

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การศึกษารูปแบบของแคดเมียมในดินปนเปื้อน



T107800



นางสาวกนกวรรณ เกษประดิษฐ์  
นางสาวปัฐริกา วีระสามนต์  
นางสาวศุภลักษณ์ ฉีลาบุษภิญโญ

เลขหมู่.....  
เลขทะเบียน 107800  
วัน,เดือน,ปี 14 พ.ค. 2553

b. 12212313  
i.....

โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต  
สาขาเคมีทรัพยากรสิ่งแวดล้อม  
ภาควิชาเคมี  
คณะวิทยาศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2549

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**The Study of Cadmium forms in Contaminated Soils**



**A Special Project Submitted in Partial Fulfillment of the Requirement for the Degree of  
Bachelor of Science**

**Major of Environmental Resource Chemistry**

**Department of Chemistry**

**Faculty of Science**

**King Monkut's Institute of Technology Ladkrabang**

**Academic Year 2006**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**โครงการพิเศษเรื่อง** การศึกษารูปแบบของแคดเมียมในดินปนเปื้อน  
**นักศึกษา** นางสาวกนกวรรณ เกษประดิษฐ์  
 นางสาวปัฐติดา ชีระสานต์  
 นางสาวศุภลักษณ์ ลีถานุชภิญโญ  
**ภาควิชา** เคมี  
**สาขาวิชา** เคมีทรัพยากรสิ่งแวดล้อม  
**อาจารย์ที่ปรึกษา** ผศ.พิสมัย ชัยรัตน์อุทัย

ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง อนุมัติให้  
 โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการตรวจสอบ	ลายมือชื่อ
ประธานกรรมการ ผศ. กรองแก้ว ทิพย์ศักดิ์	
กรรมการ ดร. วิบูลย์ ประดิษฐ์เวียงคำ	
กรรมการ ผศ. พิสมัย ชัยรัตน์อุทัย	



(ผศ.ดร.ประยงค์ ดวงดี)

หัวหน้าภาควิชา

**ลิขสิทธิ์ของภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์**  
**สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

<b>โครงการพิเศษเรื่อง</b>	การศึกษารูปแบบของแคดเมียมในดินปนเปื้อน
<b>นักศึกษา</b>	นางสาวกนกวรรณ เกษประดิษฐ์ นางสาวปัฐริกา ธีระสานต์ นางสาวสุกัลกษณ์ ลีลาบุษกัญญา
<b>ภาควิชา</b>	เคมี
<b>สาขาวิชา</b>	เคมีทรัพยากรสิ่งแวดล้อม
<b>ปีการศึกษา</b>	2549
<b>อาจารย์ที่ปรึกษา</b>	ผศ.พิสมัย ชัยรัตน์อุทัย

### บทคัดย่อ

โครงการพิเศษนี้เป็นการศึกษารูปแบบของแคดเมียมในดินที่ปนเปื้อนก่อนและหลังการล้างดินด้วยสารละลายไทรทอนเอกซ์ – 100 ร่วมกับโซเดียมไฮดรอกไซด์ ดินที่นำมาทำการทดลองเป็นดินปนเปื้อน 2 ตัวอย่างเก็บมาจากบริเวณห้วยแม่ตาว อำเภอแม่สอด จังหวัดตาก นำมาเติมสารละลายแคดเมียมในรูปโลหะไนเตรท 1 มิลลิโมลต่อลิตร ในสัดส่วนดิน:สารละลายแคดเมียม 1 กรัม:10 มิลลิลิตร ทิ้งไว้เป็นระยะเวลา 1 สัปดาห์ คือดินชุดที่ 1 และ 2 ขณะที่ดินที่ทิ้งไว้ 12 สัปดาห์ คือดินชุดที่ 3 และ 4 ตามลำดับ จากนั้นทำการทดลองโดยการล้างดินด้วยสารละลายไทรทอนเอกซ์ – 100 ร่วมกับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ศึกษาแบบของแคดเมียมก่อนและหลังการล้างด้วยวิธีการสกัดแบบเป็นลำดับขั้น และเปรียบเทียบรูปแบบของแคดเมียมที่ระยะเวลา 1 สัปดาห์ และ 12 สัปดาห์ ในการล้างดินใช้ สารละลายไทรทอนเอกซ์ – 100 และสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ที่มีความเข้มข้นเท่ากับ 0.025 โมลาร์และ 0.336 โมลาร์ตามลำดับ ควบคุมอัตราการเขย่าที่ 150 รอบต่อนาที ระยะเวลาในการเขย่า 24 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิห้อง pH = 7 และผ่านการกรองด้วยกระดาษกรองขนาด 0.45 ไมโครเมตร วิเคราะห์หาปริมาณแคดเมียมโดยใช้เครื่องอะตอมมิกแอบซอร์บชันสเปกโทรมิเตอร์ ผลการศึกษาพบว่า ลักษณะทางกายภาพและทางเคมีของดินทั้ง 4 ชุดมีลักษณะที่คล้ายคลึงกัน แตกต่างกันในลักษณะของเนื้อดิน โดยดินชุดที่ 1 และชุดที่ 3 มีลักษณะเนื้อดินเป็นดินร่วนเหนียวปนทราย ดินชุดที่ 2 และชุดที่ 4 มีลักษณะเนื้อดินเป็นดินร่วนปนทราย และที่ระยะเวลา 1 สัปดาห์หลังจากการเติมสารละลายแคดเมียมลงไป สารละลายไทรทอนเอกซ์-100 ผสมกับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์มีประสิทธิภาพในการล้างแคดเมียมออกจากดินได้สูงกว่าที่ระยะเวลา 12 สัปดาห์ โดยในดินชุดที่ 1 มีค่าเท่ากับ 87.38 เปอร์เซ็นต์ ดินชุดที่ 2 มีค่าเท่ากับ 77.47 เปอร์เซ็นต์ ดินชุดที่ 3 มีค่าเท่ากับ 85.65 เปอร์เซ็นต์ และดินชุดที่ 4 มีค่าเท่ากับ 75.33 เปอร์เซ็นต์ สำหรับการสกัดแบบเป็นลำดับขั้นประกอบด้วย 6 ขั้นตอน เพื่อศึกษารูปแบบของแคดเมียมดังนี้คือ รูปที่เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ละลายน้ำ รูปที่แลกเปลี่ยนไอออนได้ รูปคาร์บอเนต รูปออกไซด์และไฮดรอกไซด์ รูปสารอินทรีย์ และรูปที่เหลือ โดยให้มีระยะเวลาที่สารละลายแคลเซียมสะสมในดิน 1 สัปดาห์กับ 12 สัปดาห์ พบว่ารูปแบบของแคลเซียมในดินที่ปนเปื้อนส่วนใหญ่อยู่ในรูปที่ละลายน้ำและรูปที่แลกเปลี่ยนไอออนได้ และเมื่อระยะเวลายาวนานขึ้นรูปที่แลกเปลี่ยนไอออนได้มีแนวโน้มลดลง ขณะที่สัดส่วนรูปคาร์บอเนตเพิ่มขึ้น ในขณะที่หลังการล้างสัดส่วนแคลเซียมรูปคาร์บอเนตมีแนวโน้มลดลงเมื่อระยะเวลายาวนานขึ้น

**คำสำคัญ :** แคลเซียม การล้างดิน สารลดแรงตึงผิว ลิแกนด์ การสกัดลำดับชั้น



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

<b>Special Project Title</b>	The Study of Cadmium forms in Contaminated Soils
<b>Name</b>	Miss Kanokwan Ketpradit Miss Pattida Dhirasan Miss Supalag Leelanuchpinyo
<b>Department</b>	Chemistry
<b>Program</b>	Environmental Resource Chemistry
<b>Academic Year</b>	2006
<b>Special Project Advisor</b>	Asst.Prof. Pitsamai Chairatu-tai

### Abstract

The objective of this special project is to study the cadmium forms in contaminated soils and soils after washing with Triton X-100 combined with sodium iodide solution. Two samples of naturally contaminated soil were sampling from Mae Tao creek, Maesod district, Tak province. These soil samples were spiked with 1 mM of cadmium nitrate solution by the ratio of soil : solution at 1 gram : 10 mL, left for 1 week ( soil sample No.1 and 2 )and 12 weeks (soil sample No.3 and 4 ) and then studied the sequential extraction to find out the various forms of cadmium in soil before and after washing with mixed solution of 0.025 M Triton X – 100 and 0.336 M sodium iodide. For soil washing process, the shaking rate, washing time, temperature, pH and pore size filters were fixed at 150 rpm , 24 hours, room temperature, pH 7 and 0.45  $\mu$ m, respectively. After centrifuged and separated the aliquots, the residue soils were taken to digest using microwave digestion and then filtered. All aliquots were then taken to determine the amount of cadmium using atomic absorption spectrophotometer (AAS). The results show that the physical and chemical characterization of contaminated soil samples No.1 and 3 were sandy clay loam and soil sample No 2 and 4 were sandy loam texture. The cadmium removal from 1 week spiked soil samples were better than 12 weeks spiked soil sample. The effective of cadmium for soil sample No.1, 2, 3 and 4 were 87.38, 77.47, 85.65 and 75.33 percents, respectively. The sequential extraction experiment contains 6 steps to study on the 6 forms of cadmium, soluble, exchangeable, carbonate, oxide and hydroxide, organic and residual forms. The results showed that the major forms of cadmium in contaminated soil were soluble form and exchangeable form.

For the long period of accumulate cadmium in soils, the exchangeable form was decrease but

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

carbonate form and organic form have trend to increase, while the carbonate form have trend to decrease after washing process.

Key words: Cadmium, Soil washing, Surfactant, Ligand, Sequential Extraction



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## กิตติกรรมประกาศ

โครงการพิเศษนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีด้วยคำแนะนำและการดูแลเอาใจใส่ของอาจารย์ผู้ควบคุมโครงการพิเศษ ผศ.พิสมัย ชัยรัตน์อุทัย ผู้จัดทำโครงการขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบพระคุณ ผศ.กรองแก้ว ทิพย์ศักดิ์ และ ดร.วิบูลย์ ประดิษฐ์เวียงคำที่ได้ให้ข้อคิดเห็นและข้อเสนอแนะตลอดจนช่วยตรวจรายละเอียดต่าง ๆ ในโครงการพิเศษฉบับนี้

ขอขอบพระคุณนักวิทยาศาสตร์ และนักศึกษาปริญญาโท ภาควิชาเคมีและภาคชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง หน่วยเครื่องมือกลาง คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล วิทยาเขตพญาไท ที่คอยให้ความช่วยเหลือ อำนวยความสะดวก และกำลังใจในการทำโครงการพิเศษจนสำเร็จลุล่วงเป็นอย่างดี

สุดท้ายขอขอบพระคุณบิดา มารดา บุคคลในครอบครัวและเพื่อน ๆ ที่คอยให้ความช่วยเหลือ และเป็นกำลังใจอย่างดีมาตลอดจนโครงการนี้สำเร็จในที่สุด

กนกวรรณ เกษประดิษฐ์

ปัฐริดา ชีระสานต์

ศุภลักษณ์ ลีตลานุชฎิญา

25 มีนาคม 2550

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ค
กิตติกรรมประกาศ	จ
สารบัญ	ฉ
สารบัญตาราง	ณ
สารบัญรูป	ญ
คำย่อและสัญลักษณ์ที่ใช้	ฎ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาของ โครงการพิเศษ	1
1.2 วัตถุประสงค์	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	2
1.4 ขั้นตอนการวิจัยและวิธีดำเนินงาน	2
1.5 ผลที่คาดว่าจะได้รับ	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ	3
2.1 การบำบัดดิน	4
2.1.1 วิธีการบำบัดดิน	5
2.2 การล้างดิน (Soil Washing and Soil Flushing)	5
2.2.1 สารเคมีที่ใช้ในการล้าง โลหะหนักออกจากดิน	5
2.3 สารลดแรงตึงผิว (Surfactant)	6
2.3.1 ประเภทของสารลดแรงตึงผิว	6
2.3.2 ลักษณะของสารลดแรงตึงผิว	8
2.3.3 ความสามารถในการละลายของสารลดแรงตึงผิว	9
2.3.4 ไทรทอนเอกซ์ – 100	10
2.4 การประยุกต์ใช้สารประกอบทิกแทนต์กับสารลดแรงตึงผิว	10
2.5 โลหะหนัก	12
2.5.1 แคดเมียม	12
2.6 การสกัดแบบเป็นลำดับขั้น	16
2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	18

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย	21
3.1 อุปกรณ์และสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง	21
3.1.1 อุปกรณ์	21
3.1.2 สารเคมี	22
3.2 ที่มาของตัวอย่างดิน	22
3.3 วิธีการทดลอง	23
3.3.1 การศึกษาลักษณะทางกายภาพและทางเคมีของดิน	23
3.3.2 การเติมสารละลายแคลเซียม (Spike) ลงไปในดิน	24
3.3.4 การศึกษาปริมาณแคลเซียมในดิน	24
3.3.5 การศึกษารูปแบบของแคลเซียมในดินด้วยวิธีการสกัดแบบเป็นลำดับขั้น	25
3.3.7 การล้างดินที่ปนเปื้อนด้วยสารละลายไทรทอนเอกซ์-100 ร่วมกับลิแกนด์ไอโอไดด์	27
บทที่ 4 ผลการทดลองและอภิปรายผล	29
4.1 การศึกษาลักษณะทางกายภาพและทางเคมีของดิน	29
4.2 การศึกษาการล้างแคลเซียมออกจากดินด้วยไทรทอนเอกซ์-100 ร่วมกับโซเดียมไอโอไดด์	30
4.3 การศึกษารูปแบบของแคลเซียมในดิน	32
4.3.1 เปรียบเทียบรูปแบบของแคลเซียมในดินก่อนและหลังการล้างด้วยไทรทอนเอกซ์-100 ร่วมกับโซเดียมไอโอไดด์	32
4.3.2 เปรียบเทียบรูปแบบของแคลเซียมในดินที่ระยะเวลา 1 สัปดาห์ และ 12 สัปดาห์	34
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	36
5.1 สรุปผลการทดลอง	36
5.2 ข้อเสนอแนะ	37
บรรณานุกรม	38
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก การวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพและเคมีของดิน	41

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ในงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

ภาคผนวก ข การเตรียมสารละลายแคดเมียมในรูปโลหะในเตรท	49
ภาคผนวก ค การเตรียมสารละลาย	
ไทรทอนเอกซ์-100 และสารละลายโซเดียมไอโอดด์	51
ภาคผนวก ง ผลการทดลอง	53
ภาคผนวก จ มาตรฐานคุณภาพดินเพื่อการอยู่อาศัยและการเกษตรกรรม	61



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญตาราง

	หน้า
<b>ตารางที่ 3.1</b> วิธีการวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพและทางเคมีของดิน	23
<b>ตารางที่ 4.1</b> ลักษณะทางกายภาพและทางเคมีของดิน	30
<b>ตารางที่ 4.1</b> ค่าพีเอชของดินตัวอย่าง	54
<b>ตารางที่ 4.2</b> ความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวกของดินตัวอย่าง	54
<b>ตารางที่ 4.3</b> ปริมาณอินทรีย์สารของดินตัวอย่าง	54
<b>ตารางที่ 4.4</b> ปริมาณคาร์บอนอินทรีย์ของดินตัวอย่าง	55
<b>ตารางที่ 4.5</b> ปริมาณความชื้นของดินตัวอย่าง	55
<b>ตารางที่ 4.6</b> การกระจายตัวของอนุภาคของดินตัวอย่าง	55
<b>ตารางที่ 4.7</b> ปริมาณแคลเซียมทั้งหมดที่พบในดิน	56
<b>ตารางที่ 4.8</b> รูปแบบแคลเซียมที่พบในดินก่อนการล้างดิน	57
<b>ตารางที่ 4.9</b> ปริมาณแคลเซียมในดินและน้ำที่ถูกระบายออกจากการล้างดิน	58
<b>ตารางที่ 4.10</b> รูปแบบแคลเซียมที่พบในดินหลังการล้างดิน	59
<b>ตารางที่ 4.1</b> ค่ามาตรฐานคุณภาพดินเพื่อการอยู่อาศัยและการเกษตรกรรม	61

## สารบัญรูป

<b>รูปที่ 2.1</b> โครงสร้างมอนอเมอร์ของสารลดแรงตึงผิว	หน้า
<b>รูปที่ 2.2</b> สูตร โครงสร้างของ ไทรทอนเอกซ์-100	8
<b>รูปที่ 4.1</b> ปริมาณแคคเมียมในดินและในน้ำที่ถูกระบายออกมา	10
<b>รูปที่ 4.2</b> สัดส่วนของแคคเมียมรูปแบบต่างๆ ในดินก่อนและหลังล้าง	31
<b>รูปที่ 4.3</b> สัดส่วนของแคคเมียมรูปแบบต่างๆ ในดินเมื่อระยะเวลาเปลี่ยนแปลงไป	32
<b>รูปที่ ข-1</b> สามเหลี่ยมจำแนกเนื้อสัมผัสของดิน	34
	46



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## คำย่อและสัญลักษณ์ที่ใช้

มล.	มิลลิลิตร
มก./กก	มิลลิกกรัมต่อกิโลกรัม
Cd	Cadmium
[CdI <sub>3</sub> ] <sup>-</sup>	Cadmium trichloride
[CdI <sub>4</sub> ] <sup>2-</sup>	Cadmium tetraiodide
CMC	Critical Micelle Concentration
CEC	Cation exchange capacity
g	กรัม
I <sup>-</sup>	Iodide
meq/g	มิลลิกกรัมสมมูลต่อกรัม
mg/kg	มิลลิกกรัมต่อกิโลกรัม
mM	มิลลิโมลาร์
mmol/kg	มิลลิโมลต่อกิโลกรัม
mol	โมล
MW	มวลโมเลกุล
rpm	รอบต่อนาที
SCN <sup>-</sup>	Thiocyanate
S.D.	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทอนเอกซ์-100 ผสมกับสารละลายโซเดียมไอโอไดด์มีประสิทธิภาพในการล้างแคดเมียมที่ปนเปื้อนในดินดีกว่าสารละลายโซเดียมโคเดซิลซัลเฟตผสมกับสารละลายโซเดียมไอโอไดด์ (พิลดาและคณะ 2548) ดังนั้นในโครงการพิเศษนี้ จึงนำดินจากบริเวณดังกล่าวมาฟื้นฟูด้วยการล้างดินด้วยสารละลายไฮดรอกไซด์-100 ผสมกับสารละลายโซเดียมไอโอไดด์ และศึกษารูปแบบของแคดเมียมที่ถูกจับยึดอยู่ในดิน เพื่อเป็นการศึกษาหาแนวทางที่เหมาะสมและมีประสิทธิภาพมากที่สุดในการบำบัดและฟื้นฟูสภาพดินที่มีการปนเปื้อน

## 1.2 วัตถุประสงค์

1. ศึกษาสมบัติทางกายภาพและเคมีของดินที่มีผลต่อการจับยึดโลหะหนัก
2. ศึกษาประสิทธิภาพการล้างดินด้วยสารละลายไฮดรอกไซด์-100 ร่วมกับโซเดียมไอโอไดด์
3. ศึกษารูปแบบของแคดเมียมที่ถูกจับยึดอยู่ในดิน

## 1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1. ดินที่ใช้ในการทดลองเก็บจากพื้นที่ที่มีการปนเปื้อนจากการทำเหมืองแร่สังกะสีบริเวณห้วยแม่ดาว อำเภอแม่สอด จังหวัดตาก โดยเก็บดินในพื้นที่ 2 แหล่ง ที่มีปริมาณแคดเมียมที่แตกต่างกัน คือ บริเวณที่มีการปนเปื้อนน้อย (น้อยกว่า 20 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมดินแห้ง) และบริเวณที่มีการปนเปื้อนมาก (มากกว่า 20 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมดินแห้ง)
2. ศึกษาระยะเวลาที่มีผลต่อประสิทธิภาพการล้างดิน
3. ศึกษาสัดส่วนของแคดเมียมรูปแบบต่างๆ ในดินก่อนและหลังการล้างดิน ด้วยวิธีการสกัดแบบเป็นลำดับขั้น (sequential extraction)
4. ศึกษาระยะเวลาที่มีผลต่อรูปแบบของแคดเมียมในดินก่อนและหลังการล้างดิน

## 1.5 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

ทราบถึงรูปแบบที่แคดเมียมถูกจับยึดอยู่ในดิน เพื่อสามารถหาแนวทางกำจัดแคดเมียมออกจากดินที่ปนเปื้อนให้เหลือน้อยที่สุด เพื่อนำดินกลับคืนสู่ธรรมชาติ และลดสารมลพิษในสิ่งแวดล้อม

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาของโครงการพิเศษ

ในปัจจุบันนี้มีการพัฒนาทางด้านเทคโนโลยีและอุตสาหกรรมอย่างมาก ส่งผลให้เกิดการขยายตัวของโรงงานอุตสาหกรรมต่างๆขึ้น และก่อให้เกิดปัญหามลพิษที่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมตามมา โดยเฉพาะสารมลพิษที่สำคัญอย่างแคดเมียม สำหรับประเทศไทยปัญหาการปนเปื้อนของแคดเมียมในดินที่ได้รับความสนใจ คือปัญหาการปนเปื้อนแคดเมียมในดินที่ห้วยแม่ดาว อำเภอแม่สอด จังหวัดตาก ที่มีการทำเหมืองแร่สังกะสี ซึ่งในแหล่งแร่สังกะสีพบแร่แคดเมียมอยู่ด้วย จึงมีความเป็นไปได้ที่แคดเมียมจากหน้าดินที่อุดมด้วยแร่สังกะสีและแคดเมียมจะถูกฝนตกชะและปนเปื้อนลงสู่ต้นน้ำของลำน้ำธรรมชาติ ทำให้เกิดการสะสมในตะกอนท้องน้ำ เมื่อปล่อยน้ำเข้าสู่แปลงเกษตรทำให้เกิดการแพร่กระจายต่อไป อย่างไรก็ตาม นักวิจัยสรุปว่าไม่มีหลักฐานเพียงพอที่จะกล่าวว่าแคดเมียมมาจากเหมืองแร่สังกะสีที่เปิดทำการอยู่ในบริเวณที่พบการปนเปื้อนนี้ จากการตรวจสอบของนักวิจัยจากสถาบันจัดการคุณภาพน้ำ-อิวมี (International Water Management Institute-IMWI) ร่วมกับนักวิชาการจากกรมวิชาการเกษตร ทำการตรวจวัดระดับสารแคดเมียมในดินและข้าว บริเวณห้วยแม่ดาว จ.ตาก พบว่าปริมาณการปนเปื้อนของแคดเมียมในดินมีค่าสูงถึง 72 เท่าของค่ามาตรฐาน EU ขณะที่กว่าร้อยละ 80 ของตัวอย่างข้าวที่นำมาวิเคราะห์มีปริมาณแคดเมียมสูงกว่าค่ามาตรฐานของญี่ปุ่นและองค์การอาหารและเกษตร (FAO) ทั้งนี้ ผลการวิเคราะห์ปริมาณสารแคดเมียมตกค้างในสัตว์น้ำ 5 ชนิด ได้แก่ ปลาสด ปลาแก้มขี้ปลาหมอไทย ปลากะตือหม้อ และปลาชัคเกอร์ พบมีค่าความเข้มข้นของสารแคดเมียมอยู่ระหว่าง 0.04-0.011 มก./กก. ซึ่งเป็นค่าที่ต่ำกว่าค่ามาตรฐานที่กำหนดไว้ที่จะต้องไม่เกิน 2.0 มก./กก. จึงถือว่ายังคงปลอดภัยต่อผู้บริโภค (ศูนย์ข้อมูลพิษวิทยา, 2547) จากการปนเปื้อนนี้ทำให้ประชาชนในพื้นที่ดังกล่าวมีความเสี่ยงค่อนข้างมากที่จะได้รับความเป็นพิษจากแคดเมียมซึ่งส่งผลกระทบต่อสุขภาพอนามัย จึงเป็นเหตุให้ภาครัฐเร่งดำเนินการตรวจสอบและแก้ไขฟื้นฟูพื้นที่ที่มีการปนเปื้อนอย่างเร่งด่วน เพื่อให้ดินมีสภาพที่เหมาะสมต่อการเพาะปลูกและไม่ส่งผลกระทบต่อประชาชนอีกต่อไป และจากแหล่งการปนเปื้อนดังกล่าว

จากงานวิจัยที่ผ่านมา ได้มีการศึกษาเทคนิคการล้างดินเพื่อการกำจัดแคดเมียมออกจากดินปนเปื้อน โดยใช้สารลดแรงตึงผิวชนิดไม่มีประจุผสมกับลิแกนด์ กับชนิดมีประจุผสมกับลิแกนด์ ดินที่นำมาทำการทดลองเป็นดินบริเวณห้วยแม่ดาว จังหวัดตาก ผลการศึกษาพบว่า สารละลายไทโรเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

### ทฤษฎีและหลักการ

#### 2.1 การบำบัดดิน

วิธีการในการบำบัดและสารเคมีที่ใช้ในการบำบัดดินที่ปนเปื้อนนั้นมีอยู่หลายวิธีด้วยกัน ขึ้นอยู่กับองค์ประกอบของดินที่จะนำมาบำบัดและค่าความเข้มข้นของสารที่ปนเปื้อนอยู่ โดยสารปนเปื้อนที่พบอยู่บ่อย นั้นคือ สารอินทรีย์ที่ระเหยและไม่สามารถระเหยได้ โพลีไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน ยาฆ่าแมลง โพลีคลอริเนต ไบฟีนิล โลหะหนัก และสารประกอบเชิงซ้อนที่มีส่วนประกอบของไซยาไนด์

โดยเทคนิคและวิธีการในการบำบัดของเสียในดินมีหลายวิธี ซึ่งจะประกอบไปด้วยวิธีทางกายภาพ ทางเคมี ทางชีวภาพ การตรึงสารพิษและวิธีการที่ใช้ความร้อน โดยในแต่ละเทคนิคต่างก็มีช่วงจำกัดความเข้มข้นของสารปนเปื้อนด้วยกันทั้งสิ้น สารเคมีที่ใช้ในการบำบัด เช่น สารลดแรงดึงผิวจะมีช่วงจำกัดของสารปนเปื้อนที่มากกว่าสารตัวอื่นๆ เมื่อนำมาใช้ในการล้างดิน

##### 2.1.1 วิธีการบำบัดดิน

การบำบัดพื้นฟูดินที่มีการปนเปื้อนของเสียสามารถทำได้หลายวิธี ได้แก่

##### 1. การปรับเสถียร (Stabilization)

คือ วิธีการหยุดการเคลื่อนย้ายของโลหะหนักโดยการทำให้เป็นของแข็งการทำให้โลหะหนักอยู่ในรูปที่เสถียรไม่สามารถปนเปื้อนสู่สิ่งแวดล้อมได้

##### 2. การบำบัดโดยการแยกอนุภาค (Mechanical separation)

คือ วิธีการแยกอนุภาคเพื่อนำไปบำบัด โดยใช้เครื่องไฮโดรไซโคลอน หรือ ฟลูอิดซ์เบด (Fluidized bed) ซึ่งอาศัยหลักการของแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง และแรงโน้มถ่วง นอกจากนี้ยังมีการใช้สารเคมี เช่น สารช่วยการลอยตัว และการแยกโลหะหนักโดยอาศัยแม่เหล็ก

##### 3. การบำบัดโดยใช้ความร้อน (Pyrometallurgical Separation)

คือ วิธีการบำบัดสำหรับโลหะหนักที่สามารถระเหยได้ โดยการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 200-700 องศาเซลเซียส เป็นวิธีการที่เหมาะสมกับการบำบัดปรอท

##### 4. การบำบัดทางเคมี (Chemical Treatment)

คือ วิธีการบำบัดโดยอาศัยปฏิกิริยาออกซิเดชันและ รีดักชันหรือการปรับพีเอชด้วยสารละลายกรดหรือเบส เพื่อลดความเป็นพิษ ตกตะกอน หรือเพื่อละลายโลหะหนัก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 5. การบำบัดด้วยแผ่นกั้นที่น้ำซึมผ่านได้ (Permeable Treatment Walls)

คือ วิธีการบำบัดที่อาศัยความสามารถในการซึมผ่านเพื่อลดการเคลื่อนที่ของโลหะหนักในน้ำใต้ดิน

#### 6. การบำบัดโดยใช้กระแสไฟฟ้า (Electrokinetics)

คือ การแยกไอออนบวกและไอออนลบในน้ำใต้ดินและดินที่ปนเปื้อน โดยไอออนและอนุภาคประจุเล็ก ๆ ที่มีประจุบวกจะเคลื่อนที่ไปยังขั้วแคโทด ส่วนไอออนที่มีประจุลบจะเคลื่อนที่ไปที่ขั้วแอโนด โดยการผ่านกระแสไฟฟ้าไปยังขั้วอิเล็กโทรดทั้งสอง (แคโทดและแอโนด) วิธีนี้สามารถทำได้ในสถานที่จริง หรืออาจจะขุดดินขึ้นมาทำก็ได้

#### 7. การบำบัดโดยอาศัยกระบวนการทางชีวเคมี (Biochemical Process)

คือ วิธีการบำบัดที่ได้แก่ การชะล้างชีวภาพ ปฏิกิริยาออกซิเดชัน-รีดักชัน ซึ่งกระบวนการดังกล่าวเป็นการใช้แบคทีเรีย และควบคุมสภาวะต่างๆ เช่น ปริมาณออกซิเจน ค่าพีเอช และอุณหภูมิ

#### 8. การบำบัดโดยใช้พืช (Phytoremediation)

คือ วิธีการบำบัดที่ใช้พืชเป็นตัวสกัดโลหะหนักออกจากดินและน้ำใต้ดิน โดยกระบวนการดูดซับที่จะเก็บสะสมสารมลพิษโดยรากและส่วนต่างของพืช อีกทั้งยังย่อยสลายสารมลพิษให้อยู่ในรูปของสารที่มีอันตรายน้อยกว่าด้วย ซึ่งอาจนำวิธีบำบัดวิธีอื่นมารวมด้วย เช่น การสกัดโลหะหนักด้วยกรด

#### 9. การล้างดิน (Soil Washing and Soil Flushing)

คือ วิธีการสกัดโลหะหนักออกจากดินที่ปนเปื้อนโดยการใช้น้ำหรือสารละลายชะล้าง สกัดสิ่งเจือปนออกมาซึ่ง Soil Washing เป็นวิธีการบำบัดวิธีหนึ่งที่สามารถปฏิบัติภายนอกแหล่งปนเปื้อนได้ และ Soil Flushing เป็นวิธีการบำบัดที่สามารถปฏิบัติภายในแหล่งปนเปื้อนได้

### 2.2 การล้างดิน (Soil Washing and Soil Flushing)

การล้างดิน (Soil washing) เป็นหลักการที่ใช้ของเหลวในการสกัดหรือการทำการแยก โดยต้องจัดหา ขุดดินที่มีปนเปื้อน จากนั้นทำการผ่านตระแกรงร่อนเพื่อทำการคัดขนาดของดินที่มีขนาดใหญ่และทำการร่อนเม็ดดินที่มีเนื้อหยาบ จากนั้นจึงผ่านเข้าสู่กระบวนการบำบัด และทำการจัดการกับสิ่งที่เหลือ

การชะล้างดิน (Soil flushing) เป็นอีกวิธีการหนึ่งที่ใช้ น้ำหรือสารเคมีในการสกัด และกำจัดสิ่งปนเปื้อนออกจากดิน โดยที่การล้างดิน (Soil washing) เป็นวิธีการบำบัดสิ่งปนเปื้อนแบบนอกพื้นที่การปนเปื้อน มีการนำดินที่ปนเปื้อนออกจากบริเวณที่ปนเปื้อนแล้วทำการบำบัด แต่การชะล้างดิน (Soil flushing) เป็นการบำบัดดินที่แหล่งปนเปื้อน โดยไม่มีการนำดินออกไปจากพื้นที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การล้างดิน (Soil washing) และการชะล้างดิน (soil flushing) มีประโยชน์ในการกำจัดได้ทั้งสารปนเปื้อนที่เป็นสารอินทรีย์ สารอนินทรีย์ และพวกสารกัมมันตภาพรังสี จากดินได้

### 2.2.1 สารเคมีที่ใช้ในการล้างโลหะหนักออกจากดิน

โลหะหนักสามารถกำจัดออกจากดินได้ โดยการเติมสารที่ทำหน้าที่ในการสกัดโลหะหนักซึ่งสารดังกล่าวได้แก่

1. คีเลตติงค์ เอเจนต์ (Chelating agent) เช่น กรดเอทิลีน ไดอะมีน เททราอะเซติก (Ethylenediaminetetraacetic acid, EDTA) กรดไนทริโล ไตรแอซีติก (Nitritotriacetic acid, NTA)
2. กรดอนินทรีย์ (Inorganic acid) เช่น กรดซัลฟูริก และกรดไฮโดรคลอริก
3. กรดอินทรีย์ (Organic acid) เช่น กรดอะซีติก และกรดซิตริก
4. สารละลายเบส เช่น โซเดียมไฮดรอกไซด์
5. สารลดแรงตึงผิว เช่น ไทรทอนเอกซ์-100 และ โซเดียมโคเคซิลซัลเฟต
6. ตัวทำละลายซึ่งมีความสามารถในการละลายน้ำ เช่น เมทานอล
7. การใช้สารละลายกรด ร่วมกับ คอมเพลกซิงค์ เอเจนต์ หรือออกซิไดส์ซิงค์ เอเจนต์ หรือรีดิวซ์ซิงค์ เอเจนต์

สารที่ใช้ในการสกัดโลหะหนักพวก กรดอินทรีย์ กรดอนินทรีย์ ที่เป็นกรดแก่ ปริมาณของโลหะหนักจะถูกกำจัดออกจากดินได้เมื่อกำแพงเชลลคลงโดยค่าพีเอชต่ำกว่า 6 กรดอินทรีย์ที่เป็นกรดอ่อนเช่นพวกกรดซิตริกและกรดทาร์ทริก มีประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะออกจากดินที่ปนเปื้อนได้เช่นกัน คีเลตติงค์เอเจนต์ เช่น กรดเอทิลีน ไดอะมีน เททราอะเซติก (EDTA) และ กรดไนทริโล ไตรแอซีติก (NTA) เป็นสารที่นิยมนำมาใช้ในการสกัดโลหะออกจากดินเนื่องจากมีความสามารถในการจับตัวเป็นสารประกอบเชิงซ้อน ได้ดีกับโลหะที่ปนเปื้อนภายในดิน

ถึงแม้ว่ากรดแก่และคีเลตติงค์ เอเจนต์ จะเป็นสารที่มีประสิทธิภาพสูงในการกำจัดโลหะที่เป็นพิษออกจากดินได้ แต่ก็พบว่าสารเหล่านี้เป็นสารที่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม โดยจะมีผลต่อสมบัติทางเคมี ทางกายภาพ และทางชีวภาพของดิน

สารลดแรงตึงผิวเป็นสารที่มีค่าความสามารถในการกำจัดโลหะหนักออกจากดิน โดยที่จะส่งผลกระทบต่อ น้อยกว่าสารทั้งสองชนิด สารลดแรงตึงผิวมีอยู่ 3 ชนิด คือ สารลดแรงตึงผิวที่มีประจุบวก สารลดแรงตึงผิวที่มีประจุลบ และสารลดแรงตึงผิวที่ไม่มีประจุ สามารถใช้ในการกำจัดโลหะหนักที่ปนเปื้อนอยู่ภายในดินได้ (Doong et al., 1998). พบว่าเมื่อทำการเติม สารลดแรงตึงผิวที่มีประจุลบ และ สารลดแรงตึงผิวที่ไม่มีประจุ สามารถเพิ่มอัตราการสกัดโลหะหนัก ได้ ส่วนสารลดแรงตึงผิวที่มีประจุบวกพบว่าเมื่อเติมลงไปจะทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักลดลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยในสภาวะที่เป็นกรดสารลดแรงตึงผิวที่มีประจุบวก จะมีประสิทธิภาพในการสกัดโลหะหนักที่ดีกว่าสารลดแรงตึงผิวที่มีประจุลบ และสารลดแรงตึงผิวที่ไม่มีประจุ

### 2.3 สารลดแรงตึงผิว (Surfactant)

สารลดแรงตึงผิวเป็นสารที่ใช้ในการบำบัดที่น่าสนใจ ด้วยลักษณะเฉพาะที่สามารถเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของพื้นผิว (Surface properties) ของเหลวได้ คุณสมบัติของพื้นผิวสามารถถูกเปลี่ยนได้โดยปรากฏการณ์ที่เรียกว่ากิจกรรมของพื้นผิว (Surfact activity) สารลดแรงตึงผิวมีความสามารถมากในการลดความตึงผิวของน้ำได้ เนื่องจากสารลดแรงตึงผิวมีโครงสร้างโมเลกุลเป็นแบบแอมฟิพาติก (Amphiphatic structure) คือ ประกอบด้วยส่วนที่มีขั้วหรือส่วนที่ชอบน้ำ (Hydrophilic portion) และ ส่วนที่ไม่มีขั้วหรือส่วนที่ไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic portion) ทำให้สามารถเชื่อมรอยต่อระหว่างวัฏภาคของน้ำ (hydro phase) และวัฏภาคน้ำมัน (lipid phase) ได้เป็นอย่างดี จึงทำหน้าที่เป็นตัวอิมัลซิไฟเออร์ได้ ซึ่งสารลดแรงตึงผิวนี้มีมากมายทั้งสังเคราะห์ขึ้นและที่มีอยู่ในธรรมชาติ โครงสร้างโมเลกุลของกลุ่มไฮโดรโฟบิกหรือส่วนที่ไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic group) จะเป็นสายไฮโดรคาร์บอนต่อกันเป็นสายยาว และบางครั้งก็อาจจะเป็น ฮาโลจีเนต (halogenated) หรือ ออกซิจีเนตไฮโดรคาร์บอน (oxygenated hydrocarbon) หรืออาจเป็น ซิลอกเซน (siloxane) ส่วนกลุ่มของไฮโดรฟิลิกหรือส่วนที่ชอบน้ำ (hydrophilic group) จะเป็นประจุ หรือหมู่ที่มีความเป็นขั้วสูง ขึ้นอยู่กับธรรมชาติของหมู่ไฮโดรฟิลิกและสารลดแรงตึงผิว

ประสิทธิภาพของสารลดแรงตึงผิวในการกำจัดสารปนเปื้อนขึ้นอยู่กับการรวมตัวของโมเลกุลเป็นไมเซลล์ (Micelle) โดยโมเลกุลจะรวมตัวกันเป็นกลุ่ม โดยหันส่วนที่มีขั้วออกมาด้านนอกและด้านในเป็นส่วนที่ไม่มีขั้ว ซึ่งความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวที่จะทำให้โครงสร้างรวมตัวกันเป็นไมเซลล์ได้นั้น จะต้องมีความเข้มข้นต่ำที่สุดที่จุดวิกฤตของการเกิดไมเซลล์ (Critical Micelle Concentration, CMC)

#### 2.3.1 ประเภทของสารลดแรงตึงผิว

สารลดแรงตึงผิวแบ่งออกเป็นหลายกลุ่มขึ้นอยู่กับประจุบนไฮโดรฟิลิกที่เป็นส่วนประกอบที่สามารถละลายน้ำ (ภาพที่ 2.1) ประจุไฟฟ้าบนไฮโดรโฟบิกจะเป็นตัวกำหนดคุณสมบัติของสารลดแรงตึงผิวโดยอาศัยความยาวของสายโซ่ไฮโดรคาร์บอน กลุ่มของไฮโดรโฟบิกที่นิยมใช้ในสารลดแรงตึงผิวจะมีจำนวนคาร์บอนตั้งแต่ 10 ถึง 20 อะตอม สารลดแรงตึงผิวสามารถสังเคราะห์ได้จากกรดไขมัน พาราฟิน อัลคิลเบนซีน แอลกอฮอล์ และพอลิโออกซิโพรไพลีน สารลดแรงตึงผิวสังเคราะห์เช่น อัลคิลเบนซีน ซัลโฟเนต (Alkylbenzene sulfonate) เป็นสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุลบ เกลืออัลคิลไตรเมทิลแอมโมเนียม (Alkyltrimethylammonium salts) เป็นสารลด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แรงตึงผิวชนิดประจุบวก เป็นต้น สารลดแรงตึงผิวสามารถแบ่งออกได้เป็น 4 ประเภท ตามชนิดของประจุบนไฮโดรฟิลิก คือ

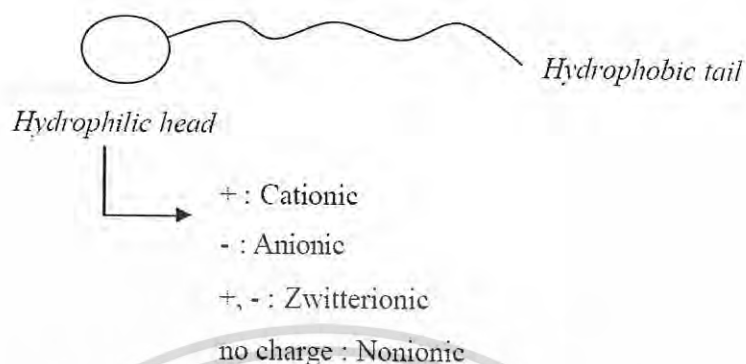
1. สารลดแรงตึงผิวชนิดประจุลบ (Anionic surfactant) เป็นสารลดแรงตึงผิวที่ประจุไฟฟ้าบนไฮโดรฟิลิก เป็นประจุลบ โดยพบแสดงในรูป คาร์บอกซิเลต ซัลเฟต ซัลโฟเนต หรือ ฟอสเฟต สารลดแรงตึงผิวประเภทนี้ใช้ มากในอุตสาหกรรมผงซักฟอก ผลิตภัณฑ์ทำความสะอาด น้ำยาล้างชาม เป็นต้น โดยปริมาณการใช้ถึง 49% ของสารลดแรงตึงผิวทั้งหมด เนื่องจากสามารถใช้ขจัดคราบสกปรกได้ดี ได้แก่ โซเดียมโคเคซิลซัลโฟเนต

2. สารลดแรงตึงผิวชนิดประจุบวก (Cationic surfactant) เป็นสารลดแรงตึงผิวที่ประจุไฟฟ้าบนไฮโดรฟิลิกเป็นประจุบวก ส่วนมากมักจะเป็นพวกควอเตอร์นารีแอม โมเนียม สารลดแรงตึงผิวประเภทนี้จะไม่สามารถทำงานได้ในสภาวะแวดล้อมที่เป็นด่างสูง (พีเอช 10 -11) เนื่องจากเกลือแอม โมเนียมจะมีการสูญเสียประจุบวก ทำให้เกิดการตกตะกอนได้ สารลดแรงตึงผิวชนิดประจุบวก จะทำให้เกิดการระคายเคืองมากกว่าสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุลบ นิยมใช้ในการผสมในน้ำยาปรับผ้านุ่ม ครีมนวดผม และผลิตภัณฑ์เกี่ยวกับการจัดแต่งทรงผม เป็นต้น

3. สารลดแรงตึงผิวชนิดไม่มีประจุ (Nonionic surfactant) สารลดแรงตึงผิวชนิดนี้จะต่างจากสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุลบและชนิดประจุบวก ตรงที่บนไฮโดรฟิลิกจะไม่มีประจุเป็นสารประกอบโพลีอีเทอร์หรือโพลีไฮดรอกซิล ใช้มากในผงซักฟอก น้ำยาล้างถ้วยชาม ผลิตภัณฑ์ทำความสะอาดพื้นผิว เป็นต้น เช่น ไทรทอนเอกซ์-100 และทวิน-80 (Tween-80)

4. สารลดแรงตึงผิวชนิดแอมโฟเทอริก (Amphoteric surfactant) หรือสวิตเทอร์ไอออน (Zwitterions) เป็นสารลดแรงตึงผิวที่ประจุไฟฟ้าบนไฮโดรฟิลิก สามารถให้ได้ทั้งประจุบวกและลบ โดยจะแสดงคุณสมบัติประเภทใดขึ้นอยู่กับสภาพความเป็นกรด - ด่าง ของสภาวะแวดล้อม ถ้าสภาวะแวดล้อมเป็นด่าง (พีเอช มากกว่า 7) ประจุไฟฟ้าบนไฮโดรฟิลิกจะให้ประจุลบ ถ้าสภาวะแวดล้อมเป็นกรด (พีเอช น้อยกว่า 7) ประจุไฟฟ้าบนไฮโดรฟิลิกจะให้ประจุบวก และในสภาวะที่เป็นกลางจะไม่เกิดการให้ประจุไฟฟ้าบนไฮโดรฟิลิก สารลดแรงตึงผิวประเภทนี้นิยมใช้ในผลิตภัณฑ์เกี่ยวกับผิวหรือผม ในปัจจุบันยังใช้น้อยกว่าสารลดแรงตึงผิวประเภทอื่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



### รูปที่ 2.1 โครงสร้างมอนอเมอร์ของสารลดแรงตึงผิว

#### 2.3.2 ลักษณะของสารลดแรงตึงผิว

เช่น การลดลงของแรงตึงผิวภายใน เป็นต้น ความคงตัวของไมเซลล์ในสารละลาย จะส่งผลกระทบต่อคุณสมบัติของสารลดแรงตึงผิว เช่น คุณสมบัติในการชะล้างสิ่งสกปรก และคุณสมบัติในการละลาย

ในสถานะที่สารละลายมีความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวต่ำนั้น โมเลกุลของสารลดแรงตึงผิวจะไม่ไหลไปรวมตัวกัน แต่ ณ จุดที่ความเข้มข้นพิเศษหรือเรียกว่าความเข้มข้น ณ จุดวิกฤต(CMC) จะเกิดการไหลไปรวมกันของโมเลกุลของสารลดแรงตึงผิว ซึ่งจะถูกรู้จักว่า ไมเซลล์เฟิร์สฟอรัม (Micell first form) ถ้าสารละลายมีความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวสูงกว่า CMC พวกมอนอเมอร์เหลืออยู่น้อยมาก การที่ความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวเพิ่มจำนวนขึ้นเป็นการสร้างไมเซลล์ให้มากยิ่งขึ้นด้วย สารลดแรงตึงผิวที่รู้จักกันทั่วไป เช่น โซเดียมโดเดซิลซัลเฟต (Sodium dodecyl sulfate, SDS) ซึ่งมี CMC คือ  $8.3 \times 10^{-3}$  โมลต่อลิตร และเกิดเป็นไมเซลล์ซึ่งมีลักษณะเป็นทรงกลมที่ขรุขระ ไมเซลล์จะมีไฮโดรโฟบิกล้อมรอบภายในซึ่งสายอัลคิล (alkyl) ของสารลดแรงตึงผิวนั้นจะละลายได้ในน้ำมัน ทำให้หมู่ของโซเดียมโดเดซิลซัลเฟต นั้นถูกเปลี่ยนแปลง

ที่บริเวณผิวหน้าของไมเซลล์ซึ่งส่วนใหญ่จะมีโครงสร้างที่เป็นทรงกลม (จำนวนที่รวมตัวกันน้อยกว่า 100 โมเลกุล) โดยมีลักษณะที่เป็นรูปทรงกระบอกต่อกัน สำหรับสารลดแรงตึงผิวที่ถูกละลายในรูปของสารละลาย โครงสร้างของสารลดแรงตึงผิว จะเปลี่ยนได้โดยหมู่ ไฮโดรโฟบิก จะหลุดออกจากกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปแบบไมเซลล์ของสารลดแรงตึงผิวชนิดที่มีประจุ (Ionic surfactants) ในสารละลายของเหลว เป็นผลของแรงที่ตรงกันข้ามสองแรงคือน้อยลงนั่นคือ ไฮโดรโฟบิก สนับสนุนให้เกิดการรวมตัวกันของสารลดแรงตึงผิวและเกิดเป็นแรงผลักทางประจุไฟฟ้าระหว่างหมู่ของประจุทางหัวและประจุที่อยู่ตรงข้ามกัน ดังนั้น ถ้าความยาวของหางไฮโดรโฟบิก นั้นยาวมากขึ้น จะส่งผลให้ไฮโดรโฟบิกแข็งแรงมากขึ้น แต่ค่า CMC จะลดลงและ ไมเซลล์ที่ถูกสร้างขึ้นจะมีขนาดใหญ่มากขึ้น บางครั้งถ้ามีการเติมเกลือบางชนิดลงไป ก็เป็นการลดแรงผลักระหว่างหมู่ทางหัว และค่า CMC ก็ลดลง

### 2.3.3 ความสามารถในการละลายของสารลดแรงตึงผิว

ความสามารถในการละลาย เป็นคุณสมบัติหนึ่งที่สำคัญของสารลดแรงตึงผิว ซึ่งจะเกี่ยวข้องโดยตรงกับลักษณะของไมเซลล์ ซึ่งเป็นสิ่งสำคัญเมื่อนำไปใช้ในอุตสาหกรรม เช่น ใช้ในการเคลื่อนย้าย กำจัดของเสียประเภทน้ำมัน เป็นต้น ความสามารถในการละลายนั้น ถูกกำหนดขึ้นโดยสมบัติเฉพาะตัวของสารตั้งต้นที่เป็นปฏิกิริยาย้อนกลับได้ สารอินทรีย์ใช้เวลาในการละลายในสารลดแรงตึงผิวสูงกว่าสารลดแรงตึงผิวที่ละลายในน้ำ ณ ความเข้มข้นที่จุด CMC

ตำแหน่งในไมเซลล์ทำให้สารลดแรงตึงผิวมีความสามารถในการละลายที่แตกต่างกันไป โดยขึ้นกับธรรมชาติของสารนั้นๆ และขึ้นอยู่กับชนิดของปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างสารลดแรงตึงผิว และความสามารถในการละลาย การศึกษาความสามารถในการละลายโดยมากจะศึกษาโดยใช้เทคนิคเอกซเรย์ สเปกโตรเมทรี (X-ray spectrometry) และเทคนิคนิวเคลียร์ แมกเนติก เรโซแนนซ์ สเปกโตรเมทรี (NMR spectrometry) เป็นต้น ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการละลายนั้น อาจเกิดขึ้นจากความแตกต่างของตำแหน่งของไมเซลล์

สารลดแรงตึงผิวชนิดที่มีประจุ ความสามารถในการละลายนั้น จะมีอยู่ 3 แบบ คือ

1. พวก โมเลกุลที่ไม่มีขั้ว จะละลายในแกนของไมเซลล์าร์ ซึ่งเป็นส่วนหางของไฮโดรคาร์บอน จะไหลไปรวมกันซึ่งจะเป็นประโยชน์ต่อการละลาย
2. โมเลกุลที่มีขั้วจะประกอบไปด้วยสายไฮโดรคาร์บอน และหมู่ไฮโดรฟิลิกอ่อนๆ เช่น สายโซ่ของแอลกอฮอล์ หรือของเอมีน จะถูกรวมเข้าไปในไมเซลล์กับส่วนหางของไฮโดรคาร์บอนในชั้นไมเซลล์ และส่วนหัวของไฮโดรฟิลิกจะยื่นออกมาในสารละลายตัวกลางบริเวณรอบนอกของไมเซลล์าร์
3. สารละลายบางตัวก็จะไม่ละลายในไฮโดรคาร์บอนหรือน้ำ แต่เชื่อกันว่าจะเกิดการดูดซับที่บริเวณไมเซลล์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.3.4 ไทรทอนเอกซ์ - 100

ไทรทอนเอกซ์-100 มีชื่อทางเคมีอื่นๆ เช่น Octylphenol decaethylene glycoether, Polyethylene glycol mono-[p-(1,1,3,3-tetramethylbutyl)phenyl]ether ซึ่งเป็นสารลดแรงตึงผิวชนิดไม่มีประจุ เป็นของเหลว ไม่มีสี มีกลิ่นอ่อน ไทรทอนเอกซ์-100 เป็นหนึ่งในสารลดแรงตึงผิวหลายชนิดที่มีการใช้กันอย่างแพร่หลาย สาเหตุที่นิยมใช้กันมากเนื่องจากคุณสมบัติที่สามารถทำหน้าที่เป็นอิมัลซิฟายเออร์ที่ดีในการผสมน้ำกับน้ำมัน มีความคงตัวที่อุณหภูมิและความดันปกติ ย่อยสลายทางชีวภาพได้ง่ายโดยไม่ก่อให้เกิดผลกระทบต่อระบบนิเวศ มีความสามารถในการละลายสูงคือละลายได้ในน้ำ ตัวทำละลายอินทรีย์ที่มีขี้้ว สารประกอบอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอนแต่ไม่ละลายในสารประกอบอะลิฟาติกไฮโดรคาร์บอน นอกจากนี้ยังสามารถผสมได้เป็นเนื้อเดียวกันกับสารลดแรงตึงผิวชนิดอื่นอีกทุกชนิด



รูปที่ 2.2 สูตร โครงสร้างของไทรทอนเอกซ์-100

### 2.4 การประยุกต์ใช้สารประกอบลิแกนด์กับสารลดแรงตึงผิว (Mari, 2004)

สารลดแรงตึงผิวมีศักยภาพในการกำจัดสารปนเปื้อน เช่น โลหะหนัก และมลสารอินทรีย์ แต่ต้องใช้ร่วมกับลิแกนด์ เพราะจะทำให้สารลดแรงตึงผิวมีประสิทธิภาพที่ดีมาก จากการวิจัย มีการชะโลหะโดยใช้ลิแกนด์ร่วมกับสารลดแรงตึงผิวซึ่งถูกจำกัดให้ใช้ในรูปของสารละลายไม่ใช่ใช้กับดินโดยตรง สารลดแรงตึงผิวเมื่อถูกใช้กับลิแกนด์จะมีประสิทธิภาพในการกำจัดทั้งโลหะและมลพิษในรูปสารอินทรีย์ในดินได้ดีพอๆกับในน้ำ ลิแกนด์ไอออนที่มีลักษณะเฉพาะจะสามารถสกัดโลหะที่มีลักษณะเฉพาะจากดิน โดยผ่านสารประกอบเชิงซ้อนของโลหะในไมเซลล์ของสารลดแรงตึงผิว สารประกอบโลหะจะอยู่ในรูปที่ไม่ชอบน้ำ ซึ่งสามารถผลักดันให้สารประกอบนั้นละลายได้ในไมเซลล์ ผลก็คือ มีความเป็นไปได้สูงที่จะกำจัดสารประกอบโลหะ และ พีซีบี (Polychlorinated Biphenyls) จากดินได้พร้อมๆกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเกิดสารประกอบเชิงซ้อนของโลหะเกิดจากการสร้างพันธะระหว่างไอออนของโลหะกับลิแกนด์ผ่านปฏิกิริยาการใช้อิเล็กตรอนร่วมกัน โดยโลหะทำหน้าที่เป็นตัวรับอิเล็กตรอน ส่วนลิแกนด์ทำหน้าที่เป็นตัวให้อิเล็กตรอน โดย  $[CdI^+]$  และ  $[CdI_4]^{2-}$  เป็นสารประกอบเชิงซ้อนที่เกิดจากการสร้างสารประกอบเชิงซ้อนของแคดเมียมไอออนกับไอโอไดด์ไอออนในสารละลายไมเซลล์าร์ นอกจากนี้ยังพบว่า สารประกอบเชิงซ้อนทั้งในวัฏภาคของสารละลายที่เป็นของเหลวและในไมเซลล์าร์มีความสัมพันธ์กับเอนทัลปีที่มีค่าเป็นลบในการถ่ายโอนของสารประกอบเชิงซ้อน  $[CdI^+]$  และ  $[CdI_4]^{2-}$  จากในสารละลายที่เป็นของเหลวและสารละลายที่เป็นไมเซลล์ ด้วยเหตุผลดังกล่าว สารประกอบที่ไม่ชอบน้ำที่ไม่มีความสามารถในการสร้างพันธะไฮโดรเจนที่แข็งแรงในน้ำได้จึงเป็นลักษณะของไมเซลล์ในสารลดแรงตึงผิว

สารลดแรงตึงผิวและลิแกนด์ จะมีความเป็นพิษน้อยในดินเมื่อเปรียบเทียบกับสารเคมีอื่นๆ เช่น กรดแก่ และ คีเลตติ้งเอเจนต์ กรดแก่จะมีโปรตอน ( $H^+$ ) ซึ่งสามารถดูดซับและเกิดปฏิกิริยาในดิน เป็นผลให้ พิเอชของดินลดลง คีเลตติ้งเอเจนต์ได้แก่ อีดีทีเอ ซึ่งสามารถสกัดไม่เพียงแต่เฉพาะโลหะหนัก แต่ยังรวมแร่ธาตุที่สำคัญในดิน ได้แก่ แคลเซียม แมกนีเซียม และ เหล็กด้วย เนื่องจากมีความสามารถสูงในการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนกับโลหะทุกชนิด

อย่างไรก็ตาม สารลดแรงตึงผิวที่ไม่มีประจุและที่มีประจุลบจะถูกดูดซับได้น้อยในดินเมื่อเปรียบเทียบกับกรดแก่และคีเลตติ้งเอเจนต์ ดังนั้นการศึกษานี้จึงเป็นการศึกษาภายใต้สถานะแอโรบิก ซึ่งสารลดแรงตึงผิวที่ไม่มีประจุจะถูกสลายตัวอย่างมีประสิทธิภาพ สำหรับตัวอย่างลิแกนด์ก็ได้แก่  $I^-$  และ  $SCN^-$  ซึ่งคาดว่าไม่น่าจะมีการดูดซับและเกิดปฏิกิริยาได้ดีในดิน เนื่องจากมีประจุลบแตกต่างจากไซยาไนด์และไทโอไซยาเนตซึ่งมีความเป็นพิษต่ำ และจากการศึกษาพลังงานจลน์ก็แสดงให้เห็นว่า  $SCN^-$  สามารถย่อยสลายได้ดีที่อัตรา 292 มิลลิกรัม/ลิตร.วัน

ต่อมาได้มีการสกัด ไมเซลล์ ซึ่งเป็นตัวกลางของสารลดแรงตึงผิว โดยเฉพาะอย่างยิ่งมีการใช้ลิแกนด์หลากหลายชนิดในรูปของสารละลาย ในการกำจัดไอออนของโลหะหนัก เช่น แคดเมียม ทองแดง สังกะสี โคบอลต์และนิกเกิล โดยใช้กับไมเซลล์ของสารลดแรงตึงผิว ลิแกนด์ที่ไม่ชอบน้ำจะจับกับไอออนของโลหะเป้าหมายแล้วละลายมาในรูปของไมเซลล์าร์ ซูโด – เฟส Fillipi et al. (1998) ได้สกัดทองแดง โดยใช้ลิแกนด์ที่ไม่ชอบน้ำ 1-phenyl-3-isoeorthyl-1,3-propanedione กับสารลดแรงตึงผิวประจุบวก CTAB (n-hexadecyltrimethylammonium bromide) โดยวิธี อัลตรา – ฟิวเตรชัน นอกจากนี้ Akita et al. (1999) ยังใช้สารลดแรงตึงผิวที่ไม่มีประจุกับไมเซลล์และลิแกนด์ที่ไม่ชอบน้ำ ซึ่งมีประสิทธิภาพในการแยกโคบอลต์และนิกเกิลออกจากสารละลาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.5 โลหะหนัก (ชุดิมา, 2543)

โลหะหนัก หมายถึง โลหะที่มีความหนาแน่นมากกว่า 5 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร เช่น ตะกั่ว แคดเมียม พรอท นิกเกิล โครเมียม เป็นต้น โดยทั่วไปแล้วโลหะหนักมีสภาพเป็นของแข็ง ยกเว้น พรอทที่มีสถานะเป็นของเหลวที่อุณหภูมิปกติ ซึ่งโลหะหนักส่วนใหญ่มีสมบัติทางกายภาพ คล้ายคลึงกัน ได้แก่ การนำไฟฟ้าและการนำความร้อนได้ดี มีความมันวาว และสามารถนำมาตีแผ่เป็นแผ่นบางๆได้ ส่วนสมบัติทางเคมีสำคัญ คือ สามารถที่จะรวมตัวกับสารอื่น เป็นสารประกอบเชิงซ้อนได้หลายรูปแบบและเสถียรกว่าโลหะอิสระ

โลหะหนักสามารถจัดแบ่งโดยอาศัยแนวโน้มความเป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อมได้ 2 กลุ่ม คือ กลุ่มที่มีแนวโน้มความเป็นพิษต่อสภาวะแวดล้อมสูง ได้แก่ As, Au, Cd, Cu, Cr, Hg, Pb, Sb, Te, และ Zn เป็นกลุ่มที่แนวโน้มความเป็นพิษต่อสภาวะแวดล้อมสูงรองลงมา ได้แก่ Ba, Bi, Fe, Mo, Ti และ U

ความเป็นพิษของกลุ่มโลหะหนักเหล่านี้ เป็นผลมาจากการที่มนุษย์ได้รับสารเหล่านี้ในปริมาณแตกต่างกัน แล้วก่อให้เกิดอันตรายต่อร่างกายนั่นเอง แหล่งที่มาที่สำคัญของโลหะหนักเหล่านี้ คือ กระบวนการผลิตในโรงงานอุตสาหกรรม ซึ่งสามารถปนเปื้อนมากับน้ำทิ้งอุตสาหกรรม จากนั้นจึงเกิดการปนเปื้อนกับสิ่งแวดล้อมในดิน น้ำ อากาศ และผลผลิตจากการเกษตร และเข้าสู่ร่างกายของมนุษย์ และมีผลต่อเมตาโบลิซึมของเซลล์สิ่งมีชีวิต

### 2.5.1 แคดเมียม (ตุลาคม, 2539)

แคดเมียม มีมวลโมเลกุล 112 จุดหลอมเหลว 320.9 องศาเซลเซียส จุดเดือด 765 องศาเซลเซียส เป็นโลหะที่เป็นเงาแวบส่วนใหญ่ใช้ในอุตสาหกรรมต่างๆ ประมาณร้อยละ 50 ใช้ในการเคลือบเงาด้วยไฟฟ้าที่เรียกว่า อิเล็กโทรเพลท โคทติ้ง (Electroplated coating) จะได้ผิวโลหะที่เคลือบด้วยแคดเมียมเป็นเงางามและทนต่อการกัดกร่อน ไม่เป็นสนิมนอกเสียจากจะมีการหลุดลอกของแคดเมียมที่เคลือบอยู่โลหะที่เคลือบด้วยแคดเมียมจะใช้อุปกรณ์รถยนต์ต่างๆ เป็นชิ้นส่วนของเครื่องบิน วิทยุ โทรทัศน์ ตู้เย็น เป็นต้น

ในธรรมชาติแคดเมียมมักจะอยู่รวมกับกำมะถันเป็นแคดเมียมซัลไฟด์ และ มักปนอยู่ในสินแร่สังกะสี ตะกั่ว หรือทองแดง ฉะนั้นในการทำเหมืองสังกะสี จะได้แคดเมียมซึ่งเป็นผลพลอยได้

นอกจากนี้แคดเมียมยังอยู่ในรูปของสารประกอบต่างๆอีกมากมาย เช่น แคดเมียมซัลไฟด์ และแคดเมียมซัลโฟไซด์ ใช้เป็นตัวสีในสิ่งต่างๆ เช่น พลาสติก สีทา สีฟัน หมึก ยาง เสื้อผ้าและสีที่จิตรกรใช้ในการวาดภาพหรือทาสีงานจิตรกรรมต่างๆเพราะให้สีสวย สารประกอบแคดเมียมบางชนิดใช้เป็นสารเพิ่มความคงตัวของพลาสติก เช่น แคดเมียมสเตียเรท

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ใช้ผสมกับโลหะอื่นเป็นโลหะอัลลอยด์ เช่น ผสมกับโลหะทองแดงจะช่วยเพิ่มความเหนียวและความทนทานต่อการสึกหรอให้กับทองแดงด้วย โดยเฉพาะอย่างยิ่งยังทนอุณหภูมิสูงด้วยนำไปใช้ผลิตอุปกรณ์ต่างๆ ที่ต้องทนความร้อน เช่น ทำหม้อน้ำรถยนต์ หรืออุปกรณ์เครื่องเย็นต่างๆ ที่ต้องระบายความร้อนมากๆ ถ้านำแคดเมียมไปผสมกับโลหะเงินจะได้โลหะอัลลอยด์ที่เงางาม ใช้ในการผลิตเครื่องประดับอัญมณีต่างๆ ประโยชน์ของแคดเมียมยังขยายการใช้ไปในอุตสาหกรรม การผลิตแบตเตอรี่ขนาดเล็กที่เรียกว่า แคดเมียมนิเกิล แบตเตอรี่ (CdNi batteries) สำหรับการใช้อุปกรณ์ขนาดเล็ก เช่น นาฬิกา เครื่องคิดเลข กล้องถ่ายรูป และวิทยุเล็กๆ เป็นต้น ยังมีสารประกอบแคดเมียมประเภท แคดเมียมโบรไมด์ แคดเมียมไอโอไดด์ ใช้บ้างในการถ่ายรูป

นอกจากนี้ยังพบว่าโลหะแคดเมียมใช้ในโฟโตอิเล็กทริก เซลล์ (Photoelectric cells) ผสมในสารนำเชื้อราที่ใช้ในกิจการเกษตร และปัจจุบันยังใช้ในเตาปฏิกรณ์ปรมาณูด้วย

แคดเมียมอยู่ติดกับสังกะสีในตารางธาตุ จึงมีลักษณะทางฟิสิกส์และเคมีคล้ายคลึงกัน แต่แคดเมียมมีความเป็นพิษสูง แคดเมียมสามารถเข้าแทนที่สังกะสีในระบบเอนไซม์เนื่องจากมีโครงสร้างของอะตอมคล้ายกันแคดเมียมจะพบร่วมกับสังกะสีในดินเสมอ โดยมีอัตราส่วนแคดเมียม/สังกะสี ในช่วงประมาณ 1:100 ถึง 1:1000

#### 2.5.1.1 ลักษณะการแพร่กระจายและการปนเปื้อน

โลหะหนักกลุ่มแคดเมียม สังกะสี และตะกั่ว ที่สะสมในดินได้มาจากแหล่งปนเปื้อนที่สำคัญ 3 แหล่ง คือ

1. เหมืองแร่ตะกั่วและสังกะสี โดยเฉพาะอย่างยิ่งในขั้นตอนการถลุงแร่
2. กากตะกอนน้ำโสโครก
3. ปุ๋ย โดยเฉพาะอย่างยิ่งปุ๋ยฟอสเฟตและปุ๋ยคอก

โลหะแคดเมียมจะพบในดินแร่สังกะสีเสมอ ความเป็นพิษของแคดเมียมต่อสิ่งมีชีวิตสูงมาก บทบาทที่สำคัญคือเข้าแทนที่สังกะสีใน โครงสร้างโมเลกุลของเอนไซม์ที่ใช้ในกระบวนการชีวเคมีของสิ่งมีชีวิต

นอกจากนี้แล้วแคดเมียมสามารถละลายได้ดีในดิน ดังนั้นมีปริมาณเพียงเล็กน้อยที่ปนเปื้อนในดินพืชสามารถดูดหรือดึงไปสะสมในดินพืช ซึ่งโดยสภาพความเข้มข้นปรกติ พืชจะมีแคดเมียมในมวลแห้งน้อยกว่า 1 พีพีเอ็ม แต่ถึงแม้จะมีแคดเมียมสะสมในดินพืชสูงมาก พืชก็จะปราศจากอาการเป็นพิษจากแคดเมียม ซึ่งนับเป็นอันตรายอย่างมากเพราะพืชเป็นด่านแรกของโซ่อาหารของคนและสัตว์ที่กินพืช อย่างไรก็ตามก็มักจะถือว่าแคดเมียมที่สกัดได้โดยกรดแอสติกประมาณ 20 พีพีเอ็ม เป็นระดับที่พืชแสดงอาการเป็นพิษ เช่นผักกาดหอม แต่ก็มีพืชที่ทนต่อแคดเมียมได้ถึง 50 พีพีเอ็ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอ็ม และในหลายกรณีพบได้ถึง 200 พีพีเอ็ม จึงนับเป็นเรื่องที่ต้องระมัดระวัง เพราะในสภาพดินธรรมดาทั่วไปถ้ามีแคดเมียมที่สกัดได้โดยกรดแอสติกเกิน 0.15 พีพีเอ็ม ก็นับเป็นระดับสูงแล้ว

แคดเมียมเจือปนอยู่ในน้ำโสโครกเสมอ บางครั้งอาจปนอยู่สูงถึง 100 พีพีเอ็ม เนื่องจากของเสียชนิดนี้มีศักยภาพในการใช้เป็นปุ๋ยได้สูงจึงยอมเป็นการนำแคดเมียมเข้าสู่วงจรอาหารอีกทางหนึ่ง โดยที่พืชแต่ละชนิดสามารถสะสมแคดเมียมในปริมาณที่แตกต่างกันมาก ส่วนที่สะสมแคดเมียมได้ดีก็คือส่วนใบ แม้พืชกินใบเช่นผักกาดหอมต่างสายพันธุ์ ก็ยังสะสมแคดเมียมได้ในปริมาณที่แตกต่างกัน

อย่างไรก็ตามการเลือกพืชปลูกในดินที่เปื้อนแคดเมียม เป็นเรื่องสำหรับผู้บริโภคยอมรับได้ยาก อีกประการหนึ่งการเลี้ยงการปลูกพืชเลี้ยงสัตว์ในบริเวณดังกล่าว สัตว์ย่อมจะหลีกเลี่ยงการบริโภคไม่ได้ จึงเท่ากับเป็นการนำพิษสู่มนุษย์โดยอ้อมนั่นเอง ดังนั้นจึงน่าจะมีการกำหนดค่ามาตรฐานของแคดเมียมในดินที่จะนำมาใช้ประโยชน์ในกิจกรรมต่างๆ ให้เหมาะสมแคดเมียมในดินถูกดูดซับโดยอนุภาคดินเหนียว ออกไซด์ของเหล็กและอะลูมิเนียม และกรดฮิวมิก ซึ่งการดูดซับโดยอนุภาคดินเหนียวนั้นเนื่องมาจากอนุภาคดังกล่าวมีพื้นที่ผิวจำเพาะสูง มีประจุในการดูดซับ จากการใช้รังสี  $^{109}\text{Cd}$  ศึกษาการแพร่กระจายของแคดเมียมในหน้าตัดของดินโดยใช้ใส่เดือน 2 พันธุ์ คือพันธุ์ *Lumbricus* อาศัยอยู่ผิวหน้าดิน และ *Octolasion* อาศัยอยู่ในดินลึกลงไป ใส่เดือนเหล่านี้เป็นตัวการสำคัญในการแพร่กระจายของแคดเมียมในดิน

### 2.5.1.2 แคดเมียมในดิน

ปัจจัยสำคัญที่สุดในการควบคุมสภาพเคลื่อนที่ได้ของแคดเมียมในดินคือ พีเอชและศักย์รีดอกซ์ ซึ่งดินที่มีศักย์รีดอกซ์สูง แคดเมียมจะอยู่ในรูปสารประกอบเช่น แคดเมียมออกไซด์ ( $\text{CdO}$ ) และแคดเมียมคาร์บอเนต ( $\text{CdCO}_3$ ) หรืออาจอยู่ร่วมกับฟอสเฟตได้เช่นเดียวกัน

แคดเมียมมีความสามารถในการเคลื่อนที่ไปในอนุภาคดินได้สูงเมื่อดินมีพีเอชต่ำกว่า 6 เพราะ  $\text{Cd}^{2+}$  ถูกดูดซับได้น้อยในสารประกอบอินทรีย์ ซิลิเกตเคลย์ และออกไซด์ ถ้าดินมีสถานะที่พีเอชเป็นกลาง-ด่าง  $\text{Cd}^{2+}$  จะตกตะกอนในรูปคาร์บอเนตและฟอสเฟต

### 2.5.1.3 ปริมาณในดินและพืช

ปริมาณแคดเมียมในดินทั่วไปมีค่าเฉลี่ยระหว่าง 0.07 ถึง 1.0 พีพีเอ็ม โดยมีค่าเฉลี่ยสูงในดินฮิสโตซอลล์ และค่าเฉลี่ยโดยรวมของดินทั่วไปมีค่า 0.53 พีพีเอ็ม สำหรับดินที่มีการปนเปื้อน แหล่งปนเปื้อนที่สำคัญคือการถลุงแร่ กากตะกอนน้ำโสโครก และปุ๋ย การใช้ปุ๋ยฟอสเฟตหรือปุ๋ยคอกเป็นเวลา 140 ปี ทำให้ดินมีแคดเมียมเพิ่มจากปริมาณที่มีอยู่เดิม 0.51 พีพีเอ็ม เป็น 0.77 พีพีเอ็ม

ปริมาณแคดเมียมในพืชทั่วไปมีค่าต่ำ จะมีค่าสูงในพืชบางชนิด เช่น ในผักกาดหอมมีปริมาณแคดเมียม 0.6 พีพีเอ็มหรือในใบผักโขม (*Spinach*) ในปริมาณ 0.11 พีพีเอ็ม (น้ำหนักสด) พืชเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กินใบ หรือพืชหัวบางชนิดจึงเป็นตัวนำแคดเมียมสู่มนุษย์ เมื่อมีการปนเปื้อน แคดเมียมจะสะสมใน รากมากที่สุด โดยสะสมในใบรองลงมา และมีการเคลื่อนย้ายสู่เมล็ดได้น้อย เมื่อเปรียบเทียบ ระหว่างพืชผักคือ ผักคะน้า ผักกาดขาว และกวางตุ้งแล้วผักกาดขาวสะสมแคดเมียมไว้ในต้นมากที่สุด ส่วนกวางตุ้งสะสมไว้ในรากมากที่สุด

#### 2.5.1.4 พิษของแคดเมียมและโรคที่เกิดขึ้น

มนุษย์มีโอกาสได้รับแคดเมียมจาก

1. การหายใจในสถานที่ปฏิบัติงานที่มีแคดเมียมปนอยู่ในอากาศ เช่น ในโรงงานแบตเตอรี่ บริเวณที่มีการเชื่อม โลหะ
2. รับประทานอาหารที่มีการปนเปื้อนแคดเมียม อาหารโดยทั่วไปมีแคดเมียมในระดับต่ำ (มีมากในหอย กุ้ง ปู ตับและไตสัตว์)
3. จากวันบุหรี่ยาสูบที่ได้รับทุกวัน ปริมาณแคดเมียมในร่างกายจะสะสมขึ้นอย่างรวดเร็ว
4. ดื่มน้ำที่ปนเปื้อนแคดเมียม
5. หายใจอากาศเอาที่ปนเปื้อนแคดเมียมจากบริเวณที่มีการเผาซากพืชซากสัตว์ หรือ เตาเผาขยะจากเมืองใหญ่

การได้รับแคดเมียมจำนวนมากอาจทำให้เกิดพิษเฉียบพลันได้ แต่ส่วนใหญ่โรคที่เกิดจาก แคดเมียมมักเป็นชนิดเรื้อรัง โดยการได้รับแคดเมียมติดต่อกันเป็นเวลานาน โรคที่เกิดอาจแบ่งเป็น กลุ่มได้ดังนี้

##### 1. โรคปอดเรื้อรัง

การได้รับแคดเมียมนานๆ และในปริมาณมาก โดยเฉพาะจากการหายใจ จะทำให้เกิดการอุดตันภายในปอด ซึ่งเป็นเพราะมีการอักเสบของหลอดเลือด มีพังผืดจับในทางเดินหายใจส่วนล่าง และมีการทำลายของถุงลมซึ่งจะกลายเป็น โรคถุงลมโป่งพองในที่สุด ผู้ที่มีความเสี่ยงมากคือคนทำงานกับ ผงแคดเมียมโดยตรง เช่น โรงงานแบตเตอรี่ขนาดเล็ก

##### 2. โรคไตอักเสบ

โรคนี้จะแสดงออกโดยมีการอักเสบของไต โดยเฉพาะอย่างยิ่งที่ท่อในไตซึ่งจะพบ แคดเมียมในปัสสาวะสูง มีโปรตีน กลูโคสสูงในปัสสาวะ การทำงานทางท่อในไตเสียการทำงาน พบว่ามีการสะสมของแคดเมียมที่หมวกไตก่อให้เกิดการอักเสบและเป็นอันตรายต่อไป และอาจเป็น ไตวายได้ในที่สุดการเกิดโรคไตอักเสบนี้จะเป็นแบบถาวร แม้ว่าจะไม่ได้รับแคดเมียมต่อไปแล้ว แต่ไตก็ยังไม่สามารถฟื้นคืนกลับมาดังเดิมได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3. โรคกระดูก

แคลเซียมทำให้เกิดการสูญเสียแคลเซียมออกมาในปัสสาวะสูง และอาจมีแคลเซียมเข้าไปสะสมในกระดูกทำให้กระดูกพรุน และมีอาการปวดกระดูกอย่างมาก โดยเฉพาะอย่างยิ่ง อาการปวดกระดูกสะโพก เช่น ที่เกิดกับชาวญี่ปุ่นที่เมืองฟูซุ ในช่วงก่อนและระหว่างสงครามโลกครั้งที่ 2 ซึ่งเรียกโรคนี้ว่า อีไตอิต (itai itai) หรือ เออช เออช (ouch ouch) ชื่อ โรคมาจากเสียงร้องอย่างเจ็บปวดในภาษาญี่ปุ่น ซึ่งได้รับแคลเซียมมากเป็นเวลานานจากการกินข้าวที่ปนเปื้อนด้วยแคลเซียมมาก คนกลุ่มนี้จะมีกระดูกเปราะ แตกหักง่าย และอาจมีความสูงลดลงได้ เพราะการสูญเสียแคลเซียมทำให้เป็นโรคกระดูกพรุน

### 4. โรคความดันโลหิตสูงและโรคหัวใจ

พบว่าแคลเซียมทำให้ความดันโลหิตสูงขึ้นมากและมีโอกาสเป็นโรคหัวใจสูงขึ้นด้วย ซึ่งอาจจะเป็นการร่วมกันกับโรคไตดังที่กล่าวมาแล้ว

### 5. โรคมะเร็ง

มีข้อมูลการศึกษาติดตามคนงานที่ทำงานสัมผัสกับแคลเซียม เช่น โรงงานทำแบตเตอรี่แห่งขนาดเล็ก พบว่ามีความเสี่ยงต่อการเป็นโรคมะเร็งปอด สูงกว่าคนทั่วไปและอาจมีผลต่อการเลี้ยง เป็นโรคมะเร็งของต่อมลูกหมากด้วย

## 2.6 การสกัดแบบเป็นลำดับขั้น (Sequential Extraction)

เทคนิคการสกัดแบบลำดับขั้น สามารถหาปริมาณโลหะหนักได้ เนื่องจากวิธีนี้สามารถวิเคราะห์ปริมาณของธาตุแต่ละชนิดได้ โดยการศึกษาสมบัติทางเคมีของโลหะและแร่ธาตุในดิน ซึ่งการศึกษานี้จะทำให้เข้าใจเคมีของดินที่สัมพันธ์ระหว่างโลหะและชนิดของดิน การเลือกสารเคมีที่มีความเหมาะสมในการสกัด

การสกัดแบบเป็นลำดับขั้น ใช้แยกโลหะที่สนใจออกเป็นส่วนๆ ตามการใช้สารละลายสกัดที่มีความแรงเพิ่มขึ้นตามลำดับ ปริมาณของโลหะที่ออกมาในแต่ละส่วนสามารถทำนายพฤติกรรมที่เป็นพิษของโลหะในสภาพแวดล้อมต่างๆ ได้ การเคลื่อนที่ของโลหะหนักขึ้นกับพีเอชและการเกิดสารเชิงซ้อนกับลิแกนด์ ดังนั้นการสกัดแบบเป็นลำดับขั้นจึงมีความสำคัญในการศึกษาทางสิ่งแวดล้อม

ขั้นที่ 1 : ส่วนที่ละลายน้ำ

ปกติน้ำบริสุทธิ์จะไม่ใช่ตัวสกัดที่ใช้กัน แต่มักใช้เป็นสารสกัดในส่วนแรก เพื่อพิจารณาว่า โลหะหนักที่อยู่ในตัวอย่างนั้น สามารถละลายน้ำได้หรือไม่ เพื่อใช้เป็นข้อมูลที่เป็นประโยชน์ ในการดูผลกระทบของสิ่งแวดล้อม เช่น ความเป็นพิษของไอออนโลหะหนักที่มีความสามารถที่จะ เคลื่อนที่ได้หลังจากเกิดน้ำท่วม

ขั้นที่ 2 : ส่วนที่สามารถแลกเปลี่ยนไอออน

ส่วนนี้เกี่ยวข้องการแลกเปลี่ยนกับสิ่งแวดล้อม ผลของการแลกเปลี่ยนประจุบวกของโลหะที่ จับตัวกันอย่างหลวม ๆ กับแร่ธาตุ ทั้งสารอินทรีย์และอนินทรีย์ของดินตะกอน คุณสมบัติของสาร สกัดในส่วนนี้คือ สามารถละลายไอออนโลหะที่ถูกดูดซับบนผิวของตัวอย่าง สารสกัดในส่วนนี้ นิยมใช้สารที่เป็น Neutral salt, Neutral electrolytes และ Buffered neutral solutions ซึ่งนิยมใช้กัน มากในส่วนนี้

ขั้นที่ 3 : ส่วนคาร์บอเนต

คุณสมบัติของสารสกัดในส่วนนี้ ต้องสามารถละลายโลหะที่เชื่อมอยู่กับคาร์บอเนตได้ ซึ่ง สารละลายอะซิเตตถูกนำมาใช้ โดยทำให้เป็นกรดที่พีเอช 5 เพื่อป้องกันการตกตะกอนของโลหะไฮดรอกไซด์

ขั้นที่ 4 : ส่วนออกไซด์และไฮดรอกไซด์

ในงานวิจัยนี้ได้ใช้การผสมของรีดักชันเอเจนต์ และกรด ซึ่งปกติใช้สกัดโลหะในปริมาณ น้อยที่ยึดเกาะอยู่กับ  $Fe_2O_3$  หรือ  $Mn_2O_3$  ในดินและตะกอน ซึ่งรูปของออกไซด์นี้เรียกว่า รีดักชันเฟส โดยมีช่วงอยู่ระหว่างอะมอร์ฟัส (Amorphous) และคริสตัลไลน์ (Crystalline) ซึ่งในส่วนนี้ ปกติ นิยมใช้ไฮดรอกซิลามีนไฮโดรคลอไรด์ (Hydroxylamine hydrochloride) ใน กรดอะซิติก เป็นสาร สกัด  $HOAc-NH_2OH.HCl$  ไม่สามารถรีดิวซ์สารอินทรีย์ที่อยู่ในตัวอย่างตะกอนได้ แต่มีความ เฉพาะเจาะจงกับพวกโลหะออกไซด์ ดังนั้นชนิดของสารสกัดนี้ควรมีความเฉพาะเจาะจงกับ โลหะ ออกไซด์และละลายโลหะที่เชื่อมอยู่กับโลหะด้วยพันธะที่แข็งแรง

ขั้นที่ 5 : ส่วนสารอินทรีย์

การสกัดโลหะในดินและตะกอนที่เชื่อมอยู่กับสารอินทรีย์หลายแบบ เช่น การดูดซับ การ เกิดสารเชิงซ้อน และการเกิดคีเลตภายใต้การสกัดเป็นลำดับจะมีสารที่เป็นตัวออกซิไดซ์ เพื่อใช้ ละลายให้ได้โลหะที่ละลายออกมาจากการสกัด นิยมนำไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ที่ถูกทำให้มี สภาพเป็นกรด มาใช้เป็นสารสกัดมากในส่วนนี้

## ชั้นที่ 6 : ส่วนที่เหลือ

หลังจากที่สกัดเอาบางส่วนออกไปแล้ว ของแข็งที่เหลือ ส่วนใหญ่จะเป็นแร่ปฐมภูมิ และทุติยภูมิ ในส่วนนี้จึงใช้สารสกัดที่มีความเป็นกรดแรง เพื่อละลายซิลิเกต และส่วนที่เหลืออื่น ๆ ที่ไม่สามารถสกัดออกมาได้ด้วยสารสกัดที่มีความแรงอ่อน โดยปกติจะใช้กรดที่ร้อนเพื่อย่อยส่วนที่เหลือให้เป็นสารละลายใส

## 2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

**Mari Shin et al., 2004** ทำการศึกษาการสกัดโลหะหนักออกจากดินที่ปนเปื้อน โดยใช้สารลดแรงตึงผิว 2 ชนิด คือสารลดแรงตึงผิวที่มีประจุลบคือ SDS และสารลดแรงตึงผิวชนิดไม่มีประจุคือ Triton X-100 โดยใช้ลิแกนด์ไอโอไดด์ร่วมด้วย จากผลการทดลอง พบว่าประสิทธิภาพในการล้างดินของสารลดแรงตึงผิวชนิดไม่มีประจุ Triton X-100 ร่วมกับสารละลายลิแกนด์ไอโอไดด์สามารถกำจัดแคดเมียมได้ถึง 65% และ 90% สำหรับดินชนิดที่ 1 และ 2 ตามลำดับ สารลดแรงตึงผิวชนิดประจุลบ ประสิทธิภาพการกำจัดแคดเมียมมีค่าเป็น 35% และ 70% สำหรับดินชนิดที่ 1 และ 2 ตามลำดับ โดยในตัวอย่างดินที่ 1 พบว่าเมื่อใช้สารลดแรงตึงผิวชนิดที่มีประจุลบ ทั้งที่ใช้และไม่ใช้สารละลายลิแกนด์ จากขั้นตอนการสกัดลำดับขั้นพบว่าสามารถทำการคายซับแคดเมียมในส่วนของสารประกอบคาร์บอนและสารประกอบออกไซด์ ในขณะที่สารลดแรงตึงผิวชนิดที่ไม่มีประจุสามารถทำการคายซับแคดเมียมในส่วนที่สามารถแลกเปลี่ยนไอออนส่วนในตัวอย่างดินที่ 2 สารลดแรงตึงผิวทั้ง 2 ชนิดคายซับแคดเมียมในส่วนของส่วนที่สามารถแลกเปลี่ยนไอออน เท่านั้น ดังนั้นสรุปได้ว่าเมื่อใช้สารลดแรงตึงผิวร่วมกับสารละลายลิแกนด์ไอโอไดด์ สามารถทำการสกัดโลหะหนักออกจากดินได้ และได้ทำการศึกษาชนิดของสารละลายลิแกนด์ที่มีผลต่อการสกัดโลหะหนักออกจากดิน ทำการทดลองโดยใช้สารละลายลิแกนด์ 2 ชนิด คือ สารละลายไอโอไดด์ และสารละลายไทโอไซยาเนทร่วมกับการใช้สารลดแรงตึงผิว Triton X-100 หลังจากผ่านการล้าง โดยใช้ลิแกนด์ไอโอไดด์ที่ความเข้มข้น 0.336 โมลต่อลิตร พบว่ามีประสิทธิภาพการกำจัดแคดเมียม 75% และประสิทธิภาพการกำจัดคอปเปอร์ 23% แต่ไม่สามารถทำการสกัดสังกะสีและตะกั่วได้ เมื่อเปลี่ยนสารจากไอโอไดด์มาเป็นไทโอไซยาเนท พบว่าประสิทธิภาพการกำจัดแคดเมียม 36% คอปเปอร์ 44% และ สังกะสี 77 % และเมื่อใช้สารละลายลิแกนด์ทั้ง 2 ชนิดร่วมกัน พบว่าประสิทธิภาพการกำจัดแคดเมียม คอปเปอร์และตะกั่ว มีค่า 95%, 48% และ 37% ตามลำดับ แต่ไม่สามารถกำจัดสังกะสีได้ ส่วนการสกัดลำดับขั้นพบว่าไอโอไดด์สามารถกำจัดโลหะหนักในส่วนของ ส่วนที่สามารถแลกเปลี่ยนไอออน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารประกอบคาร์บอนเนตและสารประกอบออกไซด์ ในขณะที่ลิแกนด์ไทโอไซยานนทจะทำการกำจัดโลหะหนักในส่วนของ ส่วนที่สามารถแลกเปลี่ยนไอออน

**Doong Ruey an et al., 1999** งานวิจัยนี้ทำการศึกษาหาชนิดของสารลดแรงตึงผิวและสภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดดินที่ปนเปื้อนแคดเมียม โดยใช้สารลดแรงตึงผิว 3 ชนิด คือ สารลดแรงตึงผิวชนิดไม่มีประจุ (Triton X-100) สารลดแรงตึงผิวชนิดประจุลบ (SDS) และสารลดแรงตึงผิวชนิดที่มีประจุบวก (CTAB) ร่วมกับการใช้สารละลาย EDTA และสารละลายไดฟีนิลไทโอคาร์บาโซน (DPC) เพื่อช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการกำจัดแคดเมียม จากการศึกษาพบว่าเมื่อทำการเติม สารลดแรงตึงผิวชนิดประจุลบ และ สารลดแรงตึงผิวชนิดไม่มีประจุ สามารถเพิ่มอัตราการสกัดโลหะหนัก ได้ ส่วนสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุบวกพบว่าเมื่อเติมลงไปจะทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักลดลง โดยในสภาวะที่เป็นกรด สารลดแรงตึงผิวชนิดประจุบวก จะมีประสิทธิภาพในการสกัดโลหะหนักที่ดีกว่าสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุลบและสารลดแรงตึงผิวชนิดไม่มีประจุ ประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะของสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุลบและสารลดแรงตึงผิวชนิดไม่มีประจุจะลดน้อยลงเมื่อค่าพีเอชเพิ่มขึ้นด้วย และ EDTA มีประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะออกได้ดีกว่า DPC เมื่อใช้ร่วมกับสารลดแรงตึงผิว

**พิลดา และคณะ (2548)** ทำการศึกษาเทคนิคการล้างดินเพื่อการกำจัดแคดเมียมออกจากดินปนเปื้อน โดยใช้สารลดแรงตึงผิวชนิดไม่มีประจุผสมกับลิแกนด์ กับชนิดมีประจุลบผสมกับลิแกนด์ ดินที่นำมาทำการทดลองเป็นดินบริเวณห้วยแม่ตาว จังหวัดตาก การทดลองเริ่มต้นด้วยการแบ่งดินเป็น 4 ตัวอย่าง ดินตัวอย่างที่ 1 และ 2 เป็นดินที่ไม่มีการเติมสารละลายแคดเมียมในรูปของโลหะซัลเฟต โดยมีแคดเมียมปนเปื้อนมาเท่ากับ 6.10 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม และ 70.53 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ ดินตัวอย่างที่ 3 และ 4 เป็นการนำดินตัวอย่างที่ 1 และ 2 จำนวน 1 กิโลกรัม มาเติมสารละลายแคดเมียมในรูปของโลหะซัลเฟตเข้มข้น 200 พีพีเอ็ม จำนวน 1 ลิตร จากนั้นทำการทดลองโดยการล้างดินด้วยสารลดแรงตึงผิวผสมกับลิแกนด์ เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพ และศึกษาถึงผลของระยะเวลาที่โลหะหนักแคดเมียมสะสมอยู่ในดิน ในการทดลอง สารลดแรงตึงผิวและสารละลายโซเดียมไฮโอไดรด์มีความเข้มข้นเท่ากับ 0.025 โมลาร์และ 0.336 โมลาร์ตามลำดับ ควบคุมอัตราการเขย่าที่ 150 รอบต่อนาที ระยะเวลาในการเขย่า 24 ชั่วโมง ทำการทดลองที่อุณหภูมิห้อง และควบคุมพีเอชเท่ากับ 7 จากนั้นนำดินที่ได้จากการล้างไปย่อยแล้วนำสารละลายทั้งหมดที่ได้ไปวัดหาปริมาณแคดเมียม โดยใช้เครื่องอะตอมมิกแอบซอร์บชัน สเปกโตรมิเตอร์ ผลการศึกษาพบว่า สารละลายไทรทอนเอกซ์-100ผสมกับสารละลายโซเดียมไฮโอไดรด์มีประสิทธิภาพ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการกำจัดดีกว่าสารละลายโซเดียมโคเคซิลซัลเฟตผสมกับสารละลายโซเดียมไฮโอไดด์และที่ระยะเวลา 60 วัน มีเปอร์เซ็นต์การกำจัดสูงกว่าที่ระยะเวลา 100 วัน โดยเปอร์เซ็นต์การกำจัดของสารละลายไทรทอนเอกซ์-100ผสมกับสารละลายโซเดียมไฮโอไดด์ในคืนทั้ง 4 ตัวอย่างที่ระยะเวลา 60 วัน เท่ากับ 44.26, 58.03, 80.06 และ 75.09 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 3

### วิธีการดำเนินงานวิจัย

#### 3.1 อุปกรณ์และสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

##### 3.1.1 อุปกรณ์

1. ชุดย่อยสลาย รุ่น 1200 Mega บริษัท Milestone microwave Laboratory Systems
2. เครื่องอะตอมมิกแอบซอร์บชันสเปกโตรมิเตอร์ (Atomic Absorption spectrometer) ของบริษัท พาราวินเซอร์ จำกัด รุ่น GBC 932 plus
3. กระจกทรงละเอียด เบอร์ 42 และ กระจกทรงขนาด 0.45 ไมโครเมตร
4. เครื่องกรองลดความดัน รุ่น Sibata Circulating Aspirator WJ-20
5. เครื่องพีเอชมิเตอร์ รุ่น 251 บริษัท Denver Instrument
6. เครื่องชั่งน้ำหนักแบบละเอียด รุ่น TC-254 บริษัท Denver Instrument
7. เครื่องปั่นเหวี่ยง (Centrifuge) รุ่น MSBO20 CX1.5 บริษัท SUNYO
8. เครื่องเขย่า รุ่น Hetofrig CB60 VS บริษัท Heto
9. ไฮโดรมิเตอร์มาตรฐาน ASTM No.1.152 H อ่านสเกลในหน่วยกรัมต่อลิตร
10. เครื่องกวนพร้อมแท่งแม่เหล็ก
11. เครื่องให้ความร้อน (Hot plate)
12. ตู้อบ (Oven) ของบริษัท Fisher Scientific รุ่น ISOTEMP
13. ตะแกรงร่อนขนาด 10 เมช
14. แท่งแก้วสำหรับคนแบบ Plunger
15. ขวดกลั่นเจห์ดาล (Kjeldahl falsk)
16. เครื่องแก้ว
17. เครื่องอ่างน้ำปรับอุณหภูมิ รุ่น Model WB 7/14/22/29/45

##### 3.1.2 สารเคมี

1. กรดไนตริกเข้มข้น ( $\text{HNO}_3$ ) บริษัท Carlo Erba จำกัด เกรดวิเคราะห์
2. กรดไฮโดรฟลูออริกเข้มข้น (HF) บริษัท Carlo Erba จำกัด เกรดวิเคราะห์
3. แคดเมียมไนเตรท  $\{(\text{CdNO}_3)_2 \cdot 4 \text{H}_2\text{O}\}$  บริษัท Carlo Erba จำกัด เกรดวิเคราะห์
4. โซเดียมไอโอไดด์ (NaI) บริษัท Carlo Erba จำกัด เกรดวิเคราะห์
5. สารละลายโซเดียมอะซิเตท ( $\text{CH}_3\text{COONa}$ ) บริษัท Carlo Erba จำกัด เกรดวิเคราะห์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6. แอมโมเนียมคลอไรด์ ( $\text{NH}_4\text{Cl}$ ) บริษัท Carlo Erba จำกัด เกรดวิเคราะห์
7. แอมโมเนียมออกซาลेट  $\{(\text{NH}_4)_2\text{C}_2\text{O}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}\}$  บริษัท Fluka Chemika จำกัด เกรดวิเคราะห์
8. แอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{NH}_4\text{OH}$ ) บริษัท Carlo Erba จำกัด เกรดวิเคราะห์
9. ไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์ ( $\text{C}_3\text{H}_8\text{O}$ ) บริษัท Carlo Erba จำกัด เกรดวิเคราะห์
10. สารละลายซิลเวอร์ไนเตรด ( $\text{AgNO}_3$ ) บริษัท Carlo Erba จำกัด เกรดวิเคราะห์
11. โซเดียมคลอไรด์ ( $\text{NaCl}$ ) บริษัท Sigma จำกัด เกรดวิเคราะห์
12. สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{NaOH}$ ) บริษัท Carlo Erba จำกัด เกรดวิเคราะห์
13. กรดบอริก ( $\text{H}_3\text{BO}_3$ ) บริษัท Carlo Erba จำกัด เกรดวิเคราะห์
14. กรดไฮโดรคลอริกมาตรฐาน ( $\text{HCl}$ ) บริษัท Carlo Erba จำกัด เกรดวิเคราะห์
15. โพแทสเซียมไดโครเมต ( $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ ) บริษัท Carlo Erba จำกัด เกรดวิเคราะห์
16. กรดซัลฟูริกเข้มข้น ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) บริษัท Carlo Erba จำกัด เกรดวิเคราะห์
17. เฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟต  $\{\text{Fe}(\text{NH}_4)_2(\text{SO}_4)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}\}$  บริษัท Carlo Erba จำกัด
18. สารละลายคัลคอน ( $\text{Na}_6\text{O}_{18}\text{P}_6$ ) บริษัท Carlo Erba จำกัด เกรดวิเคราะห์
19. เอมีลแอลกอฮอล์ ( $\text{C}_5\text{H}_{12}\text{O}$ ) บริษัท Carlo Erba จำกัด เกรดวิเคราะห์
20. แมกนีเซียมคลอไรด์ ( $\text{MgCl}_2$ ) บริษัท Carlo Erba จำกัด เกรดวิเคราะห์
21. สารละลายไทรทอนเอกซ์-100  $\{\text{C}_8\text{H}_{17}\text{C}_6\text{H}_4(\text{OC}_2\text{H}_4)_2\text{OH}\}$  บริษัท Fluka Chemika จำกัด เกรดวิเคราะห์
22. กรดอะซิติก ( $\text{CH}_3\text{COOH}$ ) บริษัท Carlo Erba จำกัด เกรดวิเคราะห์
23. แอมโมเนียมอะซิเตต ( $\text{NH}_4\text{OAc}$ ) บริษัท Carlo Erba จำกัด เกรดวิเคราะห์
24. ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ) บริษัท Carlo Erba จำกัด เกรดวิเคราะห์
25. ไฮดรอกซิลามีน ไฮโดรคลอไรด์ ( $\text{NH}_2\text{OH} \cdot \text{HCl}$ ) บริษัท Carlo Erba จำกัด เกรดวิเคราะห์
26. น้ำกลั่น และน้ำปราศจากไอออน

### 3.2 ที่มาของตัวอย่างดิน

การทดลองนี้ใช้ดินที่เก็บจากพื้นที่ ที่มีการปนเปื้อนจากการทำเหมืองแร่สังกะสีบริเวณ ห้วยแม่ตาว อำเภอแม่สอด จังหวัดตาก โดยเก็บดินในพื้นที่ 2 แหล่งที่มีปริมาณแคดเมียมที่แตกต่างกัน คือ บริเวณที่มีการปนเปื้อนน้อยกว่า 20 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมดินแห้ง และบริเวณที่มีการปนเปื้อนมากกว่า 20 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมดินแห้ง หลังจากที่ได้ทำการวิเคราะห์หาปริมาณเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แคดเมียมที่ปนเปื้อนในดินพบว่า ปริมาณแคดเมียมที่ปนเปื้อนในดินที่เก็บมาทั้ง 2 พื้นที่มีปริมาณน้อยมากและทั้ง 2 บริเวณมีค่าไม่แตกต่างกัน โดยมีค่าอยู่ในช่วง 0-3 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม จึงได้ทำการเติมสารละลายแคดเมียมในรูปของแคดเมียมไนเตรด  $\{(CdNO_3)_2 \cdot 4 H_2O\}$  เข้มข้น 1 มิลลิโมลต่อลิตร ในสัดส่วนดิน: สารละลายแคดเมียม 1 กรัม: 10 มิลลิลิตร ทิ้งไว้เป็นเวลา 1 และ 12 สัปดาห์ ดังนั้นดินที่ใช้ในการทดลองครั้งนี้จะประกอบด้วยดิน 4 ชุดคือ

ดินชุดที่ 1 และชุดที่ 2 หมายถึงดินที่เติมสารละลายแคดเมียมในรูปของแคดเมียมไนเตรดและทิ้งไว้เป็นเวลา 1 สัปดาห์

ดินชุดที่ 3 และ ชุดที่ 4 หมายถึง ดินที่เติมสารละลายแคดเมียมในรูปของแคดเมียมไนเตรดและทิ้งไว้เป็นเวลา 12 สัปดาห์

### 3.3 วิธีการทดลอง

#### 3.3.1 การศึกษาลักษณะทางกายภาพและทางเคมีของดิน

ลักษณะทางกายภาพและทางเคมีของดินชุดที่ 1 และดินชุดที่ 2 ที่ทำการตรวจวิเคราะห์ คือ พีเอช ความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวก ปริมาณสารอินทรีย์ ความชื้น และ ลักษณะเนื้อดิน โดยใช้วิธีการวิเคราะห์ดังตารางที่ 3.1 รายละเอียดวิธีการวิเคราะห์ดังแสดงในภาคผนวก ก.

#### ตารางที่ 3.1 วิธีการวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพและทางเคมีของดิน

พารามิเตอร์	วิธี/เครื่องมือที่ใช้วิเคราะห์
พีเอช	เครื่องวัดพีเอช (1:1 ดิน:น้ำ)
ความจุในการแลกเปลี่ยนประจุบวก (CEC)	การทำให้อิ่มตัวด้วยแอมโมเนียมอะซิเตด
ปริมาณอินทรีย์สาร (%)	การออกซิเดชันแบบเปียก
ความชื้น (%)	วิธีการวิเมตริก
ลักษณะเนื้อดิน (ปริมาณทราย ซิลต์ และเคลย์)	ไฮโดรมิเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3.2 การเติมสารละลายแคดเมียม (Spike) ลงไปในดิน

1. นำดินแห้งที่ 1 และ 2 ใส่สารละลายแคดเมียมในรูปของแคดเมียมไนเตรต  $\{(CdNO_3)_2 \cdot 4 H_2O\}$  เข้มข้น 1 มิลลิโมลต่อลิตร ในอัตราดิน: สารละลายแคดเมียม เท่ากับ 1 กรัม: 10 มิลลิลิตร (วิธีการเตรียมสารละลายแคดเมียม แสดงในภาคผนวก ข.)
2. เหย้าโดยใช้เครื่องเหย้าเป็นเวลา 5 วัน
3. ทำการแยกดินออกโดยการปั่นเหวี่ยง ที่ความเร็วรอบ 4000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 30 นาที
4. แยกส่วนใสที่นำชั้นของดินที่ยังมีความชื้นอยู่ (Slurry soil) ไปตากลมให้แห้ง (air-dry)

### 3.3.3 การศึกษาปริมาณแคดเมียมในดิน

1. ทำการสุ่มตัวอย่างดิน โดยใช้วิธีอิสระ จากนั้นบดดินให้ละเอียดแล้วนำไปร่อนด้วยตะแกรงเพื่อให้ได้ดิน 2 มิลลิเมตร
2. ชั่งดินตัวอย่าง 0.25 กรัม โดยทำซ้ำ 3 ซ้ำ
3. นำดิน ไปย่อยด้วยเครื่องไมโครเวฟไคเจสชัน ตามสภาวะการทดลองตามภาคผนวก ก.
4. หลังจากย่อยดินเสร็จแล้วตั้งทิ้งให้อุณหภูมิลดลงด้วยการนำไปให้น้ำไหลผ่านและเปิดเวสเซลในตู้ดูดควันเพื่อไล่ไอกรดออกไป
5. กรองสารละลายด้วยกระดาษกรองเบอร์ 42 แล้วกรองละเอียดอีกครั้งด้วยกระดาษกรองขนาด 0.45 ไมโครเมตร ใส่ลงในขวดวัดปริมาตรขนาด 25 มิลลิลิตร จากนั้นปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่น จนได้ปริมาตรของสารละลาย 25 มิลลิลิตร ทำการรักษาสภาพตัวอย่างด้วยการปรับพีเอชให้น้อยกว่าหรือเท่ากับ 2 ด้วยกรดไนตริก และเก็บไว้ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส
6. นำสารละลายที่ได้ไปหาความเข้มข้นของแคดเมียม ด้วยเครื่องอะตอมมิกแอบซอร์บชันสเปกโทรมิเตอร์
7. นำดินที่ได้ไปผ่านขั้นตอนการสกัดแบบเป็นลำดับขั้น (Sequential extraction) เพื่อทำการศึกษารูปแบบสัดส่วนของโลหะรูปแบบต่างๆ ดังนี้ (Yong *et al.*, 1993; Mulligan *et al.*, 1999b)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3.4 การศึกษารูปแบบของแคดเมียมในดินด้วยวิธีการสกัดแบบเป็นลำดับขั้น (Sequential Extraction)

นำดินตัวอย่างทุกชุดที่ใช้ในการทดลอง และดินที่ได้หลังจากการล้างด้วยสารลดแรงตึงผิวร่วมกับลิแกนด์มาทำการสกัดเป็นลำดับขั้น เพื่อศึกษาสัดส่วนของโลหะรูปแบบต่างๆในดิน โดยสารเคมีที่ใช้สกัดจะมีความแรงเพิ่มขึ้นตามลำดับ วิธีการสกัดแบบเป็นลำดับขั้น อ้างอิงตามวิธี Yong *et al.*, 1993; Mulligan *et al.*, 1999b ซึ่งประกอบด้วย 6 ขั้นตอน ดังนี้คือ

#### ขั้นที่ 1 รูปที่ละลายน้ำ (Soluble)

1. ชั่งดิน 1 กรัม เติมน้ำกลั่นที่ปราศจากไอออน จำนวน 25 มิลลิลิตร ทำการเขย่าเป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิห้อง แล้วนำไปปั่นเหวี่ยงเพื่อแยกส่วนใส นาน 5 นาที
2. นำไปกรองผ่านกระดาษกรองเบอร์ 42
3. เก็บส่วนใสใส่ขวดพลาสติก ทำการรักษาสภาพตัวอย่างที่พีเอชน้อยกว่าหรือเท่ากับ 2 แล้วนำไปเก็บไว้ที่ 4 องศาเซลเซียส เพื่อรอการวิเคราะห์หาความเข้มข้นของแคดเมียมด้วยเครื่องอะตอมมิกแอบซอร์บชันสเปกโทรมิเตอร์
4. ล้างส่วนที่เหลือด้วย น้ำกลั่นที่ปราศจากไอออน 5 มิลลิลิตร แล้วนำของแข็งที่เหลือไปทำต่อในขั้นต่อไป

#### ขั้นที่ 2 รูปที่สามารถแลกเปลี่ยนไอออนได้ (Exchangeable)

1. นำของแข็งที่เหลือจากขั้นที่ 1 มาเติม แมกนีเซียมคลอไรด์ 1 โมลต่อลิตรในปริมาตร 8 มิลลิลิตร
2. นำไปเขย่า 1 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิห้อง แล้วนำไปปั่นเหวี่ยงเพื่อแยกส่วนใส นาน 5 นาที
3. นำไปกรองผ่านกระดาษกรองเบอร์ 42
4. เก็บส่วนใสใส่ขวดพลาสติก ทำการรักษาสภาพตัวอย่างที่พีเอชน้อยกว่าหรือเท่ากับ 2 แล้วนำไปเก็บไว้ที่ 4 องศาเซลเซียส เพื่อรอการวิเคราะห์หาความเข้มข้นของแคดเมียมด้วยเครื่องอะตอมมิกแอบซอร์บชันสเปกโทรมิเตอร์
5. ล้างส่วนที่เหลือด้วยน้ำกลั่นที่ปราศจากไอออน 5 มิลลิลิตร แล้วนำของแข็งที่เหลือไปทำต่อในขั้นต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### **ขั้นที่ 3 รูปคาร์บอเนต (Carbonate)**

1. นำของแข็งที่เหลือจากขั้นที่ 2 มาเติม โซเดียมอะซิเตรท 1 โมลต่อลิตร ( ที่ทำการปรับพีเอช ด้วย 25% v/v กรดอะซิติกให้มีค่าเท่ากับ 5 ) ในปริมาตร 8 มิลลิลิตร
2. นำไปเขย่า 5 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิห้อง แล้วนำไปปั่นเหวี่ยงเพื่อแยกส่วนใส นาน 5 นาที
3. นำไปกรองผ่านกระดาษกรองเบอร์ 42
4. เก็บส่วนใสใส่ขวดพลาสติก ทำการรักษาสภาพตัวอย่างที่พีเอชน้อยกว่าหรือเท่ากับ 2 แล้วนำไปเก็บไว้ที่ 4 องศาเซลเซียส เพื่อรอการวิเคราะห์หาความเข้มข้นของแคดเมียมด้วยเครื่องอะตอม มิกแอบซอร์บชันสเปกโทรมิเตอร์
5. ล้างส่วนที่เหลือด้วยน้ำกลั่นที่ปราศจากไอออน 5 มิลลิลิตร แล้วนำของแข็งที่เหลือไปทำต่อในขั้นต่อไป

### **ขั้นที่ 4 รูปออกไซด์และไฮดรอกไซด์ (Oxides and hydroxides)**

1. นำของแข็งที่เหลือจากขั้นที่ 3 มาเติม ไฮดรอกซาลามีน ไฮโดรคลอไรด์ 0.04 โมลต่อลิตร ( ที่ทำการปรับพีเอช เท่ากับ 2 ด้วย 25 % v/v กรดอะซิติก ) ในปริมาตร 20 มิลลิลิตร
2. นำไปเขย่าที่เครื่องอ่างน้ำปรับอุณหภูมิ 6 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 96 องศาเซลเซียส แล้วนำไปปั่นเหวี่ยงเพื่อแยกส่วนใส นาน 5 นาที
3. นำไปกรองผ่านกระดาษกรองเบอร์ 42
4. เก็บส่วนใสใส่ขวดพลาสติก ทำการรักษาสภาพตัวอย่างที่พีเอชน้อยกว่าหรือเท่ากับ 2 แล้วนำไปเก็บไว้ที่ 4 องศาเซลเซียส เพื่อรอการวิเคราะห์หาความเข้มข้นของแคดเมียมด้วยเครื่องอะตอมมิกแอบซอร์บชันสเปกโทรมิเตอร์
5. ล้างส่วนที่เหลือด้วยน้ำกลั่นที่ปราศจากไอออน 5 มิลลิลิตร แล้วนำของแข็งที่เหลือไปทำต่อในขั้นต่อไป

### **ขั้นที่ 5 รูปสารอินทรีย์ (Organic)**

1. นำของแข็งที่เหลือจากขั้นที่ 4 มาเติม กรดไนตริก 0.02 โมลต่อลิตร ในปริมาตร 3 มิลลิลิตร จากนั้นทำการเติม ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 30% ปริมาตร 5 มิลลิลิตร ( ที่ทำการปรับพีเอช ให้มีค่าเท่ากับ 2 ด้วย 20% v/v กรดไนตริก )
2. นำไปเขย่าด้วย เครื่องอ่างน้ำปรับอุณหภูมิ 2 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 85 องศาเซลเซียส แล้วตั้งทิ้งไว้ให้เย็น
3. เติม ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 30% ปริมาตร 3 มิลลิลิตร ( ที่ทำการปรับพีเอชเท่ากับ 2 ด้วย 20% (v/v) กรดไนตริก )

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. นำไปเขย่าด้วยเครื่องอ่างน้ำปรับอุณหภูมิ 3 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 85 องศาเซลเซียส แล้วตั้งทิ้งไว้ให้เย็น
5. ทำการเติมแอมโมเนียมอะซิเตรท 3.2 โมลต่อลิตร ในปริมาตร 5 มิลลิลิตร เขย่าที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 30 นาที แล้วนำไปปั่นเหวี่ยงเพื่อแยกส่วนใสนาน 5 นาที
6. กรองผ่านกระดาษกรองเบอร์ 42
7. เก็บส่วนใสใส่ขวดพลาสติก ทำการรักษาสภาพตัวอย่างที่พีเอชน้อยกว่าหรือเท่ากับ 2 แล้วนำไปเก็บไว้ที่ 4 องศาเซลเซียส เพื่อรอการวิเคราะห์หาความเข้มข้นของแคดเมียมด้วยเครื่อง อะตอมมิกแอบซอร์บชันสเปกโตรมิเตอร์
8. ล้างส่วนที่เหลือด้วยน้ำกลั่นที่ปราศจากไอออน 5 มิลลิลิตร แล้วนำของแข็งที่เหลือไปทำต่อในขั้นต่อไป

#### **ขั้นที่ 6 รูปที่เหลือ (Residual)**

1. นำของแข็งที่เหลือจากขั้นที่ 5 ไปทำให้แห้ง โดยนำไปอบที่ 103-105 องศาเซลเซียส นาน 30 นาที
2. ทำการเติมสารละลายกรดไนตริก 65% 3 มิลลิลิตร และกรดไฮโดรฟลูออริก 48% 3 มิลลิลิตร ถ้าส่วนของตัวอย่างที่เกาะอยู่ที่ผิวของเวสเซล ให้ทำการหยดกรดลงไปบริเวณนั้น นำไปย่อยด้วยเครื่องไมโครเวฟ จนได้สารละลายใส รายละเอียดวิธีการวิเคราะห์ดังแสดงในภาคผนวก ก.
3. ปรับปริมาตรเป็น 25 มิลลิลิตร ด้วยน้ำกลั่นที่ปราศจากไอออน
4. เก็บส่วนใสใส่ขวดพลาสติก ทำการรักษาสภาพตัวอย่างที่พีเอชน้อยกว่าหรือเท่ากับ 2 แล้วนำไปเก็บไว้ที่ 4 องศาเซลเซียส เพื่อรอการวิเคราะห์หาความเข้มข้นของแคดเมียมด้วยเครื่องอะตอมมิกแอบซอร์บชันสเปกโตรมิเตอร์

#### **3.3.5 การล้างดินด้วยสารละลาย ไตรทอนเอกซ์-100 (Triton X-100) ร่วมกับลิแกนด์ไอโอไดด์**

1. ชั่งดินตัวอย่างแต่ละชุด อย่างละ 2.50 กรัม ใส่ขวดพลาสติก
2. เติมสารละลายผสมของสารละลายไตรทอนเอกซ์ - 100 ที่ความเข้มข้น 0.025 โมลต่อลิตร กับสารละลายโซเดียมไอโอไดด์ที่ความเข้มข้น 0.336 โมลต่อลิตร ปริมาณ 25 มิลลิลิตร โดยทำซ้ำ 3 ครั้ง แล้วทำแบลนด์โดยใช้ น้ำกลั่นแทนดินตัวอย่าง
3. นำไปเขย่าที่ความเร็วรอบ 150 รอบต่อนาที เป็นเวลา 24 ชั่วโมง
4. จากนั้นนำไปปั่นเหวี่ยงด้วยเครื่องปั่นเหวี่ยงที่ความเร็ว 4000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 30 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. นำสารละลายที่ได้ไปกรองโดยใช้กระดาษกรองเบอร์ 42 และกรองละเอียดด้วยกระดาษกรองขนาด 0.45 ไมโครเมตร แล้วปรับปริมาตรเป็น 25 มิลลิลิตร ด้วยน้ำกลั่น ทำการรักษาสภาพตัวอย่างที่พีเอชน้อยกว่าหรือเท่ากับ 2 และเก็บไว้ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส

6. นำสารละลายที่ได้ไปวัดหาความเข้มข้นของแคดเมียม ด้วยเครื่องอะตอมมิกแอบซอร์บชันสเปกโตรมิเตอร์

7. นำดินที่ผ่านการล้าง มาผึ่งลมให้แห้ง เก็บใส่ถุงพลาสติกเพื่อนำไปทำการสกัดลำดับขั้นเพื่อศึกษาสัดส่วนของแคดเมียมรูปแบบต่างๆที่ถูกจับยึดอยู่ในดิน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

### ผลการทดลองและอภิปรายผล

#### 4.1 การศึกษาลักษณะทางกายภาพและทางเคมีของดิน

ดินที่ใช้ในการทดลองคือดินที่เก็บจากพื้นที่ที่มีการปนเปื้อนจากการทำเหมืองแร่สังกะสี บริเวณห้วยแม่ดาว ในพื้นที่ 2 แห่งที่คาดว่าจะมีปริมาณแคดเมียมปนเปื้อนต่างกัน แต่หลังจากการวิเคราะห์พบว่าปริมาณแคดเมียมในดินทั้ง 2 พื้นที่มีค่าใกล้เคียงกัน โดยมีค่าอยู่ในช่วง 0-3 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม จึงนำดินทั้ง 2 แห่ง มาเติมสารละลายแคดเมียมในรูปโลหะไนเตรท 1 มิลลิโมลต่อลิตร ในสัดส่วนดิน:สารละลายแคดเมียม 1 กรัม : 10 มิลลิตร ที่ทิ้งไว้เป็นระยะเวลา 1 สัปดาห์ คือดินชุดที่ 1 และ 2 ขณะที่ดินที่ทิ้งไว้ 12 สัปดาห์ คือดินชุดที่ 3 และ 4 ตามลำดับ เมื่อนำมาศึกษาลักษณะทางกายภาพและทางเคมีของดิน พบว่ามีค่าดังนี้คือ ดินชุดที่ 1 และชุดที่ 3 มีค่าพีเอช  $6.86 \pm 0.17$  ความจุในการแลกเปลี่ยนประจุบวก  $12.10 \pm 0.50$  มิลลิกรัมสมมูลต่อกรัมของดิน ปริมาณอินทรีย์สาร  $0.80 \pm 0.10$  เปอร์เซ็นต์ ความชื้น  $0.31 \pm 0.01$  เปอร์เซ็นต์ เปอร์เซ็นต์ดินทราย: ดินร่วน: ดินเหนียว ในดินชุดที่ 1 เท่ากับ 51.54 : 26.75 : 21.71 ลักษณะดินเป็นดินร่วนเหนียวปนทราย (sandy clay loam) ส่วนความเข้มข้นของแคดเมียมในดินชุดที่ 1 และชุดที่ 3 ปริมาณที่วิเคราะห์ได้จะอยู่ในช่วง 490-790 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม จะเห็นได้ว่าปริมาณแคดเมียมที่วิเคราะห์ได้ในแต่ละครั้ง จะมีการกระจายตัวของแคดเมียมในตัวอย่างดินเป็นแบบไม่เป็นเนื้อเดียวกัน (non - homogeneous soil samples)

ส่วนดินชุดที่ 2 และชุดที่ 4 มีค่าพีเอชเท่ากับ  $5.42 \pm 0.01$  ความจุในการแลกเปลี่ยนประจุบวก  $11.45 \pm 0.50$  มิลลิกรัมสมมูลต่อกรัมของดิน ปริมาณอินทรีย์สารเท่ากับ  $0.76 \pm 0.02$  เปอร์เซ็นต์ความชื้นเท่ากับ  $0.28 \pm 0.01$  เปอร์เซ็นต์ เปอร์เซ็นต์ดินทราย: ดินร่วน: ดินเหนียว เท่ากับ 70.76 : 21.3 : 7.94 ลักษณะดินเป็นดินร่วนปนทราย (sandy loam) ส่วนความเข้มข้นของแคดเมียมในดินชุดที่ 2 และชุดที่ 4 ปริมาณที่วิเคราะห์ 550 - 760 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ลักษณะทางกายภาพและทางเคมีของดินแสดงดังตารางที่ 4.1

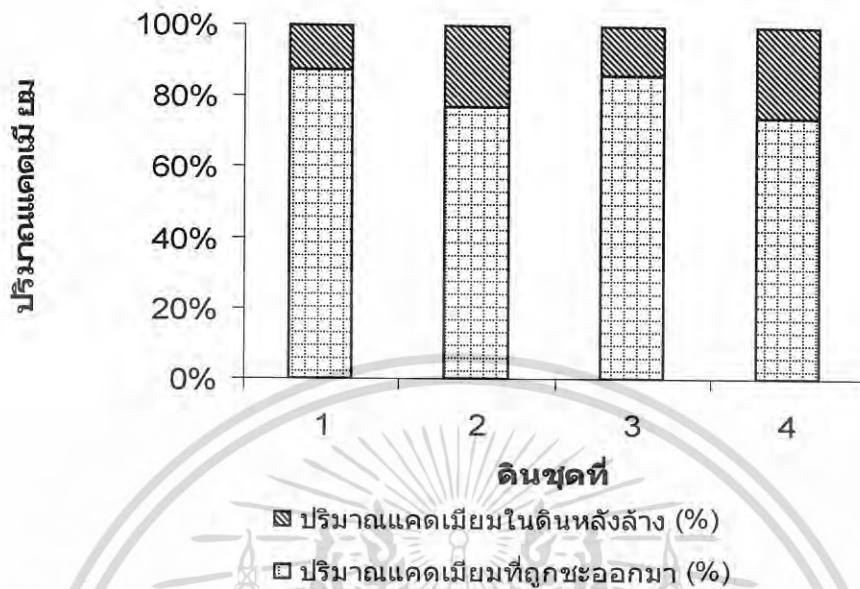
**ตารางที่ 4.1** แสดงลักษณะทางกายภาพและทางเคมีของดิน (n = 3)

พารามิเตอร์		หน่วย	ดินชุดที่ 1 และชุดที่ 3	ดินชุดที่ 2 และชุดที่ 4
ค่าพีเอช		-	6.86 ± 0.17	5.42 ± 0.01
ความจุในการแลกเปลี่ยนประจุบวก (CEC)		(มิลลิกรัม สมมูลต่อ100 กรัมของดิน)	12.10 ± 0.50	11.45 ± 0.50
ปริมาณอินทรีย์สาร		(%w/w)	0.80 ± 0.1	0.76 ± 0.02
ความชื้น		(%w/w)	0.3 ± 0.01	0.28 ± 0.01
การกระจายตัวของอนุภาค	ดินทราย	(%w/w)	51.54	70.76
	ดินซิลต์	(%w/w)	21.71	7.94
	ดินเหนียว	(%w/w)	26.75	21.30
ลักษณะเนื้อดิน		-	ดินร่วนเหนียวปนทราย (Sandy clay loam)	ดินร่วนปนทราย (Sandy loam)
ปริมาณแคลเซียมในดิน		(มิลลิกรัม/ กิโลกรัม)	490-790	550 - 760

#### 4.2 การศึกษาการล้างแคลเซียมออกจากดินด้วยไทรทอนเอกซ์-100 ร่วมกับโซเดียมไฮโอไดด์

จากการศึกษาการล้างดิน (Mari Shin, 2004) พบว่าการนำลิแกนด์เข้ามาใช้ร่วมกับสารลดแรงตึงผิวจะเพิ่มประสิทธิภาพการกำจัดแคลเซียมได้ดีขึ้น เนื่องจากโลหะจะเข้าไปสร้างเป็นสารประกอบเชิงซ้อนกับลิแกนด์ในไมเซลล์และละลายออกมา ส่วนชนิดของลิแกนด์ที่มีประสิทธิภาพในการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนกับแคลเซียมมากที่สุด คือ สารละลายโซเดียมไฮโอไดด์ เนื่องจากงานวิจัยดังกล่าวได้สรุปไว้ว่า ลิแกนด์ของไฮโอไดด์ และสารละลายไทรทอนเอกซ์ มีประสิทธิภาพดีที่สุดใน ดังนั้น ผู้ทำการทดลองจึงได้เลือกชนิดของลิแกนด์ สารลดแรงตึงผิวและสภาวะการทดลองตามงานวิจัยของ Mari Shin, 2004 โดยใช้สารละลายโซเดียมไฮโอไดด์เข้มข้น 0.336 โมลต่อลิตร สารละลายไทรทอนเอกซ์เข้มข้น 0.025 โมลต่อลิตร และแปรค่าระยะเวลาการสะสมของแคลเซียมที่ 1 สัปดาห์ และ 12 สัปดาห์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.1 แสดงปริมาณแคดเมียมในดินและในน้ำที่ถูกชะออกมา

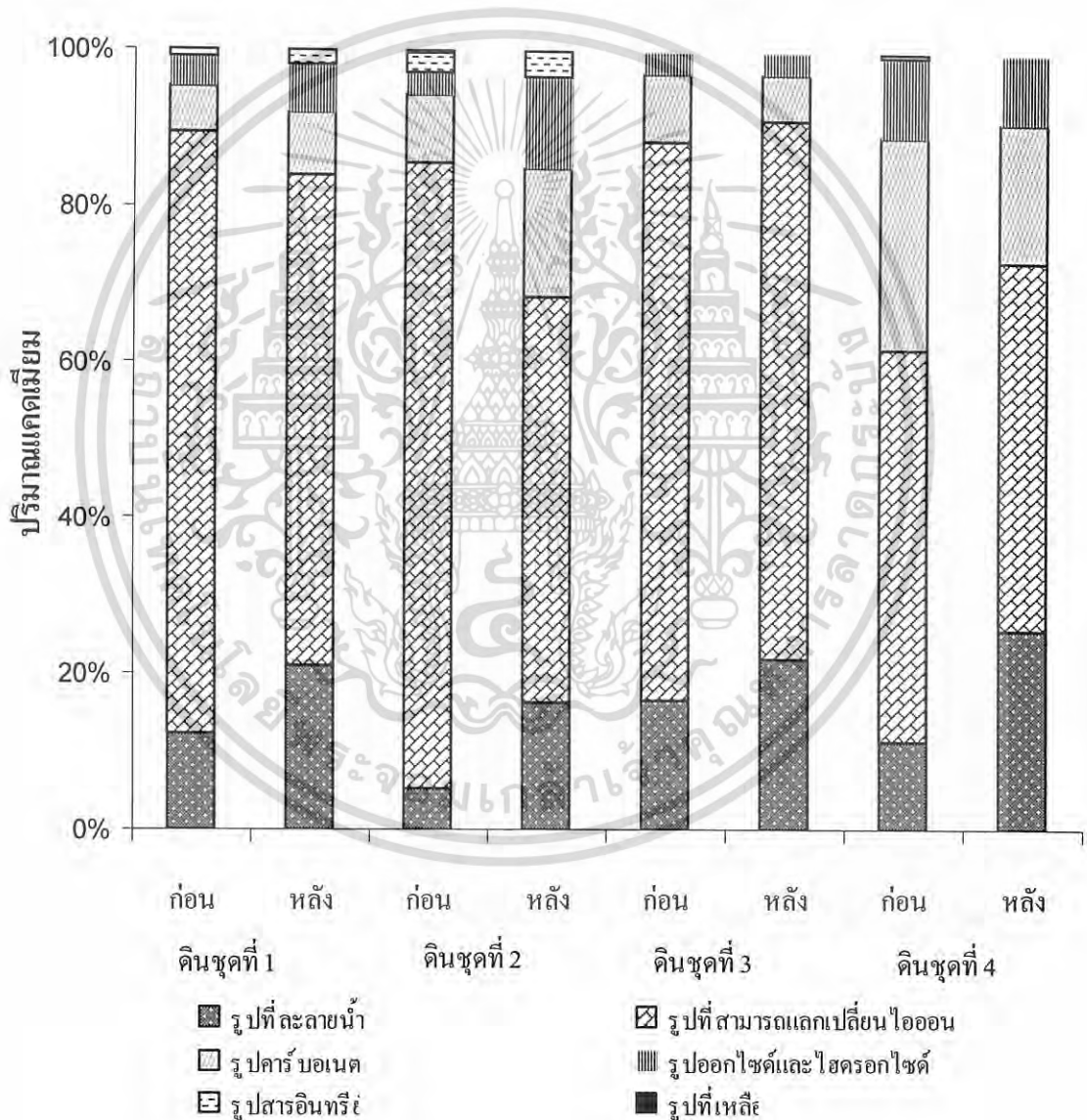
จากรูปที่ 4.1 พบว่าเมื่อระยะเวลาที่แคดเมียมสะสมอยู่ในดินยาวนานขึ้นปริมาณแคดเมียมที่ถูกชะออกมามีค่าน้อยลง โดยมีค่าปริมาณแคดเมียมที่ถูกชะออกมาในดินชุดที่ 1 มีค่าเท่ากับ 87.38% ดินชุดที่ 2 มีค่าเท่ากับ 77.47% ดินชุดที่ 3 มีค่าเท่ากับ 85.65% และดินชุดที่ 4 มีค่าเท่ากับ 75.33% ทั้งนี้เนื่องจากเมื่อระยะเวลาที่แคดเมียมสะสมอยู่ในดินยาวนานขึ้น โอกาสที่แคดเมียมทำปฏิกิริยากับอินทรีย์วัตถุหรือโลหะหนักชนิดอื่นหรืออาจจะตกตะกอนในรูปคาร์บอเนตและฟอสเฟตมีมากขึ้น ทำให้การชะล้างออกได้ยากขึ้น

เมื่อเปรียบเทียบระหว่างดินชุดที่ 1 และ 2 พบว่า ดินชุดที่ 1 มีปริมาณแคดเมียมที่ถูกชะออกมามากกว่าดินชุดที่ 2 เนื่องจากดินชุดที่ 1 มีค่าความจุในการแลกเปลี่ยนประจุบวกสูงกว่าดินชุดที่ 2 จึงทำให้มีสัดส่วนแคดเมียมในรูปที่สามารถแลกเปลี่ยนไอออนได้สูงกว่าด้วย และลิแกนด์ไอโอไดด์ที่ใช้ร่วมกับสารละลายไทรทอนเอกซ์-100 สามารถจับตัวกับแคดเมียมในรูปนี้เกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนในไมเซลล์และละลายออกมาได้สูง ดังนั้นจึงทำให้ในดินชุดที่ 1 มีปริมาณแคดเมียมที่ถูกชะออกมาสูงกว่าดินชุดที่ 2 และเป็นไปในลักษณะเดียวกันในดินชุดที่ 3 และ 4

### 4.3 การศึกษารูปแบบของแคดเมียมในดิน

#### 4.3.1 เปรียบเทียบรูปแบบของแคดเมียมในดินก่อนและหลังการล้างด้วยไทรทอนเอกซ์-100 ร่วมกับโซเดียมไฮดรอกไซด์

ในการศึกษารูปแบบของแคดเมียมในดินก่อนและหลังการล้าง ทำการทดลองโดยนำดินชุดที่ 1, 2, 3 และ 4 ก่อนการล้างมาทำการสกัดแบบเป็นลำดับขั้น เพื่อศึกษาสัดส่วนของแคดเมียมรูปแบบต่างๆ ที่อยู่ในดินก่อนการล้าง เปรียบเทียบกับรูปแบบของแคดเมียมในดินภายหลังการล้าง



รูปที่ 4.2 แสดงสัดส่วนของแคดเมียมรูปแบบต่างๆ ในดินก่อนและหลังล้าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

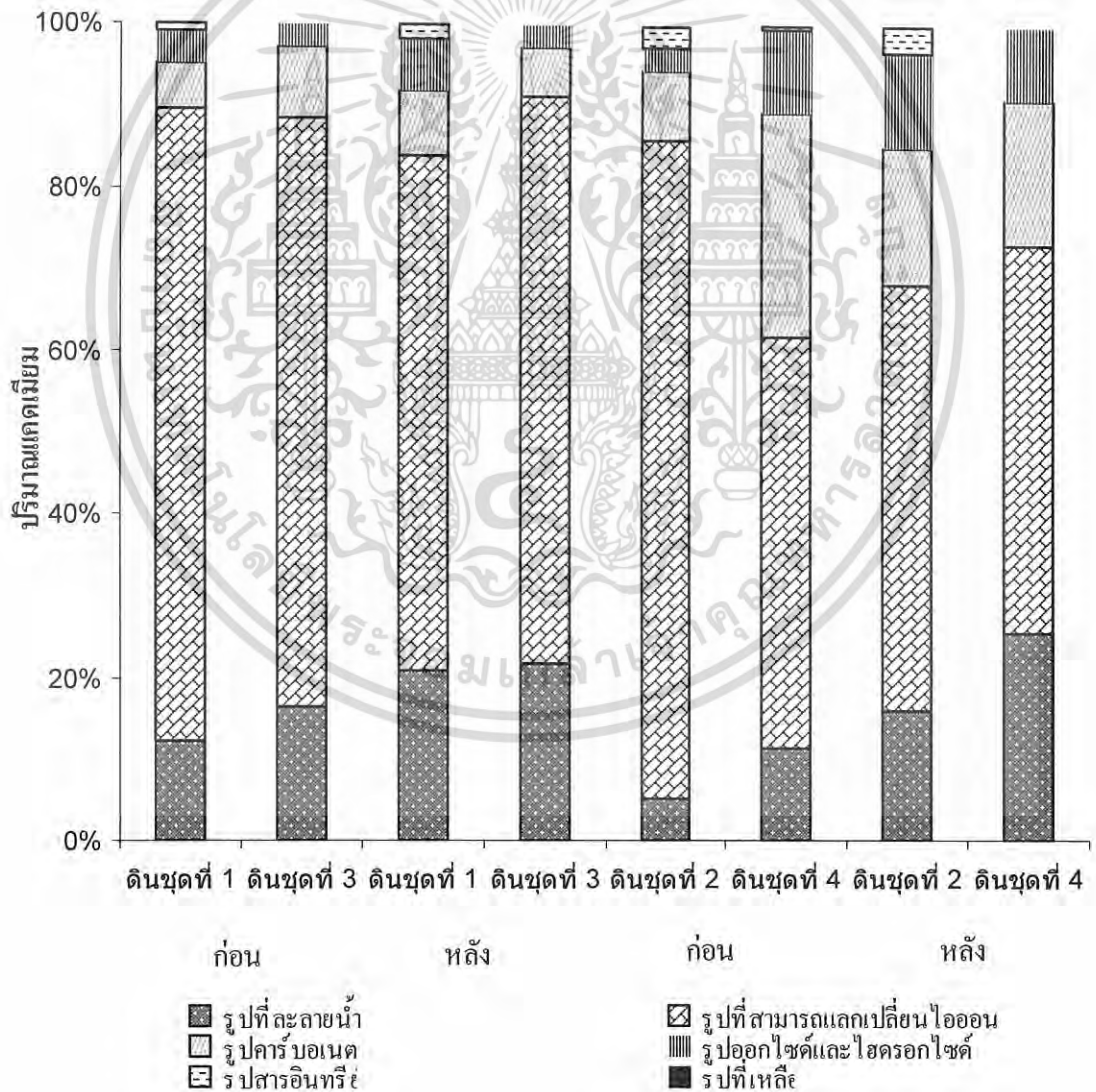
จากรูปที่ 4.2 พบว่า สัดส่วนรูปของแคดเมียมที่อยู่ในดินก่อนการล้างดินทุกชุด (ดินชุดที่ 1, 2, 3 และ 4) มีสัดส่วนแคดเมียมอยู่ในรูปที่ละลายน้ำและรูปที่สามารถแลกเปลี่ยนไอออนได้ เป็นส่วนใหญ่ โดยดินชุดที่ 1 และ 3 มีปริมาณอนุภาคดินเหนียวที่สูงกว่า ค่าความจุในการแลกเปลี่ยนประจุบวกและสัดส่วนแคดเมียมในรูปที่สามารถแลกเปลี่ยนได้ของชุดดินที่ 1 และ 3 มีค่ามากกว่าชุดดินที่ 2 และ 4 โดยที่สัดส่วนแคดเมียมที่อยู่ในรูปที่ละลายน้ำของดินชุดที่ 1, 2, 3 และ 4 มีค่าเท่ากับ 12.26, 5.07, 16.48 และ 11.33 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ สัดส่วนแคดเมียมในรูปที่สามารถแลกเปลี่ยนไอออนได้ มีค่าเท่ากับ 77.27, 80.67, 71.90 และ 50.62 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ หลังจากการล้างดินด้วยไทรทอนเอกซ์-100 ร่วมกับโซเดียมไฮโอไซด์ รูปที่สามารถแลกเปลี่ยนไอออนได้มีสัดส่วนเป็นแนวโน้มลดลง เนื่องจากลิแกนด์ไฮโอไซด์ที่ใช้ร่วมกับสารลดแรงตึงผิว ไทรทอนเอกซ์-100 สามารถจับกับแคดเมียมในรูปนี้ เกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนในไมเซลล์และละลายออกมา แคดเมียมในรูปนี้จึงถูกชะออกมา โดยสัดส่วนรูปที่สามารถแลกเปลี่ยนไอออนได้ที่เหลืออยู่ในดินชุดที่ 1, 2, 3 และ 4 เท่ากับ 63.10, 52.34, 69.44 และ 47.56 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ สำหรับสัดส่วนแคดเมียมในรูปที่ละลายน้ำของดินทุกชุดหลังการล้างมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น อาจเกิดจากสารลดแรงตึงผิว ไทรทอนเอกซ์-100 และลิแกนด์ไฮโอไซด์ สามารถทำให้แคดเมียมที่อยู่ในรูปอื่นๆ เกิดการเกาะกันอยู่อย่างหลวมๆ และเปลี่ยนแปลงมาอยู่ในรูปที่ละลายน้ำ ทำให้สัดส่วนแคดเมียมในรูปที่ละลายน้ำมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองของ Mari Shin (2004) ที่วิเคราะห์หาปริมาณแคดเมียมในน้ำหลังจากการล้างหลายๆ ครั้งด้วยไทรทอนเอกซ์-100 ร่วมกับโซเดียมไฮโอไซด์ จะเพิ่มขึ้น รูปคาร์บอเนต รูปออกไซด์และไฮดรอกไซด์ และรูปสารอินทรีย์ในดินชุดที่ 1 และ 2 มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น รูปคาร์บอเนตที่เพิ่มขึ้น อาจเกิดจากไทรทอนเอกซ์-100 และลิแกนด์ไม่สามารถชะล้างแคดเมียมในส่วนเหล่านี้ออกมาได้ จึงเกิดการตกตะกอนในรูปคาร์บอเนต ขณะที่รูปสารอินทรีย์ที่เพิ่มขึ้นอาจเกิดจากไทรทอนเอกซ์-100 และลิแกนด์มีส่วนประกอบที่เป็นสารอินทรีย์จึงอาจทำให้สารอินทรีย์เข้าไปจับตัวกับแคดเมียมในดินหลังจากการล้าง ทำให้สัดส่วนแคดเมียมรูปสารอินทรีย์มีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้น โดยสัดส่วนแคดเมียมในรูปที่ละลายน้ำในดินชุดที่ 1, 2, 3 และ 4 มีค่าเท่ากับ 20.96, 16.13, 21.79 และ 25.65 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ สัดส่วนแคดเมียมในรูปคาร์บอเนตในดินชุดที่ 1 และ 2 มีค่าเท่ากับ 7.83 และ 16.56 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ สัดส่วนแคดเมียมในรูปออกไซด์และไฮดรอกไซด์ในดินชุดที่ 1 และ 2 มีค่าเท่ากับ 6.17 และ 11.76 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ สัดส่วนแคดเมียมในรูปสารอินทรีย์ มีค่าเท่ากับ 1.94 และ 3.20 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ส่วนสัดส่วนแคดเมียมรูปคาร์บอเนตและรูปออกไซด์และไฮดรอกไซด์ในดินชุดที่ 3 และ 4 มีแนวโน้มที่ลดลงหลังการล้าง อาจเกิดจากระยะเวลาการสะสมแคดเมียมที่ยาวนานขึ้น แคดเมียมทั้งสองรูปนี้อาจมีการจับตัวกันอย่างหลวมๆ ทำให้ไทรทอนเอกซ์-100 และลิแกนด์ไฮโอไซด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สามารถชะแคะเมียมออกมาได้มากขึ้น จึงทำให้แคะเมียมในสองรูปนี้มีแนวโน้มที่ลดลง โดยมีค่า สัดส่วนรูปคาร์บอนเตเท่ากับ 6.05 และ 17.82 เปอร์เซ็นต์ สัดส่วนรูปออกไซด์และไฮดรอกไซด์ เท่ากับ 2.72 และ 8.95 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

**4.3.2 เปรียบเทียบรูปแบบของแคะเมียมในดินที่ระยะเวลา 1 สัปดาห์ และ 12 สัปดาห์**

ในการศึกษารูปแบบของแคะเมียมในดินที่ระยะเวลาต่างกัน โดยจะทำการเปรียบเทียบ สัดส่วนรูปแบบของแคะเมียมที่ได้ของดินชุดเดียวกัน ที่ระยะเวลาการสะสมของแคะเมียมต่างกัน โดยนำดินชุดที่ 1 และ 2 เป็นดินชุดที่มีระยะเวลาการสะสมของแคะเมียมเป็นระยะเวลา 1 สัปดาห์ ส่วน ในดินชุดที่ 3 และ 4 เป็นดินชุดที่มีระยะเวลาการสะสมของแคะเมียมเป็นระยะเวลา 12 สัปดาห์ มาสกัด แบบเป็นลำดับขั้น ทั้งก่อนและหลังการล้างด้วยไทรทอนเอกซ์-100 ร่วมกับลิแกนด์ไอโอไดด์



**รูปที่ 4.3 แสดงสัดส่วนของแคะเมียมรูปแบบต่างๆ ในดินเมื่อระยะเวลาเปลี่ยนแปลงไป**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.3 พบว่ารูปของแคดเมียมจากการสกัดตามลำดับชั้นของดินก่อนการล้างที่ระยะเวลา 12 สัปดาห์ (ดินชุดที่ 3 และ 4) มีสัดส่วนแคดเมียมในรูปที่ละลายได้ และรูปคาร์บอเนตมากกว่าที่ระยะเวลาการสะสมของแคดเมียม 1 สัปดาห์ (ดินชุดที่ 1 และ 2) เนื่องมาจากเมื่อระยะเวลาผ่านไปนานขึ้น จะเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปที่ละลายได้ให้มีค่ามากขึ้น เกิดการตกตะกอนของแคดเมียมในรูปคาร์บอเนตในปริมาณที่มากขึ้น โดยก่อนการล้าง ดินมีสัดส่วนแคดเมียมรูปที่ละลายน้ำได้ในดินชุดที่ 1 และ 2 มีค่าเท่ากับ 12.26 และ 5.07 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ รูปคาร์บอเนตมีค่าเท่ากับ 5.68 และ 8.64 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ สำหรับสัดส่วนแคดเมียมของดินก่อนการล้างที่ระยะเวลาการสะสมของแคดเมียม 12 สัปดาห์ (ดินชุดที่ 3 และ 4) มีสัดส่วนของแคดเมียมในรูปของคาร์บอเนตมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเป็น 8.91 และ 27.25 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ แคดเมียมรูปที่สามารถแลกเปลี่ยนไอออนได้มีแนวโน้มที่ลดลงเมื่อระยะเวลายาวนานขึ้นจาก 1 สัปดาห์ เป็น 12 สัปดาห์ เนื่องจากแคดเมียมในรูปที่สามารถแลกเปลี่ยนไอออนได้ สามารถเปลี่ยนแปลงรูปไปเป็นแคดเมียมในรูปอื่นได้ง่ายเมื่อเวลาผ่านไป ส่วนหลังจากการล้างพบว่าสัดส่วนคาร์บอเนตของดินที่มีระยะเวลาการสะสมของแคดเมียม 1 สัปดาห์ (ดินชุดที่ 1 และ 2) มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ส่วนในดินที่มีระยะเวลาการสะสมของแคดเมียม 12 สัปดาห์ (ดินชุดที่ 3 และ 4) สัดส่วนแคดเมียมรูปคาร์บอเนตมีแนวโน้มลดลง อาจเนื่องมาจากเมื่อระยะเวลายาวนานขึ้น แคดเมียมอาจจะจับตัวในรูปคาร์บอเนตอย่างหลวมๆ เมื่อผ่านการล้างจึงทำให้ล้างแคดเมียมในรูปนี้ออกมาได้มากขึ้น

## บทที่ 5

### สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการทดลอง

ดินปนเปื้อนแคดเมียมที่นำมาใช้ในการวิจัยครั้งนี้มี 4 ชุด โดยเป็นการนำดินที่เก็บจากพื้นที่ที่มีการปนเปื้อน ในพื้นที่ 2 แห่ง ซึ่งจากการวิเคราะห์พบว่าปริมาณแคดเมียมในดินทั้ง 2 พื้นที่มีค่าใกล้เคียงกันและมีปริมาณแคดเมียมน้อยมาก โดยมีค่าอยู่ในช่วง 0-3 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม จึงนำดินทั้ง 2 แห่ง มาเติมสารละลายแคดเมียมในรูปโลหะไนเตรทลงไป ในดิน 1 มิลลิโมลต่อลิตร โดยดินชุดที่ 1 และ 2 เป็นดินที่มีระยะเวลาการสะสมของแคดเมียมที่ 1 สัปดาห์ ดินชุดที่ 3 และ 4 เป็นดินที่มีระยะเวลาการสะสมของแคดเมียมที่ 12 สัปดาห์ ปริมาณแคดเมียมในดินชุดที่ 1 และดินชุดที่ 3 มีค่าอยู่ในช่วง 490 – 790 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม และดินชุดที่ 2 และ 4 มีค่า 550 – 770 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ

จากการศึกษาลักษณะทางกายภาพและทางเคมีของดินพบว่า มีลักษณะที่คล้ายคลึงกัน แตกต่างกันที่ลักษณะของเนื้อดิน โดยดินชุดที่ 1 มีลักษณะเนื้อดินเป็นดินร่วนเหนียวปนทราย ดินชุดที่ 2 มีลักษณะเนื้อดินเป็นดินร่วนปนทราย

จากการศึกษาประสิทธิภาพการล้างดิน โดยใช้สารละลายไทรทอนเอกซ์-100 ร่วมกับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ พบว่า เมื่อระยะเวลาการสะสมของแคดเมียมในดินยาวนานขึ้น มีผลให้ประสิทธิภาพการล้างแคดเมียมออกจากดินน้อยลง ค่าประสิทธิภาพการล้างแคดเมียมในดินชุดที่ 1, 2, 3 และ 4 มีค่าเป็นดังนี้ 87.38, 77.47, 85.65 และ 75.33 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

จากการศึกษาเปรียบเทียบสัดส่วนรูปแบบของแคดเมียมในดินก่อนและหลังการล้างด้วยสารละลายไทรทอนเอกซ์-100 ร่วมกับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ พบว่า ก่อนการล้างดิน ดินทุกชุดมีสัดส่วนแคดเมียมอยู่ในรูปที่ละลายน้ำได้ และรูปที่สามารถแลกเปลี่ยนไอออนได้เป็นส่วนใหญ่ โดยที่สัดส่วนแคดเมียมที่อยู่ในรูปที่ละลายน้ำได้ของดินชุดที่ 1, 2, 3 และ 4 มีค่าเท่ากับ 12.26, 5.07, 16.48 และ 11.33 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ สัดส่วนแคดเมียมในรูปที่สามารถแลกเปลี่ยนไอออนได้ มีค่าเท่ากับ 77.27, 80.67, 71.90 และ 50.62 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ หลังจากการล้างดินด้วยสารละลายไทรทอนเอกซ์-100 ร่วมกับโซเดียมไฮดรอกไซด์ รูปที่สามารถแลกเปลี่ยนไอออนได้มีสัดส่วนที่ลดลงสำหรับสัดส่วนแคดเมียมในรูปที่ละลายน้ำ รูปคาร์บอเนต รูปออกไซด์และไฮดรอกไซด์ และรูปสารอินทรีย์ในดินชุดที่ 1 และ 2 มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น โดยสัดส่วนแคดเมียมในรูปที่ละลายน้ำในดินชุดที่ 1, 2, 3 และ 4 มีค่าเท่ากับ 20.96, 16.13, 21.79 และ 25.65 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ สัดส่วน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แคดเมียมในรูปคาร์บอเนตในดินชุดที่ 1 และ 2 มีค่าเท่ากับ 7.83 และ 16.56 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ส่วนแคดเมียมในรูปออกไซด์และไฮดรอกไซด์ มีค่าเท่ากับ 6.17 และ 11.76 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ส่วนแคดเมียมในรูปสารอินทรีย์ มีค่าเท่ากับ 1.94 และ 3.2 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ส่วนแคดเมียมรูปคาร์บอเนตและรูปออกไซด์และไฮดรอกไซด์ในดินชุดที่ 3 และ 4 มีแนวโน้มที่ลดลงหลังการล้างโดยมีค่าสัดส่วนรูปคาร์บอเนตเท่ากับ 6.05 และ 17.82 เปอร์เซ็นต์ ส่วนรูปออกไซด์และไฮดรอกไซด์ 2.72 และ 8.95 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

จากการศึกษารูปแบบของแคดเมียมในดินที่ระยะเวลาต่างกัน โดยทำการเปรียบเทียบ ส่วนรูปแบบของแคดเมียมที่ได้ของดินชุดเดียวกัน ที่ระยะเวลาการสะสมของแคดเมียมต่างกัน คือ ที่ระยะเวลา 1 และ 12 สัปดาห์ พบว่า สัดส่วนรูปของแคดเมียมของดินก่อนการล้างที่ระยะเวลา 12 สัปดาห์ (ดินชุดที่ 3 และ 4) มีสัดส่วนแคดเมียมในรูปที่ละลายได้ และรูปคาร์บอเนต มากกว่าที่ ระยะเวลาการสะสมของแคดเมียม 1 สัปดาห์ (ดินชุดที่ 1 และ 2) แคดเมียมรูปที่สามารถแลกเปลี่ยน ไอออนได้มีแนวโน้มที่ลดลงเมื่อระยะเวลายาวนานขึ้นจาก 1 สัปดาห์ เป็น 12 สัปดาห์ ในขณะที่ หลังจากการล้างพบว่าสัดส่วนคาร์บอเนตของดินที่มีระยะเวลาการสะสมของแคดเมียมยาวนานขึ้น จาก 1 สัปดาห์ เป็น 12 สัปดาห์ มีแนวโน้มลดลง

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ควรมีการศึกษารูปแบบของแคดเมียมที่สะสมในดินที่ระยะเวลานานขึ้น
2. จำนวนตัวอย่างที่นำมาวิเคราะห์ควรมีจำนวนมากขึ้น
3. ในการล้างดินมักพบปัญหาการสูญเสียแคดเมียมไปในระหว่างการทดลองควรมี การศึกษาการล้างดินในรูปแบบคอลัมน์เพื่อลดปริมาณการสูญเสียแคดเมียม

## บรรณานุกรม

กรมพัฒนาที่ดิน สำนักวิทยาศาสตร์เพื่อการพัฒนาที่ดิน.2548. **คู่มือการวิเคราะห์ตัวอย่างดิน น้ำ ปุ๋ย พืช วัสดุปรับปรุงดิน และการวิเคราะห์เพื่อนตรวจรับรองมาตรฐานสินค้า เล่มที่1.** พิมพ์ครั้งที่ 2 กรุงเทพฯ.

กรองแก้ว ทิพย์ศักดิ์ และกลิ่นสุคนธ์ สุวรรณรัตน์.2547.**คู่มือปฏิบัติการเคมีสิ่งแวดล้อม 2 .**ภาค  
วิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

คมสรร ศิริติกุล และปนัดดา รุจะศิริ. 2547. **การล้างดินที่ปนเปื้อนโลหะหนักโดยใช้สารละลาย**

**โซเดียมฮิเดรอกไซด์.** โครงการงานพิเศษวิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาเคมีทรัพยากรสิ่งแวดล้อม

ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

ชนากร พิพิธศักดิ์ และธีระนันท์ กระฉิบทอง. 2548. **การล้างแคดเมียมออกจากดินที่ปนเปื้อนด้วย**

**สารละลายโซเดียมโอดีซิลซัลเฟต.**โครงการงานพิเศษวิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาเคมีทรัพยากร  
สิ่งแวดล้อม ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร  
ลาดกระบัง.

พรสรวง มากมณี, พิมพ์พิมพ์ คงจินดา และภาสกร ศรีจิว. 2546. **การล้างโครเมียมออกจากดิน**

**ปนเปื้อน.** โครงการงานพิเศษวิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาเคมีทรัพยากรสิ่งแวดล้อม ภาควิชาเคมี

คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

พิลดา พุกบุญมี และคณะ. 2548. **การล้างแคดเมียมออกจากดินที่ปนเปื้อน.**โครงการงานพิเศษวิทยา

ศาสตรบัณฑิต สาขาเคมีทรัพยากรสิ่งแวดล้อม ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบัน  
เทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร ลาดกระบัง.

สมิง เก่าเจริญ, วินัย วนานุกูล และจินตนา ศิริวรราชัย. 2542. **รายงานผลการวิจัย การศึกษาระดับ**

**แคดเมียมและโครเมียมในเลือดและปัสสาวะของกลุ่มคนสุขภาพแข็งแรงที่ไม่ได้ทำงาน**

**สัมผัสกับโลหะหนัก.**สำนักนโยบายและยุทธศาสตร์ กระทรวงแรงงาน.

ศุภมาส พนิษศักดิ์พัฒนา. 2539. **ภาวะมลพิษของดินจากการใช้สารเคมี.**ภาควิชาปฐพีวิทยา

คณะเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

Akita, S., Castillo, L.P., Ni, S., Takahashi, K., and Takeuchi H. 1999. **Separation of**

**Co(II)/Ni(II) via micellar-enhanced ultrafiltration using organophosphorous acid**

**extractant solubilized by nonionic surfactant .** J. Membr. Sci. 162, 111-117.

Carter. M.R. 1993. **Soil Sampling and Methods of Analysis** USA, Lewis Publishers, Florida .

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- Doong, R.-A., Wu, Y.-W., and Lei, W. -G. 1998. **Surfactant enhanced remediation of cadmium contaminated soils.** Wat. Sci. Tech. 37, 65-71.
- Fillipi, B.R., Scamehorn, J.F., Christian, S.D. and Taylor, R.W. 1998. **A comparative economic analysis of copper removal from water by ligand-modified micellar enhanced ultrafiltration and by conventional solvent extraction.** J. Membr. Sci. 145, 27-44.
- Mari Shin. 2004. **Surfactant/Ligand Systems for the Simultaneous Remediation of Soils Contaminated with Heavy metals and Polychlorinated biphenyls.** Thesis of Doctor of Philosophy. Department of Bioresource Engineering. Macdonald Campus of McGill University.
- Mulligan, C. N., Yong, R. N. and Gibbs, B. F. 1999b, **Removal of Heavy Metals from Contaminated Soil and Sediments Using the Bio Surfactant Surfactin.** Journal of Soil Contamination, 8, 231-254.
- Yong, R.N., Galvez-Cloutier, R., and Phadungchewit, Y. 1993, **Selective Extraction Analysis of Heavy Metal Retention in Soil.** Can. Geotech. J. 28, 378-387.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 1. การวัดค่าพีเอช

1. ชั่งดินแห้ง 5 กรัม ลงในบีกเกอร์ เติมน้ำกลั่นลงไป 5 มล. พร้อมบันทึกหมายเลขตัวอย่างดิน
2. กวนให้เข้ากันอย่างน้อย 5 วินาที แล้วตั้งทิ้งไว้ 10 นาที
3. ขณะที่ตั้งสารละลายทิ้งไว้ ให้ทำการปรับเทียบเครื่องวัดพีเอช กับสารละลายบัฟเฟอร์มาตรฐาน 4 และ 7 จุ่มอิเล็กโทรดลงในบีกเกอร์ที่บรรจุสารละลายดินที่ครบตามเวลา กวนโดยใช้การหมุนอิเล็กโทรดเบาๆ อ่านค่าพีเอช

## 2. การหาความจุในการแลกเปลี่ยนประจุบวก (กรองแก้ว และกลั่นสุคนธ์, 2547)

1. ชั่งตัวอย่างดิน 5-10 กรัม (ละเอียดสองตำแหน่งทศนิยม) ใส่ขวดรูปชมพู่ขนาด 125 มล. เติมสารละลายแอมโมเนียมอะซิเตท 1 นอร์มอล ลงไป 60 มล. ปิดจุกเขย่าให้เข้ากัน ตั้งทิ้งไว้ค้างคืน
2. เขย่าสารละลายดิน 30 นาที โดยใช้เครื่องเขย่า จากนั้นนำไปปั่นเหวี่ยงนาน 5 นาที แยกเอาส่วนใสทิ้ง
3. ล้างดินด้วยสารละลายแอมโมเนียมอะซิเตท 1 นอร์มอล ครั้งละ 30 มล. นำไปปั่นเหวี่ยง แยกเอาส่วนใสออกจนไม่มีแคลเซียมเหลืออยู่ (การทดสอบแคลเซียมทำได้โดยนำส่วนใสที่ได้จากการล้างแต่ละครั้ง ประมาณ 10 มล. ใส่หลอดทดลอง หยดแอมโมเนียมคลอไรด์ 1 นอร์มอล, แอมโมเนียมออกซาลेट 10 % และแอมโมเนียมไซเตรอิก 50 % อย่างละ 2-3 หยด นำไปต้มให้เดือด ถ้าตะกอนหรือสารละลายขุ่น แสดงว่ามีแคลเซียมตกค้างอยู่ต้องล้างดินด้วยสารละลายแอมโมเนียมอะซิเตทต่อไปอีก)
4. ล้างตัวอย่างดินต่อด้วยสารละลายแอมโมเนียมคลอไรด์ 0.25 นอร์มอล อีก 1 ครั้ง จากนั้นล้างด้วยไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์ 7 ครั้ง ๆ ละ 30 มล. โดยในการล้างแต่ละครั้งให้นำไปปั่นเหวี่ยงด้วยเครื่องปั่นเหวี่ยงนาน 3-5 นาที เพื่อแยกส่วนใสออกจนไม่มีคลอไรด์เหลืออยู่ในดิน ใช้หลอดหยดดูดเฉพาะส่วนที่ใสมาใส่ภาชนะอื่นเพื่อทดสอบคลอไรด์ การทดสอบคลอไรด์ทำโดยใช้สารละลายซิลเวอร์ไนเตรต 0.1 นอร์มอล 2-3 หยดลงในสารละลายส่วนที่ใสจากการปั่นเหวี่ยง ถ้ามีตะกอนสีขาวของซิลเวอร์คลอไรด์ (AgCl) เกิดแสดงว่ายังมีคลอไรด์เหลืออยู่ ต้องล้างดินด้วยแอมโมเนียมคลอไรด์ต่อไป
5. นำสารละลายที่ได้จากข้างต้นทิ้งไป นำดินที่ได้มาล้างต่อด้วยสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 10 % เพื่อไล่แอมโมเนียมไอออนในดิน โดยล้างครั้งละ 30 มล. ซ้ำ 3 ครั้ง นำไปปั่นเหวี่ยง (เก็บส่วนใสไว้)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6. นำส่วนใสที่ได้จากสารละลายดินมาใส่ขวดวัดปริมาตรขนาด 100 มล. ปรับปริมาตรรวมด้วยน้ำกลั่นจนมีปริมาตร 100 มล.
7. นำสารละลายที่ได้ไปกลั่น เพื่อไล่แอมโมเนียออกมาโดยเติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 40 % ลงไป 25 มล. ใส่ในขวดกลั่นเจห์ดาลโดยใช้ปลายคอนเดนเซอร์จุ่มอยู่ในสารละลายกรดบอริก 3 % จำนวน 50 มล. ซึ่งใส่อินดิเคเตอร์ผสมไว้ 2-3 หยด กลั่นจนกระทั่งสารละลายเปลี่ยนจากสีม่วง เป็นสีเขียว ขณะกลั่นควรตรวจสอบว่าน้ำหล่อเย็นที่เข้าและออก ช่วยคักให้ก๊าซแอมโมเนียกลั่นตัวได้ดีหรือไม่ ถ้าอุณหภูมิน้ำออกและที่ใช้ภาชนะที่ใส่สารละลายกรดบอริกสูงมากจะไม่สามารถจับก๊าซแอมโมเนียด้วยกรดบอริกได้สมบูรณ์ ควรใช้น้ำแข็งหล่อเย็นรอบ ๆ ภาชนะที่ใส่สารละลายกรดบอริกด้วย
8. นำสารละลายที่ได้จากการกลั่นไปไทเทรตด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริกมาตรฐานที่ทราบความเข้มข้นที่แน่นอน จนสีของสารละลายเปลี่ยนจากสีเขียวเป็นสีม่วง
9. กลั่นแบลงค์ และไทเทรตเช่นเดียวกับตัวอย่างดิน

การคำนวณ

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

- เมื่อ
- A = ปริมาตรของกรดไฮโดรคลอริกมาตรฐานที่ใช้ไทเทรตกับตัวอย่างดิน (มล.)
  - B = ปริมาตรของกรดไฮโดรคลอริกมาตรฐานที่ใช้ไทเทรตกับแบลงค์
  - N = ความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริกมาตรฐาน (นอร์มอล)
  - X = น้ำหนักเป็นกรัมของตัวอย่างดิน

**7. การวิเคราะห์หาปริมาณสารอินทรีย์ในดิน (กรมพัฒนาที่ดิน, 2548)**

วิธี Walkley and Black

1. ชั่งตัวอย่างดิน 1 กรัม ใส่ในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มล.
2. เติมน้ำยาโพแทสเซียมไดโครเมท 1 นอร์มอล ลงไป 10 มล. โดยใช้ปิเปต
3. เติมกรดซัลฟูริกเข้มข้นลงไป 15 มล. เขย่าขวดแก้วเบาๆ เป็นเวลา 1-2 นาที ตั้งทิ้งไว้ในดินและน้ำยาทำปฏิกิริยากันเป็นเวลา 30 นาที
4. เติมน้ำกลั่นลงไปประมาณ 50 มล. ทิ้งไว้ให้เย็น(หยดอินดิเคเตอร์ ออร์โทฟีแนนโทลีน 5 หยด )

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. โทเทรตสารละลายที่ได้ด้วยน้ำยาเฟอรัสแอม โมเนียมซัลเฟต 0.5 นอร์มอล เพื่อวิเคราะห์หาปริมาณ โปแทสเซียม ไดโครเมตที่เหลือจากปฏิกิริยา จนกระทั่งสีของสารละลายดิน เปลี่ยนจากสีเขียวเป็นสีน้ำตาลแดงที่จุดยุติ
6. จดปริมาณ โปแทสเซียม ไดโครเมตและเฟอรัสแอม โมเนียมซัลเฟตที่ใช้
7. ทำแปลงค์เช่นเดียวกันกับการวิเคราะห์ดิน
8. กำหนดหาปริมาณอินทรีย์คาร์บอนและอินทรีย์วัตถุ

#### การคำนวณ

$$\% \text{ Organic carbon} = \left[ \frac{(B-T)N}{B} \right] \times \left[ \frac{100}{77} \right] \times 0.003 \times \left[ \frac{100}{X} \right] \times 10$$

เมื่อ	N	=	ความเข้มข้นของ โปแทสเซียม ไดโครเมต
	B	=	จำนวนมิลลิลิตรของสารละลายเฟอรัสแอม โมเนียมซัลเฟตที่ไทเทรตกับ แปลงค์
	T	=	จำนวนมิลลิลิตรของสารละลายเฟอรัสแอม โมเนียมซัลเฟตที่ไทเทรตกับ ตัวอย่างดิน
	X	=	น้ำหนักดิน (กรัม)

$$\% \text{ Organic matter} = \% \text{ Organic carbon} \times 1.724$$

หรือ

$$\% \text{ Organic matter} = \left[ \frac{(B-T)N}{B} \right] \times \left[ \frac{100}{77} \right] \times \left[ \frac{100}{58} \right] \times 0.003 \times \left[ \frac{100}{X} \right] \times 10$$

#### 4. การหาค่าความชื้น (Carter, 1993)

1. ชั่งกระจกนาฬิกาที่สะอาด
2. นำตัวอย่างดินมาชั่ง 10 กรัม ลงบนกระจกนาฬิกาจذبน้ำที่น้ำหนักเป็ยก
3. นำไปเข้าอบในตู้อบที่อุณหภูมิ 105-110 องศาเซลเซียส เป็นเวลาอย่างน้อย 12 ชั่วโมง ทำให้เย็นในเดซิเคเตอร์
4. นำมาชั่งน้ำหนักแห้ง
5. กำหนดหาเปอร์เซ็นต์ความชื้น
6. ทำการทดลองซ้ำอีก 2 ครั้ง หาค่าเฉลี่ย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### การคำนวณ

$$\% \text{ ความชื้น} = [( \text{น้ำหนักเปียก} - \text{น้ำหนักแห้ง} ) \times 100] / \text{น้ำหนักเปียก}$$

## **5. การหาลักษณะเนื้อดิน** (กรองแก้ว และกลั่นสุคนธ์, 2547)

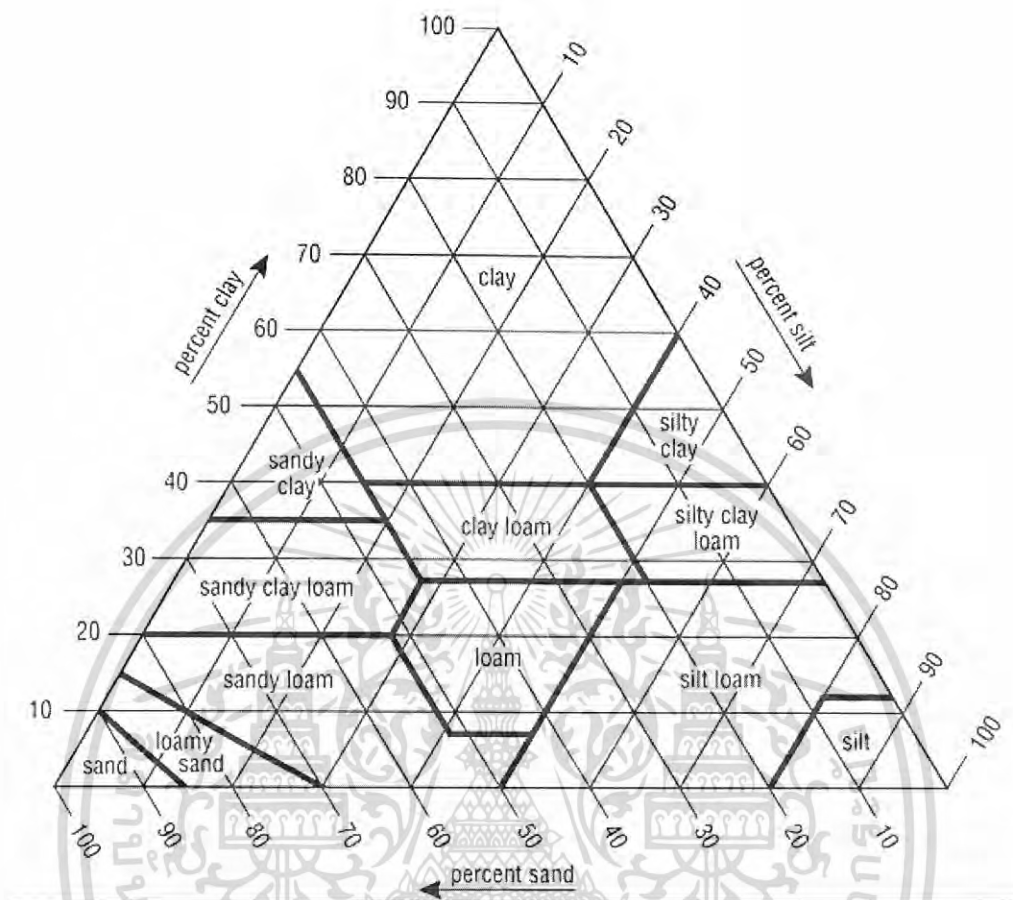
### การปรับเทียบไฮโดรมิเตอร์

1. เทสารละลายคัลกอน ปริมาตร 100 มล. ลงในกระบอกตวงปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นจนถึงขีด 1.0 ลิตร ผสมให้ทั่วด้วยแท่งแก้วคนแบบ plunger ตั้งทิ้งไว้จนอุณหภูมิคงที่ (อยู่ในช่วง 20-25 องศาเซลเซียส)
2. ค่อย ๆ หย่อนไฮโดรมิเตอร์ลงในสารละลายอย่างระมัดระวัง อ่านค่าจากสเกลที่รอยเว้าบนของ ของเหลวที่ล้อมรอบไฮโดรมิเตอร์

### การอ่านค่าจากสารแขวนลอย

1. ชั่งดินที่ผึ่งแห้งและร่อนผ่านตะแกรงขนาด 0.2 มิลลิเมตร แล้ว 40 กรัม (ถ้าเป็นดินทรายร่วนหรือดินทรายใช้ 100 กรัม) ลงในบีกเกอร์ขนาด 600 มล. เติมสารละลายคัลกอน 100 มล. และน้ำประมาณ 300 มล. ตั้งทิ้งไว้ 1 คืน
2. ชั่งดินตัวอย่างเดิมอีก 10 กรัม เพื่อหาเปอร์เซ็นต์ความชื้น และน้ำหนักแห้งแล้วนำไปอบที่ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลานาน 1 คืน แล้วทำให้เย็นในเดซิเคเตอร์และชั่งน้ำหนัก
3. นำสารแขวนลอยดินจากข้อ 1 มาควนด้วยเครื่องควนแม่เหล็กประมาณ 5 นาที แล้วเทลงกระบอกตวงขนาด 1 ลิตร
4. ปรับปริมาตรสารในข้อ 3 ด้วยน้ำกลั่นจนถึงขีด 1 ลิตร ทิ้งไว้จนอุณหภูมิคงที่
5. จุ่มแท่งแก้วคนแบบ plunger แบบขึ้น-ลง เบา ๆ เพื่อให้เกิดการผสมกันอย่างทั่วทั้งกระบอกตวง (ให้หมุนขึ้นลงแบบเกลียวสว่าน 2-3 รอบ) บันทึกเวลาเมื่อคนเสร็จ (เดิม 1 หยอดของเอมิลแอลกอฮอล์ ถ้าที่ผิวของสารแขวนลอยเป็นฟอง)
6. ค่อย ๆ หย่อนไฮโดรมิเตอร์ลงอย่างระมัดระวังในสารแขวนลอยและอ่านสเกลเหมือนหัวข้อการปรับเทียบไฮโดรมิเตอร์ เมื่อเวลาผ่านไป 40 วินาที หลังจากการควนผสม ค่าที่อ่านได้ควรหักลบจากค่าที่อ่านได้จากการปรับเทียบไฮโดรมิเตอร์
7. ค่อย ๆ ดึงไฮโดรมิเตอร์ขึ้นอย่างระมัดระวังเมื่ออ่านเสร็จ ล้างและเช็ดให้แห้ง
8. เมื่อครบ 2 ชั่วโมง ให้อ่านค่าไฮโดรมิเตอร์อีกครั้งโดยทำเหมือนข้อ 6 และ 7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ข-1 สามเหลี่ยมจำแนกเนื้อสัมผัสของดิน

#### การคำนวณ

$$\% \text{ Sand} = [(W - R_{40s}) \times 100] / W$$

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

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

#### กำหนดให้

$W$  = น้ำหนักดินแห้ง (กรัม)

$R_{40s}$  = ค่าจากไฮโดรมิเตอร์ เมื่อตั้งทิ้งไว้ที่ 40 วินาที

$R_{2hr}$  = ค่าจากไฮโดรมิเตอร์ เมื่อตั้งทิ้งไว้ที่ 2 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 5. การหาความเข้มข้นของแคดเมียมในดินโดยไมโครเวฟไคเจสชัน (Microwave digester)

### เครื่องมือ

เครื่องไมโครเวฟไคเจสชัน รุ่น MLS 1200 MEGA

### สารเคมี

1.  $\text{HNO}_3$  65%
2. HF 48%

### วิธีดำเนินการ

1. ชั่งดินตัวอย่าง 0.25 กรัม ใส่ใน TFM vessel ขนาด 150 ml
2. ใส่ TFM vessel ลงใน HTC Safety Shield
3. ใส่  $\text{HNO}_3$  65% 3 มิลลิลิตร และ HF 48% 3 มิลลิลิตร ถ้าส่วนของตัวอย่างที่เกาะอยู่ที่ผิวของ vessel ให้ทำการหยดกรดลงไปบริเวณนั้น
4. ปิด vessel และใส่เข้าไปใน rotor segment ทำการหมุนล็อกให้แน่น
5. ใส่ segment ส่วนที่ใช้ประกอบเครื่อง เข้าไปในเครื่องไมโครเวฟ
6. ทำการเปิดเครื่องและตั้งเครื่องตามโปรแกรมที่กำหนดไว้จนเสร็จสมบูรณ์
7. นำ segment มาหล่อเย็นด้วยน้ำ จนกระทั่งสารละลายมีอุณหภูมิเกือบเท่าอุณหภูมิห้อง
8. เปิด vessel ทำการกรองแล้วถ่ายสารละลายลงในขวดวัดปริมาตร ขนาด 25 มิลลิลิตร จากนั้นปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่น

### โปรแกรมการย่อยด้วยเครื่องไมโครเวฟ

Step	Time	Power	Press	Temp1	Temp2
1.	00:06:00	250	0	0	0
2.	00:06:00	400	0	0	0
3.	00:06:00	650	0	0	0
4.	00:06:00	250	0	0	0

Vent 00:05:00

Rotor ctrl on

Twist on

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 6. การหาความเข้มข้นของแคดเมียมในสารละลายโดยไมโครเวฟไดเจสชัน (Microwave digester)

### เครื่องมือ

เครื่องไมโครเวฟไดเจสชัน รุ่น MLS 1200 MEGA

### สารเคมี

1. HNO<sub>3</sub> 65%

### วิธีดำเนินการ

1. ชั่งดินตัวอย่าง 0.25 กรัม ใส่ใน TFM vessel ขนาด 150 ml
2. ใส่ TFM vessel ลงใน HTC Safety Shield
3. ใส่ HNO<sub>3</sub> 65% 5 มิลลิลิตร ถ้าส่วนของตัวอย่างที่เกาะอยู่ที่ผิวของ vessel ให้ทำการหยดกรดลงไปบริเวณนั้น
4. ปิด vessel และใส่เข้าไปใน rotor segment ทำการหมุนล็อกให้แน่น
5. ใส่ segment ส่วนที่ใช้ประกอบเครื่อง เข้าไปในเครื่องไมโครเวฟ
6. ทำการเปิดเครื่องและตั้งเครื่องตามโปรแกรมที่กำหนดไว้จนเสร็จสมบูรณ์
7. นำ segment มาหล่อเย็นด้วยน้ำ จนกระทั่งสารละลายมีอุณหภูมิเกือบเท่าอุณหภูมิห้อง
8. เปิด vessel ทำการกรองแล้วถ่ายสารละลายลงในขวดวัดปริมาตร ขนาด 25 มิลลิลิตร จากนั้นปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่น

### โปรแกรมการย่อยด้วยเครื่องไมโครเวฟ

Step	Time	Power	Press	Temp1	Temp2
1.	00:06:00	250	0	0	0
2.	00:06:00	400	0	0	0
3.	00:06:00	650	0	0	0
4.	00:06:00	250	0	0	0

Vent 00:05:00

Rotor ctrl on

Twist on

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 1. การเตรียมสารละลายแคดเมียมในรูปโลหะในเตรทเข้มข้น 1 มิลลิโมลต่อลิตร

สูตรเคมี  $\{(CdNO_3)_2 \cdot 4 H_2O\}$

น้ำหนักโมเลกุล เท่ากับ 420.82

$$\text{mol} = \frac{\text{g}}{\text{MW}}$$

$$0.001 = \frac{\text{g}}{420.82}$$

$$\text{g} = 0.4208 \text{ g. ในน้ำ 1 ลิตร}$$

$\{(CdNO_3)_2 \cdot 4 H_2O\}$	420.82	กรัม	มี	Cd	112	กรัม
$\{(CdNO_3)_2 \cdot 4 H_2O\}$	0.4208	กรัม	มี	Cd	0.112	กรัม
ในสารละลาย $\{(CdNO_3)_2 \cdot 4 H_2O\}$	1000	มิลลิลิตร	มี	Cd	0.112	กรัม
ในสารละลาย $\{(CdNO_3)_2 \cdot 4 H_2O\}$	10	มิลลิลิตร	มี	Cd	0.00112	กรัม

ในดิน 1 กรัม มี Cd 0.00112 กรัม

ในดิน 1000 กรัม มี Cd 1.12 กรัม ( 1120 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม หรือเท่ากับ 1120 พีพีเอ็ม )

ดังนั้น ในการเพิ่มปริมาณแคดเมียมด้วยสารละลายแคดเมียมในรูปโลหะในเตรท 1 มิลลิโมลต่อลิตร ในอัตราส่วนดิน 1 กรัม ต่อสารละลายแคดเมียม 10 มิลลิลิตร

ในดิน 1 กิโลกรัม จึงมี Cd 1120 มิลลิกรัม ( 1120 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม หรือเท่ากับ 1120 พีพีเอ็ม )

แต่เนื่องจากการปั่นเหวี่ยงแยกส่วนใสขณะทำการเพิ่มปริมาณแคดเมียมลงในดิน จึงทำให้มีปริมาณแคดเมียมในดินไม่ถึง 1120 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 1. การเตรียมสารละลายไทรทอนเอกซ์-100 ที่ความเข้มข้น 0.025 โมลาร์

สูตรเคมี  $C_{34}H_{62}O_{11}$

น้ำหนักโมเลกุล เท่ากับ 647

$$\text{mol} = \frac{\text{g}}{\text{MW}}$$

$$0.025 = \frac{\text{g}}{647}$$

$$\text{g} = 16.175 \text{ g. ในน้ำ 1 ลิตร}$$

### 2. การเตรียมสารละลายลิแกนด์โซเดียมไอโอดด์ ที่ความเข้มข้น 0.336 โมลาร์

สูตรเคมี NaI

น้ำหนักโมเลกุล เท่ากับ 149.89

$$\text{mol} = \frac{\text{g}}{\text{MW}}$$

$$0.336 = \frac{\text{g}}{149.89}$$

$$\text{g} = 50.3630 \text{ g. ในน้ำ 1 ลิตร}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก ง  
ผลการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ง.1 ค่าพีเอชของดินตัวอย่าง (อัตราส่วนดิน : น้ำ เท่ากับ 1 : 1)

ดินชุดที่	ค่าพีเอช			S.D.	ค่าเฉลี่ย
	1	2	3		
1	6.67	6.98	6.94	0.17	6.86
2	5.41	5.42	5.43	0.01	5.42

ตารางที่ ง.2 ความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวกของดินตัวอย่าง

ดินชุดที่	CEC (meq/100g)			S.D.	ค่าเฉลี่ย
	1	2	3		
1	12.2	12.1	11.99	0.50	12.10
2	11.46	10.94	11.94	0.50	11.45

ตารางที่ ง.3 ปริมาณอินทรีย์สารของดินตัวอย่าง

ดินชุดที่	เปอร์เซ็นต์อินทรีย์สาร			S.D.	ค่าเฉลี่ย
	1	2	3		
1	0.76	0.72	0.91	0.10	0.80
2	0.78	0.74	0.76	0.02	0.76

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**ตารางที่ ง.4 ปริมาณคาร์บอนอินทรีย์ของดินตัวอย่าง**

ดินชุดที่	เปอร์เซ็นต์คาร์บอนอินทรีย์			S.D.	ค่าเฉลี่ย
	1	2	3		
1	0.44	0.42	0.53	0.06	0.46
2	0.45	0.43	0.44	0.01	0.44

**ตารางที่ ง.5 ปริมาณความชื้นของดินตัวอย่าง**

ดินชุดที่	เปอร์เซ็นต์ความชื้น			S.D.	ค่าเฉลี่ย
	1	2	3		
1	0.31	0.32	0.31	0.01	0.31
2	0.27	0.28	0.29	0.01	0.28

**ตารางที่ ง.6 การกระจายตัวของอนุภาคของดินตัวอย่าง**

ดินชุดที่	% Sand	% Silt	% Clay	ลักษณะเนื้อดิน
1	51.54	21.71	26.75	ดินร่วนเหนียวปนทราย
2	70.76	7.94	21.30	ดินร่วนปนทราย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ง.7 ปริมาณแคดเมียมทั้งหมดที่พบในดินหลังการเพิ่มปริมาณแคดเมียมลงในดิน

ดินชุดที่	ครั้งที่วิเคราะห์	ค่าความเข้มข้นของแคดเมียม(มก./กก. ดินแห้ง)	
1	1	1	760.79
		2	540.00
		3	592.87
	2	1	550.98
		2	633.27
		3	720.27
		เฉลี่ย	633.03
		SD	90.48
	2	1	1
2			287.47
3			739.674
2		1	493.17
		2	559.3
		3	722.34
		เฉลี่ย	598.33
		SD	190.03

หมายเหตุ \* คือ ค่าที่ผิดปกติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ๖.8 รูปแบบแคดเมียมที่พบในดินก่อนการล้างดิน

ลำดับชั้น	ดินชุดที่	ความเข้มข้นของแคดเมียม			เฉลี่ย	% แคดเมียม	S.D.	
		(มก./กก. ดินแห้ง)						
		1	2	3				
ชั้นที่ 1	1	66.520	53.124	72.354	63.999	12.26	1.89	
	รูปที่ละลายน้ำ	2	41.124	46.430	40.682	42.744	5.07	1.62
		3	48.705	55.414	51.777	51.966	16.48	0.99
		4	76.645*	48.955	50.676	49.816	11.33	0.28
ชั้นที่ 2	1	914.403*	396.090	410.654	403.372	77.27	1.97	
	รูปที่สามารถแลกเปลี่ยนไอออนได้	2	683.353	687.183	671.030	680.522	80.67	1.00
		3	222.661	220.429	237.145	226.745	71.90	2.66
		4	236.029	201.089	230.356	222.492	50.62	4.27
ชั้นที่ 3	1	39.627	5.248	44.025	29.634	5.68	4.07	
	รูปคาร์บอเนต	2	-	60.253	85.440	72.847	8.64	2.11
		3	28.175	27.740	28.398	28.104	8.91	0.10
		4	87.425	136.788	102.727	119.758	27.25	5.75
ชั้นที่ 4	1	21.100	22.981	16.793	20.291	3.89	0.61	
	รูปออกไซด์และไฮดรอกไซด์	2	52.766	18.425	0.000	23.730	2.81	2.88
		3	8.433	8.685	2.939*	8.559	2.71	0.05
		4	37.690	52.968	44.442	45.034	10.25	1.74
ชั้นที่ 5	1	5.643	3.183	5.407	4.744	0.91	0.26	
	รูปสารอินทรีย์	2	23.763	21.860	19.262	21.628	2.56	1.17
		3	0.000	0.000	0.000	0.000	0.00	0.00
		4	1.050	2.674	3.554	2.426	0.55	0.29
ชั้นที่ 6	1	0.000	0.000	0.000	0.000	0.00	0.00	
	รูปที่เหลือ	2	0.000	0.000	0.000	0.000	0.25	0.15
		3	0.000	0.000	0.000	0.000	0.00	0.00
		4	0.000	0.000	0.000	0.000	0.00	0.00

หมายเหตุ \* คือ ค่าที่ผิดปกติ

- คือ ค่าที่ไม่ได้ทำการวัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ง.9 ปริมาณแคดเมียมในดินและน้ำที่ถูกชะออกมาจากการล้างดิน

ดินชุดที่		ความเข้มข้นของแคดเมียม			เฉลี่ย	% แคดเมียม	S.D.
		(มก./กก. ดินแห้ง)					
		1	2	3			
1	ดิน	0.000*	113.431	146.966	130.199	12.62	7.25
	น้ำ	880.169	876.616	947.015	901.267	87.38	1.62
2	ดิน	252.887	188.642*	290.143	271.515	22.53	3.81
	น้ำ	922.461	957.854	920.753	933.689	77.47	1.74
3	ดิน	109.336	83.308	111.088	101.244	13.75	2.56
	น้ำ	550.978	633.272	720.271	634.840	85.65	2.08
4	ดิน	173.690	186.431	215.201	191.774	24.48	1.57
	น้ำ	173.690	186.431	215.201	191.774	75.33	1.57

หมายเหตุ \* คือ ค่าที่ผิดปกติ

#### การคำนวณ

เปอร์เซ็นต์แคดเมียมที่เหลือในดิน =  $\frac{\text{ปริมาณแคดเมียมที่เหลือในดิน}}{\text{ปริมาณแคดเมียมในสารละลาย} + \text{ปริมาณแคดเมียมที่เหลือในดิน}} \times 100$

ปริมาณแคดเมียมในสารละลาย+ปริมาณแคดเมียมที่เหลือในดิน

เปอร์เซ็นต์แคดเมียมที่ถูกชะออกมา =  $100 \times \frac{\text{ปริมาณแคดเมียมในสารละลาย}}{\text{ปริมาณแคดเมียมในสารละลาย} + \text{ปริมาณแคดเมียมที่เหลือในดิน}}$

ปริมาณแคดเมียมในสารละลาย+ปริมาณแคดเมียมที่เหลือในดิน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ง.10 ปริมาณรูปแบบแคดเมียมที่พบในดินหลังการล้างดิน

ลำดับชั้น	ดินชุดที่	ความเข้มข้นของแคดเมียม (มก./กก. ดินแห้ง)			เฉลี่ย	% แคดเมียม	S.D.	
		1	2	3				
		ชั้นที่ 1	1	0.000				4.088
รูปที่ละลายน้ำ	2	27.537	30.369	26.424	28.110	16.13	1.17	
	3	29.890	30.224	25.849	28.654	21.79	2.02	
	4	56.624	54.010	51.432	54.022	25.65	1.23	
	ชั้นที่ 2	1	39.592	42.367	35.879	39.279	63.10	5.23
รูปที่สามารถ แลกเปลี่ยน ไอออนได้	2	95.450	86.840	91.320	91.203	52.34	2.47	
	3	83.835	77.680	112.430	91.316	69.44	15.36	
	4	86.411	70.424	143.690	100.175	47.56	18.29	
รูปคาร์บอเนต	1	5.489	3.730*	5.407	5.448	7.83	0.09	
	2	31.108	28.583	27.150	28.856	16.56	1.15	
	3	8.410	7.491	25.982*	7.951	6.05	0.54	
	4	37.206	32.181	48.526	37.524	17.82	3.98	
ชั้นที่ 4	1	4.461	3.401	3.657	3.840	6.17	0.89	
	รูปออกไซด์ และไฮดรอกไซด์	2	19.881	20.038	21.563	20.494	11.76	0.53
		3	1.662	0.896	8.192	3.583	2.72	3.32
		4	18.292	13.077	25.190	18.853	8.95	2.66
ชั้นที่ 5	1	1.108	27.076*	1.303	1.205	1.94	0.22	
	รูป สารอินทรีย์	2	9.792	4.416	2.529	5.579	3.20	2.16
		3	0.000	0.000	0.000	0.000	0.00	0.00
		4	1.545*	0.000	0.075	0.037	0.02	0.03
ชั้นที่ 6	1	0.000	0.000	0.000	0.000	0.00	0.00	
	รูปที่เหลือ	2	0.000	0.000	0.000	0.000	0.25	0.15
		3	0.000	0.000	0.000	0.000	0.00	0.00
		4	0.000	0.000	0.000	0.000	0.00	0.00

หมายเหตุ \* คือ ค่าที่ผิดปกติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



**ภาคผนวก จ.**

**มาตรฐานคุณภาพดินเพื่อการอยู่อาศัยและการเกษตรกรรม**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**ตารางที่ จ.1** ค่ามาตรฐานคุณภาพดินเพื่อการอยู่อาศัยและการเกษตรกรรม

ดัชนีคุณภาพดิน	หน่วย	ค่ามาตรฐาน
แคดเมียมและสารประกอบ แคดเมียม (Cadmium and compounds)	มิลลิกรัม/กิโลกรัม	ต้องไม่เกิน 37

หมายเหตุ : 1.ระบุเฉพาะโลหะหนักที่ทำการศึกษเท่านั้น

ที่มา : ประกาศคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ ฉบับที่ 25 (พ.ศ. 2547) ออกตามความในพระราชบัญญัติส่งเสริมและรักษาคุณภาพสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ พ.ศ. 2535 เรื่อง กำหนดมาตรฐานคุณภาพดิน ดิพิมพ์ในราชกิจจานุเบกษา เล่ม 121 ตอนพิเศษ 119 ง ลงวันที่ 20 ตุลาคม 2547



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้