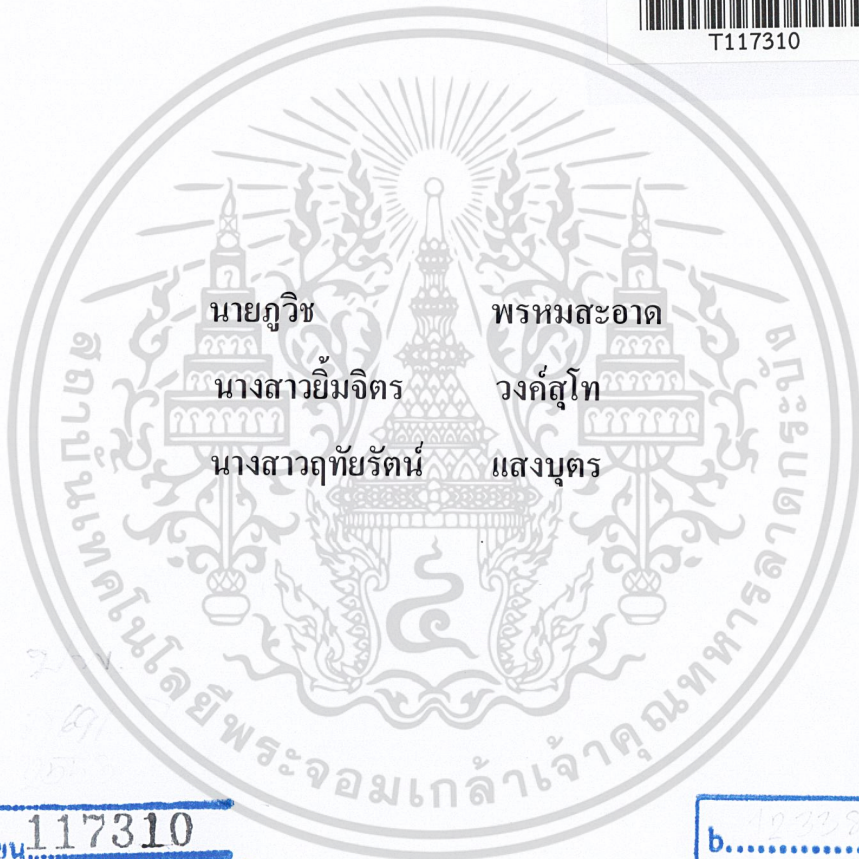


สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การศึกษารูปฟอร์มของโครเมียมในดินปนเปื้อนที่ผ่านการบำบัดด้วยพืช
STUDY ON THE FORMS OF CHROMIUM IN CONTAMINATED
SOIL AFTER PHYTOREMEDIATION



T117310



เลขหมู่.....
เลขทะเบียน.....117310
วันเดือนปี.....20 ก.ค. 2554

b.....
i.....

โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาเคมีทรัพยากรสิ่งแวดล้อม

คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2553

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**STUDY ON THE FORMS OF CHROMIUM IN CONTAMINATED
SOIL AFTER PHYTOREMEDIATION**



**A SPECIAL PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIRMENT FOR THE DEGREE OF BACHELOR OF SCIENCE
IN ENVIRONMENTAL RESOURCE CHEMISTRY**

FACULTY OF SCIENCE

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

ACADEMIC YEAR 2010

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ การศึกษารูปฟอร์มของโครเมียมในดินปนเปื้อนที่ผ่านการบำบัดด้วยพืช
Study on The Forms of Chromium in Contaminated Soil after
Phytoremediation



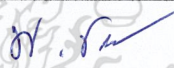
ชื่อนักศึกษา ภูวิช พรหมสะอาด
ยัมจิตร วงศ์สุโท
ฤทัยรัตน์ แสงบุตร

ปริญญา วิทยาศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชา เคมีทรัพยากรสิ่งแวดล้อม

อาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.พิสมัย ชัยรัตน์อุทัย

คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง อนุมัติให้
โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร วิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาเคมี
ทรัพยากรสิ่งแวดล้อม ประจำปีการศึกษา 2553

คณะกรรมการสอบ	ลายมือชื่อ
ผศ.ดร.สุวรรณณี จรรยาพูน	
รศ.อรุณี คงศักดิ์ไพศาล	
ผศ.พิสมัย ชัยรัตน์อุทัย	

ลิขสิทธิ์ของคณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ	การศึกษาารูปฟอร์มของโครเมียมในดินปนเปื้อนที่ผ่านการบำบัดด้วยพืช
ชื่อนักศึกษา	นายภูวิช พรหมสะอาด นางสาวอิมจิตร วงศ์สุโท นางสาวฤทัยรัตน์ แสงบุตร
ปริญญา	วิทยาศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชา	เคมีทรัพยากรสิ่งแวดล้อม
ปีการศึกษา	2553
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผศ.พิสมัย ชัยรัตน์อุทัย

บทคัดย่อ

โครงการพิเศษนี้ทำการศึกษาารูปแบบการกระจายของโครเมียมในดินปนเปื้อนที่ผ่านการบำบัดด้วยพืช โดยมีชุดการทดลอง 2 ชุด แต่ละชุดประกอบด้วยดิน 4 ชนิด ได้แก่ ดินที่ไม่มีการปนเปื้อนโครเมียม (ชุดควบคุม) ดินที่ปนเปื้อนโครเมียม ดินที่ปนเปื้อนโครเมียมและผสมสารคีเลต แบ่งเป็นอีดีทีเอและอีดีดีเอส โดยชุดการทดลองแรกผ่านการปลูกต้นขลุ่ย และชุดการทดลองสุดท้ายผ่านการปลูกหญ้าแพรก ปัจจัยที่ทำการศึกษาได้แก่ ลักษณะทางกายภาพและทางเคมีของดิน ปริมาณของโครเมียมในดิน รวมทั้งรูปแบบการกระจายของโครเมียมที่ได้จากการสกัดแบบลำดับขั้น 4 ขั้นตอน ประกอบด้วย ส่วนที่ละลายน้ำและแลกเปลี่ยนไอออน ส่วนที่ยึดอยู่กับเหล็กและแมงกานีสออกไซด์ ส่วนสุดท้ายคือ ส่วนที่เหลือ ผลการศึกษาพบว่าดินตัวอย่างที่ใช้มีลักษณะเนื้อดินเป็นดินร่วนเหนียว ดินเหนียว และดินเหนียวปนทราย ค่าพีเอชเป็นกรดเล็กน้อยถึงปานกลาง ความจุในการแลกเปลี่ยนประจุบวกมีอยู่ในระดับต่ำ ปริมาณอินทรีย์วัตถุในดินอยู่ในระดับต่ำถึงสูงมาก ความเป็นกรดของดินอยู่ในช่วงกรดเล็กน้อยถึงปานกลาง ชุดตัวอย่างดินทั้งหมด มีออกไซด์ของซิลิกอน อลูมินัมและเหล็กเป็นองค์ประกอบหลัก ปริมาณของโครเมียมในดินอยู่ในรูปโครเมียมไตรวาเลนซ์มากกว่ารูปโครเมียมเฮกซะวาเลนซ์ โดยดินที่ผ่านการปลูกหญ้าแพรกมีปริมาณโครเมียมทั้งหมดมากกว่าดินที่ผ่านการปลูกต้นขลุ่ย และรูปแบบการกระจายของโครเมียมในดินที่ปนเปื้อนโครเมียมและผสมสารคีเลต จะพบอยู่ในรูปที่ยึดอยู่กับแมงกานีสออกไซด์มากที่สุด นอกจากนี้ดินที่ผสมสารคีเลตอีดีทีเอและอีดีดีเอส จะพบโครเมียมรูปที่ละลายน้ำและแลกเปลี่ยนไอออนได้ในปริมาณที่มากกว่าดินที่ไม่มีสารคีเลตผสมอยู่

คำสำคัญ : โครเมียม, การสกัดแบบลำดับขั้น, ต้นขลุ่ย, หญ้าแพรก

Title	Study on the forms of chromium in contaminated soil after phytoremediation
Students	Mr. Phuwich Promsaard Miss Yimjitr Wongsuto Miss Ruthairat Saengbut
Degree	Bachelor of Science
Major Program	Environmental Resource Chemistry
Academic Year	2010
Advisor	Asst. Prof. Pitsamai Chairat-utai

ABSTRACT

This special project studied on the various forms of chromium in contaminated soil treated with phytoremediation. Two sets of experiment with 4 types soil sample, e.g. Uncontaminated soil, as control sample, chromium contaminated soil and chromium contaminated soil added by chelating of EDTA and EDDS are used for this study. The first set was used for planting Indian Marsh Fleabane, the remain set was planted with Burmuda Grass. The parameters were studied such as, physical and chemical characteristic of soil, chromium content and the various forms of chromium by 4 steps sequential extraction (soluble and exchangeable, Fe-Mn oxides bound and residues fractions) in soil. Results showed that the texture of soil are clay loam, clay and sandy clay. The pH is ranged from slightly to medium acid. The cation exchange capacity are low. The organic content in soil ranges are low to very high. Acidity of soil is slightly acid to medium. All soil samples contain silicon oxide, alumina and iron as main contents. More tri-valence Cr than hexa-valence Cr are found in soil sample. The soils which are planted with Burmuda Grass have more total chromium than planted with Indian Marsh Fleabane. The forms of chromium in contaminated soil are mostly found with manganese oxide bound. Application of chelate (EDTA and EDDS) caused an increased in the soluble and exchangeable fraction of chromium.

Keywords : Chromium, Sequential Extraction, Indian Marsh Fleabane, Bermuda grass

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

โครงการพิเศษเล่มนี้สำเร็จได้ด้วยความกรุณาจากอาจารย์ที่ปรึกษาโครงการพิเศษ ผศ.พิสมัย ชัยรัตน์อุทัย อาจารย์ประจำภาคเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ได้ให้ความช่วยเหลือ คำแนะนำ และช่วยแก้ปัญหา ตลอดจนให้ความรู้ และประสบการณ์ที่ดีแก่กลุ่มของข้าพเจ้า

ขอขอบพระคุณ รศ.อรุณี กงศักดิ์ไพศาล ผศ.ดร.สุวรรณี จรรยาพูน และดร.ณัฐภูมิ เชิงชั้น อาจารย์ประจำภาคเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ได้ให้ความช่วยเหลือ คำแนะนำ และช่วยตรวจสอบเพิ่มความสมบูรณ์ให้กับโครงการพิเศษฉบับนี้

ขอขอบพระคุณเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการเคมี และเจ้าหน้าที่ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังที่อำนวยความสะดวก ให้ความช่วยเหลือ และอนุเคราะห์เครื่องมือ และอุปกรณ์วิทยาศาสตร์สำหรับงานวิจัย

ขอขอบพระคุณศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยที่อำนวยความสะดวก ให้ความช่วยเหลือ และอนุเคราะห์เครื่องมือ และอุปกรณ์วิทยาศาสตร์สำหรับงานวิจัย

ขอขอบพระคุณเจ้าหน้าที่ห้องธุรการภาควิชาเคมี เจ้าหน้าที่ฝ่ายอาคาร คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่อำนวยความสะดวก และให้ความช่วยเหลือสำหรับงานวิจัย

สุดท้ายขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา บุคคลในครอบครัว รวมทั้งพี่ๆ เพื่อนๆ และน้องๆ ภาควิชาเคมี เป็นอย่างสูงที่คอยให้ความช่วยเหลือ และเป็นกำลังใจอย่างดีมาตลอด

นายภูวิช พรหมสะอาด

นางสาวอิมจิตร วงศ์สุโท

นางสาวอุทัยรัตน์ แสงบุตร

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VII
สารบัญรูป.....	VIII
สัญลักษณ์และคำย่อ.....	IX
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 ภาวะมลพิษของดิน.....	4
2.1.1 ธาตุพิษในดิน.....	5
2.1.2 รูปของธาตุโลหะในดิน.....	5
2.2 สภาพการละลายและการเคลื่อนที่ของโลหะหนักในดิน.....	5
2.3 ลักษณะสมบัติของดิน.....	7
2.3.1 ความเป็นกรดของดิน.....	7
2.3.2 ความจุในการแลกเปลี่ยนประจุบวก.....	8
2.3.3 อินทรีย์วัตถุในดิน.....	9
2.4 โครเมียม.....	11
2.4.1 สมบัติทางเคมีของโครเมียม.....	13
2.4.2 พฤติกรรมทางเคมีในดิน.....	14
2.5 การบำบัดและฟื้นฟูดินปนเปื้อน โดยพืช.....	14

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.6 สารสีเลต.....	17
2.6.1 ประเภทของสารสีเลต.....	18
2.6.2 การใช้สารสีเลตในการกำจัดโลหะหนักที่ปนเปื้อนในดิน.....	18
2.7 การสกัดแบบเป็นลำดับขั้น.....	18
2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	20
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	23
3.1 อุปกรณ์และสารเคมี.....	23
3.1.1 อุปกรณ์.....	23
3.1.2 สารเคมี.....	24
3.2 ดินที่ใช้ในการทดลอง.....	25
3.2.1 แหล่งที่มาของดิน.....	25
3.3 วิธีการทดลอง.....	26
3.3.1 ขั้นตอนการเตรียมดิน.....	26
3.3.2 ลักษณะทางกายภาพและทางเคมีของดิน.....	26
3.4 การสกัดแบบเป็นลำดับขั้น.....	27
3.5 การวิเคราะห์ผลทางสถิติ.....	28
บทที่ 4 ผลการวิจัยและอภิปรายผล.....	29
4.1 ลักษณะทางกายภาพและทางเคมีของดิน.....	29
4.2 ปริมาณของโครเมียมในดิน.....	31
4.3 การสกัดแบบเป็นลำดับขั้น.....	32
4.3.1 รูปฟอร์มของโครเมียมในดินที่ผ่านการปลูกต้นขลุ่ยและหญ้าแพรก.....	32
4.3.2 เปรียบเทียบรูปฟอร์มของโครเมียมในดินที่ผ่าน.....	35
การปลูกต้นขลุ่ยและหญ้าแพรก	
4.3.3 เปรียบเทียบปริมาณโครเมียมทั้งหมดในดินและปริมาณที่.....	36
สกัดได้ในการสกัดแบบเป็นลำดับขั้น	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	37
เอกสารอ้างอิง.....	39
ภาคผนวก ก วิธีการวิเคราะห์หัตถ์.....	43
ภาคผนวก ข วิธีการสกัดแบบเป็นลำดับขั้น (Sequential extraction).....	53
ภาคผนวก ค ลักษณะทางกายภาพ – เคมีของดินที่ใช้ในการศึกษา.....	56
ภาคผนวก ง ลักษณะของดินปนเปื้อน โครเมียม.....	64
ภาคผนวก จ ผลการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ.....	69



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา VI และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ความเข้มข้นเฉลี่ยของโครเมียมในถ่านหินและซีเมนต์.....	12
2.2 การประมาณค่าความเข้มข้นของโครเมียมที่ปล่อยสู่อากาศ น้ำ และดิน.....	12
3.1 วิธีการวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพและทางเคมีของดิน.....	26
4.1 ลักษณะทางกายภาพและทางเคมีของดิน.....	29
4.2 ปริมาณโครเมียมที่พบได้ในดิน.....	31
ค-1 เปอร์เซ็นต์ความชื้นของดินที่ใช้ในการศึกษา.....	56
ค-2 เปอร์เซ็นต์เนื้อดินสัมพัทธ์.....	57
ค-3 พีเอชของดินที่ใช้ในการศึกษา.....	58
ค-4 ความจุในการแลกเปลี่ยนประจุบวกของดินที่ใช้ในการศึกษา.....	59
ค-5 อินทรีย์วัตถุที่ใช้ในการศึกษา.....	60
ค-6 ความเป็นกรดของดินที่ใช้ในการศึกษา.....	61
ค-7 อนินทรีย์วัตถุในดินที่ใช้ในการศึกษา.....	62
ง-1 รูปฟอร์มของโครเมียมที่พบในตัวอย่างดิน.....	64
จ-1 ผลที่ได้จากการทดสอบสมมติฐาน โดยใช้โปรแกรมการวิเคราะห์ทางสถิติ.....	69
ANOVA ของดินตัวอย่างที่ปนเปื้อนโครเมียม (รูปของโครเมียมที่ยึดกับเมงกานีสออกไซด์ในดินตัวอย่างทั้ง 8 ชุดดิน)	
จ-2 ผลที่ได้จากการทดสอบสมมติฐาน โดยใช้โปรแกรมการวิเคราะห์ทางสถิติ.....	71
ANOVA ของดินตัวอย่างที่ปนเปื้อนโครเมียม (รูปของโครเมียมที่ยึดกับเหล็กออกไซด์ในดินตัวอย่างทั้ง 8 ชุดดิน)	
จ-3 ผลที่ได้จากการทดสอบสมมติฐาน โดยใช้โปรแกรมการวิเคราะห์ทางสถิติ.....	73
ANOVA ของดินตัวอย่างที่ปนเปื้อนโครเมียม (รูปของโครเมียมที่ละลายได้และสามารถแลกเปลี่ยนไอออนได้ในดินที่ปลูกต้นขลุ)	
จ-4 ผลที่ได้จากการทดสอบสมมติฐาน โดยใช้โปรแกรมการวิเคราะห์ทางสถิติ.....	73
ANOVA ของดินตัวอย่างที่ปนเปื้อนโครเมียม (รูปของโครเมียมที่ละลายได้และสามารถแลกเปลี่ยนไอออนได้ในดินที่ปลูกหญ้าแพรก)	

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 ประเภทของการบำบัดและฟื้นฟูดินปนเปื้อนโดยพืช.....	17
3.1 ขั้นตอนการสกัดโลหะในรูปต่าง ๆ ออกจากดินแบบเป็นลำดับขั้น.....	27
4.1 ปริมาณของโครเมียมที่พบได้ในดิน.....	31
4.2 สัดส่วนรูปฟอร์มต่าง ๆ ของโครเมียมในดินปนเปื้อนที่ปลูกต้นขลุ่.....	33
4.3 สัดส่วนรูปฟอร์มต่าง ๆ ของโครเมียมในดินปนเปื้อนที่ปลูกหญ้าแพรก.....	33
4.4 เปรียบเทียบรูปฟอร์มที่ละลายและแลกเปลี่ยนไอออนได้ในดินที่ผ่านการปลูกพืช.....	34
4.5 รูปฟอร์มของโครเมียมที่ยึดเกาะกับสออกไซด์และเหล็กออกไซด์ในดินที่ผ่านการปลูกพืช..	35
4.6 เปรียบเทียบปริมาณของโครเมียมทั้งหมดและ.....	36
ปริมาณโครเมียมที่ได้จากการสกัดแบบเป็นลำดับขั้น	
ก.1 สามเหลี่ยมจำแนกเนื้อสัมผัสดิน.....	47

สัญลักษณ์และคำย่อ

คำย่อ	ความหมาย
pH	พีเอช
mV	มิลลิโวลต์
meq/clay 100 g	มิลลิกรัมสมมูลต่อดิน 100 กรัม
mg/kg	มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม
ton/yr	ตันต่อปี
M	โมลต่อลิตร (โมลาลิตี้)
A.R. Grade	เกรดวิเคราะห์
mL	มิลลิลิตร
h	ชั่วโมง
°C	องศาเซลเซียส
AAS	อะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Atomic Absorption Spectrophotometer)
DI	น้ำกลั่น
FAAS	เฟลมอะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Flame Atomic Absorption Spectrophotometer)
ppm	หนึ่งส่วนในล้านส่วน (part per million)
EDTA	เอทิลดีน ไดเอมีนเตตระเอซิติคเอซิด
EDDS	เอทิลดีน ไดเอมีนดิสซัลไฟด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

ปัญหามลพิษทางดินนั้นมีสาเหตุเนื่องมาจากการใช้ดินเป็นแหล่งรองรับของเสียทั้งจากทางเกษตรกรรม อุตสาหกรรมและชุมชน จากการรายงานของ National Priority List (NPL) พบว่า สารที่ปนเปื้อนในดินมีด้วยกันหลายชนิด ได้แก่ สารอินทรีย์ที่ระเหยได้ สารอินทรีย์ที่ชอบและไม่ชอบน้ำ โลหะหนัก และสารกัมมันตภาพรังสี โดยสารปนเปื้อนที่พบมากที่สุด คือ โลหะหนักชนิดต่าง ๆ โลหะโครเมียมเป็นโลหะชนิดหนึ่งที่กำลังเป็นปัญหาอย่างมากในปัจจุบันนี้เนื่องจากการนำโลหะชนิดนี้มาใช้ในอุตสาหกรรมอย่างกว้างขวาง เช่น ในอุตสาหกรรมชุบโลหะ ฟอกหนัง ย้อมสีขนสัตว์ไหมและหนังสัตว์ หากไม่มีวิธีการบำบัดของเสียและกักตะกอนจากการบำบัดน้ำเสียของอุตสาหกรรมข้างต้นอย่างถูกต้อง อาจทำให้เกิดปัญหาการปนเปื้อนโลหะโครเมียมเพิ่มขึ้น โดยเฉพาะพื้นที่ทำการเกษตรกรรม ถ้ามีการสะสมเป็นปริมาณมากในดินอาจมีความเป็นพิษต่อมนุษย์ พืช และสัตว์ สามารถเข้าสู่ห่วงโซ่อาหาร (food chain) และสะสมในสิ่งมีชีวิต (สำนักนโยบายและแผนสิ่งแวดล้อม, 2543) นอกจากนี้โครเมียมยังเป็นโลหะชนิดหนึ่งที่ย่อยสลายได้ยากและสะสมในร่างกายมนุษย์ ทั้งทางอากาศซึ่งเกิดจากฝุ่นละอองของโครเมียม ไอควันระเหย นอกจากนี้คณะกรรมการวิจัยโรคมะเร็ง (International Agency for on Cancer , IARC) ได้มีข้อมูลยืนยันว่า สารประกอบโครเมียมเป็นสารก่อมะเร็ง (carcinogen) และเป็นโลหะหนักที่มีระดับความเป็นพิษกลุ่มที่ 2 คือ กลุ่มที่มีความเป็นพิษสูงแม้ใช้ในปริมาณเล็กน้อย ๆ ดังนั้นปัญหามลพิษทางดินที่เกิดจากการปนเปื้อนของโลหะหนักจึงเป็นประเด็นสำคัญที่ควรศึกษา เพื่อหาวิธีป้องกันและแก้ไข ปัจจุบันเทคโนโลยีการบำบัดโลหะหนักที่ปนเปื้อนในดินหลัก ๆ ประกอบไปด้วย การสกัดด้วยตัวทำละลาย (solvent extraction) การเผาไหม้ (incineration) การระเหย (volatilization) การทำให้เสถียรหรือเป็นของแข็ง (solidification/stabilization) การบำบัดทางชีวภาพ (bioremediation) การบำบัดโดยพืช (phytoremediation) ในการเลือกใช้วิธีการใดขึ้นกับสภาพพื้นที่ ปริมาณที่ปนเปื้อน รวมทั้งขั้นตอนการบำบัด และค่าใช้จ่ายในการจัดการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การบำบัดและฟื้นฟูดินปนเปื้อนโดยพืชนั้น พืชจะช่วยในการดึงโลหะหนักไปเก็บสะสมในส่วนต่างๆ ของพืช จากการศึกษาการดูดดึงโครเมียมในดินปนเปื้อนโดยใช้หญ้าแพรกและต้นขลุ้ (เอกษา ภาณุวัฒน์ และกนกรัตน์, 2552) ผลการทดลองพบว่า พืชสามารถดึงโครเมียมได้บางส่วน และมีบางส่วนที่เหลืออยู่ในดิน งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษารูปฟอร์มของโครเมียมที่ปนเปื้อนอยู่ในดินหลังการบำบัดด้วยต้นขลุ้และหญ้าแพรก และรูปฟอร์มของโครเมียมที่ปนเปื้อนในดินที่ผสมสารคีเลตด้วยวิธีการสกัดแบบลำดับขั้น (Sequential extraction) เพื่อเป็นแนวทางในการนำไปประยุกต์ใช้ในการบำบัดฟื้นฟูพื้นที่ที่มีปัญหามลพิษทางดินจากโลหะหนัก

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 1.2.1 เพื่อศึกษาลักษณะทางกายภาพและทางเคมีของดินที่ปนเปื้อนที่ผ่านการบำบัดหรือฟื้นฟูด้วยพืช
- 1.2.2 เพื่อศึกษารูปฟอร์มของโครเมียมในดินปนเปื้อนที่ผ่านการบำบัดด้วยต้นขลุ้และหญ้าแพรก
- 1.2.3 เพื่อศึกษารูปฟอร์มของโครเมียมในดินปนเปื้อนที่ผสมสารคีเลตอิตีทีเอและอิตีดีเอส

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1.3.1 ดินที่ใช้ในการทดลองได้จากงานวิจัยของ เอกษา ภาณุวัฒน์ และกนกรัตน์, 2552 ที่เก็บดินมาจากพื้นที่ตำบลมาบข่า อำเภอนิคมน้ำจืด จังหวัดระยอง และมีปริมาณโครเมียมทั้งหมดปนเปื้อนอยู่ในช่วง 350-390 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม นำไปปลูกต้นขลุ้ และหญ้าแพรกเป็นเวลา 130 วัน สำหรับดินที่ผสมคีเลตนั้น ได้จากการเติมสารอิตีทีเอและอิตีดีเอสที่ระดับความเข้มข้น 2 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดินลงไป และนำไปปลูกพืชเช่นเดียวกัน

1.3.2 วิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพและทางเคมีของดิน โดยทำการวิเคราะห์ค่าพีเอช ความเป็นกรดของดิน ความจุในการแลกเปลี่ยนประจุบวก (CEC) ปริมาณสารอินทรีย์ ปริมาณสารอินทรีย์ ปริมาณความชื้น เปอร์เซ็นต์เนื้อดินสัมผัส ปริมาณโครเมียมทั้งหมด ปริมาณโครเมียมไตรวาเลนซ์ และปริมาณโครเมียมเฮกซะวาเลนซ์

1.3.3 การศึกษารูปฟอร์มของโครเมียมจะใช้วิธีการสกัดแบบลำดับขั้น 4 ขั้นตอน ตามวิธี

ของ Tessier et al., 1979

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.4.1 ทำให้ทราบถึงรูปฟอร์มของโครเมียมที่อยู่ในดินและรูปที่พืชสามารถดึงไปใช้ได้
- 1.4.2 เป็นแนวทางในการกำจัดโครเมียมออกจากดินที่ปนเปื้อน โดยการใช้พืชบำบัด



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ภาวะมลพิษของดิน

ภาวะมลพิษของดิน (soil pollution) หมายถึง “สภาพความปนเปื้อนของดินด้วยสารมลพิษ (soil pollutant) มากเกินขีดจำกัดจนมีอันตรายต่อสุขภาพอนามัยตลอดจนการเจริญเติบโตของมนุษย์ พืชและสัตว์” ดังนั้นภาวะมลพิษของดินจะเกิดขึ้นได้ก็ต่อเมื่ออัตราการเพิ่มสารมลพิษลงไปในดินมีมากกว่าการสลายตัวของสารมลพิษนั้น จนเกิดการสะสมสารมลพิษมากขึ้นถึงขั้นที่เป็นอันตรายต่อสภาวะแวดล้อม

ขอบเขตที่จะเรียกว่า เกิดภาวะมลพิษของดิน ประการแรกขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของสารมลพิษในสารละลายดินมากกว่าปริมาณของสารมลพิษทั้งหมดในดิน อีกประการหนึ่งคือ ภาวะมลพิษนั้นได้ทำให้ดินสูญเสียหน้าที่ของดินไป คือ เป็นปัจจัยเบื้องต้นของการดำรงชีวิต เช่น ปัจจัย 4 ได้แก่ อาหาร ที่อยู่อาศัย เครื่องนุ่งห่มและยารักษาโรค เป็นต้น และเป็นเครื่องกรองสารมลพิษมิให้ปนเปื้อนแหล่งน้ำและน้ำใต้ดิน ซึ่งน้ำก็เป็นตัวการสำคัญที่สุดในการนำสารมลพิษลงสู่ดิน กล่าวกันว่า ดินเป็นเครื่องกรองที่มีชีวิต (living filter) มนุษย์ใช้ดินเป็นแหล่งทิ้งสิ่งปฏิกูลทั้งหมด ดินจะทำหน้าที่เป็นตัวกรองโดยอาศัยสมบัติความมีประจุดูดซับสารที่มีประจุ เป็นที่สำหรับการเกิดปฏิกิริยาเคมีระหว่างสารเคมีต่าง ๆ ในดิน ความมีพื้นที่ผิวจำเพาะสูงเพื่อกักกันสารมลพิษหรือยึดเหนี่ยวเชื้อโรคไว้ และยังมีจุลินทรีย์เพื่อย่อยสลายสารต่าง ๆ ทรายเท่าที่ซึ่งได้รับสารมลพิษไม่เกินขีดความสามารถที่จะรักษาไว้ได้ ดังนั้นในสภาพดินเสีย คือ สภาพความเป็นตัวกรองหมดไปจากดินก่อให้เกิดผลกระทบต่าง ๆ เช่น การยับยั้งการเจริญเติบโตของพืช การเติมสารมลพิษลงในห่วงโซ่อาหาร (food chain) โดยการดูดซึมของพืชหรือโดยการกินของสัตว์ และการปนเปื้อนของสารมลพิษในแหล่งน้ำและน้ำใต้ดิน เป็นต้น

2.1.1 ธาตุพิษในดิน

ธาตุพิษ (toxic element) โดยทั่วไปมักหมายถึง ธาตุโลหะหนัก และธาตุอื่น ซึ่งเป็นสารมลพิษที่สำคัญในดิน ธาตุพิษเหล่านี้จะเป็นสารมลพิษได้เนื่องจากมีการนำไปใช้ประโยชน์ในรูปสารประกอบและเครื่องมือเครื่องใช้ต่าง ๆ แล้วมีการปนเปื้อนสู่สภาพแวดล้อม

ธาตุโลหะหนัก (heavy metal) หมายถึง โลหะธาตุที่มีความถ่วงจำเพาะตั้งแต่ 5.0 ขึ้นไป โดยไม่รวมโลหะที่เป็นโลหะอัลคาไลน์ (alkaline) และโลหะอัลคาไลน์เอิร์ท (alkaline earth) ซึ่งโดยทั่วไปจะเป็นธาตุในตารางธาตุที่มีเลขอะตอม (atomic number) ในช่วง 23-92 อยู่ในคาบที่ 4-7

2.1.2 รูปของธาตุโลหะในดิน

ธาตุโลหะที่ใส่ลงไปในดินจะอยู่ในรูปหนึ่งหรือหลายรูปดังต่อไปนี้

1. รูปที่ละลายในสารละลายดิน (soluble form)
2. รูปที่ถูกดูดซับในตำแหน่งผิวของอนุภาคคอลลอยด์ดิน (adsorbed form)
3. รูปที่ตกตะกอนหรือตกตะกอนกับสารอื่น (precipitated form)
4. รูปที่ตรึงและจับกับสารแขวนลอยอื่นหรือแร่ในดิน (fixed, occluded form)
5. รูปที่ถูกคลุกเคล้าเข้าสู่ระบบชีวภาพเป็นสารอินทรีย์ (organic form)

ธาตุโลหะในรูปที่หนึ่งและสองถือเป็นรูปที่เคลื่อนที่ได้ (mobile) ในดิน สามารถถูกพืชนำไปใช้ได้ ส่วนสามรูปหลังเป็นรูปที่หยุดเคลื่อนที่ (immobile) แต่เนื่องจากกระบวนการในดินมีลักษณะเป็นพลวัต (dynamic) จึงอาจมีการเปลี่ยนแปลงรูปต่าง ๆ ที่กล่าวถึงได้อยู่ตลอดเวลา

2.2 สภาพการละลายและการเคลื่อนที่ของโลหะหนักในดิน

การเคลื่อนที่ (Mobility) ของโลหะในดินเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความสามารถในการละลาย (solubility) ของโลหะชนิดนั้น การเคลื่อนที่ของโลหะในดินจะเกิดขึ้น 3 รูปแบบหลักๆ ได้แก่ การนำไปใช้ของพืช การนำไปใช้ของจุลินทรีย์ และการเคลื่อนย้ายในสภาพสารละลายและสารแขวนลอย เนื่องจากการแปรและการไหลของมวล (ศุภมาศ, 2539) ปัจจัยที่มีผลต่อสภาพการละลายของโลหะ ได้แก่

1. **ความเป็นกรด-ด่างของดิน** ซึ่งเป็นปัจจัยที่สำคัญที่สุด เพราะเมื่อดินมีสภาพกรด-ด่างที่เปลี่ยนแปลงไปจะส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสมดุลของโลหะระหว่างส่วนที่เป็นของแข็งซึ่งสามารถเคลื่อนที่ได้เล็กน้อยและส่วนที่ละลายได้ในดินซึ่งสามารถเคลื่อนที่ได้ดี เช่น สภาพการละลายของเหล็ก ตะกั่วและแคดเมียมจะต่ำมากเมื่อดินมีสภาพเป็นกลาง ($\text{pH} = 7$) และสภาพการละลายจะเพิ่มขึ้นเป็นอย่างมากเมื่อดินมีความเป็นกรดเพิ่มขึ้น ($\text{pH} < 5$) (ศุภามาศ, 2539)

2. **ศักย์รีดอกซ์ (redox potential)** การเปลี่ยนแปลงของศักย์รีดอกซ์ในดินเป็นผลมาจากกระบวนการหายใจของจุลินทรีย์ในดิน เมื่อจุลินทรีย์ในดินที่ใช้ออกซิเจนเจริญได้ดี อัตราการใช้ออกซิเจนในการหายใจสูงกว่าอัตราการแพร่ของออกซิเจนจากอากาศลงสู่ดิน ดินจะเริ่มขาดออกซิเจนส่งผลให้จุลินทรีย์กลุ่มที่ไม่ใช้ออกซิเจนเจริญเติบโตมากขึ้น (มีการใช้ในตรรกหรือเพอร์ริกเป็นตัวรับอิเล็กตรอนแทนออกซิเจน) ศักย์รีดอกซ์ของดินเริ่มลดลง การเปลี่ยนแปลงสภาพศักย์รีดอกซ์ของดินมีผลต่อสภาพการละลายได้ของโลหะ เช่น เมื่อศักย์รีดอกซ์ของดินลดลงจนดินอยู่ในสภาพรีดักชัน ($< 100 \text{ mV}$) สภาพการละลายได้ของเหล็ก แมงกานีส โซเดียม และโพแทสเซียม จะเพิ่มขึ้น ในขณะที่สภาพการละลายได้ของสังกะสีและทองแดงจะลดลง (คณาจารย์ภาควิชาปฐพีวิทยา, 2548)

3. **เนื้อดิน** ดินที่มีเนื้อดินละเอียดจะมีคุณสมบัติที่ดูดซับสารหรือโลหะต่างๆ ได้ดีกว่าดินเหนียว เนื่องจากดินเนื้อละเอียดจะมีสัดส่วนดินเหนียวมากกว่าดินหยาบ ประกอบกับดินเหนียวมีขนาดอนุภาคที่เล็ก รูปร่างแบนและยังมีประจุลบที่ผิวจำนวนมาก (คณาจารย์ภาควิชาปฐพีวิทยา, 2548) จึงสามารถดูดซับโลหะที่มีประจุบวกไว้ได้ดี โลหะจึงละลายออกมาสู่สารละลายดินและเคลื่อนที่ได้น้อยลงเมื่อถูกดูดซับที่ผิวของอนุภาคดินเหนียว ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับธรรมชาติและปริมาณของตำแหน่งดูดซับของอนุภาคดินเหนียวที่เป็นองค์ประกอบในดิน

4. **วัตถุดิบกำเนิดดิน** ซึ่งจะมียอดประกอบจำพวกแร่ธาตุอยู่หลายชนิด สามารถก่อให้เกิดปฏิกิริยาต่างๆ กับโลหะได้ เช่น การแทนที่ (isomorphous substitution) ของอนุภาคในแร่ หรือการดูดซับที่ผิวของแร่ (ศุภามาศ, 2539) เช่น การแทนที่แคลเซียมไอออน (Ca^{2+}) ด้วย ตะกั่วไอออน (Pb^{2+}) ในโครงสร้างของแร่ไฮดรอกอะพาไทต์ ทำให้เกิดแร่ชนิดใหม่ คือ ไฮดรอกซีฟอสเฟตที่มีความสามารถในการละลายต่ำส่งผลให้สภาพการละลายของตะกั่วลดลงด้วย เนื่องจากถูกตรึงอยู่ในโครงสร้างของแร่ แสดงได้ดังสมการ (Takeuchi et al., 1998)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. ชนิดและปริมาณสารประกอบอินทรีย์ในดินและในสารละลายดิน สารอินทรีย์ส่วนใหญ่อยู่ในรูปที่มีประจุ จึงสามารถดูดซับโลหะได้เช่นเดียวกับอนุภาคดินเหนียว หรืออาจเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนกับสารอินทรีย์ นอกจากนี้สารอินทรีย์ยังสัมพันธ์กับการเปลี่ยนแปลงพีเอชของดินซึ่งมีผลโดยตรงกับความสามารถในการละลายของโลหะ

6. ไอออนของธาตุอื่นที่มีอยู่ในสารละลายดิน ที่สามารถเกิดสารประกอบกับโลหะแล้วเกิดตะกอนหรือเปลี่ยนรูปที่ละลายได้ดีขึ้น

7. สมบัติอื่น ๆ ของดิน ได้แก่ ความชื้นของดิน กิจกรรมของจุลินทรีย์ในดินและอุณหภูมิของดิน ซึ่งจะเป็นตัวกำหนดการเปลี่ยนแปลงของศักย์รีดอกซ์ในดิน นอกจากนี้ยังสัมพันธ์กับลักษณะเนื้อดิน และปริมาณอินทรีย์วัตถุ

2.3 ลักษณะสมบัติของดิน

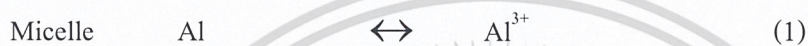
2.3.1 ความเป็นกรดของดิน (Soil acidity)

ความเป็นกรดของดินเกิดขึ้นได้หลายสาเหตุ หรือมีปัจจัยที่เกี่ยวข้องหลายอย่าง ความเป็นกรดของดินจะมากหรือน้อยเพียงใดขึ้นอยู่กับธรรมชาติและปัจจัยเหล่านั้น แหล่งที่มาของความเป็นกรดในดิน เกิดจาก 2 ปัจจัยดังนี้

1. อินทรีย์วัตถุหรือฮิวมัส (Organic matter or humus) สารอินทรีย์ที่เป็นเศษเหลือของพืชและสัตว์เมื่อสลายตัวด้วยกิจกรรมของจุลินทรีย์ในดิน ทำให้เกิดสารอินทรีย์ประเภทต่าง ๆ ทั้งที่มีโครงสร้างอย่างง่าย ๆ และสลับซับซ้อน ซึ่งมีกลุ่มที่วงเวททางเคมี อันประกอบด้วยกรดอินทรีย์หลายชนิดโดยเฉพาะสารฮิวมัส ซึ่งประกอบด้วยหมู่ฟังก์ชันต่าง ๆ ที่สามารถปล่อยไฮโดรเจนออกมาได้ และฮิวมัสสามารถทำปฏิกิริยากับอลูมิเนียมและเหล็กกลายเป็นสารประกอบเชิงซ้อนและทำปฏิกิริยากับไฮโดรเจนไอออนได้ นอกจากนี้เมื่ออินทรีย์วัตถุสลายตัวและสิ่งมีชีวิตต่าง ๆ ในดินมีการหายใจย่อมต้องเกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ขึ้นมา และเมื่อก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ทำปฏิกิริยากับน้ำจะได้กรดคาร์บอนิก ซึ่งต่อมาก็จะแตกตัวเป็นไอออน ปล่อยไฮโดรเจนไอออน (H^+) ออกมารวมทั้งกรดอินทรีย์ต่าง ๆ ที่ได้จากการสลายตัวของอินทรีย์วัตถุก็จะเพิ่มความเป็นกรดในดินมากขึ้น

2. คอลลอยด์พวกอนินทรีย์สาร (Inorganic colloids) การเกิดกรดในดินเนื่องจากคอลลอยด์พวกอนินทรีย์สารเป็นผลที่ได้ทางอ้อม การแตกหักของขอบหรือเหลี่ยมมุมของผลึกแร่ดินเหนียวพวกเคโอลิไนต์ ทำให้ส่วนที่เป็น $-Al-OH$ แตกตัวเป็นไฮโดรเจนไอออน ตลอดจนสารคอลลอยด์เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของเหล็กและอลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ รวมทั้งสารพวกอัลโลเฟนสามารถทำให้ดินเกิดเป็นกรดได้ทั้งสิ้น ในสภาพแวดล้อมของดินที่เป็นกรด อลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ซึ่งถูกดูดซับอยู่ตามผิวของแร่ดินเหนียวประเภท 2:1 อยู่ก่อนแล้วจะถูกไล่ที่ออกมา และอยู่ในรูปของอลูมิเนียมไอออน (Al^{3+}) หรืออลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ไอออนรูปต่าง ๆ คือ ที่ระดับพีเอชต่ำกว่า 5 อลูมิเนียมจะถูกดูดซับอยู่ในรูปของ $\text{Al}(\text{H}_2\text{O})_6^{3+}$ ซึ่งเรียกว่า Hexahydrated Al^{3+} และอลูมิเนียมที่ถูกดูดซับไว้บนผิวของแร่ดินเหนียวนี้จะอยู่ในสภาพสมดุลกับอลูมิเนียมไอออนในสารละลาย และอลูมิเนียมไอออนนี้เองจะเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสทำให้เกิดความเป็นกรดเพิ่มขึ้น ดังสมการ



2.3.2 ความจุในการแลกเปลี่ยนประจุบวก (Cation exchange capacity หรือ CEC)

(คู่มือ, 2535)

ความจุในการแลกเปลี่ยนประจุบวกของดินหรือของคอลลอยด์นั้นหมายถึงปริมาณแคทไอออนทั้งหมดที่ดินหรือคอลลอยด์นั้นสามารถดูดซับไว้ได้ การที่จะรู้ได้ว่าคอลลอยด์หรือดินมีค่าความจุในการแลกเปลี่ยนประจุบวกเท่าใดนั้นจะต้องทำการวิเคราะห์ทางเคมี โดยการไล่ที่แคทไอออนเดิมที่ดูดซับอยู่ที่ผิวของดินเหนียวด้วยแอมโมเนียมไอออน (NH_4^+) แล้วให้แคทไอออนดังกล่าวเข้าไปแทนที่ทั้งหมด จากนั้นทำการวิเคราะห์หาปริมาณแอมโมเนียมไอออนที่ถูกดูดซับ (Adsorbed NH_4^+) นั้นว่ามีอยู่เท่าใด โดยการบอกเป็นจำนวนสมมูลต่อดิน 100 กรัม (meq/clay 100 g)

ความจุในการแลกเปลี่ยนประจุบวกของคอลลอยด์ในดินที่ต่างชนิดกันจะแตกต่างกันเป็นอย่างมาก ยกตัวอย่างเช่น ฮิวมัส มอนมอริลโลไนต์ (Montmorillonite) ไฮดรรัสไมก้า (Hydrous mica) และไฮดรรัสออกไซด์ (Hydrous oxide) ของเหล็กและอลูมิเนียม ดังนั้นดินที่มีฮิวมัสมากหรือพวกมีมอนมอริลโลไนต์เป็นองค์ประกอบอยู่มากจะทำให้ค่าความจุของการแลกเปลี่ยนประจุบวกของดินนั้นสูงขึ้นไปกว่าดินชนิดหนึ่งซึ่งมีปริมาณดินเหนียวทั้งหมดเท่ากัน ดังนั้นความจุการแลกเปลี่ยนประจุบวกจึงมีความสำคัญอย่างมากในการควบคุมสมบัติต่าง ๆ ทั้งกายภาพ เคมี และชีวภาพของดิน ซึ่ง

สามารถสรุปได้ดังนี้ คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. ความสำคัญต่อความอุดมสมบูรณ์ของดิน ดินที่มีค่าความจุในการแลกเปลี่ยนประจุบวกสูงมักจะเป็นดินที่มีความอุดมสมบูรณ์สูง เนื่องจากดินนั้นมีความสามารถในการดูดซับไอออนบวกต่าง ๆ ที่เป็นอาหารพืชไว้ได้มาก พืชสามารถดึงไอออนบวกต่าง ๆ เหล่านี้ได้โดยตรงจากพื้นผิวของคอลลอยด์ และนอกจากนั้นธาตุอาหารพืชต่าง ๆ ไม่สูญหายไปจากดินได้ง่าย เพราะว่ามีอำนาจในการดูดยึดธาตุอาหารเหล่านี้ไว้

2. มีอิทธิพลต่อสมบัติทางกายภาพของดิน เช่น ความร่วนซุย ความเหนียว การฟุ้งกระจาย และการเกาะกลุ่มของดิน ดินที่มีไอออนบวกที่มีวาเลนซ์เดียวโดยเฉพาะ โซเดียมไอออน (Na^+) มีผลทำให้ดินอยู่ในลักษณะที่ฟุ้งกระจายซึ่งอนุภาคดินเกาะกลุ่มกันเป็นเม็ดดินซึ่งมีผลให้ดินนั้นร่วนซุยไม่แน่นทึบ และมีการระบายน้ำและถ่ายเทอากาศที่ดี ตามทฤษฎีของประจุสองชั้น (ionic double layer) คือผลของคอลลอยด์มีประจุลบอยู่ ดังนั้นจึงมีอำนาจในการดึงประจุบวกหรือผลักรันประจุลบที่อยู่ใกล้ ๆ ได้ ประจุบวกที่ดูดซับอยู่ที่ผิวคอลลอยด์ทำให้เกิดสภาพประจุสองชั้นชั้นในจะเป็นประจุลบซึ่งเป็นของคอลลอยด์ ส่วนชั้นนอกจะเป็นประจุบวกของพวกไอออนบวกระยะทางระหว่างประจุบวกที่อยู่รอบนอกกับประจุลบที่อยู่ชั้นในก็จะมาก แต่ถ้าไอออนบวกที่ดูดซับที่ผิวคอลลอยด์มีขนาดที่มีน้ำหุ้มอยู่บ้างก็จะทำให้ประจุสองชั้นของคอลลอยด์บางอนุภาคของคอลลอยด์จึงมีโอกาสได้มาอยู่ใกล้ชิดกัน

3. สมบัติทางเคมีของดิน โดยเฉพาะอย่างยิ่งความเป็นกรดของดินเนื่องจากมีไฮโดรเจนไอออนดูดซับที่ผิวคอลลอยด์มากกว่าไอออนบวกที่เป็นค่า เช่น แคลเซียมไอออนและโพแทสเซียมไอออน (K^+) ซึ่งดินที่เป็นกรดมาก ๆ มีผลต่อความเป็นประโยชน์ของธาตุอาหารพืชบางชนิด ดังนั้นการแก้ไขหรือปรับปรุงดินที่เป็นกรดมากให้เป็นกรดน้อยลงสามารถกระทำได้โดยการใส่ที่ไฮโดรเจนไอออนด้วยการใส่ปูนลงไป ในดินแคลเซียมไอออนที่อยู่ในปูนก็จะไปแทนที่ไฮโดรเจนไอออนที่ดูดซับที่ผิวของคอลลอยด์ออกมาทำให้ความเป็นกรดของดินลดน้อยลง

2.3.3 อินทรีย์วัตถุในดิน (Soil organic matter)

อินทรีย์วัตถุในดินเป็นวัตถุที่สลายซับซ้อนมาก นอกจากประกอบด้วยสารประกอบ (compound) ที่มีปรากฏในพืชและสัตว์แล้ว ยังประกอบด้วยจุลินทรีย์ทั้งที่ยังมีชีวิตและตายแล้ว ตลอดจนสารประกอบที่จุลินทรีย์สังเคราะห์ขึ้นและสารประกอบที่เกิดขึ้นเนื่องมาจากกิจกรรมการสลายตัวของจุลินทรีย์ ฉะนั้นอาจกล่าวได้ว่าอินทรีย์วัตถุในดินประกอบด้วยสารประกอบอินทรีย์ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แทบทุกชนิดที่สามารถเกิดขึ้นได้ตามธรรมชาติตลอดจนสารประกอบจำพวกกรดอินทรีย์ และพวกไฮโดรคาร์บอน (Wax) สารประกอบต่าง ๆ เหล่านี้อาจปรากฏอยู่ในสภาพโคคเดี่ยวหรือรวมตัวกันเป็นสารที่มีโครงสร้างสลับซับซ้อนก็ได้

ความสำคัญของอินทรีย์วัตถุในดิน มีความสำคัญอย่างยิ่งในแง่ของการควบคุมอิทธิพลต่อสมบัติของดิน สมบัติทางฟิสิกส์ เคมี และชีวของดิน อิทธิพลของอินทรีย์วัตถุในดินที่มีต่อสมบัติต่าง ๆ เหล่านี้พอจะกล่าวสรุปเป็นข้อ ๆ ดังต่อไปนี้

1. อิทธิพลต่อสีของดิน ทำให้สีของดินเป็นสีน้ำตาลจนถึงสีดำ ฉะนั้นโดยทั่วไปแล้วดินที่มีสีหนักไปทางน้ำตาลหรือดำจึงถือเป็นดินที่มีปริมาณอินทรีย์วัตถุสูง

2. อิทธิพลต่อสมบัติทางฟิสิกส์อื่น ๆ อินทรีย์วัตถุช่วยส่งเสริมให้อนุภาคของดินจับตัวกันเป็นก้อน ลดความหนืด ตลอดจนเป็นตัวช่วยให้ดินมีความจุในการอุ้มน้ำและถ่ายเทอากาศได้ดี

3. อิทธิพลต่อความสามารถในการดูดซับไอออนบวก (influence on cation adsorption capacity) อินทรีย์วัตถุในดินเป็นสารที่มีความสามารถในการดูดซับ ไอออนบวกได้สูงมากเมื่อเปรียบเทียบกับความสามารถในการดูดซับไอออนบวกโดยคอลลอยด์อื่น ๆ โดยทั่วไปการดูดซับโดยอินทรีย์วัตถุจะสูงตั้งแต่ 2 ถึง 30 เท่า ในดินโดยทั่วไปปริมาณของไอออนบวกที่ถูกดูดซับอยู่ตั้งแต่ 30 - 90% เป็นพวกที่ถูกดูดซับโดยอินทรีย์วัตถุในดิน เหตุที่อินทรีย์วัตถุมีความสามารถในการดูดซับไอออนบวกเนื่องมาจากประจุลบซึ่งเกิดขึ้นหลังจากการแตกตัวของสารประกอบบางกลุ่มในอินทรีย์วัตถุ

4. อิทธิพลต่อการเปลี่ยนแปลงพีเอชของดิน จากข้อ 3 อินทรีย์วัตถุในดินมีประจุลบเป็นจำนวนมากและมีความสามารถในการดูดซับไอออนบวกสูง จึงมีผลทำให้ดินที่มีอินทรีย์วัตถุสูงมีความต้านทานต่อการเปลี่ยนแปลงของพีเอชได้ดี

5. อิทธิพลต่อปริมาณและความเป็นประโยชน์ของธาตุอาหารพืช อินทรีย์วัตถุในดินมีธาตุอาหารพืชเป็นองค์ประกอบหรือผสมอยู่ ธาตุอาหารเหล่านี้ถูกปลดปล่อยออกมาสะสมอยู่ในดินหลังจากอินทรีย์วัตถุสลายตัวโดยกิจกรรมของจุลินทรีย์ นอกจากนี้ธาตุอาหารพืชที่เป็นประจุบวกซึ่งถูกดูดซับอยู่โดยอินทรีย์วัตถุ ยังเป็นประโยชน์ต่อพืชได้เช่นเดียวกัน โดยประจุบวกที่ถูกดูดซับอยู่ถูกแลกเปลี่ยนหรือแทนที่โดยประจุบวกได้ด้วยตัวเอง และอีกประการหนึ่งอินทรีย์วัตถุที่มีสมบัติเป็นกรด หรือกรดที่เกิดขึ้นจากคาร์บอนไดออกไซด์ที่ถูกปลดปล่อยออกมาเมื่ออินทรีย์วัตถุสลายตัวยังช่วยละลายธาตุอาหารบางชนิดให้เป็นประโยชน์ต่อพืชอีกด้วย

6. อิทธิพลต่อจุลินทรีย์ดิน อินทรีย์วัตถุในดินเป็นอาหารของจุลินทรีย์ดินโดยเฉพาะ จุลินทรีย์พวก Heterothrophic ดินที่มีอินทรีย์วัตถุในปริมาณที่สูงจะทำให้ปริมาณของจุลินทรีย์ใน ดินนั้นสูงด้วย ซึ่งก็เป็นผลให้กิจกรรมต่าง ๆ ของจุลินทรีย์ เช่น การแปรสภาพของธาตุอาหารพืช การตรึงไนโตรเจน ฯลฯ เกิดขึ้นได้ในดินเป็นอย่างดี

2.4 โครเมียม

แหล่งกำเนิดโครเมียมที่ปนเปื้อนในสิ่งแวดล้อมมีดังนี้

1. กากตะกอนน้ำเสีย

โลหะจากธรรมชาติ บำบัดน้ำเสีย และแหล่งอุตสาหกรรม การกำจัด โครเมียมจากน้ำเสียโดย กากตะกอนขึ้นอยู่กับกระบวนการและอายุของตะกอน ในระบบบำบัดส่วนใหญ่จะมีขั้นตอนการ ตกตะกอนก่อน แต่โครเมียม(VI)ไอออน (Cr^{6+}) เพียง 48% เท่านั้นที่ถูกบำบัด ทั้ง โครเมียม (III)ไอออน (Cr^{3+}) และโครเมียม(VI)ไอออนสามารถพบได้ในน้ำเสีย เช่น ในน้ำเสียจากงาน ชุบโลหะจะมีโครเมียม(VI)ไอออนอยู่มากกว่า ซึ่งส่วนใหญ่น้ำทิ้งที่ถูกปล่อยจะมีการบำบัดน้ำใน แต่ละแหล่งเพื่อลดภาระความเป็นพิษของน้ำเสียให้มีโครเมียม(VI)ไอออนลดลงโดยสารอินทรีย์ เป็นผลให้โครเมียมในกากตะกอนจะเปลี่ยนไปเป็นสารประกอบโครเมียม(III)ไอออน Nriagu และ Pacyna ประมาณว่าโครเมียมที่ปนอยู่ในดินแต่ละปีมาจากการกำจัดกากตะกอนน้ำเสีย โลหะหลาย ชนิดสะสมอยู่ในความเข้มข้นสูงในชั้นผิวดิน ความเข้มข้นของโลหะที่ปนเปื้อนนั้นขึ้นอยู่กับความ ลึกและรอยแตก หรือช่องว่างในดิน การกำจัดนั้นจะมีการไถกวาดกากตะกอนและมีการเพาะปลูก อื่น ๆ มีการรายงานว่าโครเมียมยังคงอยู่ในดินเป็นเวลานานหลายปี ปัจจุบันในหลาย ๆ ประเทศได้มีการควบคุมปริมาณโลหะในกากตะกอนน้ำเสีย หรือความเข้มข้นสูงสุดของโลหะในดิน เช่น โรงงานอุตสาหกรรมฟอกหนัง และอุตสาหกรรมชุบโลหะ มีปริมาณความเข้มข้นของโครเมียมใน กากตะกอนน้ำเสียสูงกว่าโรงงานอื่น ๆ

2. วัสดุทางการเกษตร

การเกษตรกรรมก็เป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้พบปริมาณ โครเมียมในดินสูง เนื่องจากปุ๋ยจะมี ส่วนประกอบของโครเมียม The National Research Council of Canada รายงานว่าในปุ๋ยฟอสเฟตมี โครเมียมในช่วง 30-3000 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม

3. จากแหล่งกำเนิดอื่น ๆ

การจัดการเถ้าบนพื้นดินซึ่งเป็นปัญหาที่ทำให้โครเมียมเข้าสู่ดิน ตารางที่ 2.1 แสดงให้เห็นความเข้มข้นเฉลี่ยของโครเมียมในถ่านหินและขี้เถ้า

ตารางที่ 2.1 ความเข้มข้นเฉลี่ยของโครเมียมในถ่านหินและขี้เถ้า

ถ่านหินและขี้เถ้า	Cr (mg/kg)
Coal	15
Fly ash	
- Bituminous	172
- Sub-bituminous	50
Lignite	43

ที่มา : Alloway ; 1995

Fly ash จะมีปริมาณโครเมียมมาก พื้นดินรอบ ๆ โรงไฟฟ้าจากการเผาถ่านหินจะมีปริมาณโครเมียมอยู่สูง การกำจัดกากเชื้อเพลิงจำนวนมากบนดินทำให้ปริมาณโครเมียมเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับพื้นดิน โดยทั่วไปในขี้เถ้าจะมีปริมาณโครเมียมมากกว่านิกเกิล และทำให้ปริมาณโครเมียมในดินมีมากขึ้นด้วย มีโครเมียมจำนวนน้อยที่จะถูกดูดซึมโดยพืช

ของเสียจากการถลุงแร่โครเมต ทำให้เพิ่มจำนวนโครเมียมในดินโครเมียม(VI) ไอออนในของเสียปริมาณมาก ๆ ในทางเหนือของประเทศอังกฤษมีความเป็นพิษต่อพืช การลดโครเมียม (VI) ไอออนเป็นโครเมียม (III) ไอออนโดยวิธีทางเคมีให้อยู่ในรูปสารละลายซึ่งจะลดความเป็นพิษต่อพืช แหล่งกำเนิดอื่น ๆ ของโครเมียม เช่น ละอองไอจากการใช้โครเมียมเป็นตัวกระตุ้น (catalyst) ในการลดควัน ดังนั้นจึงอาจสรุปได้ว่า โครเมียมในดินเปรียบเทียบกับในอากาศและในน้ำ ในดินจะได้รับผลกระทบมากกว่าส่วนอื่น ๆ ในสิ่งแวดล้อม (ตารางที่ 2.2)

ตารางที่ 2.2 การประมาณค่าความเข้มข้นของโครเมียมที่ปล่อยสู่อากาศ น้ำ และดิน

ผลกระทบต่อ	Cr (10^3 ton/yr)
อากาศ	30
น้ำ	142
ดิน	896

ที่มา : Alloway ; 1995

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนื่องจากโครเมียมส่วนใหญ่จะปล่อยสู่อากาศ และไปอยู่ในน้ำและเกิดการสะสมในดิน โดยในอากาศและน้ำจะเกิดการผสมกันมากกว่า ทำให้มีปริมาณโลหะเจือจางมากกว่าในดินซึ่งเป็น ปัญหาในระดับท้องถิ่นและระดับโลก

2.4.1 สมบัติทางเคมีของโครเมียม

2.4.1.1 สารประกอบโครเมียมมีเลขออกซิเดชันได้หลายค่าที่สำคัญ ได้แก่ +2, +3 และ +6 ในบางกรณีอาจมีเลขออกซิเดชัน +4 และ +5 ได้ เช่น ในสารประกอบประเภทโครเมียมฟีนิล (Chromium Phenyl Compound) และอาจเป็นศูนย์ได้ในสารคาร์บอนิล ($\text{Cr}(\text{CO})_6$) สารประกอบของโครเมียมจำนวนมากมีสีและสีเข้ม เช่น โครเมียมออกไซด์ (Cr_2O_3) มีสีเขียว โครเมียมซัลเฟต ($\text{Cr}_2(\text{SO}_4)_3$) มีสีม่วงแดง โครเมียมไตรฟลูออรีน ($\text{CrF}_3 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$) หรือ ($\text{CrF}_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$) มีสีเขียว เป็นต้น

2.4.1.2 โลหะโครเมียมอยู่ในรูปที่ว่องไว ทำปฏิกิริยาทันทีกับกรดอินทรีย์เจือจางเกิดเป็นสารละลายสีน้ำเงินที่มีโครเมียม (II) อยู่ด้วย พร้อมกับให้แก๊สไฮโดรเจน (H_2) ออกมา โครเมียมไอออน (Cr^{2+}) ในสารละลายดูดออกซิเจน (O_2) จากอากาศอย่างรวดเร็วเปลี่ยนไปเป็นโครเมียม (Cr^{3+}) ที่มีสีเขียว

2.4.1.3 โลหะโครเมียมทำปฏิกิริยากับตัวออกซิไดซ์ เช่น กรดไนตริก กรดฟอสฟอริก กรดคลอริก และกรดเปอร์คลอริก จะเกิดออกไซด์ชั้นบาง ๆ เคลือบที่ผิวทำให้โลหะที่อยู่ข้างในไม่สามารถถูกออกซิไดซ์หรือทำปฏิกิริยาต่อไป จึงไม่สามารถทำปฏิกิริยากับกรดอ่อนทั่วไป เรียกโครเมียมที่มีออกไซด์ของโครเมียมเคลือบอยู่ว่าอยู่ในรูป Passive ซึ่งสามารถต่อต้านการผุกร่อนได้เป็นอย่างดี

2.4.1.4 โครเมียมสามารถเกิดสารประกอบโคออร์ดิเนชัน (coordination) หรือสารเชิงซ้อน (Complex Compound) ที่มีเลขโคออดิเนชันเท่ากับ 6 เช่น ไตรโครเมียมแอมโมเนีย ($\text{Cr}_3(\text{NH}_3)_6$) โครเมียมโมโนไฮเดรต ($(\text{Cr}(\text{H}_2\text{O})_6)^{3+}$) เป็นต้น

2.4.2 พฤติกรรมทางเคมีในดิน

โครเมียมในดินอาจอยู่ในรูป oxidation state แต่ส่วนใหญ่จะเสถียรและอยู่ในรูปโดยทั่วไปคือ โครเมียม(VI)ไอออน และโครเมียม(III)ไอออนซึ่งมีคุณสมบัติทางเคมีขัดแย้งกัน คือ

โครเมียม (VI) ไอออนในรูปแอนไอออนสกัดได้จากดินและอนุภาคตะกอนได้อย่างรวดเร็ว และอยู่ในรูปที่เป็นพิษมากกว่าโครเมตซึ่งขึ้นกับพีเอชที่สมดุล รูปอื่น ๆ ของโครเมียม (VI) ไอออน เช่น HCrO_4^- และไดโครเมต ($\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$) กับโครเมียมออกไซด์ (CrO_4^{2-}) เมื่ออยู่ในสภาวะพีเอชมากกว่า 7

โครเมียม (III) ไอออน มีการเคลื่อนที่ช้าและดูดซับบนอนุภาคได้แข็งแรงกว่า โครเมียม (VI) ไอออน ค่าการละลายของโครเมียม (III) ไอออนจะลดลงเมื่ออยู่ในสภาวะพีเอชมากกว่า 4 และเมื่ออยู่ในสภาวะพีเอชมากกว่า 5.5 จะเกิดการตกตะกอนอย่างสมบูรณ์

โครเมียม (VI) ไอออนอยู่ในรูปที่เสถียรมากกว่าเมื่ออยู่ในภาวะสมดุลกับออกซิเจนในอากาศ เพราะโครเมียม (VI) ไอออนเป็น high positive reduction potential อยู่ในรูป oxidizing ที่แรงและสารอินทรีย์ในดินจะรีดิวซ์โครเมียม (VI) ไอออน เป็นโครเมียม (III) ไอออน โดยปฏิกิริยารีดักชันจะเกิดได้อย่างรวดเร็วในดินที่มีสภาวะเป็นกรดมากกว่าดินที่มีสภาวะเป็นด่าง ดังนั้นในดินส่วนใหญ่ความสัมพันธ์ระหว่างการไม่ละลายและการเคลื่อนที่ได้ร้อยละของโครเมียม (III) ไอออนจึงมีอิทธิพลและเกิดขึ้นได้ โดยทั่วไปในรูปไฮดรอกไซด์และออกไซด์ จากการสังเกตตัวอย่างทำให้ทราบว่า การละลายของโครเมียมในดินทั้งโครเมียม(VI)ไอออน และโครเมียม (III) ไอออนเปลี่ยนกลับสู่รูปเดิมที่ไม่ละลายน้ำและพืชไม่สามารถนำไปใช้ได้ ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าการรีดักชันโครเมียม(VI)ไอออน ซึ่งละลายได้ในกรดอินทรีย์ เช่น กรดซิตริก, diethylene triaminepenta acetic acid , fulvic acid และการสกัดดินที่ละลายน้ำยังคงมีโครเมียม(III)ไอออนอยู่เล็กน้อย โดยความสามารถในการแลกเปลี่ยนการเคลื่อนที่ขึ้นกับสภาวะพีเอชที่ต่างกัน ทำให้การเคลื่อนที่สู่ดินต่างกันซึ่งค่าการละลายจะเพิ่มขึ้นเมื่ออยู่ในสภาวะพีเอชต่ำ ๆ

2.5 การบำบัดและฟื้นฟูดินปนเปื้อนโดยพืช (phytoremediation)

การบำบัดสภาพดินที่มีการปนเปื้อนจากสารพิษขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่าง เช่น ปฏิสัมพันธ์ระหว่างดิน จุลินทรีย์ ชนิดของพืช รูปแบบ และชนิดของสารปนเปื้อน เป็นต้น นอกจากนี้ต้องพิจารณาถึงปัจจัยที่มีผลกระทบต่อปฏิสัมพันธ์ดังกล่าวคือ สภาพภูมิประเทศ ภูมิอากาศ สมบัติของดิน สภาพทางอุทกธรณีวิทยา กลไกของพืช และผลกระทบที่เกิดจากการเกษตรกรรม เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การบำบัดและฟื้นฟูดินปนเปื้อนโดยพืชจะอาศัยกระบวนการสำคัญ ๆ ที่เป็นหลักการทำงานของวิธีนี้ (USEPA, 2000) ซึ่งสามารถแบ่งตามกลไกของพืชที่ใช้ในการกำจัดสารพิษต่างๆ ที่ปนเปื้อนอยู่ในสิ่งแวดล้อม ได้ดังต่อไปนี้ (ITRC, 1999; USEPA, 1998)

1. Phytoextraction เป็นการใช้พืชเพื่อบำบัดสารมลพิษที่อยู่ในดิน ตะกอนดิน โดยใช้พืชไปดูดซึมสารมลพิษโดยผ่านราก แล้วไปเก็บสะสมในเนื้อเยื่อพืชส่วนที่เป็นลำต้นและใบ โดยปัจจัยหลายประการที่จำกัดการบำบัดสารโลหะหนัก (Metal Phytoextraction) เช่น อัตราการดูดซึมสารโลหะหนักโดยราก การนำไปใช้ประโยชน์ของโลหะหนักโดยพืช (Metal Bioavailability) สัดส่วนของสารโลหะหนักที่ถูกดูดซึมโดยราก ความทนได้ของเซลล์พืชต่อสารโลหะหนักที่เป็นพิษ เป็นต้น ดังนั้นพืชที่ใช้ในการบำบัดจึงควรมีความสามารถในการสะสมสารโลหะหนักโดยผ่านรากได้มาก และสามารถเคลื่อนย้ายสารโลหะหนักไปสู่ส่วนของต้นพืชได้เป็นอย่างดี นอกจากนี้ควรมีกลไกในการลดความเป็นพิษของสารโลหะหนัก (Detoxify) และมีความทนต่อปริมาณสารโลหะหนักที่มีความเข้มข้นสูง สารโลหะหนักที่สามารถบำบัดได้โดยวิธีนี้ เช่น เงิน แคลเซียม โคบอลต์ โครเมียม ทองแดง พรอท แมงกานีส โมลิบดีนัม นิกเกิล ตะกั่ว และสังกะสี เป็นต้น (จันทน์แจ่มแสงทอง, 2550) ซึ่งสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.1 (a)

2. Rhizofiltration เป็นการเลือกใช้พืชที่มีความสามารถในการกรอง ดูดซับ และรับเอาสารปนเปื้อนต่าง ๆ ที่อยู่ในรูปของสารละลายรอบ ๆ บริเวณรากให้เข้าไปในรากของพืชได้ ซึ่งพืชที่มีสมบัติเหล่านี้มีความเหมาะสมในการนำไปกำจัดสารปนเปื้อนต่างๆ ในแหล่งน้ำ หรือในดินที่มีความชุ่มชื้นของน้ำหรือระบบไฮโดรโปนิกส์ (Hydroponics) ซึ่งสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.1 (d)

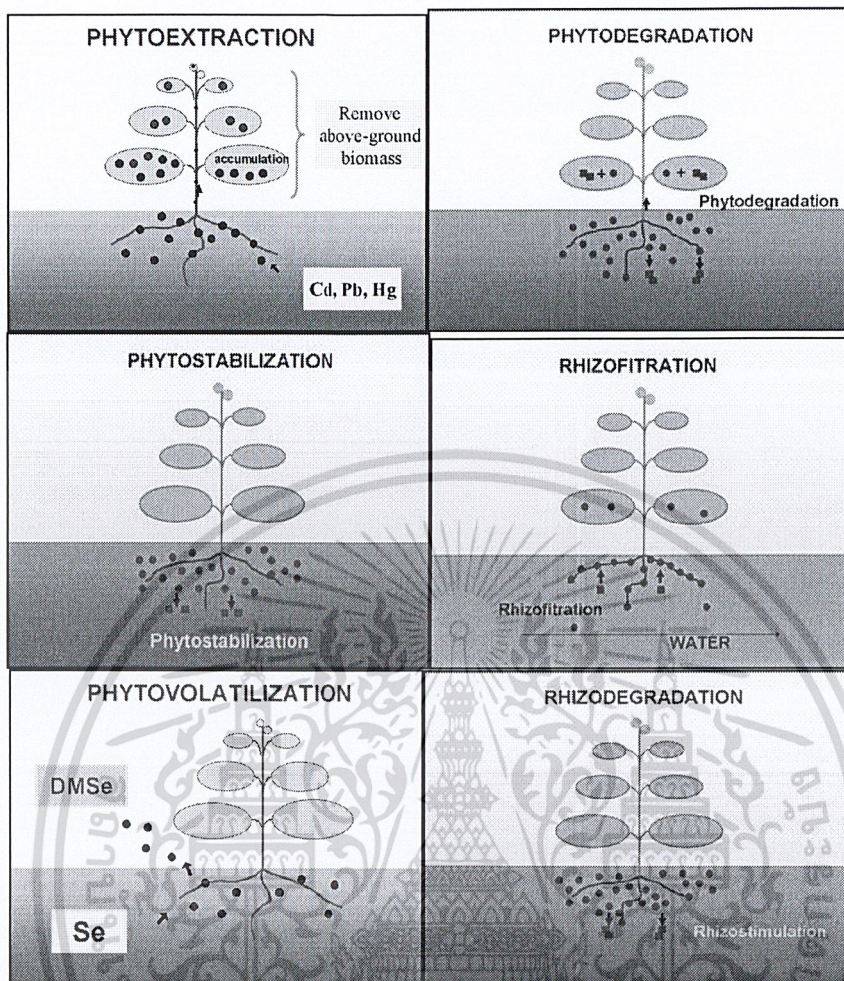
3. Phytostabilization เป็นการเลือกใช้พืชที่มีความสามารถในการควบคุม หรือลดการเคลื่อนย้ายของสารพิษที่ปนเปื้อนในดินและน้ำใต้ดินด้วยการตรึงและยึดไว้ที่ราก ทำให้สารปนเปื้อนต่างๆ ภายในดินมีการเปลี่ยนรูปไปอยู่ในรูปที่มีความเสถียร เกิดการตกตะกอน กระบวนการดังกล่าวนี้สามารถลดการเคลื่อนย้ายสารปนเปื้อนที่เป็นพิษต่างๆ ภายในดิน และขัดขวางการเคลื่อนย้ายสารปนเปื้อนลงไปสู่น้ำใต้ดินหรือในอากาศที่มีการเคลื่อนย้ายลดลง นอกจากนี้ยังสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการปลูกพืชคลุมดินในบริเวณที่มีการปนเปื้อน ทำให้สารปนเปื้อนที่มีความเข้มข้นสูงลดระดับความเป็นพิษให้น้อยลง ด้วยการลดความสามารถในการเคลื่อนย้ายสารปนเปื้อนโดยกษัยจากลม (Wind Erosion) การเคลื่อนย้ายผิวหน้าดิน และการชะล้างสารปนเปื้อนลงไปสู่น้ำใต้ดิน ซึ่งสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.1 (c)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. Phytodegradation สามารถเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า Phytotransformation เป็นการสลายตัวของโลหะหนักที่ปนเปื้อนโดยการดูดซับของพืชด้วย กระบวนการเมตาบอลิซึม (Metabolic) ภายในพืชหรือจากการสร้างสารประกอบต่างๆ ของพืช เช่น เอนไซม์ (Enzymes) สารพิษสามารถสร้างความเสียหายแก่พืชโดยการดูดใช้ธาตุอาหาร หรือการสะสมธาตุอาหารภายในเนื้อเยื่อของพืช ซึ่งสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.1 (b)

5. Rhizodegradation หรือเรียกอีกอย่างว่า Phytostimulation, Rhizosphere, Biodegradation หรือ Enhanced Rhizosphere Biodegradation เป็นการสลายตัวของสารที่ปนเปื้อนในดินด้วยกิจกรรมของจุลินทรีย์ที่มีอยู่ในดิน เช่น ยีสต์ รา และแบคทีเรีย สามารถใช้หรือย่อยสลายสารอินทรีย์เพื่อเป็นอาหารของมัน รวมทั้งจุลินทรีย์ยังสามารถย่อยสลายสารอินทรีย์ที่เป็นอันตรายต่อมนุษย์ และสิ่งแวดล้อมให้มีความเป็นพิษน้อยลง โดยพืชจะปล่อยน้ำตาล แอลกอฮอล์ และกรด ซึ่งจะไปยังชั้นอินทรีย์คาร์บอน (Organic Carbon) ที่ทำหน้าที่เป็นแหล่งอาหารของจุลินทรีย์ดิน และกระตุ้นการทำงานของจุลินทรีย์ Biodegradation ซึ่งเป็นตัวช่วยทำให้ดินมีความร่วนซุยเพิ่มมากขึ้น และมีการเคลื่อนย้ายออกซิเจนกับน้ำเพิ่มมากขึ้นด้วย ซึ่งสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.1 (f)

6. Phytovolatilization เป็นการเลือกใช้พืชที่มีความสามารถในการเป็นสื่อที่ใช้ในการเคลื่อนย้ายสารปนเปื้อนที่มีอยู่ในดิน หรือในน้ำออกไปสู่อากาศ โดยเกิดขึ้นตามการเจริญเติบโตของพืชยืนต้น และพืชชนิดอื่นๆ ที่มีการดูดน้ำที่มีสารอินทรีย์และสารอินทรีย์ปนเปื้อนเข้าไป และในบางครั้งการดูดสารปนเปื้อนดังกล่าวด้วยพืชนั้นจะผ่านไปยังใบ และจะมีการระเหยเป็นไอออกไปสู่บรรยากาศที่มีความเข้มข้นระดับต่ำ ซึ่งพืชที่มีสมบัติดังกล่าวนี้มีความเหมาะสมในการนำไปใช้บำบัดสารปนเปื้อนที่เป็นพิษในดิน และน้ำได้เช่นกัน ซึ่งสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.1 (e)



- | | | | |
|---|---------------------|---|------------------|
| a | Phytoextraction | b | Phytodegradation |
| c | Phytostabilization | d | Rhizofiltration |
| e | Phytovolatilization | f | Rhizodegradation |

รูปที่ 2.1 ประเภทของการบำบัดและฟื้นฟูดินปนเปื้อนโดยพืช (พันธวัช สัมพันธ์พานิช, 2549)

2.6 สารคีเลต

สารคีเลต (Chelating Agent) เป็นสารที่มีผลต่อการละลายของโลหะหนักในดิน และการดูดดึงของพืช เนื่องจากเป็นสารเคมีที่สามารถรวมและป้องกันไม่ให้เกิดการตกตะกอนของแคทไอออนบางชนิดรวมถึงจุลธาตุ เช่น แมงกานีส สังกะสี เหล็ก ทองแดง และตะกั่ว เป็นต้น โดยสารคีเลตจะเข้าล้อมรอบแคทไอออนที่เป็นโลหะ (Metallic Cation) และไม่ยอมให้สารอื่นเข้ามาสร้างพันธะกับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการศึกษาเพื่อการศึกษาเท่านั้น มิฉะนั้นผู้ใดที่นำเอกสารนี้ไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แคทไอออนเหล่านี้ โดยแคทไอออนที่มีสารคีเลตล้อมรอบจะคงอยู่ในสภาพสารละลายได้นาน และมีความคงทนต่อสภาพแวดล้อมได้ดีกว่าแคทไอออนธรรมดา ทำให้พืชสามารถดูดดึงไปใช้ได้ง่ายขึ้น (คณาจารย์ภาควิชาปฐพีวิทยา, 2548)

2.6.1 ประเภทของสารคีเลต (Evangelou et al., 2007)

2.6.1.1 สารอินทรีย์ธรรมชาติ เช่น เอธิลีนไดเอมีนดิซซัสซิเนต (Ethylene Diamine Disuccinate; (EDDS)) และไนทริโลไตรแอซติก (Nitrilotriacetic Acid; (NTA)) เป็นต้น

2.6.1.2 สารคีเลตสังเคราะห์ เช่น เอธิลีนไดเอมีนเทตระเอซติกเอซิด (Ethylene Diamine Tetraacetic Acid; (EDTA)), ไฮดรอกซีเอธิลเอธิลไดเอมีนเทตระเอซติกเอซิด (Hydroxyethylene Tetraacetic Acid; (HEDTA)) เป็นต้น

2.6.2 การใช้สารคีเลตในการกำจัดโลหะหนักที่ปนเปื้อนในดิน

วิธีการนี้เป็นวิธีการที่มีประสิทธิภาพค่อนข้างสูง การใช้สารคีเลตกับการแก้ปัญหาดินปนเปื้อน ควรคำนึงถึงปัจจัย 4 ปัจจัย ดังนี้

2.6.2.1 สารเคมี ควรมีความสามารถเกิดสารเชิงซ้อนที่เสถียรในช่วงพีเอชที่กว้างที่อัตราส่วนลิแกนด์ต่อโลหะเท่ากับ 1:1 M

2.6.2.2 การย่อยสลายทางชีวภาพของสารคีเลต และสารประกอบเชิงซ้อนกับโลหะหนักควรมีค่าต่ำ

2.6.2.3 สารคีเลตที่ใช้ควรมีความเป็นพิษและอันตรายต่อสิ่งแวดล้อมต่ำ

2.6.2.4 คุ่มค่าต่อการนำมาใช้

2.7 การสกัดแบบเป็นลำดับขั้น (Sequential extraction)

การสกัดแบบลำดับขั้นเป็นเทคนิคที่นำมาใช้ในการศึกษารูปฟอร์มและปริมาณของโลหะในดิน ซึ่งจะเกี่ยวข้องกับการเลือกสารเคมีที่เหมาะสมในการสกัดแต่ละลำดับขั้นของการสกัดและปริมาณโลหะที่ออกมาในแต่ละขั้นสามารถนำไปทำนายพฤติกรรมของโลหะที่เป็นพิษในสภาพแวดล้อมต่างๆ นอกจากนี้ยังทำให้เข้าใจเคมีของดินที่สัมพันธ์ระหว่างโลหะและชนิดของดินมากยิ่งขึ้นด้วย ประสิทธิภาพการสกัดลำดับขั้นขึ้นอยู่กับปัจจัยที่สำคัญ คือ การเลือกหรือการเลือกสารเป็นอีกสารที่ส่งมอบให้กับการสกัดในเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ดูแลเห็นว่าเป็นประโยชน์ในการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เรียงลำดับการใช้สารสกัดที่เหมาะสมในแต่ละส่วนหรือขั้นตอนของการสกัด ระดับความแรงของสารสกัดที่ต้องเพิ่มขึ้นในแต่ละลำดับขั้นเพื่อจะได้สามารถสกัดโลหะที่อยู่ในรูปต่างๆ ได้อย่างเหมาะสมและการลดการปนเปื้อนระหว่างขั้น ระยะเวลาของการสกัดแต่ละขั้นเพื่อให้เพียงพอสำหรับการเข้าสู่สมดุลของปฏิกิริยา นอกจากนี้ยังรวมไปถึงความเข้มข้นของการสกัด อัตราส่วนของสารสกัดและตัวอย่าง พีเอชและอุณหภูมิ (Shiowatana et al., 2001)

วิธีการและสารเคมีที่ใช้ในการสกัดลำดับขั้นมีอยู่หลายวิธีการ (Tessier et al., 1979 ; Shuman L.M., 1985) แต่ก็ยังไม่มียุทธวิธีใดที่เป็นมาตรฐานและนำมาใช้อย่างจริงจัง The Commission of the European Communities Bureau of Reference (BCR) (1999) ได้เสนอวิธีการสกัดแบบ 4 ขั้นตอนที่มีขั้นตอนการปฏิบัติที่ง่าย ทันสมัย เป็นที่นิยมและสามารถจำแนกรูปฟอร์มของโลหะหนักได้ดีกว่าวิธีการสกัดวิธีการอื่น ๆ ในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้วิธีการของ BCR เป็นวิธีการในการศึกษาการกระจายตัวของรูปฟอร์มของโครเมียมในดินตัวอย่าง ซึ่งวิธีการนี้มีลำดับการสกัดดังนี้คือ

ขั้นที่ 1: ส่วนที่ละลายได้ในกรดและสามารถแลกเปลี่ยนไอออนได้ (0.1M CH_3COOH)

โลหะส่วนที่ถูกดูดซับที่ผิวหน้าของดินเป็นส่วนที่เชื่อมอยู่กับคาร์บอนเนต งานวิจัยนี้ได้นำกรดอะซิติก (CH_3COOH) มาใช้ โดยไฮโดรเจนไอออนจะแทนที่โลหะที่ถูกดูดซับอยู่ และโลหะก็จะถูกละลายอยู่ในรูปสารเชิงซ้อนอะซิเตท ทั้งนี้สารละลายจะต้องปรับพีเอชของสารละลายให้เท่ากับ 5 เพื่อป้องกันการละลายของโลหะที่เชื่อมกับอินทรีย์วัตถุ โลหะออกไซด์ ซัลไฟด์ แร่ดินเหนียว และยังป้องกันการตกตะกอนของโลหะไฮดรอกไซด์ (Mulligan et al., 2001)

ขั้นที่ 2: ส่วนที่ถูกรีดิวซ์ (0.5 M $\text{NH}_2\text{OH}\cdot\text{HCl}$, pH 1.5)

โลหะที่อยู่ในรูปนี้เป็นรูปรีดิวซ์ที่สามารถละลายได้ง่าย การสกัดโลหะในดินที่ยึดอยู่กับแมงกานีสออกไซด์ในดิน นิยมใช้ $\text{NH}_2\text{OH}\cdot\text{HCl}$ ซึ่งมีคุณสมบัติเป็นรีดิวซิงเอเจนต์ จากงานวิจัยของ Tipping et al., 1985 ได้รายงานว่า $\text{NH}_2\text{OH}\cdot\text{HCl}$ สามารถสกัดออกไซด์ของแมงกานีสออกไซด์ได้สูงถึง 97 % นอกจากนี้ยังพบว่า $\text{NH}_2\text{OH}\cdot\text{HCl}$ มีความเฉพาะเจาะจงกับแมงกานีสออกไซด์โดยไม่ขึ้นกับความเข้มข้น โดยจำเป็นต้องปรับพีเอชให้น้อยกว่า 3 เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการรีดิวซ์

ขั้นที่ 3: ส่วนที่ถูกลอกซีไดซ์ได้ (8.8 M H₂O₂, 1.0 M CH₃COONH₄, pH 2)

โลหะในรูปนี้ เป็นรูปรีดิวซ์ที่สามารถละลายได้ปานกลาง ซึ่งยึดเกาะอยู่กับเหล็กออกไซด์ นิยมใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H₂O₂) และแอมโมเนียมออกซาลेट (CH₃COONH₄) ในการสกัด ซึ่งมีความเฉพาะมากกว่า NH₂OH·HCl โดยจำเป็นต้องปรับพีเอชให้เท่ากับ 2 เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการรีดิวซ์ของรีดิวซิงเอเจนต์

ขั้นที่ 4: ส่วนที่เหลือ (HNO₃/HCl)

หลังจากที่สกัดโลหะบางส่วนออกไปแล้ว ของแข็งที่เหลือส่วนใหญ่เป็นแร่ปฐมภูมิ และทุติยภูมิ ซึ่งมีโลหะในปริมาณที่น้อยที่อยู่ในรูปของผลึก และค่อนข้างจะเฉื่อยต่อการเกิดปฏิกิริยา และไม่พบในสิ่งมีชีวิตในสภาพธรรมชาติ ในส่วนนี้จึงใช้สารสกัดที่มีความรุนแรงมากกว่าสารสกัดส่วนอื่นๆ โดยปกติจะนำการผสมกันของกรดที่ร้อนมาใช้เพื่อย่อยส่วนที่เหลือเป็นสารละลายใส ซึ่งในงานวิจัยนี้ ส่วนที่เหลือจากส่วนที่ 3 สามารถถูกละลายโดยการย่อยด้วย HNO₃ และ HCl ตามวิธีมาตรฐานการย่อยดินของ SW-846 Method 3050b (US.EPA, 1996)

2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Santos et al. (2006) ศึกษาการใช้สารคีเลต 2 ชนิด ได้แก่ สาร EDTA และ EDDS ที่ระดับความเข้มข้น 10 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน เพื่อชักนำให้พืชดูดดึงแคดเมียม สังกะสี และตะกั่วที่ปนเปื้อนดินโดยใช้หญ้า (*Brachiaria decumbens*) ผลการศึกษาพบว่าสาร EDTA มีผลกระทบต่อโลหะในสารละลายมากกว่าในดิน ส่วนสาร EDDS มีความเป็นอันตรายต่อสิ่งแวดล้อมน้อย และมีประสิทธิภาพในการชักนำให้ *B. decumbens* ดูดดึงโลหะหนักในดินได้ดีกว่าสาร EDTA นอกจากนี้สาร EDDS สามารถชักนำให้ *B. decumbens* ดูดดึงแคดเมียม สังกะสี และตะกั่วสะสมไว้ในส่วนลำต้นเหนือดิน ทำให้ความเข้มข้นเพิ่มขึ้น 2.54, 2.74 และ 4.30 เท่า ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับชุดควบคุม ส่วนสาร EDTA สามารถชักนำให้ *B. decumbens* ดูดดึงแคดเมียม สังกะสี และตะกั่วได้เท่ากับ 1.77, 1.11 และ 1.87 เท่าตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับชุดควบคุม แสดงให้เห็นว่าสาร EDDS มีประสิทธิภาพมากกว่าสาร EDTA ในการชักนำให้เกิดการเคลื่อนย้ายประจุบวกของโลหะหนักจากรากพืชสู่ส่วนลำต้นเหนือดิน และจากการศึกษาในครั้งนี้นี้ยังพบว่า *B. decumbens* สามารถเจริญเติบโตได้ดีในดินที่ปนเปื้อน โดยไม่แสดงอาการให้เห็นถึงลักษณะความเป็นพิษ มีความทนทานต่อโลหะหนัก เจริญเติบโตเร็ว และมีมวลชีวภาพสูง

Nymphodora et al. (2009) ทำการศึกษาการปรับเสถียรดินที่ปนเปื้อนโครเมียมด้วย จุลินทรีย์ *Desulfuromonas palmitatis* โดยตัวอย่างดินมีการเติมโครเมียม (VI) ความเข้มข้น 200 และ 500 มิลลิกรัมต่อดิน 1 กิโลกรัม ตัวอย่างดินทั้งก่อนและหลังการบำบัดถูกวิเคราะห์ด้วยวิธีมาตรฐานหลายวิธี เช่น EN 12475 standard leaching test, US EPA 3060A และการสกัดแบบลำดับขั้นด้วยวิธี BCR โครเมียมที่ละลายน้ำวิเคราะห์ด้วยเทคนิค EN leaching test พบว่าดินที่ปนเปื้อนโครเมียม 200 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม มีปริมาณโครเมียมลดลงจาก 13 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมเหลือน้อยกว่า 0.5 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม และดินที่ปนเปื้อนโครเมียม 500 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม มีปริมาณโครเมียมลดลงจาก 120 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมเหลือเพียง 5.6 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ถึงแม้ว่าการสกัดแบบลำดับขั้นด้วยวิธี BCR ไม่มีความแม่นยำในการวิเคราะห์โครเมียมเริ่มต้น แต่มีการพิสูจน์ว่าสามารถใช้เป็นเครื่องมือในการศึกษาการเปลี่ยนแปลงรูปของโลหะได้ เมื่อดินผ่านการปรับเสถียรพบว่า เปอร์เซ็นต์โครเมียมส่วนที่ถูกรีดิวซ์ได้และส่วนที่เหลืออยู่เพิ่มขึ้นเป็น 96% จาก 54 และ 73% ตามลำดับในตัวอย่างดินทั้งสองชุด

Slavica et al. (2010) ทำการศึกษาอัตราส่วนของโครเมียมในพืชและดิน โดยดินมีการเติมสารละลายมาตรฐานโครเมียม (III) และพืชที่ใช้ในการศึกษาคือ *Mentha piperita* ตัวอย่างดินมีค่าพีเอช คือ 5, 6 และ 7 ตามลำดับ ในการวิเคราะห์ใช้เทคนิคการสกัดแบบลำดับขั้น 3 ขั้นตอน ดังนี้ ขั้นตอนที่ 1 ใช้ Ammonium acetate 1 โมลต่อลิตร ขั้นตอนที่ 2 ใช้ Hydroxylamine chlorohydrate 0.1 โมลต่อลิตร และขั้นตอนที่ 3 ใช้ Oxalic acid และ Ammonium oxalate อัตราส่วน 0.2:0.2 โมลต่อลิตร แล้ววิเคราะห์ต่อด้วยเครื่อง GFAAS จากการทดลองพบว่า ขั้นตอนที่ 1 ความเข้มข้นของโครเมียมเท่ากับ 4.64 – 10.93, 0.79 – 5.78 และ 0.26 – 5.26 มิลลิกรัมต่อลิตร ขั้นตอนที่ 2 เท่ากับ 1.14 – 15.99, 0.76 – 20.31 และ 0.67 – 20.64 มิลลิกรัมต่อลิตร ขั้นตอนที่ 3 เท่ากับ 0.67 – 20.64, 19.17 – 100.76 และ 19.17 – 116.05 มิลลิกรัมต่อลิตร สำหรับตัวอย่างดินที่มีค่าพีเอชเท่ากับ 5, 6 และ 7 ตามลำดับ การหาปริมาณโครเมียมทั้งหมดในดินและพืชวิเคราะห์ด้วยเครื่องไมโครเวฟ นอกจากนี้เหล็กและแมงกานีสในรูปออกไซด์และไฮดรอกไซด์เป็นสารประกอบที่มีความสำคัญต่อการเคลื่อนที่ของโครเมียมในดิน ดังนั้นจึงมีการศึกษาปริมาณของเหล็กและแมงกานีสด้วย

J.Zerbe et al (1999) ทำการศึกษาปริมาณของแคดเมียม โครเมียม ทองแดง เหล็ก แมงกานีส นิกเกิล ตะกั่ว และสังกะสี จากตะกอนของทะเลสาบ Goreckie ซึ่งอยู่ใน Wielkopolski National Park ประเทศโปแลนด์ โดยศึกษาความเข้มข้นทั้งหมด และรูปฟอร์มที่กระจายตัวอยู่ในดินของแต่ละธาตุ ด้วยเทคนิคการสกัดแบบลำดับขั้น 5 ขั้นตอน คือ ขั้นตอนที่ 1 ส่วนที่สามารถแลกเปลี่ยนไอออนได้ ขั้นตอนที่ 2 ส่วนที่ถูกดูดซับที่ผิวหน้าของดิน ขั้นตอนที่ 3 ส่วนที่ยึดเกาะกับเหล็กและแมงกานีสออกไซด์ ขั้นตอนที่ 4 ส่วนที่ถูกดูดซับกับอินทรียสารวัตถุในดิน และขั้นตอนที่ 5 ส่วนที่เหลือ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 อุปกรณ์และสารเคมี

3.1.1 อุปกรณ์

- 3.1.1.1 เครื่องเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์ รุ่น SRS 3400
- 3.1.1.2 เครื่องไมโครเวฟ รุ่น Milestone ETHOS PLUS
with MPR-300/12S medium pressure rotor
- 3.1.1.3 เครื่องอะตอมมิคแอปซอพซันสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ รุ่น HGA 900
บริษัท PerkinElmer
- 3.1.1.4 เครื่องปั่นเหวี่ยง รุ่น MSB020.CX1.5 บริษัท SANYO
- 3.1.1.5 เครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (ยูวี/วิสิเบิล) รุ่น GENESYS 10S UV-VIS
Spectrophotometer บริษัท Thermo Scientific
- 3.1.1.6 เครื่องเขย่าแนวนอน (Horizontal shaker) รุ่น SHO400.XX1.C
บริษัท GALLENKAMP
- 3.1.1.7 เครื่องควบคุมอุณหภูมิแบบเขย่า รุ่น WNB22,SV1422 บริษัท MEMMERT
- 3.1.1.8 เครื่องกรองแบบลดความดัน รุ่น A-3S บริษัท EYELA (Tokyo)
- 3.1.1.9 เครื่องกลั่นแอมโมเนีย-ไนโตรเจน รุ่น B-323
- 3.1.1.10 เครื่องชั่งน้ำหนักแบบละเอียด รุ่น ED224S บริษัท Sartorius mechatronics
- 3.1.1.11 เครื่องวัดพีเอช
- 3.1.1.12 ไฮโดรมิเตอร์มาตรฐาน ASTM NO.1.152 H
- 3.1.1.13 แท่นให้ความร้อน บริษัท Fisher Scientific
- 3.1.1.14 เครื่องกวนแม่เหล็ก บริษัท Fisher Scientific
- 3.1.1.15 ตะแกรงร่อน ขนาด 10 เมช
- 3.1.1.16 เดซิเคเตอร์
- 3.1.1.17 เทอร์โมมิเตอร์
- 3.1.1.18 ขวดกลั่นเจห์ดกาล
- 3.1.1.19 แท่งแก้วคน แบบ Plunger
- 3.1.1.20 ตู้อบเครื่องแก้วและสารเคมี รุ่น ISOTEMP บริษัท Fisher Scientific
- 3.1.1.21 กระดาษกรอง Whatman เบอร์ 41
- 3.1.1.22 แผ่นกรองเมมเบรน Whatman ขนาดรูพรุน 0.45 ไมโครเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.1.23 ขวดพลาสติกใส่น้ำ และขวดเขย่าพลาสติก

3.1.1.24 เซลล์พลาสติกชนิดที่มีด้านใส 2 ด้าน

3.1.2 สารเคมี

3.1.2.1 แอมโมเนียมอะซิเตท ($\text{CH}_3\text{COONH}_4$) เกรดวิเคราะห์ บริษัท Carlo Erba

3.1.2.2 กรดอะซิติก (CH_3COOH) 100% w/w A.R. Grade บริษัท Carlo Erba

3.1.2.3 ไฮดรอกซิลามีนไฮโดรคลอไรด์ ($\text{NH}_2\text{OH}\cdot\text{HCl}$) เกรดวิเคราะห์ บริษัท Carlo Erba

3.1.2.4 ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) 30 % เกรดวิเคราะห์ บริษัท Carlo Erba

3.1.2.5 กรดไนตริก (HNO_3) 50% w/w Commercial grade บริษัท Carlo Erba

3.1.2.6 สารละลายบัฟเฟอร์มาตรฐาน pH 4 และ 7

3.1.2.7 โซเดียมอะซิเตท (NaOAc) เกรดวิเคราะห์ บริษัท Carlo Erba

3.1.2.8 แอมโมเนียมคลอไรด์ (NH_4Cl) เกรดวิเคราะห์ บริษัท Fisher Scientific

3.1.2.9 แอมโมเนียมออกซาลेट ($(\text{NH}_4)_2\text{C}_2\text{O}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$) เกรดวิเคราะห์ บริษัท Carlo Erba

3.1.2.10 แอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ (NH_4OH) เกรดวิเคราะห์ บริษัท Carlo Erba

3.1.2.11 สารละลายไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์

3.1.2.12 โซเดียมคาร์บอเนต (Na_2CO_3) เกรดห้องปฏิบัติการ บริษัท Fisher Scientific

3.1.2.13 โซเดียมคลอไรด์ (NaCl) เกรดวิเคราะห์ บริษัท Carlo Erba

3.1.2.14 โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) เกรดวิเคราะห์ บริษัท Carlo Erba

3.1.2.15 โบรโมกลีซอลกรีน เกรดวิเคราะห์ บริษัท Fisher Chemicals

3.1.2.16 เมซิลเลต ($\text{C}_{15}\text{H}_{15}\text{N}_3\text{O}_2$) เกรดวิเคราะห์ บริษัท Fluka Chemical

3.1.2.17 อินดิเคเตอร์ O-phenanthroline

3.1.2.18 แบเรียมไดฟีนิลลามีนซัลโฟเนต เกรดวิเคราะห์ บริษัท Carlo Erba

3.1.2.19 กรดบอริก (H_3BO_3) เกรดวิเคราะห์ บริษัท Fisher Scientific

3.1.2.20 กรดไฮโดรคลอริก (HCl) เกรดวิเคราะห์ บริษัท Carlo Erba

3.1.2.21 โพแทสเซียมไดโครเมต ($\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$) เกรดวิเคราะห์ บริษัท Carlo Erba

3.1.2.22 โซเดียมเตตระโบเรต ($\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$) เกรดวิเคราะห์ บริษัท Carlo Erba

3.1.2.23 กรดซัลฟิวริกเข้มข้น (Conc. H_2SO_4) เกรดวิเคราะห์ บริษัท Carlo Erba

3.1.2.24 กรดฟอสฟอริกเข้มข้น (Conc. H_3PO_4) เกรดวิเคราะห์ บริษัท Carlo Erba

3.1.2.25 เฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟต (FAS) เกรดวิเคราะห์ บริษัท Carlo Erba

3.1.2.26 โซเดียมเฮกซะเมตาฟอสเฟต ($(\text{NaPO}_3)_6$) เกรดวิเคราะห์ บริษัท Carlo Erba

3.1.2.27 แมกนีเซียมคลอไรด์ ($\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) เกรดวิเคราะห์ บริษัท Fisher Scientific

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 3.1.2.28 ไคโพแทสเซียมไฮโดรเจนฟอสเฟต (K_2HPO_4) เกรดวิเคราะห์
บริษัท Fisher Scientific
- 3.1.2.29 โพแทสเซียมไคไฮโดรเจนฟอสเฟต (KH_2PO_4) เกรดวิเคราะห์
บริษัท Fisher Scientific
- 3.1.2.30 ไคฟีนิลคาร์บาไซด์ ($C_6H_5NHNHCONHNHC_6H_5$) เกรดวิเคราะห์
บริษัท Carlo Erba
- 3.1.2.31 อะซีโตน เกรดวิเคราะห์ บริษัท Carlo Erba
- 3.1.2.32 สารละลายมาตรฐานเหล็ก 1000 มิลลิกรัมต่อลิตร เกรดวิเคราะห์
- 3.1.2.33 ไตรเอทานอลามีน (CH_2OHCH_2)₃N เกรดวิเคราะห์ บริษัท Carlo Erba
- 3.1.2.34 แบเรียมคลอไรด์ ($BaCl_2 \cdot 2H_2O$) เกรดวิเคราะห์ บริษัท Carlo Erba
- 3.1.2.35 ซิลเวอร์ไนเตรต ($AgNO_3$) เกรดวิเคราะห์ บริษัท Carlo Erba
- 3.1.2.36 ไฮโดรเจนฟลูออไรด์ (HF) 48% เกรดวิเคราะห์ บริษัท VWR International
- 3.1.2.37 ไคเอทานอลิน ไตรเอมีนเพนตะอะซิติกแอซิก (DTPA) เกรดวิเคราะห์
- 3.1.2.38 แคลเซียมคลอไรด์ ($CaCl_2 \cdot 2H_2O$) เกรดวิเคราะห์ บริษัท Carlo Erba

3.2 ดินที่ใช้ในการทดลอง

3.2.1 แหล่งที่มาของดิน

ดินที่ใช้ในการทดลองได้จากงานวิจัยของ เอกษา ภาณุวัฒน์ และกนกรัตน์, 2552 ที่เก็บดินมาจากพื้นที่ตำบลมาบข่า อำเภอนิคมน้ำจืด จังหวัดระยอง เต็มสารละลาย $K_2Cr_2O_7$ ความเข้มข้น 400 พีพีเอ็ม และสารเคเลต อีดีทีเอ และอีดีทีเอส ที่ระดับความเข้มข้น 2 มิลลิโมลต่อลิตรดิน ในเดือนพฤษภาคม พ.ศ. 2552 หรือมีปริมาณโครเมียมทั้งหมดปนเปื้อนอยู่ในช่วง 350-390 มิลลิกรัมต่อลิตร และนำไปปลูกต้นขลุ่ยและหญ้าแพรก เป็นเวลา 130 วัน หลังจากเก็บพืชออกแล้วจึงนำดินมาใช้ในการวิจัย โดยดินชุดที่ 1 คือดินที่ไม่มีโครเมียมปนเปื้อน (ชุดควบคุม) ดินชุดที่ 2 คือดินที่ปนเปื้อนโครเมียมและผ่านการปลูกต้นขลุ่ยมาแล้ว ดินชุดที่ 3 คือดินที่ปนเปื้อนโครเมียมที่ใส่สารเคเลตอีดีทีเอและผ่านการปลูกต้นขลุ่ยมาแล้วเช่นเดียวกัน สำหรับดินชุดที่ 4 เหมือนกับชุดที่ 3 แต่สารเคเลตที่ใช้ คือ อีดีทีเอสและดินชุดที่ 6 – 8 เป็นดินที่มีการปนเปื้อนโครเมียมเช่นเดียวกันแต่พืชที่ใช้ปลูกเป็นหญ้าแพรก โดยดินชุดที่ 5 คือดินที่ไม่มีโครเมียมปนเปื้อน(ชุดควบคุม) ดินชุดที่ 6 คือดินที่ปนเปื้อนโครเมียมและผ่านการปลูกหญ้าแพรกมาแล้ว ดินชุดที่ 7 คือดินที่ปนเปื้อนโครเมียมที่ใส่สารเคเลตอีดีทีเอและผ่านการปลูกหญ้าแพรกมาแล้วเช่นเดียวกัน สำหรับดินชุดที่ 8 เหมือนกับชุดที่ 7 แต่เคเลตที่ใช้ คือ อีดีทีเอส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 วิธีการทดลอง

3.3.1 ขั้นตอนการเตรียมดิน

ดินที่นำมาวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพและทางเคมี จะนำดินที่ผ่านการปลุกหญ้าแพรก และต้นขลุ้มมาผสมกัน เพื่อลดจำนวนตัวอย่างที่จะวิเคราะห์ ขณะที่ดินที่ใช้ในการศึกษารูปฟอร์มของโครเมียมด้วยการสกัดแบบเป็นลำดับขั้น 4 ขั้นตอนจะไม่นำมาผสมกัน จากนั้นนำดินแต่ละชุดมาเกลี่ยให้กระจายทั่วทั้งภาคที่รองพลาสติกไว้ นำไปตากจนแห้งแล้วนำมาร่อนผ่านตะแกรงขนาด 10 เมช เพื่อให้ได้ดินขนาด 2 มิลลิเมตร แล้วนำไปเก็บไว้ในภาชนะพลาสติกที่อุณหภูมิห้อง เพื่อนำไปวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพและทางเคมี ดังตารางที่ 3.1

3.3.2 ลักษณะทางกายภาพและทางเคมีของดิน

ลักษณะทางกายภาพและทางเคมีของดินที่ทำการตรวจวิเคราะห์ คือ ค่าพีเอช ความเป็นกรดของดิน ความจุในการแลกเปลี่ยนประจุบวก (CEC) ปริมาณสารอินทรีย์ ปริมาณสารอนินทรีย์ ปริมาณความชื้น เปอร์เซ็นต์เนื้อดินสัมผัส ปริมาณ โครเมียมทั้งหมด ปริมาณ โครเมียมไตรวาเลนซ์ และปริมาณ โครเมียมเฮกซะวาเลนซ์ โดยใช้วิธีการวิเคราะห์ดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 วิธีการวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพและทางเคมีของดิน (กองวิเคราะห์ดิน, 2535)

พารามิเตอร์	วิธี/เครื่องมือที่ใช้วิเคราะห์
พีเอช	เครื่องวัดพีเอช
ความเป็นกรดของดิน	วิธีอิมตัวด้วยเบเรียมคลอไรด์
ความจุในการแลกเปลี่ยนประจุบวก (CEC)	วิธีทำให้อิมตัวด้วยแอมโมเนียม
ปริมาณสารอินทรีย์	วิธีการออกซิเดชันแบบเปียก
ปริมาณสารอนินทรีย์	วัดปริมาณด้วยเครื่องเอกซ์เรย์ฟลูออเรสเซนซ์
ปริมาณความชื้น	วิธีการวิเมตริก
เปอร์เซ็นต์เนื้อดินสัมผัส (ปริมาณทราย ซิลต์ และเคลย์)	เครื่องมือไฮโดรมิเตอร์
ปริมาณโครเมียมทั้งหมด	* ย่อยด้วยกรดเข้มข้นในเครื่องไมโครเวฟ วัดปริมาณด้วยเครื่องอะตอมมิกแอบซอร์บชันสเปกโตรโฟโตมิเตอร์
ปริมาณโครเมียมเฮกซะวาเลนซ์	** วัดปริมาณด้วยเครื่องยูวี-วิสซิเบิลสเปกโตรโฟโตมิเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หมายเหตุ : วิธีการทดลองในภาคผนวก ก.

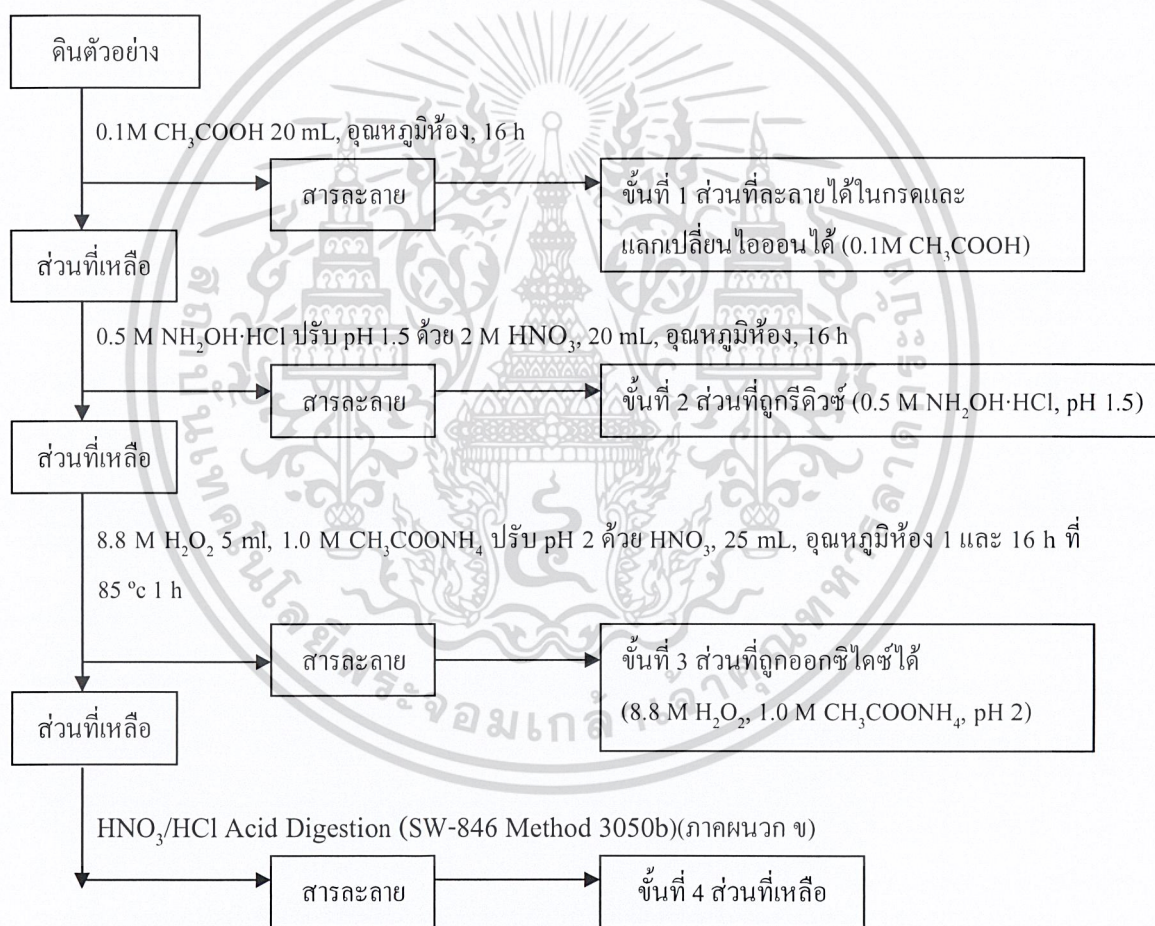
* US EPA method 3052A (US EPA)

** US EPA method 3060 (US EPA, 1996b)

US EPA method 7196A (US EPA, 1992)

3.4 การสกัดแบบเป็นลำดับขั้น (Sequential extraction) (Tessier et al., 1979)

การสกัดแบบเป็นลำดับขั้นเพื่อศึกษารูปฟอร์มของโครเมียมในดิน ซึ่งลำดับการสกัดแสดงดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการสกัดโลหะในรูปต่าง ๆ ออกจากดินแบบเป็นลำดับขั้น
(วิธีการทดลองในภาคผนวก ข)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.5 การวิเคราะห์ผลทางสถิติ

ข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์แสดงผลในรูปค่าเฉลี่ย (Mean) และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD) ความแตกต่างของตัวอย่างดินทั้ง 4 ชุดจะวิเคราะห์ด้วย ANOVA ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ด้วยโปรแกรม SPSS



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการวิจัยและอภิปรายผล

งานวิจัยนี้ทำการศึกษารูปฟอร์มของโครเมียมในดินปนเปื้อนที่ผ่านการบำบัดด้วยต้นขลุ้และหญ้าแพรก และดินปนเปื้อนที่ผสมสารคีเลต อีดีทีเอและอีดีทีเอส ปัจจัยที่ศึกษาได้แก่ ลักษณะทางกายภาพและทางเคมีของดิน ปริมาณโครเมียมทั้งหมดในดิน และรูปฟอร์มของโครเมียม ด้วยการสกัดแบบเป็นลำดับขั้น 4 ขั้นตอน ผลการศึกษาเป็นดังนี้

4.1 ลักษณะทางกายภาพและทางเคมีของดิน

ดินตัวอย่างที่ใช้ในการศึกษา มีลักษณะทางกายภาพและทางเคมีสรุปได้ดังแสดงในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ลักษณะทางกายภาพและทางเคมีของดิน¹

ลักษณะของดิน		ดินตัวอย่าง		
		Cr + พีช	Cr + EDTA + พีช	Cr + EDDS + พีช
1. ความชื้น (%)		0.39 ± 0.11	0.57 ± 0.03	0.50 ± 0.06
2. เปอร์เซ็นต์เนื้อดินสัมผัส	% ทราย	42.79	33.58	40.21
	% ซิลต์	15.06	17.60	15.07
	% ดินเหนียว	42.16	48.83	44.72
	เนื้อดิน	ดินเหนียว (clay)	ดินเหนียว (clay)	ดินเหนียวปนทราย (sandy clay)
3. ค่าพีเอช (ดิน:น้ำ เท่ากับ 1:1)		5.98 ± 0.21	6.15 ± 0.08	5.82 ± 0.07
4. ความจุในการแลกเปลี่ยนประจุบวก (meq/ดินแห้ง 100 กรัม)		5.70 ± 0.01	6.74 ± 0.01	5.92 ± 0.01
5. ปริมาณอินทรีย์วัตถุในดิน (%)		2.61 ± 0.01	4.25 ± 0.06	5.10 ± 0.06
6. ความเป็นกรดของดิน (meq/ดินแห้ง 1 กรัม)		0.01 ± 0.01	0.04 ± 0.01	0.13 ± 0.01
7. ปริมาณอนินทรีย์วัตถุ	% Al ₂ O ₃	29.4	30.6	22.6
	% SiO ₂	68.6	66.6	55.7
	% Fe ₂ O ₃	1.80	2.02	2.16
	% MnO ₂	nd	nd	1.01

1 รายละเอียดดินในภาคผนวก คำนวณไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

nd = not detected ทุกๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อพิจารณาลักษณะทางกายภาพและทางเคมีของดินตัวอย่างกับคุณภาพของดินตามเกณฑ์ของกองสำรวจดิน พบว่า ตัวอย่างดินทั้ง 3 ชุดดินมีลักษณะทางกายภาพและทางเคมีของดินแตกต่างกัน ดังนี้คือ

1. ลักษณะของเนื้อดิน พบว่า ดินตัวอย่างทั้ง 3 ชุดการทดลองจัดอยู่ในกลุ่มดินเนื้อละเอียด (fine-textured soil) โดยดินที่ปนเปื้อนโครเมียมและผ่านการบำบัดด้วยพืชและดินที่ปนเปื้อนโครเมียมและเติมสาร EDTA เป็นดินเหนียว ขณะที่ดินที่ปนเปื้อนโครเมียมและเติมสาร EDDS จะมีเนื้อดินเป็นดินเหนียวปนทราย

2. ค่าพีเอชของดินอยู่ในช่วงกรดเล็กน้อยถึงกรดปานกลาง และมีค่าพีเอชโดยเฉลี่ยอยู่ในช่วง 5.82 – 6.15 โดยดินที่ปนเปื้อนโครเมียมและผ่านการบำบัดด้วยพืช (5.98 ± 0.21) และดินที่เติมสาร EDDS (5.82 ± 0.07) มีค่าพีเอชอยู่ในช่วงกรดปานกลาง (pH 5.6 – 6.0) ส่วนดินที่เติมสาร EDTA (6.15 ± 0.08) มีค่าพีเอชอยู่ในช่วงกรดเล็กน้อย (pH 6.1 – 6.5) (คณาจารย์ภาควิชาปฐพีวิทยา, 2548)

3. ความจุในการแลกเปลี่ยนประจุบวกของดินตัวอย่างมีค่าใกล้เคียงกัน และอยู่ในระดับต่ำ (< 10 meq/ดินแห้ง 100 กรัม) โดยค่าความจุในการแลกเปลี่ยนประจุบวกโดยเฉลี่ยของดินที่ปนเปื้อนโครเมียมและผ่านการบำบัดด้วยพืชและดินที่ปนเปื้อนโครเมียมและเติมสาร EDTA และสาร EDDS มีค่าเท่ากับ 5.70 ± 0.01 , 6.74 ± 0.01 และ 5.92 ± 0.01 meq/ดินแห้ง 100 กรัม ซึ่งความจุในการแลกเปลี่ยนประจุบวกสัมพันธ์กับลักษณะเนื้อดิน กล่าวคือ ความจุในการแลกเปลี่ยนประจุบวกของดินจะเพิ่มสูงขึ้น เมื่อดินมีเนื้อละเอียดหรือมีสัดส่วนของดินเหนียว (clay fraction) เพิ่มมากขึ้น อนุภาคของดินเหนียวซึ่งมีประจุลบอยู่ที่ผิวเป็นส่วนใหญ่มีการจับกับไอออนบวกอย่างหลวม ๆ จึงสามารถถูกแทนที่ด้วยประจุบวกอื่น ๆ ได้ง่าย (คณาจารย์ภาควิชาปฐพีวิทยา, 2548)

4. ความอุดมสมบูรณ์ของดินซึ่งวัดจากร้อยละของปริมาณอินทรีย์วัตถุในดิน พบว่าดินที่เติมสาร EDDS มีอินทรีย์วัตถุ เท่ากับ 5.10 ± 0.06 ซึ่งจัดอยู่ในกลุ่มที่มีความอุดมสมบูรณ์อยู่ในระดับสูงมาก (ปริมาณอินทรีย์วัตถุ > 4.5 %) ดินที่เติมสาร EDTA มีปริมาณอินทรีย์วัตถุเท่ากับ 4.25 ± 0.06 อยู่ในกลุ่มที่มีความอุดมสมบูรณ์อยู่ในระดับสูง (1.5 - 4.5 %) ขณะที่ดินปนเปื้อนโครเมียมและผ่านการบำบัดด้วยพืชมีปริมาณอินทรีย์วัตถุเท่ากับ 2.61 ± 0.01 ความอุดมสมบูรณ์อยู่ในระดับค่อนข้างสูง (2.5 - 3.5 %) การที่ดินมีปริมาณอินทรีย์วัตถุที่แตกต่างกันเป็นผลมาจากลักษณะเนื้อดินที่แตกต่างกัน คือ เมื่อดินเนื้อละเอียดขึ้นจะพบว่ามีแนวโน้มที่อินทรีย์วัตถุในดินจะมากขึ้น เนื่องจากดินเนื้อละเอียดจะอุ้มน้ำและดูดซับ ไอออนที่เป็นธาตุอาหารพืชได้มาก ประกอบกับดินเนื้อหยาบจะมีการแลกเปลี่ยนก๊าซและการระบายน้ำที่ดีกว่าดินเนื้อละเอียด ทำให้การสลายตัวของอินทรีย์วัตถุเกิดขึ้นได้ดีกว่า ปริมาณอินทรีย์วัตถุในเนื้อดินที่หยาบ

5. อินทรีย์วัตถุในดิน จากการวิเคราะห์พบว่าดินทั้ง 3 ชุดดินที่ใช้ในการศึกษามีออกไซด์ของซิลิกอน อะลูมินัมและเหล็ก เป็นองค์ประกอบหลัก คิดเป็น 80 – 99 % ของทั้งหมด

6. ความเป็นกรดอยู่ในระดับเล็กน้อยถึงปานกลาง และมีค่าความเป็นกรดอยู่ในช่วง 0.01 - 0.013 meq/ดินแห้ง 1 กรัม)

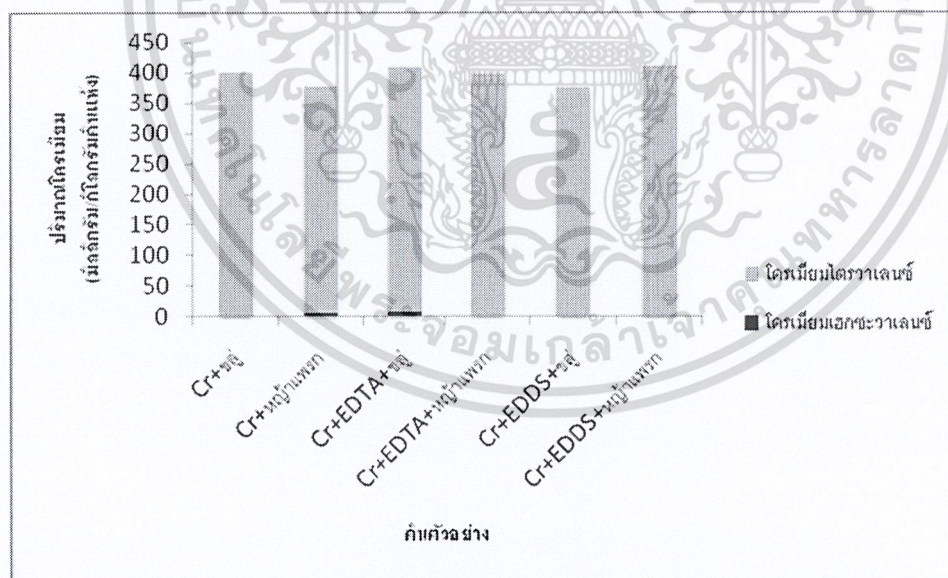
4.2 ปริมาณของโครเมียมในดิน

ดินตัวอย่างที่ใช้ในการศึกษานำมาวิเคราะห์ปริมาณของโครเมียม โดยวิเคราะห์ปริมาณโครเมียมทั้งหมด โครเมียมเฮกซะวาเลนซ์ และโครเมียมไตรวาเลนซ์ ซึ่งสามารถสรุปได้ดังแสดงในตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ปริมาณโครเมียมที่พบได้ในดิน^a

ดินตัวอย่าง	ปริมาณโครเมียมที่พบได้ในดิน (มิลลิกรัม/กิโลกรัมดินแห้ง)		
	โครเมียมทั้งหมด	โครเมียมเฮกซะวาเลนซ์	โครเมียมไตรวาเลนซ์
Cr+ขลุ้	400.79	3.57	397.22
Cr+EDTA+ขลุ้	377.87	5.87	372.00
Cr+EDDS+ขลุ้	409.15	7.15	402.00
Cr+หญ้าแพรก	397.68	3.53	394.15
Cr+EDTA+หญ้าแพรก	375.30	3.30	372.00
Cr+EDDS+หญ้าแพรก	409.54	4.54	405.00

^a อ้างอิงจากโครงการพิเศษของเอกชา, ภาณุวัฒน์ และกนกกรัตน์, 2552



รูปที่ 4.1 ปริมาณของโครเมียมที่พบได้ในดิน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตาราง 4.2 และรูปที่ 4.1 พบว่า ดินที่ปลูกต้นขลุ้ และดินเติมสาร EDTA และเติมสาร EDDS รวมทั้งดินที่ปลูกหญ้าแพรกและดินที่เติมสาร EDTA และสาร EDDS มีความเข้มข้นของโครเมียมทั้งหมดเท่ากับ 400.79, 377.87, 409.15, 397.68, 375.30 และ 409.54 มิลลิกรัม/กิโลกรัมดินแห้ง ตามลำดับ และมีปริมาณของโครเมียมไตรวาเลนซ์เท่ากับ 397.22, 372.00, 402.00, 394.15, 372.00 และ 405.00 มิลลิกรัม/กิโลกรัมดินแห้ง ตามลำดับ ขณะที่ปริมาณโครเมียมเฮกซะวาเลนซ์ ในดินที่ใช้ในการศึกษามีน้อยมากเท่ากับ 3.57, 5.87, 7.15, 3.53, 3.30 และ 4.54 มิลลิกรัม/กิโลกรัมดินแห้งตามลำดับ นอกจากนี้ยังพบว่าปริมาณโครเมียมไตรวาเลนซ์ซึ่งเคลื่อนที่ได้ช้า สามารถดูดซับบนอนุภาคดินได้ดีและมีความเป็นพิษน้อยกว่าโครเมียมเฮกซะวาเลนซ์ซึ่งมีความเป็นพิษมาก

ชุดดินที่ผ่านการปลูกต้นขลุ้มีปริมาณโครเมียมทั้งหมดน้อยกว่าชุดดินที่ผ่านการปลูกต้นหญ้าแพรก แสดงว่า ต้นขลุ้สามารถดึงโครเมียมในดินได้ดีกว่าหญ้าแพรก ซึ่งสอดคล้องกับผลวิจัยของ เอกษา, ภาณุวัฒน์ และกนกรัตน์, 2552 ที่พบว่าต้นขลุ้และต้นหญ้าแพรกที่ปลูกในดินปนเปื้อนโครเมียมมีประสิทธิภาพการดูดดึงโครเมียมได้ 0.3441% และ 0.0443% ตามลำดับ นอกจากนี้ยังพบว่าสารคีเลตอีดีดีเอสมีผลต่อการดูดดึงโครเมียมในดินของต้นขลุ้ทำให้ปริมาณโครเมียมลดลงอย่างเห็นได้ชัด ส่วนสารคีเลตอีดีดีเอนั้น ไม่มีผลต่อการดูดดึงโครเมียมของต้นขลุ้ เช่นเดียวกับต้นหญ้าแพรกที่ชุดดินซึ่งเติมสารคีเลตกับไม่เติมสารคีเลตมีปริมาณโครเมียมในดินไม่แตกต่างกัน แสดงว่าสารคีเลตทั้งอีดีดีเอและอีดีดีเอสไม่มีผลต่อการดูดดึงโครเมียมในดินของต้นหญ้าแพรก

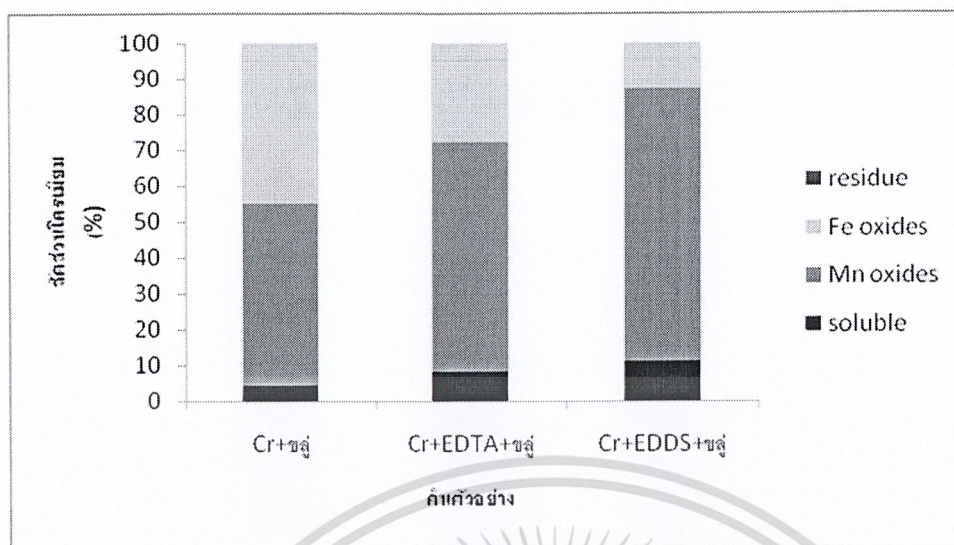
4.3 การสกัดแบบเป็นลำดับขั้น

ในการศึกษารูปฟอร์มของโครเมียมในดินทำการสกัดลำดับขั้น 4 ขั้นตอน โดยขั้นที่ 1 ได้รูปที่ละลายได้ในกรดและแลกเปลี่ยนไอออนได้ ขั้นตอนที่ 2 ได้รูปโครเมียมที่ยึดอยู่กับเมงกานีสออกไซด์ ขั้นตอนที่ 3 ได้รูปที่ยึดเกาะอยู่กับเหล็กออกไซด์ และขั้นตอนที่ 4 คือรูปของแข็งที่เหลือส่วนใหญ่เป็นแร่ปฐมภูมิ และทุติยภูมิ ซึ่งมีโลหะในปริมาณที่น้อยที่อยู่ในรูปของผลึก

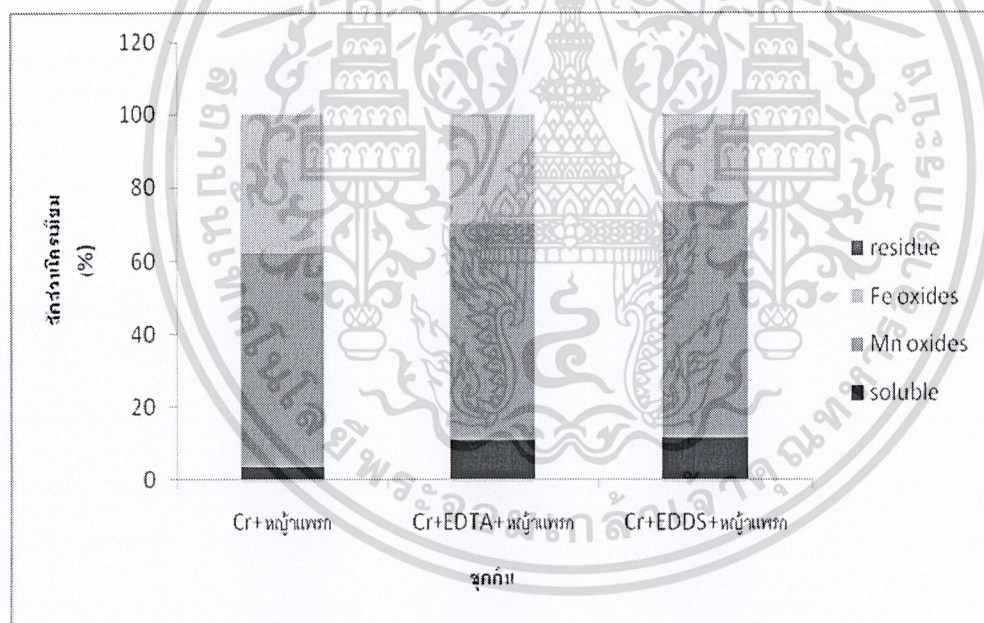
4.3.1 รูปฟอร์มของโครเมียมในดินที่ผ่านการบำบัดด้วยพืช (รายละเอียดในภาคผนวก ง)

เมื่อเปรียบเทียบสัดส่วนรูปฟอร์มต่าง ๆ ของโครเมียมในแต่ละชุดการทดลองที่ผ่านการปลูกต้นขลุ้และหญ้าแพรก พบว่ามีแนวโน้มในทิศทางเดียวกัน(รูปที่ 4.2 และ 4.3) โดยชุดการทดลองที่ปนเปื้อนโครเมียม ชุดการทดลองที่ปนเปื้อนโครเมียมและเติมสารอีดีดีเอ และชุดการทดลองที่ปนเปื้อนโครเมียมและเติมสารอีดีดีเอส มีปริมาณโครเมียมรูปที่ยึดอยู่กับเมงกานีสออกไซด์มากที่สุด (50.65%, 58.55%, 64.11%, 59.49%, 64.53% และ 75.92% ตามลำดับ) รองลงมาคือรูปที่ยึดอยู่กับเหล็กออกไซด์ (44.84%, 37.89%, 27.74%, 29.61%, 24.00% และ 12.96% ตามลำดับ) รูปที่ละลายและสามารถแลกเปลี่ยนไอออนได้ (4.51%, 3.56%, 8.15%, 10.90%, 11.47% และ 11.12% ตามลำดับ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



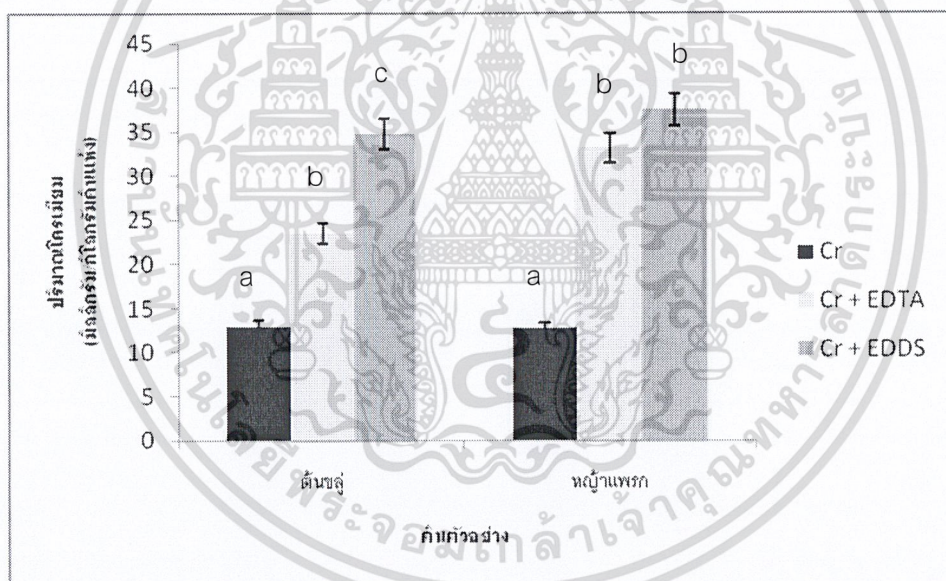
รูปที่ 4.2 สัดส่วนรูปฟอร์มต่างๆ ของโครเมียมในดินปนเปื้อนที่ปลูกต้นขลุ้



รูปที่ 4.3 สัดส่วนรูปฟอร์มต่างๆ ของโครเมียมในดินปนเปื้อนที่ปลูกหญ้าแพรก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อวิเคราะห์รูปฟอร์มของโครเมียมในรูปที่ละลายและแลกเปลี่ยนไอออนได้พบว่ามีปริมาณน้อยมากเมื่อเทียบกับรูปฟอร์มที่ยึดอยู่กับแมงกานีสออกไซด์และเหล็กออกไซด์ ซึ่งเป็นรูปที่เสถียรพืชไม่สามารถดึงดูดไปได้ โดยชุดดินที่เติมสารอีดีทีเอส รูปฟอร์มที่ละลายและแลกเปลี่ยนไอออนได้จะมีปริมาณมากที่สุด (34.79 ± 2.91 , 37.43 ± 0.18 มิลลิกรัม/กิโลกรัม) ในดินที่ผ่านการปลูกต้นขลุ้และหญ้าแพรก รองลงมาคือ ชุดการทดลองที่ปนเปื้อนโครเมียมและเติมสารอีดีทีเอ และชุดการทดลองที่ปนเปื้อนโครเมียม (23.50 ± 1.10 , 33.11 ± 1.21 และ 12.92 ± 0.22 , 12.73 ± 1.26 มิลลิกรัม/กิโลกรัมตามลำดับ) และพบว่าชุดการทดลองทั้ง 3 ชุดแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ดังรูปที่ 4.4 ชุดการทดลองที่มีการเติมสารคีเลตกับชุดการทดลองที่ไม่เติมสารคีเลตแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% จากการวิเคราะห์พบว่าชุดการทดลองที่มีการเติมสารคีเลตอีดีทีเอและอีดีทีเอส จะมีปริมาณโครเมียมที่ละลายและสามารถแลกเปลี่ยนไอออนมากกว่าชุดการทดลองที่ไม่เติมสารคีเลต เนื่องจากสารคีเลตจะเข้าทำปฏิกิริยากับโครเมียม เกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนที่ละลายน้ำได้ดีขึ้นและสารคีเลตอีดีทีเอสมีประสิทธิภาพมากกว่าสารคีเลตอีดีทีเอในการทำให้โครเมียมเปลี่ยนมาอยู่ในรูปที่ละลายและแลกเปลี่ยนไอออนได้ ดังรูปที่ 4.4



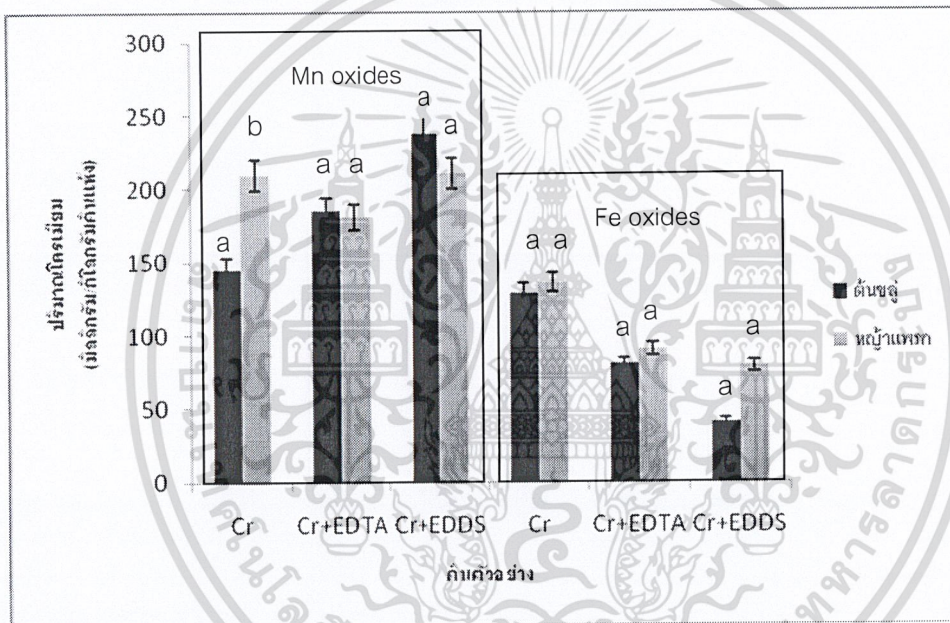
รูปที่ 4.4 เปรียบเทียบรูปฟอร์มที่ละลายและแลกเปลี่ยน ไอออนได้ในดินที่ผ่านการปลูกพืช

—| แถบแสดงความผิดพลาดแสดงค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าเฉลี่ย 3 ซ้ำ และตัวอักษร a, b และ c ที่ต่างกันแสดงความแตกต่างทางสถิติของข้อมูลอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

4.3.2 เปรียบเทียบรูปฟอร์มของโครเมียมในดินที่ผ่านการปลูกต้นขลุ้และหญ้าแพรง

(รายละเอียดในภาคผนวก ง)

จากการวิเคราะห์รูปฟอร์มของโครเมียมในดิน รูปฟอร์มที่พบมากกว่ารูปฟอร์มอื่นๆ คือ รูปที่ยึดอยู่กับแมงกานีสออกไซด์ และรูปที่ยึดอยู่กับเหล็กออกไซด์ จึงจะใช้รูปฟอร์มทั้ง 2 รูปในการเปรียบเทียบรูปฟอร์มของโครเมียมในดิน (รูปที่ 4.5) โดยพบว่าปริมาณของโครเมียมในรูปที่ยึดกับแมงกานีสออกไซด์ ในชุดการทดลองที่ไม่มีการเติมสารคีเลตทั้ง 2 ชุด มีความแตกต่างกัน ส่วนชุดการทดลองที่มีการเติมสารคีเลตคือ ดีทีเอและอีดีดีเอส พบว่า ปริมาณโครเมียมที่อยู่ในรูปที่ยึดกับแมงกานีสออกไซด์ในแต่ละชุดการทดลองไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% และโครเมียมรูปที่ยึดอยู่กับเหล็กออกไซด์ในชุดการทดลองทั้ง 8 ชุด ก็ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% เช่นกัน

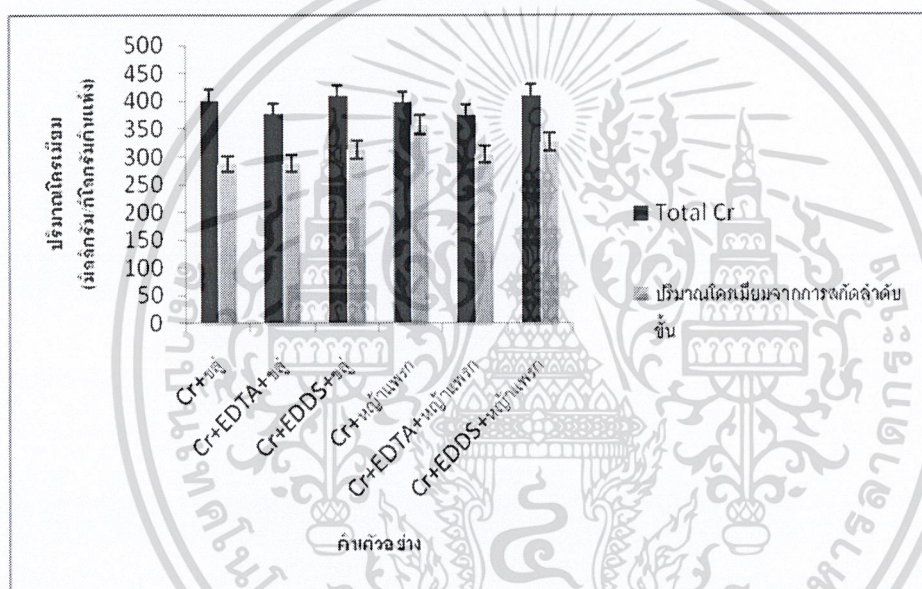


รูปที่ 4.5 รูปฟอร์มของโครเมียมที่ยึดกับแมงกานีสออกไซด์และเหล็กออกไซด์ในดินที่ผ่านการปลูกพืช

4.3.3 เปรียบเทียบปริมาณโครเมียมทั้งหมดในดินและปริมาณที่สกัดได้แบบเป็นลำดับขั้น

(รายละเอียดในภาคผนวก ง)

จากรูปที่ 4.6 แสดงปริมาณของโครเมียมทั้งหมดในดินจากการย่อยด้วยกรดเข้มข้น โดยใช้เครื่องมือโครเวฟซึ่งอ้างอิงจากงานวิจัยของเอกษา, ภาณุวัฒน์และกนกรัตน์, 2552 เปรียบเทียบกับปริมาณโครเมียมทั้งหมดที่ได้จากการสกัดแบบเป็นลำดับขั้น พบว่าชุดการทดลองทั้ง 6 ชุด มีปริมาณโครเมียมทั้งหมดในดินจากการย่อยด้วยกรดเข้มข้น โดยใช้เครื่องมือโครเวฟสูงกว่าปริมาณโครเมียมทั้งหมดในดินที่ได้จากการสกัดแบบเป็นลำดับขั้น เนื่องจากการย่อยด้วยกรดเข้มข้น โดยเครื่องมือโครเวฟจะใช้สารเคมีที่เป็นกรดเข้มข้นซึ่งมีความรุนแรงมาก สามารถย่อยของแข็ง ให้เป็นสารละลายได้และโลหะรูปฟอร์มต่างๆ ที่จับอยู่ในอนุภาคดินถึงแม้จะเป็นรูปที่สกัดได้ยาก อยู่ในรูปของผลึกและเฉื่อยต่อการเกิดปฏิกิริยาที่สามารถสกัดออกมาได้



รูปที่ 4.6 เปรียบเทียบปริมาณของโครเมียมทั้งหมดและปริมาณโครเมียมที่ได้จากการสกัดแบบเป็นลำดับขั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลวิจัยและข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้ทำการศึกษารูปฟอร์มของโครเมียมที่ปนเปื้อนในดินที่ผ่านการบำบัดด้วยต้นขลุ้และหญ้าแพรก ปัจจัยที่ศึกษาได้แก่ ลักษณะเนื้อดิน ผลของสารคีเลตอีดีทีเอและอีดีดีเอส และศึกษารูปฟอร์มของโครเมียมด้วยวิธีการสกัดแบบลำดับชั้น 4 ขั้นตอน ผลการศึกษาสามารถสรุปได้ดังนี้

ดินตัวอย่างที่ใช้ในการศึกษาเก็บมาจากพื้นที่ตำบลมาบข่า อำเภอนิคมน้ำจืด จังหวัดระยอง โดยดินตัวอย่างที่ใช้ในการศึกษามีลักษณะทางกายภาพ และทางเคมี ดังนี้ ลักษณะเนื้อดินเป็นดินร่วนเหนียว ดินเหนียว และดินเหนียวปนทราย ค่าพีเอชเป็นกรดเล็กน้อยถึงปานกลาง (pH 5.5 – 6.5) ความจุในการแลกเปลี่ยนประจุบวกมีอยู่ในระดับต่ำ (น้อยกว่า 10 มิลลิกรัมสมมูล/ดินแห้ง 100 กรัม) ปริมาณอินทรีย์วัตถุในดินอยู่ในระดับต่ำถึงสูงมาก (1.0 – 4.5 %) ความเป็นกรดของดินอยู่ในช่วงกรดเล็กน้อยถึงปานกลาง ชุดตัวอย่างดินทั้งหมด มีออกไซด์ของซิลิกอน อลูมิเนียมและเหล็กเป็นองค์ประกอบหลัก

ปริมาณโครเมียมทั้งหมดในดินที่ผ่านการปลูกต้นขลุ้มีปริมาณโครเมียมทั้งหมดน้อยกว่าดินที่ผ่านการปลูกต้นหญ้าแพรก แสดงว่า ต้นขลุ้สามารถดึงโครเมียมในดินได้ดีกว่าหญ้าแพรก และพบปริมาณโครเมียมไตรวาเลนซ์ (ซึ่งเป็นรูปที่เคลื่อนที่ได้ช้า สามารถดูดซับบนอนุภาคดินได้ดีและมีความเป็นพิษน้อย) สูงกว่าโครเมียมเฮกซะวาเลนซ์ (ซึ่งมีความเป็นพิษมาก)

รูปฟอร์มของโครเมียมที่ปนเปื้อนในดิน หลังจากการสกัดลำดับชั้น 4 ขั้นตอน พบ 3 รูปฟอร์มหลัก คือรูปที่ยึดกับแมงกานีสออกไซด์ รูปที่ยึดกับเหล็กออกไซด์และรูปที่อยู่ในรูปละลายและแลกเปลี่ยนไอออนได้ โดยดินที่ผ่านการปลูกต้นขลุ้และหญ้าแพรกโครเมียมจะอยู่ในรูปที่ยึดกับแมงกานีสออกไซด์มากที่สุด รองลงมาคือ รูปที่ยึดกับเหล็กออกไซด์และรูปที่ละลายและสามารถแลกเปลี่ยนไอออนได้ สำหรับดินที่ผสมสารคีเลตอีดีทีเอและอีดีดีเอส จะพบโครเมียมรูปที่ละลายน้ำและแลกเปลี่ยนไอออนได้ ในปริมาณที่มากกว่าดินที่ไม่มีสารคีเลต ผสมอยู่

ข้อเสนอแนะ

1. ควรศึกษาถึงวิธีการที่จะทำให้โครเมียมในรูปที่ยึดกับแมงกานีสออกไซด์และรูปที่ยึดกับเหล็กออกไซด์มาเป็นรูปฟอร์มที่ละลายและสามารถแลกเปลี่ยน ไอออน ได้เพื่อบำบัดโครเมียมในดินด้วยการฟื้นฟูโดยพืช (phytoremediation)
2. ควรศึกษารูปฟอร์มของโครเมียมในดินที่ไม่มี การปลูกพืชเปรียบเทียบกับดินที่มีการปลูกพืช
3. ควรศึกษารูปฟอร์มของโครเมียมด้วยการสกัดลำดับชั้นในต้นขลุ่ยและหญ้าแพรก
4. ควรศึกษาปัจจัยที่เกี่ยวข้องในการทำปฏิกิริยาของสารคีเลตกับโครเมียมในดิน เช่น พีเอช ลักษณะเนื้อดิน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

กลั่นสุคนธ์ สุวรรณรัตน์ และกรองแก้ว ทิพย์ศักดิ์. ปฏิบัติการเคมีสิ่งแวดล้อม 2. กรุงเทพฯ: คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

กองวิเคราะห์ดิน กรมพัฒนาที่ดิน. 2535. คู่มือปฏิบัติการวิเคราะห์ดินของกลุ่มเคมีดินที่ 2. กรุงเทพฯ: กรมพัฒนาที่ดิน.

กองสำรวจดิน.2523. วิธีการประเมินระดับความอุดมสมบูรณ์ของดินจากผลการวิเคราะห์ดิน

[Online].Available : <http://lpsci.nfe.go.th/elearning/biodiversity/indexnan8.php>

คณาจารย์ภาควิชาปฐพีวิทยา. 2548. ปฐพีวิทยาเบื้องต้น. พิมพ์ครั้งที่ 10. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

คูสิต มานะจุติ. 2535. ปฐพีวิทยาทั่วไป. พิมพ์ครั้งที่ 1. เชียงใหม่: กองบริการการศึกษา มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.

สำนักวิทยาศาสตร์เพื่อการพัฒนาที่ดิน กรมพัฒนาที่ดิน. 2547. คู่มือการวิเคราะห์ตัวอย่างดิน น้ำ ปุ๋ย พืช วัสดุปรับปรุงดิน และการวิเคราะห์เพื่อตรวจรับรองมาตรฐานสินค้า. กรุงเทพฯ. สำนักวิทยาศาสตร์เพื่อการพัฒนาที่ดิน.

ศุภมาส พนิชศักดิ์พัฒนา. 2539. ภาวะมลพิษของดินจากการใช้สารเคมี. กรุงเทพฯ : โรงพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เอกชา ตนานนท์ชัย, ภาณุวัฒน์ ฉิมจินดา และกนกรัตน์ แจ่มประทีป. 2552. การศึกษาการดูดซับโครเมียมในดินปนเปื้อนโดยใช้หญ้าแพรงและต้นขลุ้. โครงการพิเศษตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต ภาควิชาเคมี สาขาเคมีทรัพยากรสิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

A.Tessier, P.G.C. Campbell, M. Bisson. 1979. **Sequential extraction procedure for the speciation of particulate trace metals.** Anal. Chem. 51,844.

J.Zerbe, T. Sobczynski, H. Elbonowska, J. Siepak. 1999. **Speciation of Heavy Metal in Bottom Sediments of Lakes.** Journal of Enviromental Studies. 8(5), 331-339.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- Mulligan, C.N., Yong, R.N. and B.F. Gibbs. 2001. **Remediation technologies for metal contaminated soils and groundwater : an evaluation.** Eng. Geo. 60, 193-207.
- Nymphodora Pappasiopi, Athina Kontoyianni, Katerina Vaxevanidou and Anthimos Xenidis. 2009. **Assessment of chromium biostabilization in contaminated soils using standard leaching and sequential extraction techniques.** Science of the total environment. 407, 925- 936.
- Rauret G, Lopez-Sanchez JF, Sahuquillo A, Rubio R, Davidson C, Ure A, et al. 1999. **Improvement of the BCR three step sequential extraction procedure prior to the certification of new sediment and soil reference materials.** J Environ Monit. 1, 57-61.
- Shiowatana, J., Tantidanai, N., Nookabaew, S. and Nacapricha, D. 2001. **A flow system for the determination of metal speciation in soil by sequential.** Environ. Inter. 26, 381-387.
- Shuman, L. M. 1985. **Fractionation method for soil microelement.** Soil Sci. 14, 11-12.
- Slavica Razic, Svetlana Dogo. 2010. **Determination of chromium in *Mentha piperita* L. and soil by graphite furnace atomic adsorption spectrometry after sequential extraction and microwave-assisted acid digestion to assess potential bioavailability.** Chemosphere. 78, 451-456.
- Takeuchi, Y. and Arai, H. 1998. **A study of equilibrium and mass transfer in processes for removal of heavy metal ions by hydroxyapatites.** J. Chem. Eng. Jpn. 21, 98-100.
- U.S. EPA. 1992. **Chromium, hexavalent (colorimetric) / Method 7196A.**
[Online]. Available : www.epa.gov/method/pdfs/7196a.pdf
- U.S. EPA. 1996. **Alkaline digestion for hexavalent chromium / Method 3060A.**
[Online]. Available : www.epa.gov/method/pdfs/3060a.pdf



ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ก.1 การวัดค่าพีเอช (กองวิเคราะห์ดิน, 2535)

1. ชั่งดินแห้ง 20 กรัม ลงในบีกเกอร์ เติมน้ำกลั่นลงไป 20 มิลลิลิตร พร้อมบันทึกหมายเลขตัวอย่างดิน
2. กวนให้เข้ากันอย่างน้อย 5 วินาที และตั้งทิ้งไว้ 10 นาที
3. ขณะที่ตั้งสารละลายทิ้งไว้ให้ทำการปรับเทียบเครื่องวัดพีเอชกับสารละลายบัฟเฟอร์มาตรฐาน 4 และ 7 (ปฏิบัติตามคู่มือการใช้งานเครื่องวัดพีเอช)
4. จุ่มอิเล็กโทรดลงในบีกเกอร์ที่บรรจุสารละลายดินที่ครบตามเวลากวนโดยใช้การหมุนอิเล็กโทรดเบาๆ (ระวัง! อิเล็กโทรดกระแทกแตกได้) อ่านค่าพีเอช

ก.2 การวิเคราะห์ความเป็นกรดของดิน (กลินส์คินซ์ และกรองแก้ว)

1. ชั่งดิน 5-10 กรัม ใส่ขวดรูปชมพู่
2. เติมน้ำยา (สารละลาย BaCl_2 0.5 นอร์มอล และ ไทรเอทานอลามีน) ลงไป 50 มิลลิลิตร ปิดจุกเขย่าให้เข้ากัน ทิ้งไว้ 1 คืน
กรองโดยใช้กรวยแบบลดความดันและล้างดินด้วยเบเรียมคลอไรด์ ไทรเอทานอลามีน 2-3 ครั้ง จนสารละลายที่ได้มีปริมาตร 100 มิลลิลิตร ลงในขวดวัดปริมาตรและใช้สารละลาย BaCl_2 0.5 นอร์มอล และ ไทรเอทานอลามีนปรับปริมาตร
3. เทสารละลายที่กรองได้ลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 500 มิลลิลิตร ล้างขวดด้วยน้ำกลั่นและเติมอินดิเคเตอร์ฟสม 4-5 หยด จะได้สารละลายสีเขียว
4. ทำการหาความเข้มข้นที่แน่นอนของกรดไฮโดรคลอริกก่อน (ให้ได้ความละเอียดทศนิยม 4 ตำแหน่ง) ถ้าไม่ใกล้เคียงกับ 0.2 นอร์มอล ต้องเตรียมใหม่
5. นำไปไทเทรตกับ HCl 0.2 นอร์มอล จนถึงจุดยุติเป็นสีชมพูม่วง
6. ทำเบลงค์ เช่นเดียวกับตัวอย่างดิน และไทเทรตเช่นกัน

การคำนวณ

$$\text{ความเป็นกรดของดิน} = [(B - S) \times N \times 100] / [X (100 - \% \text{ความชื้น})] \quad \text{meq/g dry soil} \quad \dots \quad (\text{ก.10})$$

เมื่อ N = ความเข้มข้นของ HCl (นอร์มอล)

B = ปริมาตรของ HCl ที่ใช้ในการไทเทรตกับเบลงค์ (มิลลิลิตร)

S = ปริมาตรของ HCl ที่ใช้ในการไทเทรตกับตัวอย่างดิน (มิลลิลิตร)

X = น้ำหนักของดิน (กรัม)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ก.3 การหาความจุในการแลกเปลี่ยนประจุบวก (กองวิเคราะห์ดิน, 2535)

1. ชั่งตัวอย่างดิน 5 กรัม ใส่ขวดรูปชมพู่ขนาด 125 มิลลิลิตร เติมสารละลายแอมโมเนียมอะซิเตท 1 นอร์มอล ลงไป 60 มิลลิลิตร ปิดจุกเขย่าให้เข้ากันทิ้งไว้ค้างคืน
2. เขย่าสารละลายดิน 30 นาที โดยใช้เครื่องเขย่าๆ จากนั้นนำไปปั่นเหวี่ยง นาน 5 นาที แยกเอาส่วนใสทิ้ง
3. ล้างดินออกด้วยสารละลายแอมโมเนียมอะซิเตท 1 นอร์มอล ครั้งละ 30 มิลลิลิตร นำไปปั่นเหวี่ยงแยกส่วนใสออกจนไม่มีแคลเซียมเหลืออยู่ (ทดสอบดูโดยนำส่วนใสที่ได้จากการล้างแต่ละครั้งประมาณ 10 มิลลิลิตร ใส่ในหลอดทดลองหยดแอมโมเนียมคลอไรด์ 1 นอร์มอล แอมโมเนียมออกซาลาเลท 10 % และแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ 50 % อย่างละ 3 หยด นำไปต้มให้เดือด ถ้าเกิดตะกอนหรือสารละลายขุ่น แสดงว่ามีแคลเซียมตกค้างอยู่)
4. ล้างตัวอย่างดินต่อด้วยสารละลายแอมโมเนียมคลอไรด์ 0.25 นอร์มอล 1 ครั้งจากนั้นล้างด้วยไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์ 7 ครั้งๆ ละ 30 มิลลิลิตร โดยนำไปปั่นเหวี่ยงนานประมาณ 5 นาทีเพื่อแยกส่วนใสออกจนไม่มีคลอไรด์เหลืออยู่ (ทดสอบโดยใช้สารละลายซิลเวอร์ไนเตรท 0.1 นอร์มอล 3 หยด ถ้ามีตะกอนขาวของ AgCl แสดงว่ามีคลอไรด์เหลืออยู่)
5. นำสารละลายจากข้างต้นทิ้งไปนำตัวอย่างดินที่ได้มาล้างต่อด้วยโซเดียมคลอไรด์ 10 % เพื่อไล่แอมโมเนียมในดิน โดยล้างครั้งละ 30 มิลลิลิตร ซ้ำ 3 ครั้ง นำไปปั่นเหวี่ยง เก็บส่วนใสไว้
6. นำส่วนใสที่ได้จากสารละลายดินมาใส่ในขวดวัดปริมาตร 100 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรรวมจนมีปริมาตร 100 มิลลิลิตร ด้วยน้ำกลั่น
7. นำสารละลายดินที่ได้ไปกลั่นเพื่อไล่แอมโมเนียมออกมาโดยเติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 40 % ลงไป 25 มิลลิลิตร ใส่ใน Kjeldahl flask ที่ปลายคอนเดนเซอร์ (Condenser) จุ่มอยู่ในสารละลายกรดบอริก 3 % จำนวน 50 มิลลิลิตรซึ่งใส่อินดิเคเตอร์ผสมไว้ 3 หยด กลั่นจนกระทั่งสารละลายเปลี่ยนจากสีม่วงเป็นสีเขียว
8. นำสารละลายที่ได้จากการกลั่นไปไทเทรตด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริกมาตรฐาน 0.1 นอร์มอล จนสีของสารละลายเปลี่ยนจากสีเขียวเป็นสีม่วง
9. กลั่นแบลนด์และไทเทรตเช่นเดียวกับตัวอย่างดิน

การคำนวณ

$$CEC = [(A - B)N \times 100] / X \quad \text{มิลลิกรัมสมมูลต่อดิน} \dots\dots\dots (ก.1)$$

A = ปริมาตรของกรดไฮโดรคลอริกมาตรฐานที่ใช้ไทเทรตกับตัวอย่างดิน (มิลลิลิตร)

B = ปริมาตรของกรดไฮโดรคลอริกมาตรฐานที่ใช้ไทเทรตกับแบลนค์ (มิลลิลิตร)

N = ความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริกมาตรฐาน (นอร์มอล)

X = น้ำหนักแห้งเป็นกรัมของตัวอย่างดิน

ก.4 การวิเคราะห์หาปริมาณอินทรีย์สารโดยวิธี Walkley and Black

(กองวิเคราะห์ดิน, 2535)

1. ชั่งตัวอย่างดิน 0.2 กรัม ใส่ในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร
2. เติมน้ำยาโพแทสเซียมไดโครเมท 1 นอร์มอล ลงไป 10 มิลลิลิตร โดยใช้ปิเปต
3. เติมกรดซัลฟูริกเข้มข้นลงไป 20 มิลลิลิตรลงไปโดยเร็ว และแขวงขวดรูปชมพู่แรง ๆ เป็นเวลา 1 นาที ตั้งทิ้งไว้ให้ดินและน้ำยาทำปฏิกิริยากันเป็นเวลา 30 นาที
4. เติมน้ำกลั่นลงไปประมาณ 100 มิลลิลิตร ทิ้งไว้ให้เย็น และเติมกรดฟอสฟอริกเข้มข้น 10 มิลลิลิตร แขวงขวดรูปชมพู่แล้วเติมอินดิเคเตอร์ 3 หยด สีของสารละลายจะเปลี่ยนเป็นสีม่วงปนน้ำเงิน
5. ไทเทรตสารละลายที่ได้ด้วยน้ำยาเฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟต 0.5 นอร์มอล เพื่อวิเคราะห์หาปริมาณ โพแทสเซียม ไดโครเมทที่เหลือจากปฏิกิริยาจนกระทั่งสีของสารละลายดินเปลี่ยนจากสีม่วงปนน้ำเงินเป็นสีเขียวใสที่จุดยุติ
6. จดปริมาณ โพแทสเซียม ไดโครเมทและเฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟตที่ใช้
7. ทำแบลนค์เช่นเดียวกันกับการวิเคราะห์ดิน
8. คำนวณหาปริมาณอินทรีย์คาร์บอนและอินทรีย์วัตถุ

การคำนวณ

$$\% \text{ Organic carbon} = [(B-T)N/B] \times [100/77] \times 0.003 \times [100/X] \times 10 \dots\dots\dots (ก.2)$$

N = ความเข้มข้นของโพแทสเซียมไดโครเมท

B = จำนวนมิลลิลิตรของสารละลายเฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟตที่ไทเทรตกับแบลนค์

T = จำนวนมิลลิลิตรของสารละลายเฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟตที่ไทเทรตกับตัวอย่างดิน

X = น้ำหนักดิน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\% \text{ Organic matter} = \% \text{ Organic carbon} \times 1.724 \quad \dots\dots\dots (ก.3)$$

$$\text{หรือ } \% \text{ Organic matter} = [(B-T)N/B] \times [100/77] \times [100/58] \times 0.003 \times [100/X] \times 10 \quad (ก.4)$$

ก.5 การวิเคราะห์ปริมาณเหล็กออกไซด์ (พัชรีย์ ชีร์จินดาขจร, 2552)

1. ชั่งดิน (ที่ฝั่งให้แห้งในที่ร่มและร่อนผ่านตะแกรงขนาด 2 มิลลิเมตร) 10 กรัม (± 0.01) ใส่ลงใน Erlenmeyer flask ขนาด 125 มิลลิลิตร
2. Pipet น้ำยาสกัด (0.005 M DTPA pH7.3) 20 ml (ใช้ volumetric pipet) ใส่ตัวอย่างดิน
3. ปิดด้วยจุกยาง เขย่าด้วยเครื่องเป็นเวลา 2 ชั่วโมง
4. กรองตัวอย่างโดยใช้กระดาษกรอง No.5 เก็บสารละลายที่กรองได้ไว้ในขวดพลาสติก
5. วัดความเข้มข้น Fe, Mn, Cu และ Zn ด้วย atomic absorption spectrophotometer เปรียบเทียบกับ working standard โดยใช้ wave length ตามที่วิธีการวิเคราะห์แต่ละธาตุกำหนด

การคำนวณ

$$\text{Extr. Fe/Mn/Cu/Zn (ppm)} = \frac{\text{ppm from curve} \times \{\text{Final volume (ml)}\} \times \text{Extractant (ml)}}{\{\text{aliq. (ml)}\} \times \text{wt. of soil (g)}}$$

ก.6 การหาค่าความชื้น (กลิ่นสุคนธ์ และกรองแก้ว)

1. ชั่งกระชอนพีกาที่สะอาด
2. นำตัวอย่างดินมาชั่ง 10 กรัม ลงบนกระชอนพีกา จดบันทึกน้ำหนักเปียก
3. นำไปเข้าอบในตู้อบที่อุณหภูมิ 105 – 110 °C เป็นเวลาอย่างน้อย 12 ชั่วโมง ทำให้เย็นในเดซิเคเตอร์
4. นำมาชั่งน้ำหนักแห้ง
5. คำนวณหาเปอร์เซ็นต์ความชื้น

$$\% \text{ ความชื้น} = \left[\frac{\text{น้ำหนักเปียก} - \text{น้ำหนักแห้ง}}{\text{น้ำหนักแห้ง}} \times 100 \right] \dots\dots\dots (ก.5)$$
6. ทำการทดลองซ้ำอีก 2 ครั้ง หาค่าเฉลี่ย

ก.7 การหาเปอร์เซ็นต์ทราย ซิลต์ เกลย์ (กลินส์คูนซ์ และกรองแก้ว)

การปรับเทียบไฮโดรมิเตอร์

1. เทสารละลายคัลคอน จำนวน 100 มิลลิลิตร ลงในกระบอกตวงปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่น จนถึงขีด 1.0 ลิตร ผสมให้ทั่วด้วยแท่งแก้วคนแบบ Plunger ตั้งทิ้งไว้จนอุณหภูมิคงที่ (อยู่ในช่วง 20 – 25 °C)
2. ค่อย ๆ หย่อนไฮโดรมิเตอร์ลงในสารละลายอย่างระมัดระวัง อ่านค่าจากสเกลที่รอยเว้าบนของของเหลวที่ล้อมรอบไฮโดรมิเตอร์ และวัดอุณหภูมิของสารละลาย



รูปที่ ก.1 ตามเหลี่ยมจำแนกเนื้อสัมผัสดิน

การอ่านค่าจากสารแขวนลอย

1. ชั่งดินที่ผึ่งแห้งและร่อนผ่านตะแกรงขนาด 10 เมช แล้ว 40 กรัม (ถ้าเป็นดินทรายร่วนหรือดินทรายใช้ 100 กรัม) ลงในบีกเกอร์ขนาด 600 มิลลิลิตร เติมสารละลายคัลคอน 100 มิลลิลิตร และน้ำประมาณ 300 มิลลิลิตร ตั้งทิ้งไว้ 1 คืน
2. ชั่งดินตัวอย่างเดิมอีก 10 กรัม เพื่อหาเปอร์เซ็นต์ความชื้นและน้ำหนักแห้งแล้วนำไปอบที่ 105 °C 1 คืน ทำให้เย็นในเดซิเคเตอร์และชั่งน้ำหนัก
3. นำสารแขวนลอยดินจากข้อ 1 มาควนด้วยเครื่องควนแม่เหล็กประมาณ 5 นาที แล้วเทลงกระบอกตวงขนาด 1 ลิตร
4. ปรับปริมาตรสารในข้อ 3 ด้วยน้ำกลั่นจนถึงขีด 1 ลิตร ทิ้งไว้จนอุณหภูมิคงที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. จุ่มแท่งแก้วคนแบบ Plunger แบบขึ้น-ลง เบา ๆ เพื่อให้เกิดการผสมกันอย่างทั่วทั้งกระบอกตวง (ให้หมุนขึ้นลงแบบเกลียวส่วน 2-3 รอบ) บันทึกเวลาเมื่อคนเสร็จ (เดิม 1 หยดของเอมิลแอลกอฮอล์ ถ้าที่ผิวของสารแขวนลอยเป็นฟอง)
6. ค่อยๆหย่อนไฮโดรมิเตอร์ลงอย่างระมัดระวังในสารแขวนลอยและอ่านสเกลเหมือนหัวข้อ การปรับเทียบไฮโดรมิเตอร์ เมื่อเวลาผ่านไป 40 วินาที หลังจากการกวนผสม ค่าที่อ่านได้ควรหักลบจากค่าที่อ่านได้จากการปรับเทียบไฮโดรมิเตอร์ และอ่านค่าอุณหภูมิของสารแขวนลอย
7. ค่อย ๆ ดึงไฮโดรมิเตอร์ขึ้นอย่างระมัดระวังเมื่ออ่านเสร็จ ล้างและเช็ดให้แห้ง
8. เมื่อครบ 2 ชั่วโมง ให้อ่านค่าไฮโดรมิเตอร์อีกครั้ง โดยทำเหมือนข้อ 6 และ 7

ข้อควรระวัง

การหาขนาดของอนุภาคด้วยวิธีไฮโดรมิเตอร์นี้ไม่เหมาะสมในกรณีที่ดินตัวอย่างมีหินปูนมากหรือเป็นดินเค็ม หรือมีอินทรีย์คาร์บอนมากกว่า 2 %

การคำนวณ

ค่าอนุภาคของดินจะเป็นค่าที่ถูกต้องเมื่ออุณหภูมิของสารแขวนลอยดินเท่ากับอุณหภูมิของสารแขวนลอยดินตามที่ระบุไว้ที่ก้านของไฮโดรมิเตอร์คือ 68 องศาฟาเรนไฮต์ หรือที่ 20°C ดังนั้นต้องปรับค่า R_s โดยใช้สูตร

$$R_s = R'_s + 0.36(T-L) \quad \text{..... (ก.6)}$$

เมื่อ R_s = จำนวนกรัมที่ถูกต้องของอนุภาคดินในปริมาตร 1 ลิตร

R'_s = จำนวนกรัมของอนุภาคดินที่ได้อ่านจากไฮโดรมิเตอร์

L = อุณหภูมิบนก้านไฮโดรมิเตอร์ (°ซ)

T = อุณหภูมิของสารแขวนลอย (°ซ)

$$\% \text{ Sand} = [(W - R)40S \times 100] / W \quad \text{..... (ก.7)}$$

$$\% \text{ Clay} = [(R_{2hr}) \times 100] / W \quad \text{..... (ก.8)}$$

$$\% \text{ Silt} = 100 - (\% \text{ Sand} + \% \text{ Clay}) \quad \text{..... (ก.9)}$$

เมื่อ W = น้ำหนักดินแห้ง (กรัม)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ก.8 การหาปริมาณโครเมียมทั้งหมด (US EPA method 3052A (US EPA))

8.1 การย่อยด้วยเครื่องไมโครเวฟ

เครื่องมือ

Milestone ETHOS PLUS with MPR-300/12S medium pressure rotor

สารเคมี

1. HCl 37% 3 มิลลิลิตร
2. HNO₃ 65% 9 มิลลิลิตร

วิธีวิเคราะห์

1. ใช้ PFA vessel ขนาด 250 ml. โดยใส่ตัวอย่าง 0.5 กรัม
2. ใส่ PFA vessel ลงใน HTC Safety Shield
3. ใส่สารเคมีลงไปตามจำนวนข้างต้นถ้าส่วนของตัวอย่างเกาะอยู่ที่ผิวของvessel ทำการหยดกรดลงไปบริเวณนั้น
4. ปิด vessel และใส่เข้าไปในส่วนที่ใช้หมุน (rotor segment) ทำการหมุนลือคให้แน่น
5. ใส่ segment ส่วนที่ใช้ประกอบเครื่องเข้าไปในเครื่อง Microwave และต่อเข้ากับตัววัดอุณหภูมิ
6. ทำการเปิดเครื่องให้เครื่องทำตามโปรแกรมที่ตั้งไว้จนเสร็จสมบูรณ์
7. นำ segment มาทำให้เย็นโดยอากาศ/น้ำ กระทั่งสารละลายมีอุณหภูมิเกือบเท่าอุณหภูมิห้อง
8. ปิดvessel ทำการถ่ายสารละลายลงในขวดวัดปริมาตรขนาด 50 มิลลิลิตร
9. ทำการปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นให้ได้ 100 มิลลิลิตร

โปรแกรม Microwave

Step	Time	Temperature	Microwave Power
1	10 minutes	200 ^o C	Up to 1000 watt
2	15 minutes	200 ^o C	Up to 1000 watt

8.2 วิธี Atomic Absorption Spectrometer

การวิเคราะห์โครเมียมโดยวิธีนี้ เปลวไฟที่เกิดจากก๊าซผสมระหว่าง อากาศและ Acetylene จะทำให้พลังงานที่ทำให้ธาตุแตกตัวเป็นอะตอมเสรี (Atomzation) เพื่อให้ดูดกลืนแสงที่มีความยาวคลื่น 357 นาโนเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เครื่องมือ

เครื่อง Atomic absorption Spectrophotometer

วิธีการวิเคราะห์

นำสารละลายที่ย่อยด้วยเครื่องไมโครเวฟแล้วมากรองผ่านกระดาษกรองเบอร์ 42 แล้วนำไปวัดด้วยเครื่อง Atomic Absorption Spectrophotometer

ก.9 การวิเคราะห์หาโครเมียมเฮกซะวาเลนต์ (US EPA method 3060 (US EPA, 1996b))

เครื่องมือ

เครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (ยูวี/วิสิเบิล) รุ่น GENESYS 10S UV-VIS Spectrophotometer

สารเคมี

1. โซเดียมคาร์บอเนต
2. โซเดียมไฮดรอกไซด์
3. แมกนีเซียมคลอไรด์
4. ฟอสเฟตบัพเฟอร์
 - 4.1 K_2HPO_4
 - 4.2 KH_2PO_4
 - 4.3 0.5 M K_2HPO_4 /0.5 M KH_2PO_4 buffer pH 7
 - 4.4 ละลาย K_2HPO_4 4.3545 กรัม และ KH_2PO_4 3.4022 กรัมด้วยน้ำกลั่น และปรับปริมาตรเป็น 50 มิลลิลิตร
5. สารละลายที่ใช้ในการสกัด

ละลาย NaOH 20.0 ± 0.05 กรัม และ Na_2CO_3 30.0 ± 0.05 กรัม ด้วยน้ำกลั่นและปรับปริมาตรเป็น 1 ลิตร และพีเอชของสารละลายที่ใช้เท่ากับ 11.5
6. สารละลายไดฟีนิลคาร์บาไซด์


ละลายไดฟีนิลคาร์บาไซด์ 250 มิลลิกรัมในอะซิโตน 50 มิลลิลิตร

วิธีการวิเคราะห์

1. ชั่งดินใส่ในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร จำนวน 2.5 ± 0.10 กรัม
2. ใส่สารละลายที่ใช้ในการสกัด (ตามข้อ 5) จำนวน 50 ± 1 มิลลิลิตร โดยใช้กระบอกตวง และเติมเมกนีเซียมคลอไรด์ 400 มิลลิกรัม และเติมฟอสเฟตบัฟเฟอร์ (ตามข้อ 4.4) จำนวน 0.5 มิลลิลิตร
3. เขย่าให้เข้ากันอย่างน้อย 5 นาที โดยใช้เครื่องเขย่า
4. นำไปใส่ใน Waterbath ที่อุณหภูมิ 90-95 องศาเซลเซียส พร้อมเขย่าเป็นเวลา 1 ชั่วโมง
5. นำออกมาทิ้งไว้ให้เย็นจากนั้นจึงนำไปกรอง
6. นำน้ำที่กรองได้มาปรับปริมาตรเป็น 100 มิลลิลิตร
7. นำสารมา 95 มิลลิลิตร ใส่ในบีกเกอร์
8. ใส่สาร Diphenyl carbazide จำนวน 2 มิลลิลิตร
9. ปรับ pH ด้วยกรด Sulfuric acid 10% ให้ pH อยู่ระหว่าง 1.5 - 2.5
10. ปรับปริมาตรเป็น 100 มิลลิลิตรด้วยน้ำกลั่น
11. ตั้งทิ้งไว้ 15 นาที นำไปวัดด้วยเครื่อง Spectrophotometer ที่ความยาวคลื่น 540 นาโน

เมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

The seal of Rajabhat Buriram University is a circular emblem. It features a central sunburst with a crown-like top, flanked by two tiered stupas. Below the sunburst is a central figure, possibly a deity or a royal figure, seated on a throne. The entire emblem is surrounded by a decorative border with Thai script. The text 'ภาคผนวก ข' is centered over the seal, and 'วิธีการสกัดแบบเป็นลำดับขั้น (Sequential extraction)' is written below it.

ภาคผนวก ข
วิธีการสกัดแบบเป็นลำดับขั้น (Sequential extraction)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขั้นที่ 1 ส่วนที่ละลายได้ในกรดและสามารถแลกเปลี่ยนไอออนได้

1. นำตัวอย่างดิน 0.5 กรัม ใส่หลอดป้อนเหยียงพลาสติก ขนาด 50 มิลลิลิตร
2. เติม 0.1 M CH_3COOH ปริมาตร 20 มิลลิลิตร
3. นำไปเขย่า 16 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิห้อง แล้วนำไปปั่นเหยียงเพื่อแยกส่วนใส นาน 10 นาที
4. เก็บส่วนใสใส่ขวดพลาสติก แล้วนำไปเก็บไว้ที่ 4 °C เพื่อรอการวิเคราะห์หาความเข้มข้นด้วยเครื่อง AAS
5. ล้างส่วนที่เหลือด้วยน้ำ DI 10 มิลลิลิตร เขย่าด้วยเครื่องเขย่า นาน 10 นาที
6. นำของแข็งที่เหลือไปทำต่อในขั้นต่อไป

ขั้นที่ 2 ส่วนที่ถูกรีดิวซ์

1. นำของแข็งที่เหลือจากขั้นที่ 1 มาเติม 0.5 M $\text{NH}_2\text{OH}\cdot\text{HCl}$, pH 1.5 ปริมาตร 20 มิลลิลิตร
2. นำไปเขย่า 16 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิห้อง แล้วนำไปปั่นเหยียงเพื่อแยกส่วนใส นาน 10 นาที
3. เก็บส่วนใสใส่ขวดพลาสติก แล้วนำไปเก็บไว้ที่ 4 °C เพื่อรอการวิเคราะห์หาความเข้มข้นด้วยเครื่อง AAS
4. ล้างส่วนที่เหลือด้วยน้ำ DI 10 มิลลิลิตร เขย่าด้วยเครื่องเขย่า นาน 10 นาที
5. นำของแข็งที่เหลือไปทำต่อในขั้นต่อไป

ขั้นที่ 3 ส่วนที่ถูกออกซิไดซ์ได้


1. นำของแข็งที่เหลือจากขั้นที่ 2 มาเติม 8.8 M H_2O_2 ปริมาตร 5 มิลลิลิตรในขวดพลาสติก
2. ปิดฝาขวดแล้วเขย่าด้วยมือ 1 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิห้องและที่อุณหภูมิ 85°C ด้วยอ่างควบคุมอุณหภูมิแบบเขย่า
3. เติม H_2O_2 ปริมาตร 5 มิลลิลิตร เขย่าที่อุณหภูมิ 85°C 1 ชั่วโมง แล้วตั้งทิ้งไว้ให้เย็น
4. เติม 1.0 M $\text{CH}_3\text{COONH}_4$, pH 2 ปริมาตร 25 มิลลิลิตร
5. นำไปเขย่า 16 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิห้อง แล้วนำไปปั่นเหยียงเพื่อแยกส่วนใส นาน 10 นาที
6. เก็บส่วนใสใส่ขวดพลาสติก แล้วนำไปเก็บไว้ที่ 4 °C เพื่อรอการวิเคราะห์หาความเข้มข้นด้วยเครื่อง AAS
7. ล้างส่วนที่เหลือด้วยน้ำ DI 10 มิลลิลิตร เขย่าด้วยเครื่องเขย่า นาน 10 นาที
8. นำของแข็งที่เหลือไปทำต่อในขั้นต่อไป

ขั้นที่ 4 ส่วนที่เหลือ (HNO_3/HCl)

1. นำของแข็งที่เหลือจากขั้นที่ 3 มา 0.5 กรัม ปริมาตร 25 มิลลิลิตร ในขวดพลาสติก
2. เติม HCl 3.5 มิลลิลิตร และ HNO_3 1.15 มิลลิลิตรแล้วเขย่า 16 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิห้อง
3. ตั้งทิ้งไว้ให้เย็น แล้วเทสารละลายใส่ขวดรูปชมพู่ ขนาด 25 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรด้วย 0.5 M HNO_3
4. วิเคราะห์ผลด้วยเครื่อง AAS



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

The seal of Rajabhat Buriram University is a circular emblem. It features a central sunburst with rays emanating from a central point. Below the sunburst are three tiered stupas or pagodas. The entire emblem is surrounded by a decorative border with Thai script. The text within the seal includes "มหาวิทยาลัยราชภัฏบรียรัมย์" (Mahavithayalai Rajabhat Buriram) and "พระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง" (Phra Chomklao Chao Khan Thara Ladkrabang).

ภาคผนวก ก
ลักษณะทางกายภาพ – เคมีของดินที่ใช้ในการศึกษา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค-1 เปรูเซ็นต์ความชื้นของดินที่ใช้ในการศึกษา

ดินตัวอย่าง	ครั้งที่	น้ำหนักกระชก นาฬิกา (กรัม)	น้ำหนัก (กระชกนาฬิกา+ดินเปียก) (กรัม)	น้ำหนัก (กระชกนาฬิกา+ดินแห้ง) (กรัม)
Control+พีช	1	52.3449	62.3442	62.2938
	2	34.2342	44.2357	44.1944
	3	33.9698	43.9702	43.9304
Cr+พีช	1	34.0178	44.0175	43.9942
	2	33.4612	43.4634	43.4195
	3	34.3897	44.3938	44.3453
Cr+EDTA+พีช	1	34.3966	44.3978	44.3363
	2	33.5048	43.5061	43.4525
	3	34.2342	44.2372	44.1819
Cr+EDDS+พีช	1	38.7008	48.7022	48.6598
	2	34.9276	44.9293	44.8788
	3	33.4668	43.4679	43.4112

การคำนวณ

$$\% \text{ ความชื้น} = \left\{ \frac{\text{นน. (กระชกนาฬิกา + ดินเปียก)} - \text{นน. (กระชกนาฬิกา + ดินแห้ง)}}{\text{นน. (กระชกนาฬิกา + ดินแห้ง)}} \right\} \times 100$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค-2 เปอร์เซ็นต์เนื้อดินสัมพัทธ์

ดินตัวอย่าง	ครั้งที่	น้ำหนักดินแห้ง (กรัม)	ค่าที่อ่านได้จากไฮโดรมิเตอร์ (กรัม/ลิตร)			
			อุณหภูมิ(°C)	40 วินาที	อุณหภูมิ(°C)	2 ชั่วโมง
สารละลายคัลกอน	1	0.0000	25	3.5	25	3.5
	2	0.0000	29.5	3.5	29.5	3.5
Control+พีช	-	40.1650	25	16	25	15
Cr+พีช	-	40.0065	25	21	25	15
Cr+EDTA+พีช	-	40.0027	29.5	23	29.5	16
Cr+EDDS+พีช	-	40.0039	25	22	25	16

การคำนวณ

$$R_s = R's + 0.36(T - L)$$

$$\% \text{ Sand} = \left[\frac{W - R_s \text{ ที่ } 40 \text{ วินาที}}{W} \right] \times 100$$

$$\% \text{ Clay} = \frac{R_s \text{ ที่ } 2 \text{ ชั่วโมง}}{W} \times 100$$

$$\% \text{ Silt} = 100 - (\% \text{ Sand} + \% \text{ Clay})$$

- เมื่อ
- R_s = จำนวนกรัมที่ถูกต้องของอนุภาคดินในปริมาตร 1 ลิตร
 - $R's$ = จำนวนกรัมของอนุภาคดินที่ได้อ่านจากไฮโดรมิเตอร์
 - L = อุณหภูมิบนก้านไฮโดรมิเตอร์ (°ซ)
 - T = อุณหภูมิของสารแขวนลอย (°ซ)
 - W = น้ำหนักดินแห้ง (กรัม)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค-3 พีเอชของดินที่ใช้ในการศึกษา

ดินตัวอย่าง	ครั้งที่	พีเอช	อุณหภูมิ (°C)
Control+พีช	1	5.84	28.5
	2	5.93	28.5
	3	6.00	28.6
Cr +พีช	1	5.94	28.5
	2	5.90	28.5
	3	6.11	28.5
Cr+EDTA+พีช	1	5.85	29.0
	2	6.31	28.7
	3	6.29	28.7
Cr+EDDS+พีช	1	5.73	29.1
	2	5.93	28.6
	3	5.79	28.6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค-4 ความจุในการแลกเปลี่ยนประจุบวกของดินที่ใช้ในการศึกษา

ดินตัวอย่าง	ครั้งที่	น้ำหนักดินแห้ง (กรัม)	ปริมาตรของ HCL (มิลลิลิตร)	ความเข้มข้นของ HCL (มิลลิลิตร)
แบลจค์	-	-	0.10	0.10
Control+พีช	1	4.9794	2.90	0.1015
	2	4.9791	3.00	0.1015
	3	4.9807	2.90	0.1015
Cr +พีช	1	4.9838	2.90	0.1015
	2	4.9816	2.90	0.1015
	3	4.9840	2.90	0.1015
Cr+EDTA+พีช	1	4.9737	3.40	0.1015
	2	4.9747	3.40	0.1015
	3	4.9719	3.40	0.1015
Cr+EDDS+พีช	1	4.9762	3.00	0.1015
	2	4.9772	3.00	0.1015
	3	4.9762	3.00	0.1015

การคำนวณ

$$CEC = \frac{(A - B)N \times 100}{X}$$

เมื่อ A = ปริมาตรของกรดไฮโดรคลอริกมาตรฐานที่ใช้ในการไทเทรตกับสารละลายดิน (มิลลิลิตร)

B = ปริมาตรของกรดไฮโดรคลอริกมาตรฐานที่ใช้ในการไทเทรตกับแบลจค์ (มิลลิลิตร)

N = ความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริกมาตรฐาน (นอร์มอล)

X = น้ำหนักแห้งของตัวอย่างดิน (กรัม)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก-5 อินทรีย์วัตถุที่ใช้ในการศึกษา

ดินตัวอย่าง	ครั้งที่	น้ำหนักดินแห้ง (กรัม)	ปริมาตรของ FAS (มิลลิลิตร)	ความเข้มข้นของ FAS (มิลลิลิตร)
แบลنگค์	-	-	20.03	0.4977
Control + ฟีช	1	0.2036	19.40	0.4977
	2	0.2025	19.40	0.4977
	3	0.2036	19.50	0.4977
Cr+ฟีช	1	0.2003	18.00	0.4977
	2	0.1999	18.00	0.4977
	3	0.1994	18.00	0.4977
Cr+EDTA+ฟีช	1	0.2002	16.70	0.4977
	2	0.1997	16.80	0.4977
	3	0.1995	16.70	0.4977
Cr+EDDS+ฟีช	1	0.2002	16.00	0.4977
	2	0.1999	16.10	0.4977
	3	0.2003	16.10	0.4977

การคำนวณ

$$\%OC = \frac{(B-S) \times N \times 0.3}{X}$$

$$\%OM = \%OC \times 1.724$$

เมื่อ B = ปริมาตรของสารละลายเฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟตที่ใช้ในการไทเทรตกับแบลنگค์ (มิลลิลิตร)

S = ปริมาตรของสารละลายเฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟตที่ใช้ในการไทเทรตกับสารละลายดิน (มิลลิลิตร)

N = ความเข้มข้นของสารละลายเฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟต (นอร์มอล)

X = น้ำหนักดินแห้ง (กรัม)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค-6 ความเป็นกรดของดินที่ใช้ในการศึกษา

ดินตัวอย่าง	ครั้งที่	น้ำหนักดิน (กรัม)	ปริมาตรของ HCl (มิลลิลิตร)	ความเข้มข้นของ HCl (มิลลิลิตร)
แบลงค์	-	-	29.63	0.1962
Control+พีช	1	5.0001	26.50	0.1962
	2	5.0007	26.50	0.1962
	3	5.0002	26.40	0.1962
Cr +พีช	1	5.0003	29.50	0.1962
	2	5.0003	29.50	0.1962
	3	5.0000	29.50	0.1962
Cr+EDTA+พีช	1	5.0006	28.60	0.1962
	2	5.0001	28.60	0.1962
	3	5.0007	28.50	0.1962
Cr+EDDS+พีช	1	5.0008	26.40	0.1962
	2	5.0003	26.50	0.1962
	3	5.0005	26.30	0.1962

การคำนวณ

$$\text{ความเป็นกรดของดิน} = \frac{(B-S) \times N \times 100}{X(100 - \% \text{ความชื้น})}$$

- เมื่อ B = ปริมาตรของกรดไฮโดรคลอริกมาตรฐานที่ใช้ในการไทเทรตกับแบลงค์ (มิลลิลิตร)
 S = ปริมาตรของกรดไฮโดรคลอริกมาตรฐานที่ใช้ในการไทเทรตกับสารละลายดิน (มิลลิลิตร)
 N = ความเข้มข้นของสารละลายเฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟต (นอร์มอล)
 X = น้ำหนักดิน (กรัม)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก-7 อนินทรีย์วัตถุในดินที่ใช้ในการศึกษา

สารประกอบ	ดินตัวอย่าง			
	Control+พืช (%)	Cr+ พืช (%)	Cr+EDTA+พืช (%)	Cr+EDDS+พืช (%)
Al ₂ O ₃	30.1	29.4	30.6	22.6
SiO ₂	65.2	68.6	66.6	55.7
TiO ₂	1.70			1.88
MnO	0.549			1.01
Fe ₂ O ₃	2.10	1.80	2.02	2.16
NiO				0.469
CuO	0.145	0.140	0.168	0.494
ZrO ₂	0.237		0.234	0.281
La ₂ O ₃				5.05
Sm ₂ O ₃				3.64
Gd ₂ O ₃				2.86
Dy ₂ O ₃				1.04
Er ₂ O ₃				1.32
Yb ₂ O ₃				1.43
MgO			0.309	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ง-1 รูปฟอร์มของโครเมียมที่พบในตัวอย่างดิน

ดินตัวอย่าง		ครั้งที่	น้ำหนัก ดินแห้ง (กรัม)	Abs. เบลงค์	Abs. ตัวอย่าง	ปริมาตร สารละลาย (มล.)	กราฟมาตรฐาน	
รูปที่ละลายและสามารถแลกเปลี่ยนไอออนได้	Control+ ขลุ่	1	0.5004	0.0000	0.006	50	Y = 0.0983X	
		2	0.5007	0.0000	0.006	50		
		3	0.5007	0.0000	0.006	50		
	Cr+ ขลุ่	1	0.5012	0.0000	0.010	50		
		2	0.5019	0.0000	0.010	50		
		3	0.5001	0.0000	0.010	50		
	Cr+EDTA+ ขลุ่	1	0.5014	0.0000	0.016	50		
		2	0.5004	0.0000	0.015	50		
		3	0.5024	0.0000	0.016	50		
	Cr+EDDS+ ขลุ่	1	0.5007	0.0000	0.022	50		
		2	0.5006	0.0000	0.022	50		
		3	0.5010	0.0000	0.019	50		
	Control+ หญ้าแพรก	1	0.5124	0.0000	0.000	25		Y = 0.0068X
		2	0.5015	0.0000	0.000	25		
	Cr+ หญ้าแพรก	1	0.5102	0.0000	0.002	25		
		2	0.5166	0.0000	0.002	25		
	Cr+EDTA+ หญ้าแพรก	1	0.5122	0.0000	0.005	25		
		2	0.5139	0.0000	0.004	25		
Cr+EDDS+ หญ้าแพรก	1	0.5044	0.0000	0.005	25			
	2	0.5113	0.0000	0.005	25			

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ง-1 (ต่อ)

ดินตัวอย่าง		ครั้งที่	น้ำหนัก ดินแห้ง (กรัม)	Abs. เบลงค์	Abs. ตัวอย่าง	ปริมาตร สารละลาย (มล.)	กราฟมาตรฐาน	
รูปที่จับกับแมงกานีสออกไซด์	Control + ขลุ่	1	0.5004	0.0000	0.005	50	Y = 0.0983X	
		2	0.5007	0.0000	0.004	50		
		3	0.5007	0.0000	0.004	50		
	Cr+ ขลุ่	1	0.5012	0.0000	0.056	50		
		2	0.5019	0.0000	0.067	50		
		3	0.5001	0.0000	0.055	50		
	Cr+EDTA+ ขลุ่	1	0.5014	0.0000	0.072	50		
		2	0.5004	0.0000	0.066	50		
		3	0.5024	0.0000	0.073	50		
	Cr+EDDS+ ขลุ่	1	0.5007	0.0000	0.078	50		
		2	0.5006	0.0000	0.087	50		
		3	0.5010	0.0000	0.088	50		
	Control + หญ้าแพรก	1	0.5124	0.0000	-	25		Y = 0.0068X
		2	0.5015	0.0000	-	25		
	Cr+ หญ้าแพรก	1	0.5102	0.0000	0.028	25		
		2	0.5166	0.0000	0.030	25		
	Cr+EDTA+ หญ้าแพรก	1	0.5122	0.0000	0.027	25		
		2	0.5139	0.0000	0.023	25		
	Cr+EDDS+ หญ้าแพรก	1	0.5044	0.0000	0.030	25		
		2	0.5113	0.0000	0.027	25		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ง-1 (ต่อ)

ดินตัวอย่าง		ครั้งที่	น้ำหนัก ดินแห้ง (กรัม)	Abs. เบลงค์	Abs. ตัวอย่าง	ปริมาตร สารละลาย (มล.)	กราฟมาตรฐาน	
รูปที่จับกับเหล็กออกไซด์	Control + ขลุ่	1	0.5004	0.0000	-	50	Y = 0.0034X	
		2	0.5007	0.0000	-	50		
		3	0.5007	0.0000	-	50		
	Cr +ขลุ่	1	0.5012	0.0000	0.008	50		
		2	0.5019	0.0000	0.006	50		
		3	0.5001	0.0000	0.005	50		
	Cr+EDTA+ ขลุ่	1	0.5014	0.0000	0.005	50		
		2	0.5004	0.0000	0.005	50		
		3	0.5024	0.0000	0.003	50		
	Cr+EDDS+ ขลุ่	1	0.5007	0.0000	0.004	50		
		2	0.5006	0.0000	0.004	50		
		3	0.5010	0.0000	0.003	50		
	Control+ หลู้าแพรก	1	0.5124	0.0000	-	50		Y = 0.0068X
		2	0.5015	0.0000	-	50		
	Cr+ หลู้าแพรก	1	0.5102	0.0000	0.011	50		
		2	0.5166	0.0000	0.008	50		
	Cr+EDTA+ หลู้าแพรก	1	0.5122	0.0000	0.007	50		
		2	0.5139	0.0000	0.006	50		
Cr+EDDS+ หลู้าแพรก	1	0.5044	0.0000	0.007	50			
	2	0.5113	0.0000	0.004	50			

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ง-1 (ต่อ)

ดินตัวอย่าง		ครั้งที่	น้ำหนัก ดินแห้ง (กรัม)	Abs. เบลนจ์	Abs. ตัวอย่าง	ปริมาตร สารละลาย (มล.)	กราฟมาตรฐาน
รูปที่เหลือ	Control+ ขลุ้	1	0.5004	0.0000	-	50	Y = 0.0034X
		2	0.5007	0.0000	-	50	
		3	0.5007	0.0000	-	50	
	Cr +ขลุ้	1	0.5012	0.0000	-	50	
		2	0.5019	0.0000	-	50	
		3	0.5001	0.0000	-	50	
	Cr+EDTA+ ขลุ้	1	0.5014	0.0000	-	50	
		2	0.5004	0.0000	-	50	
		3	0.5024	0.0000	-	50	
	Cr+EDDS+ ขลุ้	1	0.5007	0.0000	-	50	
		2	0.5006	0.0000	-	50	
		3	0.5010	0.0000	-	50	
	Control+ หญ้าแพรก	1	0.5124	0.0000	-	25	Y = 0.0068X
		2	0.5015	0.0000	-	25	
	Cr+หญ้า แพรก	1	0.5102	0.0000	-	25	
		2	0.5166	0.0000	-	25	
	Cr+EDTA+ หญ้าแพรก	1	0.5122	0.0000	-	25	
		2	0.5139	0.0000	-	25	
Cr+EDDS+ หญ้าแพรก	1	0.5044	0.0000	-	25		
	2	0.5113	0.0000	-	25		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก จ

ผลการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ จ-1 ผลที่ได้จากการทดสอบสมมติฐาน โดยใช้โปรแกรมการวิเคราะห์ทางสถิติ ANOVA ของดิน
ตัวอย่างที่ปนเปื้อนโครเมียม

(รูปของโครเมียมที่จับกับแมงกานีสออกไซด์ในดินตัวอย่างทั้ง 8 ชุดดิน)

ชุดตัวอย่างดิน		ผลการทดสอบทางสถิติ		
		Sig.	P	ผล*
Cr + หลุม้าแพรก	Cr + EDTA + หลุม้าแพรก	0.652	0.05	ND
	Cr + EDDS + หลุม้าแพรก	1.000	0.05	ND
	Cr + ขลุ่	0.036	0.05	D
	Cr + EDTA + ขลุ่	0.702	0.05	ND
	Cr + EDDS + ขลุ่	0.586	0.05	ND
Cr + EDTA + หลุม้าแพรก	Cr + หลุม้าแพรก	0.652	0.05	ND
	Cr + EDDS + หลุม้าแพรก	0.615	0.05	ND
	Cr + ขลุ่	0.369	0.05	ND
	Cr + EDTA + ขลุ่	1.000	0.05	ND
	Cr + EDDS + ขลุ่	0.067	0.05	D
Cr + EDDS + หลุม้าแพรก	Cr + หลุม้าแพรก	1.000	0.05	ND
	Cr + EDTA + หลุม้าแพรก	0.615	0.05	ND
	Cr + ขลุ่	0.033	0.05	D
	Cr + EDTA + ขลุ่	0.663	0.05	ND
	Cr + EDDS + ขลุ่	0.626	0.05	ND
Cr + ขลุ่	Cr + หลุม้าแพรก	0.036	0.05	D
	Cr + EDTA + หลุม้าแพรก	0.369	0.05	ND
	Cr + EDDS + หลุม้าแพรก	0.033	0.05	D
	Cr + EDTA + ขลุ่	0.191	0.05	ND
	Cr + EDDS + ขลุ่	0.002	0.05	D

*ND = ยอมรับสมมติฐานหลัก (H_0) D = ปฏิเสธสมมติฐานหลัก (H_0)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ จ-1 (ต่อ)

ชุดตัวอย่างดิน		ผลการทดสอบทางสถิติ		
		Sig.	<i>P</i>	ผล*
Cr + EDTA + ขลุ่	Cr + หลู้แพรก	0.702	0.05	ND
	Cr + EDTA + หลู้แพรก	1.000	0.05	ND
	Cr + EDDS + หลู้แพรก	0.663	0.05	ND
	Cr + ขลุ่	0.191	0.05	ND
	Cr + EDDS + ขลุ่	0.056	0.05	ND
Cr + EDDS + ขลุ่	Cr + หลู้แพรก	0.586	0.05	ND
	Cr + EDTA + หลู้แพรก	0.067	0.05	ND
	Cr + EDDS + หลู้แพรก	0.626	0.05	ND
	Cr + ขลุ่	0.002	0.05	D
	Cr + EDTA + ขลุ่	0.056	0.05	ND

*ND = ยอมรับสมมติฐานหลัก (H_0) D = ปฏิเสธสมมติฐานหลัก (H_0)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ จ-2 ผลที่ได้จากการทดสอบสมมติฐาน โดยใช้โปรแกรมการวิเคราะห์ทางสถิติ ANOVA ของดิน
ตัวอย่างที่ปนเปื้อนโครเมียม
(รูปของโครเมียมที่จับกับเหล็กออกไซด์ในดินตัวอย่างทั้ง 8 ชุดดิน)

ชุดตัวอย่างดิน		ผลการทดสอบทางสถิติ		
		Sig.	<i>P</i>	ผล*
Cr + หนุ้าแพรก	Cr + EDTA + หนุ้าแพรก	0.618	0.05	ND
	Cr + EDDS + หนุ้าแพรก	0.406	0.05	ND
	Cr + ขลู่	1.000	0.05	ND
	Cr + EDTA + ขลู่	0.349	0.05	ND
	Cr + EDDS + ขลู่	0.044	0.05	D
Cr + EDTA + หนุ้าแพรก	Cr + หนุ้าแพรก	0.618	0.05	ND
	Cr + EDDS + หนุ้าแพรก	0.998	0.05	ND
	Cr + ขลู่	0.683	0.05	ND
	Cr + EDTA + ขลู่	0.999	0.05	ND
	Cr + EDDS + ขลู่	0.460	0.05	ND
Cr + EDDS + หนุ้าแพรก	Cr + หนุ้าแพรก	0.046	0.05	ND
	Cr + EDTA + หนุ้าแพรก	0.998	0.05	ND
	Cr + ขลู่	0.444	0.05	ND
	Cr + EDTA + ขลู่	1.000	0.05	ND
	Cr + EDDS + ขลู่	0.700	0.05	ND
Cr + ขลู่	Cr + หนุ้าแพรก	1.000	0.05	ND
	Cr + EDTA + หนุ้าแพรก	0.683	0.05	ND
	Cr + EDDS + หนุ้าแพรก	0.444	0.05	ND
	Cr + EDTA + ขลู่	0.370	0.05	ND
	Cr + EDDS + ขลู่	0.036	0.05	D

*ND = ยอมรับสมมติฐานหลัก (H_0) D = ปฏิเสธสมมติฐานหลัก (H_0)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ จ-2 (ต่อ)

ชุดตัวอย่างดิน		ผลการทดสอบทางสถิติ		
		Sig.	P	ผล*
Cr + EDTA + ขลุ่	Cr + หลู้แพรก	0.349	0.05	ND
	Cr + EDTA + หลู้แพรก	0.999	0.05	ND
	Cr + EDDS + หลู้แพรก	1.000	0.05	ND
	Cr + ขลุ่	0.370	0.05	ND
	Cr + EDDS + ขลุ่	0.568	0.05	ND
Cr + EDDS + ขลุ่	Cr + หลู้แพรก	0.044	0.05	D
	Cr + EDTA + หลู้แพรก	0.460	0.05	ND
	Cr + EDDS + หลู้แพรก	0.700	0.05	ND
	Cr + ขลุ่	0.036	0.05	D
	Cr + EDTA + ขลุ่	0.568	0.05	ND

*ND = ขอมรับสมมติฐานหลัก (H_0) D = ปฏิเสธสมมติฐานหลัก (H_0)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ จ-3 ผลที่ได้จากการทดสอบสมมติฐาน โดยใช้โปรแกรมการวิเคราะห์ทางสถิติ ANOVA ของดิน
ตัวอย่างที่ปนเปื้อนโครเมียม
(รูปของโครเมียมที่ละลายได้และสามารถแลกเปลี่ยนไอออนได้ในดินที่ปลูกต้นขลุ่ยโดย
เปรียบเทียบการมีคิเลตและไม่มีคิเลต)

ชุดตัวอย่างดิน		ผลการทดสอบทางสถิติ		
		Sig.	P	ผล*
Cr + ขลุ่ย	Cr + EDTA + ขลุ่ย	0.003	0.05	D
	Cr + EDDS + ขลุ่ย	0.000	0.05	D
Cr + EDTA + ขลุ่ย	Cr + ขลุ่ย	0.003	0.05	D
	Cr + EDDS + ขลุ่ย	0.002	0.05	D
Cr + EDDS + ขลุ่ย	Cr + ขลุ่ย	0.000	0.05	D
	Cr + EDTA + ขลุ่ย	0.002	0.05	D

*ND = ขอมรับสมมติฐานหลัก (H_0) D = ปฏิเสธสมมติฐานหลัก (H_0)

ตารางที่ จ-4 ผลที่ได้จากการทดสอบสมมติฐาน โดยใช้โปรแกรมการวิเคราะห์ทางสถิติ ANOVA ของดิน
ตัวอย่างที่ปนเปื้อนโครเมียม
(รูปของโครเมียมที่ละลายได้และสามารถแลกเปลี่ยนไอออนได้ในดินที่ปลูกหญ้าแพรกโดย
เปรียบเทียบการมีคิเลตและไม่มีคิเลต)

ชุดตัวอย่างดิน		ผลการทดสอบทางสถิติ		
		Sig.	P	ผล*
Cr + หญ้าแพรก	Cr + EDTA + หญ้าแพรก	0.002	0.05	D
	Cr + EDDS + หญ้าแพรก	0.001	0.05	D
Cr + EDTA + หญ้าแพรก	Cr + หญ้าแพรก	0.002	0.05	D
	Cr + EDDS + หญ้าแพรก	0.112	0.05	ND
Cr + EDDS + หญ้าแพรก	Cr + หญ้าแพรก	0.001	0.05	D
	Cr + EDTA + หญ้าแพรก	0.112	0.05	ND

*ND = ขอมรับสมมติฐานหลัก (H_0) D = ปฏิเสธสมมติฐานหลัก (H_0)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้