเหนียวซึ่งอยู่ในสภาพแขวนลอย 20 มิลลิลิตร เข้าตู้อบเป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วจึงชั่งหาน้ำหนักอนุภาคดินเหนียว

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

(1.7) การแยกอนุภาคดินทราย

หลังจากที่แยกอนุภาคทรายแป้งและอนุภาคดินเหนียวออกไปแล้ว จะเหลืออนุภาคดินทราย ให้ทำการถ่ายตัวอย่างดินทรายทั้งหมดลงบนชุดตะแกรงร่อน จากนั้นนำชุดตะแกรงร่อนเข้าเครื่องเขย่าเพื่อแยกอนุภาคทรายขนาดต่าง ๆ ออกจากกัน

(1.8) คำนวณร้อยละของอนุภาคทราย อนุภาคทรายแป้งและอนุภาคดินเหนียว

เมื่อทราบร้อยละของอนุภาคทราย อนุภาคทรายแป้งและอนุภาคดินเหนียว จะสามารถแยกขนาดอนุภาคได้โดยการเทียบจากไดอะแกรมสามเหลี่ยม เพื่อแบ่งชนิดของเนื้อดินมาตรฐาน

– ดินทราย มีขนาดอนุภาคดิน 2.00–0.05 มิลลิเมตร

– ดินทรายแป้ง มีขนาดอนุภาคดิน 0.002–0.05 มิลลิเมตร

– ดินเหนียว มีขนาดอนุภาคดิน เล็กกว่า 0.002 มิลลิเมตร

3.2.1.2 คุณสมบัติทางเคมีของดิน

(1) ความเข้มข้นของสารหนูและเหล็กในดิน

การย่อยตัวอย่างดินใช้วิธีการตาม U.S. EPA 3051A Microwave Assisted Acid Digestion of Sediments, Sludges, Soils and Oils (U.S. EPA, 2007) ในการเตรียมตัวอย่างดินจะใช้ตัวอย่างดิน 0.5 กรัม ใส่ในหลอดทดลอง จากนั้นเติมกรดไนตริกและไฮโดรคลอริคเข้มข้น (Conc. HNO_3 และ Conc. HCl) อัตราส่วน 1:3 ทิ้งไว้เป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นนำตัวอย่างไปตรวจวิเคราะห์โดยใช้เครื่อง Microwave หลังจากนั้นจึงกรองสารละลายที่ได้ด้วยกระดาษกรอง Whatman เบอร์ 42 โดยใช้กรวยกรอง และปรับปริมาตรสุดท้ายด้วยน้ำปราศจากไอออน (DI) จนได้ปริมาตร 25 มิลลิลิตร ด้วยขวดปรับปริมาตร (Volumetric flask) แล้วนำตัวอย่างไปวัดค่าความเข้มข้นของสารหนูและเหล็กใช้วิธีการ U.S. EPA 6010D Inductively Coupled Plasma–Atomic Emission Spectrometry (U.S. EPA, 2014) โดยใช้เครื่อง ICP–OES (Inductively coupled plasma–optical emission spectrometry) ซึ่งด้วยวิธีการนี้มีค่า Detection Limit ของสารหนูและเหล็กในดินเท่ากับ 0.25 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม สำหรับการควบคุมคุณภาพของการวิเคราะห์สารหนูทั้งหมดในดินจะใช้ Standard Reference Material 2711a (Montana II soil) และ European Reference Material ERM-CC141 (Loam soil) ดังแสดงในตารางที่ 3–2

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ 3-2 คุณภาพของการวิเคราะห์สารหนูทั้งหมดในดิน

(ก) Standard Reference Material 2711a (Montana II soil)

Element	Certified values (mg/kg)	Experiment values (mg/kg)	Recovery rate (%)
สารหนู	89	92.4±4.88	103.79

(ข) European Reference Material ERM-CC141 (Loam soil)

Element	Certified values (mg/kg)	Experiment values (mg/kg)	Recovery rate (%)
สารหนู	7.5	7.3±0.46	97.34

จากผลจากการวิเคราะห์สารหนูทั้งหมดในดิน พบว่ามีค่าร้อยละการกลับคืน (%Recovery) อยู่ในช่วงร้อยละ 97.34 ถึง 103.79 ซึ่งถือว่าอยู่ในช่วงที่เหมาะสมของการตรวจวัด

(2) ค่าพีเอช

การวิเคราะห์ค่าพีเอชใช้วิธีการของ U.S. EPA 9045D Soil and Waste pH U.S. EPA 9045D Soil and Waste pH (U.S. EPA, 2004) โดยต้องคำนึงถึงสัดส่วนของดินต่อน้ำ ซึ่งส่วนใหญ่จะใช้อัตราส่วนเท่ากับ 1:1 หรือ 1:2 ซึ่งในการศึกษานี้จะใช้ดิน 10 มิลลิกรัมต่อน้ำ 10 มิลลิลิตร (อัตราส่วน 1:1) และวัดค่าพีเอชของสารละลายดินด้วย pH meter มีขั้นตอนดังนี้

(2.1) ชั่งตัวอย่างดิน 10 กรัม ใส่ในหลอด Centrifuge ปริมาตร 50 มิลลิลิตร จากนั้นเติมน้ำ DI (Deionized water) ปริมาตร 10 มิลลิลิตร

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

(2.2) นำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าอย่างต่อเนื่อง เป็นเวลา 5 นาที

(2.3) นำไปปั่นเหวี่ยง 3,000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 2 นาที เพื่อให้สารละลายแยกชั้น โดยในการวิเคราะห์ค่าพีเอชของดินจะวัดพีเอชด้วยเครื่องพีเอชมิเตอร์ (pH meter) ในส่วนที่เป็นสารละลายใส และบันทึกผล

หมายเหตุ: การวัดค่าพีเอชของสารละลายดินจะต้องเตรียมเครื่องพีเอชมิเตอร์ให้พร้อมใช้งานโดยการวัด Standard buffer solution ก่อน

(3) ค่าอีเอช

การวิเคราะห์ค่าสภาพปฏิกิริยารีดอกซ์ (Oxidation Reduction Potential: ORP) สามารถวัดได้โดยใช้หลักการของ ASTM G200–09 Standard Test Method for Measurement of Oxidation–Reduction Potential (ORP) of Soil (ASTM, 2014) โดยใช้เครื่องวัดค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าระหว่างขั้ว (ORP Meter) ซึ่งมีขั้นตอนดังนี้

(3.1) ชั่งตัวอย่างดิน 10 กรัมใส่ในหลอด Centrifuge ปริมาตร 50 มิลลิลิตร จากนั้นเติมน้ำ DI (Deionized water) ปริมาตร 10 มิลลิลิตร

(3.2) เขย่าด้วยเครื่องเขย่าอย่างต่อเนื่อง เป็นเวลา 5 นาที

(3.3) นำไปปั่นเหวี่ยง 20,000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 2 นาที เพื่อให้สารละลายแยกชั้น และใช้ส่วนที่เป็นสารละลายใสในการวิเคราะห์สภาพปฏิกิริยารีดอกซ์ของดิน และบันทึกผล

หมายเหตุ: ในการวัดค่า ORP จะใช้เครื่องวัดค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าระหว่างขั้ว โดยค่าที่อ่านได้นั้นขึ้นอยู่กับชนิดของหัววัด และต้องแปลงเป็นค่า Redox Potential (ค่า Eh) ซึ่งจะต้องบวกค่า Reference Electrode (Eref) เพิ่มจากค่า ORP ที่วัดได้ ยกตัวอย่างเช่น ค่า Eref ของหัววัดที่เป็น Silver (Ag)/Silver chloride (AgCl) ที่ใช้สารละลาย Potassium chloride (KCl) 1 โมลาร์ ต้องบวกเพิ่ม 236 มิลลิโวลต์ จากค่า ORP ที่วัดได้และค่า Eref ของหัววัด Silver (Ag)/Silver chloride (AgCl) ที่ใช้สารละลาย Saturated Potassium chloride (KCl) หรือสารละลาย KCl ที่อิ่มตัวนั้นต้องบวกเพิ่ม 197 มิลลิโวลต์ จากค่าที่วัดได้ (Nordstrom and Wilde, 2005) จึงจะถือเป็นค่าที่แท้จริงสำหรับประเมินตัวรับอิเล็กตรอนในดิน

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

(4) Acid volatile sulfide (AVS)

การตรวจความเข้มข้นซัลไฟด์ในดิน ในที่นี้ตรวจวัดเป็น Acid volatile sulfide (AVS) ประยุกต์จากวิธีของ Yekta et al. (2012) โดยใช้เครื่อง ISE (Ion Selective Electrode) ซึ่งมีค่า Detection Limit ของสารหนูเท่ากับ 200 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ซึ่งปกติแล้ว AVS เป็นสารที่สลายตัวได้เมื่อสัมผัสอากาศ และระเหยสู่บรรยากาศได้ง่ายเมื่อสารละลายเป็นกรด วิธีนี้จึงใช้การระเหย AVS จากตัวอย่างด้วยกรดไฮโดรคลอริค และมีการนำสารละลาย SAOB (Sulfide antioxidant buffer) มาใช้จับ AVS ที่ระเหยซึ่งมีคุณสมบัติทำให้ AVS ไม่ระเหยและลดการสลายตัว ซึ่งมีขั้นตอนดังนี้

4.1 ชั่งตัวอย่างดินไม่อบแห้ง (Field moist sample) 1 กรัมและใส่แท่งแม่เหล็กลงในขวดปากกว้าง ขนาด 250 มิลลิลิตร

4.2 วางถ้วยเซรามิคปากกว้าง (Evaporating dish) พร้อมขาตั้งลงในขวด

4.3 เติมสารละลาย SAOB ปริมาตร 10 มิลลิลิตร ในถ้วยเซรามิคปากกว้าง โดยสารละลาย SAOB ประกอบด้วยสารละลาย NaOH ความเข้มข้น 2 โมลาร์ EDTA 0.1 โมลาร์ และ Ascorbic acid 0.1 โมลาร์ ซึ่งมีคุณสมบัติทำให้ AVS ไม่ระเหย

4.4 เติมสารละลาย HCl ความเข้มข้น 1 โมลาร์ ปริมาตร 50 มิลลิลิตร ลงในขวดปากกว้างและปิดฝาขวดอย่างรวดเร็ว

4.5 ปั่นเบา ๆ ให้เกิดการผสมกัน เป็นระยะเวลา 1 ชั่วโมง

4.6 นำตัวอย่างจากข้อ 4.5 มาเจือจาง 10 เท่า เพื่อให้ความเข้มข้นของด่างลดลง จากนั้นตรวจวัดด้วยเครื่อง ISE (Ion–Selective–Electrode)

หมายเหตุ: เครื่อง ISE มีข้อจำกัดในการตรวจวัด โดยสารละลายที่จะวัดด้วยเครื่อง ISE ต้องมีค่าพีเอชอยู่ในช่วง 12 ถึง 14 ดังนั้น จึงจำเป็นต้องเจือจางตัวอย่าง 10 เท่า

(5) ปริมาณอินทรียวัตถุในดิน

การหาปริมาณอินทรียวัตถุในดิน โดยส่งตัวอย่างดินไปวิเคราะห์ปริมาณอินทรียวัตถุในดินที่กรมวิชาการเกษตร โดยวิธี Walkley and Black Method (Walkley and Black, 1934) ซึ่งมีขั้นตอนดังนี้

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

5.1 ชั่งตัวอย่างดิน 1 กรัม ใส่ในขวดรูปชมพู่ ขนาด 250 มิลลิลิตร

5.2 ใช้สารละลาย Oxidizing agent คือ Potassium dichromate ($K_2Cr_2O_7$) โดยการปิเปตสารละลาย $K_2Cr_2O_7$ ที่ความเข้มข้น 1 นอร์มัล ปริมาตร 10 มิลลิลิตร

5.3 เติมกรดซัลฟิวริกเข้มข้น (Conc. H_2SO_4) ปริมาตร 20 มิลลิลิตร เขย่าเบา ๆ ให้ตัวอย่างเข้ากันดีเป็นเวลา 1–2 นาที จากนั้นวางพักไว้เป็นเวลา 30 นาทีจนสารละลายเย็นเท่าอุณหภูมิห้อง

5.4 เติมน้ำกลั่นปริมาตร 50 มิลลิลิตร แล้ววางพักไว้ให้เย็น

5.5 หยดอินดิเคเตอร์โทฟีแนนโทรลีน (o–phenanthroline) จำนวน 5 หยด

5.6 ไทเทรตด้วยสารละลายเฟอรัสแอมโมเนียมซัลเฟต (Ferrous Ammonium sulfate; FAS) ที่ความเข้มข้น 0.5 นอร์มัล เพื่อหา $K_2Cr_2O_7$ ที่เหลือจากปฏิกิริยา จนกระทั่งสีของสารละลายดินเปลี่ยนจากสีเขียวเป็นสีน้ำตาลแดงที่จุดยุติ และบันทึกปริมาณ $K_2Cr_2O_7$ และ FAS

5.7 ทำ Blank โดยเริ่มทำตั้งแต่ขั้นตอนที่ 2 ถึง 6

5.8 คำนวณปริมาณอินทรีย์คาร์บอน (ร้อยละ) และปริมาณอินทรียวัตถุ (ร้อยละ) จากสมการ

$$\text{ร้อยละ Organic carbon} = \frac{(B-S)N}{(B)} \times \frac{100}{77} \times \frac{100}{10^3} \times \frac{10}{W} \times 10 \times 3 \quad \text{.......(1)}$$

$$\text{ร้อยละ Organic matter} = \frac{(B-S)N}{(B)} \times \frac{100}{77} \times \frac{100}{58} \times \frac{10}{10^3} \times \frac{10}{W} \times 10 \times 3 \quad \text{.......(2)}$$

หรือร้อยละ Organic matter = ร้อยละ Organic carbon × 1.724 ....(3)

เมื่อ B = ปริมาณ FAS ที่ใช้ในการไทเทรตกับ blank (มิลลิลิตร)

S = ปริมาณ FAS ที่ใช้ในการไทเทรตกับตัวอย่าง (มิลลิลิตร)

N = ความเข้มข้นของ Potassium dichromate (ในกรณีที่ความเข้มข้นไม่ใช่ 1 นอร์มัล) (หน่วยนอร์มัล)

W = น้ำหนักดินที่ใช้ (กรัม)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

3.2.2 การศึกษาการกระจายสัดส่วนและชีวปริมาณออกฤทธิ์ของสารหนู

ทำการศึกษากับตัวอย่างดินนาข้าว 4 ตัวอย่างและดินปลูกยางพารา 4 ตัวอย่าง ทั้ง 2 ฤดูกาล (3 ซ้ำ) ซึ่งการคัดเลือกตัวอย่างได้คัดเลือกจากค่าความเข้มข้นของสารหนูในดินที่ได้จากการวิเคราะห์ในหัวข้อ 3.2.1 โดยการศึกษาการกระจายสัดส่วนใช้วิธีการสกัดตามลำดับส่วนใช้วิธี Modified Tessier (Rauret et al., 1989) ส่วนชีวปริมาณออกฤทธิ์ของสารหนูใช้การสกัดแบบขั้นตอนเดียวซึ่งใช้วิธีการสกัดด้วย EDTA ที่ความเข้มข้น 0.05 โมลาร์ (Gregori et al., 2004)

3.2.2.1 วิธีการศึกษาการกระจายสัดส่วนของสารหนูในดิน

(1) เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

(1.1) หลอด Centrifuge (Centrifuge tube) ปริมาตร 40 มิลลิลิตร

(1.2) ที่ใส่หลอด Centrifuge (Centrifuge rack)

(1.3) เครื่องหมุนเหวี่ยง (Centrifuge)

(1.4) กรวยกรอง (Glass funnel)

(1.5) บีกเกอร์ (Beaker)

(1.6) อ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ (Water bath)

(1.7) เครื่องเขย่า (Shaker)

(1.8) ออโตปิเปต (Auto pipette)

(1.9) ตัวกรอง (Syringe filter) ขนาด 0.45 ไมโครเมตร

(1.10) กระบอกฉีดยา (Syringe)

(1.11) ขวดเก็บตัวอย่าง (Bottle)

(2) สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

(2.1) Magnesium chloride ($MgCl_2$)

(2.2) Sodium acetate (CH_3COONa)

(2.3) Acetic acid (CH_3COOH)

(2.4) Hydroxylamine hydrochloride ($NH_2OH.HCl$)

(2.5) Peroxide (H_2O_2)

(2.6) Nitric (HNO_3)

(2.7) Ammonium acetate (CH_3COONH_4)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

(3) วิธีการทดลอง

ใช้เทคนิคการสกัดตามลำดับส่วน ซึ่งในที่นี้เลือกใช้วิธีการสกัดตามลำดับส่วนโดยวิธี Modified Tessier (Rauret et al., 1989)เพื่อวิเคราะห์การกระจายสัดส่วนของสารหนูในดิน สามารถแบ่งได้ 5 ขั้นตอนดังนี้

<u>การสกัดขั้นที่ 1</u>: Exchangeable Fraction (F1)

นำตัวอย่างดินปริมาณ 0.8 กรัม ใส่ลงในหลอด Centrifuge ขนาด 40 มิลลิลิตร เติมสารละลาย $MgCl_2$ ความเข้มข้น 1 โมลาร์ ปริมาตร 6.4 มิลลิลิตร ปิดฝาและเขย่าด้วยเครื่องเขย่า 3000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 1 ชั่วโมงที่อุณหภูมิห้อง จากนั้นนำไปหมุนเหวี่ยง 3000 รอบต่อนาที และเก็บสารละลายไปวิเคราะห์

<u>การสกัดขั้นที่ 2</u>: Bound to Carbonates Fraction (F2)

นำตัวอย่างดินที่เหลือจากการสกัดในขั้นที่ 1 มาเติมสารละลาย CH_3COONa ความเข้มข้น 1 โมลาร์ ที่ปรับพีเอชเป็น 5 ด้วย CH_3COOH ปริมาตร 35 มิลลิลิตร จากนั้นปิดฝาและเขย่าเป็นเวลา 5 ชั่วโมงที่อุณหภูมิห้อง จากนั้นนำไปหมุนเหวี่ยงและเก็บสารละลายไปวิเคราะห์

<u>การสกัดขั้นที่ 3</u>: Bound to Fe–Mn Oxides Fraction (F3)

นำตัวอย่างดินที่เหลือจากการสกัดในขั้นที่ 2 มาเติมสารละลาย $NH_2OH.HCl$ 0.04 โมลาร์ ใน Acetic acid ความเข้มข้นร้อยละ 25 ปริมาตร 35 มิลลิลิตร จากนั้นปิดฝาและใส่ใน Water bath ที่อุณหภูมิประมาณ 96° C เป็นเวลา 6 ชั่วโมง โดยเขย่าเป็นบางครั้ง จากนั้นนำไปหมุนเหวี่ยงและเก็บสารละลายไปวิเคราะห์

<u>การสกัดขั้นที่ 4</u>: Bound to Organic Matter Fraction (F4)

นำตัวอย่างดินที่เหลือจากการสกัดในขั้นที่ 3

4.1) เติมสารละลาย HNO_3 ความเข้มข้น 0.026 โมลาร์ ปริมาตร 2.4 มิลลิลิตร และเติม H_2O_2 ความเข้มข้นร้อยละ 30 ปริมาตร 4 มิลลิลิตร ปิดฝาและใส่ในอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิที่อุณหภูมิ 85° C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง โดยเขย่าด้วยมือเป็นระยะ

4.2) เติม H_2O_2 ความเข้มข้นร้อยละ 30 ปริมาตร 2.4 มิลลิลิตร ปิดฝาและใส่ใน Water bath ที่อุณหภูมิ 85° C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง และโดยเขย่าด้วยมือเป็นระยะ

4.3) เติมสารละลาย Na_4OAc ที่ความเข้มข้น 3.2 โมลาร์ ใน HNO_3 ความเข้มข้นร้อยละ 20 ปริมาตร 4 มิลลิลิตร เขย่า 30 นาที จากนั้นปรับปริมาตรโดยการเจือจางเป็น 25 มิลลิลิตร และนำไปหมุนเหวี่ยงเพื่อเก็บสารละลายไปวิเคราะห์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

<u>การสกัดขั้นที่ 5</u>: **Residual Fraction (F5)**

นำตัวอย่างดินที่เหลือจากการสกัดในขั้นที่ 4 มาย่อยโดยใช้เครื่องไมโครเวฟ (Microwave Digestion) ซึ่งในขั้นนี้จะใช้การย่อยดินด้วยวิธีมาตรฐาน EPA 3051A เป็นการย่อยด้วยสารละลายกรด Aqua regia ที่ผสมขึ้นจากกรดไนตริกเข้มข้น 2 มิลลิลิตร และกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 6 มิลลิลิตร (อัตราส่วน 1:3) โดยใช้เครื่องไมโครเวฟที่อุณหภูมิ 175 °C ในการย่อยสารต่าง ๆ ที่เกิดจากการปนเปื้อนออกมาได้ทั้งหมด

หมายเหตุ: ในการเก็บตัวอย่างเมื่อสิ้นสุดการสกัดแต่ละขั้นตอน ให้นำไปหมุนเหวี่ยงเพื่อให้ดินและน้ำสกัดแยกส่วนกัน จากนั้นเก็บตัวอย่างน้ำด้วย Auto pipette และล้างตัวอย่างที่เหลือโดยการเติมน้ำ DI (Deionized water) 7 มิลลิลิตร ปิดฝาเขย่าด้วยมือ และนำไปหมุนเหวี่ยง 30 นาที ทิ้งน้ำในส่วนนี้ไป จากนั้นนำตัวอย่างหลอดเดิมที่มีตัวอย่างดินอยู่ ไปใช้ทำการทดลองในขั้นตอนต่อไป โดยตัวอย่างน้ำที่เก็บให้กรองด้วย Syringe filter ขนาด 0.45 ไมโครเมตร และนำใส่ขวดเก็บตัวอย่าง

3.2.2.2 การศึกษาชีวปริมาณออกฤทธิ์ของสารหนูในดิน

(1) เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

(1.1) หลอด Centrifuge (Centrifuge tube) ปริมาตร 40 มิลลิลิตร

(1.2) ที่ใส่หลอด Centrifuge (Centrifuge rack)

(1.3) เครื่องหมุนเหวี่ยง (Centrifuge)

(1.4) บีกเกอร์ (Beaker)

(1.5) เครื่องเขย่า (Shaker)

(1.6) ตัวกรอง (Syringe filter) ขนาด 0.45 ไมโครเมตร

(1.7) ขวดเก็บตัวอย่าง (Bottle)

(2) สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

(2.1) สารละลาย EDTA (Ethylene diamine tetra–acetic acid)

(2.2) สารละลาย NH_4OH (Ammonium hydroxide)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

(3) วิธีการทดลอง

เตรียมตัวอย่างดิน 1 กรัมและเติมสารละลาย EDTA ความเข้มข้น 0.05 โมลาร์ ปริมาตร 10 มิลลิลิตรที่ปรับค่าพีเอชเป็น 7 ด้วย NH_4OH เขย่าเป็นเวลา 30 นาทีที่อุณหภูมิห้อง จากนั้นนำสารละลายที่ได้มากรองด้วย Syringe filter ขนาด 0.45 ไมโครเมตร และนำสารละลายที่ได้มาทำการตรวจวิเคราะห์ความเข้มข้นของสารหนูโดยใช้เครื่อง Inductively coupled plasma–optical spectrometer (ICP–OES)

3.2.3 การจำลองดินให้อยู่ภายใต้สภาวะไร้อากาศ (Anaerobic) ในห้องปฏิบัติการ

นอกจากดินปลูกยางพาราและดินนาข้าวแล้ว เพื่อทำให้เกิดความแตกต่างด้านสภาพแวดล้อมของดิน ยังได้ทำการจำลองสภาพดินให้อยู่ภายใต้สภาวะไร้อากาศ ซึ่งเป็นลักษณะที่พบในดินนาข้าวในภาคกลาง โดยการจำลองดินให้อยู่ภายใต้สภาวะไร้อากาศนั้นคาดการณ์ว่าจะทำให้เกิดการหมักหมมของอินทรียวัตถุในดิน ประกอบกับการที่ออกซิเจนไม่สามารถส่งผ่านลงมาใต้ดินได้เพียงพอจนมีค่าอีเอชต่ำจนเกิด AVS ในดิน ซึ่งจะส่งผลให้การกระจายสัดส่วนรวมถึงชีวปริมาณออกฤทธิ์ของสารหนูในดินเปลี่ยนแปลงไป ทั้งนี้จึงได้นำตัวอย่างดินนาข้าวในฤดูฝน จำนวน 4 ตัวอย่าง มาทำการจำลองให้เกิดสภาวะดังกล่าว โดยใช้เวลา 1 เดือน (จำลอง 2 ซ้ำ) โดยใช้แนวทางของ Damrongsiri (2018)

(1) เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

(1.1) ขวดแก้วสีชา (Laboratory Bottle Amber) ปริมาตร 500 มิลลิลิตร

(1.2) บีกเกอร์ (Beaker)

(2) สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

(2.1) อาหารเลี้ยงเชื้อ Lauryl Tryptose Broth (Difco^{tm})

(2.2) สารละลาย Na_2SO_4 (99% MERCK)

(3) วิธีการทดลอง

เตรียมตัวอย่างดิน 300 กรัม ใส่ในขวดทึบปริมาตร 500 มิลลิลิตร และจากการคำนวณพบว่าต้องเติมน้ำสกัด 350 มิลลิลิตร ซึ่งประกอบด้วย Lauryl Tryptose Broth (Difco^{tm}) เป็นแหล่งคาร์บอนของจุลินทรีย์ และ Na_2SO_4 (99% MERCK) เป็นแหล่งซัลเฟอร์เพื่อให้เกิดเป็น AVS ปิดฝาให้

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

สนิท และวางไว้ในที่ไม่มีแสง เป็นเวลา 1 เดือน เพื่อศึกษาคุณสมบัติทางเคมีของดิน รวมถึงศึกษาการกระจายสัดส่วนและชีวปริมาณออกฤทธิ์ของสารหนูในดิน เมื่อดินอยู่ภายใต้สภาวะไร้อากาศ

(3.1) การเติมซัลเฟอร์ลงในดินตัวอย่าง

โดยทั่วไปในดินมีซัลเฟอร์ (S, น้ำหนักโมเลกุลของ S=32.065 กรัมต่อโมล) ส่วนใหญ่จะอยู่ในรูป AVS หรือซัลเฟต (Sulfate) ซึ่งแร่ที่มีซัลเฟอร์เป็นองค์ประกอบส่วนใหญ่จะพบในหินอัคนีที่ผุพังและสลายตัวในรูปของโลหะ AVS สามารถถูกออกซิไดซ์ให้อยู่ในรูปของซัลเฟตได้เมื่ออยู่ในสภาวะที่เหมาะสม ซึ่งความเข้มข้นเฉลี่ยของ AVS ในดินทั่วโลกมีค่าอยู่ในช่วง 30–1,600 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม) (Essington, 2004; Kabata-Pendias, 2001) ดังนั้น ในที่นี้จึงใช้ค่าความเข้มข้นซัลเฟอร์ในดินที่จะเพิ่มเข้าไปเท่ากับ 1,000 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม เพื่อให้ง่ายต่อการคำนวณ โดยการเติมซัลเฟอร์ลงไปในรูปของซัลเฟต แล้วจึงปล่อยให้เกิดปฏิกิริยาทางชีวเคมีที่จะเปลี่ยนรูป (รีดิวซ์) ซัลเฟตให้กลายเป็น AVS ภายใต้สภาวะไร้อากาศ ซึ่งเตรียมจากสารละลายโซเดียมซัลเฟต (Na_2SO_4) (น้ำหนักโมเลกุล Na_2SO_4 =142.04 กรัมต่อโมล) ผลจากการคำนวณคือต้องการ AVS 0.3 กรัมต่อดิน 300 กรัม โดยใช้โซเดียมซัลเฟต 1.329 กรัม

(3.2) การเติมแหล่งอาหารของจุลินทรีย์ในระบบ

จุลินทรีย์ที่อยู่ในดินจะมีบทบาทสำคัญเกี่ยวข้องกับตัวรับอิเล็กตรอนที่อยู่ในดิน โดยจุลินทรีย์จะทำให้เกิดการออกซิไดซ์ (Oxidized) สารประกอบอินทรีย์ที่มีธาตุคาร์บอนเป็นองค์ประกอบ และทำให้เกิดปฏิกิริยารีดอกซ์กับตัวรับอิเล็กตรอนที่มีอยู่ในดิน ซึ่งดินในสภาวะปกติ ออกซิเจนจะเป็นตัวรับอิเล็กตรอนได้ดี ให้พลังงานสูง จุลินทรีย์ที่ใช้ออกซิเจนเป็นตัวรับอิเล็กตรอนจึงเจริญเติบโตได้อย่างรวดเร็ว และมีบทบาทสำคัญต่อปฏิกิริยาต่าง ๆ บนดิน อย่างไรก็ตาม ในสภาพที่ดินอยู่ในน้ำขังออกซิเจนที่ส่งผ่านมายังใต้น้ำและใต้ดินจะถูกจำกัด ทำให้ไม่เพียงพอต่อปฏิกิริยาดังกล่าวโดยเฉพาะเมื่อมีสารอินทรีย์อยู่มาก ทำให้จุลินทรีย์ที่ใช้สารอื่นรับอิเล็กตรอนได้เติบโตขึ้นมาแทน โดยสามารถคาดการณ์ได้จากค่าอีเอชที่ลดลงไปตามลำดับ โดยสารอื่น ๆ ที่สามารถเป็นตัวรับอิเล็กตรอนได้ ได้แก่ ไนโตรเจน (ในรูปไนเตรท) แมงกานีส เหล็ก (ในรูปเหล็กออกไซด์) และซัลเฟอร์ (ในรูปซัลเฟต) เป็นต้น ซึ่งปฏิกิริยาต่อไปนี้จะเกิดขึ้นต่อเนื่องกัน โดยเริ่มจากสมการที่ 1 ถึงสมการที่ 5 ตามลำดับ (Mitsch and Gosselink, 2015)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

1. O_2 (ปฏิกิริยาที่ดินอยู่ในสภาวะปกติที่มีออกซิเจน)

$O_2 + 4e^- + 4H^+ \longrightarrow 2H_2O$ สมการที่ 1

2. $NO_3 \longrightarrow N_2$ (ปฏิกิริยาแรกที่เกิดขึ้นหลังจากดินอยู่ในสภาวะไร้ออกซิเจน)

$2NO_3 + 10e^- + 12H^+ \longrightarrow N_2 + 6H_2O$ สมการที่ 2

3. $MnO_2 \longrightarrow Mn^{2+}$ (แมงกานีสถูกรีดิวซ์เป็นแมงกานัสที่ค่าอีเอชประมาณ +225 มิลลิโวลต์)

$MnO_2 + 2e^- + 4H^+ \longrightarrow Mn^{2+} + 2H_2O$ สมการที่ 3

4. $Fe^{3+} \longrightarrow Fe^{2+}$ (เฟอร์ริกถูกรีดิวซ์เป็นเฟอร์รัสที่ค่าอีเอชประมาณ +100 ถึง –100 มิลลิโวลต์)

$Fe(OH)_3 + e^- + 3H^+ \longrightarrow Fe^{2+} + 3H_2O$ สมการที่ 4

5. $SO_4^{2-} \longrightarrow S^{2-}$ (ซัลเฟตถูกรีดิวซ์เป็นซัลไฟด์ที่ค่าอีเอชประมาณ –100 ถึง –200 มิลลิโวลต์)

$SO_4^{2-} + 8e^- + 9H^+ \longrightarrow HS^- + 4H_2O$ สมการที่ 5

<u>การคำนวณ</u>

การคำนวณจะประมาณปริมาณอาหารเลี้ยงเชื้อที่ต้องเติมลงไปเพื่อให้มีค่าอีเอชต่ำกว่า 0 มิลลิโวลต์ เพื่อให้ตัวรับอิเล็กตรอนครอบคลุมตั้งแต่สมการที่ 1 ถึงสมการที่ 5

1) ปริมาตรสารละลายในระบบ

การจำลองระบบใช้ขวดปริมาตร 500 มิลลิลิตร ใช้ดิน 300 กรัม เมื่อคำนวณโดยใช้ค่าความหนาแน่นดินเท่ากับ 2.65 กรัมต่อมิลลิลิตร (USDA-NRCS, n.d.) จะได้ปริมาตรดินเท่ากับ 300 กรัม x 1 มิลลิลิตร / 2.65 กรัม เท่ากับ 113.21 มิลลิลิตร ดังนั้น ขวดนี้สามารถบรรจุสารละลายได้อีก 386.79 มิลลิลิตร จึงจะเต็มขวด ในที่นี้จะใช้สารละลาย 350 มิลลิลิตร เพื่อไม่ให้ล้นขวด

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

2) ออกซิเจนในสารละลาย

สมมติให้สารละลายมีออกซิเจนได้มากที่สุดเท่ากับค่าอิ่มตัวในน้ำเท่ากับ 8.2 มิลลิกรัมต่อลิตร (Weiss, 1970) ดังนั้นจะมีออกซิเจนในน้ำเท่ากับ 350 มิลลิลิตร x 1 ลิตร / 1,000 มิลลิลิตร x 8.2 มิลลิกรัม / 1 ลิตร เท่ากับ 2.87 มิลลิกรัม ซึ่งเทียบเท่า 8.97×10^{-5} โมล

3) อิเล็กตรอน (e^- acceptor) ที่ต้องการในการทำปฏิกิริยา

เพื่อความสะดวกในการคำนวณ ในที่นี้จะไม่พิจารณาปฏิกิริยากับไนเตรทและแมงกานีส โดยถือว่ามีน้อยมากเมื่อเทียบกับเหล็กที่มีอยู่ในดิน

O_2: จากสมการที่ 1 พบว่า ใช้ 4 อิเล็กตรอนต่อออกซิเจน 1 โมล ดังนั้น ในระบบต้องการอิเล็กตรอนเท่ากับ 4 x (8.97×10^{-5}) เท่ากับ 3.588×10^{-4} อิเล็กตรอน

Fe^{3+}: ดินมีความเข้มข้นเหล็กประมาณ 30,000 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม น้ำหนักโมเลกุลของเหล็กเท่ากับ 55.847 กรัมต่อโมล) ซึ่งปริมาณเหล็กในระบบเท่ากับ 30,000 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม x 300 กรัม x 1 กิโลกรัม / 1,000 กรัม เท่ากับ 9,000 มิลลิกรัม หรือ 9 กรัม ซึ่งเทียบเท่า 0.161 โมล โดยจากสมการที่ 4 พบว่า ใช้ 1 อิเล็กตรอนต่อเหล็ก 1 โมล ดังนั้น ในระบบต้องการอิเล็กตรอนเท่ากับ 1 x 0.161 เท่ากับ 0.161 อิเล็กตรอน

SO_4^{2-}: ในทีนี้ประมาณจากโซเดียมซัลเฟต 1.329 กรัม (น้ำหนักโมเลกุล Na_2SO_4 เท่ากับ 142.04 กรัมต่อโมล) ที่จะเติมลงในระบบ ซึ่งปริมาณซัลเฟตในระบบคิดเป็น 1.329 กรัม / 142.04 กรัมต่อโมล เท่ากับ 9.357×10^{-3} โมล โดยจากสมการที่ 5 พบว่า ใช้ 8 อิเล็กตรอนต่อซัลเฟต 1 โมล ดังนั้น ในระบบต้องการอิเล็กตรอนเท่ากับ 8 x (9.357×10^{-3}) เท่ากับ 0.0748 อิเล็กตรอน

โดยสรุปแล้วต้องการอิเล็กตรอนรวมทั้งหมดประมาณ 0.2359 อิเล็กตรอน

4) ปริมาณอาหารเลี้ยงเชื้อที่ต้องการ

ในที่นี้จะประมาณปริมาณอาหารเลี้ยงเชื้อที่ต้องการใช้ค่า Biochemical oxygen demand (BOD) โดยค่า BOD คือ ปริมาณออกซิเจนที่ต้องการในการย่อยสลายสารอินทรีย์ ดังนั้นจากสมการที่ 1 ออกซิเจน 1 โมล ต้องการ 4 อิเล็กตรอน ดังนั้น ความเข้มข้นของอาหารเลี้ยงเชื้อที่มี BOD = 1 โมล จึงหมายความว่าสามารถให้ 4 อิเล็กตรอน

เมื่อระบบจำลองต้องการอิเล็กตรอน 0.2359 โมล จะต้องการ BOD 0.059 โมล หรือ คิดเป็น 1,890 มิลลิกรัม หรือ เทียบเท่า สารละลาย BOD 5,400 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 350 มิลลิลิตร

ดังนั้น สามารถสรุปได้ว่าการจำลองดินในสภาวะไร้อากาศจะใช้ขวดปริมาตร 500 มิลลิลิตร โดยเติมดิน 300 กรัม และสารละลาย BOD 5,400 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณ 350 มิลลิลิตร และโซเดียมซัลเฟต 1.329 กรัม

ในส่วนของการวิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมีของดินจำลองภายใต้สภาวะไร้อากาศเมื่อจำลองครบ 1 เดือน ให้นำดินในแต่ละขวดมาปั่นเหวี่ยงแยกส่วนของน้ำและดินไว้ ซึ่งส่วนของน้ำใช้ในการวิเคราะห์ค่าพีเอชและค่าอีเอช สำหรับส่วนของดินใช้ในการวิเคราะห์ความเข้มข้น AVS การกระจายสัดส่วนและชีวปริมาณออกฤทธิ์ของสารหนูในดิน

3.2.4 การวิเคราะห์ผลด้วยวิธีการทางสถิติ

3.2.4.1 การทดสอบว่าข้อมูล 2 กลุ่มมีความแตกต่างหรือไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ (significance/Non-significance)

จากการพิจารณาข้อมูล พบว่าข้อมูลมีกระจายตัวแบบปกติ (Normal distribution) จึงเลือกใช้ T–test เป็นเครื่องมือในการทดสอบ เพื่อดูความแตกต่างของค่าเฉลี่ยของประชากร 2 กลุ่ม

(1) T–Test: Two–sample assuming equal variances ในกรณีที่ตัวอย่างมีประชากรเท่ากันในทั้ง 2 กลุ่ม เช่น ในการพิจารณาความแตกต่างของฤดูกาล โดยการดูค่าดัชนีต่าง ๆ ของการวิเคราะห์ ในบริเวณพื้นที่ราบลุ่มและบริเวณพื้นที่เนินเขาทั้ง 2 ฤดูกาล มีค่าแตกต่างหรือไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

(2) T–Test: Two–sample assuming unequal variances ในกรณีที่ตัวอย่างมีประชากร 2 กลุ่มที่มีค่าไม่เท่ากัน เช่น ในการพิจารณาความแตกต่างของพื้นที่ โดยการดูค่าดัชนีต่าง ๆ ของการวิเคราะห์ ในฤดูร้อนและฤดูฝนทั้ง 2 บริเวณ มีค่าแตกต่างหรือไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ

Chulalongkorn University

3.2.4.2 การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร

การวิเคราะห์ความถดถอย (Regression Analysis) เป็นการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรตั้งแต่ 2 ตัวแปรขึ้นไป แบ่งเป็น ตัวแปรอิสระ (x) และตัวแปรตาม (y) โดยมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Correlation Coefficient; R^2) เป็นตัวบ่งชี้ถึงความสัมพันธ์ แสดงผลเป็นกราฟเส้นตรง (Simple Linear Regression) โดยมีขนาดของความสัมพันธ์แสดงดังตารางที่ 3-3

ตารางที่ 3-3 ขนาดของความสัมพันธ์

R^2	**ขนาดของความสัมพันธ์**
0.0-0.3	ความสัมพันธ์ต่ำมาก
0.3-0.5	ความสัมพันธ์ต่ำ
0.5-0.7	ความสัมพันธ์ปานกลาง
0.7-0.9	ความสัมพันธ์สูง
0.9-1.0	ความสัมพันธ์สูงมาก

(ที่มา: Hinkle; Wiersma and Jurs, 2003)

ผลการศึกษาทำให้ทราบถึง

(1) ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระ (x) และตัวแปรตาม (y) ว่ามีความสัมพันธ์กันหรือไม่ หรือมีความสัมพันธ์กันมากหรือน้อยเพียงใด เพื่อที่จะสามารถการคาดการณ์ได้ว่าตัวแปรอิสระ (x) ตัวใดมีอิทธิพลต่อตัวแปรตาม (y) มากที่สุด

(2) แบบจำลองที่อยู่ในลักษณะสมการทางคณิตศาสตร์ เพื่อแสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระ (x) และตัวแปรตาม (y)

ในการศึกษาครั้งนี้จะใช้การวิเคราะห์ความถดถอยเชิงเส้นเพื่อศึกษา

(1) ความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติของดินกับการกระจายสัดส่วนของสารหนูในดิน

(2) ความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติของดินกับชีวปริมาณออกฤทธิ์ของสารหนูในดิน

(3) ความสัมพันธ์ระหว่างการกระจายสัดส่วนและชีวปริมาณออกฤทธิ์ของสารหนูในดิน

เพื่อทราบถึงอิทธิพลของตัวแปรในแต่ละปัจจัยและนำไปสร้างสมการพยากรณ์เพื่อบ่งบอกระดับความสัมพันธ์ของแต่ละตัวแปรต่อการกระจายสัดส่วนและชีวปริมาณออกฤทธิ์ของสารหนู

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

บทที่ 4

ผลและวิจารณ์ผลการศึกษา

4.1 ผลการเลือกพื้นที่ศึกษา

การคัดเลือกพื้นที่เก็บตัวอย่างได้พิจารณาจากแหล่งข้อมูลพื้นฐานของพื้นที่ ประกอบด้วย ข้อมูลภูมิประเทศ ข้อมูลความเข้มข้นของสารหนู ข้อมูลการใช้ประโยชน์ที่ดิน อีกทั้งยังมีการพิจารณาจากการสำรวจภาคสนามร่วมด้วย

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย (2555) ได้ทำการศึกษาการกระจายตัวของมลสารในสิ่งแวดล้อม ทั้งในแหล่งน้ำผิวดิน น้ำใต้ดิน ตะกอนท้องน้ำ และในดิน รวมถึงวิเคราะห์ปริมาณธาตุโลหะหนักและธาตุกึ่งโลหะ ได้แก่ ทองแดง (Cu) ตะกั่ว (Pb) แมงกานีส (Mn) ปรอท (Hg) แคดเมียม (Cd) และสารหนู (As) ในบริเวณพื้นที่แหล่งแร่ทองคำภูทับฟ้า ตำบลเขาหลวง อำเภอวังสะพุง จังหวัดเลย ซึ่งครอบคลุมพื้นที่ศึกษา พบว่ามีมลสารเพียงบางชนิดที่ต้องเฝ้าระวัง โดยส่วนใหญ่พิจารณาได้ว่าเป็นค่าภูมิหลังของพื้นที่ แต่อาจได้รับผลกระทบเพิ่มเติมจากกิจกรรมของมนุษย์ โดยเฉพาะสารหนูในดินที่มีค่าความเข้มข้นเกินค่ามาตรฐานเกือบทุกจุดเก็บตัวอย่าง ซึ่งมีค่าตั้งแต่ 13.5–94.4 มิลลิกรัมตอกิโลกรัม จากข้อมูลพระราชบัญญัติส่งเสริมและรักษาคุณภาพสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ พ.ศ. 2535 ได้กำหนดค่ามาตรฐานของสารหนูในดินที่ใช้ประโยชน์เพื่อการอยู่อาศัยและเกษตรกรรม ต้องมีค่าไม่เกิน 3.9 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม สารหนูที่มีค่าสูงเกินค่ามาตรฐานนั้นมีสาเหตุจากกองกากแรที่ปนเปื้อนสารหนูในปริมาณที่สูงเกิดการชะละลายและแพร่กระจายออกสู่สิ่งแวดล้อม สอดคล้องกับการศึกษาการปนเปื้อนโลหะหนักในดินตะกอนและดินริมฝั่งลำน้ำฮวยในอำเภอวังสะพุงและอำเภอเมือง จังหวัดเลย ที่พบสารหนูเกินค่ามาตรฐานเช่นเดียวกัน โดยพบสารหนูในดินตะกอนอยู่ในช่วง 6.59–32.10 มิลลิกรัมตอกิโลกรัม และดินริมฝั่งลำน้ำฮวย พบสารหนูอยู่ในช่วง 4.19–222.03 มิลลิกรัมตอกิโลกรัม (แก้วใจ ครังระหัด และวัลลภ ทาทอง, 2561) โดยค่าความเข้มข้นของสารหนูที่เกินค่ามาตรฐานนั้นเป็นลักษณะทางธรรมชาติของพื้นที่ศักยภาพแหล่งแร่ที่อยู่ในบริเวณใกล้เคียงที่ประกอบด้วยแหล่งแร่ชนิดต่าง ๆ เช่น สินแร่โลหะ (ทองคำ เหล็ก และทองแดง) สินแร่อโลหะ (แบไรต์และยิปซัม) เป็นต้น และพบแร่ที่กระจายอยู่ทั่วไปในพื้นที่ ได้แก่ แร่ทองคำ (Au) ทองแดง (Cu) เหล็ก (Fe) ตะกั่ว (Pb) สังกะสี (Zn) แมงกานีส (Mn) แบไรต์ และยิปซัม ซึ่งในสายแร่ทองคำส่วนใหญ่จะมีสารหนูในรูปของ

แร่ไพไรต์ และอาร์เซโนไพไรต์ (กรมทรัพยากรธรณี, 2549) นอกจากนี้ยังพบว่าความเข้มข้นของสารหนูในน้ำผิวดินมีค่า 0.00–0.036 มิลลิกรัมตอลิตร ในน้ำใตดินมีค่า 0.00–0.0232 มิลลิกรัมตอลิตร ซึ่งเกินค่ามาตรฐานเช่นเดียวกัน (ค่ามาตรฐานสารหนูในน้ำผิวดินมีค่าไม่เกิน 0.01 มิลลิกรัมตอลิตรและค่ามาตรฐานสารหนูในน้ำบาดาลมีค่าไม่เกิน 0.05 มิลลิกรัมตอลิตร)

นอกจากนี้ในส่วนของข้อมูลทางธรณีวิทยาในบริเวณโดยรอบพื้นที่ศึกษา พบว่าหินที่พบส่วนใหญ่อยู่ในหมวดหินผาเดื่อ (Phadua Formation) ในกลุ่มหินสระบุรี (Saraburi Group) ซึ่งเป็นหินตะกอนที่ประกอบด้วย หินทรายแป้ง (Siltstone) หินดินดาน (Shale) หินทราย (Sandstone) และหินปูน (Limestone) ส่วนข้อมูลภูมิประเทศโดยทั่วไปมีลักษณะเป็นที่ราบสลับกับเนินเขา ดังแสดงในรูปที่ 4–1 มีความสูงของพื้นที่อยู่ระหว่าง 260–420 เมตรจากระดับน้ำทะเลปานกลาง (รทก.) มีทางน้ำสายสั้น ๆ ไหลจากหุบเขาจากทางทิศตะวันตกเฉียงใต้ไปทางทิศตะวันออกเฉียงเหนือลงสู่ทางน้ำ ซึ่งทางน้ำที่พาดผ่านบริเวณพื้นที่ส่วนใหญ่จะมีน้ำไหลเฉพาะในฤดูฝน (ช่วงแรกเริ่มตั้งแต่ปลายเดือนเมษายนถึงเดือนกรกฎาคม ซึ่งเป็นฝนเนื่องจากอิทธิพลของลมมรสุมตะวันตกเฉียงใต้ ช่วงที่สองเริ่มตั้งแต่เดือนสิงหาคมถึงปลายตุลาคม ซึ่งเป็นฝนที่เกิดจากอิทธิพลของพายุดีเปรสชันในทะเลจีนใต้) โดยมีทิศทางการไหลของน้ำลงสู่คลองน้ำฮวย

นอกจากนี้ยังมีการศึกษาข้อมูลแผนที่แสดงการใช้ประโยชน์ที่ดินของพื้นที่ศึกษา สามารถแบ่งการใช้ประโยชน์ที่ดินออกเป็น 5 ประเภทหลัก ได้แก่ พื้นที่ชุมชนและสิ่งปลูกสร้าง พื้นที่เกษตรกรรม พื้นที่ป่าไม้ พื้นที่แหล่งน้ำ และพื้นที่เบ็ดเตล็ด ซึ่งสามารถสรุปข้อมูลได้ว่า พื้นที่ศึกษามีการใช้ประโยชน์ที่ดินด้านเกษตรกรรมมากที่สุด รองลงมาคือ พื้นที่ป่าไม้ พื้นที่ชุมชนและสิ่งปลูกสร้าง ซึ่งพื้นที่เกษตรกรรม คิดเป็นร้อยละ 69.14 ของพื้นที่ทั้งหมด เนื่องจากประชากรส่วนใหญ่ประกอบอาชีพเกษตรกรรมเป็นหลัก พบว่ามีการปลูกยางพารามากที่สุด คิดเป็นร้อยละ 23.94 ของพื้นที่ทั้งหมด รองลงมาคือข้าวโพด คิดเป็นร้อยละ 20.97 ของพื้นที่ทั้งหมด และอันดับที่สามคือนาข้าว คิดเป็นร้อยละ 13.67 ของพื้นที่ทั้งหมด นอกจากนี้ยังพบพืชชนิดอื่น ๆ ปะปนอยู่ในพื้นที่ (จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2555) ดังแสดงในรูปที่ 4–2 ทั้งนี้หากสารหนูมีการปนเปื้อนในดินในพื้นที่เกษตรกรรมอาจส่งผลให้มีการปนเปื้อนของสารหนูในผลผลิตทางการเกษตรในปริมาณที่สูงจนอาจก่อให้เกิดอันตรายต่อสิ่งมีชีวิต รวมถึงอาจก่อให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและระบบนิเวศ

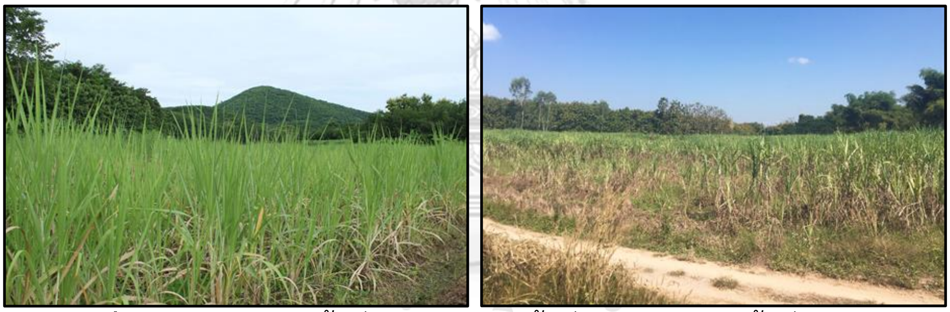
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ด้วยเหตุทั้งหมดที่กล่าวมานี้ นำมาสู่การเลือกพื้นที่ศึกษา ซึ่งเป็นพื้นที่เกษตรกรรมที่ตั้งอยู่บริเวณคลองน้ำฮวย ตำบลเขาหลวง อำเภอวังสะพุง จังหวัดเลย โดยแสดงตำแหน่งได้จากแผนที่ ดังรูปที่ 4–3 ซึ่งสอดคล้องกับหัวข้อพิจารณาต่าง ๆ ได้แก่

1) ด้านภูมิประเทศ พื้นที่ศึกษามีลักษณะเป็นที่ราบลุ่ม ที่อยู่ระหว่างเนินเขาทั้ง 2 ด้าน ทำให้ได้ลักษณะพื้นที่ที่แตกต่างกัน 2 แบบ คือ บริเวณที่ราบลุ่มและบริเวณที่เนินเขา

2) ด้านการใช้พื้นที่ ในพื้นที่ศึกษาเป็นพื้นที่เกษตรกรรมที่มีการปลูกข้าวในบริเวณที่ราบลุ่มและปลูกยางพาราในบริเวณที่เนินเขา ซึ่งเป็น 2 พื้นที่ที่มีการใช้ประโยชน์ทางด้านเกษตรกรรมที่แตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัด

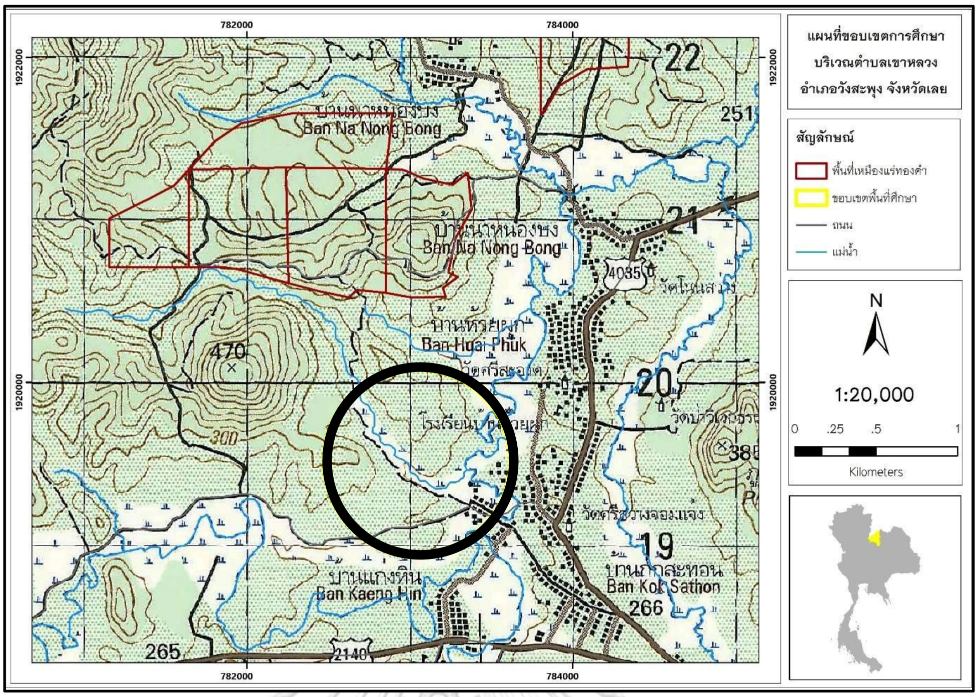
3) ด้านข้อมูลสารหนู จากการพิจารณาข้อมูลในแผนที่แสดงความเข้มข้นของสารหนูเชิงพื้นที่ในรูปที่ 4–4 พบว่าพื้นที่บริเวณนี้มีความเข้มข้นของสารหนูในดินสูงกว่าบริเวณอื่น ๆ ซึ่งมีค่าอยู่ในช่วง 13.5–94.4 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม (จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2555)



รูปที่ 4-1 ลักษณะของพื้นที่ ประกอบด้วยพื้นที่ราบลุ่มสลับกับพื้นที่เนินเขา

รูปที่ 4-2 การใช้ประโยชน์ที่ดินในการทำเกษตรกรรมต่าง ๆ ในพื้นที่

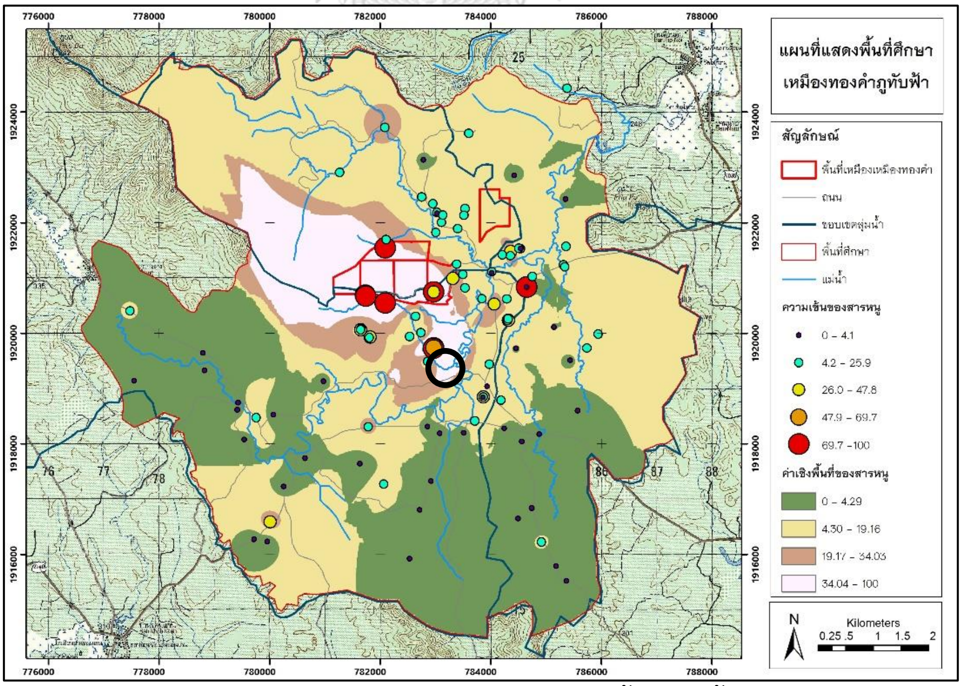
เช่น ข้าว ยางพารา อ้อย และถั่วเหลือง เป็นต้น



รูปที่ 4-3 แผนที่แสดงขอบเขตพื้นที่เกษตรกรรมที่ทำการศึกษา

บริเวณคลองน้ำฮวย ตำบลเขาหลวง อำเภอวังสะพุง จังหวัดเลย

ที่มา: (จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2555)



รูปที่ 4-4 แผนที่แสดงความเข้มข้นของสารหนูเชิงพื้นที่ ในพื้นที่เกษตรกรรม

บริเวณคลองน้ำฮวย ตำบลเขาหลวง อำเภอวังสะพุง จังหวัดเลย

ที่มา: (จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2555)

4.2 ผลการศึกษาดินในนาข้าวและเนินเขาในสภาพพื้นที่จริง (Field condition)

4.2.1 คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของดิน

หากพิจารณาลักษณะของพื้นที่ ในบริเวณพื้นที่ราบลุ่ม (ดินนาข้าว) คาดการณ์ว่าพื้นที่ดังกล่าวเป็นบริเวณที่มีน้ำขัง และอาจเกิดการหมักหมมของอินทรียวัตถุในดิน ประกอบกับการที่ออกซิเจนไม่สามารถส่งผ่านลงมาใต้ดินได้เพียงพอจนมีค่าอีเอชต่ำ จนมีสารอื่นเป็นตัวรับอิเล็กตรอนแทน ซึ่งครอบคลุมตั้งแต่ ไนเตรท แมงกานีส เฟอร์ริค ไปจนถึงซัลเฟต โดยดินบริเวณพื้นที่ราบลุ่มที่เพาะปลูกนาข้าวที่อาจมีค่าอีเอชต่ำได้ถึง 0 มิลลิโวลต์ได้ (Gotoh and Yamashita, 1966) ซึ่งอาจทำให้องค์ประกอบทางเคมีของดินต่างจากดินทั่วไป ส่วนในบริเวณพื้นที่เนินเขา (ดินปลูกยางพารา) คาดการณ์ว่าเป็นบริเวณที่ไม่มีน้ำขัง น่าจะมีการสัมผัสกับอากาศ มีออกซิเจนเพียงพอ และมีค่าอีเอชที่ค่อนข้างสูง จึงคาดการณ์ว่าตัวอย่างดินใน 2 พื้นที่ดังกล่าวน่าจะมีความแตกต่างกันในเรื่องขององค์ประกอบของดิน รวมถึงการกระจายสัดส่วนของสารหนูในดิน อีกทั้งเมื่อพิจารณาถึงความแตกต่างของฤดูกาล ซึ่งคาดการณ์ว่าจะมีผลต่อคุณสมบัติทั้งทางกายภาพและทางเคมีของดิน รวมถึงทำให้การกระจายสัดส่วนของสารหนูในดินเปลี่ยนแปลงไป โดยผลการวิเคราะห์คุณสมบัติของดินทั้งทางกายภาพและทางเคมีของตัวอย่างดิน จะแสดงในตารางที่ 4-1 ทั้งนี้ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติของดินทั้งทางกายภาพและทางเคมีของตัวอย่างดินทั้ง 3 ซ้ำ จะแสดงในตารางที่ ก-1

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตารางที่ 4-1 คุณสมบัติของดินทั้งทางกายภาพและทางเคมีที่เกี่ยวข้อง

(ก) แสดงคุณสมบัติทั้งทางกายภาพและทางเคมีของดินบริเวณที่ราบลุ่มในฤดูร้อน (ข) แสดงคุณสมบัติทั้งทางกายภาพและทางเคมีของดินบริเวณที่ราบลุ่มในฤดูฝน (ค) แสดงคุณสมบัติทั้งทางกายภาพและทางเคมีของดินบริเวณที่เนินเขาในฤดูร้อน และ (ง) แสดงคุณสมบัติทั้งทางกายภาพและทางเคมีของดินบริเวณที่เนินเขาในฤดูฝน

(ก) คุณสมบัติทั้งทางกายภาพและทางเคมีของดินบริเวณที่ราบลุ่มในฤดูร้อน

ตัวอย่างดิน	ลักษณะเนื้อดิน	ค่าพีเอช	ปริมาณอินทรียวัตถุในดิน (ร้อยละ)	ค่าอีเอช (มิลลิโวลต์)	ปริมาณเหล็กทั้งหมดในดิน (มก./กก.)	ปริมาณสารหนูทั้งหมดในดิน (มก./กก.)
A3	ดินเหนียว	4.71±0.02	2.04	+679±23.45	40,773±3,983	35.07±4.78
A4	ดินร่วนเหนียว	4.72±0.08	1.96	+670±22.51	21,833±619	26.60±1.44
A5	ดินร่วนเหนียว	6.03±0.13	2.01	+546±4.66	23,367±1,312	15.83±0.54
B3	ดินร่วนเหนียว	4.71±0.09	1.89	+642±4.30	19,090±1,315	32.07±1.06
B4	ดินเหนียว	3.73±0.13	2.28	+666±5.51	23,030±2,095	36.64±0.76
B5	ดินเหนียว	3.36±0.02	2.34	+697±21.40	22,559±226	19.95±0.15
ค่าเฉลี่ย±SD		4.43±0.95	2.09±0.18	+650±53.89	25,109±7,825	27.69±8.43

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

(ข) คุณสมบัติทั้งทางกายภาพและทางเคมีของดินบริเวณที่ราบลุ่มในฤดูฝน

ตัวอย่างดิน	ลักษณะเนื้อดิน	ค่าพีเอช	ปริมาณอินทรียวัตถุในดิน (ร้อยละ)	ค่าอีเอช (มิลลิโวลต์)	ปริมาณเหล็กทั้งหมดในดิน (มก./กก.)	ปริมาณสารหนูทั้งหมดในดิน (มก./กก.)
A3	ดินเหนียว	5.28±0.01	2.60	+615±9.24	33,127±1,556	40.95±0.61
A4	ดินร่วนเหนียว	6.00±0.02	2.07	+560±1.80	27,203±2,067	36.59±2.75
A5	ดินร่วนเหนียว	6.33±0.01	2.36	+544±0.64	34,583±1,084	19.26±0.76
B3	ดินร่วนเหนียว	5.59±0.06	2.18	+676±9.40	29,557±1,319	48.65±0.47
B4	ดินเหนียว	5.93±0.16	2.31	+595±12.75	22,940±1,954	35.14±1.46
B5	ดินเหนียว	5.86±0.01	2.58	+581±27.47	28,613±1,646	21.77±0.34
ค่าเฉลี่ย±SD		5.83±0.36	2.35±0.21	+595±46.98	29,337±4,194	33.73±11.29

ตารางที่ 4-1 คุณสมบัติของดินทั้งทางกายภาพและทางเคมีที่เกี่ยวข้อง
(ก) แสดงคุณสมบัติทั้งทางกายภาพและทางเคมีของดินบริเวณที่ราบลุ่มในฤดูร้อน (ข) แสดงคุณสมบัติทั้งทางกายภาพและทางเคมีของดินบริเวณที่ราบลุ่มในฤดูฝน (ค) แสดงคุณสมบัติทั้งทางกายภาพและทางเคมีของดินบริเวณที่เนินเขาในฤดูร้อน และ (ง) แสดงคุณสมบัติทั้งทางกายภาพและทางเคมีของดินบริเวณที่เนินเขาในฤดูฝน (ต่อ)

(ค) คุณสมบัติทั้งทางกายภาพและทางเคมีของดินบริเวณที่เนินเขาในฤดูร้อน

ตัวอย่างดิน	ลักษณะเนื้อดิน	ค่าพีเอช	ปริมาณอินทรียวัตถุในดิน (ร้อยละ)	ค่าอีเอช (มิลลิโวลต์)	ปริมาณเหล็กทั้งหมดในดิน (มก./กก.)	ปริมาณสารหนูทั้งหมดในดิน (มก./กก.)
C1	ดินร่วนเหนียว	5.47±0.07	3.77	+586±28.29	24,403±5,300	8.71±1.77
C2	ดินร่วนเหนียว	4.93±0.05	2.17	+715±8.45	40,767±10,104	11.51±2.21
C3	ดินเหนียว	5.15±0.03	3.67	+657±25.99	45,903±8,262	11.56±2.00
C4	ดินเหนียว	4.83±0.02	2.47	+647±9.08	34,743±5,958	11.25±2.17
C5	ดินร่วนเหนียว	5.11±0.07	2.54	+663±12.21	42,637±275	6.32±0.19
C6	ดินเหนียว	4.80±0.03	2.46	+662±17.80	43,447±1,914	7.95±0.52
D1	ดินร่วน	5.63±0.03	1.75	+537±6.28	17,350±2,666	28.81±0.13
D2	ดินร่วน	5.89±0.15	2.22	+618±20.78	17,553±1,975	13.10±0.60
D3	ดินร่วนเหนียว	5.22±0.02	2.56	+644±7.93	37,900±2,395	11.54±1.08
D4	ดินร่วนเหนียว	5.02±0.02	2.38	+687±16.51	49,837±5,180	12.56±0.40
ค่าเฉลี่ย±SD		5.21±0.36	2.60±0.64	+639±51.62	35,454±11,722	12.33±6.18

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ 4-1 คุณสมบัติของดินทั้งทางกายภาพและทางเคมีที่เกี่ยวข้อง

(ก) แสดงคุณสมบัติทั้งทางกายภาพและทางเคมีของดินบริเวณที่ราบลุ่มในฤดูร้อน (ข) แสดงคุณสมบัติทั้งทางกายภาพและทางเคมีของดินบริเวณที่ราบลุ่มในฤดูฝน (ค) แสดงคุณสมบัติทั้งทางกายภาพและทางเคมีของดินบริเวณที่เนินเขาในฤดูร้อน และ (ง) แสดงคุณสมบัติทั้งทางกายภาพและทางเคมีของดินบริเวณที่เนินเขาในฤดูฝน (ต่อ)

(ง) คุณสมบัติทั้งทางกายภาพและทางเคมีของดินบริเวณที่เนินเขาในฤดูฝน

ตัวอย่างดิน	ลักษณะเนื้อดิน	ค่าพีเอช	ปริมาณอินทรียวัตถุในดิน (ร้อยละ)	ค่าอีเอช (มิลลิโวลต์)	ปริมาณเหล็กทั้งหมดในดิน (มก./กก.)	ปริมาณสารหนูทั้งหมดในดิน (มก./กก.)
C1	ดินร่วนเหนียว	5.27±0.01	3.39	+659±11.79	39,643±2,774	8.92±2.04
C2	ดินร่วนเหนียว	4.99±0.07	3.00	+698±10.71	34,680±2,667	7.73±0.52
C3	ดินเหนียว	3.69±0.22	3.07	+685±20.70	43,537±5,231	10.9±1.75
C4	ดินเหนียว	5.17±0.04	3.64	+678±4.21	27,497±11,449	10.74±2.47
C5	ดินร่วนเหนียว	5.35±0.15	1.92	+603±9.36	30,360±10,804	9.99±0.57
C6	ดินเหนียว	5.8±0.09	2.92	+625±7.71	25,307±1,465	8.59±0.42
D1	ดินร่วน	5.73±0.10	1.65	+625±9.05	33,190±3,217	17.98±2.40
D2	ดินร่วน	4.71±1.17	1.66	+651±5.37	32,337±1,827	13.01±1.23
D3	ดินร่วนเหนียว	6.32±0.06	2.31	+629±7.23	15,783±769	23.83±3.37
D4	ดินร่วนเหนียว	5.79±0.08	2.96	+630±4.33	11,887±945	11.33±0.96
ค่าเฉลี่ย±SD		5.28±0.73	2.65±0.72	+648±31.05	29,422±9,827	12.30±4.97

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

4.2.1.1 เนื้อดิน

ดินบริเวณพื้นที่ราบลุ่ม มีลักษณะเนื้อดินที่พบ คือ ดินเหนียวและดินร่วนเหนียว ดินบริเวณที่เนินเขามีลักษณะเนื้อดินที่พบส่วนใหญ่ คือ ดินร่วนเหนียว รองลงมาคือดินเหนียว และพบดินร่วนในบางจุด โดยรวมแล้วดินบริเวณพื้นที่ราบลุ่มและเนินเขามีลักษณะดินที่คล้ายคลึงกัน

4.2.1.2 พีเอช

เมื่อพิจารณาผลของฤดูกาลกับพีเอช พบว่า ค่าพีเอชของดินบริเวณที่ราบลุ่มไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p>0.05$) ดังแสดงในตารางที่ ฉ-5 ซึ่งดินในฤดูร้อนมีค่าพีเอชเฉลี่ยคือ 4.43±0.95 ในขณะที่ดินในฤดูฝนมีค่าพีเอชเฉลี่ยคือ 5.83±0.36 จะเห็นว่าดินบริเวณพื้นที่ราบลุ่มทั้ง 2 ฤดูกาลมีค่าพีเอชเป็นกรด ส่วนค่าพีเอชของดินบริเวณเนินเขาพบว่าไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p>0.05$) เช่นกัน ดังแสดงในตารางที่ ฉ-5 ซึ่งดินเนินเขาที่เก็บในฤดูร้อนมีค่าพีเอชเฉลี่ย 5.21±0.36 ส่วนในฤดูฝนมีค่าพีเอชเฉลี่ย 5.28±0.73

เมื่อพิจารณาผลของลักษณะพื้นที่ต่อค่าพีเอช พบว่า ในฤดูร้อนมีค่าพีเอชไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p>0.05$) ดังแสดงในตารางที่ ฉ-6 โดยมีค่าพีเอชเฉลี่ย 4.92±0.72 ส่วนในฤดูฝนมีค่าพีเอชไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p>0.05$) เช่นเดียวกัน ดังแสดงในตารางที่ ฉ-6 โดยมีค่าพีเอชเฉลี่ย 5.49±0.66

จากการข้อมูลข้างต้นพบว่าทั้งลักษณะพื้นที่และฤดูกาลไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงพีเอชอย่างมีนัยสำคัญ โดยดินในพื้นที่ศึกษามีพีเอชเป็นกรดซึ่งคาดว่าเป็นลักษณะตามธรรมชาติของดินในพื้นที่ ซึ่งจากข้อมูลชุดดินจะเห็นได้ว่าดินในพื้นที่มีความเป็นกรดตามลักษณะทางธรรมชาติ โดยบริเวณพื้นที่ศึกษาสามารถแบ่งกลุ่มชุดดินออกเป็น 3 กลุ่ม ได้แก่ กลุ่มชุดดินที่ 7 กลุ่มชุดดินที่ 31 และกลุ่มชุดดินที่ 62 โดยมีรายละเอียดดังนี้

- กลุ่มชุดดินที่ 7 หรือกลุ่มชุดดินท่าตูม (Tha Tum: Tt) เป็นดินนาที่เกิดจากตะกอนน้ำพัดพามาทับถมกันในบริเวณที่ราบ ดินชั้นบนเป็นดินร่วนหรือดินร่วนเหนียว ดินเป็นกรดเล็กน้อย (ค่าพีเอชอยู่ในช่วง 5–6) ส่วนดินชั้นล่างเป็นดินเหนียวสีเทา พบจุดประสีน้ำตาลเข้มและแดง ดินเป็นกรด (ค่าพีเอชอยู่ในช่วง 4.5–5) ดินมีการระบายน้ำค่อนข้างเลว มักใช้ประโยชน์ในการปลูกข้าว

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

- กลุ่มชุดดินที่ 31 หรือกลุ่มชุดดินเลย (Loei series: Lo) เป็นชุดดินที่เกิดจากการสลายตัวผุพังอยู่กับที่หรือเป็นเศษหินเชิงเขาของหินแกรนิต ดินชั้นบนเป็นดินเหนียวหรือดินร่วนปนดินเหนียว สีน้ำตาลเข้ม ดินเป็นกรดเล็กน้อย (ค่าพีเอชอยู่ในช่วง 6–6.5) ดินชั้นล่างเป็นดินเหนียวสีน้ำตาลปนแดง อาจพบเหล็กและแมงกานีสสะสมในดินชั้นล่าง ดินเป็นกรดเล็กน้อย (ค่าพีเอชอยู่ในช่วง 5–6) ดินมีการระบายน้ำดี มีความอุดมสมบูรณ์ปานกลาง ดินชุดนี้มีความเหมาะสมกับการปลูกพืชไร่ จำพวกอ้อย มันสำปะหลัง ยางพารา
- กลุ่มชุดดินที่ 62 หรือกลุ่มชุดดินพื้นที่ลาดชันเชิงซ้อน (Slope complex: Sc) พื้นที่บริเวณนี้ยังไม่มีการสำรวจและจำแนกดิน เนื่องจากสภาพพื้นที่มีความลาดชันสูง (มากกว่าร้อยละ 35) ไม่เหมาะสมสำหรับการปลูกพืชเนื่องจากอาจเกิดการชะล้างพังทลายของหน้าดิน

นอกจากนี้ ปริมาณอินทรียวัตถุในดินส่งผลให้เกิดกิจกรรมของจุลินทรีย์ในดิน ทำให้เกิดกรดอินทรีย์ประเภทต่าง ๆ หลายชนิด เช่น กลุ่มคาร์บอกซิล ฟีนอล อีนอล และแอลกอฮอล์ เป็นต้น ซึ่งกลุ่มฟังก์ชันเนล (Functional group) ของอินทรียสารเหล่านี้สามารถปลดปล่อยไฮโดรเจนไอออนออกมาได้ ทั้งนี้ การย่อยสลายดังกล่าวยังมีก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดจากกระบวนการหายใจของสิ่งมีชีวิตในดิน ซึ่งคาร์บอนไดออกไซด์ในดินจะไปทำปฏิกิริยาทางเคมีกับน้ำและส่งผลให้ดินมีความเป็นกรด (คณาจารย์ภาควิชาปฐพีวิทยา, 2541) ส่วนดินในฤดูฝนมีพีเอชเฉลี่ยสูงกว่าดินในฤดูร้อนนั้นอาจเกิดจากการที่น้ำฝนสามารถชะละลายความเป็นกรดของดินออกไป ส่งผลให้ดินมีความเป็นกรดลดลงชั่วคราว

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

สำหรับค่าพีเอชที่มีความเหมาะสมต่อการปลูกข้าว (สถาบันวิจัยข้าว, 2547) ได้ให้ข้อมูลค่าพีเอชที่เหมาะสมกับการปลูกข้าวว่าควรมีค่าตั้งแต่ 5.5 ถึง 6 ซึ่งเป็นค่าที่ใกล้เคียงกับข้อมูลของ Prakongkep et al. (2008) ที่กล่าวว่าค่าพีเอชที่เหมาะสมกับการปลูกข้าวในภาคกลางของประเทศไทย ซึ่งดินชั้นบน (Top soil) และดินชั้นล่าง (Sub soil) ควรมีค่าพีเอชประมาณ 6.0±1.0 และ 6.4±1.1 ตามลำดับ โดยพบว่าดินบริเวณที่ราบลุ่มในพื้นที่ศึกษามีค่าพีเอชเฉลี่ยเท่ากับ 5.13±1.00 ซึ่งเป็นค่าที่เหมาะสมต่อการเพาะปลูกข้าว นอกจากนี้ ทัศนีย์ อัตตะนันทน์ (2550) ได้อธิบายว่าค่าพีเอชที่เหมาะสมกับการปลูกข้าว คือ 6.6 เพราะว่าที่ค่าพีเอชดังกล่าวจุลินทรีย์จะย่อยสลายอินทรียวัตถุรวมถึงปลดปล่อยไนโตรเจนและฟอสฟอรัสออกมาได้มาก ส่วนค่าพีเอชที่เหมาะสมกับการปลูก

ยางพาราจากข้อมูลของ (สถาบันวิจัยข้าว, 2547) กล่าวว่าควรมีค่าตั้งแต่ 4.5 ถึง 5.4 ซึ่งดินบริเวณเนินเขามีค่าพีเอชเฉลี่ยเท่ากับ 5.24±0.56 ซึ่งถือว่าอยู่ในช่วงค่าที่เหมาะสมต่อการปลูกยางพารา

4.2.1.3 ปริมาณอินทรียวัตถุในดิน

ในดินบริเวณที่ราบลุ่ม พบว่าปริมาณอินทรียวัตถุในดินในทั้ง 2 ฤดูกาลมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p<0.05$) ดังแสดงในตารางที่ ฉ-5 โดยในฤดูร้อนมีปริมาณอินทรียวัตถุในดินเฉลี่ยร้อยละ 2.09±0.18 น้อยกว่าดินในฤดูฝนที่มีปริมาณอินทรียวัตถุเฉลี่ยร้อยละ 2.35±0.21 โดยเมื่อเปรียบเทียบกับปริมาณอินทรียวัตถุในดินนาข้าวภาคกลางของประเทศไทย พบว่าปริมาณอินทรียวัตถุในดินนาข้าวที่ศึกษานั้นมีค่าต่ำกว่าดินนาข้าวในภาคกลางเล็กน้อย ซึ่งมีค่าอยู่ในช่วงร้อยละ 2.80±1.50 (Intorpetch et al., 2014) สำหรับดินบริเวณที่เนินเขาทั้งในฤดูร้อนและฤดูฝน พบว่าไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p>0.05$) ดังแสดงในตารางที่ ฉ-5 ซึ่งในฤดูร้อนมีปริมาณอินทรียวัตถุเฉลี่ยเท่ากับร้อยละ 2.60±0.64 ส่วนในฤดูฝนมีค่าเฉลี่ยเท่ากับร้อยละ 2.65±0.72

เมื่อพิจารณาผลของลักษณะพื้นที่ต่อปริมาณอินทรียวัตถุในดิน พบว่าในฤดูร้อนมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p<0.05$) ดังแสดงในตารางที่ ฉ-6 โดยดินบริเวณที่ราบลุ่มมีปริมาณอินทรียวัตถุในดินเฉลี่ยร้อยละ 2.09±0.18 น้อยกว่าดินบริเวณเนินเขาที่มีปริมาณอินทรียวัตถุในดินเฉลี่ยร้อยละ 2.60±0.64 ส่วนในฤดูฝนพบว่าทั้งสองพื้นที่ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p>0.05$) ดังแสดงในตารางที่ ฉ-6 ซึ่งมีปริมาณอินทรียวัตถุในดินเฉลี่ยร้อยละ 2.54±0.59

ดินบริเวณที่ราบลุ่มในพื้นที่ศึกษามีปริมาณอินทรียวัตถุเฉลี่ยเท่ากับร้อยละ 2.22±0.23 ซึ่งสำหรับการใช้ทำนาถือว่าเป็นดินนาที่มีความอุดมสมบูรณ์สูง เนื่องจากมีปริมาณอินทรียวัตถุมากกว่าร้อยละ 2 (สถาบันวิจัยข้าว, 2547) เหมาะสมต่อการปลูกข้าว ส่วนปริมาณอินทรียวัตถุบริเวณเนินเขามีปริมาณอินทรียวัตถุเฉลี่ยเท่ากับร้อยละ 2.63±0.66 ถือว่ามีความอุดมสมบูรณ์สูงเช่นกัน และการที่ดินในพื้นที่ศึกษามีปริมาณอินทรียวัตถุสูงนั้นเนื่องมาจากในบริเวณพื้นที่ศึกษาพบเศษซากใบไม้ทับถมกันเป็นจำนวนมาก ซึ่งบางส่วนอาจสลายตัวเป็นฮิวมัสแล้ว หรือบางส่วนกำลังสลายตัว ถือเป็นแหล่งที่มาของอินทรียวัตถุในดิน (คณาจารย์ภาควิชาปฐพีวิทยา, 2541) นอกจากนี้ ยังมีผลจากการเติมปุ๋ยหมัก การพัดพา รวมถึงผลจากการไถกลบภายหลังจากการเก็บเกี่ยวผลผลิตในช่วงก่อนที่จะปลูกข้าวในช่วงฤดูฝน ทำให้เกิดกระบวนการย่อยสลายในดินซึ่งจะกลายเป็นแหล่งของอินทรียวัตถุและธาตุอาหารในดินเช่นกัน

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

4.2.1.4 ค่าอีเอช

เมื่อพิจารณาผลของฤดูกาลกับค่าอีเอช พบว่า ค่าอีเอชของตัวอย่างดินจากบริเวณพื้นที่ราบลุ่มในฤดูฝนมีค่าเฉลี่ยต่ำกว่าในฤดูร้อนแต่ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p>0.05$) ดังแสดงในตารางที่ ฉ-5 โดยในฤดูร้อนมีค่าอีเอชเฉลี่ย +650±53.89 มิลลิโวลต์ และในฤดูฝนมีค่าเฉลี่ย +595±46.98 มิลลิโวลต์ สำหรับค่าอีเอชในดินเนินเขาพบว่าทั้ง 2 ฤดูกาลไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p>0.05$) ดังแสดงในตารางที่ ฉ-5 โดยในฤดูร้อนมีค่าอีเอชเฉลี่ย +639±51.62 มิลลิโวลต์ ส่วนในฤดูฝนมีค่าอีเอชเฉลี่ย +648±31.05 มิลลิโวลต์ ซึ่งเป็นค่าที่สูง และมีออกซิเจนเป็นตัวรับอิเล็กตรอนในดิน

เมื่อพิจารณาในเชิงพื้นที่ พบว่าในฤดูร้อนมีค่าอีเอชไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p>0.05$) ซึ่งมีค่าอีเอชเฉลี่ยอยู่ที่ +643±50.97 มิลลิโวลต์ ดังแสดงในตารางที่ ฉ-6 แต่ในฤดูฝนพบว่าค่าอีเอชของพื้นที่ราบลุ่มและเนินเขามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p<0.05$) ดังแสดงในตารางที่ ฉ-6 ซึ่งดินบริเวณที่ราบลุ่มมีค่าอีเอชเฉลี่ยอยู่ที่ +595±46.98 มิลลิโวลต์ ต่ำกว่าดินบริเวณเนินเขามีค่าอีเอชเฉลี่ยอยู่ที่ +648±31.05 มิลลิโวลต์ การที่ในดินที่ราบลุ่มที่เก็บในฤดูฝนมีค่าอีเอชต่ำกว่าดินเนินเขาที่เก็บในฤดูฝนอาจเนื่องมาจากบริเวณที่เนินเขามีลักษณะเป็นที่ลาด หน้าดินตื้น ดินมักมีอากาศถ่ายเทได้ดีกว่าดินบริเวณที่ราบลุ่ม จึงส่งผลให้มีออกซิเจนเป็นตัวรับอิเล็กตรอนมากกว่าดินบริเวณที่ราบลุ่ม อีกทั้งยังพบว่าบริเวณที่ราบลุ่มมีน้ำตื้น ๆ ไหลปกคลุมดิน อาจส่งผลให้ออกซิเจนถ่ายเทได้ยากกว่า ดินบริเวณที่ราบลุ่มจึงมีค่าอีเอชต่ำกว่าดินบริเวณเนินเขาในฤดูฝน

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

จากข้อมูลดังกล่าว ค่าอีเอชที่ตรวจวัดได้ทั้งหมดเป็นค่าที่สูง (ค่าอีเอชมากกว่า +400 มิลลิโวลต์) บ่งชี้ว่ามีออกซิเจนเป็นตัวรับอิเล็กตรอนในดิน (Mitsch and Gosselink, 2015) ทั้งนี้ เมื่อพิจารณาค่าอีเอชจากข้อมูลดินนาข้าวโดยทั่วไป พบว่าในสภาวะดินแห้งหรือดินที่ไม่มีน้ำขัง ดินนาข้าวจะมีค่าอีเอชได้ถึงสูงกว่า +500 มิลลิโวลต์ ในขณะที่ในสภาวะดินเปียกหรือดินที่อยู่สภาวะไร้อากาศ ค่าอีเอชของดินจะมีค่าลดลงจนต่ำกว่า 0 มิลลิโวลต์ได้ (Yu et al., 2016)

ซึ่งจะเห็นได้ว่าค่าอีเอชในพื้นที่ศึกษาสูงกว่าในพื้นที่นาข้าวโดยทั่วไปมาก เมื่อพิจารณาจากการออกภาคสนามพบว่าน้ำในนาข้าวในฤดูฝนในพื้นที่ศึกษามีลักษณะเป็นน้ำที่ไหลผ่านมาจากร่องเขาโดยเป็นน้ำตื้น ๆ ที่ไหลผ่านนาข้าวตลอดฤดูกาล อาจเป็นเหตุที่ทำให้ดินในพื้นที่ไม่ขาดออกซิเจน ซึ่งแตกต่างจากดินที่มีการเพาะปลูกข้าวโดยทั่วไปที่พบว่าร้อยละ 80 ของการปลูกข้าวจะปลูกในบริเวณที่

มีน้ำขังในปริมาณที่มากพอจนทำให้ดินขาดออกซิเจน ส่งผลให้ค่าอีเอชเป็นลบ จนเกิด AVS และมีเทน (Yu et al., 2016)

4.2.1.5 AVS

จากข้อมูลค่าอีเอชที่ตรวจวัดได้ทั้งหมดเป็นค่าที่สูง (ค่าอีเอชมากกว่า +400 มิลลิโวลต์) บ่งชี้ว่ามีออกซิเจนเป็นตัวรับอิเล็กตรอนในดิน สอดคล้องกับการที่ตรวจไม่พบ AVS ในดิน (LOD=200 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม) ซึ่งโดยปกติจะพบ AVS ที่ค่าอีเอชน้อยกว่า –100 มิลลิโวลต์หรือในสภาวะที่ดินไร้ออกซิเจน (Mitsch and Gosselink, 2015) นอกจากนี้ ยังพบว่าสีของตัวอย่างดินมีสีน้ำตาล ไม่พบสีดำ จึงไม่เกิดสภาวะไร้อากาศในบริเวณพื้นที่ศึกษา

4.2.1.6 ความเข้มข้นของเหล็ก

สำหรับผลของฤดูกาลพบว่า ทั้งในพื้นที่ราบลุ่มและพื้นที่เนินเขา ความเข้มข้นของเหล็กที่พบในระหว่าง 2 ฤดูกาลไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p>0.05$) ส่วนในเชิงพื้นที่ความเข้มข้นของเหล็กทั้ง 2 พื้นที่ก็ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p>0.05$) เช่นเดียวกัน ดังแสดงในตารางที่ ฉ-5 โดยในบริเวณพื้นที่ราบลุ่มมีความเข้มข้นของเหล็กเฉลี่ยจากข้อมูลทั้งหมด 27,223±6,380 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม และพื้นที่เนินเขามีความเข้มข้นของเหล็กเฉลี่ยจากข้อมูลทั้งหมด 32,438±10,973 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ทั้งนี้ ค่าความเข้มข้นของเหล็กในดินประเทศไทยมีค่าอยู่ในช่วง 2,100–67,300 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม (Prakongkep et al., 2008) สำหรับค่าความเข้มข้นของเหล็กในดินทั่วโลกมีค่าอยู่ในช่วง 2,000–55,000 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม (Essington, 2004; Kabata-Pendias, 2001)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

4.2.1.7 ความเข้มข้นของสารหนู

ความเข้มข้นของสารหนูทั้งหมดที่พบในดินนาข้าวทั้ง 2 ฤดูกาล พบว่าไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p>0.05$) ดังแสดงในตารางที่ ฉ-5 โดยในฤดูร้อนมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 27.69±8.43 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ส่วนในฤดูฝนมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 33.73±11.29 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม เช่นเดียวกับตัวอย่างดินจากเนินเขาที่มีความเข้มข้นของสารหนูทั้ง 2 ฤดูกาล ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p>0.05$) โดยในฤดูร้อนมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 12.32±6.18 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ส่วนในฤดูฝนมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 12.30±4.97 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม

ทั้งนี้ เมื่อพิจารณาค่าความเข้มข้นของสารหนูในดินบริเวณที่ราบลุ่มและที่เนินเขาพบว่าค่าความเข้มข้นของสารหนูมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p<0.05$) ดังแสดงในตารางที่ ฉ-6 โดยพบว่าดินบริเวณพื้นที่ราบลุ่มมีความเข้มข้นของสารหนูเฉลี่ยเท่ากับ 30.71±10.01 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ซึ่งมากกว่าดินบริเวณพื้นที่เนินเขาที่มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 12.32±5.46 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม

เมื่อพิจารณาว่าดินเนินเขาเป็นดินที่ไม่ถูกรบกวนจากการพัดพาสะสมจากตะกอนดิน ค่าความเข้มข้นสารหนูที่ตรวจพบมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 12.32±5.46 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ซึ่งน่าจะเป็นค่าพื้นฐานของดินในบริเวณดังกล่าว สอดคล้องกับการศึกษาของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย (2555) ที่พบว่าความเข้มข้นพื้นฐานของสารหนูในพื้นที่ดังกล่าวมีค่าตั้งแต่ 0–13.5 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม โดยค่านี้สูงเกินกว่าค่ามาตรฐานของสารหนูในดินที่ใช้ประโยชน์เพื่อการอยู่อาศัยและเกษตรกรรม คือไม่เกิน 3.9 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม แต่ไม่เกินมาตรฐานของสารหนูในดินเพื่อการอื่นนอกเหนือจากการอยู่อาศัยและเกษตรกรรมคือไม่เกิน 27 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม

ทั้งนี้ มีการศึกษาถึงระดับเกณฑ์พื้นฐานของสารหนูของประเทศไทย 2 การศึกษา ได้แก่ 1) การศึกษาที่ประเทศไทยทำร่วมกับออสเตรเลีย (Zarcinas et al., 2004) ซึ่งมีการเก็บตัวอย่างดินในบริเวณพื้นที่เกษตรกรรมทั่วประเทศไทย จำนวน 318 ตัวอย่าง และ 2) การศึกษาของกรมพัฒนาที่ดิน (สำนักวิทยาศาสตร์เพื่อการพัฒนาที่ดิน, 2552) ซึ่งมีการเก็บตัวอย่างดินในบริเวณพื้นที่เกษตรกรรมทั่วประเทศไทย จำนวน 3,186 ตัวอย่าง โดยทั้ง 2 การศึกษานี้ได้ทำการศึกษาและวิเคราะห์ถึงค่าพื้นฐานของสารหนูในประเทศไทยจากตัวอย่างดินในพื้นที่เกษตรกรรมที่เก็บมาในข้างต้น ซึ่งสามารถนำมาสรุปได้เป็นค่าพื้นฐานของสารหนูอยู่ที่ไม่เกิน 30 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ซึ่งค่าที่ได้ถือว่าเป็นค่าที่สูง ซึ่งกรมพัฒนาที่ดินได้ให้ข้อมูลว่าเกิดจากการที่มีสายแร่ที่มีสารหนูปะปนอยู่หลายแห่งในประเทศไทย ดังนั้นดินในประเทศไทยหลายแห่งจึงมีค่าเกินมาตรฐาน ซึ่งค่าความเข้มข้นสารหนูที่มีค่าสูงเกินค่ามาตรฐานนั้นก็เป็นผลมาจากลักษณะทางธรรมชาติของพื้นที่ศักยภาพแหล่งแร่ อีกทั้งสารหนูยังเป็นองค์ประกอบของหินและแร่ตามธรรมชาติ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

4.2.1.7 สรุปคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของดิน

โดยสรุป หากพิจารณาในเรื่องความแตกต่างของฤดูกาล พบว่าไม่ส่งผลกระทบต่อดัชนีต่าง ๆ ที่ตรวจวัดในดินจากบริเวณเนินเขา ส่วนในที่ราบลุ่มมีความแตกต่างกันเล็กน้อยในเรื่องของปริมาณอินทรียวัตถุซึ่งอาจเกิดจากการปรับปรุงดิน หรือการชะเอาใบไม้ลงมาจากเนินเขาข้าง ๆ มาสะสมใน

ดินที่ราบ หากพิจารณาในเรื่องความแตกต่างของพื้นที่ ค่าความเข้มข้นของสารหนูในพื้นที่ราบลุ่มมีค่าสูงกว่าพื้นที่เนินเขาอย่างชัดเจน โดยเป็นที่น่าสังเกตว่าค่าอีเอชจากตัวอย่างทั้งหมดมีค่ามากกว่า +500 มิลลิโวลต์ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าไม่เกิดภาวะไร้อากาศ แม้ในนาข้าวในฤดูฝนที่ดินอยู่ใต้ผิวน้ำ อันเป็นลักษณะเฉพาะของพื้นที่ตรงนี้ดังที่อภิปรายไว้ข้างต้น โดยในฤดูฝนจะพบว่าค่าอีเอชในพื้นที่ราบลุ่มมีค่าต่ำกว่าพื้นที่เนินเขาเพียงเล็กน้อย และดินในพื้นที่มีพีเอชเป็นกรดซึ่งมีค่าพีเอชประมาณ 5

4.2.2 การศึกษาชีวปริมาณออกฤทธิ์ของสารหนูในดินโดยการสกัดด้วย EDTA

เมื่อพิจารณาถึงความแตกต่างของฤดูกาล พบว่า

1) ชีวปริมาณออกฤทธิ์ของสารหนูในดินบริเวณพื้นที่ราบลุ่มทั้ง 2 ฤดูกาล มีค่าที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p<0.05$) ดังแสดงในตารางที่ ฉ-7 โดยบริเวณพื้นที่ราบลุ่มในฤดูร้อนมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 2.38±0.78 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม (เฉลี่ยร้อยละ 7.60±3.56) ซึ่งมีค่ามากกว่าบริเวณพื้นที่ราบลุ่มในฤดูฝนซึ่งมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 0.74±0.05 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม (เฉลี่ยร้อยละ 1.84±0.22) อาจเนื่องมาจากสารหนูถูกชะละลายไปกับน้ำฝนในช่วงฤดูฝน จึงส่งผลให้ในฤดูฝนมีชีวปริมาณออกฤทธิ์ของสารหนูในดินต่ำกว่าในฤดูร้อน

2) ชีวปริมาณออกฤทธิ์ของสารหนูในดินบริเวณพื้นที่เนินเขาทั้ง 2 ฤดูกาล มีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p>0.05$) ดังแสดงในตารางที่ ฉ-7 โดยบริเวณพื้นที่เนินเขาในฤดูร้อนมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 0.76±0.08 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม (เฉลี่ยร้อยละ 5.63±2.08) และบริเวณพื้นที่เนินเขาในฤดูฝนซึ่งมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 0.47±0.17 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม (เฉลี่ยร้อยละ 3.69±2.06)

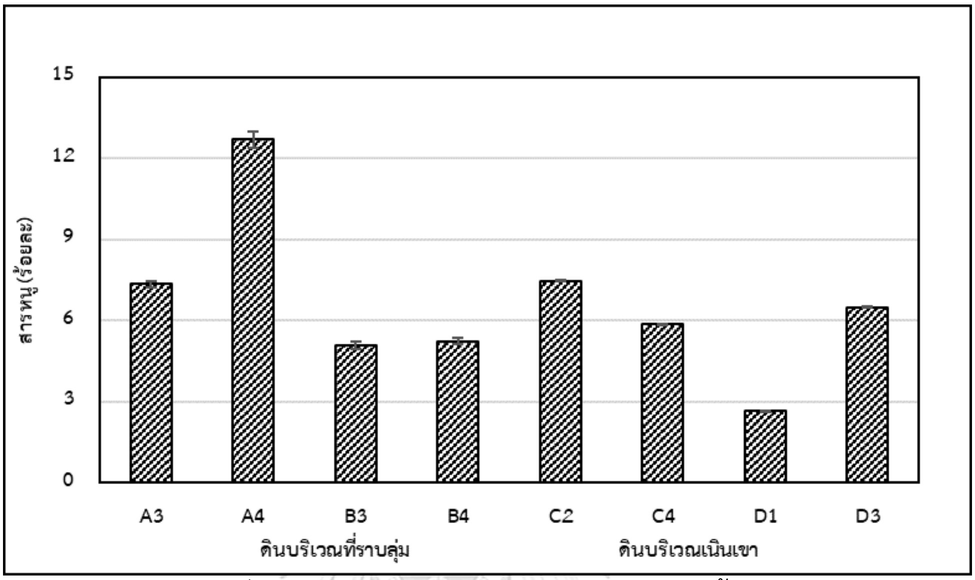
เมื่อพิจารณาถึงความแตกต่างของพื้นที่ พบว่า

1) ชีวปริมาณออกฤทธิ์ของสารหนูในดินที่เก็บในฤดูร้อน ทั้งในบริเวณพื้นที่ราบลุ่มและบริเวณพื้นที่เนินเขา ดังแสดงในรูปที่ 4–5 มีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p>0.05$) ดังแสดงในตารางที่ ฉ-8 ซึ่งมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 1.57±1.01 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม (เฉลี่ยร้อยละ 6.61±2.90)

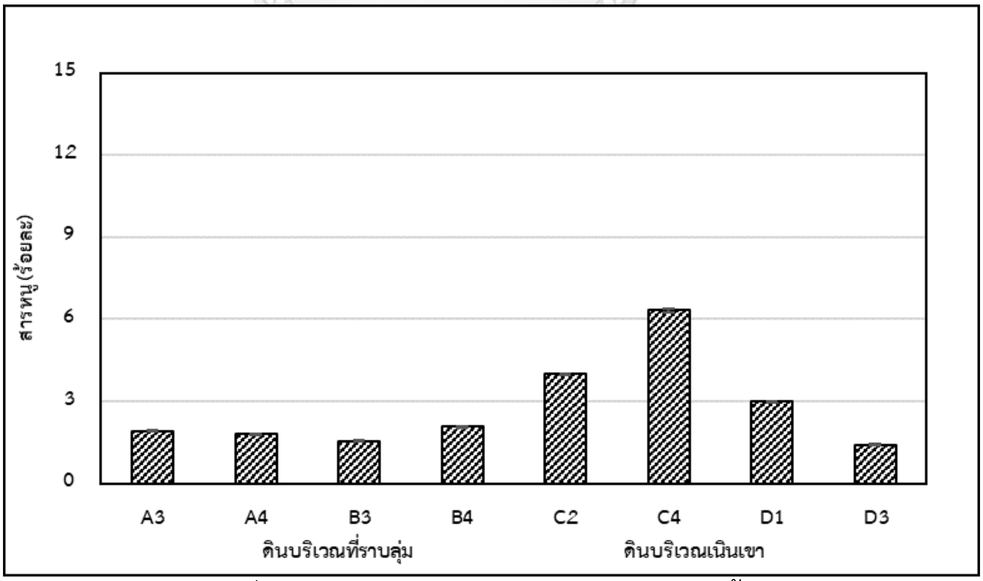
2) ชีวปริมาณออกฤทธิ์ของสารหนูในดินที่เก็บในฤดูฝน ทั้งในบริเวณพื้นที่ราบลุ่มและบริเวณพื้นที่เนินเขา ดังแสดงในรูปที่ 4–6 มีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p>0.05$) ดังแสดงในตารางที่ ฉ-8 ซึ่งมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 0.60±0.19 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม (เฉลี่ยร้อยละ 2.77±1.68)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

จากผลการศึกษาชีวปริมาณออกฤทธิ์ของสารหนูในดินพบว่าชีวปริมาณออกฤทธิ์ของสารหนูมีค่าต่ำมาก ทั้งนี้ ผลชีวปริมาณออกฤทธิ์ของสารหนูในดินในหน่วยมิลลิกรัมต่อกิโลกรัมได้แสดงในตารางที่ ข-3



รูปที่ 4-5 ชีวปริมาณออกฤทธิ์ของสารหนูเทียบกับความเข้มข้นของสารหนูทั้งหมดในตัวอย่างดินในฤดูร้อน โดย A3 A4 B3 และ B4 เป็นตัวอย่างดินบริเวณที่ราบลุ่ม และ C2 C4 D1 และ D3 เป็นตัวอย่างดินบริเวณที่เนินเขา ซึ่งแสดงผลในหน่วยร้อยละ (%)



รูปที่ 4-6 ชีวปริมาณออกฤทธิ์ของสารหนูเทียบกับความเข้มข้นของสารหนูทั้งหมดในตัวอย่างดินในฤดูฝน โดย A3 A4 B3 และ B4 เป็นตัวอย่างดินบริเวณที่ราบลุ่มและ C2 C4 D1 และ D3 เป็นตัวอย่างดินบริเวณที่เนินเขา ซึ่งแสดงผลในหน่วยร้อยละ (%)

4.2.3 การศึกษาการกระจายสัดส่วนของสารหนูในดินโดยวิธี Modified Tessier

ผลการศึกษาการกระจายสัดส่วนของสารหนูในดินสามารถแบ่งได 5 ส่วน ประกอบด้วย สารหนูในส่วนที่ชะละลายได้ง่าย (F1) สารหนูส่วนที่ชะละลายได้ในกรด (F2) สารหนูในส่วนที่ชะละลายได้ภายใต้สภาพแวดล้อมที่เกิดปฏิกิริยารีดักชัน (F3) สารหนูในส่วนที่ชะละลายได้ภายใต้สภาพแวดล้อมที่เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน (F4) และสารหนูส่วนที่คงตัว (F5) ทั้งนี้ ได้แสดงการกระจายสัดส่วนของสารหนูบริเวณพื้นที่ราบลุ่มและเนินเขาทั้ง 2 ฤดูกาล ในหน่วยร้อยละ แสดงในรูปที่ 4–7 และรูปที่ 4–8 รวมถึงในหน่วยมิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ในตารางที่ ข-1 และตารางที่ ข- 2

เมื่อพิจารณาถึงผลของฤดูกาล พบว่า

1) การกระจายสัดส่วนของสารหนูทั้ง 5 ส่วนในบริเวณพื้นที่ราบลุ่มทั้ง 2 ฤดูกาลไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p>0.05$) ดังแสดงในตารางที่ ฉ-9 ซึ่งบริเวณพื้นที่ราบลุ่มมีการกระจายสัดส่วนของสารหนูอยู่ใน F5 มากที่สุด (เฉลี่ยร้อยละ 73.01±6.21) รองลงมาคือ F3 (เฉลี่ยร้อยละ 20.50±6.37) และ F4 (เฉลี่ยร้อยละ 5.99±1.22) ตามลำดับ ในขณะที่ F1 รวมถึง F2 มีปริมาณน้อยมาก (เฉลี่ยร้อยละ 0.51±0.63) เมื่อเทียบกับปริมาณสารหนูทั้งหมดในดิน

2) การกระจายสัดส่วนของสารหนูในบริเวณพื้นที่เนินเขาทั้ง 2 ฤดูกาลไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p>0.05$) เช่นเดียวกัน ดังแสดงในตารางที่ ฉ-9 ซึ่งบริเวณเนินเขามีการกระจายสัดส่วนของสารหนูอยู่ในส่วน F5 มากที่สุด (เฉลี่ยร้อยละ 81.12±7.77) รองลงมาคือ F3 (เฉลี่ยร้อยละ 9.04±6.54) และ F4 (เฉลี่ยร้อยละ 8.97±4.66) ตามลำดับ ในขณะที่ F1 รวมถึง F2 มีปริมาณน้อยมาก (เฉลี่ยร้อยละ 0.87±0.98) เมื่อเทียบกับปริมาณสารหนูทั้งหมดในดิน

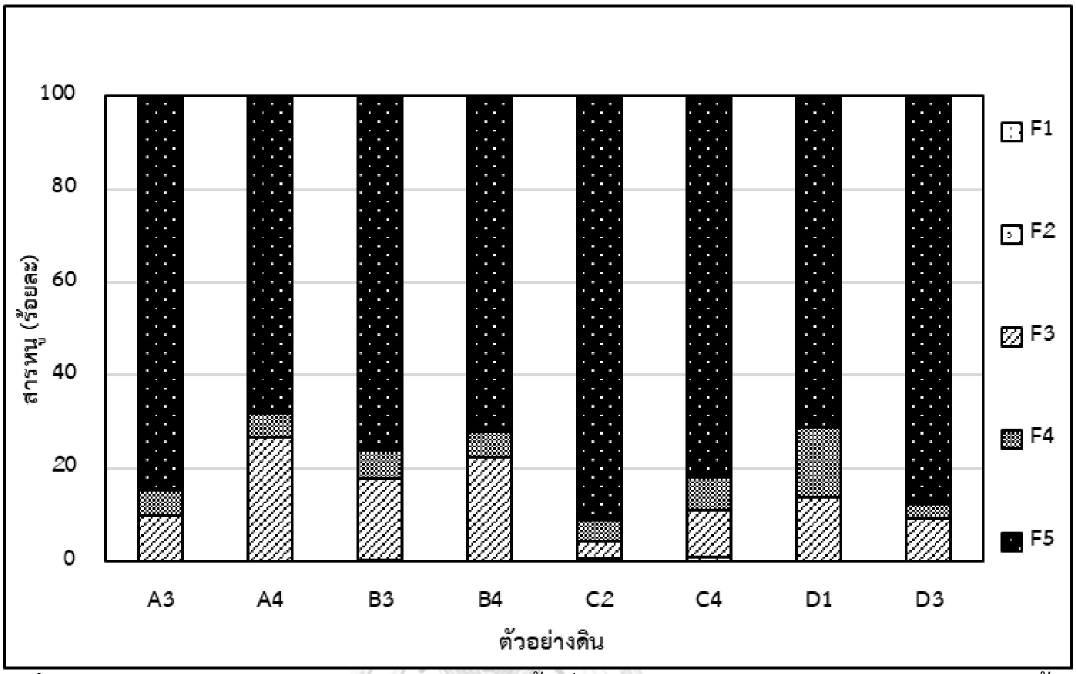
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ทั้งนี้เมื่อพิจารณาถึงความแตกต่างของพื้นที่ พบว่า

1) บริเวณพื้นที่ราบลุ่มที่และบริเวณเนินเขาในทั้ง 2 ฤดูกาล มีการกระจายสัดส่วนของสารหนูที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p<0.05$) ดังแสดงในตารางที่ ฉ-10 และ ฉ-11 ในส่วน F5 และ F3 โดยบริเวณพื้นที่ราบลุ่มมี F5 (เฉลี่ยร้อยละ 73.01±6.21) ซึ่งมีค่าน้อยกว่าเนินเขา (เฉลี่ยร้อยละ 81.12±7.77) ในขณะที่มี F3 (เฉลี่ยร้อยละ 20.50±6.37) มีค่ามากกว่าเนินเขา (เฉลี่ยร้อยละ 9.04±6.54) เมื่อเทียบกับปริมาณสารหนูทั้งหมดในดิน

2) บริเวณพื้นที่ราบลุ่มที่และบริเวณเนินเขาในทั้ง 2 ฤดูกาล มีการกระจายสัดส่วนที่ไม่มีความแตกต่างกัน ($p>0.05$) ในส่วน F4 F1 และ F2 โดยบริเวณพื้นที่ราบลุ่มมี F4 (เฉลี่ยร้อยละ 5.99±1.22) F1 (เฉลี่ยร้อยละ 0.14±0.04) และ F2 (เฉลี่ยร้อยละ 0.37±0.64) ส่วนบริเวณพื้นที่เนิน

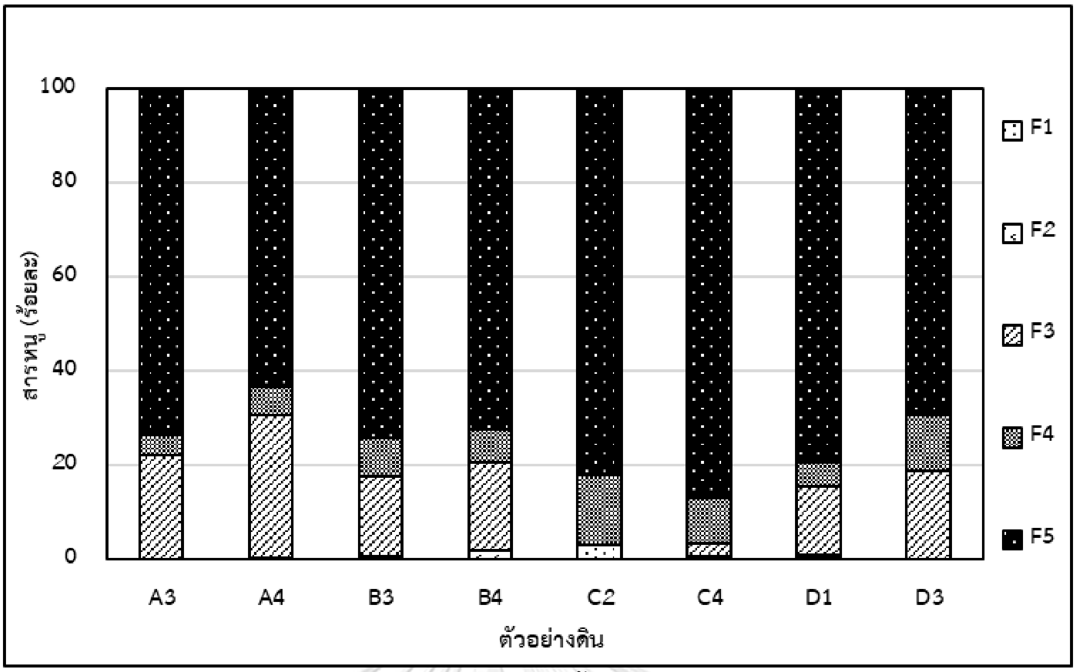
เขามี F4 (เฉลี่ยร้อยละ 8.97±4.66) F1 เฉลี่ยร้อยละ 0.76±1.00 และ F2 เฉลี่ยร้อยละ 0.11±0.21 เมื่อเทียบกับปริมาณสารหนูทั้งหมดในดิน



รูปที่ 4-7 การกระจายสัดส่วนของสารหนูบริเวณพื้นที่ราบลุ่ม (A3 A4 B3 และ B4) และบริเวณพื้นที่เนินเขา (C2 C4 D1 และ D3) ในฤดูร้อน แสดงผลในหน่วยร้อยละ (%)

ประกอบด้วยสารหนูในส่วนที่ชะละลายได้ง่าย (F1) สารหนูส่วนที่ชะละลายได้ในกรด (F2) สารหนูส่วนที่ชะละลายได้ภายใต้สภาพแวดล้อมที่เกิดปฏิกิริยารีดักชัน (F3) สารหนูส่วนที่ชะละลายได้ภายใต้สภาพแวดล้อมที่เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน (F4) และสารหนูส่วนที่คงตัว (F5)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University



รูปที่ 4-8 ผลการกระจายสัดส่วนของสารหนูบริเวณพื้นที่ราบลุ่ม (A3 A4 B3 และ B4) และบริเวณพื้นที่เนินเขา (C2 C4 D1 และ D3) ในฤดูฝน แสดงผลในหน่วยร้อยละ (%) ประกอบด้วย สารหนูในส่วนที่ชะละลายได้ง่าย (F1) สารหนูส่วนที่ชะละลายได้ในกรด (F2) สารหนูส่วนที่ชะละลายได้ภายใต้สภาพแวดล้อมที่เกิดปฏิกิริยารีดักชัน (F3) สารหนูส่วนที่ชะละลายได้ภายใต้สภาพแวดล้อมที่เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน (F4) และสารหนูส่วนที่คงตัว (F5)

จากผลการกระจายสัดส่วนของสารหนูในดิน พบสารหนูอยู่ในส่วน F5 มากที่สุดจากที่กล่าวมาในข้างต้นนั้น คาดว่าเป็นเพราะสารหนูส่วนมากมาจากแหล่งกำเนิดทางธรรมชาติ จากวัตถุต้นกำเนิดดิน ซึ่งการปะปนอยู่ในสายแร่ใต้ดิน ซึ่งบริเวณที่ศึกษาเป็นพื้นที่ศักยภาพแหล่งแร่ทองคำ ซึ่งสารหนูในส่วนนี้เป็นส่วนที่มีความเสถียร สามารถคงตัวในดินได้นาน เคลื่อนตัวได้ยาก จึงถือว่ามีความเสี่ยงต่ำที่สารหนูจะแพร่กระจายออกสู่สิ่งแวดล้อม โดยจากการศึกษาของ Kim et al. (2014) คาดว่าเป็น แร่อาร์เซโนไพไรต์ แร่ออร์พิเมนท์ รวมถึงแร่ไพไรต์ที่มีองค์ประกอบของสารหนูแทรกอยู่

สารหนูในส่วน F3 (มักอยู่ในรูปที่จับกับเหล็กและแมงกานีสออกไซด์) เป็นส่วนที่พบรองลงมา โดยเหล็กออกไซด์จะพบมากในสภาพแวดล้อมบนผิวโลก เช่น ในดิน และตะกอนต่าง ๆ ซึ่งเป็นส่วนสำคัญที่มลสารจะไปจับโดยใช้กลไกต่าง ๆ เช่น การแลกเปลี่ยนประจุ การตกตะกอนร่วม หรือการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนบนพื้นผิว โดยการศึกษาของ Kim et al. (2014) พบว่าสารหนูมักจับอยู่กับเหล็กออกไซด์ทั้งในรูปที่เป็นผลึก (Crystalline Fe) และไม่เป็นผลึก (Amorphous Fe) อีกทั้ง Devesa-

Rey et al. (2008) พบว่าสารหนูมักเกาะที่ผิวของเหล็กออกไซด์ ทำให้เหล็กออกไซด์มีบทบาทสำคัญในการตรึงสารหนูในดิน ซึ่งจากการพิจารณาถึงความแตกต่างของพื้นที่ พบว่าบริเวณพื้นที่ราบลุ่มและเนินเขาในทั้ง 2 ฤดูกาล มีการกระจายสัดส่วนของสารหนูที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p<0.05$) ในส่วน F5 และ F3 อาจเนื่องมาจากบริเวณพื้นที่ราบลุ่มในฤดูฝนมีน้ำขังทำให้สารหนูในส่วนที่คงตัว (F5) เปลี่ยนเป็นสารหนูในส่วนที่ไม่คงตัว (F1 ถึง F4) ซึ่งโดยปกติแล้วมักพบในส่วน F3 มากกว่าส่วนอื่น ๆ

สารหนูในส่วน F4 (มักอยู่ในรูปที่จับกับสารอินทรีย์รวมถึง AVS ในดิน) เป็นส่วนที่พบเป็นอันดับ 3 โดยในการศึกษานี้ไม่พบ AVS และมีค่าอีเอชสูง ดังนั้น สารหนูที่ปรากฏใน F4 นี้จึงเชื่อว่าเป็นสารหนูที่จับอยู่กับสารอินทรีย์ โดย Buzek et al. (2013) อธิบายว่า ธาตุมลสารที่เป็นโลหะหนักในดิน เช่น เหล็ก อลูมิเนียม และแมงกานีส จะฟอร์มประจุบวกระหว่างพื้นผิวของสารอินทรีย์ในดิน (ซึ่งมีประจุลบ) กับสารหนู (ซึ่งมีประจุลบ) ซึ่งทำให้สารหนูจับกับสารอินทรีย์ได้ และสารหนูในส่วนนี้จะมีความเสถียรที่ค่อนข้างสูง

สารหนูในส่วน F1 และ F2 (มักพบว่าอยู่ในรูปที่จับกับคาร์บอเนต) มีปริมาณน้อยมากหรือตรวจไม่พบ อาจเนื่องมาจากธรรมชาติของสารหนูที่มักจับกับเหล็กออกไซด์ รวมถึงค่าพีเอชของดินที่เป็นกรดทำให้โครงสร้างของดินในส่วนที่ละลายได้ง่ายด้วยกรดมีอยู่น้อย

สำหรับผลที่ได้นั้นมีความสอดคล้องกับงานวิจัยของ (Wang et al., 2015) ที่ศึกษาการกระจายสัดส่วนของดินที่มีวัตถุต้นกำเนิดดินในธรรมชาติที่แตกต่างกัน 5 ชนิด ซึ่งผลการศึกษาส่วนใหญ่จะพบสารหนูในส่วนที่คงตัว และหลังจากนั้นเมื่อเติมสารละลายสารหนูเพิ่มเข้าไป พบว่าในช่วงเริ่มแรกสารหนูที่เติมลงไปจะอยู่ในรูปที่จับกับองค์ประกอบต่าง ๆ ทั่วไป ซึ่งจะปรากฏในการสกัดลำดับแรก ๆ แต่เมื่อเวลาผ่านไป F3 ที่มักอยู่ในรูปที่จับกับเหล็กและแมงกานีสออกไซด์ จะค่อย ๆ เพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ ในขณะที่ส่วนที่จับกับองค์ประกอบอื่น ๆ ลดลง ส่วนงานวิจัยของ (Kumpiene et al., 2006) ที่ศึกษาการกระจายสัดส่วนของสารหนูในดินปนเปื้อนบริเวณโรงงานผลิตน้ำยารักษาสภาพเนื้อไม้ ในประเทศสวีเดน พบสารหนูในส่วนใหญ่อยู่ในรูปที่คงตัวซึ่งมักอยู่ในส่วน F3 จากข้อมูลที่ยกตัวอย่างมาในข้างต้นสามารถสรุปได้ว่าดินที่มีการปนเปื้อนสารหนูจากแหล่งกำเนิดตามธรรมชาติมักพบสารหนูในส่วนคงตัว ซึ่งสารหนูในส่วนนี้เป็นส่วนที่มีความเสถียร คงตัวอยู่ในดินได้นาน และไม่สามารถถูกชะออกมาได้ในสภาพแวดล้อมปกติ

เมื่อพิจารณาค่าความเข้มข้นเสมือนทั้งหมดของสารหนูที่สกัดได้ (Pseudo–total As) เทียบกับความเข้มข้นของสารหนูทั้งหมดในดิน (Total As) ของตัวอย่างที่ทำการศึกษา พบว่าส่วนมากมีค่า

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ร้อยละที่สกัดได้ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ (p>0.05) โดยมีค่าร้อยละการกลับคืนของปริมาณสารหนูที่พบในตัวอย่างดินเฉลี่ยร้อยละ 109±25 เมื่อเทียบกับค่าความเข้มข้นของสารหนูทั้งหมดในดิน

ดังนั้นจากข้อมูลการศึกษาในข้างต้น สามารถสรุปได้ว่า

1) ทั้งบริเวณพื้นที่ราบลุ่มที่มีการเพาะปลูกข้าวและบริเวณพื้นที่เนินเขาที่มีการปลูกยางพาราพบสารหนูในส่วนที่คงตัว (F5) (เฉลี่ยร้อยละ 77.07±7.98) มากกว่าสารหนูในส่วนที่ไม่คงตัว (F1 ถึง F4) (เฉลี่ยร้อยละ 5.73±7.56) บ่งชี้ว่าสารหนูบริเวณที่ราบลุ่มและบริเวณเนินเขามีต้นกำเนิดมาจากธรรมชาติ

2) บริเวณพื้นที่ราบลุ่มพบร้อยละของสารหนูในส่วน F5 (เฉลี่ยร้อยละ 73.01±6.21) มีค่าน้อยกว่าบริเวณพื้นที่เนินเขา (เฉลี่ยร้อยละ 81.12±7.77) บ่งชี้ว่าสารหนูในส่วน F5 บริเวณพื้นที่ราบลุ่ม ได้เปลี่ยนเป็นสารหนูในส่วน F1 ถึง F4 มากกว่าบริเวณเนินเขา ซึ่งอาจมีสาเหตุมาจากการใช้ประโยชน์ที่ดินในการเพาะปลูกข้าว หรือการที่มีน้ำปกคลุมผิวดินในฤดูฝน

3) หากพิจารณาความเข้มข้นของสารหนูในดิน พบว่าสารหนูในส่วน F5 ในบริเวณพื้นที่ราบลุ่ม (เฉลี่ย 30.71±10.01 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม) มีค่าสูงกว่าบริเวณพื้นที่เนินเขา (เฉลี่ย 12.32±5.46 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม) ซึ่งอาจบ่งชี้ได้ว่าสารหนูในดินไม่ได้ถูกพัดมาจากเนินเขาแต่น่าจะถูกพัดพามาจากบริเวณด้านบนของพื้นที่

4) สารหนูในส่วนที่ไม่คงตัว มักอยู่ในส่วน F3 มากกว่าส่วนอื่น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Devesa-Rey et al. (2008) ที่พบว่าสารหนูมักเกาะที่ผิวของเหล็กออกไซด์ ทำให้เหล็กออกไซด์มีบทบาทสำคัญในการตรึงสารหนูในดิน และหากสภาพแวดล้อมมีการเปลี่ยนแปลง เช่น ดินอยู่ในสภาวะไร้ออกซิเจนก็จะส่งผลให้ค่าอีเอชเกิดการเปลี่ยนแปลง และส่งผลให้เหล็กออกไซด์รวมถึงแมงกานีสออกไซด์บางส่วนเปลี่ยนฟอร์มและละลายไป ซึ่งจะส่งผลให้สารหนูถูกปลดปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อม

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ทั้งนี้ เมื่อพิจารณาผลการศึกษาการกระจายสัดส่วนควบคู่กับชีวปริมาณออกฤทธิ์ของสารหนูในดิน พบว่าการกระจายสัดส่วนของสารหนูใน F1 F2 รวมถึง F4 มีปริมาณน้อยมาก เช่นเดียวกับชีวปริมาณออกฤทธิ์ของสารหนู ซึ่งมีค่าเฉลี่ย 0.07±0.05 0.07±0.15 และ 1.89±1.00 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม (เฉลี่ยร้อยละ 0.45±0.75 0.24±0.48 และ 7.48±3.63 ตามลำดับ) จึงคาดว่าชีวปริมาณออก

ฤทธิ์ของสารหนูอาจจะมีความเกี่ยวข้องกับ F1 F2 หรือ F4 จึงได้พิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างการกระจายสัดส่วนกับชีวปริมาณออกฤทธิ์ของสารหนูในบริเวณพื้นที่ราบลุ่มและบริเวณพื้นที่เนินเขาทั้ง 2 ฤดูกาล โดยการพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) ซึ่งพบความสัมพันธ์ระหว่างการกระจายสัดส่วนกับชีวปริมาณออกฤทธิ์ของสารหนูในค่าที่ต่ำ (R^2<0.6)

4.3 ดินภายใต้การจำลองให้อยู่ในสภาวะไร้อากาศ (Anaerobic)

จากการคาดการณ์ว่าในบริเวณพื้นที่ราบลุ่มที่มีการเพาะปลูกข้าวเป็นบริเวณที่มีน้ำขัง และอาจเกิดการหมักหมมของอินทรียวัตถุในดิน ส่งผลให้ออกซิเจนไม่สามารถส่งผ่านชั้นน้ำลงมาใต้ดินได้เพียงพอ ประกอบกับออกซิเจนที่มีอยู่เดิมถูกจุลินทรีย์ในดินใช้ไปจนหมด และมีค่าอีเอชต่ำจนสารประกอบต่าง ๆ ในดินถูกใช้เป็นตัวรับอิเล็กตรอนแทนออกซิเจน (Gotoh and Yamashita, 1966) แต่จากการตรวจวัดค่าอีเอชของตัวอย่างดินในนาข้าวในฤดูฝนซึ่งมีน้ำขัง พบว่ามีค่าอีเอชประมาณ +595±46.98 มิลลิโวลต์ บ่งชี้ว่ามีออกซิเจนเป็นตัวรับอิเล็กตรอนในดิน ซึ่งแตกต่างจากที่คาดการณ์ไว้ ทั้งนี้ เมื่อพิจารณาจากการออกภาคสนาม พบว่า การที่ตัวอย่างดินไม่ขาดออกซิเจนน่าจะเกิดจากการที่น้ำในนาข้าวในฤดูฝนในพื้นที่นี้มีลักษณะเป็นน้ำที่ไหลผ่านมาจากร่องเขา โดยเป็นน้ำตื้น ๆ ที่ไหลผ่านนาข้าวตลอดฤดูกาล จึงแตกต่างจากดินที่มีการเพาะปลูกข้าวโดยทั่วไป

ด้วยเหตุนี้จึงเป็นที่มาของการจำลองดินให้อยู่ในสภาวะไร้อากาศ ซึ่งเป็นสภาพที่มักจะเกิดขึ้นในนาข้าวในพื้นที่อื่น ๆ เพื่อศึกษาผลของการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทั้งทางกายภาพและทางเคมีของดิน การกระจายสัดส่วน รวมถึงชีวปริมาณออกฤทธิ์ของสารหนูในดิน

จากการศึกษาตัวอย่างดินจากการจำลองให้อยู่ในสภาวะไร้อากาศ โดยเลือกดินที่เก็บบริเวณพื้นที่ราบลุ่มที่มีการปลูกข้าวในฤดูฝนจำนวน 4 ตัวอย่าง ได้แก่ A3 A4 B3 และ B4 (จำลอง 2 ซ้ำ) ซึ่งคัดเลือกดินจากค่าความเข้มข้นสารหนูในปริมาณที่สูง จำลองโดยใช้ดิน 300 กรัม ในขวดแก้วปริมาตร 500 มิลลิลิตร เป็นระยะเวลา 1 เดือน โดยใช้แนวทางของ Damrongsiri (2018) ที่ใช้จำลองเพื่อศึกษาผลของการเปลี่ยนแปลงสภาพปฏิกิริยารีดอกซ์ ดังนี้

ในการทดลองนี้จะใช้แนวทาง คือ

1) สภาพไร้อากาศที่จำลองควรมีค่าอีเอชต่ำกว่า 0 มิลลิโวลต์ เพื่อให้เกิดการใช้สารอื่น ๆ เป็นตัวรับอิเล็กตรอน ซึ่งครอบคลุมตั้งแต่ไนเตรท แมงกานีส เฟอร์ริค ไปจนถึงซัลเฟต ซึ่งครอบคลุมการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบดินที่สำคัญต่อการศึกษา

2) ดินที่อยู่ในสภาพไร้อากาศอย่างต่อเนื่องโดยทั่วไปจะมีการสะสมของซัลเฟอร์ในรูป AVS มากขึ้นเนื่องจากกิจกรรมของจุลินทรีย์ในดินซึ่งต้องอาศัยระยะเวลาในการสะสม (de Livera et al., 2011) ในการทดลองนี้จึงทำการเติมสารประกอบซัลเฟอร์เพื่อร่นระยะเวลาในการจำลองสถานการณ์ดังกล่าวด้วย

3) ใช้อาหารเลี้ยงเชื้อ Lauryl Tryptose Broth (Difco^{tm}) เป็นแหล่งอาหารทำให้เชื้อจุลินทรีย์เติบโตได้อย่างรวดเร็ว และใช้ออกซิเจนที่มีอยู่อย่างจำกัดจนหมด และทำให้เกิดสภาพไร้อากาศ

4.3.1 ผลการจำลองดินให้อยู่ในสภาวะไร้อากาศ

4.3.1.1 คุณสมบัติทางเคมีของดิน

สำหรับผลการวิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมีของตัวอย่างดินภายหลังการจำลอง แสดงในตารางที่ 4.3–1 (ข) จากการจำลองดินให้อยู่ในสภาวะไร้อากาศโดยเลือกดินที่เก็บบริเวณพื้นที่ราบลุ่มที่มีการปลูกข้าวในฤดูฝนจำนวน 4 ตัวอย่าง ได้แก่ A3 A4 B3 และ B4 (2 ซ้ำ) เมื่อพิจารณาค่าพีเอชของดินพบว่าภายหลังการจำลอง ดินมีความเป็นกลางซึ่งมีค่าพีเอชเฉลี่ยเท่ากับ 7.39±0.11 ส่วนปริมาณอินทรียวัตถุในดินมีค่าเฉลี่ยเท่ากับร้อยละ 2.27±0.09 โดยถือว่ามีความอุดมสมบูรณ์ของดินอยู่ในระดับสูง เนื่องจากมีค่ามากกว่าร้อยละ 2 (สถาบันวิจัยข้าว, 2547) ส่วนค่าอีเอช พบว่ามีค่าเฉลี่ยเท่ากับ –78±39.24 มิลลิโวลต์ จากข้อมูลดังกล่าวสอดคล้องกับการพบ AVS ในดิน ซึ่งมีความเข้มข้นเฉลี่ยเท่ากับ 830±297.24 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตารางที่ 4-2 (ก) คุณสมบัติทางเคมีของดินก่อนการจำลอง (ข) คุณสมบัติทางเคมีของดินภายหลังจากการจำลองในสภาวะไร้อากาศ

(ก) ดินก่อนการจำลอง

ตัวอย่างดิน		ค่าพีเอช	ปริมาณอินทรียวัตถุในดิน (ร้อยละ)	AVS (มก./กก.)	ค่าอีเอช (มิลลิโวลต์)	ปริมาณเหล็กทั้งหมดในดิน (มก./กก.)	ปริมาณสารหนูทั้งหมดในดิน (มก./กก.)
A3	A3–1	5.28±0.01	2.60	0	+615±9.24	33,127±1,556	40.95±0.61
	A3–2	5.28±0.01	2.60	0	+615±9.24		
A4	A4–1	6.00±0.02	2.07	0	+560±1.80	27,203±2,067	36.59±2.75
	A4–2	6.00±0.02	2.07	0	+560±1.80		
B3	B3–1	5.59±0.06	2.18	0	+676±9.40	29,557±1,319	48.65±0.47
	B3–2	5.59±0.06	2.18	0	+676±9.40		
B4	B4–1	5.93±0.16	2.31	0	+595±12.70	22,940±1,954	35.14±1.46
	B4–2	5.93±0.16	2.31	0	+595±12.70		
ค่าเฉลี่ย±SD		5.70±0.31	2.29±0.21	0	+612±44.90	28,207±3956	40.33±6.07

(ข) ดินภายหลังจากการจำลองในสภาวะไร้อากาศ

ตัวอย่างดิน		ค่าพีเอช	ปริมาณอินทรียวัตถุในดิน (ร้อยละ)	AVS (มก./กก.)	ค่าอีเอช (มิลลิโวลต์)	ปริมาณเหล็กทั้งหมดในดิน (มก./กก.)	ปริมาณสารหนูทั้งหมดในดิน (มก./กก.)
A3	A3–1	7.29±0.01	2.31	414±44.73	-121±5.64	33,127±1,556	40.95±0.61
	A3–2	7.29±0.02	2.26	705±126.98	-126±11.07		
A4	A4–1	7.32±0.01	2.11	893±98.25	-93±17.32	27,203±2,067	36.59±2.75
	A4–2	7.41±0.04	2.31	432±103.85	-96±9.07		
B3	B3–1	7.55±0.03	2.29	1,253±180.18	-21±9.50	29,557±1,319	48.65±0.47
	B3–2	7.55±0.02	2.15	1,020±19.17	-44±4.47		

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตารางที่ 4-2 (ก) คุณสมบัติทางเคมีของดินก่อนการจำลอง (ข) คุณสมบัติทางเคมีของดินภายหลังจากการจำลองในสภาวะไร้อากาศ (ต่อ)

(ข) ดินภายหลังจากการจำลองในสภาวะไร้อากาศ (ต่อ)

ตัวอย่างดิน		**ค่าพีเอช**	**ปริมาณอินทรียวัตถุในดิน (ร้อยละ)**	**AVS (มก./กก.)**	**ค่าอีเอช (มิลลิโวลต์)**	**ปริมาณเหล็กทั้งหมดในดิน (มก./กก.)**	**ปริมาณสารหนูทั้งหมดในดิน (มก./กก.)**
B4	**B4–1**	7.32±0.02	2.38	869±167.42	-96±9.03	22,940±1,954	35.14±1.46
	B4–2	7.35±0.01	2.33	1,054±177.09	-42±18.75		
ค่าเฉลี่ย±SD		7.39±0.11	2.27±0.09	830±297.24	-80±39.24	28,207±3956	40.33±6.07

อภิปรายการเปลี่ยนแปลงทางคุณสมบัติทางเคมีของดินจากการจำลอง

เมื่อเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างคุณสมบัติทางเคมีดินจำลองเทียบกับดินก่อนจำลอง พบว่าคุณสมบัติทางเคมีของดินจำลองมีความแตกต่างจากดินก่อนจำลองอย่างมีนัยสำคัญ ($p<0.05$) ในบางพารามิเตอร์ ยกเว้นปริมาณอินทรียวัตถุในดิน ดังแสดงในตารางที่ ฉ-12 และในส่วนความเข้มข้นเหล็กรวมถึงความเข้มข้นสารหนูทั้งหมดที่พบจะใช้ค่าอ้างอิงเดียวกับดินก่อนการจำลอง

เมื่อพิจารณาค่าพีเอชของดิน พบว่าดินจำลองมีพีเอชเป็นกลาง (เฉลี่ยเท่ากับ 7.39±0.11) ซึ่งแตกต่างจากดินก่อนจำลองอย่างมีนัยสำคัญ ($p<0.05$) โดยดินก่อนจำลองมีความเป็นกรดที่มีค่าพีเอชเฉลี่ยเท่ากับ 5.70±0.31 ค่าที่ได้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Ponnamperuma (1972) และ Narteh and Sahrawat (1999) ที่พบว่าภายใต้สภาวะไร้อากาศ ดินที่เป็นกรดจะมีค่าพีเอชของดินสูงขึ้น ส่วนดินที่เป็นด่างจะมีค่าพีเอชของดินลดลง จนเข้าสู่สภาวะสมดุลของค่าพีเอชดินในธรรมชาติ (Neutral range) ซึ่งจะมีค่าพีเอชอยู่ในช่วง 6.5–7.5 ทั้งนี้ การที่ดินจำลองมีค่าพีเอชเพิ่มขึ้นอาจมีสาเหตุเนื่องมาจากปฏิกิริยาการย่อยสลายสารอินทรีย์ ซึ่งเป็นปฏิกิริยารีดอกซ์แบ่งเป็นสองครึ่งปฏิกิริยา คือ เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันกับสารประกอบอินทรีย์ที่มีธาตุคาร์บอนเป็นองค์ประกอบ และเกิดปฏิกิริยารีดักชันกับตัวรับอิเล็กตรอนที่มีอยู่ในดิน ซึ่งปฏิกิริยาออกซิเดชันกับสารประกอบอินทรีย์ (e^- donor, ตัวที่ให้ e^-) สามารถแสดงได้ดังสมการที่ 6

$$[CH_2O]\,n + nH_2O \longrightarrow nCO_2 + 4ne^- + 4nH^+ \qquad \text{สมการที่ 6}$$

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการย่อยสลายสารอินทรีย์ในดิน ได้แก่ คาร์บอนไดออกไซด์ ไฮโดรเจน และพลังงาน ซึ่งจากสมการที่ 6 ในข้างต้นที่เป็นสมการการย่อยสลายสารอินทรีย์ในดิน เมื่อรวมกับสมการที่ 1 ซึ่งเป็นสมการที่อธิบายดินในสภาวะปกติที่มีออกซิเจนเป็นตัวรับอิเล็กตรอนในดิน จุลินทรีย์ที่ใช้ออกซิเจนเป็นตัวรับอิเล็กตรอนจะเจริญเติบโตได้อย่างรวดเร็ว และมีบทบาทในการเกิดปฏิกิริยาต่าง ๆ ในดินเป็นอันดับแรก จะได้สมการ คือ

$$CH_2O + O_2 \longrightarrow CO_2 + H_2O$$ สมการที่ 7

จากสมการจะเห็นได้ว่า เมื่อจุลินทรีย์ย่อยสลายสารอินทรีย์ในดินที่อยู่ในสภาวะปกติที่มีออกซิเจนเป็นตัวรับอิเล็กตรอนในดิน และไม่มีการใช้ไฮโดรเจนไอออนในการย่อยสลายสารอินทรีย์ ดังนั้นจึงไม่ส่งผลกระทบต่อพีเอชในดิน

ทั้งนี้ เมื่อดินอยู่ในสภาพที่มีน้ำขัง ออกซิเจนที่ส่งผ่านมายังใต้น้ำและใต้ดินจะถูกจำกัด และไม่เพียงพอต่อปฏิกิริยาดังกล่าว ทำให้จุลินทรีย์ที่ใช้สารอื่นรับอิเล็กตรอนได้เติบโตขึ้นมาแทน โดยสามารถคาดการณ์ได้จากค่าอีเอชที่ลดลงไปตามลำดับ โดยสารอื่น ๆ ที่สามารถเป็นตัวรับอิเล็กตรอนได้ (e^- acceptor) เช่น เหล็ก (ในรูปเหล็กออกไซด์) และซัลเฟอร์ (ในรูปซัลเฟต) และเมื่อรวมกับสมการการย่อยสลายสารอินทรีย์ในดินจะได้สมการดังสมการที่ 8 และ 9 ตามลำดับ

$$CH_2O + 4Fe(OH)_3 + 8H^+ \longrightarrow CO_2 + 4Fe^{2+} + 11H_2O$$ สมการที่ 8

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

$$2CH_2O + SO_4^{2-} + H^+ \longrightarrow 2CO_2 + HS^- + 2H_2O$$ สมการที่ 9

CHULALONGKORN UNIVERSITY

จากสมการจะเห็นได้ว่ามีการใช้ไฮโดรเจนไอออนในการย่อยสลายสารอินทรีย์ในดิน ซึ่งจะส่งผลให้ค่าพีเอชของดินเพิ่มขึ้น ทั้งนี้ Sahrawat (2015) พบว่าในสภาวะไร้อากาศ ปฏิกิริยาการย่อยสลายสารอินทรีย์ของเหล็กออกไซด์เป็นปฏิกิริยาหลักที่ทำให้ดินมีค่าพีเอชเพิ่มขึ้น เนื่องจากในดินมีเหล็กออกไซด์ในปริมาณมาก โดยมีการใช้ไฮโดรเจนไอออนในการเกิดปฏิกิริยารีดักชันของเหล็ก

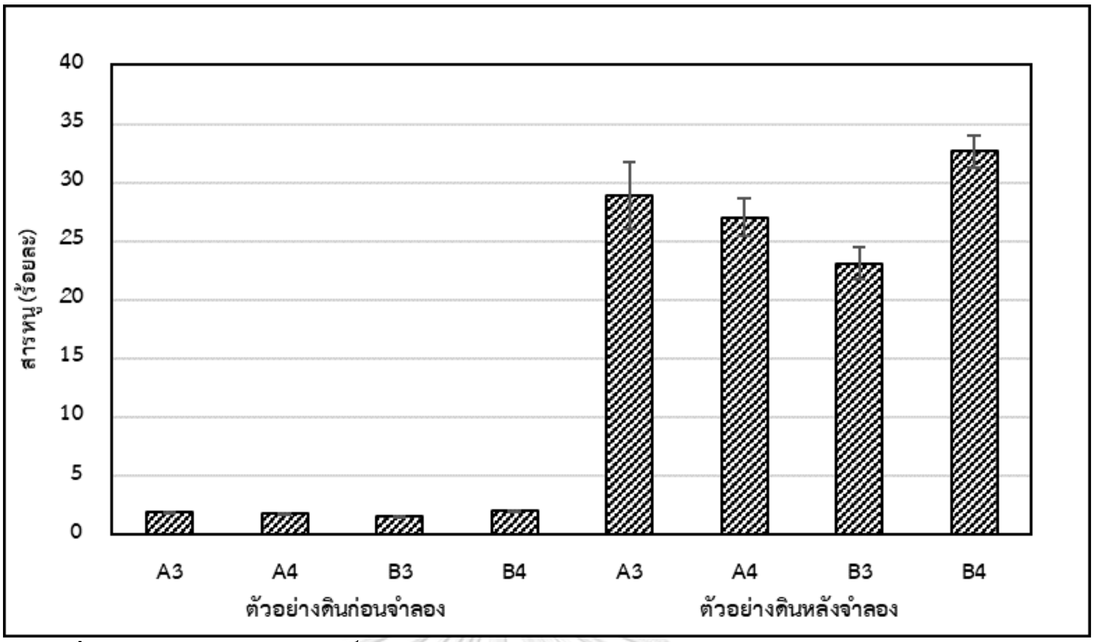
ส่วนปริมาณอินทรียวัตถุในดินมีค่าเฉลี่ยร้อยละ 2.27±0.09 ซึ่งไม่แตกต่างจากดินก่อนจำลองอย่างมีนัยสำคัญ ($p>0.05$) ซึ่งมีปริมาณอินทรียวัตถุในดินเฉลี่ยร้อยละ 2.29±0.21 โดยถือว่ามีความอุดมสมบูรณ์ของดินอยู่ในระดับสูง เนื่องจากมีค่ามากกว่าร้อยละ 2 (สถาบันวิจัยข้าว, 2547)

ส่วนค่าอีเอชพบว่ามีค่าเฉลี่ยประมาณ –80±39.24 มิลลิโวลต์ ซึ่งแตกต่างจากดินก่อนจำลองอย่างมีนัยสำคัญ ($p<0.05$) โดยดินก่อนจำลองมีค่าอีเอชเฉลี่ยเท่ากับ +612±44.98 มิลลิโวลต์ จะเห็นได้ว่าดินก่อนจำลองมีค่าอีเอชเป็นบวกและค่ามากกว่า +400 มิลลิโวลต์ จึงสามารถบ่งชี้ว่าดินก่อนจำลองมีออกซิเจนเป็นตัวรับอิเล็กตรอน (Mitsch and Gosselink, 2015) ส่วนภายหลังจากการจำลอง พบว่าดินมีค่าอีเอชลดลงจนเป็นค่าติดลบ ทั้งนี้ในดินจำลองตรวจพบ AVS ในดิน (ความเข้มข้นเฉลี่ยเท่ากับ 830±297.24 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม) จึงสามารถบ่งชี้ได้ว่าในดินจำลองเกิดปฏิกิริยาครอบคลุมตั้งแต่สมการที่ 1 ถึง สมการที่ 5 จะมี AVS เป็นตัวรับอิเล็กตรอนในดิน ซึ่งแม้ Hartley and Dickinson (2010) จะให้ลำดับว่าเหล็กออกไซด์ (Fe_2O_3) จะถูกรีดิวซ์ที่ค่าอีเอชต่ำกว่า +100 มิลลิโวลต์และซัลเฟตจะถูกรีดิวซ์ที่ค่าอีเอชต่ำกว่า –100 มิลลิโวลต์ แต่จากการศึกษาของ Tanji et al. (2003) พบว่าการรีดิวซ์ของซัลเฟตเป็น AVS เกิดได้ตั้งแต่ที่ค่าอีเอชของดินประมาณ +100 มิลลิโวลต์ ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลอง

4.3.1.2 การศึกษาชีวปริมาณออกฤทธิ์ของสารหนูในดินโดยการสกัดด้วย EDTA

ผลการศึกษาชีวปริมาณออกฤทธิ์ของสารหนูในดินภายหลังการจำลองในสภาวะไร้อากาศ แสดงในรูปที่ ง-3 โดยมีค่าเฉลี่ยของสารหนูเท่ากับ 11.11±1.83 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม (เฉลี่ยร้อยละ 27.92±5.49) ซึ่งแตกต่างจากชีวปริมาณออกฤทธิ์ของสารหนูในดินก่อนการจำลองอย่างมีนัยสำคัญ ($p<0.05$) ดังแสดงในตารางที่ ฉ-13 โดยชีวปริมาณออกฤทธิ์ของสารหนูในดินภายหลังการจำลองมีค่าสูงกว่าดินก่อนการจำลองที่มีค่าเฉลี่ยชีวปริมาณออกฤทธิ์ของสารหนูเพียง 0.74±0.05 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม (เฉลี่ยร้อยละ 1.84±0.20) ดังแสดงในรูปที่ 4–9

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University



รูปที่ 4-9 ชีวปริมาณออกฤทธิ์ของสารหนูในตัวอย่างดินก่อนและหลังจำลองในสภาวะไร้อากาศ แสดงผลในหน่วยร้อยละ (%)

4.3.1.3 การศึกษาการกระจายสัดส่วนของสารหนูในดินโดยวิธี Modified Tessier

ผลการศึกษาการกระจายสัดส่วนของสารหนูในดินจำลองสามารถแบ่งได 5 ส่วน ซึ่งแสดงดังรูปที่ ง-1 ประกอบด้วย สารหนูในส่วนที่ชะละลายได้ง่าย (F1) สารหนูส่วนที่ชะละลายได้ในกรด (F2) สารหนูส่วนที่ชะละลายได้ภายใต้สภาพแวดล้อมที่เกิดปฏิกิริยารีดักชัน (F3) สารหนูส่วนที่ชะละลายได้ภายใต้สภาพแวดล้อมที่เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน (F4) และสารหนูส่วนที่คงตัว (F5)

เมื่อพิจารณาการกระจายสัดส่วนของสารหนูในดินก่อนจำลอง พบสารหนูในส่วน F5 มากที่สุด (เฉลี่ยร้อยละ 70.75±5.18) รองลงมาคือ F3 (เฉลี่ยร้อยละ 22.00±6.01) และ F4 (เฉลี่ยร้อยละ 6.45±1.64) ในขณะที่ F2 และ F1 มีปริมาณน้อยมาก (เฉลี่ยร้อยละ 0.67±0.84 และ 0.13±0.03 ตามลำดับ) เมื่อเทียบกับปริมาณสารหนูทั้งหมดในดิน ทั้งนี้ ได้แสดงผลเปรียบเทียบการกระจายสัดส่วนของสารหนูในตัวอย่างดินก่อนและหลังจำลองในสภาวะไร้อากาศ ในรูปที่ 4–10

เมื่อพิจารณาการกระจายสัดส่วนของสารหนูในดินภายหลังจากการจำลอง พบสารหนูในส่วน F5 มากที่สุด (เฉลี่ยร้อยละ 59.76±5.14) รองลงมาคือ F3 (เฉลี่ยร้อยละ 19.83±2.60) และ F2 (เฉลี่ยร้อยละ 16.57±2.80) ตามลำดับ ในขณะที่ F4 และ F1 มีปริมาณน้อยมาก (เฉลี่ยร้อยละ 3.83±0.91 และ 0.02±0.01 ตามลำดับ) เมื่อเทียบกับปริมาณสารหนูทั้งหมดในดิน

เมื่อพิจารณาถึงความแตกต่างของดินก่อนและหลังการจำลอง พบว่ามีการกระจายสัดส่วนของสารหนูที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p<0.05$) ในส่วน F1 F2 F4 และ F5 ในขณะที่ส่วน F3 ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p>0.05$) ดังแสดงในตารางที่ ฉ-14 โดยค่าร้อยละที่สกัดได้จะแสดงในตารางที่ 4–3 โดยจะเห็นได้ว่าภายหลังจากการจำลองดินในสภาวะไร้อากาศ สารหนูในส่วน F5 F4 และ F1 ลดลง ในขณะที่สารหนูในส่วน F2 เพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด

ตารางที่ 4-3 ความแตกต่างของการกระจายสัดส่วนของสารหนูในดินก่อนและหลังการจำลองในสภาวะไร้อากาศ

การกระจายสัดส่วนของสารหนู		ดินก่อนจำลอง (ร้อยละ)	ดินภายหลังการจำลอง (ร้อยละ)
F5	สารหนูในส่วนที่คงตัว	70.75±5.18	59.76±5.14
F4	สารหนูส่วนที่ชะละลายได้ภายใต้สภาพแวดล้อมที่เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน	6.45±1.64	3.83±0.91
F3	สารหนูส่วนที่ชะละลายได้ภายใต้สภาพแวดล้อมที่เกิดปฏิกิริยารีดักชัน	22.00±6.01	19.83±2.60
F2	สารหนูส่วนที่ชะละลายได้ในกรด	0.67±0.84	16.57±2.80
F1	สารหนูส่วนที่ชะละลายได้ง่าย	0.13±0.03	0.02±0.01

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

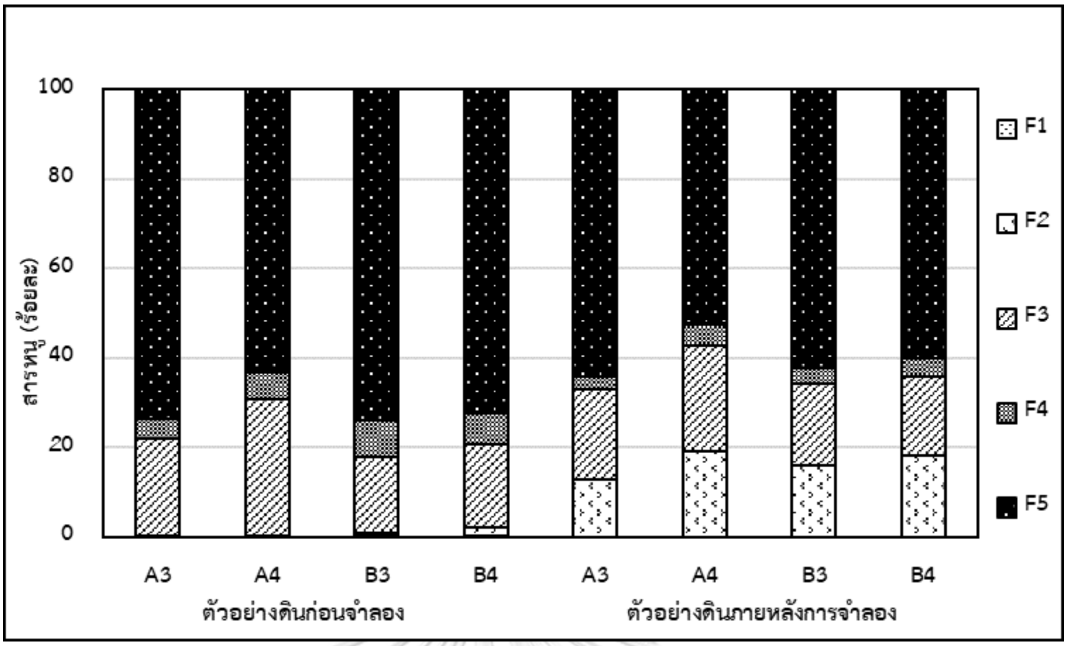
จากตารางที่ 4–3 พบว่าสารหนูในส่วนที่คงตัว (F5) ลดลง ซึ่งจะเห็นได้ว่ามีการเปลี่ยนแปลงเป็นสารหนูในส่วนที่ไม่คงตัว (F1 ถึง F4) เพิ่มมากขึ้น สอดคล้องกับ Damrongsiri (2018) El Samrani et al. (2004) และ Houhou et al. (2009) ที่พบว่าการลดลงของส่วนที่คงตัวมักเกี่ยวข้องกับการเกิดปฏิกิริยารีดักชันในสภาพแวดล้อม ซึ่งจะเกิดขึ้นภายใต้สภาวะไร้อากาศ ในขณะที่การเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันจะเกิดในสภาวะที่มีออกซิเจนและพบส่วนที่คงตัวเพิ่มขึ้น ทั้งนี้ สารหนูในส่วนที่ไม่คงตัวมีความเสี่ยงที่สารหนูจะถูกปลดปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อมได้ง่ายกว่าสารหนูในส่วนที่คงตัว

สารหนูในส่วน F4 ลดลง (สารหนูในรูปนี้มักอยู่ในรูปที่จับกับสารอินทรีย์รวมถึงซัลไฟด์ในดิน) เนื่องจากตรวจพบ AVS ในระบบจำลองนี้จึงนำมาสู่การพิจารณาไดอะแกรม Eh–pH ของสารหนูควบคู่กับ AVS ในดิน (As–S–O–H System; ที่อุณหภูมิ 25 °C ความดัน 1 บรรยากาศ) ซึ่งแสดงใน

รูปที่ จ-1 พบว่าภายหลังการจำลองดินให้อยู่ในสภาวะไร้ออกซิเจน ซึ่งมีค่าอีเอชตั้งแต่ –42±18.75 ถึง –126±11.70 มิลลิโวลต์ (เทียบเท่า –0.02 ถึง –0.12 โวลต์) และค่าพีเอชเฉลี่ยประมาณ 7.39 ซึ่งจากไดอะแกรมจะเห็นได้ว่ารูปทางเคมีสารหนูที่อยู่ในช่วงค่าอีเอชและค่าพีเอชดังกล่าวสามารถเป็นได้ทั้ง As_2O_3 (Arsenic trioxide) As_2S_3 (Arsenic trisulfides หรือ Orpiment) $HAsO_4^{2-}$ และ $H_2AsO_4^-$ (Arsenic acid) ซึ่งความจริงแล้วการที่พบค่าความเข้มข้น AVS ในดินสารหนูก็ควรจะอยู่ในส่วน F4 โดยจับกับ AVS ในดินเพิ่มมากขึ้น แต่ผลปรากฏว่าสารหนูในส่วน F4 ลดลง ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Nickson et al. (2000) ที่พบว่าสารหนูในดินตะกอนไม่มีความสัมพันธ์กับ AVS ในดิน แต่มีสัมพันธ์กับความเข้มข้นของเหล็กในดิน

ทั้งนี้ ดินภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจน สารประกอบของเหล็กจะเกิดปฏิกิริยารีดักชันและทำให้ Fe^{3+} (Ferric) กลายเป็น Fe^{2+} (Ferrous) โดย Fe^{2+} มีความสามารถในการละลายน้ำได้ และสามารถตกตะกอนร่วมกับสารประกอบอื่น ๆ ในดินได้ด้วย (Hartley and Dickinson, 2010) โดย Brookins (1988) พบว่าในช่วงพีเอชและอีเอชดังกล่าว Fe^{2+} สามารถอยู่ในรูป $FeCO_3$ (Ferrous carbonate) $FeOH_2$ (Ferrous hydroxide) และ FeS_2 (Pyrite) ได้ ซึ่งแสดงในรูปที่ จ-2 และ จ-3 โดย Henke (2009) ได้พบว่าสารหนูถูกดูดซับหรือตกตะกอนร่วมกับสารประกอบของ Fe^{2+} ที่เกิดขึ้นได้ ดังนั้น จึงเป็นไปได้ว่าในดินจำลอง เหล็กที่ถูกรีดิวซ์ไปแล้วน่าจะอยู่ในรูปสารประกอบของ Fe^{2+} ทำให้สารหนูในดินที่ปลดปล่อยออกมาจาก F5 และ F4 ถูกดูดซับหรือตกตะกอนไปกับสารประกอบของ Fe^{2+} ที่เกิดขึ้นนั้นได้ แทนที่จะอยู่ในส่วน F3 จึงนำมาสู่การเพิ่มขึ้นของสารหนูในส่วน F2 และส่งผลให้ F3 ที่มักอยู่ในรูปที่จับกับเหล็กและแมงกานีสออกไซด์ไม่มีการเปลี่ยนแปลง ซึ่งผลที่ได้มีความสอดคล้องกับการเพิ่มขึ้นของชีวปริมาณออกฤทธิ์ของสารหนูในดิน

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University



รูปที่ 4-10 เปรียบเทียบผลการสกัดลำดับส่วนของสารหนูในตัวอย่างดินก่อนและหลังจำลองในสภาวะไร้อากาศซึ่งแสดงผลแบบร้อยละ (%)

และเมื่อพิจารณาค่าความเข้มข้นเสมือนทั้งหมดของสารหนูที่สกัดได้ (Pseudo–total As) ในดินจำลองเทียบกับความเข้มข้นของสารหนูทั้งหมดในดิน (Total As) พบว่าค่าร้อยละการกลับคืนของปริมาณสารหนูที่พบในตัวอย่างดินจำลอง พบว่ามีร้อยละการกลับคืนของสารหนูเฉลี่ยมีค่าตั้งแต่ร้อยละ 83.12 ถึง 110.94 เมื่อเทียบกับค่าความเข้มข้นทั้งหมดของสารหนู

ทั้งนี้ เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างการกระจายสัดส่วนกับชีวปริมาณออกฤทธิ์ของสารหนูในดินก่อนและหลังจำลอง พบว่าชีวปริมาณออกฤทธิ์ของสารหนูมีความสัมพันธ์เชิงบวกกับสารหนูในส่วน F2 มากที่สุด (R^2=0.9284) ดังนั้นส่วนที่เป็นชีวปริมาณออกฤทธิ์ของสารหนูในดินในงานวิจัยนี้คือสารหนูในส่วน F2

โดยปกติแล้วการศึกษาชีวปริมาณออกฤทธิ์ของธาตุมลสารมักพบว่า มีความสัมพันธ์กับการกระจายสัดส่วนของธาตุมลสารในส่วนที่เคลื่อนที่ได้ง่าย (Mobile Fraction) เช่น ส่วนที่ชะละลายได้ง่าย (F1) และส่วนที่ชะละลายได้ในกรด (F2) โดยการสกัดแบบ Modified Tessier รวมถึงงานวิจัยของ Liu et al. (2015) ที่ใช้การสกัดโดยวิธี Wenzel (Wenzel et al., 2001) และศึกษาความสัมพันธ์กับสารหนูในต้นข้าวพบว่า สารหนูในส่วนที่ไม่ได้จับอยู่กับเหล็กออกไซด์มีความสัมพันธ์เชิงบวกกับสารหนูในข้าว จึงพิจารณาว่า 2 ส่วนนี้เป็นชีวปริมาณออกฤทธิ์ของสารหนูในข้าว อีกทั้ง

การศึกษาของ Wang et al. (2015) ที่ศึกษาการกระจายสัดส่วนของสารหนูในดินโดยใช้การสกัดตามลำดับส่วน รวมถึงศึกษาชีวปริมาณออกฤทธิ์ของสารหนูโดยใช้การสกัดแบบขั้นตอนเดียว พบความสัมพันธ์เชิงบวกระหว่างชีวปริมาณออกฤทธิ์กับส่วนที่เคลื่อนที่ได้ง่าย ซึ่งมี R^2 สูงถึง 0.83 ซึ่งผลที่ได้มีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกับการศึกษานี้

นอกจากนี้การที่ไม่พบความสัมพันธ์เชิงบวกกับสารหนูในส่วนอื่น สอดคล้องกับ Wang et al. (2015) ที่พบว่ามีความสัมพันธ์เชิงลบกับสารหนูในส่วนที่จับกับเหล็กในฟอร์มต่าง ๆ รวมถึงสารหนูในส่วนที่คงตัว ซึ่งหมายความว่า สารหนูในส่วน F3 และ F5 ที่พบนั้นไม่ใช่ชีวปริมาณออกฤทธิ์ของสารหนูในดิน สอดคล้องกับการศึกษาของ Liu et al. (2015) ที่พบว่าเหล็กออกไซด์มีบทบาทสำคัญในการลดชีวปริมาณออกฤทธิ์ของสารหนูในข้าวเนื่องจากสารหนูจับกับเหล็กออกไซด์ด้วยพันธะที่แข็งแรง รวมถึงการศึกษาของ Wang et al. (2015) ที่พบว่าสารประกอบออกไซด์ของเหล็กและอลูมิเนียมเป็นปัจจัยที่สำคัญที่สุดในการควบคุมชีวปริมาณออกฤทธิ์และการเคลื่อนที่ของสารหนูในดิน

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

บทที่ 5
สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

จากการศึกษาการกระจายสัดส่วนและชีวปริมาณออกฤทธิ์ของสารหนูในดินในพื้นที่เกษตรกรรม บริเวณคลองน้ำฮวย ตำบลเขาหลวง อำเภอวังสะพุง จังหวัดเลย สามารถสรุปผลการศึกษาได้ดังต่อไปนี้

5.1.1 ลักษณะพื้นที่ศึกษา

พื้นที่ศึกษาเป็นพื้นที่เกษตรกรรมที่ตั้งอยู่บริเวณคลองน้ำฮวย ตำบลเขาหลวง อำเภอวังสะพุง จังหวัดเลย โดยมีลักษณะพื้นที่ที่แตกต่างกัน 2 แบบ คือ บริเวณที่ราบลุ่มและบริเวณที่เนินเขา ซึ่งมีการใช้ประโยชน์ด้านเกษตรกรรมที่แตกต่างกัน โดยในบริเวณที่ราบลุ่มมีการปลูกข้าว ส่วนในบริเวณที่เนินเขามีการปลูกยางพารา ทำให้ได้ลักษณะพื้นที่ที่แตกต่างกัน อีกทั้ง เมื่อพิจารณาข้อมูลความเข้มข้นของสารหนูเชิงพื้นที่ พบว่าพื้นที่บริเวณในบริเวณดังกล่าวมีความเข้มข้นของสารหนูในดินสูงกว่าบริเวณอื่น ๆ

5.1.2 การศึกษาดินในนาข้าวและเนินเขาในสภาพพื้นที่จริง (Field condition)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

5.1.2.1 ความแตกต่างของคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของดินบริเวณที่ราบลุ่มและที่เนินเขา

1) ดินบริเวณพื้นที่ราบลุ่มและเนินเขา มีลักษณะเนื้อดินที่พบส่วนใหญ่คือดินเหนียวและดินร่วนเหนียว โดยรวมแล้วดินทั้งสองพื้นที่มีลักษณะคล้ายกัน

2) ดินบริเวณพื้นที่ราบลุ่มและเนินเขาทั้ง 2 ฤดูกาล มีค่าพีเอชที่ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p>0.05$) ดินในพื้นที่ศึกษามีค่าพีเอชเฉลี่ยเท่ากับ 5.02±0.74 สอดคล้องกับข้อมูลชุดดินในพื้นที่ที่มีความเป็นกรดตามลักษณะทางธรรมชาติ และพบว่าดินในฤดูฝนมีพีเอชเฉลี่ยสูงกว่าดินในฤดูร้อน อาจเกิดจากการที่น้ำฝนสามารถชะละลายความเป็นกรดของดินออกไป ส่งผลให้ดินมีความเป็นกรดลดลงชั่วคราว

3) ทั้งบริเวณพื้นที่ราบลุ่มและเนินเขามีค่าอีเอชมากกว่า +500 มิลลิโวลต์ บ่งชี้ว่ามีออกซิเจนเป็นตัวรับอิเล็กตรอนในดิน และพบว่าดินบริเวณพื้นที่ราบลุ่มในฤดูฝนมีค่าอีเอชเฉลี่ยเท่ากับ +595±46.98 มิลลิโวลต์ ซึ่งต่ำกว่าดินบริเวณเนินเขาที่มีค่าอีเอชเฉลี่ยเท่ากับ +648±31.05 มิลลิโวลต์ ซึ่งคาดว่าเป็นผลจากการที่ดินในบริเวณพื้นที่ราบลุ่มในฤดูฝนมีน้ำตื้น ๆ ไหลปกคลุมดินและมีน้ำจากช่องเขาไหลผ่านตลอดเวลา ส่งผลให้ออกซิเจนถ่ายเทได้ยากกว่า ค่าอีเอชของดินในพื้นที่ราบลุ่มจึงต่ำกว่าดินบริเวณที่เนินเขา

4) ปริมาณอินทรียวัตถุในพื้นที่ราบลุ่มและเนินเขามีค่าเฉลี่ยเท่ากับร้อยละ 2.22±0.23 และ 2.63±0.66 ตามลำดับ ถือว่าเป็นดินที่มีความอุดมสมบูรณ์สูง และพบว่าบริเวณพื้นที่ราบลุ่มในทั้ง 2 ฤดูกาลมีความแตกต่างกันเล็กน้อยในเรื่องของอินทรียวัตถุซึ่งอาจเกิดจากการปรับปรุงดิน

5) ความเข้มข้นเหล็กทั้งหมดที่พบในดินบริเวณพื้นที่ราบลุ่มและเนินเขา มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 30,482±9,737 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม โดยรวมถือว่าอยู่ในช่วงค่าความเข้มข้นของเหล็กที่พบในดินประเทศไทย

6) ความเข้มข้นของสารหนูในดินบริเวณพื้นที่ราบลุ่ม (เฉลี่ยเท่ากับ 30.71±10.01 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม) มากกว่าดินบริเวณพื้นที่เนินเขา (เฉลี่ยเท่ากับ 12.32±5.46 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม) โดยค่าความเข้มข้นของสารหนูบริเวณที่เนินเขานั้นคาดว่าเป็นค่าความเข้มข้นพื้นฐานของสารหนูในธรรมชาติของดินในพื้นที่ ส่วนบริเวณพื้นที่ราบลุ่มคาดว่าเป็นผลจากการพัดพาสะสม รวมถึงผลของปุ๋ยหรือยาฆ่าแมลง ซึ่งไม่ทราบที่มาที่แน่นอน

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

สามารถสรุปได้ว่า ในงานวิจัยนี้ไม่พบความแตกต่างของดัชนีที่ตรวจวัดในระหว่างฤดูกาลของดินบริเวณเนินเขา ส่วนดินบริเวณที่ราบลุ่มมีความแตกต่างกันเล็กน้อยในเรื่องของปริมาณอินทรียวัตถุซึ่งอาจเกิดจากการปรับปรุงดิน และเมื่อพิจารณาในเรื่องความต่างของพื้นที่ พบว่าค่าความเข้มข้นของสารหนูในพื้นที่ราบลุ่มมีค่าสูงกว่าพื้นที่เนินเขาอย่างชัดเจน โดยเป็นที่น่าสังเกตว่าค่าอีเอชจากตัวอย่างทั้งหมดมีค่ามากกว่า +500 มิลลิโวลต์ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าไม่เกิดภาวะไร้อากาศ ถึงแม้ดินนาข้าวในฤดูฝนจะมีน้ำขังแต่ก็เป็นน้ำตื้น ๆ ค่าอีเอชจึงยังเป็นบวก อันเป็นลักษณะเฉพาะของพื้นที่นี้ โดยในฤดูฝนจะพบว่าค่าอีเอชในพื้นที่ราบลุ่มมีค่าต่ำกว่าพื้นที่เนินเขาเพียงเล็กน้อย และดินในพื้นที่มีพีเอชเป็นกรดซึ่งมีค่าพีเอชประมาณ 5

5.1.2.2 ชีวปริมาณออกฤทธิ์และการกระจายสัดส่วนของสารหนูในดิน

เมื่อพิจารณาผลของฤดูกาล พบว่าดินบริเวณพื้นที่ราบลุ่ม ในฤดูร้อนมีชีวปริมาณออกฤทธิ์ของสารหนูเฉลี่ยร้อยละ 7.60±3.56 ซึ่งมีค่ามากกว่าฤดูฝนที่มีค่าเฉลี่ยร้อยละ 1.84±0.22 ส่วนบริเวณพื้นที่เนินเขาทั้ง 2 ฤดูกาลมีชีวปริมาณออกฤทธิ์ของสารหนูที่ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p>0.05$) โดยมีชีวปริมาณออกฤทธิ์ของสารหนูเฉลี่ยร้อยละ 4.66±2.17 อีกทั้งยังพบว่าความแตกต่างของพื้นที่ไม่มีผลต่อชีวปริมาณออกฤทธิ์ของสารหนูในดิน และจะเห็นได้ว่าชีวปริมาณออกฤทธิ์ของสารหนูในดินทั้ง 2 บริเวณมีค่าต่ำมาก

สำหรับการกระจายสัดส่วนของสารหนูแบ่งออกเป็น 5 ส่วน ประกอบด้วย ส่วนที่ชะละลายได้ง่าย (F1) ส่วนที่ชะละลายได้ในกรด (F2) ส่วนที่ชะละลายได้ภายใต้สภาพแวดล้อมที่เกิดปฏิกิริยารีดักชัน (F3) ส่วนที่ชะละลายได้ภายใต้สภาพแวดล้อมที่เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน (F4) และส่วนที่คงตัว (F5)

เมื่อพิจารณาการกระจายสัดส่วนของสารหนูในดิน พบว่า

1) ทั้งบริเวณพื้นที่ราบลุ่มและบริเวณพื้นที่เนินเขา พบสารหนูในส่วนที่คงตัว (F5) (เฉลี่ยร้อยละ 77.07±7.98) มากกว่าสารหนูในส่วนที่ไม่คงตัว (F1 ถึง F4) (เฉลี่ยร้อยละ 5.73±7.56) บ่งชี้ว่าสารหนูบริเวณที่ราบลุ่มและบริเวณเนินเขามีต้นกำเนิดมาจากธรรมชาติ

2) บริเวณพื้นที่ราบลุ่มพบร้อยละของสารหนูส่วน F5 (เฉลี่ยร้อยละ 73.01±6.21) น้อยกว่าบริเวณพื้นที่เนินเขา (เฉลี่ยร้อยละ 81.12±7.77) บ่งชี้ว่า F5 บริเวณพื้นที่ราบลุ่มได้เปลี่ยนเป็นรูปที่ไม่คงตัวโดยเฉพาะ F3 ซึ่งอาจมีสาเหตุมาจากการมีน้ำขังในดิน หรือจากการใช้ประโยชน์ที่ดินในการเพาะปลูกข้าว

3) หากพิจารณาความเข้มข้นของสารหนูในดิน พบว่าสารหนูส่วน F5 ในบริเวณพื้นที่ราบลุ่ม (เฉลี่ย 30.71±10.01 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม) มีค่าสูงกว่าบริเวณพื้นที่เนินเขา (เฉลี่ย 12.32±5.46 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม) ซึ่งอาจบ่งชี้ได้ว่าสารหนูในดินไม่ได้ถูกพัดมาจากเนินเขาแต่น่าจะถูกพัดพามาจากบริเวณด้านบนของพื้นที่

4) สารหนูในส่วนที่ไม่คงตัว มักอยู่ในส่วน F3 มากกว่าส่วนอื่น ซึ่งมีบทบาทสำคัญในการตรึงสารหนูในดิน ทั้งนี้ หากสภาพแวดล้อมมีการเปลี่ยนแปลงไป เช่น เมื่อดินอยู่ในสภาวะไร้ออกซิเจนจะส่งผลให้ค่าอีเอชเกิดการเปลี่ยนแปลง และจะส่งผลให้เหล็กออกไซด์รวมถึงแมงกานีสออกไซด์บางส่วนเปลี่ยนฟอร์มและละลายไป รวมถึงจะส่งผลให้สารหนูถูกปลดปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อม

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ทั้งนี้ เมื่อพิจารณาผลการศึกษาการกระจายสัดส่วนควบคู่กับชีวปริมาณออกฤทธิ์ของสารหนูในดิน พบว่าสารหนูส่วนที่ F1 F2 และ F4 ก็มีปริมาณน้อยมากเช่นเดียวกัน (ค่าเฉลี่ยร้อยละ 0.45±0.75 0.24±0.48 และ 7.48±3.63 ตามลำดับ) จึงคาดว่าชีวปริมาณออกฤทธิ์ของสารหนูอาจจะมีความเกี่ยวข้องกับ F1 F2 หรือ F4 จึงได้พิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างการกระจายสัดส่วนกับชีวปริมาณออกฤทธิ์ของสารหนู โดยการพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) ซึ่งพบความสัมพันธ์ระหว่างการกระจายสัดส่วนกับชีวปริมาณออกฤทธิ์ของสารหนูในค่าที่ต่ำ (R^2<0.6)

5.1.3 ดินภายใต้การจำลองให้อยู่ในสภาวะไร้อากาศ (Anaerobic)

จากการคาดการณ์ว่าในบริเวณพื้นที่ราบลุ่มที่มีการเพาะปลูกข้าวเป็นบริเวณที่มีน้ำขัง และอาจเกิดการหมักหมมของอินทรียวัตถุในดิน ส่งผลให้ออกซิเจนไม่สามารถส่งผ่านชั้นน้ำลงมาใต้ดินได้เพียงพอ ประกอบกับออกซิเจนที่มีอยู่เดิมถูกจุลินทรีย์ในดินใช้ไปจนหมด และมีค่าอีเอชต่ำจนสารประกอบต่าง ๆ ในดินถูกใช้เป็นตัวรับอิเล็กตรอนแทนออกซิเจน แต่จากการตรวจวัดค่าอีเอชของตัวอย่างดินในนาข้าวในฤดูฝนซึ่งมีน้ำขัง พบว่ามีค่าอีเอชประมาณ +595±46.98 มิลลิโวลต์ บ่งชี้ว่ามีออกซิเจนเป็นตัวรับอิเล็กตรอนในดิน ซึ่งแตกต่างจากที่คาดการณ์ไว้ ด้วยเหตุนี้จึงเป็นที่มาของการจำลองดินให้อยู่ในสภาวะไร้อากาศ

5.1.3.1 การเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางเคมีของดินภายหลังการจำลองในสภาวะไร้อากาศ

สำหรับคุณสมบัติทางเคมีของดินที่จำลองอยู่ในสภาวะไร้อากาศ พบความแตกต่างของดัชนีที่ตรวจวัดดังนี้

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

1) ดินมีค่าอีเอชลดลงจนเป็นค่าติดลบ (ก่อนจำลองค่าอีเอชเฉลี่ยเท่ากับ +612±44.90 หลังจำลองค่าอีเอชเฉลี่ยเท่ากับ –80±39.24 มิลลิโวลต์) บ่งชี้ว่าเกิดสภาวะไร้อากาศเนื่องจากปฏิกิริยาการย่อยสลายสารอินทรีย์ในดิน

2) ค่าพีเอชของดิน ซึ่งในดินจำลองมีค่าพีเอชสูงขึ้นจากเดิมที่เป็นกรดจนมีค่าเป็นกลาง (ก่อนจำลองค่าพีเอชเฉลี่ยเท่ากับ 5.70±0.31 หลังจำลองค่าพีเอชเฉลี่ยเท่ากับ 7.39±0.11) เนื่องจากการเกิดปฏิกิริยารีดอกซ์ภายใต้สภาวะไร้อากาศ

3) ตรวจพบ AVS ในดิน จึงสามารถบ่งชี้ได้ว่าในดินที่จำลองอยู่ในสภาวะไร้อากาศมีซัลเฟตเป็นตัวรับอิเล็กตรอนในดิน

ซึ่งทั้งหมดที่กล่าวมาในข้างต้นเป็นไปตามวัตถุประสงค์ของงานการทดลองนี้

5.1.3.2 การเปลี่ยนแปลงชีวปริมาณออกฤทธิ์และการกระจายสัดส่วนของสารหนูในดินภายหลังการจำลองในสภาวะไร้อากาศ

ภายหลังจากการจำลอง พบว่าชีวปริมาณออกฤทธิ์ของสารหนูมีค่าเฉลี่ยร้อยละ 27.92±5.49 ซึ่งสูงขึ้นจากก่อนจำลองที่มีชีวปริมาณออกฤทธิ์ของสารหนูเฉลี่ยเพียงร้อยละ 1.84±0.20

และเมื่อพิจารณาการกระจายสัดส่วนของสารหนูในดินภายหลังจากการจำลอง พบสารหนูในส่วน F5 มากที่สุด (เฉลี่ยร้อยละ 59.76±5.14) รองลงมาคือ F3 (เฉลี่ยร้อยละ 19.83±2.60) และ F2 (เฉลี่ยร้อยละ 16.57±2.80) ตามลำดับ ในขณะที่ F4 และ F1 มีปริมาณน้อยมาก (เฉลี่ยร้อยละ 3.83±0.91 และ 0.02±0.01 ตามลำดับ) เมื่อเทียบกับปริมาณสารหนูทั้งหมดในดิน สามารถสรุปได้ว่า

1) สารหนูในส่วน F5 ลดลง โดยเกิดการเปลี่ยนแปลงเป็นสารหนูในส่วนที่ไม่คงตัว (F1 ถึง F4) เพิ่มขึ้น ซึ่งจะมีความเสี่ยงที่สารหนูจะถูกปลดปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อมได้

2) สารหนูในส่วน F4 ลดลง สอดคล้องกับการศึกษาของ Nickson et al. (2000) ที่พบว่าสารหนูในดินตะกอนไม่มีความสัมพันธ์กับ AVS ในดิน แต่มีสัมพันธ์กับความเข้มข้นของเหล็กในดิน

3) ดินภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจน สารประกอบของเหล็กจะเกิดปฏิกิริยารีดักชันและทำให้ Fe^{3+} กลายเป็น Fe^{2+} โดย Fe^{2+} ซึ่งสามารถตกตะกอนร่วมกับสารประกอบอื่น ๆ ในดินและดูดซับสารหนูได้ ซึ่งปรากฏในส่วน F2 ที่เพิ่มขึ้น

ผลที่ได้มีความสอดคล้องกับการเพิ่มขึ้นของชีวปริมาณออกฤทธิ์ของสารหนูในดิน และเมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างการกระจายสัดส่วนกับชีวปริมาณออกฤทธิ์ของสารหนูในดินก่อนและหลังจำลอง พบว่าชีวปริมาณออกฤทธิ์ของสารหนูมีความสัมพันธ์เชิงบวกกับสารหนูในส่วน F2 มากที่สุด (R^2=0.9284) ดังนั้นส่วนที่เป็นชีวปริมาณออกฤทธิ์ของสารหนูในดินในงานวิจัยนี้คือสารหนูในส่วน F2

ปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับชีวปริมาณออกฤทธิ์และการกระจายสัดส่วนของสารหนูในดิน

การเปลี่ยนแปลงของชีวปริมาณออกฤทธิ์และการกระจายสัดส่วนของสารหนูในดินในงานวิจัยนี้พบว่าเกี่ยวข้องกับค่าพีเอชและอีเอชในดิน

จากการศึกษาดินในนาข้าวและเนินเขาที่เป็นบริเวณที่มีการปนเปื้อนสารหนูทั้ง 2 ฤดูกาล พบว่าดินมีความเป็นกรด (ประมาณพีเอช 5) ค่าอีเอชที่ตรวจวัดได้ทั้งหมดเป็นค่าที่สูงซึ่งมีค่ามากกว่า +500 มิลลิโวลต์ บ่งชี้ว่ามีออกซิเจนเป็นตัวรับอิเล็กตรอนในดิน และที่ค่าพีเอชและอีเอชดังกล่าวสาร

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

หนูจะอยู่ในรูป $H_2AsO_4^-$ ซึ่งมีความเสถียร (Ferguson and Gavis, 1972) ซึ่งโดยปกติแล้วพบว่า $H_2AsO_4^-$ มีการดูดซับมากที่สุดที่ประมาณพีเอช 5 (Frost and Griffin, 1977)

และเมื่อดินอยู่ภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจน พบว่าภายหลังการจำลอง ดินมีพีเอชเพิ่มขึ้นจนเข้าสู่สภาวะสมดุลในธรรมชาติ (พีเอชอยู่ในช่วง 6.5–7.5) ซึ่งแตกต่างจากดินก่อนจำลองอย่างมีนัยสำคัญ ($p<0.05$) และมีค่าอีเอชลดลง (เฉลี่ยเท่ากับ –80±39.24 มิลลิโวลต์) ทั้งนี้ยังตรวจพบค่าความเข้มข้น AVS ในดิน จึงสามารถบ่งชี้ได้ว่าองค์ประกอบที่สำคัญต่อการดูดซับสารหนูเกิดการเปลี่ยนแปลง โดยในการศึกษานี้ พบว่าภายใต้สภาวะไร้อากาศจะมีสารหนูส่วนที่คงตัวหรือ F5 ลดลงและมีส่วนที่จับกับสารอินทรีย์ลดลงด้วย และที่ค่าพีเอชและอีเอชดังกล่าวสารหนูสามารถดูดซับไปกับสารประกอบของ Fe^{2+} ที่เกิดขึ้น จึงนำมาสู่การเพิ่มขึ้นของสารหนูในส่วน F2 ซึ่งสารหนูในส่วนนี้จะมีความเสี่ยงที่สารหนูจะถูกปลดปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อมได้ สอดคล้องกับชีวปริมาณออกฤทธิ์ของสารหนูที่มีค่าสูงกว่าในดินก่อนจำลอง

5.2 ข้อเสนอแนะสำหรับการทำเกษตรกรรมในพื้นที่ปนเปื้อนสารหนู

จากการศึกษาพบว่าชีวปริมาณออกฤทธิ์ของสารหนูจะเพิ่มขึ้นเมื่อดินอยู่ในสภาวะไร้อากาศ จึงควรหลีกเลี่ยงการทำให้ดินอยู่ในสภาวะไร้อากาศ อย่างเช่นการปลูกข้าวซึ่งต้องมีการขังน้ำ ดังนั้นเกษตรกรควรมีการปลูกพืชชนิดอื่นสลับกับการปลูกข้าว หรือเปลี่ยนไปปลูกพืชเศรษฐกิจชนิดอื่น นอกจากนี้ อาจหลีกเลี่ยงโดยการปลูกพืชที่ไม่ใช้ในการบริโภค

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

บรรณานุกรม

Uncategorized References

Adriano, D. C. 2001. Arsenic. Trace elements in terrestrial environments: Springer. 219-261.

Akins, M. B., and Lewis, R. J. 1976. Chemical Distribution and Gaseous Evolution of Arsenic-74 Added to Soils as DSMA-74As 1. Soil Science Society of America Journal. 40(5): 655-658.

Akter, K. F., Owens, G., Davey, D. E., and Naidu, R. 2005. Arsenic speciation and toxicity in biological systems. Reviews of environmental contamination and toxicology: Springer. 97-149.

Anawar, H. M., Garcia-Sanchez, A., and Santa Regina, I. 2008. Evaluation of various chemical extraction methods to estimate plant-available arsenic in mine soils. Chemosphere. 70(8): 1459-1467.

ASTM, I. ASTM D422–63 Standard Test Method for Particle–Size Analysis of Soils (Withdrawn 2016) [Online]. 2002. Available from: www.astm.org [11 April 2018]

ASTM, I. ASTM G200–09 Standard Test Method for Measurement of Oxidation–Reduction Potential (ORP) of Soil [Online]. 2014. Available from: www.astm.org

Baig, J. A., Kazi, T. G., Arain, M. B., Shah, A. Q., Sarfraz, R. A., Afridi, H. I., Kandhro, G. A., Jamali, M. K., and Khan, S. 2009. Arsenic fractionation in sediments of different origins using BCR sequential and single extraction methods. J Hazard Mater. 167(1-3): 745-751.

Bhattacharyya, T. 2015. The Soil: A Natural Resource. 1-19.

Boyle, R., and Jonasson, I. 1973. The geochemistry of arsenic and its use as an indicator element in geochemical prospecting. Journal of Geochemical Exploration. 2(3): 251-296.

Brookins, D. 1988. Eh-pH Diagrams for Geochemistry. 66-67.

Buzek, F., Cejkova, B., Dousova, B., Jackova, I., Kadlecova, R., and Lnenickova, Z. 2013. Mobilization of arsenic from acid deposition–The Elbe River catchment, Czech Republic. Applied geochemistry. 33: 281-293.

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

Carbonell-Barrachina, A., Jugsujinda, A., Burlo, F., Delaune, R., and Patrick Jr, W. 2000. Arsenic chemistry in municipal sewage sludge as affected by redox potential and pH. Water Research. 34(1): 216-224.

Damrongsiri, S. 2018. Transformation of heavy metal fractionation under changing environments: a case study of a drainage system in an e-waste dismantling community. Environmental Science and Pollution Research. 25(12): 11800-11811.

de Livera, J., McLaughlin, M. J., Hettiarachchi, G. M., Kirby, J. K., and Beak, D. G. 2011. Cadmium solubility in paddy soils: Effects of soil oxidation, metal sulfides and competitive ions. Science of the Total Environment. 409(8): 1489-1497.

Devesa-Rey, R., Paradelo, R., Díaz-Fierros, F., and Barral, M. T. 2008. Fractionation and Bioavailability of Arsenic in the Bed Sediments of the Anllóns River (NW Spain). Water, Air, and Soil Pollution. 195(1-4): 189-199.

Doyle, T. A., Davis, A., and Runnells, D. D. 1994. Predicting the environmental stability of treated copper smelter flue dust. Applied geochemistry. 9(3): 337-350.

Du, X., Cui, Y., Weng, L., Cao, Q., and Zhu, Y. 2008. Arsenic bioavailability in the soil amended with leaves of arsenic hyperaccumulator, Chinese brake fern (Pteris vittata L.). Environmental toxicology and chemistry. 27(1): 126-130.

El Samrani, A., Lartiges, B., Ghanbaja, J., Yvon, J., and Kohler, A. 2004. Trace element carriers in combined sewer during dry and wet weather: an electron microscope investigation. Water Research. 38(8): 2063-2076.

Essington, M. E. 2004. Soil and water chemistry: an integrative approach.

Ferguson, J. F., and Gavis, J. 1972. A review of the arsenic cycle in natural waters. Water Research. 6(11): 1259-1274.

Fitz, W. J., and Wenzel, W. W. 2002. Arsenic transformations in the soil–rhizosphere–plant system: fundamentals and potential application to phytoremediation. Journal of Biotechnology. 99(3): 259-278.

Frost, R., and Griffin, R. 1977. Effect of pH on Adsorption of Arsenic and Selenium from Landfill Leachate by Clay Minerals 1. Soil Science Society of America Journal. 41(1): 53-57.

Gleyzes, C., Tellier, S., and Astruc, M. 2002. Fractionation studies of trace elements in

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

contaminated soils and sediments: a review of sequential extraction procedures. TrAC Trends in Analytical Chemistry. 21(6-7): 451-467.

Gotoh, S., and Yamashita, K. 1966. Oxidation-reduction potential of a paddy soil in in situ with special reference to the production of ferrous ikon, manganous manganese and sulfide. Soil Science and Plant Nutrition. 12(6): 24-32.

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(1): 38-47.

Hartley, W., and Dickinson, N. M. 2010. Exposure of an Anaerobic and contaminated canal sediment: mobility of metal(loid)s. Environ Pollut. 158(3): 649-657.

Henke, K. 2009. Arsenic: environmental chemistry, health threats and waste treatment, John Wiley & Sons.

HOODA, P. S. 2010. TRACE ELEMENTS IN SOILS. Trace Elements in Soils.

Houhou, J., Lartiges, B., Montarges-Pelletier, E., Sieliechi, J., Ghanbaja, J., and Kohler, A. 2009. Sources, nature, and fate of heavy metal-bearing particles in the sewer system. Science of the Total Environment. 407(23): 6052-6062.

Intorpetch, B., Wisawapipat, W., Arunlertaree, C., and Teartisup, P. 2014. Soil physicochemical status and nutrient management for paddy soils in the lower central plain of Thailand after the flood disaster in 2011.

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

Kabata-Pendias, A. 2001. Trace elements in soils and plants.

Kalev, S. D., and Toor, G. S. 2018. The Composition of Soils and Sediments. Green Chemistry: 339–357.

Khalid, S., Shahid, M., Niazi, N. K., Rafiq, M., Bakhat, H. F., Imran, M., Abbas, T., Bibi, I., and Dumat, C. 2017. Arsenic behaviour in soil-plant system: Biogeochemical reactions and chemical speciation influences. Enhancing Cleanup of Environmental Pollutants: Springer. 97-140.

Kim, E. J., Yoo, J. C., and Baek, K. 2014. Arsenic speciation and bioaccessibility in arsenic-contaminated soils: sequential extraction and mineralogical investigation. Environ Pollut. 186: 29-35.

Kumpiene, J., Ore, S., Renella, G., Mench, M., Lagerkvist, A., and Maurice, C. 2006. Assessment of zerovalent iron for stabilization of chromium, copper, and arsenic

in soil. Environ Pollut. 144(1): 62-69.

Larios, R., Fernandez-Martinez, R., Alvarez, R., and Rucandio, I. 2012. Arsenic pollution and fractionation in sediments and mine waste samples from different mine sites. Sci Total Environ. 431: 426-435.

Liang, S., Guan, D.-X., Ren, J.-H., Zhang, M., Luo, J., and Ma, L. Q. 2014. Effect of aging on arsenic and lead fractionation and availability in soils: coupling sequential extractions with diffusive gradients in thin-films technique. Journal of hazardous materials. 273: 272-279.

Liu, Luo, C.-l., Xu, Wu, C.-a., Li, F., and Zhang, G. 2012. Effects of calcium peroxide on arsenic uptake by celery (Apium graveolens L.) grown in arsenic contaminated soil. Chemosphere. 86(11): 1106-1111.

Liu, 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? Environ Pollut. 199: 95-101.

Lombi, E., Sletten, R., and Wenzel, W. 2000. Sequentially extracted arsenic from different size fractions of contaminated soils. Water, Air, and Soil Pollution. 124(3-4): 319-332.

Marin, A., Masscheleyn, P., and Patrick, W. 1993. Soil redox-pH stability of arsenic species and its influence on arsenic uptake by rice. Plant and Soil. 152(2): 245-253.

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

Martínez-Sánchez, M. J., Martínez-López, S., García-Lorenzo, M. L., Martínez-Martínez, L. B., and Pérez-Sirvent, C. 2011. Evaluation of arsenic in soils and plant uptake using various chemical extraction methods in soils affected by old mining activities. Geoderma. 160(3-4): 535-541.

Mehra, O., and Jackson, M. (1960). *Iron oxide removal from soils and clays by a dithionite-citrate system buffered with sodium bicarbonate.* Paper presented at the Proceedings 7th nat. Conf. Clays.

Meunier, L., Walker, S. R., Wragg, J., Parsons, M. B., Koch, I., Jamieson, H. E., and Reimer, K. J. 2010. Effects of soil composition and mineralogy on the bioaccessibility of arsenic from tailings and soil in gold mine districts of Nova Scotia. Environmental Science & Technology. 44(7): 2667-2674.

Mitsch, W., and Gosselink, J. 2015. Wetlands. 5th Edition, New York: John Wiley & sons.

Narteh, L., and Sahrawat, K. 1999. Influence of flooding on electrochemical and chemical properties of West African soils. Geoderma. 87(3-4): 179-207.

Niazi, N. K., Singh, B., Van Zwieten, L., and Kachenko, A. G. 2011. Phytoremediation potential of Pityrogramma calomelanos var. austroamericana and Pteris vittata L. grown at a highly variable arsenic contaminated site. International journal of phytoremediation. 13(9): 912-932.

Nickson, R., McArthur, J., Ravenscroft, P., Burgess, W., and Ahmed, K. 2000. Mechanism of arsenic release to groundwater, Bangladesh and West Bengal. Applied geochemistry. 15(4): 403-413.

Nordstrom, D., and Wilde, F. 2005. Reduction–oxidation potential-electrode method (ver. 1.2): US Geological Survey Techniques of Water-Resources Investigations, book 9, chap. A6., sec. 6.5, September 2005 (Ed.),^(Eds.).

Nordtest. Solid waste, granular inorganic material: compliance batch leaching test [Online]. 1998. Available from: http://www.nordtest.info/images/documents/nt-methods/environment/NT%20envir%20005_Solid%20waste,%20granular%20inorganic%20material_Compliance%20batch%20leaching%20test_Nordtest%20Method.pdf

Nriagu, J. O., and Azcue, J. 1994. Arsenic in the environment. Part I: cycling and characterization: John Wiley & Sons New York, NY. 26.

OECD. 2002. Aerobic and Anaerobic Transformation in Aquatic Sediment Systems, OECD Guidelines for the Testing of Chemicals, Section 3: OECD Publishing Paris.

Olsen, S. R. 1954. Estimation of available phosphorus in soils by extraction with sodium bicarbonate: United States Department Of Agriculture; Washington.

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(1-2): 243-257.

Ponnamperuma, F. N. 1972. The chemistry of submerged soils. Advances in agronomy. 24. 29-96.

Prakongkep, N., Suddhiprakarn, A., Kheoruenromne, I., Smirk, M., and Gilkes, R. J. 2008.

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

The geochemistry of Thai paddy soils. Geoderma. 144(1-2): 310-324.

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(2): 69-83.

Ritcey, G. M. 2005. Tailings management in gold plants. Hydrometallurgy. 78(1-2): 3-20.

Ruby, M. V., Davis, A., Schoof, R., Eberle, S., and Sellstone, C. M. 1996. Estimation of lead and arsenic bioavailability using a physiologically based extraction test. Environmental Science & Technology. 30(2): 422-430.

Ryu, C., Suguri, M., Iida, M., and Umeda, M. 2010. Investigation into possible use of methane fermentation digested sludge as liquid fertilizer for paddy fields. Engineering in Agriculture, Environment and Food. 3(1): 32-37.

Sahrawat, K. L. 2015. Redox potential and pH as major drivers of fertility in submerged rice soils: a conceptual framework for management. Communications in Soil Science and Plant Analysis. 46(13): 1597-1606.

Sarkar, D., Makris, K., Parra-Noonan, M., and Datta, R. 2007. Effect of soil properties on arsenic fractionation and bioaccessibility in cattle and sheep dipping vat sites. Environment international. 33(2): 164-169.

Semple, K. T., Doick, K. J., Jones, K. C., Burauel, P., Craven, A., and Harms, H. 2004. Peer reviewed: defining bioavailability and bioaccessibility of contaminated soil and sediment is complicated. Environmental Science & Technology.

Shahid, M., Dumat, C., Aslam, M., and Pinelli, E. 2012. Assessment of lead speciation by organic ligands using speciation models. Chemical Speciation & Bioavailability. 24(4): 248-252.

Shakoor, M. B., Niazi, N. K., Bibi, I., Murtaza, G., Kunhikrishnan, A., Seshadri, B., Shahid, M., Ali, S., Bolan, N. S., and Ok, Y. S. 2016. Remediation of arsenic-contaminated water using agricultural wastes as biosorbents. Critical Reviews in Environmental Science and Technology. 46(5): 467-499.

Sharma, V. K., and Sohn, M. 2009. Aquatic arsenic: toxicity, speciation, transformations, and remediation. Environment international. 35(4): 743-759.

Shiowatana, J., McLaren, R. G., Chanmekha, N., and Samphao, A. 2001. Fractionation of arsenic in soil by a continuous-flow sequential extraction method. Journal of

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

environmental quality. 30(6): 1940-1949.

Smith, E. R. G., Naidu, R., and Alston, A. M. Arsenic in the soil environment. Academic Press, 1998.

Tang, X.-Y., Zhu, Y.-G., Shan, X.-Q., McLaren, R., and Duan, J. 2007. The ageing effect on the bioaccessibility and fractionation of arsenic in soils from China. Chemosphere. 66(7): 1183-1190.

Tanji, K. K., Gao, S., Scardaci, S. C., and Chow, A. T. 2003. Characterizing redox status of paddy soils with incorporated rice straw. Geoderma. 114(3): 333-353.

Tessier, A., Campbell, P. G. C., and Bisson, M. 1979. Sequential extraction procedure for the speciation of particulate trace metals. Analytical Chemistry. 51(7): 844-851.

U.S. EPA. Method 9045D Soil and Waste pH [Online]. 2004. Available from: https://www.epa.gov/sites/production/files/2015-12/documents/9045d.pdf [11 April 2018]

U.S. EPA. Method 3051A (SW–846): Microwave Assisted Acid Digestion of Sediments, Sludges, and Oils [Online]. 2007. Available from: https://www.epa.gov/sites/production/files/2015-12/documents/3051a.pdf [11 April 2018]

U.S. EPA. Method 6010D (SW-846): Inductively Coupled Plasma-Atomic Emission Spectrometry [Online]. 2014. Available from: https://www.epa.gov/sites/production/files/2015-12/documents/6010d.pdf [11 April 2018]

USDA-NRCS. Soil Bulk Density / Moisture / Aeration – Soil Quality Kit [Online]. n.d. Available from: https://www.nrcs.usda.gov/Internet/FSE_DOCUMENTS/nrcs142p2_053260.pdf [2 September 2018]

Vaxevanidou, K., Giannikou, S., and Papassiopi, N. 2012. Microbial arsenic reduction in polluted and unpolluted soils from Attica, Greece. Journal of hazardous materials. 241: 307-315.

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(1): 29-38.

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

Wang, Bai, L., Zeng, X., Su, S., Wang, Y., and Wu, C. 2014. Assessment of arsenic availability in soils using the diffusive gradients in thin films (DGT) technique—a comparison study of DGT and classic extraction methods. Environmental Science: Processes & Impacts. 16(10): 2355-2361.

Wang, Zeng, X., Lu, 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. Environ Pollut. 207: 79-87.

Wang, and Zhao. 2009. On the potential of biological treatment for arsenic contaminated soils and groundwater. Journal of environmental Management. 90(8): 2367-2376.

Weiss, R. F. 1970. The solubility of nitrogen, oxygen and argon in water and seawater. Deep Sea Research and Oceanographic Abstracts. 17(4): 721-735.

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. Analytica chimica acta. 436(2): 309-323.

Wild, A. 1993. Soils and the Environment: Cambridge University Press.

Wilson, F. H., and Hawkins, D. B. 1978. Arsenic in streams, stream sediments, and ground water, fairbanks area, alaska. Environmental Geology. 2(4): 195-202.

Woolson, E. A., Axley, J. H., and Kearney, P. C. 1971. Correlation between Available Soil Arsenic, Estimated by Six Methods, and Response of Corn (Zea mays L.)1. Soil Science Society of America Journal. 35: 101-105.

Xiong, T., Austruy, A., Pierart, A., Shahid, M., Schreck, E., Mombo, S., and Dumat, C. 2016. Kinetic study of phytotoxicity induced by foliar lead uptake for vegetables exposed to fine particles and implications for sustainable urban agriculture. Journal of Environmental Sciences. 46: 16-27.

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 Anaerobic sludge from biogas reactors. Talanta. 89: 470-477.

Yu, Li, F.-B., Liu, C.-S., Huang, Liu, T.-X., and Yu, W.-M. 2016. Iron redox cycling coupled to transformation and immobilization of heavy metals: implications for paddy

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

rice safety in the red soil of South China. Advances in Agronomy. 137: 279-317.

Yu, Tsai, L.-J., Chen, S.-H., and Ho, S.-T. 2001. Chemical binding of heavy metals in Anaerobic river sediments. Water Research. 35(17): 4086-4094.

Zarcinas, B. A., Ishak, C. F., McLaughlin, M. J., and Cozens, G. 2004. Heavy metals in soils and crops in Southeast Asia. Environmental geochemistry and health. 26(4): 343-357.

Zhang, Q., Ye, J., Chen, J., Xu, H., Wang, C., and Zhao, M. 2014. Risk assessment of polychlorinated biphenyls and heavy metals in soils of an abandoned e-waste site in China. Environmental pollution. 185: 258-265.

เกษม จันทร์จรูญพงษ์. 2519. ธรณีเคมีของสารหนูและการใช้ประโยชน์ในการสำรวจแร่: ข่าวสารธรณีวิทยา. 36-43.

แก้วใจ ครังระหัด และวัลลภ ทาทอง. 2561. การปนเปื้อนโลหะหนักในดินตะกอนและดินริมฝั่งลำน้ำฮวย อำเภอวังสะพุง และอำเภอเมือง จังหวัดเลย.

กรมทรัพยากรธรณี. 2549. ธรณีเคมีสิ่งแวดล้อมบริเวณแหล่งแร่ทองคำ ตำบลเขาหลวง อำเภอวังสะพุง จังหวัดเลย. กรุงเทพมหานคร: กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม.

กรมพัฒนาที่ดิน. เอกสารคำแนะนำการเก็บตัวอย่างดินเพื่อวิเคราะห์สำหรับการปลูกพืช. [ออนไลน์]. 2561. แหล่งที่มา: http://www.ldd.go.th/WEB_WorldSoilDay/Data/SoilSampling.pdf [2 กรกฎาคม 2561]

คณาจารย์ภาควิชาปฐพีวิทยา. 2541. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. ปฐพีวิทยาเบื้องต้น. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 2555. โครงการสำรวจการกระจายตัวและแหล่งที่มาของการปนเปื้อนโลหะหนักในเขตพื้นที่แหล่งแร่ทองคำภูทับฟ้า ตำบลเขาหลวง อำเภอวังสะพุง จังหวัดเลย. สถาบันวิจัยสภาวะแวดล้อม. กรุงเทพมหานคร: บริษัท จรัลสนิทวงศ์ การพิมพ์ จำกัด.

ทัศนีย์ อัตตะนันทน์. 2550. ดินที่ใช้ปลูกข้าว. กรุงเทพมหานคร: ภาควิชาปฐพีวิทยา คณะเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน.

มหาวิทยาลัยขอนแก่น. 2551. รายงานวิเคราะห์ผลกระทบสิ่งแวดล้อมสำหรับโครงการที่มีการเปลี่ยนแปลงรายละเอียดโครงการและทบทวนมาตรการป้องกันผลกระทบสิ่งแวดล้อม โครงการเหมืองแร่ทองคำ บริษัททุ่งคำ จำกัด. ขอนแก่น: ศูนย์การจัดการสิ่งแวดล้อม คณะวิศวะกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น.

ยุวดี เชี่ยววัฒนา. 2545. การพัฒนาระบบการสกัดแบบต่อเนื่องสำหรับการสกัดเป็นลำดับขั้นเพื่อวิเคราะห์ Chemical Speciation ของโลหะหนัก. กรุงเทพมหานคร: สำนักงานกองทุน

สนับสนุนงานวิจัย.

ศุภมาศ พนิชศักดิ์พัฒนา. 2559. มลพิษทางดิน. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

สถาบันวิจัยข้าว. 2547. คำแนะนำการใช้ปุ๋ยเคมีในนาข้าวตามค่าวิเคราะห์ดิน. กรุงเทพมหานคร: กรมวิชาการเกษตร.

สำนักวิทยาศาสตร์เพื่อการพัฒนาที่ดิน. 2552. รายงานการศึกษา ติดตาม และพัฒนาระบบฐานข้อมูลโลหะหนักในดินปลูกพืชเศรษฐกิจของประเทศไทย. กรุงเทพมหานคร: กระทรวงเกษตรและสหกรณ์ กรมพัฒนาที่ดิน.

อนงค์ ไพจิตรประภาภรณ์. 2540. การศึกษาติดตามปัญหาและการแก้ไขการแพร่กระจายของสารหนูอำเภอร่อนพิบูลย์ จังหวัดนครศรีธรรมราช: กองทรัพยากรธรณี กรมทรัพยากรธรณี.

อัยย์แลปดอทเอเชีย. วิธีการเก็บตัวอย่างดิน. [ออนไลน์]. 2011. แหล่งที่มา: http://www.ilab.asia/img/iLab_howto_05.jpg

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ภาคผนวก (ก)

ผลการศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของดิน
ในพื้นที่ราบลุ่มและเนินเขาทั้ง 2 ฤดูกาล

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ ก-1 ดัชนีต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องบริเวณพื้นที่ราบลุ่มและเนินเขา จำนวน 3 ซ้ำ (ฤดูร้อน)

ดัชนีต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องบริเวณพื้นที่ราบลุ่มและเนินเขา (ฤดูร้อน)						
ตัวอย่างดิน	จำนวนซ้ำ	ค่าพีเอช	ค่าอีเอช (มิลลิโวลต์)	ปริมาณอินทรียวัตถุในดิน (ร้อยละ)	ค่าความเข้มข้นเหล็ก (มก./กก.)	ค่าความเข้มข้นสารหนู (มก./กก.)
A3	A3-1	4.70	659.40	2.04	42,860	40.59
	A3-2	4.74	705.00		36,180	32.21
	A3-3	4.69	672.70		43,280	32.42
A4	A4-1	4.65	661.50	1.96	21,260	27.99
	A4-2	4.69	653.10		22,490	26.69
	A4-3	4.81	695.60		21,750	25.12
A5	A5-1	5.94	541.00	2.01	24,820	15.42
	A5-2	5.98	548.40		22,270	16.44
	A5-3	6.18	549.60		23,010	15.63
B3	B3-1	4.00	637.50	1.89	20,300	32.61
	B3-2	4.15	646.10		17,690	32.75
	B3-3	3.99	641.80		19,280	30.84
B4	B4-1	3.59	664.30	2.28	23,440	35.78
	B4-2	3.77	661.60		20,760	37.22
	B4-3	3.83	672.20		24,890	36.92
B5	B5-1	3.36	672.20	2.34	22,817	20.11
	B5-2	3.38	710.40		22,468	19.92
	B5-3	3.34	708.00		22,393	19.82
C1	C1-1	5.42	553.80	3.77	21,510	7.78
	C1-2	5.44	602.90		30,520	10.75
	C1-3	5.55	602.70		21,180	7.6

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตารางที่ ก-1 ดัชนีต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องบริเวณพื้นที่ราบลุ่มและเนินเขา จำนวน 3 ซ้ำ (ฤดูร้อน) (ต่อ)

ดัชนีต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องบริเวณพื้นที่ราบลุ่มและเนินเขา (ฤดูร้อน) (ต่อ)						
ตัวอย่างดิน	จำนวนซ้ำ	ค่าพีเอช	ค่าอีเอช (มิลลิโวลต์)	ปริมาณอินทรียวัตถุในดิน (ร้อยละ)	ค่าความเข้มข้นเหล็ก (มก./กก.)	ค่าความเข้มข้นสารหนู (มก./กก.)
C2	C2-1	4.91	721.00	2.17	44,000	12.79
	C2-2	4.88	718.30		29,440	8.96
	C2-3	4.99	705.20		48,860	12.77
C3	C3-1	5.18	671.40	3.67	54,050	13.77
	C3-2	5.12	672.40		37,530	9.89
	C3-3	5.14	626.90		46,130	11.01
C4	C4-1	4.82	639.50	2.47	34,210	10.93
	C4-2	4.82	644.40		40,950	13.56
	C4-3	4.85	657.10		29,070	9.25
C5	C5-1	5.20	650.40	2.54	42,910	6.1
	C5-2	5.06	674.80		42,360	6.42
	C5-3	5.08	663.40		42,640	6.43
C6	C6-1	4.77	641.60	2.46	41,650	7.55
	C6-2	4.82	673.60		45,460	7.75
	C6-3	4.80	671.10		43,230	8.54
D1	D1-1	5.60	543.70	1.75	15,250	28.66
	D1-2	5.66	535.00		16,450	28.85
	D1-3	5.62	531.50		20,350	28.91
D2	D2-1	5.90	606.80	2.22	15,900	12.42
	D2-2	5.73	604.90		17,020	13.54
	D2-3	6.03	641.80		19,740	13.34

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ ก-1 ดัชนีต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องบริเวณพื้นที่ราบลุ่มและเนินเขา จำนวน 3 ซ้ำ (ฤดูร้อน) (ต่อ)

ดัชนีต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องบริเวณพื้นที่ราบลุ่มและเนินเขา (ฤดูร้อน) (ต่อ)						
ตัวอย่างดิน	**จำนวนซ้ำ**	**ค่าพีเอช**	**ค่าอีเอช (มิลลิโวลต์)**	**ปริมาณอินทรียวัตถุในดิน (ร้อยละ)**	**ค่าความเข้มข้นเหล็ก (มก./กก.)**	**ค่าความเข้มข้นสารหนู (มก./กก.)**
D3	**D3-1**	5.24	640.60	2.56	37,110	12.71
	D3-2	5.20	638.40		36,000	10.58
	D3-3	5.22	653.10		40,590	11.32
D4	**D4-1**	5.00	692.20	2.38	49,770	12.6
	D4-2	5.04	699.40		55,050	12.93
	D4-3	5.02	667.90		44,690	12.14
ค่าเฉลี่ย±SD		4.91±0.71	644.7±51.09	2.41±0.57	31,574±11,708	18.09±10.15

ตารางที่ ก-2 ดัชนีต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องบริเวณพื้นที่ราบลุ่มและเนินเขา จำนวน 3 ซ้ำ (ฤดูฝน)

ดัชนีต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องบริเวณพื้นที่ราบลุ่มและเนินเขา (ฤดูฝน)						
ตัวอย่างดิน	**จำนวนซ้ำ**	**ค่าพีเอช**	**ค่าอีเอช (มิลลิโวลต์)**	**ปริมาณอินทรียวัตถุในดิน (ร้อยละ)**	**ค่าความเข้มข้นเหล็ก (มก./กก.)**	**ค่าความเข้มข้นสารหนู (มก./กก.)**
A3	**A3-1**	5.29	606.70	2.60	34,180	41.40
	A3-2	5.28	612.10		31,340	40.25
	A3-3	5.29	624.70		33,860	41.19
A4	**A4-1**	6.03	561.90	2.07	25,000	33.49
	A4-2	5.99	560.90		29,100	38.72
	A4-3	5.98	558.40		27,510	37.56
A5	**A5-1**	6.34	543.10	2.36	34,690	19.36
	A5-2	6.33	543.30		33,450	18.45
	A5-3	6.31	544.30		35,610	19.96

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ ก-2 ดัชนีต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องบริเวณพื้นที่ราบลุ่มและเนินเขา จำนวน 3 ซ้ำ (ฤดูฝน) (ต่อ)

ดัชนีต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องบริเวณพื้นที่ราบลุ่มและเนินเขา (ฤดูฝน) (ต่อ)						
ตัวอย่างดิน	**จำนวนซ้ำ**	**ค่าพีเอช**	**ค่าอีเอช (มิลลิโวลต์)**	**ปริมาณอินทรียวัตถุในดิน (ร้อยละ)**	**ค่าความเข้มข้นเหล็ก (มก./กก.)**	**ค่าความเข้มข้นสารหนู (มก./กก.)**
B3	**B3-1**	5.66	666.80	2.18	30,930	49.00
	B3-2	5.57	685.60		29,440	48.12
	B3-3	5.54	676.50		28,300	48.83
B4	**B4-1**	6.04	592.10	2.31	20,720	36.38
	B4-2	6.01	584.40		24,400	35.51
	B4-3	5.75	609.30		23,700	33.53
B5	**B5-1**	6.01	549.00	2.58	26,750	21.47
	B5-2	5.68	598.10		29,870	22.14
	B5-3	5.88	594.90		29,220	21.69
C1	**C1-1**	5.28	671.70	3.39	37,550	7.91
	C1-2	5.28	648.40		42,790	11.27
	C1-3	5.25	656.90		38,590	7.57
C2	**C2-1**	4.93	710.10	3.00	37,740	8.10
	C2-2	5.06	689.30		32,850	7.13
	C2-3	4.99	695.30		33,450	7.96
C3	**C3-1**	3.60	708.10	3.07	39,290	9.27
	C3-2	3.95	680.80		41,940	10.69
	C3-3	3.54	667.50		49,380	12.75
C4	**C4-1**	5.13	673.70	3.64	40,700	13.50
	C4-2	5.17	682.10		21,480	9.95
	C4-3	5.21	677.30		20,310	8.76

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ ก-2 ดัชนีต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องบริเวณพื้นที่ราบลุ่มและเนินเขา จำนวน 3 ซ้ำ (ฤดูร้อน) (ต่อ)

ดัชนีต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องบริเวณพื้นที่ราบลุ่มและเนินเขา (ฤดูร้อน) (ต่อ)						
ตัวอย่างดิน	**จำนวนซ้ำ**	**ค่าพีเอช**	**ค่าอีเอช (มิลลิโวลต์)**	**ปริมาณอินทรีย วัตถุในดิน (ร้อยละ)**	**ค่าความเข้มข้น เหล็ก (มก./กก.)**	**ค่าความเข้มข้น สารหนู (มก./กก.)**
C5	**C5-1**	5.49	601.70		40,680	10.31
	C5-2	5.35	594.90	1.92	31,270	10.32
	C5-3	5.20	613.40		19,130	9.33
C6	**C6-1**	5.74	627.60		25,270	8.34
	C6-2	5.75	616.20	2.92	23,860	8.36
	C6-3	5.90	630.90		26,790	9.08
D1	**D1-1**	5.79	634.70		34,800	17.89
	D1-2	5.61	616.70	1.65	34,520	20.42
	D1-3	5.79	624.00		30,250	15.63
D2	**D2-1**	5.40	656.70		30,810	13.14
	D2-2	5.36	650.50	1.66	30,630	14.17
	D2-3	3.36	646.00		27,560	11.72
D3	**D3-1**	6.27	635.50		14,110	24.20
	D3-2	6.30	629.50	2.31	13,960	29.70
	D3-3	6.38	621.10		12,710	23.59
D4	**D4-1**	5.74	629.00		12,770	12.32
	D4-2	5.76	626.60	2.96	12,000	11.28
	D4-3	5.88	635.00		10,890	10.40
ค่าเฉลี่ย±SD		5.49±0.69	628.4±45.03	2.54±0.59	29,086±8,840	20.46±12.95

ภาคผนวก (ข)

ผลการศึกษาการกระจายสัดส่วนและชีวปริมาณออกฤทธิ์ของสารหนูบริเวณ
พื้นที่ราบลุ่มและเนินเขาทั้ง 2 ฤดูกาล ในหน่วยมิลลิกรัมต่อกิโลกรัม

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตารางที่ ข-1 การกระจายสัดส่วนของสารหนูบริเวณพื้นที่ราบลุ่มและเนินเขาในฤดูร้อน (3 ซ้ำ) ในหน่วยมิลลิกรัมต่อกิโลกรัม

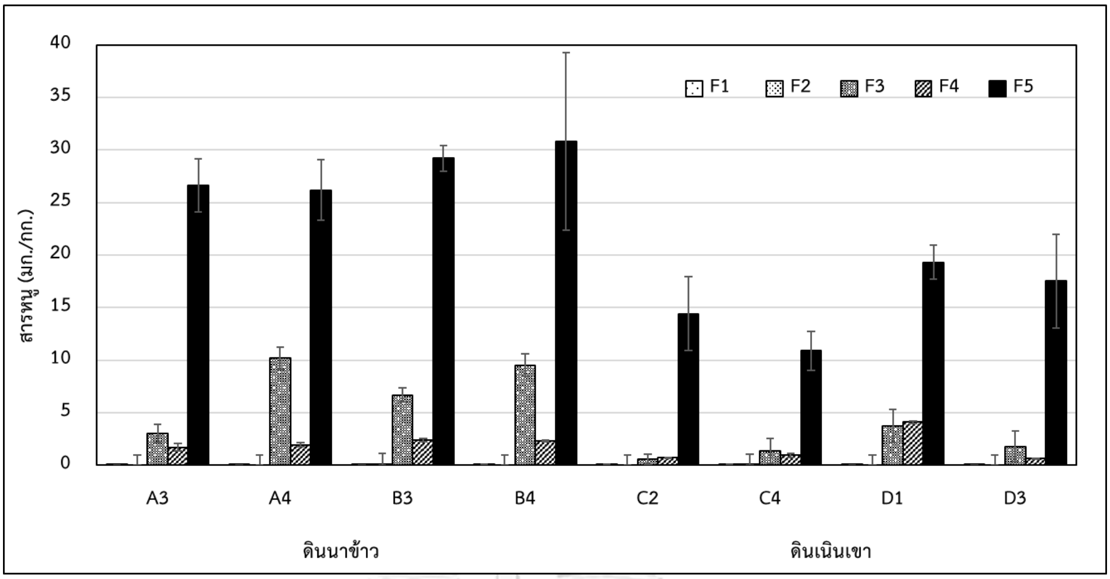
(ก) การกระจายสัดส่วนของสารหนูบริเวณพื้นที่ราบลุ่มและเนินเขา (ฤดูร้อน)						
ตัวอย่างดิน	**จำนวนซ้ำ**	**F1**	**F2**	**F3**	**F4**	**F5**
A3	**A3-1**	0.06	< 0.25	2.66	2.12	25.21
	A3-2	0.05	< 0.25	2.44	1.56	25.12
	A3-3	0.06	< 0.25	4.05	1.45	29.58
A4	**A4-1**	0.05	< 0.25	11.39	1.89	23.03
	A4-2	0.05	< 0.25	9.30	1.74	26.76
	A4-3	0.05	< 0.25	9.90	2.14	28.74
B3	**B3-1**	0.03	0.10	6.95	2.45	28.08
	B3-2	0.04	0.20	5.92	2.21	30.52
	B3/3	0.04	< 0.25	7.17	2.46	29.05
B4	**B4-1**	0.09	< 0.25	10.19	2.26	33.86
	B4-2	0.08	< 0.25	8.33	2.40	37.35
	B4-3	0.08	< 0.25	10.09	2.34	21.26
C2	**C2-1**	0.08	< 0.25	< 0.25	0.71	14.95
	C2-2	0.08	< 0.25	0.91	0.76	10.67
	C2-3	0.08	< 0.25	0.84	0.73	17.63
C4	**C4-1**	0.12	< 0.25	< 0.25	1.10	12.99
	C4-2	0.12	0.05	1.88	0.99	10.24
	C4-3	0.12	< 0.25	2.18	0.72	9.44
D1	**D1-1**	0.02	< 0.25	4.95	4.23	17.65
	D1-2	0.02	< 0.25	1.99	4.08	20.84
	D1-3	0.02	< 0.25	4.28	3.99	19.49
ค่าเฉลี่ย±SD		0.06±0.03	0.01±0.03	4.62±3.74	1.85±1.14	21.88±7.34

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตารางที่ ข-2 การกระจายสัดส่วนของสารหนูบริเวณพื้นที่ราบลุ่มและเนินเขาในฤดูฝน (3 ซ้ำ) ในหน่วยมิลลิกรัมต่อกิโลกรัม

(ข) การกระจายสัดส่วนของสารหนูบริเวณพื้นที่ราบลุ่มและเนินเขา (ฤดูฝน)						
ตัวอย่างดิน	**จำนวนซ้ำ**	**F1**	**F2**	**F3**	**F4**	**F5**
A3	**A3-1**	0.07	< 0.25	9.85	1.76	27.51
	A3-2	0.06	0.03	8.26	1.69	30.35
	A3-3	0.07	0.00	8.91	1.89	32.90
A4	**A4-1**	0.05	0.16	10.44	2.19	22.30
	A4-2	0.04	< 0.25	10.29	2.13	22.23
	A4-3	0.05	< 0.25	11.36	2.18	21.87
B3	**B3-1**	0.03	0.37	6.36	2.83	24.96
	B3-2	0.03	< 0.25	9.53	2.84	26.51
	B3-3	0.03	0.28	1.95	2.91	26.11
B4	**B4-1**	0.04	0.80	7.23	2.76	27.63
	B4-2	0.05	0.57	4.28	1.67	23.67
	B4-3	0.05	0.44	6.58	2.48	19.07
C2	**C2-1**	0.22	< 0.25	< 0.25	0.92	5.75
	C2-2	0.22	< 0.25	< 0.25	1.04	6.71
	C2-3	0.22	< 0.25	< 0.25	1.22	5.02
C4	**C4-1**	0.08	< 0.25	< 0.25	0.96	8.29
	C4-2	0.09	0.00	0.69	1.09	7.88
	C4-3	0.08	0.00	0.12	1.06	11.51
D1	**D1-1**	0.06	0.30	2.29	0.70	9.09
	D1-2	0.08	< 0.25	1.11	0.96	16.03
	D1-3	0.08	< 0.25	3.85	0.87	14.41
D3	**D3-1**	0.01	< 0.25	1.45	3.67	15.44
	D3-2	0.01	0.13	12.62	3.18	19.46
	D3-3	0.02	< 0.25	1.74	3.26	23.71
ค่าเฉลี่ย±SD		0.07±0.06	0.13±0.21	4.96±3.87	1.93±0.92	18.68±8.5

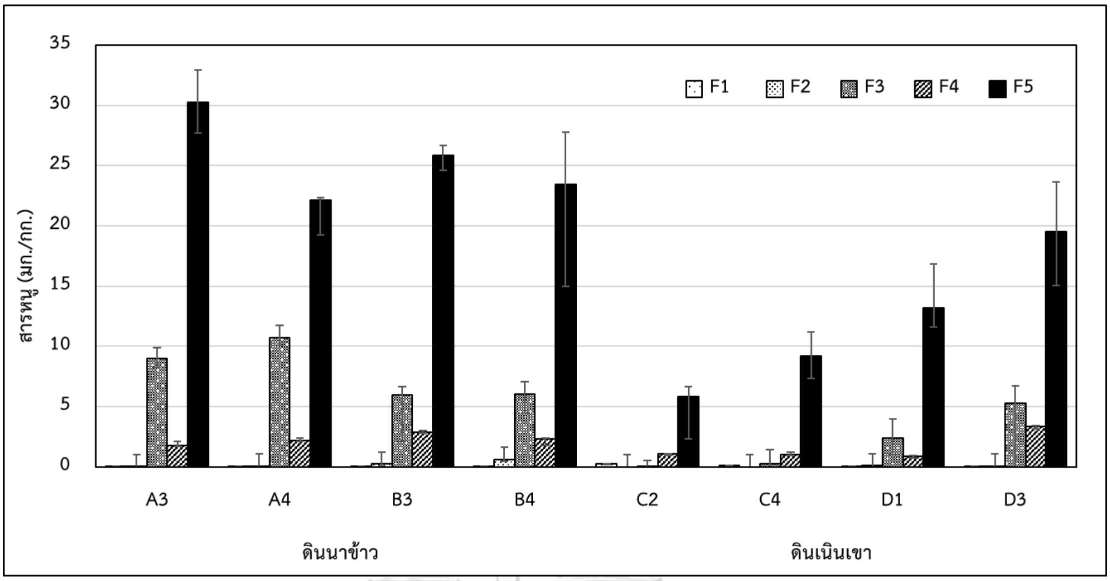
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY



รูปที่ ข-1 การกระจายสัดส่วนของสารหนูบริเวณพื้นที่ราบลุ่ม (A3 A4 B3 และ B4) และบริเวณพื้นที่เนินเขา (C2 C4 D1 และ D3) ในฤดูร้อน แสดงผลในหน่วยมิลลิกรัมต่อกิโลกรัม

ประกอบด้วยสารหนูในส่วนที่ชะละลายได้ง่าย (F1) สารหนูส่วนที่ชะละลายได้ในกรด (F2) สารหนูส่วนที่ชะละลายได้ภายใต้สภาพแวดล้อมที่เกิดปฏิกิริยารีดักชัน (F3) สารหนูส่วนที่ชะละลายได้ภายใต้สภาพแวดล้อมที่เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน (F4) และสารหนูส่วนที่คงตัว (F5)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY



รูปที่ ข-2 การกระจายสัดส่วนของสารหนูบริเวณพื้นที่ราบลุ่ม (A3 A4 B3 และ B4) และบริเวณพื้นที่เนินเขา (C2 C4 D1 และ D3) ในฤดูฝน แสดงผลในหน่วยมิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ประกอบด้วยสารหนูในส่วนที่ชะละลายได้ง่าย (F1) สารหนูส่วนที่ชะละลายได้ในกรด (F2) สารหนูส่วนที่ชะละลายได้ภายใต้สภาพแวดล้อมที่เกิดปฏิกิริยารีดักชัน (F3) สารหนูส่วนที่ชะละลายได้ภายใต้สภาพแวดล้อมที่เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน (F4) และสารหนูส่วนที่คงตัว (F5)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตารางที่ ข-3 ชีวปริมาณออกฤทธิ์ของสารหนูบริเวณพื้นที่ราบลุ่มและเนินเขา ในฤดูร้อนและฤดูฝน (3 ซ้ำ) ในหน่วยมิลลิกรัมต่อกิโลกรัม

ชีวปริมาณออกฤทธิ์ของสารหนูบริเวณพื้นที่ราบลุ่มและเนินเขา			
ตัวอย่างดิน	**จำนวนซ้ำ**	**(ฤดูร้อน)**	**(ฤดูฝน)**
	A3-1	2.56	0.80
A3	A3-2	2.72	0.79
	A3-3	2.47	0.77
	A4-1	3.05	0.66
A4	A4-2	3.66	0.65
	A4-3	3.43	0.67
	B3-1	1.50	0.75
B3	B3-2	1.60	0.76
	B3/3	1.79	0.77
	B4-1	1.95	0.75
B4	B4-2	1.99	0.70
	B4-3	1.80	0.73
	C2-1	0.86	0.30
C2	C2-2	0.86	0.30
	C2-3	0.85	0.32
	C4-1	0.66	0.63
C4	C4-2	0.68	0.74
	C4-3	0.66	0.65
	D1-1	0.76	0.52
D1	D1-2	0.77	0.56
	D1-3	0.76	0.54
ค่าเฉลี่ย±SD		1.57±0.97	0.60±0.18

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาคผนวก (ค)

ผลการศึกษาคุณสมบัติทางเคมีของดินภายหลังการจำลองในสภาวะไร้อากาศ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ ค-1 ดัชนีต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องของดินภายหลังการจำลองในสภาวะไร้อากาศจำนวน 3 ซ้ำ

ดัชนีต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องของดินภายหลังการจำลองในสภาวะไร้อากาศ						
ตัวอย่างดิน		จำนวนซ้ำ	ค่าอีเอช (มิลลิโวลต์)	AVS (มก./กก.)	ค่าพีเอช	ปริมาณอินทรียวัตถุในดิน (ร้อยละ)
A3	A3-1	1	-115.4	366.33	7.297	2.31
		2	-122.2	452.65	7.289	
		3	-126.6	421.61	7.283	
	A3-2	1	-127.3	775.59	7.286	2.26
		2	-113.8	558.24	7.257	
		3	-137.1	780.69	7.279	
A4	A4-1	1	-75.3	952.53	7.323	2.11
		2	-109.8	779.19	7.332	
		3	-95.2	945.99	7.345	
	A4-2	1	-95.1	313.05	7.412	2.31
		2	-105.2	474.54	7.453	
		3	-87.1	506.92	7.376	
B3	B3-1	1	-22.7	1380.28	7.554	2.29
		2	-10.4	-	7.528	
		3	-29.1	1125.47	7.593	
	B3-2	1	-39.7	1006.41	7.549	2.15
		2	-48.6	-	7.562	
		3	-43.5	1033.51	7.528	

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ ค-1 ดัชนีต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องของดินภายหลังการจำลองในสภาวะไร้อากาศจำนวน 3 ซ้ำ (ต่อ)

ดัชนีต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องของดินภายหลังการจำลองในสภาวะไร้อากาศ (ต่อ)						
ตัวอย่างดิน		จำนวนซ้ำ	ค่าอีเอช (มิลลิโวลต์)	AVS (มก./กก.)	ค่าพีเอช	ปริมาณอินทรียวัตถุในดิน (ร้อยละ)
B4	B4-1	1	-93.2	676.16	7.304	2.38
		2	-106.1	960.50	7.332	
		3	-88.7	971.46	7.329	
	B4-2	1	-60.9	851.15	7.343	2.33
		2	-41.8	1132.85	7.359	
		3	-23.4	1177.92	7.356	
	ค่าเฉลี่ย±SD		-79.93±39.24	829.83±297	7.39±0.11	2.27±0.09

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ภาคผนวก (ง)

ผลการศึกษาการกระจายสัดส่วนและชีวปริมาณออกฤทธิ์ของสารหนู

ภายหลังการจำลองในสภาวะไร้อากาศ ในหน่วยมิลลิกรัมต่อกิโลกรัม

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

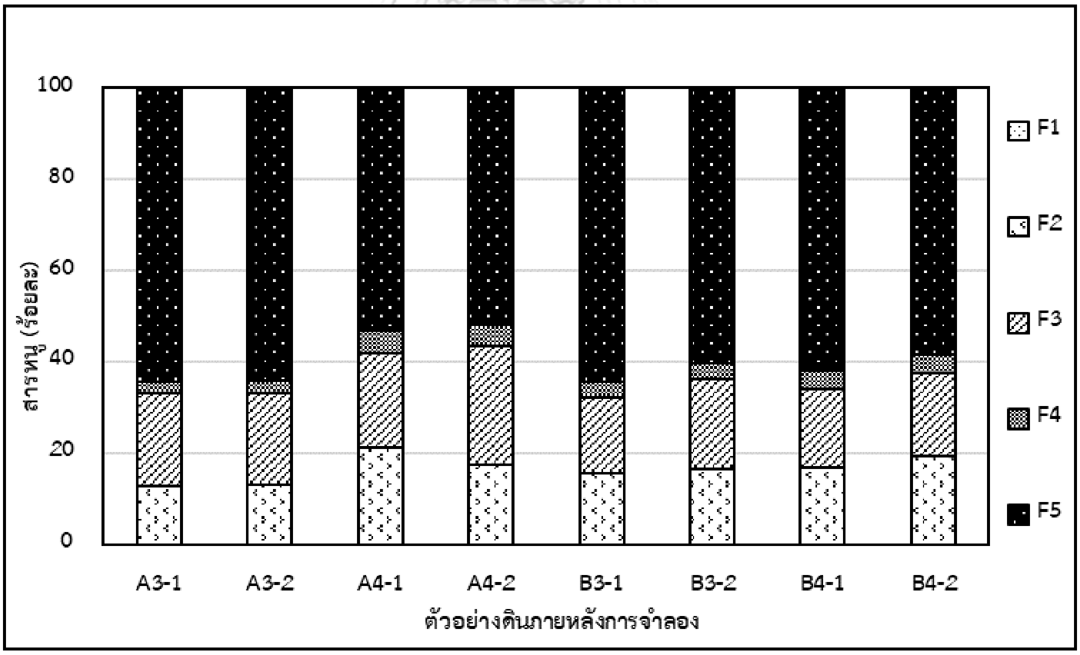
ตารางที่ ง-1 การกระจายสัดส่วนของสารหนูของดินภายหลังการจำลองในสภาวะไร้อากาศ (3 ซ้ำ) ในหน่วยมิลลิกรัมต่อกิโลกรัม

การกระจายสัดส่วนของสารหนูของดินภายหลังการจำลองในสภาวะไร้อากาศ							
ตัวอย่างดิน		**จำนวนซ้ำ**	**F1**	**F2**	**F3**	**F4**	**F5**
A3	**A3-1**	1	0.04	4.95	7.99	21.75	21.75
		2	0.02	5.01	6.90	24.20	24.20
		3	< 0.25	3.89	7.15	23.89	23.89
	A3-2	1	< 0.25	5.50	7.92	29.18	29.18
		2	< 0.25	5.90	9.25	29.50	29.50
		3	< 0.25	6.35	10.29	28.48	28.48
A4	**A4-1**	1	< 0.25	6.89	7.53	16.38	16.38
		2	< 0.25	6.49	6.92	16.79	16.79
		3	< 0.25	6.53	4.79	16.51	16.51
	A4-2	1	< 0.25	5.33	7.86	15.36	15.36
		2	< 0.25	5.78	7.93	15.78	15.78
		3	< 0.25	4.72	8.09	16.19	16.19
B3	**B3-1**	1	0.01	7.42	7.32	31.92	31.92
		2	0.01	6.87	9.73	26.56	26.56
		3	0.02	6.45	5.08	27.69	27.69
	B3-2	1	0.01	6.96	10.06	24.50	24.50
		2	0.01	7.14	6.88	23.78	23.78
		3	0.02	6.35	7.18	26.04	26.04
B4	**B4-1**	1	< 0.25	7.01	6.32	24.56	24.56
		2	< 0.25	5.70	7.07	22.22	22.22
		3	0.01	6.33	5.79	22.79	22.79
	B4-2	1	0.01	6.89	5.05	24.86	24.86
		2	0.01	5.54	7.42	20.47	20.47
		3	< 0.25	6.72	5.85	13.07	13.07
	ค่าเฉลี่ย±SD		0.00	6.11±0.8	7.35±1.43	1.40±0.23	22.60±5.23

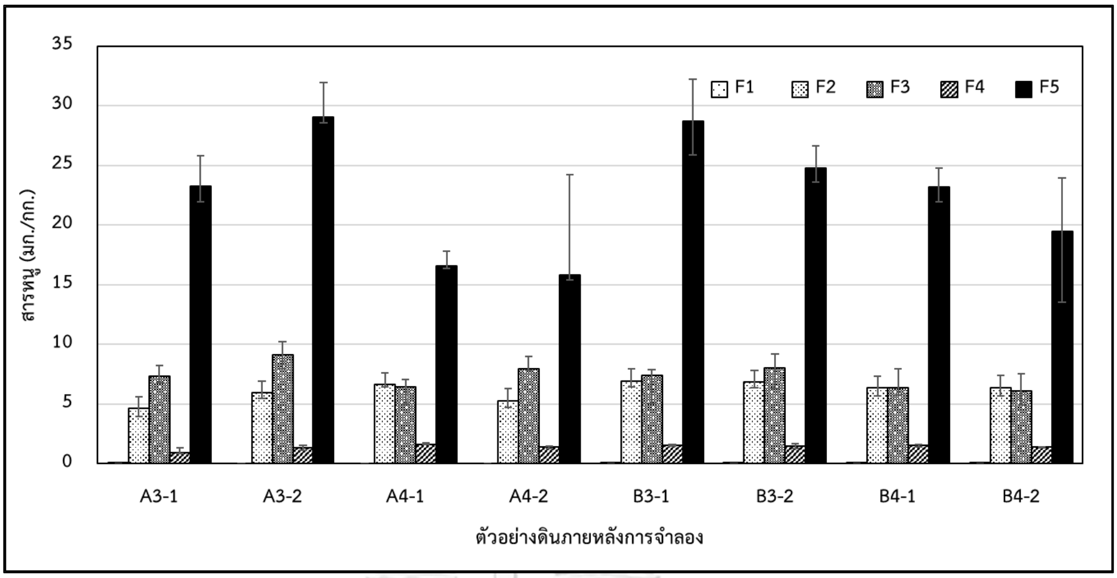
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ ง-1 การกระจายสัดส่วนของสารหนูของดินภายหลังการจำลองในสภาวะไร้อากาศ (3 ซ้ำ) ในหน่วยมิลลิกรัมต่อกิโลกรัม (ต่อ)

การกระจายสัดส่วนของสารหนูของดินภายหลังการจำลองในสภาวะไร้อากาศ (ต่อ)							
ตัวอย่างดิน		**จำนวนซ้ำ**	**F1**	**F2**	**F3**	**F4**	**F5**
B4	**B4-1**	**1**	< 0.25	7.01	6.32	24.56	24.56
		2	< 0.25	5.70	7.07	22.22	22.22
		3	0.01	6.33	5.79	22.79	22.79
	B4-2	**1**	0.01	6.89	5.05	24.86	24.86
		2	0.01	5.54	7.42	20.47	20.47
		3	< 0.25	6.72	5.85	13.07	13.07
ค่าเฉลี่ย±SD			0.00	6.11±0.8	7.35±1.43	1.40±0.23	22.60±5.23



รูปที่ ง-1 การกระจายสัดส่วนของสารหนูในตัวอย่างดินภายหลังการจำลองในสภาวะไร้อากาศ แสดงผลในหน่วยร้อยละ (%)



รูปที่ ง-2 การกระจายสัดส่วนของสารหนูในตัวอย่างดินภายหลังการจำลองในสภาวะไร้อากาศ แสดงผลในหน่วยมิลลิกรัมต่อกิโลกรัม

ตารางที่ ง-2 ชีวปริมาณออกฤทธิ์ของสารหนูของดินภายหลังการจำลองในสภาวะไร้อากาศ (3 ซ้ำ) ในหน่วยมิลลิกรัมต่อกิโลกรัม

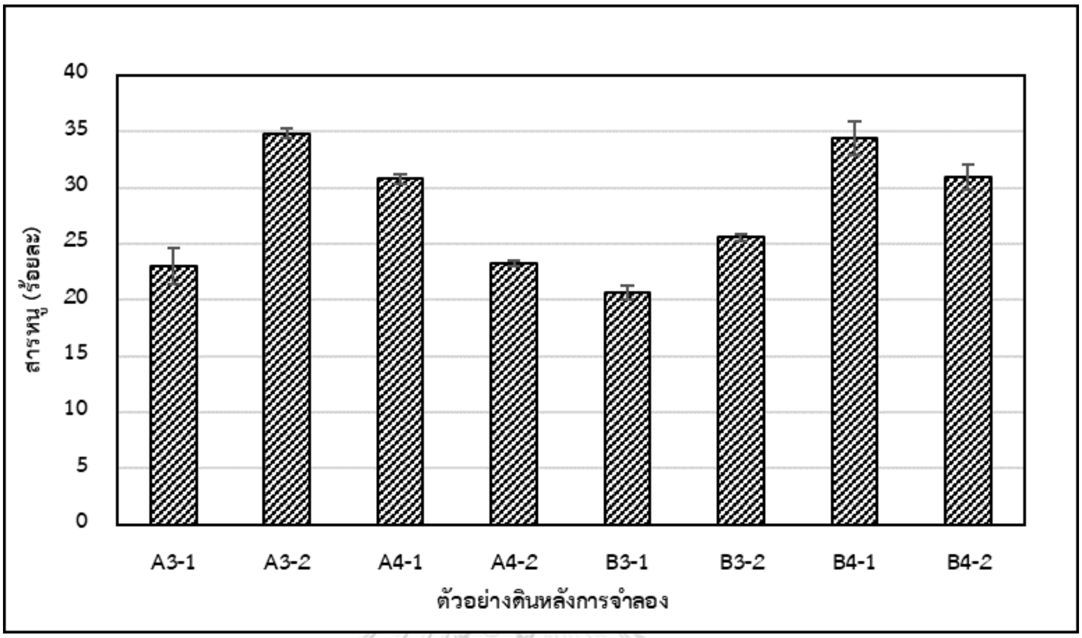
ชีวปริมาณออกฤทธิ์ของสารหนูของดินภายหลังการจำลองในสภาวะไร้อากาศ			
ตัวอย่างดิน		**จำนวนซ้ำ**	**ชีวปริมาณออกฤทธิ์ของสารหนู (มก./กก.)**
A3	A3-1	1	10.25
		2	7.58
		3	10.40
	A3-2	1	13.80
		2	14.63
		3	14.33
A4	A4-1	1	10.77
		2	11.50
		3	11.55
	A4-2	1	8.40
		2	8.84
		3	8.30

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตารางที่ ง-2 ชีวปริมาณออกฤทธิ์ของสารหนูของดินภายหลังการจำลองในสภาวะไร้อากาศ (3 ซ้ำ) ในหน่วยมิลลิกรัมต่อกิโลกรัม (ต่อ)

ชีวปริมาณออกฤทธิ์ของสารหนูของดินภายหลังการจำลองในสภาวะไร้อากาศ			
ตัวอย่างดิน		**จำนวนซ้ำ**	**ชีวปริมาณออกฤทธิ์ของสารหนู (มก./กก.)**
B3	B3-1	1	9.35
		2	10.53
		3	10.23
	B3-2	1	12.11
		2	12.61
		3	12.60
B4	B4-1	1	11.63
		2	13.71
		3	10.90
	B4-2	1	11.07
		2	11.87
		3	9.64
	ค่าเฉลี่ย±SD		11.11±1.91

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY



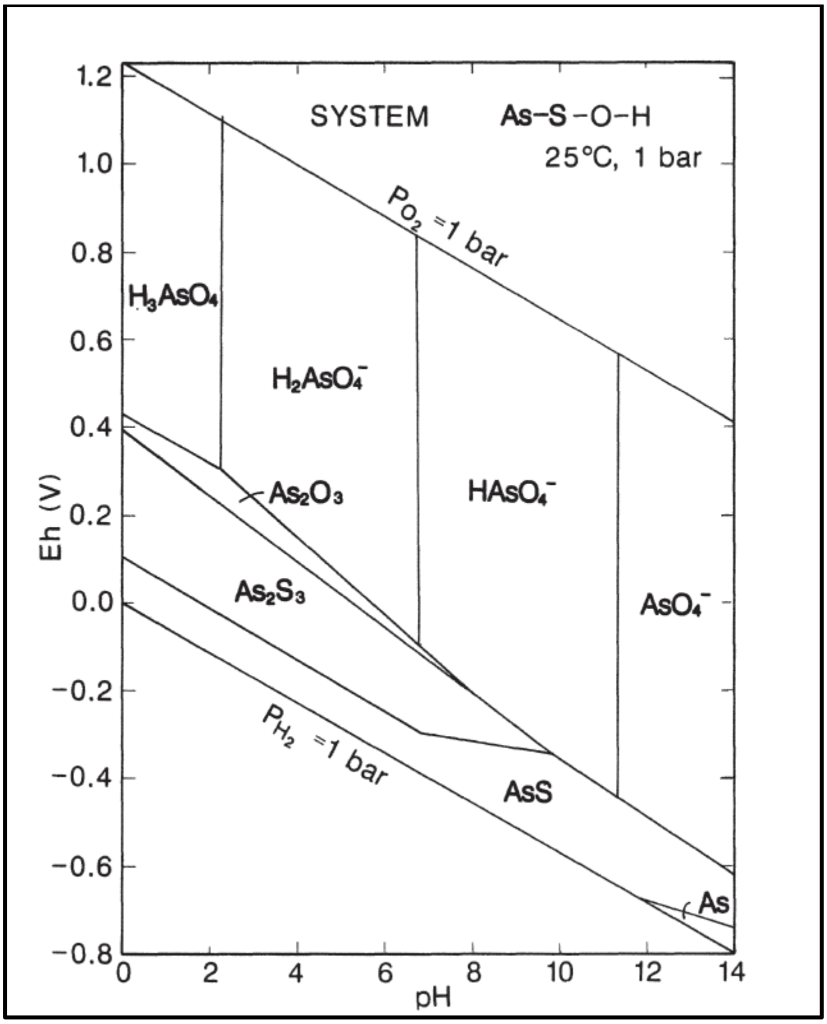
รูปที่ ง-3 ชีวปริมาณออกฤทธิ์ของสารหนูในตัวอย่างดินภายหลังการจำลองในสภาวะไร้อากาศ แสดงผลในหน่วยร้อยละ (%)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

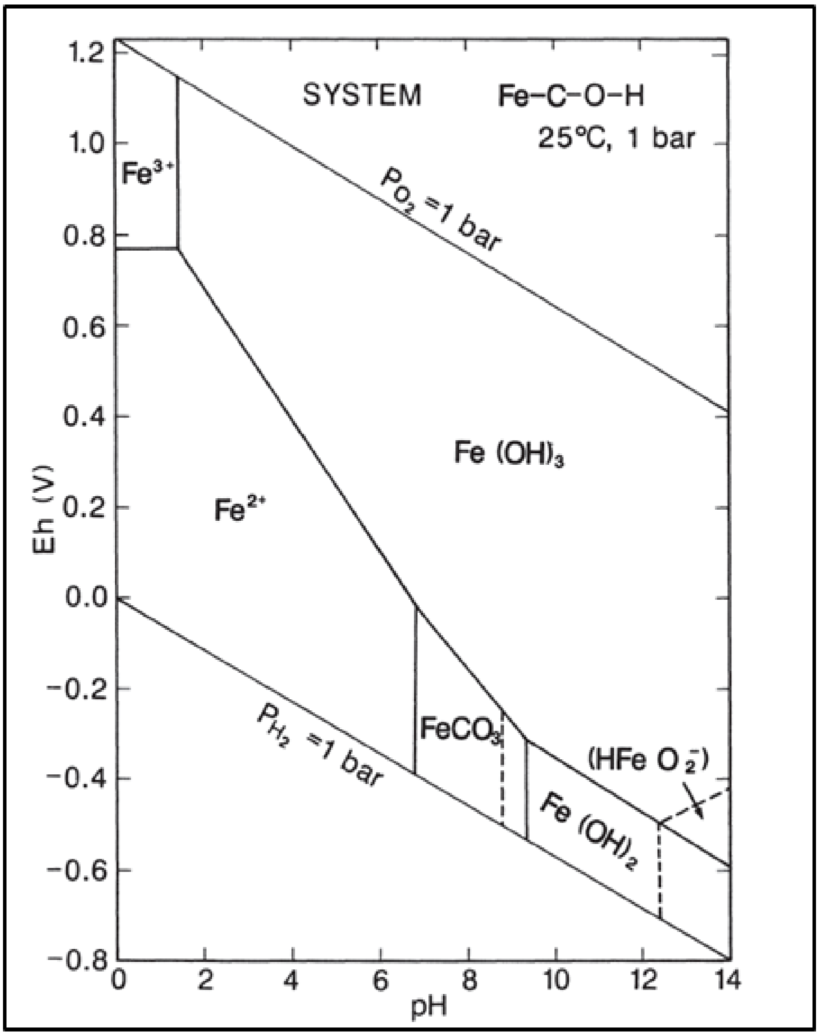
ภาคผนวก (จ)

ไดอะแกรม Eh-pH ของสารหนู

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

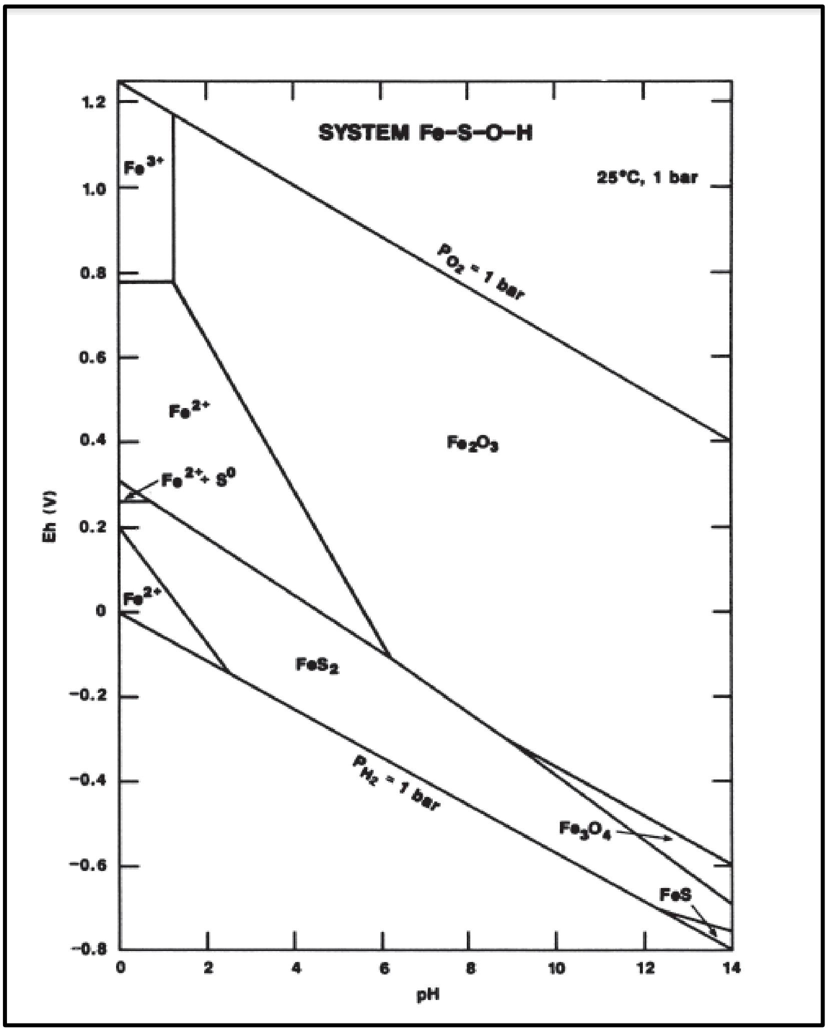


รูปที่ จ-1 ไดอะแกรม Eh–pH ของสารหนูในระบบ As–S–O–H ที่อุณหภูมิ 25 °C ความดัน 1 บรรยากาศ ที่มา: (Brookins, 1988)



รูปที่ จ-2 ไดอะแกรม Eh–pH ของเหล็กในระบบ Fe–C–O–H

ที่อุณหภูมิ 25 °C ความดัน 1 บรรยากาศ ที่มา: (Brookins, 1988)



รูปที่ จ-3 ไดอะแกรม Eh–pH ของเหล็กในระบบ Fe–S–O–H

ที่อุณหภูมิ 25 °C ความดัน 1 บรรยากาศ ที่มา : (Brookins, 1988)

ภาคผนวก (ฉ)

ผลการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ ฉ-1 สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) แบบ Pearson ระหว่างคุณสมบัติทางเคมีของดินที่มีผลต่อความเข้มข้นทั้งหมด การกระจายสัดส่วน และชีวปริมาณออกฤทธิ์ของสารหนูในดินบริเวณที่ราบลุ่มในฤดูร้อน

	pH	ORP	OM	As	Fe	F1	F2	F3	F4	F5	EDTA
pH	1										
Eh	-.783*	1									
OM	-.583*	.408	1								
As	-.410	.454	-.050	1							
Fe	.183	.179	-.006	.345	1						
F1	-.369	.320	.952*	.444	.139	1					
F2	-.193	-.455	-.435	.010	-.365	-.514	1				
F3	-.348	-.145	.231	-.383	-.726*	.350	-.158	1			
F4	-.751*	-.523	.150	.318	-.629*	.040	.258	.374	1		
F5	-.462	-.191	.254	.154	-.244	.234	.147	.032	.287	1	
EDTA	.796*	.482	-.194	-.604*	.209	.016	-.493	.143	-.626*	-.292	1

หมายเหตุ: * ความสัมพันธ์อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตารางที่ ฉ-2 สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) แบบ Pearson ระหว่างคุณสมบัติทางเคมีของดินที่มีผลต่อความเข้มข้นทั้งหมด การกระจายสัดส่วน และชีวปริมาณออกฤทธิ์ของสารหนูในดินบริเวณที่เนินเขาในฤดูร้อน

	pH	ORP	OM	As	Fe	F1	F2	F3	F4	F5	EDTA
pH	1										
Eh	-.783*	1									
OM	-.583*	.408	1								
As	-.410	.454	-.050	1							
Fe	.183	.179	-.006	.345	1						
F1	-.369	.320	.952*	.444	.139	1					
F2	-.193	-.455	-.435	.010	-.365	-.514	1				
F3	-.348	-.145	.231	-.383	-.726*	.350	-.158	1			
F4	-.751*	-.523	.150	.318	-.629*	.040	.258	.374	1		
F5	-.462	-.191	.254	.154	-.244	.234	.147	.032	.287	1	
EDTA	.796*	.482	-.194	-.604*	.209	.016	-.493	.143	-.626*	-.292	1

หมายเหตุ: * ความสัมพันธ์อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตารางที่ ฉ-3 สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) แบบ Pearson ระหว่างคุณสมบัติทางเคมีของดินที่มีผลต่อความเข้มข้นทั้งหมด การกระจายสัดส่วน และชีวปริมาณออกฤทธิ์ของสารหนูในดินบริเวณที่ราบลุ่มในฤดูฝน

	pH	ORP	OM	As	Fe	F1	F2	F3	F4	F5	EDTA
pH	1										
Eh	-.783*	1									
OM	-.583*	.408	1								
As	-.410	.454	-.050	1							
Fe	.183	.179	-.006	.345	1						
F1	-.369	.320	.952*	.444	.139	1					
F2	-.193	-.455	-.435	.010	-.365	-.514	1				
F3	-.348	-.145	.231	-.383	-.726*	.350	-.158	1			
F4	-.751*	-.523	.150	.318	-.629*	.040	.258	.374	1		
F5	-.462	-.191	.254	.154	-.244	.234	.147	.032	.287	1	
EDTA	.796*	.482	-.194	-.604*	.209	.016	-.493	.143	-.626*	-.292	1

หมายเหตุ: * ความสัมพันธ์อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตารางที่ ฉ-4 สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) แบบ Pearson ระหว่างคุณสมบัติทางเคมีของดินที่มีผลต่อความเข้มข้นทั้งหมด การกระจายสัดส่วน และชีวปริมาณออกฤทธิ์ของสารหนูในดินบริเวณที่เนินเขาในฤดูฝน

	pH	ORP	OM	As	Fe	F1	F2	F3	F4	F5	EDTA
pH	1										
Eh	-.563*	1									
OM	-.168	.568*	1								
As	.435*	-.355	-.456*	1							
Fe	-.597*	.405*	.105	-.344	1						
F1	-.845*	.805*	.363	-.836*	.654*	1					
F2	.313	-.313	-.441	.338	.049	-.276	1				
F3	.616*	-.500	-.389	.711*	-.456	-.505	.422	1			
F4	.790*	-.448	-.190	.754*	-.828*	-.615*	-.045	.477	1		
F5	.895*	-.838*	-.515	.854*	-.705*	-.795*	.025	.544	.723*	1	
EDTA	-.249	-.037	.272	-.216	.138	-.250	.005	-.197	-.492	-.149	1

หมายเหตุ: * ความสัมพันธ์อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตารางที่ ฉ-5 ผล T-test จากการทดสอบความแตกต่างของดัชนีต่าง ๆ ของดิน ระหว่างฤดูร้อนและฤดูฝน

ดัชนี	พื้นที่	ระดับความเชื่อมั่น (p-value)
pH	บริเวณพื้นที่ราบลุ่ม	.0070
	บริเวณพื้นที่เนินเขา	.7673
Eh	บริเวณพื้นที่ราบลุ่ม	.0894
	บริเวณพื้นที่เนินเขา	.6221
OM	บริเวณพื้นที่ราบลุ่ม	.0432*
	บริเวณพื้นที่เนินเขา	.8632
As	บริเวณพื้นที่ราบลุ่ม	.3189
	บริเวณพื้นที่เนินเขา	.9909
Fe	บริเวณพื้นที่ราบลุ่ม	.2704
	บริเวณพื้นที่เนินเขา	.2283

หมายเหตุ: * ความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (p<0.05)

ตารางที่ ฉ-6 ผล T-test จากการทดสอบความแตกต่างของดัชนีต่าง ๆ ของดิน ระหว่างบริเวณพื้นที่ราบลุ่มและบริเวณพื้นที่เนินเขา

ดัชนี	ฤดูกาล	ระดับความเชื่อมั่น (p-value)
pH	ฤดูร้อน	.1043
	ฤดูฝน	.0638
Eh	ฤดูร้อน	.6913*
	ฤดูฝน	.0386*
OM	ฤดูร้อน	.0361*
	ฤดูฝน	.2391
As	ฤดูร้อน	.0046*
	ฤดูฝน	.0045*
Fe	ฤดูร้อน	.0529
	ฤดูฝน	.9812

หมายเหตุ: * ความสัมพันธ์อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (p<0.05)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตารางที่ ฉ-7 ผล T-test จากการทดสอบความแตกต่างของชีวปริมาณออกฤทธิ์ของสารหนูระหว่างฤดูร้อนและฤดูฝน

พื้นที่	ระดับความเชื่อมั่น (p-value)
บริเวณพื้นที่ราบลุ่ม	.0053*
บริเวณพื้นที่เนินเขา	.2337

หมายเหตุ: * ความสัมพันธ์อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (p<0.05)

ตารางที่ ฉ-8 ผล T-test จากการทดสอบความแตกต่างของชีวปริมาณออกฤทธิ์ของสารหนูระหว่างบริเวณพื้นที่ราบลุ่มและบริเวณพื้นที่เนินเขา

ฤดูกาล	ระดับความเชื่อมั่น (p-value)
ฤดูร้อน	.3763
ฤดูฝน	.1236

หมายเหตุ: * ความสัมพันธ์อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (p<0.05)

ตารางที่ ฉ-9 ผล T-test จากการทดสอบความแตกต่างของการกระจายสัดส่วนของสารหนูระหว่างฤดูร้อนและฤดูฝน

พื้นที่	การกระจายสัดส่วนของสารหนู	ระดับความเชื่อมั่น (p-value)
พื้นที่ราบลุ่ม	F1	.5089
	F2	.2045
	F3	.5459
	F4	.3227
	F5	.3416
พื้นที่เนินเขา	F1	.3691
	F2	.3186
	F3	.9692
	F4	.4172
	F5	.5587

หมายเหตุ: * ความสัมพันธ์อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (p<0.05)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตารางที่ ฉ-10 ผล T-test จากการทดสอบความแตกต่างของการกระจายสัดส่วนของสารหนูระหว่างบริเวณพื้นที่ราบลุ่มและบริเวณพื้นที่เนินเขา

ฤดูกาล	การกระจายสัดส่วนของสารหนู	ระดับความเชื่อมั่น (p-value)
ฤดูร้อน	F1	.2191
	F2	.6612
	F3	.0565
	F4	.4172
	F5	.5587
ฤดูฝน	F1	.2047
	F2	.3213
	F3	.0530
	F4	.1235
	F5	.1073

หมายเหตุ: * ความสัมพันธ์อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$)

ตารางที่ ฉ-11 ผล T-test จากการทดสอบความแตกต่างของการกระจายสัดส่วนของสารหนูทั้ง 2 พื้นที่ ในฤดูร้อนและฤดูฝน

พื้นที่	การกระจายสัดส่วนของสารหนู	ระดับความเชื่อมั่น (p-value)
พื้นที่ราบลุ่มและพื้นที่เนินเขา	F1	.1023
	F2	.3022
	F3	.0032*
	F4	.1015
	F5	.0369*

หมายเหตุ: * ความสัมพันธ์อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตารางที่ ฉ-12 ผล T-test จากการทดสอบความแตกต่างของดัชนีต่าง ๆ ที่ตรวจวัด ระหว่างดินก่อนและหลังจำลองในสภาวะไร้อากาศ

ดัชนี	ระดับความเชื่อมั่น (p-value)
pH	.0000*
Eh	.0000*
OM	.7567
AVS	.0000*

หมายเหตุ: * ความสัมพันธ์อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$)

ตารางที่ ฉ-13 ผล T-test จากการทดสอบความแตกต่างของชีวปริมาณออกฤทธิ์ของสารหนูระหว่างดินก่อนและหลังจำลองในสภาวะไร้อากาศ

ชีวปริมาณออกฤทธิ์ของสารหนู	ระดับความเชื่อมั่น (p-value)
EDTA	.0000*

หมายเหตุ: * ความสัมพันธ์อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$)

ตารางที่ ฉ-14 ผล T-test จากการทดสอบความแตกต่างของการกระจายสัดส่วนของสารหนู ระหว่างดินก่อนและหลังจำลองในสภาวะไร้อากาศ

การกระจายสัดส่วนของสารหนู	ระดับความเชื่อมั่น (p-value)
F1	.0001*
F2	.000*
F3	.1382
F4	.0014*
F5	.0000*

หมายเหตุ: * ความสัมพันธ์อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาคผนวก (ช)

ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) ระหว่างการกระจายสัดส่วนและชีวปริมาณออกฤทธิ์ของสารหนูในดินของตัวอย่างจากสภาพพื้นที่จริง และตัวอย่างดินภายหลังการจำลองในสภาวะไร้อากาศ

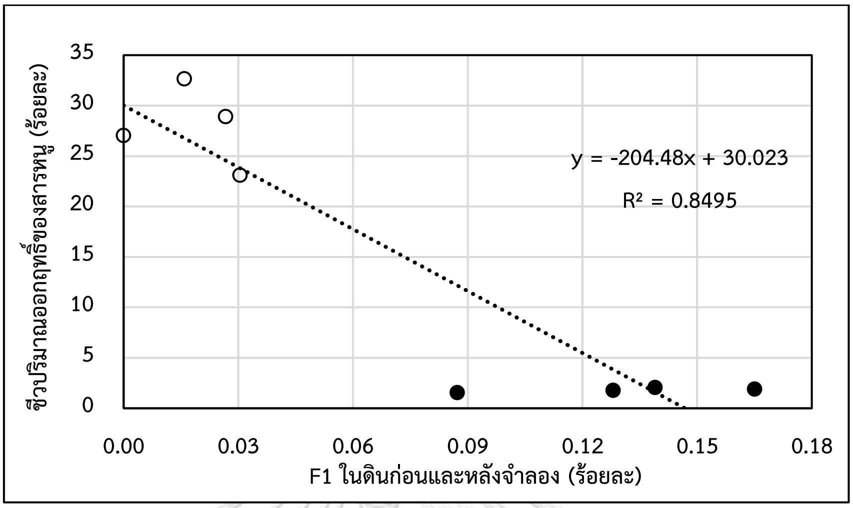
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ ช-1 ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) ระหว่างการกระจายสัดส่วนและชีวปริมาณออกฤทธิ์ของสารหนูของดินบริเวณที่ราบลุ่มและเนินเขาในสภาพพื้นที่จริง

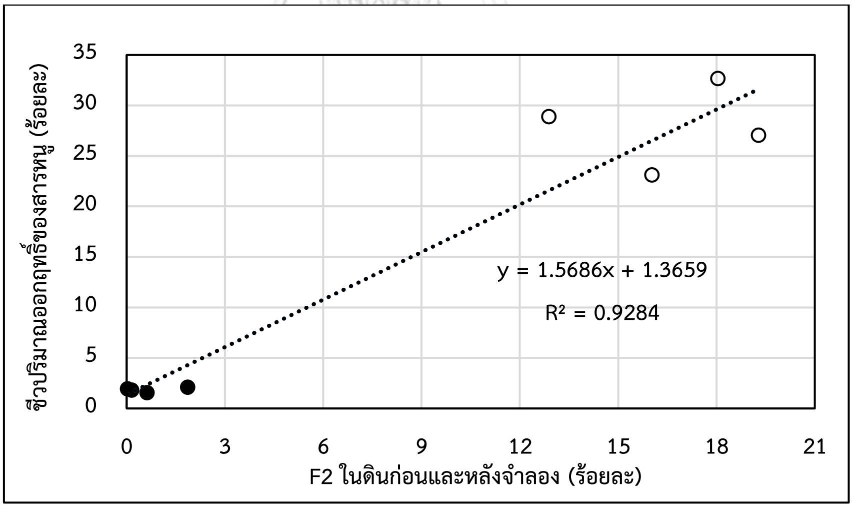
ฤดูกาล	ตัวอย่างดิน	การกระจายสัดส่วน (ร้อยละ)	ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2)
ฤดูร้อน	บริเวณที่ราบลุ่ม	F1	0.00
		F2	0.22
		F1+F2	0.45
		F3	0.23
		F4	0.62
		F5	0.19
	บริเวณเนินเขา	F1	0.22
		F2	0.01
		F1+F2	0.17
		F3	0.83
		F4	0.91
		F5	0.97
ฤดูฝน	บริเวณที่ราบลุ่ม	F1	0.66
		F2	0.22
		F1+F2	0.25
		F3	0.00
		F4	0.22
		F5	0
	บริเวณเนินเขา	F1	0.11
		F2	0.19
		F1+F2	0.06
		F3	0.66
		F4	0.00
		F5	0.91

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

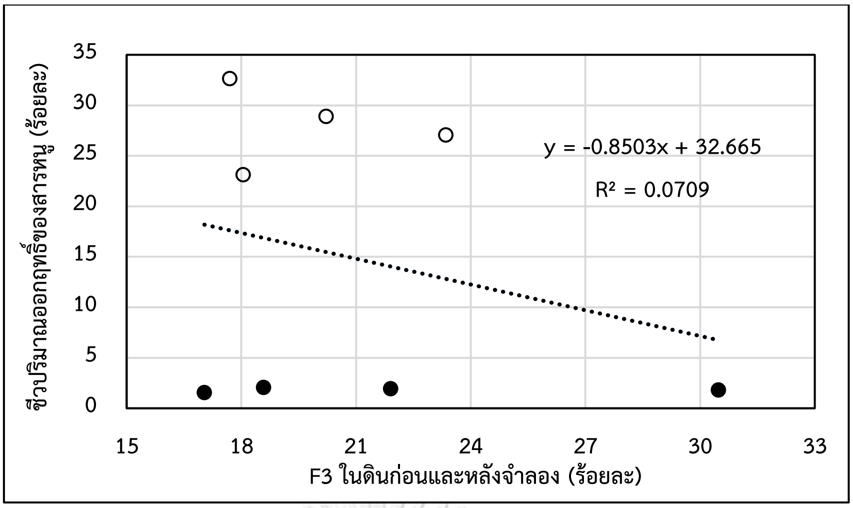
รูปแสดงค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) ระหว่างการกระจายสัดส่วนตั้งแต่ F1 ถึง F5 และชีวปริมาณออกฤทธิ์ของสารหนูของดินก่อนและหลังการจำลองในสภาวะไร้อากาศ โดยดินก่อนจำลองแสดงเป็นวงกลมทึบ และดินภายหลังการจำลองแสดงเป็นวงกลมโปร่ง



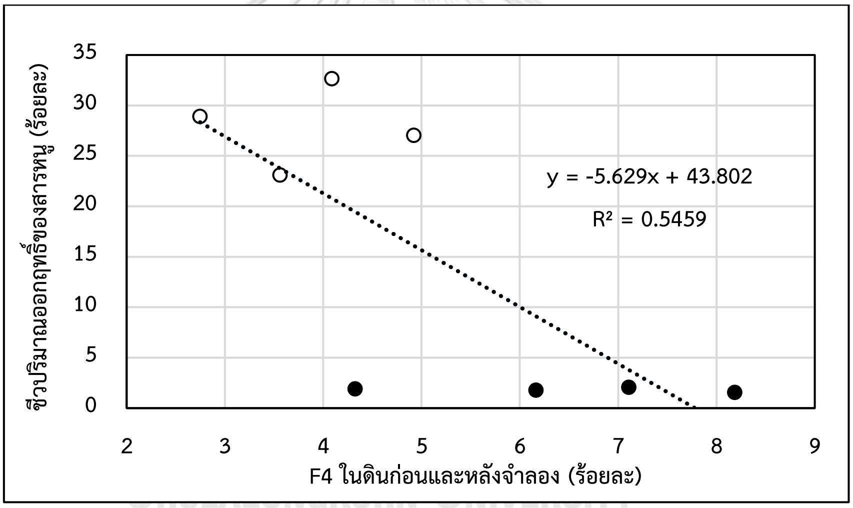
รูปที่ ช-1 ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) ระหว่างการกระจายสัดส่วน F1 และชีวปริมาณออกฤทธิ์ของสารหนูของดินก่อนและหลังการจำลองในสภาวะไร้อากาศ



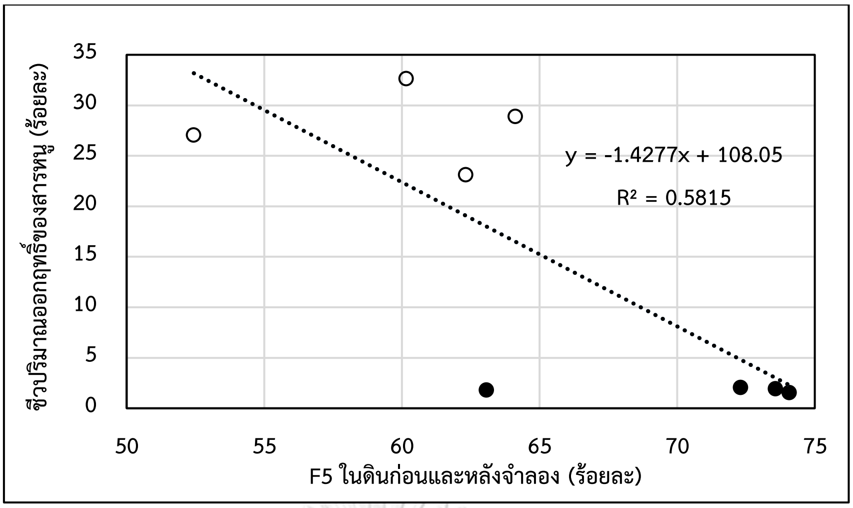
รูปที่ ช-2 ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) ระหว่างการกระจายสัดส่วน F2 และชีวปริมาณออกฤทธิ์ของสารหนูของดินก่อนและหลังการจำลองในสภาวะไร้อากาศ



รูปที่ ช-3 ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) ระหว่างการกระจายสัดส่วน F3 และชีวปริมาณออกฤทธิ์ของสารหนูของดินก่อนและหลังการจำลองในสภาวะไร้อากาศ



รูปที่ ช-4 ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) ระหว่างการกระจายสัดส่วน F4 และชีวปริมาณออกฤทธิ์ของสารหนูของดินก่อนและหลังการจำลองในสภาวะไร้อากาศ



รูปที่ จ-5 ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) ระหว่างการกระจายสัดส่วน F5 และชีวปริมาณออกฤทธิ์ของสารหนูของดินก่อนและหลังการจำลองในสภาวะไร้อากาศ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	นางสาวอภิชญา ดวงทอง
วัน เดือน ปี เกิด	10 มีนาคม 2537
สถานที่เกิด	จังหวัดสงขลา
วุฒิการศึกษา	สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาวิทยาศาตรบัณฑิต สาขาชีววิทยา มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตหาดใหญ่ เมื่อปีการศึกษา 2558 จากนั้นได้เข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิทยาศาตรมหาบัณฑิต สหสาขาวิชา วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ที่อยู่ปัจจุบัน	1 ซอยพาฝัน ถนนกาญจนวนิช ตำบลคอหงส์ อำเภอหาดใหญ่ จังหวัดสงขลา
ผลงานตีพิมพ์	อภิชญา ดวงทอง และคณะ. การกระจายสัดส่วนและชีวปริมาณออกฤทธิ์ของสารหนูในดิน บริเวณพื้นที่ที่มีการใช้ประโยชน์ทางด้านเกษตรกรรมที่แตกต่างกัน. การประชุมเสนอผลงานวิจัยระดับชาติ มหาวิทยาลัยสุโขทัยธรรมาธิราช ครั้งที่ 8. 23 พฤศจิกายน 2561. 428-440.

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY