



การตัดชั้นแคตเมียม นิกเกิล และสังกะสี  
ในสารละลายผสมของโลหะหนัก โดยดินชั้นบน

รพ.  
พ437ก  
2536

นายพลเกียรติ สีระอเนกนถ

นายศิริ เหล่าชนภัทร

เลขหมู่.....  
เลขทะเบียน.....  
วันเดือนปี.....

612529087

โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตร์บัณฑิต

ภาควิชาเคมี

คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2536

Adsorption of Cd , Ni and Zn in Mixed Solution  
of Heavy Metal by Top Soils

MR.POLAKIAT SIWA-ANAKENART

MR.SIRI LAOTANAPART

A Special Project Submitted in partial Fulfillment of the  
Requirement for the Degree of Bachelor of science  
Department of Chemistry  
Faculty of science  
Kings Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang

หัวข้อโครงการพิเศษ

การดูดซับแคดเมียม นิกเกิล และสังกะสี

ในสารละลายผสมของโลหะหนัก โดยดินชั้นบน

โดย

นายพลเกียรติ ลีระอนเณกนาก

นายศิริ เหล่าชนภัทร

ภาควิชา

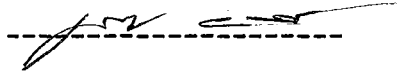
เคมี

อาจารย์ที่ปรึกษา

อ. กรองแก้ว ทิพย์ศักดิ์

อ. พิสมัย ชัยรัตน์อุทัย

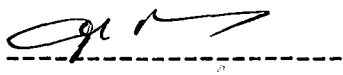
ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
อนุมัติให้โครงการพิเศษฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต



(ผศ. นงนุช เกตรานูวัฒน์)

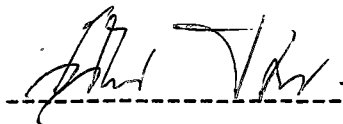
รักษาการหัวหน้าภาค

คณะกรรมการโครงการพิเศษ



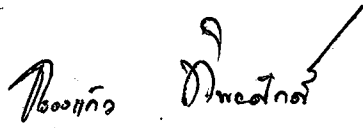
(ผศ. อรุณี คงศักดิ์ไพศาล)

ประธานกรรมการ



(อ. สุนันต์ ตันตนิษฐกุล)

กรรมการ



(อ.กรองแก้ว ทิพย์ศักดิ์)

อาจารย์ที่ปรึกษา



(อ.นิสมีช ชัยรัตน์อุทัย)

อาจารย์ที่ปรึกษา

ลิขสิทธิ์ของภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

หัวข้อโครงการพิเศษ	การดูดซับแคดเมียม นิกเกิล และสังกะสี ในสารละลายผสมของโลหะหนัก โดยดินชั้นบน
นักศึกษา	นายพลเกียรติ ลีระอเนกนาถ นายศิริ เหล่าชนภัทร
อาจารย์ที่ปรึกษา	อาจารย์กรองแก้ว ทิพย์ศักดิ์ อาจารย์พิพัฒน์ ชัยรัตน์อุทัย
ภาควิชา	เคมี
ปีการศึกษา	2536

#### บทคัดย่อ

การศึกษาการดูดซับโลหะหนัก แคดเมียม นิกเกิล และสังกะสี ในสารละลายผสมของโลหะหนัก โดยดินชั้นบน ( ลึก 0-30 เซนติเมตร ) จากชุดดิน 2 ชนิด คือ ชุดดินกำแพงแสน และชุดดินนราธิวาส โดยชุดดินทั้ง 2 ชุดมีวัสดุที่ใช้แลกเปลี่ยนประจุบวกต่างกัน ( Cation Exchange Materials ) ชุดดินกำแพงแสนจัดอยู่ในดินแร่ ( mineral soil ) ซึ่งมีองค์ประกอบส่วนมากเป็น คาโอไลไนต์ผสมซิลิเกต ส่วนชุดดินนราธิวาสเป็นดินพรุหรือดินอินทรีย์ ( organic soil ) ซึ่งมีฮิวมัสเป็นส่วนมาก การทดลองนี้เป็นแบบ Batch Experiment โดยนำโลหะหนักแต่ละชนิดมาผสมกันและมีสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ เข้มข้น 0.01 โมลาร์ เป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์ โลหะหนักที่นำมาผสมกันได้แก่ แคดเมียมกับนิกเกิล แคดเมียมกับสังกะสี นิกเกิลกับสังกะสี และแคดเมียมกับนิกเกิลกับสังกะสี โดยมีความเข้มข้นเริ่มต้นของโลหะหนักแต่ละชนิดเท่ากัน คือ  $5 \times 10^{-4}$  โมลาร์

การศึกษาการดูดซับจะกระทำภายในเวลา 24 ชั่วโมงที่อุณหภูมิ  $30 \pm 2$  องศาเซลเซียส ผลการทดลองพบว่า ความสามารถในการดูดซับโลหะหนักของดินนราธิวาสมีค่ามากกว่าดินกำแพงแสน สังกะสีจะถูกดูดซับโดยดินทั้ง 2 ชนิดได้ดีที่สุด ไม่ว่าจะอยู่ร่วมกับแคดเมียม หรือนิกเกิลหรือโลหะหนักทั้ง 2 ชนิด ส่วนแคดเมียมกับนิกเกิลถูกดูดซับได้รองลงมาตามลำดับ

ในดินกำแพงแสนที่อ้อมตัวด้วยแคลเซียมพบว่า ปริมาณและความสามารถในการดูดซับโลหะหนักทุกชนิดเพิ่มขึ้นมากกว่าดินธรรมชาติแต่ลำดับความสามารถนั้นยังคงเหมือนดินธรรมชาติ

เมื่อปรับค่าพีเอชของสารละลายโลหะหนักเป็น 4 , 5 , 6 และ 7 ก่อนการศึกษาการดูดซับของดินกำแพงแสน จะพบว่าการเปลี่ยนแปลงพีเอชมีผลต่อปริมาณรวมของการดูดซับโดยปริมาณรวมของการดูดซับแคดเมียมกับนิกเกิลกับสังกะสี เป็น 80.46 , 77.38 , 71.08 และ 100.63  $\mu\text{eq/g dry soil}$  ตามลำดับ



these three heavy metal ions , the order of adsorbate quantity on both soil was nearly identical with the row :  $Ni^{2+} < Cd^{2+} < Zn^{2+}$ . It's found from Calcium - saturated Ks soil that the adsorbate quantity increased but the order of adsorbent quantity was still the same as original Ks soil.

When the pH value of heavy metal ions solution was adjusted to 4 , 5 , 6 and 7 before adsorption, it's indicated that the total adsorption of Cd , Ni and Zn was 80.46 , 77.38 , 71.08 and 100.63  $\mu eq / g$  dry soil respectively but the order of adsorbent quantity remained the same. Therefore , it could be concluded that the variation of the pH value effected the total adsorption.

## กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ อาจารย์กรองแก้ว ทิพย์ศักดิ์ เป็นอย่างสูงที่ให้คำปรึกษาและเอาใจใส่ช่วยเหลือในการดำเนินโครงการพิเศษนี้มาโดยตลอด รวมทั้งได้กรุณาตรวจทานและแก้ไขรายงานโครงการพิเศษนี้ให้มีความถูกต้องยิ่งขึ้น ขอขอบคุณ อ.พิศมัย ชัยรัตน์อุทัย ที่ให้คำแนะนำและช่วยเหลือให้รายงานโครงการพิเศษนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี ขอขอบคุณ คุณนิธิตา (กรมพัฒนาที่ดิน กระทรวงเกษตรและสหกรณ์) ที่ได้กรุณาจัดหาดินมาให้

ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ธุรการทุกท่าน ที่ได้อำนวยความสะดวกในด้านต่าง ๆ และท้ายที่สุดที่สิ่งที่ไม่ได้ ต้องขอขอบคุณแม่บ้านที่ได้ทำความสะอาดห้องปฏิบัติการเคมีให้สะอาดอยู่เสมอด้วยความขยันขันแข็ง

นายพล เกียรติ สีระอเนกนาถ

นายศิริ เหล่าชนภัทร

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญตาราง.....	ง
สารบัญรูป.....	จ
คำย่อ.....	ฉ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของโครงการพิเศษ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตการวิจัย.....	2
1.4 วิธีกรดำเนินการวิจัย.....	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง .....	4
2.1 กล่าวนำ.....	4
2.2 อนุภาคดินส่วนที่เป็นสารอินทรีย์.....	5
2.2.1 ชนิดของซิลิเกต เคลย์ที่สำคัญ.....	6
2.2.2 พวกรอกไฮด์ และไฮดรอกไซด์ของเหล็กและอะลูมิเนียม.....	10
2.3 อินทรีย์วัตถุ.....	10
2.4 กระบวนการดูดซับและการปลดปล่อย.....	15

	หน้า
2.5 ปัจจัยที่ควบคุมการแลกเปลี่ยนไอออนในดิน.....	15
2.5.1 ชนิดของ adsorbed cation และ replacing cation....	15
2.5.2 ความเข้มข้นของ replacing cation.....	18
2.5.3 ปริมาณการอิ่มตัว.....	19
2.5.4 แคตไอออนอื่นที่อยู่ร่วมกับผิวของเคลย์.....	19
2.6 ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับและการปลดปล่อยของโลหะหนัก.....	19
2.6.1 คอลลอยด์ของดิน.....	19
2.6.2 ประจุบวกของโลหะ.....	22
2.6.3 ผลของ pH .....	22
2.7 ที่มาของประจุลบ.....	23
2.7.1 ที่มาของประจุลบของแร่ดินเหนียว.....	23
2.7.2 ที่มาของประจุลบของอินทรีย์วัตถุ.....	24
2.8 โลหะหนักในดิน.....	25
2.8.1 แคดเมียม.....	25
2.8.2 นิกเกิล.....	25
2.8.3 สังกะสี.....	26
บทที่ 3 การวิจัยและการดำเนินงาน.....	27
3.1 อุปกรณ์การทดลอง.....	27
3.2 สารเคมี.....	27
3.3 การทดลอง.....	28
3.3.1 การเตรียมตัวอย่างดินธรรมชาติ.....	28
3.3.2 การเตรียมตัวอย่างดินที่อิ่มตัวด้วยแคลเซียม.....	28
3.3.3 การเตรียมสารละลายผสมของโลหะหนัก.....	29
3.3.4 การดูดซับโดยดินธรรมชาติ.....	29

	หน้า
3.3.5 การดูดซับโดยดินที่ถมตัวด้วยแคลเซียม.....	31
3.3.6 การศึกษาผลของพีเอชของสารละลายต่อปริมาณการดูดซับ โลหะหนัก.....	31
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์.....	32
4.1 คุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของดิน.....	32
4.1.1 ดินกำแพงแสน ( Ks ).....	32
4.1.2 ดินนราธิวาส ( Nw ).....	33
4.2 การดูดซับโดยดินธรรมชาติ.....	35
4.2.1 ดินกำแพงแสน.....	35
4.2.2 ดินนราธิวาส .....	38
4.3 การดูดซับโดยดินกำแพงแสนที่ถมตัวด้วยแคลเซียม.....	42
4.4 ผลของความเป็นกรด-เบสต่อปริมาณการดูดซับโลหะหนัก.....	45
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....	49
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	49
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	50
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก.....	52
ภาคผนวก ข.....	59
ภาคผนวก ค.....	61
ภาคผนวก ง.....	63
ภาคผนวก จ.....	65
เอกสารอ้างอิง.....	69

## สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
3.1	วิธีการที่ใช้วิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของดิน.....	30
3.2	สารละลายโลหะหนักที่ใช้ทดลอง.....	31
4.1	คุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของดินกำแพงแสน.....	32
4.2	คุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของดินนราธิวาส.....	33
4.3	การดูดซับโลหะหนักโดยดินกำแพงแสน.....	35
4.4	การดูดซับโลหะหนักโดยดินนราธิวาส.....	38
4.5	การดูดซับโลหะหนักโดยดินกำแพงแสนที่อิมมูด้วยแคลเซียม.....	42
4.6	การดูดซับโลหะหนักโดยดินกำแพงแสนที่พีเอชต่างๆ.....	45

## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1	12
โครงสร้างของ ซิลิกา เตตระฮีดรัลซีต และ อะลูมินา ออกตะฮีดรัลซีต ซึ่งเป็น หน่วยโครงสร้างที่สำคัญของแร่ อะลูมินา ซิลิเกต เคลย์ ทั้งหมด.....	
2.2	13
ภาพของแร่ดินเหนียว คาโอไลไนต์ และ มอนโมริลโลไนต์ ถ่ายจากกล้อง อิเล็กตรอนไมโครสโคป.....	
2.3	14
โครงสร้างของผลึกของ ซิลิเกต เคลย์ ที่สำคัญ.....	
2.4	18
ขนาดของประจุบวกที่มีต่อ replacing power.....	
4.1	37
การดูดซับโลหะหนักในสารละลายผสมของโลหะหนัก โดยดินกำแพงแอส.....	
4.2	40
การดูดซับโลหะหนักในสารละลายผสมของโลหะหนัก โดยดินนราธิวาส.....	
4.3	41
การดูดซับโลหะหนักระหว่างดินกำแพงแอสกับดินนราธิวาส.....	
4.4	44
การดูดซับโลหะหนักโดยดินกำแพงแอสที่อิ่มตัวด้วยแคลเซียม.....	
4.5	44
การดูดซับโลหะหนักระหว่างดินกำแพงแอสกับดินกำแพงแอสที่อิ่มตัวด้วยแคลเซียม..	
4.6	47
การดูดซับโลหะหนักโดยดินกำแพงแอสที่ pH = 4.....	
4.7	47
การดูดซับโลหะหนักโดยดินกำแพงแอสที่ pH = 5.....	
4.8	48
การดูดซับโลหะหนักโดยดินกำแพงแอสที่ pH = 6.....	
4.9	48
ปริมาณรวมของโลหะหนักที่ถูกดูดซับที่ pH 4 , 5 , 6 และ 7.....	

## คำย่อ

Ks	=	ชุดดินกำแพงแสน
Nw	=	ชุดดินนราธิวาส
Ca-sat. Ks	=	ดินกำแพงแสนที่อิ่มตัวด้วยแคลเซียม
Mt	=	มอนต์มอริลโลไนต์
Kt	=	คาโอลิไนต์
I	=	อิไลต์
Ht	=	ฮาลอซต์ไซต์
A	=	แอลโลเฟน
Im	=	อิโมโกไลต์
M	=	หน่วยความเข้มข้น (โมลาร์)
CEC	=	ค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวก
$\mu\text{eq/g}$	=	Microequivalent per gram soil
$\text{meq}/100 \text{ g}$	=	Milliequivalent per 100 gram soil

## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ความสำคัญและที่มาของโครงการพิเศษ

โลหะหนักหลายชนิด เช่น แคดเมียม (Cd) โครเมียม (Cr) เหล็ก (Fe) แมงกานีส (Mn) สังกะสี (Zn) และนิกเกิล (Ni) เป็นโลหะหนักที่มีความเป็นพิษต่อระบบนิเวศน์ ปัจจุบันมีการใช้โลหะหนัก และสารประกอบของโลหะหนักกันอย่างกว้างขวาง เช่น อุตสาหกรรมชุบโลหะในเขตกรุงเทพมหานครมีจำนวนถึง 200 โรงงาน (1) ซึ่งก่อให้เกิดปัญหาการกระจายของโลหะหนักเข้าสู่สิ่งแวดล้อม การเกิดพิษของโลหะหนักจะขึ้นอยู่กับปริมาณที่โลหะหนักกระจายตัวออกมา สังกะสีเมื่อมีอยู่ในดินปริมาณที่สูง จะก่อให้เกิดผลกระทบต่อการเจริญเติบโตของต้นข้าว แต่ถ้ามีอยู่ในปริมาณที่เหมาะสมจะเป็นจุลธาตุอาหารที่ช่วยในการเจริญเติบโตของพืช ในขณะที่นิกเกิลเป็นโลหะหนักที่ก่อให้เกิดผลกระทบต่อการเจริญเติบโตของพืชได้มากกว่าสังกะสีถึง 8 เท่า (6) แคดเมียมเป็นโลหะหนักที่ปลดปล่อยออกมาจากอุตสาหกรรมเหมืองแร่สังกะสี อุตสาหกรรมการถลุงโลหะ โรงงานถ่านไฟฉาย การที่มนุษย์ได้รับแคดเมียมเข้าไปสะสมในปริมาณที่สูงจะก่อให้เกิดโรคอิไต-อิไต (itai-itai disease) ได้ (2) ปัจจุบันโรงงานชุบโลหะในกรุงเทพมหานคร มีการกำจัดโลหะหนักที่อยู่ในน้ำทิ้งโดยใช้ระบบบำบัดด้วยวิธีตกตะกอนด้วยปูนขาวเป็นส่วนใหญ่ ทำให้ตกตะกอนในรูปของไฮดรอกไซด์ แล้วนำกากตะกอนเหล่านั้นไปฝังดิน (Sanitary Landfill) ตามหลักวิชาการ แต่อย่างไรก็ดีกากตะกอนเหล่านั้นอาจถูกชะโลหะหนักออกมาได้ในสภาวะแวดล้อมที่มีความเป็นกรด (1) การกำจัดโลหะหนักโดยใช้ซีโอไลต์หรือเรซินจะมีประสิทธิภาพดีกว่าการตกตะกอน แต่ก็มีค่าใช้จ่ายสูง ทำให้ไม่เป็นที่นิยมในโรงงานขนาดเล็ก ดังนั้นการตกตะกอนแล้วนำตะกอนที่ได้ไปฝังดินจึงเป็นวิถีทางของการแพร่กระจายของโลหะหนักได้ จึงควรที่จะได้มีการศึกษาถึงความสามารถในการดูดซับโลหะหนักของดินเพื่อใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานในการอธิบายการแพร่ของโลหะหนัก อย่างไรก็ตาม

ข้อมูลการดูดซับโลหะหนักของดินในประเทศไทยนั้นยังมีผู้ศึกษาไม่มากนัก ผู้ทำโครงการพิเศษจึงต้องทำการศึกษาถึงปัจจัยพื้นฐานที่มีผลต่อการดูดซับก่อน เช่น ชนิดของดิน โลหะหนัก ชนิดต่าง ๆ ที่ผสมกันอยู่ ความเป็นกรด-เบส เพื่อนำข้อมูลที่ได้ไปพัฒนาใช้กับสภาพแวดล้อมจริง ๆ ในธรรมชาติต่อไป

## 1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาการดูดซับโลหะหนักในสารละลายโลหะหนักผสม ระหว่าง แคลเซียม นิกเกิล และสังกะสี โดยดินแร่ (mineral soil) และดินอินทรีย์ (organic soil) และดินที่ทำให้อยู่ในสภาวะที่อิ่มตัวด้วยแคลเซียม (calcium-saturated soil)

1.2.2 เพื่อศึกษาถึงผลกระทบของค่าความเป็น กรด-เบส ที่เปลี่ยนแปลงต่อการดูดซับโลหะหนักของดินก้ำแพงแสน

## 1.3 ขอบเขตการวิจัย

1.3.1 ดินธรรมชาติที่เลือกมาศึกษา ได้แก่ ชุดดินก้ำแพงแสน ซึ่งจัดอยู่ในดินแร่ และดินนราธิวาส ซึ่งจัดอยู่ในดินอินทรีย์ ส่วนดินที่ทำให้อยู่ในสภาวะที่อิ่มตัวด้วยแคลเซียม จะศึกษาเฉพาะดินก้ำแพงแสน

1.3.2 โลหะหนักที่เลือกมาศึกษา คือ Cd , Ni และ Zn โดยใช้สารละลายผสมของโลหะหนักที่มีความเข้มข้นเริ่มต้นของโลหะหนักแต่ละชนิดเท่ากัน คือ  $5 \times 10^{-4}$  โมลาร์ ระหว่าง

- Cd+Ni
- Cd+Zn
- Ni+Zn
- Cd+Ni+Zn

1.3.3 ค่าความเป็นกรด-เบสที่เปลี่ยนแปลง คือ 4 , 5 , 6 และ 7 โดยจะศึกษาเฉพาะดินกำแพงแสนเท่านั้น

1.3.4 การทดลองนี้เป็นแบบ Batch Experiment ซึ่งมีการควบคุมสภาวะที่ใช้ในการทดลอง ได้แก่ เวลาที่ใช้ในการศึกษากระบวนการดูดซับ คือ 24 ชั่วโมง อุณหภูมิที่ศึกษา คือ  $30 \pm 2$  องศาเซลเซียส

#### 1.4 วิธีการดำเนินงานวิจัย

1.4.1 เตรียมตัวอย่างดินธรรมชาติและดินที่อิ่มตัวด้วยแคลเซียม

1.4.2 วิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของดินตัวอย่าง

1.4.3 ศึกษาการดูดซับโลหะหนักผสมโดยดินธรรมชาติและดินที่อิ่มตัวด้วยแคลเซียม

1.4.4 ศึกษาผลของพีเอชของสารละลาย ต่อปริมาณการดูดซับโลหะหนักโดยดินธรรมชาติ

#### 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.5.1 ทราบถึงความสามารถในการดูดซับโลหะหนักของดินที่นำมาวิจัย

1.5.2 ทราบถึงชนิดของโลหะหนักที่ถูกดูดซับได้มากที่สุดโดยดินที่นำมาวิจัย

1.5.3 นำข้อมูลที่ได้ไปใช้ในการทำนายถึงการดูดซับโลหะหนักชนิดเดียวกันในดินชุดอื่น ๆ ที่มีโครงสร้างคล้ายกัน

1.5.4 นำข้อมูลที่ได้ไปใช้ประกอบการหามาตรการป้องกันปัญหามลพิษจากโลหะหนัก

## บทที่ 2

### ทฤษฎีและหลักการ

#### 2.1. กล่าวนำ

ดินเป็นปัจจัยพื้นฐานในการดำรงชีพของมนุษย์ เพราะดินเป็นแหล่งกักเก็บอาหาร เครื่องนุ่งห่ม ที่อยู่อาศัย และยารักษาโรค ถ้าปราศจากดินก็เชื่อได้ว่าสิ่งมีชีวิตคงไม่สามารถดำรงชีพอยู่ได้ ในการศึกษาเรื่องดิน ดร. สมเจตน์ จันทวัฒน์ และ คณะ (3) ได้ให้คำจำกัดความของดินเป็น 2 ด้าน คือ

##### 1. Pedological aspect

ดิน คือ เทหวัตถุธรรมชาติ (natural body) ที่ปกคลุมผิวโลกอยู่บาง ๆ เกิดขึ้นจากผลของการแปรสภาพหรือผุพังของหินและแร่ และอินทรีย์วัตถุผสมคลุกเคล้ากัน

##### 2. Edaphological aspect

ดิน คือ เทหวัตถุที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติรวมกันขึ้นเป็นชั้น (profile) จากส่วนผสมของแร่ธาตุต่าง ๆ ที่สลายตัวเป็นชั้นเล็กชั้นน้อย กับอินทรีย์วัตถุที่เปื่อยผุพังอยู่รวมกันเป็นชั้นบาง ๆ ห่อหุ้มผิวโลก และมีอากาศ และน้ำในปริมาณที่เหมาะสมแล้วจะช่วยคำนวณพร้อมทั้งช่วยในการยังชีพ ในการเจริญเติบโตของพืช

จากคำจำกัดความดังกล่าว จะเห็นได้ว่าดินประกอบด้วย ส่วนที่เป็นแร่และอินทรีย์วัตถุ ขนาดของอนุภาคมีขนาดเล็กมาก และอยู่รวมเป็นเนื้อเดียวกับอากาศและน้ำ ในสถานะที่เรียกว่า สถานะคอลลอยด์ (Colloidal State) คุณสมบัติต่าง ๆ ของดินทั้งทางเคมีและทางกายภาพ ส่วนใหญ่จะขึ้นอยู่กับอนุภาคในสถานะคอลลอยด์ อนุภาคของดินส่วนที่เป็นแร่มาจากหินและวัตถุต้นกำเนิดโดยกระบวนการสลายตัว เช่น การชะล้าง, การกัดเซาะ

ทำให้อยู่ในรูปเม็ดดินอนุภาคเดี่ยว อนุภาคซ้อน หรือ ยึดเกาะจนเป็นหน่วยเดียวกัน เป็นก้อนดิน (soil clod) จึงมีเกณฑ์ในการจัดกลุ่มตามขนาดของอนุภาคดิน เช่น กลุ่มขนาดทราย , กลุ่มขนาดซัดท์ และ กลุ่มขนาดดินเหนียว

## 2.2. อนุภาคดินส่วนที่เป็นสารอนินทรีย์

สามารถแบ่งออกตามลักษณะโครงสร้างได้อย่างกว้าง ๆ เป็น 2 กลุ่ม คือ

1. พวกแร่อะลูมิโน ซิลิเกต ( Alumino Silicate Minerals ) หรือ ซิลิเกตเคลย์ ( Silicate clay )

2. พวกออกไซด์ และไฮดรอกไซด์ของเหล็ก และอะลูมิเนียม ( Iron-Aluminium Oxide and hydrous oxide )

ซิลิเกตเคลย์ เป็นแร่ที่มีอะลูมิเนียมและซิลิเกตเป็นองค์ประกอบที่สำคัญ จะมีหน่วยโครงสร้างพื้นฐานอยู่ 2 แบบ คือ ซิลิกา เตตระฮีดรัล ยูนิท ( Silica Tetrahedral Unit ) ประกอบด้วยธาตุซิลิกา 1 อะตอม ล้อมรอบด้วยออกซิเจน 4 อะตอม เป็นรูปทรงเหลี่ยมสี่หน้า ( tetrahedral ) จะเกาะเชื่อมกันเป็นแผ่นโดยการเกาะออกซิเจนร่วมกัน ที่ฐานทำให้เป็นแผ่นที่มีช่องรูปหกเหลี่ยมอยู่ทั่วไป จะเรียกว่า ซิลิกา เตตระฮีดรัลชีต ( Silica tetrahedral sheet ) หรือซิลิกาชีต ( Silica sheet ) สำหรับหน่วยโครงสร้างอีกแบบหนึ่ง คือ อะลูมินา ออกตะฮีดรัล ยูนิท ( Alumina Octahedral Unit ) ซึ่งประกอบด้วย อะลูมิเนียม 1 อะตอม อยู่ตรงกลางล้อมรอบด้วย ออกซิเจน 6 อะตอม เป็นรูปทรงแปดด้าน ( Octahedral ) เกาะเชื่อมโยงเป็นแผ่นในแนวระดับ เป็นแผ่นที่บิดเบี้ยวออกซิเจนร่วมกัน แต่ไม่มีช่องรูปหกเหลี่ยมเหมือน ซิลิกาชีต หน่วยโครงสร้างนี้ เรียกว่า อะลูมินา ออกตะฮีดรัลชีต ( Alumina Octahedral Sheet ) หรืออะลูมินาชีต ( Alumina sheet ) (รูปที่ 2.1)

### 2.2.1. ชนิดของซิลิเกต เคลย์ ที่สำคัญ

1. คาโอลิไนต์ (Kaolinite) ซิลิเกต เคลย์ พวกนี้ที่สำคัญ ได้แก่ คาโอลิไนต์ , ฮาลลอยไซต์ และ ดิกโคต ในกลุ่มนี้ คาโอลิไนต์ จะพบมีอยู่ในดินมากที่สุดจึงมีความสำคัญมากกว่าแร่ดินเหนียวอื่น ๆ ในกลุ่มเดียวกัน โครงสร้างทางแร่ของเคลย์พวกนี้เหมือนกันทุกประการ คือ สูตร  $\text{Si}_4\text{Al}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$  แต่ผิดกันที่การเรียงซ้อนกันของหน่วยผลึก ( crystal unit ) ที่ประกอบกันเป็นอนุภาคของเคลย์เท่านั้น เช่น หน่วยผลึกอาจจะเรียงซ้อนกันเป็นแถวตั้ง หรือ เรียงไปทางซ้าย หรือ เรียงไปทางข้างหน้า ฯลฯ และการเรียงตัวแต่ละแบบก็จะทำให้เคลย์พวกนี้ มีชื่อเรียกต่างกันไป

สำหรับโครงสร้างของคาโอลิไนต์นั้น จะประกอบด้วยแผ่น ซิลิกาชั้นหนึ่งแผ่นประกบทับกับแผ่นของอะลูมินาชั้นอีกหนึ่งแผ่น เนื่องจาก ซิลิกา และ อะลูมิเนียม จะรวมเกาะออกซิเจนตัวเดียวกันในด้านที่ประกบเข้าหากัน จึงทำให้แผ่นทั้งสองประสานกันแน่นรวมกันเข้าเป็นผลึกของแร่คาโอลิไนต์ ผลึกดังกล่าวจะขยายตัวเองออกไปในทางระดับได้โดยไม่จำกัดรูปของแผ่นผลึกเป็นรูปหกเหลี่ยมมีขอบชัดเจน ผลึกของคาโอลิไนต์ที่อยู่ในธรรมชาติจะเรียงซ้อนกันเป็นชั้น ๆ ช่องหรือหลืบ ( inter layer ) ระหว่างแผ่นผลึกที่เรียงซ้อนทับกันมีความกว้าง 7 อังสตรอม (วัดจากขอบบนของผลึกแผ่นบนถึงขอบบนของผลึกแผ่นล่างถัดลงมา) หลืบนี้แคบและระยะคงที่ไม่สามารถขยายให้กว้างขึ้นหรือแคบเข้าได้อีก เนื่องจากถูกยึดด้วยพันธะไฮโดรเจน ซึ่งเกิดขึ้นระหว่างออกซิเจน อะตอมของซิลิกาชั้น และ ไฮโดรเจน อะตอมของอะลูมินาชั้น การที่ อะลูมินาชั้น มีไฮโดรเจน อะตอม อยู่ด้วยนั้น ความจริงไฮโดรเจนอะตอมนี้ เป็นของกลุ่มไฮดรอกซิล (Hydroxyl group (OH)) ซึ่งเข้ามาแทนที่ ออกซิเจนอะตอม ที่อยู่ด้านนอกของอะลูมินาชั้น ( รูปที่ 2.3 ก ) โดยธรรมชาติแล้วไฮโดรเจนและออกซิเจน จะมี แอฟฟินิตี ( affinity ) ที่เกาะยึดกันเป็นอย่างมาก ดังนั้นเมื่อต่างเข้ามาอยู่ใกล้กัน จึงทำให้เกิดมีแรงยึดระหว่างกันชั้นค่อนข้างเหนียวแน่นมาก ทำให้โมเลกุลของน้ำและแคทไอออนต่าง ๆ เข้าแทรกซึมในหลืบไม่ได้ จึงมีผลทำให้ซิลิเกตเคลย์ พวกนี้ไม่ขยาย

และหดตัวเมื่อเปียกและแห้ง ดังนั้นจึงถือว่าเคลย์พวกนี้ไม่มีพื้นผิวภายใน ( internal surface ) มีแต่พื้นผิวภายนอก ( external surface ) จากสาเหตุดังกล่าวจึงทำให้เคลย์พวกนี้ดูดซับแคทไอออนได้น้อย

เนื่องจากผลึกของเคลย์ พวกนี้มีลักษณะโครงสร้างที่แข็งแรง และมีการเรียงตัวกันแน่น อนุภาคของเคลย์จึงแตกง่ายและหักพังยาก ดังนั้นโดยทั่วไปแล้วอนุภาคของเคลย์พวกนี้ จึงมักจะมีขนาดโตกว่าเคลย์พวกอื่น ๆ ทั้งหมด และขอบของผลึกบางส่วนก็ยังสามารถเห็นได้อย่างชัดเจนว่ามีลักษณะขอบหกเหลี่ยม ( hexagonal edge ) อยู่ ( รูปที่ 2.2 ) ขนาดของอนุภาคของเคลย์พวกนี้จะอยู่ระหว่าง 0.1-5 ไมครอน แต่ส่วนใหญ่จะมีขนาดอยู่ระหว่าง 0.2-2 ไมครอน หนึ่งเนื่องจากคาโอลินในดินนี้ประกอบด้วยอะลูมินาซีตหนึ่งแผ่นประกบกับซิลิกาซีตหนึ่งแผ่น บางครั้งเคลย์พวกนี้จึงถูกเรียกว่า เคลย์ชนิด 1:1

2. มอนต์มอริลโลไนต์ ( Montmorillonite ) ซิลิเกต เคลย์ พวกนี้ มีอยู่หลายชนิด ที่สำคัญ ได้แก่ มอนต์มอริลโลไนต์ , เบคิลโลต์ , นอนโตรไนต์ และ ซาปอนไนต์ ในจำนวนนี้ มอนต์มอริลโลไนต์ เป็นแร่ดินเหนียว ที่สำคัญเพราะมีมากในดินทั่วไป รองลงมาได้แก่ เบคิลโลต์ และ นอนโตรไนต์ ตามลำดับ

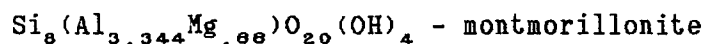
โครงสร้างของมอนต์มอริลโลไนต์ นั้น ประกอบด้วย ซิลิกาซีต สองแผ่น และ อะลูมินาซีตหนึ่งแผ่น โดยอะลูมินาจะสอดอยู่ระหว่างกลางของแผ่นซิลิกาซีตทั้งสอง ซิลิกาและอะลูมิเนียมอะตอม ในแผ่นเหล่านี้ต่างก็เกาะยึดออกซิเจนร่วมกัน ประกอบกันเป็นผลึกของมอนต์มอริลโลไนต์ เนื่องจากเคลย์พวกนี้ประกอบด้วยซิลิกาซีตสองแผ่น และ อะลูมินาซีตหนึ่งแผ่น จึงมักเรียกอีกชื่อหนึ่งว่า เคลย์ชนิด 2:1 ผลึกของมอนต์มอริลโลไนต์นี้ จะเชื่อมต่อกันไปในแนวระดับ และจะซ้อนกันเป็นชั้น ๆ หลับมีความกว้าง 9-21 อังสตรอม (รูปที่ 2.3 ข) หลับนี้อาจขยายให้กว้างหรือหดให้แคบเข้าได้ เพราะไม่มีพันธะไฮโดรเจนยึดระหว่างแผ่นผลึกที่ซ้อนทับกันอยู่ เนื่องจากทั้งด้านบนและด้านล่างของหลับนี้ต่างก็มีออกซิเจนซึ่งเป็นของซิลิกาซีต ดังนั้น พันธะไฮโดรเจนจึงไม่เกิดขึ้น แต่จะเกิดแรงยึดระหว่างออกซิเจน อะตอม ( O-O linkage ) ขึ้นแทน ซึ่งเป็นแรงเกาะกันที่เบาบางมากไม่สามารถจะยึดหลับของเคลย์ให้มีระยะคงที่ได้ โมเลกุลของน้ำและแคทไอออน ต่าง ๆ ก็แทรกซึมเข้าไปอุดที่หลับภายใน

หลับได้ง่าย เคลย์พวกนี้จะมีพื้นที่ผิวดูดซับโมเลกุลของน้ำและแคทไอออนได้มาก การพองตัวและหดตัวก็จะเกิดขึ้นมากด้วย เมื่อดินนั้นเปียกหรือแห้งตัวลง ความสามารถในการดูดซับน้ำและแคทไอออนต่าง ๆ จะสูงมาก เนื่องจากเคลย์พวกนี้ยึดหดได้ง่ายและมีการแทนที่ด้วยประจุอื่น ๆ (ionic substitution) มาก โครงสร้างของผลึกจึงไม่แข็งแรง การแตกสลายของผลึกและอนุภาคของเคลย์ พวกนี้จึงเกิดขึ้นได้ง่ายมาก ในสภาพธรรมชาติทั่วไปจึงพบว่าเคลย์พวกนี้มีขนาดเล็กมากเมื่อเปรียบเทียบกับพวกคาโอลิไนต์ คืออยู่ระหว่าง 0.01-1.0 ไมครอน ดังนั้นจึงยิ่งมีผลทำให้มีพื้นที่ผิวเฉพาะ (specific surface) สูงมากขึ้นอีก ขอบของผลึกจะฉีกขาดจนไม่อาจเห็นขอบของผลึกที่แท้จริงได้ (รูปที่ 2.2)

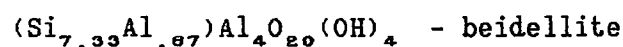
มอนต์มอริลโลไนต์ ชนิดต่าง ๆ กัน จะมีโครงสร้างเหมือนกัน แต่จะผิดกันที่ปริมาณการถูกไล่ที่ของซิลิกา หรือ อะลูมิเนียม ในโครงสร้างของผลึกด้วยธาตุอื่น ๆ ซึ่งเรียกว่า ไอออนนิก หรือ ไอโซมอร์ฟัส ซับสติติวชัน (Isomorphous substitution) ยกตัวอย่างสูตร เช่น สูตรทั่วไป ของ เคลย์ พวก 2:1 ก็คือ



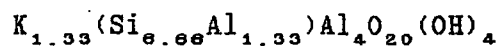
ถ้ามีธาตุ แมกนีเซียม เข้ามาแทนที่ อะลูมิเนียม บางส่วนในอะลูมินาsheet ก็ได้เคลย์ชนิด 2:1 ที่เรียกว่ามอนต์มอริลโลไนต์ มีสูตรคือ



ถ้ามีธาตุ อะลูมิเนียม เข้ามาแทนที่ ซิลิกา บางส่วนในซิลิกาsheet ก็จะได้เบติลไลต์ มีสูตรคือ



3. อิลไลต์ (Illite) โครงสร้างเหมือนกับพวก มอนต์มอริลโลไนต์มากและ  
 แร่ที่สำคัญ ได้แก่ อิลไลต์ ซิลิเกต เคลย์พวกนี้บางครั้งก็เรียกว่าเป็น พวกไฮดรัส ไมกา  
 (Hydrous mica) เพราะมีส่วนคล้ายคลึงกับพวกไมกา (mica) อิลไลต์ มีโครงสร้าง  
 ที่ ๗ ไปเหมือนกับพวกมอนต์มอริลโลไนต์ ดังนั้นจึงอยู่ในพวกเคลย์ชนิด 2:1 ด้วยเหมือนกัน  
 แต่จะแตกต่างกันตรงที่ระยะระหว่างแผ่นผลึก โดยวัดจากขอบบนของผลึกถึงขอบบนของผลึก  
 แผ่นล่างถัดลงมา หรือ หลักระหว่างผลึกของเคลย์ มีระยะคงที่เท่ากับ 10 อังสตรอม และ  
 ไม่สามารถยัดเข้ายี่ดออกได้เหมือนอย่าง มอนต์มอริลโลไนต์ บางครั้งจึงเรียกว่าเป็นพวก  
 ผลึกที่ไม่ขยายตัว (non-expanding lattice) (รูปที่ 2.3 ค) ส่วน มอนต์มอริลโลไนต์  
 เป็นพวกผลึกที่ขยายตัว (expanding lattice) สาเหตุที่อิลไลต์ เป็นพวกผลึกที่ไม่ขยายตัว  
 ก็เพราะว่า ซิลิกา อะตอม ในซิลิกาชั้นบางส่วนจะถูกแทนที่โดย อะลูมิเนียม อะตอม และประจุ  
 ที่เหลือค้างอยู่ เนื่องจากการแทนที่กันนี้จะถูกดุลยัตถ์โดย โปแทสเซียม อะตอม ดังนั้น  
 สูตรของอิลไลต์ จึงเขียนได้ดังนี้



สำหรับโปแทสเซียม ที่เข้ามาชดเชย (satisfy) ประจุลบที่ค้างอยู่นี้จะ  
 เข้ามาอยู่ในรูปของ โปแทสเซียมที่ฝังตัวอยู่ในระหว่างหลักระหว่างในช่องรูปหกเหลี่ยมของซิลิกาชั้น  
 ของผลึกที่ซ้อนอยู่ข้างบนและข้างล่าง ทำหน้าที่คล้ายคัมหรือกลอนยึดแผ่นผลึกของอิลไลต์ที่เรียง  
 ซ้อนกันทำให้ชั้นเบร็ชเชอไม่ได้ยาก ซึ่งมีผลทำให้หลักระหว่างแผ่นผลึกของเคลย์ ขยายและหดตัว  
 ไม่ได้เมื่อเคลย์เปียกหรือแห้ง แคลไออน ต่าง ๆ ก็แทรกซึมเข้าไปติดยึดกับพื้นที่ผิวภายใน  
 หลับไม่ได้ ซึ่งก็หมายความว่าพื้นที่ผิวภายในจะมีน้อยมาก แต่ก็ยังมากกว่าเคลย์ พวก  
 คาโอลิไนต์ ทั้งนี้เพราะพื้นที่ผิวภายในบริเวณใกล้กับขอบของผลึกโมเลกุลของน้ำและแคลไออน  
 อาจแทรกซึมเข้าไปติดยึดอยู่ได้บ้าง ดังนั้นคุณสมบัติของ อิลไลต์ จะอยู่ระหว่างพวกมอนต์มอริล  
 โลไนต์ กับพวก คาโอลิไนต์

4. ซิลิเกต เคลย์ ชนิดอื่น ๆ นอกจากพวกใหญ่ ๆ 3 พวกข้างต้นแล้ว ยังมีพวกอื่นๆอีกเป็นจำนวนมาก เช่น เวอร์มิคิวไลต์ ซึ่งก็เป็นพวกเคลย์ชนิด 2:1 คล้ายกับอิลไลต์ แต่อะลูมิเนียมในอะลูมินาซึ่งถูกแทนที่หมดโดยแมกนีเซียม และในระหว่างหลีบของผลึกที่ซ้อนทับกันนั้นจะมีแคลเซียม และ แมกนีเซียม คูดิติดอยู่เป็นส่วนใหญ่ และโมเลกุลของน้ำสามารถจะแทรกซึมเข้าไปได้น้อยมาก การยึดหดของหลีบก็ง่ายพอ ๆ กันกับของอิลไลต์ คลอไรต์ ก็เป็นอีกชนิดหนึ่งที่พบในดินมากแห่ง ประกอบด้วย แผ่นผลึกที่คล้ายคลึงกับไมกา

2.2.2. พวกออกไซด์และไฮดรอกไซด์ ของเหล็กและอะลูมิเนียม แร่ดินเหนียวและทรายตัวได้น้อยมาก คงทนต่อการชะล้างมาก ดูดซับไอออนได้น้อย มีสีแดงหรือเหลืองของเหล็ก มีอีกชื่อหนึ่งว่า เซสควิออกไซด์ ( sesquioxides ) มีสูตรโมเลกุล คือ  $R_2O_3 \cdot H_2O$  ( R คือ เหล็ก หรือ อะลูมิเนียม ) คอลลอยด์ ไฮดรอกไซด์ ออกไซด์ ( colloid hydrous oxide ) ของเหล็กและอะลูมิเนียมมีพื้นที่ผิวต่ำ จะมีแต่พื้นผิวภายนอกเท่านั้น ไม่มีหลีบหรือผิวชั้นใน อย่างพวกซิลิเกต เคลย์ จึงมีคุณสมบัติเกี่ยวกับการดูดซับน้ำ และแคตไอออนได้น้อยมาก สมบัติเกี่ยวกับการแปรรูป ( plasticity ) และการยึดเกาะ ( cohesion ) ก็ต่ำ ดังนั้นจึงเป็นเหตุผลว่าทำไมดินที่มีอายุมาก ๆ เช่น พวกดินแลตโตซอล และ เลดบราวน์เอิร์ท ( red brown earth ) นั้น เมื่อเวลาเปียกจึงไม่ค่อยเหนียวและลื่นเท่ากับดินเหนียวทั่วไป ทั้งที่ปริมาณเคลย์เท่ากัน เมื่อเปียกแล้วก็แห้งเร็วมาก

### 2.3. อินทรีย์วัตถุ ( organic materials )

อินทรีย์วัตถุนั้นถึงแม้ว่าตามอัตราส่วนจะมีอยู่เป็นจำนวนน้อยในดิน แต่ก็มีอิทธิพลต่อคุณสมบัติของดินอย่างมาก อย่างน้อยครึ่งหนึ่งของความจุของความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนของดิน ขึ้นอยู่กับอินทรีย์วัตถุ อินทรีย์วัตถุในดินเป็นสารที่มีความสามารถในการดูดซับไอออนบวกได้สูงมาก เมื่อเปรียบเทียบกับความสามารถในการดูดซับไอออนบวก

โดยคอลลอยด์อื่น ๆ โดยทั่วไปการดูดซับโดยอินทรีย์วัตถุในดินจะสูงกว่าตั้งแต่ 2-30 เท่าในดิน โดยทั่วไปปริมาณของไอออนบวกที่ถูกดูดซับอยู่ตั้งแต่ 30-90% เป็นพวกที่ถูกดูดซับโดยอินทรีย์วัตถุในดิน

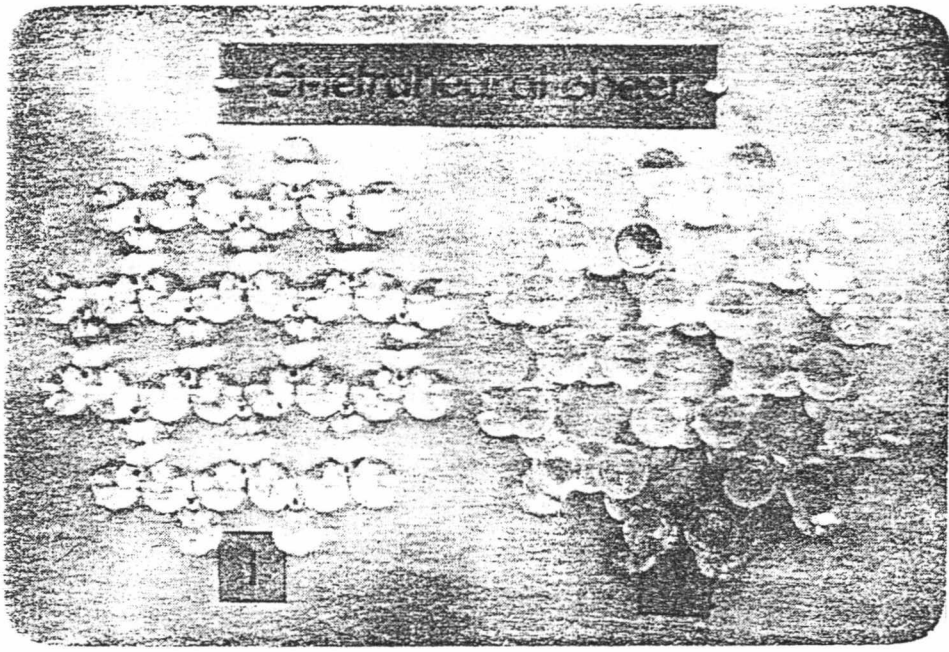
นอกจากนั้นอินทรีย์วัตถุยังเป็นตัวช่วยให้ดินจับตัวเป็นก้อน และให้พลังงานตลอดจนให้อาหารธาตุในดินแก่พืชอีกด้วย

แหล่งที่มาของสารอินทรีย์ในดินที่สำคัญคือ เศษของพืชananaxชนิด บรรดากิ่งไม้ ใบไม้ ตลอดจนรากที่ทับถมกันอยู่นั้น โดยปกติประมาณ 75% โดยน้ำหนักของพืชสีเขียวนั้นเป็นน้ำ ส่วนที่เหลือ เรียกว่า dry matter ประกอบด้วยคาร์บอน ไฮโดรเจน ออกซิเจน ไนโตรเจน และธาตุอื่น ๆ แต่จะเป็นส่วนของคาร์โบไฮเดรตเสีย 90% ในที่นี้จะกล่าวถึงแต่เศษที่เหลือของพืช ซึ่งเป็นแหล่งที่มาของอินทรีย์วัตถุของดิน ประกอบด้วยสารเคมีพวกใหญ่ ๆ 3 พวก คือ พอลิแซคคาไรด์ (polysaccharides) , ลิกนิน (lignins) และ โปรตีน (protiens)

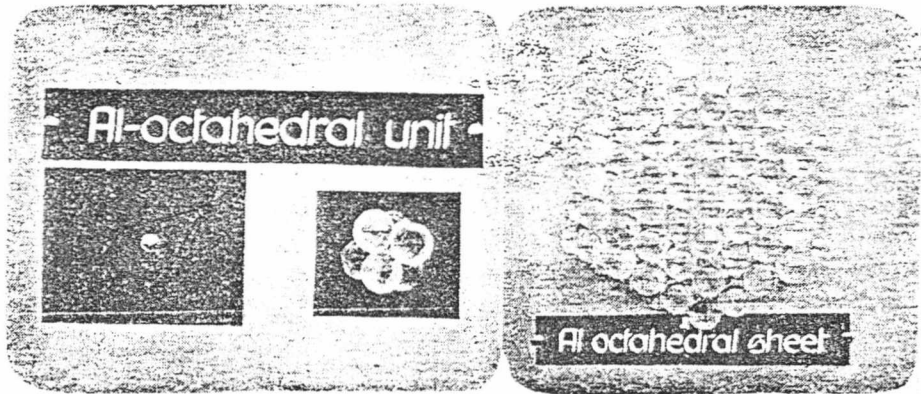
พอลิแซคคาไรด์ เป็นสารพวกคาร์โบไฮเดรตได้แก่ พวกเซลลูโลส (cellulose) 20- 50 % เฮมิเซลลูโลส (hemicellulose) 10-25 % แป้งและน้ำตาล 1-5 % ลิกนิน เป็นสารที่มีโมเลกุลที่สลับซับซ้อนพบในส่วนของไม้เนื้อแข็ง ซึ่งมีความแข็งและทนทาน โดยที่พวกจุลินทรีย์เข้าทำลายได้ยากมาก การสลายตัวเป็นไปอย่างช้า ๆ และจะทำให้มีคุณสมบัติที่จะดูดตรึงอาหารธาตุได้ดีขึ้น ลิกนินเป็นส่วนประกอบที่สำคัญของชีวมวลในพืชทั่ว ๆ ไปมีลิกนินประมาณ 10-30 %

โปรตีน เป็นส่วนของพืชที่มีธาตุไนโตรเจนเป็นส่วนประกอบที่สำคัญ มีโมเลกุลที่ซับซ้อน เกิดมาจากการรวมตัวของพวกกรดอะมิโนและธาตุพวกซิลเฟอร์ ฟอสฟอรัส และเหล็กรวมอยู่ด้วย มีสูตรโครงสร้างของโมเลกุลที่ซับซ้อนกว่าพวกลิกนินหรือพอลิแซคคาไรด์ในพืชทั่ว ๆ ไปมีอยู่ราว ๆ 1-15 %

นอกจากนี้อาจจะมีสารอื่น ๆ ประเภท ไขมัน ขี้ผึ้ง แทนนิน และอื่น ๆ อีกประมาณ 1-8 % สารพวกนี้มีความต้านทานต่อการสลายตัวโดยจุลินทรีย์ในดินค่อนข้างสูง

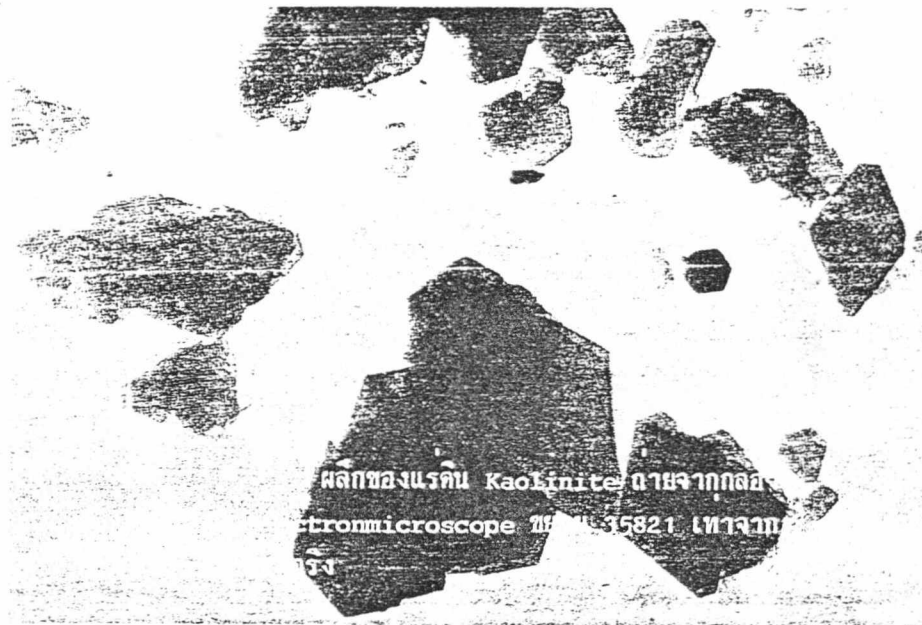


Silica tetrahedral sheet 1) แสดงให้เห็นออกซิเจนอะตอม 3 อะตอมร้บรอง เป็นฐานทรงสามเหลี่ยมและมี Si อะตอมอยู่ตรงกลาง 2) แสดงให้เห็นออกซิเจน อะตอมที่สี่ซึ่งวางอยู่บนยอดทำให้เกิดเป็นรูปทรงปริมาตรและต่อเชื่อมกันเป็นแผ่น



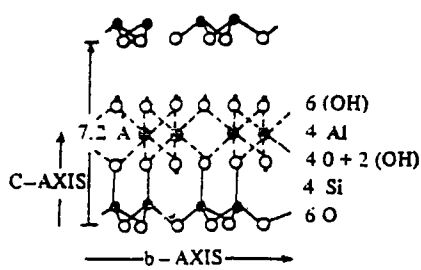
Alumina octahedral unit และ Alumina octahedral sheet.

รูปที่ 2.1 โครงสร้างของ ซิลิกา เตตระฮีดรัลชีต และ อะลูมินา ออกตะฮีดรัลชีต ซึ่งเป็น หน่วยโครงสร้างที่สำคัญของแร่ อะลูมินา ซิลิเกต เคลย์ทั้งหลาย  
ที่มา : ดร.สมเจตน์ จันทน์วณิช และคณะ พ.ศ.2526



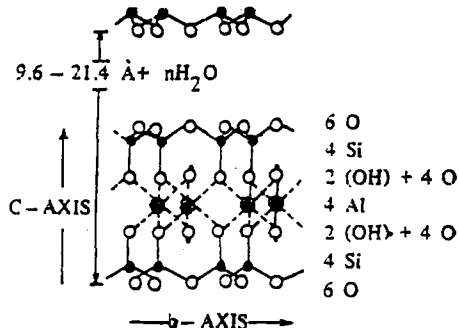
รูปที่ 2.2 ภาพของแร่ดินเหนียว คาโอลิไนต์ และ มอนโมวิลโลไนต์ ถ่ายจากกล้อง  
อิเล็กตรอนไมโครสโคป

ที่มา : ดร.สมเจตน์ จันทวีวัฒน์ และคณะ พ.ศ.2526



Kaolinite  $(OH)_3Al_4Si_4O_{10}$

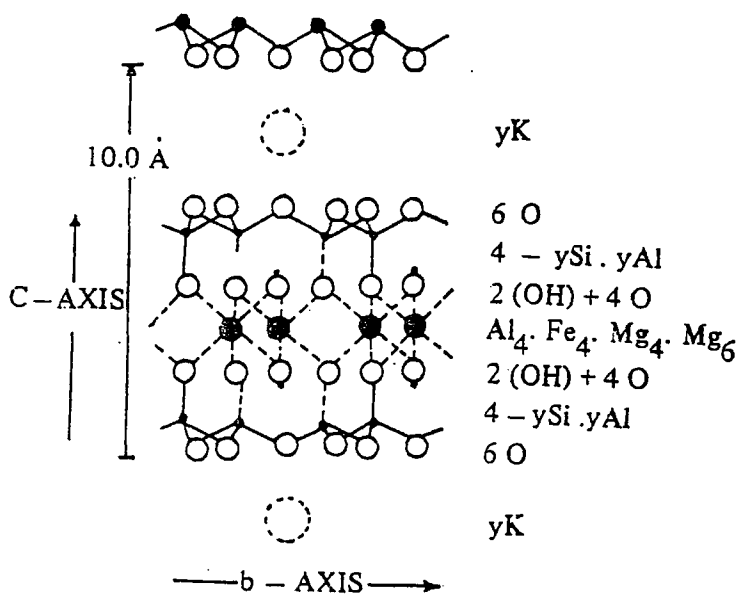
(ก) โครงสร้างของผลึกของ kaolinite  
(Schematic diagram of the crystal structure of kaolinite)



Montmorillonite



(ข) โครงสร้างของผลึกของ montmorillonite  
(Schematic diagram of the crystal structure of montmorillonite)



Illite  $(OH)_4K_y(Al_4 \cdot Fe_4 \cdot Mg_4 \cdot Mg_6)(Si_{8-y}Al_y)O_{20}$

(ค) โครงสร้างของผลึกของ illite. (Schematic diagram of the crystal structure of illite).

รูปที่ 2.3 โครงสร้างของผลึกของ ซิลิเกต เคลย์ ที่สำคัญ

ที่มา : ดร.สมเจตน์ จันทวีพันธ์ และคณะ พ.ศ.2526

## 2.4. กระบวนการดูดซับและการปลดปล่อย

กระบวนการการดูดซับและการปลดปล่อยไอออนของดิน จะเกี่ยวข้องกับโดยตรงกับสภาวะของสปีชีส์ทางเคมี ที่เกิดปฏิกิริยากับศูนย์กลางการยึดเกาะแคตไอออนกับอนุภาคคอลลอยด์ของดิน คือ ขี้วมัส และ แร่ดินเหนียว ซึ่งสามารถให้คำจำกัดความของการดูดซับและการปลดปล่อย ได้คือ " การดูดซับคือกระบวนการที่สปีชีส์ทางเคมีในสารละลาย bulk phase เคลื่อนที่ไปยังผิวของอีกเฟสหนึ่ง และมีการสะสมไปเรื่อย ๆ โดยปราศจากการเข้าไปอยู่ในโครงสร้างของอีกเฟสหนึ่ง สำหรับกระบวนการในการปลดปล่อยนั้นคือกระบวนการที่เกิดย้อนกลับของกระบวนการดูดซับ " สำหรับสถานะของแข็งที่เป็นตัวดูดซับนั้นเรียกว่า adsorbent กระบวนการดูดซับนั้น จะเกิดต่อไปเรื่อย ๆ จนกระทั่งความเข้มข้นของ adsorptive ใน bulk phase ไม่เปลี่ยนแปลง ที่จุดนี้ระบบของปฏิกิริยาจะเข้าสู่สภาวะสมดุล ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของ adsorbate และ adsorptive ที่อุณหภูมิคงที่จะจัดเป็นกระบวนการ adsorption isotherm

## 2.5. ปัจจัยที่ควบคุมการแลกเปลี่ยนไอออนในดิน

การแลกเปลี่ยนไอออนระหว่างแคตไอออนที่ดูดซับอยู่ที่ผิวเคลย์ และแคตไอออนที่อยู่ในภายนอกนั้น เกิดขึ้นได้ง่ายและยากแตกต่างกันออกไป ขึ้นอยู่กับปัจจัยที่สำคัญที่จะกล่าวไว้ในบทนี้

2.5.1. ชนิดของ adsorbed cation และ replacing cation  
แคตไอออนต่างชนิดกันจะดูดซับอยู่ที่ผิวเคลย์ และถูกไล่ที่ออกจากผิวเคลย์โดยแคตไอออนชนิดอื่น ๆ ได้ยากและง่ายแตกต่างกันออกไป บางอย่างดูดซับอยู่ที่ผิวเคลย์ได้เพียงหลวม ๆ และถูกแทนที่ได้ง่าย บางอย่างดูดซับอยู่ที่ผิวเคลย์ค่อนข้างเหนียวแน่น และถูกแทนที่ได้ยาก ได้มีผู้ศึกษาเกี่ยวกับอำนาจในการไล่ที่ และความเหนียวแน่น ในการดูดซับของแคตไอออนที่อยู่ผิวเคลย์นั้น ปรากฏว่าแคตไอออนต่าง ๆ มี replacing power แตกต่างลดหลั่นกันลงไป ดังนี้

คือ  $\text{Li}^+ < \text{Na}^+ < \text{K}^+ < \text{Mg}^{2+} < \text{Ca}^{2+} < \text{NH}_4^+ < \text{Al}^{3+} < \text{H}^+$  นั่นคือ  $\text{Na}^+$  สามารถไล่ที่  $\text{Li}^+$  ได้ง่ายกว่าที่  $\text{Li}^+$  จะไล่ที่  $\text{Na}^+$  หรืออาจจะกล่าวได้อีกอย่างหนึ่งก็คือ  $\text{Na}^+$  จะคุดชิดอยู่ที่ผิวเคลือบได้แน่นหนาแน่นกว่า  $\text{Li}^+$  แต่จะเห็นหนาแน่นน้อยกว่า  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  ฯลฯ ตามลำดับ

ลำดับของ replacing power ของแคทไอออนต่าง ๆ ที่กล่าวไว้นี้ อาจจะมีแคทไอออนบางที่สลับที่กันได้ แล้วแต่สภาพของการแลกเปลี่ยนไอออนกันเกิดขึ้นในสภาพใด เพราะมีปัจจัยอื่น ๆ เกี่ยวข้องอยู่มาก อย่างไรก็ตามอาจวางหลักเกณฑ์ไว้ได้กว้าง ๆ ว่า การที่แคทไอออนเหลื่อมกันใน replacing power นี้ก็เนื่องด้วยสาเหตุที่สำคัญ 2 ประการ คือ

1. valence ของแคทไอออน โดยทั่วไปเมื่อมีสภาพอย่างอื่นที่เหมือนกัน แคทไอออนที่มี valence สูง ย่อมจะมีอำนาจในการไล่ที่สูง และเกาะยึดอยู่ที่ผิวเคลือบได้แน่นหนาแน่นกว่าแคทไอออนที่มี valence ต่ำกว่า ยกตัวอย่างเช่น  $\text{Na}^+$  ซึ่งเป็น monovalence จะเกาะยึดอยู่ที่ผิวเคลือบด้วยแรงที่อ่อนกว่า  $\text{Ca}^{2+}$  ซึ่งเป็น divalence และในทางกลับกัน  $\text{Ca}^{2+}$  จะยึดอยู่ที่ผิวเคลือบด้วยแรงที่อ่อนกว่า  $\text{Al}^{3+}$  ซึ่งเป็น trivalence และในทางกลับกัน  $\text{Al}^{3+}$  จะไล่ที่  $\text{Ca}^{2+}$  ได้ง่ายกว่า  $\text{Ca}^{2+}$  ที่จะเข้ามาไล่ที่  $\text{Al}^{3+}$  ให้ออกไปจากผิวเคลือบ ส่วนแคทไอออนที่มี valence เท่ากันนั้น ความเหลื่อมล้ำใน replacing power ส่วนใหญ่จะขึ้นอยู่กับสาเหตุที่ 2 คือ ionic size

2. Ionic size ขนาดของแคทไอออนนั้นในที่นี้ หมายถึง ขนาดของ hydrated cation คือ รวม water shell (hull) ที่ห่อหุ้มแคทไอออนนั้นๆ ด้วย เพราะโดยธรรมชาติแคทไอออนจะมีน้ำห่อหุ้มอยู่เป็นเปลือกเสมอ เปลือกของน้ำที่ห่อหุ้มนี้จะหนาและบางไม่เท่ากัน จะขึ้นอยู่กับขนาดจริง ๆ ของแคทไอออนนั้นๆ (dehydrated ionic radii) ถ้าขนาดจริงเล็กจะมี water shell หนา แต่ในทางตรงกันข้ามถ้าขนาดจริง ๆ ของแคทไอออนนั้นโตมาแต่เดิม water shell ก็จะไม่บาง ทั้งนี้อธิบายได้จากกฎ coulomb นั้น คือ

$$F = k \cdot e^+ \cdot e^- / d^2$$

เมื่อ  $F$  = แรงดึงดูดซึ่งกันและกันระหว่างประจุบวกและลบ

$e^+$  และ  $e^-$  = จำนวนประจุของประจุบวกและลบตามลำดับ

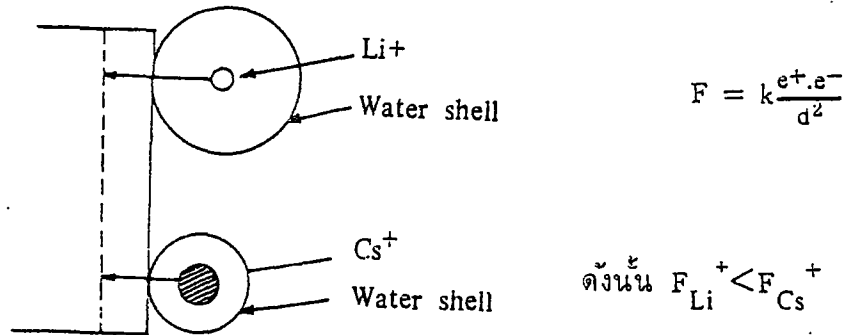
$d$  = ระยะห่างระหว่างศูนย์กลางประจุทั้งสอง

$k$  = ค่าคงที่

ซึ่งอธิบายได้ว่า แรงดึงดูดซึ่งกันและกันระหว่างประจุบวก และลบนั้นเป็น  
 ปฏิภาคโดยตรงกับผลคูณของจำนวนประจุทั้งสอง แต่จะเป็นปฏิภาคโดยทางกลับกับระยะทาง  
 ระหว่างประจุทั้งสองยกกำลังสอง นั้นหมายความว่าเมื่อระยะทางระหว่างประจุทั้งสองยิ่งห่าง  
 กันออกไป แรงดึงดูดซึ่งกันและกันก็จะลดลงอย่างมาก

เมื่อขนาดของแคทไอออนจริง ๆ เล็ก เมื่อมีโมเลกุลของน้ำมาดูดซับนั้น  
 ระยะทางจากศูนย์กลางแคทไอออน มาถึงศูนย์กลางของโมเลกุลของน้ำ ก็จะสั้นกว่าของ  
 แคทไอออนที่โตกว่า แรงดึงดูดกันระหว่างแคทไอออนที่เล็กกับโมเลกุลของน้ำจะสูงกว่าจึง  
 สามารถดึงดูดโมเลกุลของน้ำ ล้อมรอบไว้ได้หลายชั้น จึงทำให้ water shell หนากว่าด้วย

โดยอาศัย Coulomb's law อีกเช่นกันที่จะอธิบายว่าแคทไอออนที่มี  
 วาเลนซ์เท่ากัน ถ้ามี water shell หนาจะเกาะยึดที่ผิวเคลือบด้วยแรงที่ต่ำกว่าแคทไอออน  
 ที่มี water shell ที่บางกว่า และจะถูกไล่ที่ออกจากผิวเคลือบได้ง่ายกว่าด้วย (รูปที่ 2.4)



รูปที่ 2.4 ขนาดของประจุบวกที่มีผลต่อ replacing power

ดังนั้นจะเห็นได้ว่า อำนาจในการแลกที่กันของแคทไอออนนั้น จะขึ้นอยู่กับขนาด (hydrated ionic size) ของแคทไอออนนั้น ๆ เป็นอย่างมาก ถึงแม้ได้วาเลนซ์แคทไอออนบางตัวที่มีขนาดโตกว่าโมโนวาเลนซ์มาก ๆ อำนาจในการไล่ที่อาจจะเท่ากัน หรือน้อยกว่าได้เหมือนกัน และในการกล่าวถึงขนาดของไอออนในระบบสารคอลลอยด์ต่อไปนี้จะหมายถึงขนาดของไอออนที่รวม water shell ด้วย

2.5.2. ความเข้มข้นของ replacing cation โดยปรกติถ้าปริมาณของ replacing cation มีมากก็ทำให้อำนาจในการไล่ที่แคทไอออนที่อยู่ผิวเซลล์ได้ง่ายขึ้นซึ่งเป็นหลักของ mass action ถึงแม้ว่า  $Na^+$  จะมีอำนาจในการไล่ที่  $Ca^{2+}$  น้อยกว่าที่  $Ca^{2+}$  จะไล่ที่  $Na^+$  แต่ถ้ามี  $Na^+$  เป็นจำนวนมาก ๆ ก็สามารถที่จะไล่ที่  $Ca^{2+}$  ออกไปให้หมดจากผิวของเซลล์ได้หมด

2.5.3. ปริมาณการอิ่มตัว (degree of saturation) ปริมาณการอิ่มตัว ของแคทไอออนบางชนิดที่ดูดซับอยู่ที่ผิวเคลือบ จะมีอิทธิพลต่อความยากง่ายที่แคทไอออนจะถูกไล่ ที่ออกมาเป็นอย่างมากเหมือนกัน ยกตัวอย่างเช่น exchangeable calcium ที่ผิวของเคลือบ ยิ่งเหลือน้อยเท่าใด ความยากที่จะไล่ที่  $Ca^{2+}$  ออกจากผิวเคลือบให้หมดก็ยิ่งยากขึ้นเท่านั้น แต่ในทางตรงข้าม exchangeable  $Na^+$  ยิ่งเหลือน้อยอยู่บนผิวเคลือบเท่าใด ก็ยิ่งง่ายต่อการ ที่จะถูกไล่ที่ออกไปมากขึ้นเท่านั้น ส่วนแคทไอออนบางชนิด เช่น  $K^+$  และ  $Mg^{2+}$  นั้นจะไม่ขึ้น กับปริมาณการอิ่มตัวเลย เป็นต้น

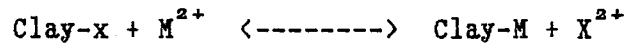
2.5.4. แคทไอออนอื่นที่อยู่ร่วมกับผิวของเคลือบ (complementary exchangeable cation) บางครั้งแคทไอออนอื่น ๆ ที่ดูดซับอยู่บนผิวเคลือบร่วมกับแคทไอออน ที่ต้องการจะไล่ที่นั้น ก็มีบทบาทสำคัญเหมือนกัน อาทิเช่น exchangeable  $K^+$  จะถูกไล่ที่ ออกมาได้ง่ายขึ้นเมื่ออยู่ร่วมกับ exchangeable  $Al^{3+}$  หรือ  $H^+$  แต่จะถูกไล่ที่ได้ยากขึ้นเมื่อ อยู่ร่วมกับ exchangeable  $Ca^{2+}$

## 2.6. ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับและการปลดปล่อยของโลหะหนัก(4)

### 2.6.1. คอลลอยด์ของดิน

คอลลอยด์ของดิน ทั้งแร่ดินเหนียวและฮิวมัส จะเกิดจากสารประกอบ ของไมเซลล์ (micell) ที่มีประจุลบ โดยทั่วไปกระบวนการดูดซับไอออนของโลหะหนักที่ผิว ของไมเซลล์จะเกิดได้ 2 วิธี คือ กระบวนการแลกเปลี่ยนและการเกิดพันธะที่มีลักษณะพิเศษ(7) กระบวนการแลกเปลี่ยนนั้นจะเกิดขึ้นบริเวณผิวของแร่ดินเหนียว และ อินทรีย์วัตถุ แต่การเกิด พันธะนั้นเกิดจากลิแกนด์หรือหมู่ที่สามารถเกิดคีเลต หรือเกิดสารเชิงซ้อนกับโลหะหนัก

รูปแบบทั่วไปของกระบวนการแลกเปลี่ยนแสดงได้ดังสมการ



เมื่อ -x คือ ประจุบวกที่เกาะกับแร่ดินเหนียว

$\text{M}^{2+}$  คือ โลหะหนัก

ในปี 1959 ถึง 1976 ได้มีการศึกษาเกี่ยวกับแร่ดินเหนียวมากมายโดยเฉพาะส่วนที่มีหน้าที่ดูดซับไอออนโลหะหนัก ซึ่งความสามารถในการดูดซับจะขึ้นกับธรรมชาติของแร่ดินเหนียว, พีเอช และ จำนวนลิแกนด์ในสภาวะสารละลาย ในธรรมชาติส่วนประกอบของเคลย์นั้น มักจะเป็นโมนอไมเนอร์ลลิต (monomineralic) หรือโฮโมไอออนิก (homoionic) ซึ่ง Farrah et.al. (7) ได้พยายามแสดงให้เห็นถึงการดูดซับไอออนโลหะหนัก (Cu, Pb, Cd) จาก bulk solution โดยดินเหนียว (คาโอลิไนต์, อิลไลต์ และมอนต์มอริลโลไนต์) นั้นจะแปรตามคุณสมบัติของเคลย์ สารละลาย พีเอช ความเข้มข้นของประจุบวกที่เกี่ยวข้อง และคุณสมบัติของลิแกนด์ที่มีอยู่ เมื่อ พีเอช ของสารละลายมีค่ามากกว่า 5 ไอออนของโลหะหนักจะอยู่ในรูปของสารประกอบเชิงซ้อนกับไฮดรอกซี ซึ่งชี้ให้เห็นว่ากระบวนการดูดซับของแคดเมียมบนมอนต์มอริลโลไนต์ ในน้ำจะขึ้นกับ พีเอช เมื่อไม่ได้เติมสารละลายอิเลคโตรไลต์ลงไป

ได้มีการศึกษาเช่นเดียวกันถึงกลุ่มอื่น ๆ ที่มีค่า cation exchange materials ต่างกัน เช่น การดูดซับโลหะหนัก (Pb, Cu, Zn, Co และ Cd) โดยใช้แคลเซียมเป็นตัวอ้างอิง โดยทั่วไปแล้วสำหรับกระบวนการแลกเปลี่ยนค่า selectivity coefficient ( $K^{2+}$ ) ของดินยกเว้นดินที่ประกอบด้วย ฮาลโลไซต์จะดูดซับสังกะสีได้น้อยมาก แต่ถ้าใช้ดินที่อิมิตัวด้วยแคลเซียมพบว่าการดูดซับสังกะสีได้ดีขึ้น ซึ่งบ่งบอกถึงความสัมพันธ์

ของค่า cation-exchange materials จากการศึกษาของ Wada และ Kakuto (8) พบว่าดินที่มีส่วนประกอบของ มอนต์มอริลโลไนต์ , เวอร์มิคิวไลต์ และ ฮิวมัส จะดูดซับสังกะสี ได้น้อยกว่า ดินที่มีส่วนประกอบเป็นอัลโลเฟน (allophane) , อิมโมโกไลต์ และ ฮีลโลไซต์

Abd-Elfattah และ Wada (9) ได้ศึกษาถึงการดูดซับของโลหะหนักของดิน ที่มีส่วนประกอบต่าง ๆ กัน และพบว่า ค่า selectivity coefficient ที่มีผลเชื่อมโยง เป็นสารอ้างอิงนั้นจะเพิ่มขึ้นดังนี้ คือ มอนต์มอริลโลไนต์ (Mt) < ฮิวมัส , คาโอลิไนต์ (Kt) < อัลโลเฟน (A) , อิมโมโกไลต์ (Im) < ฮีลโลไซต์ (Ht) , เหล็กออกไซด์ (Fe-ox) และ สำหรับโลหะชนิดต่าง ๆ จะได้ผลดังนี้

Pb ; Fe-ox, Ht, A-Im, A > humus, Kt > Mt

Cu ; Fe-ox, Ht, A-Im > humus, A, Kt > Mt

Zn ; Fe-ox, Ht, A-Im > Kt > A, humus > Mt

Co ; Fe-ox > Ht > humus, A-Im, Kt > A, Mt

Cd ; Fe-ox > A-Im > humus > A, Kt > Ht, Mt

ค่าประสิทธิภาพในการดูดซับของอินทรีย์วัตถุ นั้น มีค่าสูง เนื่องจากมันสามารถ เกิดคีเลตหรือสารเชิงซ้อนได้ อย่างไรก็ตามสารเชิงซ้อนที่เกิดขึ้นยังไม่เป็นที่เข้าใจนัก เนื่องจากยังไม่สามารถบ่งบอกถึงโครงสร้างที่แท้จริงของมันได้

จากข้อมูลต่าง ๆ ที่กล่าวมา เราสามารถกล่าวได้ว่าแร่ดินเหนียว , ไฮดรอกไซด์ , ฮิวมัส และ organo-clay complexes อาจจะมีผลต่อการดูดซับและการปลดปล่อยของประจุบวก โดยเฉพาะโลหะหนัก

### 2.6.2. ประจุบวกของโลหะ

ในแง่ของแคตไอออนนั้น การดูดซับจะขึ้นกับการเกาะกันพอดีระหว่างขนาดของแคตไอออน กับ ช่องว่างที่ผิวของโครงสร้างดิน การเกิดการยึดเกาะกันระหว่างผิวของเคลย์ กับ ประจุบวกของ hydrated จะเกิดขึ้นได้ดีเพราะมีแรงคูลอมบิก (coulombic) เข้ามามีส่วนเกี่ยวข้อง

สำหรับประจุบวกทั่ว ๆ ไป เช่น โซเดียม และ โพแทสเซียม พบว่าโพแทสเซียม มีค่า selectivity coefficient ดีกว่า โซเดียม 5 เท่า แต่ความแตกต่างของค่า selectivity ของพวกไดวาเลนต์ (divalent) นั้นจะมีน้อยมาก เช่น แคลเซียม นั้นมีค่าสูงกว่า แมกนีเซียม ในอัตราส่วน 1.2 และมีค่าใกล้เคียงกับประจุบวกที่เป็น 2+ ชนิดอื่น ๆ เช่น แอมโมเนียม , สตรอนเตียม , สังกะสี และ นิกเกิล สำหรับการดูดซับของสารอินทรีย์นั้นจะขึ้นกับการเกิดคีเลตที่เกิดขึ้น ถ้าใช้ถ่านหินเป็นตัวดูดซับพบว่า การดูดซับเป็นดังนี้  $Pb > Cu > Cd, Zn > Ca$  แต่ถ้าใช้แร่ดินเหนียวที่มี มอนต์มอริลโลไนต์เป็นส่วนประกอบหลักพบว่าเกิดขึ้นตรงข้ามกันคือ  $Ca > Pb > Cu > Mg > Cd > Zn$  และ kaolinite จะเป็น  $Pb > Ca > Cu > Mg > Zn > Cd$  และ illite จะเป็น  $Pb > Cu > Zn > Ca > Cd > Mg$  จะเห็นได้ว่าสำหรับดินแร่ สังกะสี จะถูกดูดซับได้ดีกว่า แคลเซียม และนิกเกิล มาก แต่ถ้าเป็นดินที่สารอินทรีย์มาก (organic-rich) จะมีความแตกต่างกันน้อยมาก แสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพจะขึ้นกับความเป็นผลึก (crystallinity) และ mineral forms ของโลหะหนัก

### 2.6.3. ผลของ พีเอช

เมื่อ พีเอช สูงขึ้นจะทำให้จำนวนและประสิทธิภาพในการดูดซับโลหะมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งได้มีการทดลองเพื่อสนับสนุนสมมติฐานนี้โดย Harter (10) และ Sanders กับ ElKherbawy (11) สำหรับโลหะทรานซิชันและโลหะหนักนั้น กระบวนการดูดซับจะขึ้นกับ พีเอช เป็นอย่างมาก Mckenzie (1980) ได้ศึกษาถึงกระบวนการดูดซับของตะกั่วและโลหะหนักอื่น ๆ โดยใช้สารสังเคราะห์ของแมงกานีส ออกไซด์ (manganese oxides)

และเหล็ก ออกไซด์ (iron oxides) เขาพบว่าเมื่อ พีเอช สูงขึ้น จะเพิ่มการดูดซับของ โลหะหนัก เช่น ตะกั่ว , ทองแดง , แมงกานีส , โคบอลต์ , สังกะสี และ นิกเกิล สำหรับ นิกเกิลนั้นปริมาณการดูดซับจะแปรตาม พีเอช ที่เปลี่ยนไปน้อยมาก

## 2.7. ที่มาของประจุลบ

### 2.7.1. ที่มาแห่งประจุลบของแร่ดินเหนียว

ตามที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้นว่า แร่ดินเหนียว จะมีประจุลบอยู่ และสามารถดึงดูดไอออนที่มีประจุบวกได้นั้น ก็เนื่องมาจากสาเหตุสองประการคือ

#### 1. เกิดขึ้นจากบริเวณขอบของผลึก (exposed crystal edges)

ประจุประเภทนี้เป็นประจุลบที่เกิดขึ้นได้สองประการ คือ จากบริเวณ ขอบของผลึกที่แตกหักออกไป ทำให้ ออกซิเจน ซึ่งแต่เดิมเคยเกาะยึดอยู่กับ ซิลิกา และ อะลูมิเนียม ในซิลิกาซีต และ อะลูมินาซีต ตามลำดับนั้น เมื่อไม่มีซิลิกาและอะลูมิเนียมจับเนื่อง จากการที่ขอบของผลึกแตกออกไปนี้ จึงทำให้ออกซิเจน ยังมี electronegative charge ก็จะมีมากพอที่จะดึงดูดประจุบวกได้ ประการที่สองนั้นประจุลบจะเกิดขึ้นได้จากการ ionization ของไฮโดรเจน ซึ่งเกาะอยู่กับออกซิเจน บนผิวของเคลย์ของส่วนที่เป็น อะลูมินาซีตจะ เกิดขึ้นโดยเฉพาะกับพวกเคลย์ชนิด 1:1 ไฮโดรเจน ที่เกาะอยู่กับออกซิเจน ดังกล่าวนี้ได้ เกาะยึดกันเหนียวแน่นเหมือนกับกลุ่มไฮดรอกซิล ไฮโดรเจนจะแตกหัก (dissociate) ออก มาได้บ้าง เมื่อออกมาแล้วก็จะทำให้ออกซิเจนที่ผิวของเคลย์ ณ จุดนั้น ๆ มี electronegative charge ตกค้างอยู่ เมื่อมีจุดที่ไฮโดรเจนแตกหักออกมามากขึ้น electronegative charge ที่ตกค้างอยู่นั้นก็จะสูงพอที่จะดึงดูดประจุบวกอื่น ๆ ได้

ประจุลบของเคลย์ พวก 1:1 จะได้มาจากขบวนการเหล่านี้ทั้งสิ้น ส่วนพวก 2:1 นั้นประจุลบจะได้อาจมาจากขบวนการดังกล่าวเพียงบางส่วน ประจุลบส่วนใหญ่ ของ เคลย์ พวก 2:1 จะได้อาจมาจากขบวนการซึ่งเรียกว่า ionic หรือ isomorphous substitution

## 2. เกิดขึ้นมาจากขบวนการ Isomorphous substitution

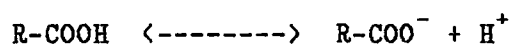
ขบวนการนี้เกิดขึ้นในธรรมชาติ โดยที่อะตอมของธาตุหนึ่งเข้าไปแทนที่อะตอมที่มีอยู่เดิมในโครงสร้างของแร่ ซึ่งอะตอมที่เข้ามาแทนที่นั้นจะมีขนาดใกล้เคียงกันหรือเท่ากัน แต่ประจุหรือวาเลนซ์ ( valence ) ไม่เท่ากันก็ได้ ถ้าแคทไอออนที่มีวาเลนซ์อิเล็กตรอน ต่ำเข้าไปแทนที่อีก แคทไอออนหนึ่ง ที่มีอยู่เดิมภายในโครงสร้างของแร่ชนิดหนึ่งซึ่งมีวาเลนซ์สูงกว่าก็จะมีผลทำให้มีประจุลบตกค้างอยู่ในโครงสร้างนั้น แต่ในทางตรงกันข้ามถ้าแคทไอออน ที่มีวาเลนซ์สูงกว่าเข้าไปแทนที่แคทไอออน ที่มีวาเลนซ์ ต่ำกว่า ก็จะมีประจุบวกตกค้างอยู่ในโครงสร้างนั้น

ขบวนการ ionic substitution นี้จะเกิดขึ้นอย่างแพร่หลายในแร่ดินเหนียว พวก 2:1 ยกตัวอย่างเช่นใน มอนต์มอริลโลไนต์ จะมีแมกนีเซียมไอออน ( $Mg^{2+}$ ) โดยเฉลี่ย 0.66 อะตอม เข้าไปแทนที่ อะลูมิเนียมไอออน ( $Al^{3+}$ ) จำนวนเท่ากันในอะลูมินาไซต์ เนื่องจากแมกนีเซียม อะตอมมีวาเลนซ์ต่ำกว่า อะลูมิเนียม อะตอม ประจุลบก็ จะตกค้างอยู่เท่ากับ -0.66 เมื่อมีจุดที่มีการไล่ที่เช่นนี้เกิดขึ้นมาก ๆ ประจุลบก็จะมีอำนาจสูงพอที่จะดูดยึดไอออนบวกได้

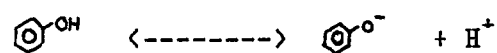
### 2.7.2. ที่มาแห่งประจุลบของอินทรีย์วัตถุ

สำหรับสารประกอบอินทรีย์ จะเป็นการแตกออกของหมู่ที่แสดงความเป็นกรด ทำให้เกิดประจุลบซึ่งเกิดขึ้นหลังจากการแตกหักของสารประกอบบางกลุ่มในอินทรีย์-วัตถุ เช่น carboxylic group ( $-COOH$ ) และ phenolic group ( $\text{C}_6\text{H}_5\text{OH}$ ) การแตกหักของทั้งสองกลุ่มนี้พอจะแสดงได้ดังต่อไปนี้

การ dissociation ของ carboxylic group



การ dissociation ของ phenolic group



## 2.8 โลหะหนักในดิน (12)

### 2.8.1 แคลเซียม

การศึกษาถึงลักษณะของโลหะหนักในดินมีความสำคัญมาก โดยเฉพาะในสารละลายดิน การเกิดพิษของโลหะหนักจะขึ้นอยู่กับรูปแบบไอออนของโลหะหนัก มากกว่าความเข้มข้น ไอออนแคลเซียมอิสระ ( $\text{Cd}^{2+}$ ) จะถูกดูดซับที่ผิวดินได้ดีกว่าสปีชีส์อื่นๆของมัน เช่น สปีชีส์ที่มีประจุลบหรือกลาง มีหลายวิธีที่จะใช้ในการทำนายถึงสปีชีส์ที่มีอยู่ในระบบของสารละลาย GEOCHEM เป็นวิธีที่พัฒนาขึ้นเพื่อใช้สำหรับดินโดยเฉพาะวิธีนี้จะสามารถหาข้อมูลเกี่ยวกับค่าความคงทนของ โลหะหนัก-ลิแกนด์แต่ละคู่ ที่สภาวะต่าง ๆ เช่น พีเอช , คาร์บอนอินทรีย์ , ความเข้มข้นของประจุบวกและประจุลบ ซึ่งทำให้สามารถทำนายได้ถึงสปีชีส์ที่ดีที่สุดในการเกิดปฏิกิริยา อย่างไรก็ตามก็มีนักวิจัยอีกหลายท่านที่พบว่าการทำนายโดยวิธีการของ GEOCHEM นั้นจะได้ผลดีเมื่อมีไอออนโลหะหนักเพียงชนิดเดียวในระบบที่ศึกษาแต่ถ้ามีไอออนโลหะหนักหลายชนิดแล้ว วิธีดังกล่าวจะไม่สามารถใช้ทำนายได้ นั้นแสดงให้เห็นถึง วิธีนี้ยังต้องการข้อมูลเพิ่มเติมเกี่ยวกับเสถียรภาพของลิแกนด์ที่อยู่ในสารละลายดิน สมดุลของแคลเซียมในสารละลายดินและที่ถูกดูดซับบนอนุภาคคอลลอยด์ดินนั้นจะขึ้นกับพีเอช ชรรวมชาติทางเคมีของสปีชีส์โลหะ เสถียรภาพของสารประกอบแคลเซียม กำลังการยึดเกาะของหมู่ฟังก์ชัน และค่า ionic strength ของสารละลายกับไอออน ปัญหาหนึ่งของการศึกษาการดูดซับของแคลเซียมของดิน ได้แก่ การที่ไม่ทราบถึงความเข้มข้นที่แท้จริงและการใช้งานในด้านต่าง ๆ ทำให้การหาปัจจัยที่มีผลต่อการแทนที่ทำได้ไม่ง่ายขึ้น

### 2.8.2 นิกเกิล

พฤติกรรมของนิกเกิลในดินนั้นจะอยู่ในรูปไอออนของไอออนโลหะหนักที่มีประจุบวก ( $\text{Ni}^{2+}$ ) ที่พีเอชต่ำการละลายของนิกเกิลจะเกิดได้ดีกว่าที่พีเอชสูง ในขณะที่ดินเป็นกรดจะพบนิกเกิลได้ในรูปของ  $\text{Ni}^{2+}$  ,  $\text{NiSO}_4$  และ  $\text{NiHPO}_4$  ความสามารถในการดูดซับของนิกเกิลโดยร่วดินเหนียวและเหล็กออกไซด์จะมีค่าต่ำ เช่น คาโอลิไนต์ และ

มอนต์มอริลโลไนต์ ในสารละลายที่ปราศจากลิแกนด์ อัตราการดูดซับจะเป็นดังนี้  $Cd > Zn > Ni$  และความแข็งแรงของการยึดเกาะที่ผิว คือ  $Zn > Cd > Ni$

### 2.7.3 สิ่งกีดขวาง

ไอออนอิสระของ  $Zn^{2+}$  จะตกตะกอนเมื่อมีไอออนลบต่าง ๆ อยู่ เช่น ไฮดรอกไซด์ , คาร์บอเนต , ฟอสเฟต , ซัลไฟด์ และแอนไอออนอื่น ๆ การละลายของ สิ่งกีดขวางเพิ่มขึ้นเมื่อพีเอชลดลง การดูดซับสิ่งกีดขวางในดินจะขึ้นอยู่กับปัจจัยต่าง ๆ ได้แก่ แร่ ดินเหนียว โลหะออกไซด์ ที่ถูกล้อมรอบด้วยน้ำ และ สารอินทรีย์ ซึ่งเรียกรวม ๆ ว่าดินนั้นอยู่ในสภาวะคอลลอยด์ การศึกษาการดูดซับของสิ่งกีดขวางพบว่าแร่และสารอินทรีย์สามารถดูดซับ สิ่งกีดขวางได้ดีและมีกระบวนการในการดูดซับ 2 แบบ คือ ในสภาวะกรดการดูดซับจะสัมพันธ์กับ ขนาดของไอออนที่เกิดการแลกเปลี่ยน และในสภาวะเบสจะมีการดูดซับทางเคมีของลิแกนด์ เข้ามาเกี่ยวข้องด้วย

### บทที่ 3

#### การวิจัยและดำเนินงาน

##### 3.1 อุปกรณ์การทดลอง

- ตะแกรงร่อนเบอร์ 10 เมช
- เครื่องชั่งละเอียด : Mettler AE 200 , Diethelm & Co,Ltd
- เครื่องวัดค่าความเป็นกรด-เบส : Metrohm Swiss made
- เครื่องเย้า : SBS 25 , STUART SCIENTIFIC
- เครื่องเซนตริฟิวส์ : JOUAN
- ตูบแห้ง : WTC binder
- เครื่องอะตอมมิคแอบซอร์พชันสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ : AA-680 SHIMADSU

##### 3.2 สารเคมี

- ซิงค์คลอไรด์ (  $ZnCl_2$  ) : เกรดวิเคราะห์
- นิกเกิลคลอไรด์ (  $NiCl_2$  ) : เกรดวิเคราะห์
- แคดเมียมคลอไรด์ (  $CdCl_2$  ) : เกรดวิเคราะห์
- แคลเซียมคลอไรด์ (  $CaCl_2$  ) : เกรดวิเคราะห์
- กรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น (  $HCl$  ) : เกรดวิเคราะห์
- แคลเซียมอะซิเตต [  $Ca(CH_3COO)_2$  ]
- ซิลเวอร์ไนเตรต (  $AgNO_3$  )

### 3.3 การทดลอง

#### 3.3.1 การเตรียมตัวอย่างดินธรรมชาติ

ดินชั้นบนทั้ง 2 ชนิดเก็บที่ระดับความลึก 0 - 30 เซนติเมตร จากหน้าดิน คือ ชุดดินกำแพงแสบ (Ks) และชุดดินราชาวาส (Nw) ได้มาจากความอนุเคราะห์ของกรมพัฒนาที่ดิน กระทรวงเกษตรและสหกรณ์ ประเทศไทย ซึ่งตัวอย่างดินทั้ง 2 ชนิด เก็บมาจากสถานที่ต่างกัน คือ ชุดดินกำแพงแสบ เก็บที่อำเภอกำแพงแสบ จังหวัดนครปฐม และชุดดินราชาวาส เก็บที่อำเภอยี่งอ จังหวัดนราธิวาส โดยชุดดินกำแพงแสบจัดอยู่ในประเภทดินแร่ ( mineral soils ) และชุดดินราชาวาสจัดอยู่ในประเภทดินอินทรีย์ ( organic soils )

ชุดดินกำแพงแสบจะถูกผึ่งให้แห้ง นำมาผสมกันให้ทั่วถึงแล้วร่อนผ่านตะแกรงขนาด 2 มิลลิเมตร ( เบอร์ 10 เมช ) เก็บไว้ที่อุณหภูมิห้อง ส่วนชุดดินราชาวาสจะเก็บไว้ที่อุณหภูมิ 4-8 องศาเซลเซียส โดยไม่ต้องผึ่งให้แห้ง เนื่องจากถ้าดินแห้งจะทำให้คุณสมบัติบางประการของดินเปลี่ยนไป

ดินกำแพงแสบที่นำมาทำการทดลองจะถูกแบ่งออกเป็น 2 ส่วนด้วยกัน คือ ทำการทดลองในสภาวะธรรมชาติ และในสภาวะที่อ้อมตัวด้วยแคลเซียม อุปกรณ์ในการเก็บรักษาตัวอย่างดินจะเป็นภาชนะพลาสติกที่ผ่านการล้างด้วยกรดเจือจาง เช่น กรดไฮโดรคลอริก หรือ กรดไนตริก เพื่อป้องกันการปนเปื้อนของโลหะ สำหรับคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของตัวอย่างดินสามารถวิเคราะห์ได้ตามวิธีต่าง ๆ ดังตาราง 3.1

#### 3.3.2 การเตรียมตัวอย่างดินที่อ้อมตัวด้วยแคลเซียม

นำตัวอย่างดินกำแพงแสบมาประมาณ 30 กรัมใส่ในขวดพลาสติก เติมน้ำละลายแคลเซียมอะซีเตต ความเข้มข้น 0.5 โมลาร์ ( pH = 7 ) ลงไป 750 มิลลิลิตร เขย่าให้เข้ากันโดยใช้เวลามากกว่า 5 นาที หลังเขย่าตั้งทิ้งไว้ 1 คืน นำสารแขวนลอยที่ได้มากรอง แล้วล้างดินที่กรองได้ด้วยสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ เข้มข้น 0.5 โมลาร์ 4 ครั้ง หลังจากนั้นใช้น้ำกลั่น 3 ครั้ง ( deionization ) ล้าง แล้วตามด้วยอะซีโตน ทดสอบว่า

ยังมีคลอไรด์เหลืออยู่หรือไม่ โดยนำน้ำล้างของดินที่กรองได้มาทดสอบกับสารละลายซิลเวอร์ไนเตรต เข้มข้น 0.1 นอร์มอล เมื่อไม่มีคลอไรด์เหลืออยู่ นำดินที่ได้ไปผึ่งให้แห้ง แล้วเก็บไว้ในภาชนะพลาสติกที่อุณหภูมิห้อง

### 3.3.3 การเตรียมสารละลายผสมของโลหะหนัก

สารละลายผสมของโลหะหนักชนิดต่าง ๆ ( แคดเมียม นิกเกิล และสังกะสี ) ดังตาราง 3.2 จะเตรียมที่ความเข้มข้นของโลหะหนักแต่ละชนิดเป็น  $5 \times 10^{-4}$  โมลาร์ โดยมีตัวทำละลายคือสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ เข้มข้น 0.01 โมลาร์ ซึ่งจะทำหน้าที่เป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์ ( การเตรียมสารละลายโลหะหนักควรทำด้วยความระมัดระวังเพื่อให้ได้ความเข้มข้นที่แน่นอนและป้องกันอันตรายจากพิษของโลหะหนัก )

### 3.3.4 การดูดซับโดยดินธรรมชาติ

ดินตัวอย่างที่ใช้ทดลอง คือ ดินกำแพงแสน และดินนราธิวาส จะถูกชั่งมา 0.2500 กรัม ใส่ในขวดพลาสติกพอลิเอทิลีน บีเปิดสารละลายผสมของโลหะหนักชนิดต่าง ๆ มา 25 มิลลิลิตร ใส่ลงไปในแต่ละขวด นำไปแช่ที่อุณหภูมิ  $30 \pm 2$  องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง หลังจากนั้นนำมาทำให้ตกตะกอนด้วยเครื่องเซนตริฟิวส์ นำสารละลายที่ได้ไปวัดปริมาณไอออนโลหะหนักที่เหลืออยู่ โดยใช้เครื่องอะตอมมิคแอนบซอร์พชันสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ คำนวหาปริมาณโลหะหนักที่ถูกดูดซับโดยนำปริมาณโลหะหนักที่เหลืออยู่ ( micro-equivalent ) หักออกจากปริมาณโลหะหนักที่มีอยู่เมื่อเริ่มต้นทำการทดลอง ( การเก็บรักษาสารละลายโลหะหนักทำได้โดยหยดกรดไนตริกเข้มข้น 1 - 2 หยดลงไปในสารละลาย เพื่อป้องกันการตกตะกอนของโลหะหนัก )

ตาราง 3.1 วิธีการที่ใช้วิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของดิน

ลักษณะของดิน	วิธีการวิเคราะห์
ความชื้น (%)	Oven-dry method*
เนื้อดิน	Pipette method*
แร่ดินเหนียว	X-ray Diffraction method*
พีเอช	Glass electrode method*
ความจุในการแลกเปลี่ยนประจุบวก	
- ARID LAND SOILS	Polemio & Rhoades method
- ACIDS SOILS	Gillman method
คาร์บอนอินทรีย์	Walkley - Black method*
ไนโตรเจนออกไซด์อิสระ	SCS*
โลหะหนัก	AAS*

\* ที่มา : Black et al. (1965) and ASA-SSSA (1965)

SCS = Soil Conservation Service

AAS = Atomic absorption spectrophotometry

ตาราง 3.2 สารละลายโลหะหนักที่ใช้ทดลอง

โลหะหนัก	ความเข้มข้นของโลหะหนัก ( โมลาร์ )			
	Cd+Ni	Cd+Zn	Ni+Zn	Cd+Ni+Zn
Cd	$5 \times 10^{-4}$	$5 \times 10^{-4}$	-	$5 \times 10^{-4}$
Ni	$5 \times 10^{-4}$	-	$5 \times 10^{-4}$	$5 \times 10^{-4}$
Zn	-	$5 \times 10^{-4}$	$5 \times 10^{-4}$	$5 \times 10^{-4}$

### 3.3.5 การดูดซับโดยดินที่อิ่มตัวด้วยแคลเซียม

การศึกษาการดูดซับโลหะหนักโดยดินกำแพงแสนที่อิ่มตัวด้วยแคลเซียม มีวิธีการทดลองเช่นเดียวกับดินธรรมชาติ เพื่อเป็นการศึกษาถึงปัจจัยหลัก คือ ค่าการแลกเปลี่ยนประจุบวก (cation exchange) ต่อปริมาณการดูดซับโลหะหนัก เปรียบเทียบกับดินธรรมชาติ

### 3.3.6 การศึกษาผลของพีเอชของสารละลายต่อปริมาณการดูดซับโลหะหนัก

ซึ่งตัวอย่างดินกำแพงแสนมา 0.2500 กรัม ใส่ในขวดพลาสติกพอลิเอทิลีน ปิดฝา สารละลายผสมของโลหะหนักชนิดต่าง ๆ มา 25 มิลลิลิตร ตามตารางที่ 3.2 ใส่ลงในขวดแต่ละขวด หลังจากนั้นนำไปปรับพีเอชของสารละลายให้เป็น 4, 5 และ 6 โดยใช้สารละลายกรดไฮโดรคลอริก เข้มข้น 0.01 โมลาร์ นำไปเขย่าที่อุณหภูมิ  $30 \pm 2$  องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง นำไปทำให้ตกตะกอนด้วยเครื่องเซนตริฟิวส์ นำสารละลายที่ได้ไปวัดปริมาณโลหะหนักที่เหลืออยู่ โดยเครื่อง AAS

## บทที่ 4

### ผลการทดลองและวิจารณ์

#### 4.1 คุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของดิน

##### 4.1.1 ดินก้ำแพงแสน ( Ks )

ตาราง 4.1 คุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของดินก้ำแพงแสน

คุณสมบัติของดิน	ผลที่ได้
เนื้อดิน	ดินร่วน*
อนุภาคคอลลอยด์ส่วนใหญ่	$K_t > I^*$
เปอร์เซ็นต์ความชื้น	1.45
พีเอช ในน้ำ ( 1:1 )	6.57
พีเอช ใน $CaCl_2$ 0.01 M ( 1:2 )	6.38
เปอร์เซ็นต์คาร์บอนอินทรีย์	1.47
CEC ( meq / 100 g dry soil )	13.16
Free Fe oxide ( % )	0.15

\* กรมพัฒนาที่ดิน กระทรวงเกษตรและสหกรณ์

ลักษณะเนื้อดินของดินก้ำแพงแสนที่ตรวจสอบจะมีลักษณะเป็นดินร่วน มีสีน้ำตาลอ่อน และเนื่องจากประกอบด้วยแร่เป็นส่วนใหญ่มีปริมาณอินทรีย์สารเป็นส่วน้อย (น้อยกว่า 20 %) จึงจัดอยู่ในประเภทดินแร่ ( mineral soil ) อนุภาคเคลย์ส่วนใหญ่ของดินก้ำแพงแสนจะ

ประกอบด้วยคาโอลิไนต์ ( Kt ) > อิลไลต์ ( I ) ค่าความเป็นกรด-เบสของดินกำพวงแสดน มีความเป็นกรดเล็กน้อย คือ 6.57 ในน้ำและ 6.38 ในสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ 0.01 โมลาร์ เนื่องจากอนุภาคเคลย์ส่วนใหญ่ของดินกำพวงแสดนเป็นคาโอลิไนต์ จึงทำให้ค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวกมีค่าต่ำ คือ มีค่า 13.16 มิลลิควิวาเลนซ์ ต่อ 100 กรัม ของดินแห้ง เมื่อเปรียบเทียบกับดินที่มีอนุภาคเคลย์ส่วนใหญ่เป็นฮิวมัส เวอร์มิคูไลต์ มอนท์มอริลโลไนต์ คาโอลิไนต์ ซึ่งจะมีค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวกเป็น 200, 150 , 100 , 8 มิลลิควิวาเลนซ์ ต่อ 100 กรัมของดินแห้ง ตามลำดับ

#### 4.1.2 ดินนราธิวาส (Nw)

ตาราง 4.2 คุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของดินนราธิวาส

คุณสมบัติของดิน	ผลที่ได้
เนื้อดิน	ดินอินทรีย์*
อนุภาคเคลย์ส่วนใหญ่	ไม่สามารถกำหนดได้*
เปอร์เซ็นต์ความชื้น	5.63
พีเอช ในน้ำ ( 1:1 )	4.36
พีเอช ใน CaCl <sub>2</sub> 0.01 M ( 1:2 )	4.18
เปอร์เซ็นต์คาร์บอนอินทรีย์	20.18
CEC ( meq / 100 g dry soil )	218.32
Free Fe oxide ( % )	ไม่สามารถกำหนดได้

\* กรมพัฒนาที่ดิน กระทรวงเกษตรและสหกรณ์

ลักษณะของดินราวีวาสที่ตรวจสอบมีลักษณะเป็นดินอินทรีย์ ซึ่งส่วนใหญ่จะเป็นอินทรีย์-  
สารที่เกิดจากการเน่าเปื่อยของซากพืชซากสัตว์ ทำให้ดินมีสีคล้ำ ลักษณะเนื้อดินร่วน มีความชื้น  
สูงเมื่อเทียบกับดินกำแพงแสน มีค่าอินทรีย์สารสูงมาก คือ 20.18 เปอร์เซ็นต์ ค่าความเป็น  
กรด-เบส จะมีค่าค่อนข้างต่ำ คือ 4.36 ในน้ำ และ 4.18 ในสารละลายแคลเซียมคลอไรด์  
0.01 โมลาร์ และเนื่องจากเป็นดินอินทรีย์ จึงทำให้ค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุ  
บวกมีค่าสูง คือ 218.32 มิลลิควิวาเลนซ์ต่อ 100 กรัมของดินแห้ง

## 4.2 การดูดซับโลหะหนักโดยดินธรรมชาติ

### 4.2.1 ดินกำแพงแสน

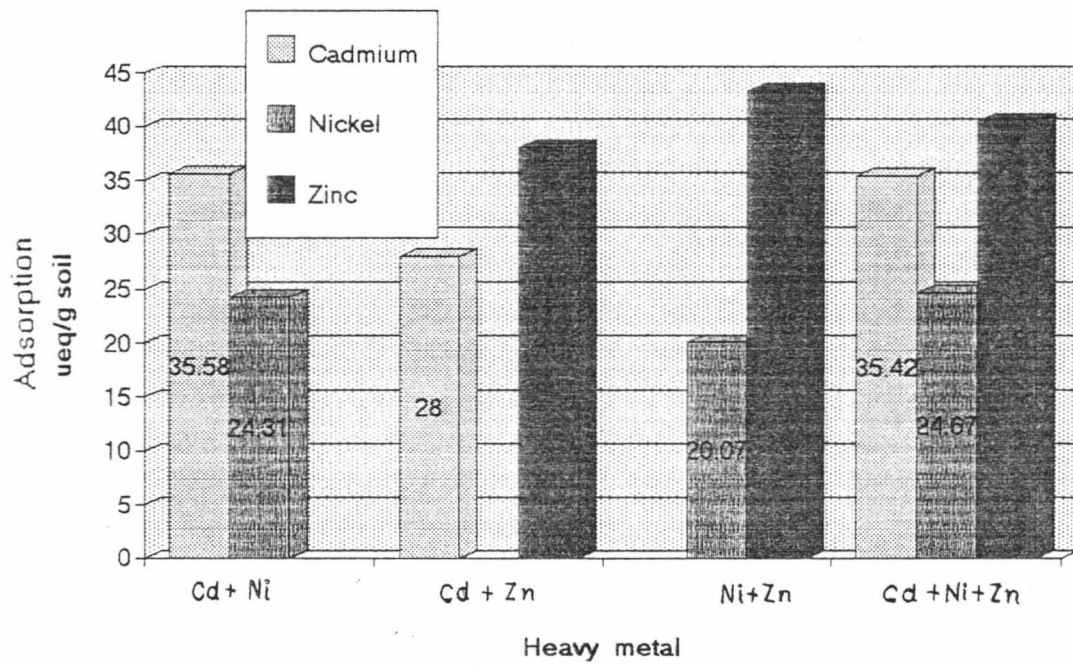
ตาราง 4.3 การดูดซับโลหะหนักโดยดินกำแพงแสน

โลหะหนัก (สารละลายผสม)	ความเข้มข้นเริ่มต้น* ( $\mu\text{eq/l}$ )	ความเข้มข้นสมดุล* ( $\mu\text{eq/l}$ )	ปริมาณการดูดซับ* ( $\mu\text{eq/g dry soil}$ )
1. Cd+Ni			
Cd	1000	645.91	35.67
Ni	1000	758.67	24.31
2. Cd+Zn			
Cd	1000	720.60	28.00
Zn	1000	621.15	37.97
3. Ni+Zn			
Ni	1000	798.14	20.08
Zn	1000	563.88	43.37
4. Cd+Ni+Zn			
Cd	1000	650.17	35.42
Ni	1000	756.33	24.67
Zn	1000	599.73	40.53

\* ค่าเฉลี่ยการทดลอง 3 ครั้ง

จากตาราง 4.3 จะพบว่าในสารละลายผสมของแคดเมียมกับนิกเกิล ดินกำแพง-  
 แสนสามารถดูดซับแคดเมียมได้ดีกว่านิกเกิล ส่วนสารละลายผสมของแคดเมียมกับสังกะสี ดิน  
 กำแพงแสนจะสามารถดูดซับสังกะสีได้ดีกว่าแคดเมียม และในสารละลายผสมของนิกเกิลกับ  
 สังกะสีนั้น ดินกำแพงแสนจะสามารถดูดซับสังกะสีได้ดีกว่านิกเกิล สำหรับสารละลายผสมของ  
 แคดเมียมกับนิกเกิลกับสังกะสี ปริมาณการดูดซับสังกะสีจะค่ามากกว่าแคดเมียม และ นิกเกิล  
 ตามลำดับ ( รูป 4.1 )

เนื่องจากอนุภาคเคลย์ส่วนใหญ่ของดินกำแพงแสนเป็นคาโอลิไนต์ ซึ่งมีโครงสร้าง  
 ผลึกเป็นแบบ 1:1 ดังนั้นจึงทำให้ความสามารถของดินในการดูดซับประจุบวกเกิดขึ้นเฉพาะ  
 บริเวณผิวภายนอกของคอลลอยด์ดินเท่านั้น เมื่อพิจารณาถึงรัศมีของไอออนโลหะหนัก จะพบ  
 ว่า แคดเมียม ( 0.97 Å ) มีค่ารัศมีของไอออนมากกว่าสังกะสี ( 0.83 Å ) และ  
 นิกเกิล ( 0.77 Å ) ตามลำดับ ส่วนค่าอิเล็กโตรเนกาติวิตีของแคดเมียมมีเท่ากับนิกเกิล  
 ( 1.7 ) และมากกว่าสังกะสี ( 1.6-1.7 ) ซึ่งทั้งสองปัจจัยที่กล่าวมานี้ จะมีผลต่อความ  
 คงทนในการยึดเกาะกับประจุลบของดิน นอกจากนี้ปัจจัยอีกอย่างหนึ่งที่มีผลต่อการดูดซับ  
 โลหะหนักของดิน คือ ผลของประจุข้างเคียง ( steric effect ) ที่จะเป็นตัวกำหนดถึง  
 ความเหมาะสมของโลหะหนักที่จะไปยึดเกาะกับประจุลบของดิน



รูป 4.1 การดูดซับโลหะหนักในสารละลายผสมของโลหะหนัก โดยดินกำแพงแสน

## 4.2.2 ดินรามีวาส

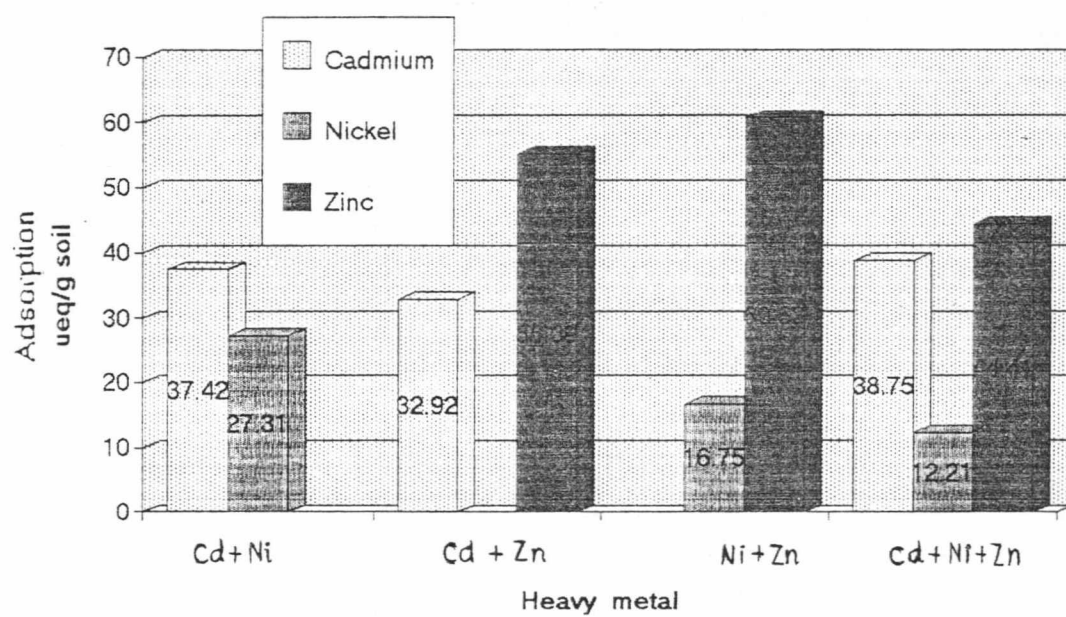
ตาราง 4.4 การดูดซับโลหะหนักโดยดินรามีวาส

โลหะหนัก (สารละลายผสม)	ความเข้มข้นเริ่มต้น* ( $\mu\text{eq/l}$ )	ความเข้มข้นสมดุล* ( $\mu\text{eq/l}$ )	ปริมาณการดูดซับ* ( $\mu\text{eq/g dry soil}$ )
1. Cd+Ni			
Cd	1000	642.88	37.15
Ni	1000	739.37	27.31
2. Cd+Zn			
Cd	1000	658.15	32.92
Zn	1000	473.09	55.09
3. Ni+Zn			
Ni	1000	840.30	16.57
Zn	1000	422.12	60.63
4. Cd+Ni+Zn			
Cd	1000	633.74	38.75
Ni	1000	884.59	12.21
Zn	1000	580.25	44.41

\* ค่าเฉลี่ยการทดลอง 3 ครั้ง

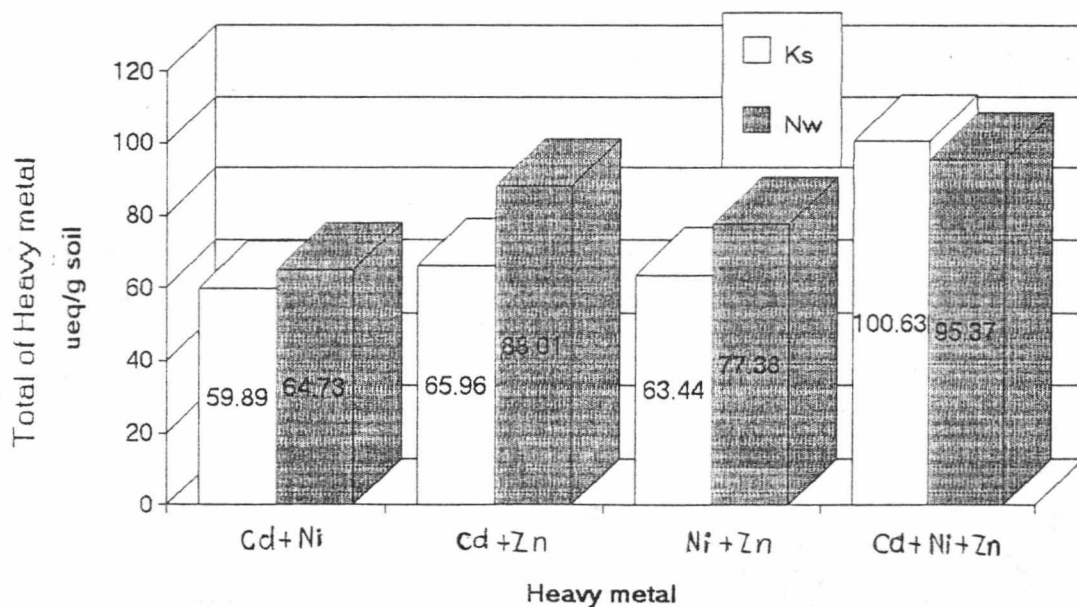
จากตาราง 4.4 จะพบว่าในสารละลายผสมของแคดเมียมกับนิกเกิล ดินนราธิวาสจะสามารถดูดซับแคดเมียมได้ดีกว่านิกเกิล ส่วนสารละลายผสมของแคดเมียมกับสังกะสี ดินนราธิวาสจะสามารถดูดซับสังกะสีได้ดีกว่าแคดเมียม และในสารละลายผสมของนิกเกิลกับสังกะสีนั้น ดินนราธิวาสจะสามารถดูดซับสังกะสีได้ดีกว่านิกเกิล สำหรับสารละลายผสมของแคดเมียมกับนิกเกิลกับสังกะสีนั้น ปริมาณการดูดซับสังกะสีจะมีค่ามากกว่าแคดเมียมและนิกเกิล ตามลำดับ ( รูป 4.2 )

การดูดซับโลหะหนักของดินนราธิวาส จะขึ้นอยู่กับการเกิดคีเลตของลิแกนด์กับไอออนโลหะหนักในสารละลาย ซึ่งจากการทดลองพบว่า ดินนราธิวาสมีการดูดซับที่เหมาะสมกับสังกะสีมากกว่าแคดเมียมและนิกเกิล ตามลำดับ อันน่าจะเป็นผลมาจากความเหมาะสมในการเกิดคีเลตของลิแกนด์กับไอออนโลหะหนัก การดูดซับประจุบวกของดินอินทรีย์นั้นพบว่าจะขึ้นอยู่กับค่าความเป็นกรด-เบสของสารละลาย โดยในสารละลายที่เป็นกรด การดูดซับแคดเมียมกับนิกเกิลจะมีค่ามากกว่าสังกะสี แต่จะสลับที่กันเมื่อสารละลายมีความเป็นเบสมากขึ้น ซึ่งในขณะนี้ยังคงไม่สามารถหาวิธีการที่ดีพอ ในการสกัดอินทรีย์สารส่วนที่มีผลต่อการดูดซับได้ทั้งหมด โดยขณะนี้สามารถสกัดได้เฉพาะ humic และ fulvic acid ซึ่งเป็นส่วนประกอบที่สำคัญต่อการดูดซับของสารอินทรีย์ (13)



รูป 4.2 การดูดซับโลหะหนักในสารละลายผสมของโลหะหนัก โดยดินนาข้าว

เมื่อพิจารณาถึงปริมาณรวมของโลหะหนักทั้งหมดที่ถูกดูดซับ ระหว่างดิน  
 กำแพงแสนกับดินนราธิวาส จะพบว่าดินนราธิวาสมีความสามารถในการดูดซับโลหะหนัก  
 ได้ดีกว่าดินกำแพงแสน ( รูป 4.3 ) อันเป็นผลมาจากค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยน  
 ประจุบวกของดินนราธิวาสที่มีค่าสูงกว่าดินกำแพงแสน แต่อย่างไรก็ตามแม้ว่าค่าความสามารถ  
 ในการแลกเปลี่ยนประจุบวกของดินนราธิวาสจะมีค่ามากกว่าดินกำแพงแสนเป็นจำนวนมาก แต่  
 ปริมาณรวมของโลหะหนักที่ถูกดูดซับโดยดินนราธิวาส จะมีค่ามากกว่าดินกำแพงแสนเพียง  
 เล็กน้อยเท่านั้น ซึ่งเป็นผลมาจากค่าความเป็นกรด-เบสของดินนราธิวาสที่มีค่าต่ำกว่าดิน  
 กำแพงแสนนั่นเอง โดยในสภาวะที่เป็นกรด โปรตอนที่มีความเข้มข้นสูงจะเป็นไอออนที่เข้า  
 แข่งขันร่วมในการดูดซับ ทำให้การดูดซับโลหะหนักเกิดได้ยากกว่า เมื่อความเข้มข้นของ  
 โปรตอนมีค่าต่ำ ( พีเอชสูง )



รูป 4.3 การดูดซับโลหะหนักระหว่างดินกำแพงแสนกับดินนราธิวาส

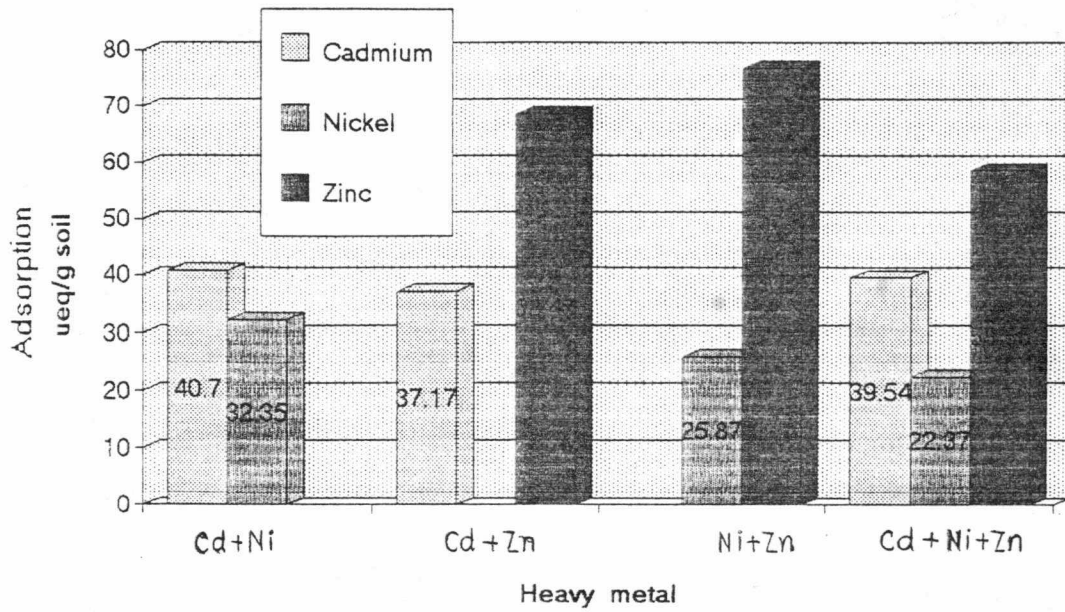
#### 4.3 การดูดซับโดยดินกำแพงแสนที่อ้อมตัวด้วยแคลเซียม

ตาราง 4.5 การดูดซับโลหะหนักโดยดินกำแพงแสนที่อ้อมตัวด้วยแคลเซียม

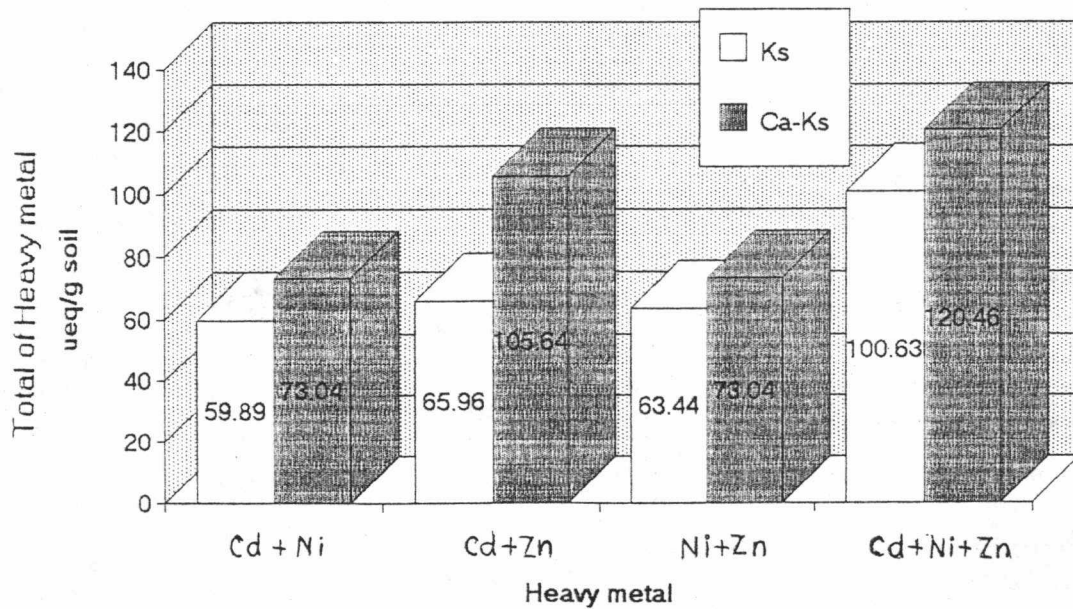
โลหะหนัก (สารละลายผสม)	ความเข้มข้นเริ่มต้น* ( $\mu\text{eq/l}$ )	ความเข้มข้นสมดุล* ( $\mu\text{eq/l}$ )	ปริมาณการดูดซับ* ( $\mu\text{eq/g dry soil}$ )
1. Cd+Ni			
Cd	1000	596.14	40.70
Ni	1000	679.00	32.35
2. Cd+Zn			
Cd	1000	630.39	37.17
Zn	1000	319.11	68.47
3. Ni+Zn			
Ni	1000	743.63	25.87
Zn	1000	239.53	76.72
4. Cd+Ni+Zn			
Cd	1000	605.75	39.54
Ni	1000	776.91	22.37
Zn	1000	416.04	58.56

\* ค่าเฉลี่ยการทดลอง 3 ครั้ง

การดูดซับโลหะหนักโดยดินกำแพงแสนที่อ้อมตัวด้วยแคลเซียม จะมีค่าสูงกว่าการดูดซับโดยดินกำแพงแสนในสภาวะธรรมชาติ แต่แนวโน้มของชนิดโลหะหนักที่เหมาะสมต่อการดูดซับยังคงเหมือนกับดินธรรมชาติ คือ สังกะสีมากกว่าแคดเมียมและนิกเกิล ตามลำดับ (รูป 4.4 และ 4.5) สาเหตุที่ปริมาณรวมของโลหะหนักทั้งหมดที่ถูกดูดซับโดยดินกำแพงแสนที่อ้อมตัวด้วยแคลเซียมมีค่าสูงกว่าดินกำแพงแสนในสภาวะธรรมชาติ เนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงของค่าการแลกเปลี่ยนประจุบวก โดยเมื่อทำให้พื้นผิวที่แลกเปลี่ยนประจุบวกมีแคลเซียมยึดเกาะอยู่เป็นส่วนใหญ่ ( ดินที่อ้อมตัวด้วยแคลเซียม ) การดูดซับโลหะหนักชนิดต่าง ๆ จะขึ้นอยู่กับขนาดของไอออนกับความเข้มข้นของโลหะหนักที่ทำให้การดูดซับนั้นมีความเหมาะสม ในขณะที่ดินในสภาวะธรรมชาติจะมีผลของการผลักกันของประจุข้างเคียง ( steric effect ) เข้ามาเกี่ยวข้องด้วย



รูป 4.4 การดูดซับโลหะหนักโดยดินกำพวงแสงที่อ้อมตัวด้วยแคลเซียม



รูป 4.5 การดูดซับโลหะหนักระหว่างดินกำพวงแสงกับดินกำพวงแสงที่อ้อมตัวด้วยแคลเซียม

## 4.4 ผลของความเป็นกรด-เบสต่อปริมาณการดูดซับโลหะหนัก

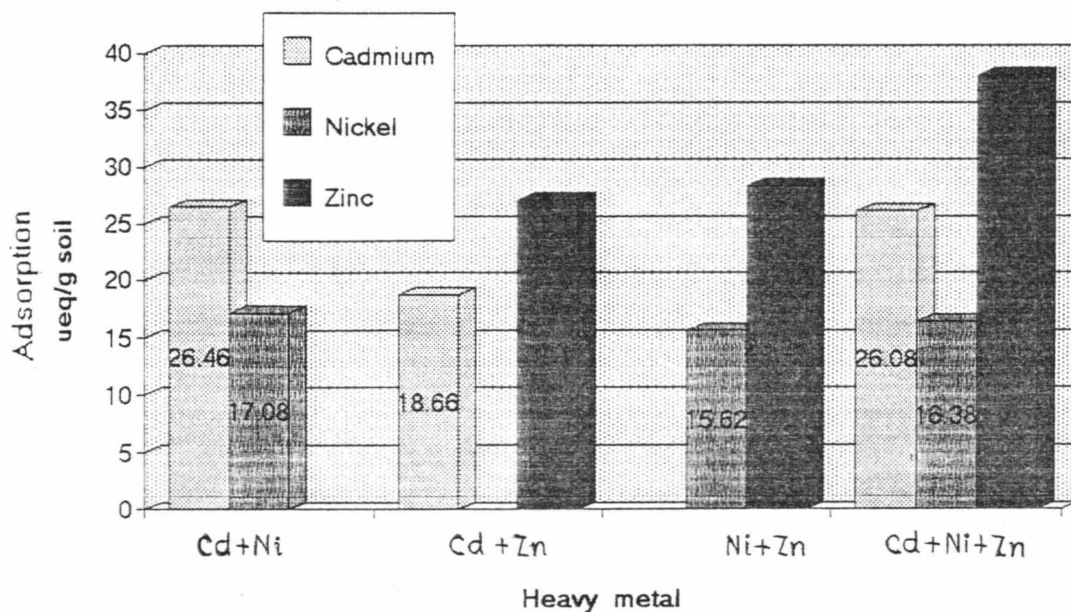
ตาราง 4.6 การดูดซับโลหะหนักโดยดินกำแพงแสนที่พีเอชต่าง ๆ

โลหะหนัก (สารละลายผสม)	ปริมาณการดูดซับ ( $\mu\text{eq/g dry soil}$ )		
	pH 4	pH 5	pH 6
1. Cd+Ni			
Cd	26.46	29.15	20.12
Ni	17.08	11.41	18.42
ปริมาณรวม	43.54	40.56	38.54
2. Cd+Zn			
Cd	18.66	20.55	15.33
Zn	27.10	29.85	24.76
ปริมาณรวม	45.77	50.40	40.09
3. Ni+Zn			
Ni	15.62	13.34	8.82
Zn	28.28	35.09	30.04
ปริมาณรวม	43.90	48.43	38.87
4. Cd+Ni+Zn			
Cd	26.08	22.73	27.32
Ni	16.38	14.70	8.96
Zn	37.99	39.96	34.81
ปริมาณรวม	80.46	77.38	71.08

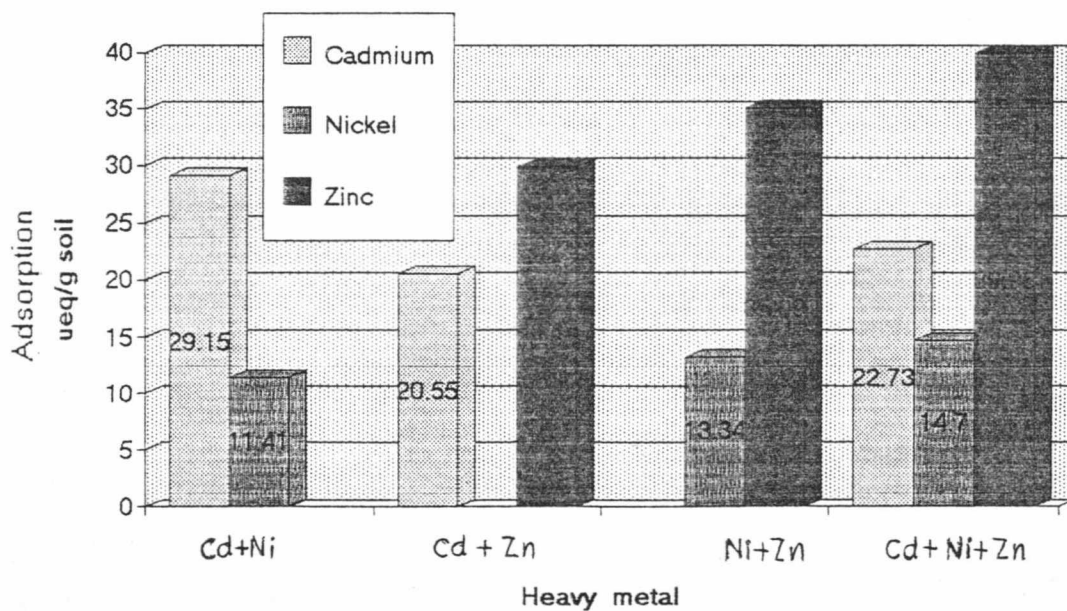
\* ค่าเฉลี่ยการทดลอง 3 ครั้ง

จากตาราง 4.5 จะพบว่าในสารละลายผสมของแคดเมียมกับนิกเกิล การดูดซับแคดเมียมของดินกำแพงแอสนังคังมีค่ามากกว่านิกเกิล แม้ว่าความเป็นกรด-เบส จะเปลี่ยนแปลงไปก็ตาม ส่วนในสารละลายผสมของแคดเมียมกับสังกะสี การดูดซับสังกะสีจะยังคงมีมากกว่าแคดเมียม แม้จะมีการเปลี่ยนแปลงไปของค่าความเป็นกรด-เบส และในสารละลายผสมของนิกเกิลกับสังกะสี การดูดซับของสังกะสีจะมีความมากกว่านิกเกิล แม้จะมีการเปลี่ยนแปลงค่าความเป็นกรด-เบส ไป สำหรับในสารละลายผสมของแคดเมียมกับนิกเกิลกับสังกะสี การดูดซับสังกะสีจะมีค่ามากที่สุดและมีค่ามากกว่าแคดเมียม และ นิกเกิล ตามลำดับ ในทุก ๆ ค่าความเป็นกรด-เบส ที่เปลี่ยนแปลง ( รูป 4.6-4.8 )

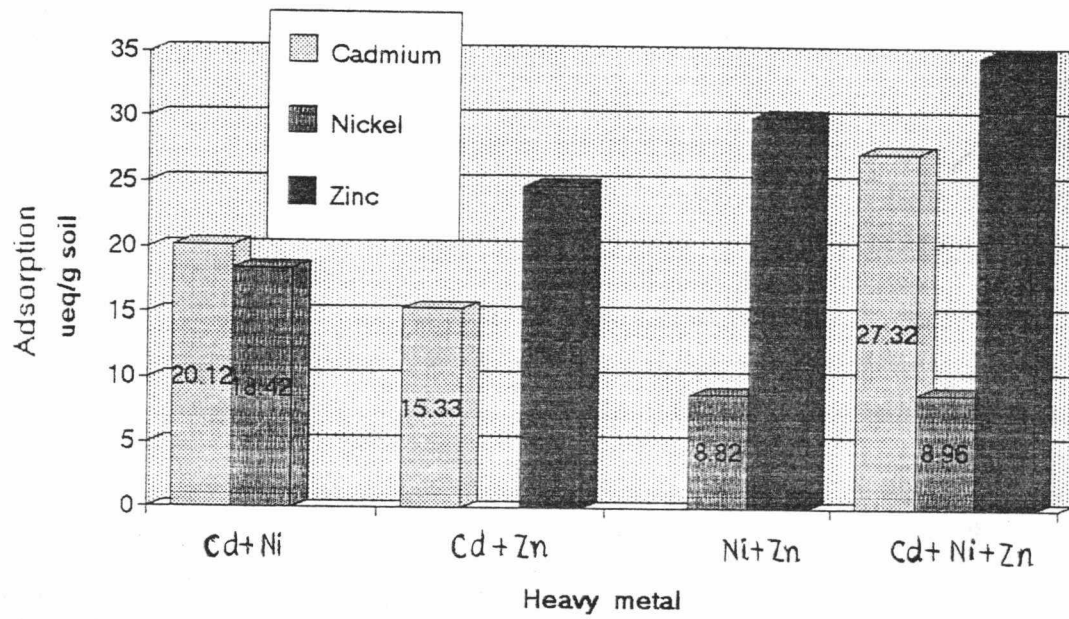
ปริมาณรวมของการดูดซับโลหะหนักที่พีเอช 4 , 5 , 6 และ 7 ของสารละลายแคดเมียมกับนิกเกิล มีค่าเท่ากับ 43.54 , 40.60 , 38.54 และ 59.97  $\mu\text{eq} / \text{g dry soil}$  ตามลำดับ สารละลายแคดเมียมกับสังกะสี มีค่าเท่ากับ 45.77 , 50.40 , 40.09 และ 65.96  $\mu\text{eq} / \text{g dry soil}$  ตามลำดับ สารละลายนิกเกิลกับสังกะสี มีค่าเท่ากับ 43.90 , 48.43 , 38.87 และ 63.44  $\mu\text{eq} / \text{g dry soil}$  ตามลำดับ ส่วนสารละลายแคดเมียมกับนิกเกิลกับสังกะสี มีค่าเท่ากับ 80.46 , 77.38 , 71.08 และ 100.63  $\mu\text{eq} / \text{g dry soil}$  ตามลำดับ ( รูป 4.9 ) ซึ่งจะพบว่า การเปลี่ยนแปลงพีเอช มีผลต่อปริมาณการดูดซับโลหะหนักโดยจะทำให้ปัจจัยต่าง ๆ ได้แก่ ความสามารถในการดูดซับของดิน และขนาดของโลหะหนักเปลี่ยนแปลงไป ซึ่งพฤติกรรมของโลหะหนักที่ผสมกันอยู่ในสารละลาย เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงพีเอชยังมีข้อมูลไม่มากนัก



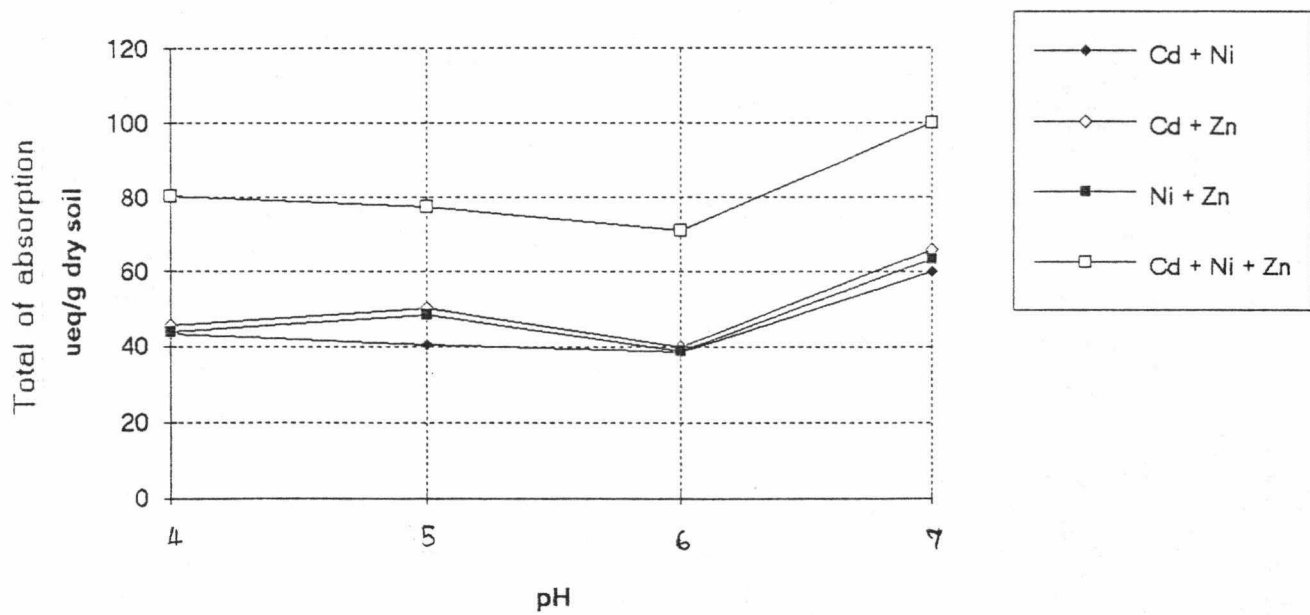
รูป 4.6 การดูดซับโลหะหนักโดยดินกำพวงแสด ที่ pH = 4



รูป 4.7 การดูดซับโลหะหนักโดยดินกำพวงแสด ที่ pH = 5



รูป 4.8 การดูดซับโลหะหนักโดยดินกำพวงแสด ที่ pH = 6



รูป 4.9 ปริมาณรวมของโลหะหนักที่ถูกดูดซับ ที่ pH 4 , 5 , 6 และ 7

## บทที่ 5

### สรุปผลการทดลองและข้อเสนอนแนะ

#### 5.1 สรุปผลการทดลอง

ชุดดินที่เลือกมาทำการศึกษานี้มีคุณสมบัติทางกายภาพและเคมีแตกต่างกันโดยดินก้ำแพงแสนจะมีอนุภาคเคลย์ส่วนใหญ่เป็นคาโอไลไนต์และอิลไลต์ ในขณะที่ดินนราธิวาสไม่สามารถกำหนดได้ แต่จะมีอิฐมีอยู่เป็นจำนวนมาก ซึ่งทำให้ค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนของดินก้ำแพงแสนมีค่าต่ำกว่าดินนราธิวาส การทดลองนี้จะทำการทดลองแบบเป็นครั้ง ( Batch experiment ) ซึ่งโลหะหนักที่เลือกมาทำการทดลอง คือ แคดเมียม นิกเกิล และสังกะสี โดยมีตัวทำลาย คือ สารละลายแคลเซียมคลอไรด์เข้มข้น 0.01 โมลาร์ ซึ่งจะทำหน้าที่เป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์ ผลจากการค้นคว้าได้ข้อสรุปดังนี้

1. ในสารละลายผสมของโลหะหนักชนิดต่าง ๆ คือ แคดเมียมกับนิกเกิล แคดเมียมกับสังกะสี นิกเกิลกับสังกะสี และแคดเมียมกับนิกเกิลกับสังกะสี ความเหมาะสมของโลหะหนักต่อการดูดซับของดินจะยังคงไม่เปลี่ยนแปลง คือ  $Zn > Cd > Ni$  แม้จะมีการเปลี่ยนแปลงชนิดของโลหะหนักที่ผสมกันอยู่ในสารละลาย คือ การดูดซับสังกะสีจะยังคงเกิดขึ้นได้มากที่สุด ไม่ว่าสังกะสีจะอยู่ร่วมกับแคดเมียมหรือนิกเกิลก็ตาม

2. ความสัมพันธ์ระหว่างชุดดินธรรมชาติสำหรับการดูดซับ คือ

$Cd : Nw > Ks \text{ หรือ } humus > Kt+I$

$Ni : Nw > Ks \text{ หรือ } humus > Kt+I$

$Zn : Nw > Ks \text{ หรือ } humus > Kt+I$

ซึ่งแม้ว่าดินนราธิวาสจะสามารถดูดซับโลหะหนักได้ดีกว่าดินก้ำแพงแสน แต่เนื่องจากดินนราธิวาสมีค่าความเป็นกรดที่ค่อนข้างสูง ( 4.18 ) จึงทำให้การดูดซับโลหะหนักของดินนราธิวาสมีค่าไม่สูงนัก

3. การดูดซับของดินที่อิ่มตัวด้วยแคลเซียมจะคล้ายกับดินธรรมชาติ คือ สังกะสีมากกว่า แคลเมียมและมากกว่านิกเกิล ตามลำดับ การปรับปรุงคุณสมบัติของดินด้วย แคลเซียมในดิน กำแพงแสน จะทำให้ปริมาณและประสิทธิภาพของการดูดซับโลหะหนักเพิ่มขึ้น

4. การเปลี่ยนแปลงค่าความเป็นกรด-เบส จะทำให้ปริมาณการดูดซับโลหะหนักของดิน เปลี่ยนไป แต่จะไม่ทำให้ชนิดของโลหะหนักที่เหมาะสมต่อการดูดซับเปลี่ยนแปลงไป โดยสังกะสี จะยังคงเหมาะสมต่อการดูดซับมากที่สุด ตามด้วยแคลเมียมและนิกเกิล ตามลำดับ

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

1. จากความสัมพันธ์ระหว่างชนิดของโลหะหนักที่เหมาะสมต่อการดูดซับของดินตัวอย่าง ที่ได้จากการทดลองจะสามารถนำไปใช้ในการทำนายถึงพฤติกรรมของโลหะหนักทั้ง 3 ชนิด ใน ดินชนิดอื่น ๆ ที่มีโครงสร้างทางกายภาพและเคมีคล้ายกับดินตัวอย่างที่นำมาทดลอง

2. เนื่องจากการทดลองนี้เป็นการทดลองแบบเป็นครั้ง (Batch experiment) ซึ่งเป็นสภาวะที่มีการควบคุมปัจจัยต่าง ๆ ผลการทดลองที่ได้จึงเป็นเพียงค่าคาดการณ์เท่านั้น ดังนั้นจึงควรทำการทดลองกับน้ำเสียที่มีอยู่ในธรรมชาติจริง ๆ เพื่อจะได้นำผลการศึกษาไป ประยุกต์ใช้งานในด้านต่าง ๆ ต่อไป

3. ควรทำการศึกษาดินชนิดอื่นที่มีคุณสมบัติทางกายภาพและเคมีต่างกัน เพื่อหาดินที่ เหมาะสมต่อการดูดซับโลหะหนักได้ดีที่สุด

4. ควรมีการศึกษาถึงการปลดปล่อยของโลหะหนักจากดินลงสู่แหล่งน้ำ เพื่อนำผลที่ได้ มาเป็นข้อมูลประกอบในการหามาตรการป้องกันปัญหามลภาวะจากโลหะหนัก

5. เนื่องจากความรู้ทางด้านปฏิกิริยาของโลหะหนักรวมทั้งลิแกนด์ชนิดต่าง ๆ ที่มีต่อกัน ยังไม่เป็นที่กระจ่างนัก จึงควรมีการศึกษาถึงผลที่เกิดขึ้นระหว่างโลหะหนักและลิแกนด์ที่มีต่อกัน เพื่อนำความรู้ที่ได้มาเป็นส่วนหนึ่งในการทำความเข้าใจถึงกระบวนการดูดซับของดิน

ภาคผนวก

ภคคพพคค ก.

KAMPHAENG SAEN SERIES (Ks)

Distribution : Occupies large extent in the southwestern part of the Central Plain.

Setting : Kamphaeng Saen soils are formed from semi-recent alluvium and occur on old levees and breach deposits of the semi-recent terrace. Relief is flat to nearly flat, with a slightly undulating micro-relief. Slopes are 1% or less. Elevation ranges from 6 to 20 m. above sea level. The climate is Tropical Savanna (Koppen 'Aw'). Mean annual precipitation ranges from 800 to 1,600 mm. Mean annual temperature is 27°C.

Drainage and Permeability : Well drained. Permeability is moderate and runoff is slow. Groundwater level is below 1.5 m. from the soil surface throughout the year.

Vegetation and Land Use : Mainly used for settlement sites, gardens and orchards; or are put to upland crops such as maize, cotton and sugar cane.

Characteristic Profile Features : Kamphaeng Saen series is a member of the fine loamy, mixed family of Nan Calcic Brown Soils (National), Udic Haplustalfs (USDA). They are deep, friable, slightly acid over neutral to mildly alkaline soils. They are characterized by a brown or dark brown loam or clay loam A horizon, overlying a brown or strong brown clay loam, weakly developed, argillic B horizon. Fine mica flakes occur in all horizons; but not enough for the micaceous family.

Typifying Pedon : Kamphaeng Saen clay loam -- Orchard form Amphoe Muang, Nakhon Pathom province - Code SW 53/6 (Type

Location) (moist colours unless otherwise stated)

- Ap -- 0-30 cm. Brown to dark brown (10YR4/3); clay loam; weak coarse subangular blocky; nonsticky and nonplastic, friable moist, hard dry; many very fine interstitial and tubular pores; common very fine roots; diffuse, smooth boundary; pH 6.5.
- B2t -- 30-65 cm. Dark yellowish brown (10YR4/4); clay loam to clay; weak to moderate medium subangular blocky; slightly sticky and slightly plastic, friable moist, hard dry; thin, broken, brown to dark brown clay coatings in pores and on ped faces; many fine and very fine tubular and interstitial pores; few mica flakes; many fine and medium and common very fine roots; gradual, smooth boundary; pH 7.5.
- B3 -- 65-90 cm. Brown to dark brown (7.5YR4/4); clay loam; moderate medium and fine subangular blocky; slightly sticky and slightly plastic, friable moist; thin patchy clay coatings; many fine and very fine interstitial and tubular pores; many white lime pseudo-mycelia, strongly calcareous, common mica flakes; common fine and very fine roots; gradual, smooth boundary; pH 8.0.
- C -- 90-130 cm. Strong brown (7.5YR5/6); loam; moderate medium subangular blocky; nonsticky and nonplastic, friable moist; many very fine interstitial mycelia, many mica flakes; few very fine roots; pH 8.0.

Range of Profile Features : The A horizon is from 20 to 40 cm. thick, has 10YR or 7.5YR hues, values of 3 through 5 and chromas of 2 and 4 in 7.5YR hue, and 2 or 3 in 10YR hue. Texture may be sandy clay loam and structure is weak coarse blocky. Field pH values range from 6.0 to 6.5.

The B horizon has 10YR or 7.5YR hues, values of 4 and 5 and chromas of 4 through 8. Reddish brown (5YR5/4 or 4/4) colours may also occur in the deeper subsoil. Textures may be silty clay loam and structure is weak to moderate, medium blocky. Field pH values range from 7.0 to 8.0. The lower B and C horizons commonly contain white, soft, powdery lime; but its presence is not diagnostic for the series.

Similar Soil Series :

Pran Buri	--	does not contain micas or soft, powdery lime and has somewhat lower pH values.
Ruso	--	has a similar profile but lower pH values throughout, no soft, powdery lime and has an udic moisture regime.

Principal Associated Soils : These include Nakhon Pathom and Nakhon Phanom series on the semi-recent terrace, and Saraburi series on the transition between the semi-recent terrace and flood plain.

## NARATHIWAT SERIES (Nw)

Classification : Organic soils  
 Described by : P. Vijarnsorn  
 Date : September 12, 1974  
 Location : Plu Thung Ka, Amphoe Yi-ngo,  
           Changwat Narathiwat  
 Elevation : Approximately 5 m. above sea level  
 Relief and slope : Flat; 0 - 1 % slope  
 Physiography : Domed bogs  
 Natural Vegetation or Land Use : Swamp forest  
 Climate :  
     - Climate type : Tropical monsoon climate (Koppen "Am")  
     - Annual rainfall : 2,644.8 mm.  
     - Mean temperature : 27.0 °C  
 Parent material : Organic material  
 Drainage : Very poorly drained  
 Permeability : Estimated to be slow  
 Run off : Slow  
 Ground water depth : Near the surface  
 Other : -----

Horizon Depth (cm)	Description
O <sub>11</sub> 0 - 60	Dark reddish brown (5YR 3/2, 5YR 3/3) peaty muck; peaty part containing very fine and fine roots mostly; structureless; non sticky, non plastic; very strongly acid (pH 5.0).
O <sub>12</sub> 60 - 120	Dark reddish brown (5YR 3/2) peaty muck; peaty part containing very fine and fine roots mostly; structureless; non sticky non plastic; very strongly acid (pH 5.0).

Remark : Soil pH and texture are determined in laboratory.  
Color are for fully moist soil except where designated.

- Source : 1. Soil Survey Division. 1979. Detailed Reconnaissance Soil Map of Nakhon Pathom Province Ministry of Agriculture and Cooperative, Bangkok.
2. Soil Survey Division. 1979. Detailed Reconnaissance Soil Map of Narathiwat Province Ministry of Agriculture and Cooperative, Bangkok.

Results of Soil Analysis

Kamphaen Saen series : Ks

Type Profile Code No. SW-53/6					Range in Master Horizons								
Laboratory No. of Topsoil : M - 543					Horizon A			Horizon B			Horizon C		
Horizon Depth (cm)	Ap	B <sub>2</sub> L	B <sub>3</sub>	C	Max	Min	Ave.	Max	Min	Ave.	Max	Min	Ave.
Particle Size Analysis (%) (USDA Grading)													
Sand	42.5	21.5	20.0	60.0	55.88	3.18	37.78	57.46	4.4	18.13	85.0	0.5	51.17
Silt	40.0	50.5	56.0	20.0	62.11	11.01	39.59	58.61	30.46	45.74	67.5	9.5	35.0
Clay	17.5	28.0	16.0	12.0	39.38	9.33	22.64	26.99	12.08	24.64	24.0	5.5	13.83
pH 1:1 H <sub>2</sub> O	7.4	6.3	7.5	8.35	7.4	5.65	6.68	8.34	5.19	6.78	8.35	5.4	7.03
1:1 KCl	6.4	5.7	7.0	7.5	6.7	4.85	6.02	6.7	3.86	5.46	7.5	4.0	6.1
CaCO <sub>3</sub> %	0.90	0.30	6.90	3.00	2.12	0.39	1.04	8.62	0.39	2.14	21.45	0.57	8.34
Moisture Air Lo													
Over dry %	1.1	1.8	2.7	1.1	4.01	0.79	1.79	2.42	0.36	1.51	1.2	0.3	0.87
Conductivity													
1 : 5 EC X 10 <sup>6</sup>	10.0	680.0	800.0	700.0	677.81	10.0	194.02	146.66	725.66	398.45	700.0	11.32	337.4
C %	3.22	2.02	1.42	0.82	17.68	0.65	4.94	1.77	0.23	1.0	0.83	0.49	0.71
Exchange Capacity & Cation (Meq. 100 g)													
Ca	10.6	16.6	37.2	19.5	25.54	5.12	10.61	37.86	1.31	14.84	37.5	0.7	19.23
Mg	1.6	2.1	5.1	2.7	3.71	1.18	2.07	4.9	0.51	2.16	2.7	0.3	1.13
K	0.4	0.2	0.2	0.1	0.53	0.82	0.41	0.8	0.2	0.35	0.2	0.1	0.13
Na	0.9	1.7	11.0	6.6	1.2	0.2	0.54	5.58	0.23	1.62	6.6	0.2	2.37

Kamphaen Saen series : Ks (Cont.)

Type Profile Code No. SW-53/6					Range in Master Horizons								
Laboratory No. of Topsoil : N - 543					Horizon A			Horizon B			Horizon C		
(B) Sum (Ca+Mg+K+Na)	13.4	20.6	53.5	20.9	27.36	7.49	13.63	30.04	2.59	18.98	38.2	1.5	22.87
(A) Extr. Acidity	3.3	3.8	0.5	0.2	6.31	3.0	4.0	5.79	1.24	3.36	2.1	0	0.77
(B1A) Sum	16.7	24.4	54.0	29.1	30.76	12.3	18.39	40.18	8.38	24.34	38.2	3.6	23.63
(C) CEC Soil	15.1	16.1	15.1	11.5	22.00	9.79	15.52	10.6	5.39	13.41	12.1	2.7	0.77
CEC, 100 g clay	85.7	57.5	94.4	95.8	121.83	69.13	92.7	101.67	44.9	66.18	95.8	49.1	65.1
Base Saturation %													
<u>B X 100</u>													
C	89	100	100	100	119.0	53.66	38.59	234.12	31.0	110.1	316.0	42.0	152.67
<u>B X 100</u>													
B1A	80	100	100	100	88.24	70.69	78.02	100	47.46	77.74	100	55	85
P (ppm) Bray N.2	47.6	82.4	44.7	20.5	75.29	12.33	40.38	60.00	3.4	18.00	20.5	3.6	10.37
K (ppm) Ammon													
Acetate	175	70	88	47	187.71	79.25	129.03	100.58	47.44	151.31	73	38	52.67

Number of Profile Sampled : N-35/70, N-38/44

Date of Completion :

NC-42/6, SW-53/6, SW-56/3

## ภาคผนวก ข.

ตัวอย่างการคำนวณ

- สารละลายผสมของ Cd+Ni ใช้ดินก้ำแพงแสนในสภาวะธรรมชาติเป็นตัวดูดซับ

## 1. ความเข้มข้นเริ่มต้น

$$\text{จำนวนประจุสมมูล (equivalent)} = (\text{g})(\text{oxidation state})/\text{Mw}$$

$$\begin{aligned} \text{ความเข้มข้นเริ่มต้นของ Cd}^{2+} &= 5 \times 10^{-4} \text{ โมลาร์} \\ &= 5 \times 10^{-4} \times 2 \times 10^6 \text{ } \mu\text{eq/l} \\ &= 1000 \text{ } \mu\text{eq/l} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ในสารละลาย 25 ml มีปริมาณ Cd}^{2+} &= 1000 \times 0.025 \\ &= 25 \text{ } \mu\text{eq} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ในสารละลาย 25 ml มีปริมาณ Ni}^{2+} &= 5 \times 10^{-4} \times 2 \times 10^6 \times 0.025 \\ &= 25 \text{ } \mu\text{eq} \end{aligned}$$

## 2. ความเข้มข้นสมดุล (หลังดูดซับ)

$$\text{ความเข้มข้นของ Cd}^{2+} \text{ ที่สมดุล} = 0.363 \text{ ppm}$$

$$\begin{aligned} \text{เจือจางมา 100 เท่า} &= 0.363 \times 100 \text{ ppm} \\ &= 0.363 \times 100 \times 2 \times 1000 / 112.4 \\ &= 645.908 \text{ } \mu\text{eq/l} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ในสารละลาย 25 ml มีปริมาณ Cd}^{2+} &= 645.908 \times 0.025 \\ &= 16.148 \text{ } \mu\text{eq} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ในสารละลาย 25 ml มีปริมาณ Ni}^{2+} &= 0.215 \times 100 \times 2 \times 1000 \times 0.025 / 58.71 \\ &= 18.956 \text{ } \mu\text{eq} \end{aligned}$$

3. ปริมาณที่ถูกดูดซับ ( $\mu\text{eq/g dry soil}$ )

$$\text{น้ำหนักดินแห้ง} = 0.2482 \text{ g}$$

$$\text{ปริมาณที่ถูกดูดซับ } (\mu\text{eq/g dry soil}) = \frac{(\text{ปริมาณก่อนดูดซับ} - \text{ปริมาณหลังดูดซับ})}{\text{น้ำหนักแห้ง}}$$

$$\begin{aligned} \text{ปริมาณ } \text{Cd}^{2+} \text{ ที่ถูกดูดซับ} &= (25 - 16.148) / 0.2482 \\ &= 35.665 \mu\text{eq/g dry soil} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ปริมาณ } \text{Ni}^{2+} \text{ ที่ถูกดูดซับ} &= (25 - 18.956) / 0.2482 \\ &= 24.351 \mu\text{eq/g dry soil} \end{aligned}$$

ภาคผนวก ค.

Free iron oxides

เหล็กที่มีอยู่ในดินโดยส่วนใหญ่ แล้วจะอยู่ในรูปของเหล็กออกไซด์ ออกไซด์เหล่านี้ จะเคลือบดินแร่ และทำหน้าที่เสมือนตัวกีดระหว่างส่วนต่าง ๆ ของแร่ ปริมาณของเหล็กออกไซด์มีความสำคัญต่อขบวนการ podzolization และ laterization ซึ่งเป็นขบวนการเกิดดินแบบ podzols และ latosols ตามลำดับ

วิธีที่ใช้ปริมาณของเหล็กออกไซด์อิสระ (Free Iron Oxides) ที่นิยมใช้ คือวิธีของ olmyren หรือ SCS method

เครื่องมือพิเศษ

Atomic Absorption Spectrometers

สารเคมี

- 1) Sodium dithionite powder ( $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_4$ )
- 2) Sodium citrate pentahydrate powder ( $\text{Na}_3\text{C}_6\text{H}_5\text{O}_7 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ )
- 3) Superfloc flocculating agent , 0.2% ในน้ำ

วิธีทดลอง

- 1) ซั่งดิน (ที่มีขนาด 80 mesh) 1-4 กรัม ใส่ในขวด nursing ขนาด 237 มล.
- 2) ใส่  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_4$  2 กรัม และ  $\text{Na}_3\text{C}_6\text{H}_5\text{O}_7 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$  20-25 กรัม ลงในขวด nursing ที่มีดินอยู่
- 3) จากนั้นละลายด้วยน้ำกลั่น 3 ครั้ง และปรับจนมีปริมาตร 118 มล.
- 4) แล้วนำขวด nursing มาเขย่าตลอดคืน
- 5) เทสารใส่ในขวดวัดปริมาตรขนาด 250 มล. แล้วหยด superfloc 5 หยด
- 6) ปิดฝา แล้วเขย่าอย่างแรง 15 วินาที
- 7) นำมาปรับปริมาตร และเขย่าอีกครั้ง
- 8) ตั้งทิ้งไว้ 1 ชม. แล้วจึงนำสารละลายที่ได้ไปเจือจางให้อยู่ในช่วงวิเคราะห์

ของ AAS

$$\% F_c = 250(f)(Fe_{sam} - Fe_{blank}) / (W \times 10,000)$$

$\% F_c$  = % free iron oxides ที่มีอยู่ในดิน

f = dilution factor

$Fe_{sam}$  = ความเข้มข้น Fe ในสารละลายตัวอย่าง (ppm)

$Fe_{blank}$  = ความเข้มข้น Fe ในสารละลายบลองค์ (ppm)

W = น้ำหนักดินตัวอย่าง

## ภาคผนวก ง.

Organic carbon

วิธีที่ใช้วิเคราะห์หาปริมาณ organic carbon คือ วิธีของ Walkley-black

สารเคมี

1. Potassium dichromate (  $K_2Cr_2O_7$  ) 1 N.

เตรียมได้โดย : ชั่ง  $K_2Cr_2O_7$  49.04 กรัม ละลายด้วยน้ำและปรับปริมาตร

ให้เป็น 1 ลิตร

2. กรดซัลฟูริกเข้มข้น

3. กรดฟอสฟอริกเข้มข้น

4. สารประกอบเชิงซ้อน o-phenanthroline-ferrous 0.025 M.

เตรียมได้โดย : ชั่ง o-phenanthroline-ferrous monohydrate

14.85 กรัม และ ferrous sulfate heptahydrate (  $FeSO_4 \cdot 7H_2O$  ) 6.95 กรัม

ละลายด้วยน้ำและปรับปริมาตรให้เป็น 1 ลิตร ซึ่งสารประกอบเชิงซ้อนที่ได้เรียกว่า Ferrion

5. Barrium diphenylamine sulfonate

6. สารละลาย Ferrous sulfate heptahydrate (  $FeSO_4 \cdot 7H_2O$  ) 0.5 N

เตรียมได้โดย : ชั่ง  $FeSO_4 \cdot 7H_2O$  140 กรัม ละลายด้วยน้ำ และใส่กรด

ซัลฟูริกเข้มข้น 15 มล. ปล่องทิ้งไว้จนสารละลายเย็น แล้วเจือจางจนมีปริมาตร 1 ลิตร

วิธีการทดลอง

1. ร่อนดินผ่านตะแกรงขนาด 0.5 มม.

2. นำดินที่ได้มาซึ่ง 10-25 มก. ใส่ใน wide mouth erlenmeyer flask

3. เติม  $K_2Cr_2O_7$  เข้มข้น 1 N. ปริมาณ 10 มล.

4. เขย่าดินให้กระจายในสารละลาย

5. จากนั้นเติมกรดซัลฟูริกเข้มข้น ปริมาณ 20 มล. แล้วเขย่าทันทีจนสารละลาย

ผสมเข้ากัน

6. ตั้ง flask ทิ้งไว้ประมาณ 30 นาที
7. แล้วใส่น้ำลงไป 200 มล. และกรองเอาสารที่แขวนลอยออก
8. นำสารละลายที่ได้ ไปไทเทรตด้วย  $\text{FeSO}_4$  เข้มข้น 0.5 N โดยใช้ o-phenanthroline-ferrous เป็นอินดิเคเตอร์ ที่จุดยุติสีจะเปลี่ยนจากสีเขียวอ่อนเป็นสีเขียวเข้ม
9. จากนั้นนำไปไทเทรตต่อด้วย  $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  จนเปลี่ยนสีจากน้ำเงินเป็นแดง
10. เตรียมสารละลายแบบลงค่าวิธีเดียวกัน เพียงแต่ไม่ต้องใส่ดิน

$$\% \text{ Organic Carbon} = \frac{(\text{meq } \text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7 - \text{meq } \text{FeSO}_4)(0.003) * (100) * f}{\text{ดินที่แห้ง (กรัม)}}$$

ดินที่แห้ง (กรัม)

## ภาคผนวก จ.

Cation exchange capacity หรือ CEC.

ความจุในการแลกเปลี่ยนแคตไอออนบวก (cation exchange capacity) ของดินหรือคอลลอยด์นั้น หมายความว่าถึง เป็นปริมาณของแคตไอออนทั้งหมดที่ดินหรือคอลลอยด์นั้นสามารถจะดูดซับไว้ได้

ความจุในการแลกเปลี่ยนไอออนบวกของดินที่ต่างชนิดกัน จะแตกต่างกันเป็นอย่างมาก วิธีวิเคราะห์จึงมีหลายวิธีขึ้นอยู่กับว่าเป็นดินชนิดใด

การวิเคราะห์หาค่าความจุในการแลกเปลี่ยนไอออนบวกของดิน Arid land

วิธีที่ใช้วิเคราะห์คือ วิธีของ Polemlo & Rhoades

เครื่องมือพิเศษ

1. Atomic adsorption spectrometer
2. เครื่องเซนตริฟิวส์
3. ขวดกั่นกลม และหลอดเซนตริฟิวส์คอแคบ ขนาด 50 มล.
4. Ultrasonic disperse
5. เครื่องเขย่า

สารเคมี

1. สารละลายอิมิตัว ประกอบด้วย 0.4 N NaOAc-0.1 N NaCl, 60% EtOH, pH 8.2

เตรียมได้โดย : ผสมสาร NaOAc  $\cdot$  3 H<sub>2</sub>O 544.33 กับ NaCl 58.44 กรัม และ EtOH 6 ลิตร จากนั้นนำไปเจือจางจนมีปริมาตรเป็น 10 ลิตร (เจือจางด้วยน้ำกลั่น) ปรับ pH โดยใช้ NaOH เข้มข้น 6 N

2. สารละลายที่ใช้สกัด (Extraction solution) , Mg(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> 0.5 N

เตรียมได้โดย : ชั่ง Mg(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>  $\cdot$  6 H<sub>2</sub>O 641.1 กรัม ละลายด้วยน้ำ แล้วปรับปริมาตรให้เป็น 10 ลิตร

### วิธีการทดลอง

ซึ่งดินตัวอย่างที่อบแห้งแล้ว 4-5 g ใส่ในหลอดเซนตริฟิวส์ จากนั้นนำไปทำตามขั้นตอนต่อไปนี้

ขั้นตอนที่ 1 :

1.1 ใส่สารละลายอ้อมตัวที่เตรียมไว้ปริมาณ 33 มล. , ในหลอดเซนตริฟิวส์ที่มีดิน ปิดฝาและเขย่าเป็นเวลา 5 นาที

1.2 เปิดฝาและนำไปเซนตริฟิวส์จนสารละลายใส (ใช้เวลาประมาณ 5 นาที)

1.3 ค่อย ๆ รินสารละลายที่ใสออกและเททิ้ง เก็บส่วนที่เป็นดินไว้

1.4 ใส่สารละลายที่อ้อมตัวลงไปหลอดเซนตริฟิวส์ที่เก็บดินนั้น

1.5 ใส่แท่ง sonifier tip เพื่อทำให้ดินที่ตกตะกอนเกิดการกระจาย ใช้เวลาประมาณ 10-30 วินาที

1.6 จากนั้นทำตามข้อ 1-5 ใหม่ ทำทั้งหมด 4 ครั้ง

1.7 ในครั้งที่ 4 จะเทสารละลายส่วนที่ใสทิ้งและนำดินไปทำตามขั้นตอนที่ 2 ต่อไป

ขั้นตอนที่ 2 :

2.1 เติมสารละลายสกัดปริมาณ 33 มล. และเขย่าเป็นเวลา 5 นาที

2.2 นำไปเซนตริฟิวส์ จนกระทั่งสารละลายใส

2.3 ค่อย ๆ รินสารละลายที่สกัดได้ใส่ในขวดวัดปริมาตร ขนาด 100 มล.

2.4 สกัดซ้ำอีกหลาย ๆ ครั้ง

2.5 จากนั้นนำมารวมกันแล้วปรับปริมาตรให้เป็น 100 มล.

$$\begin{aligned} \text{CEC.} &= (\text{Na}_e - \text{Na}_{\text{soil}}) \\ &= \text{Na}_e - (\text{Cl}_e) (\text{Na/Cl})_{\text{soil sol.}} \end{aligned}$$

$$\text{เมื่อ } \text{CEC.} (\text{meq}/100 \text{ g}) = 10/\text{weight soil sample (g)}$$

$$\text{Na}_e = \text{Na ที่สกัดได้ในสารละลายสกัด}$$

$$\text{Cl}_e = \text{Cl ที่สกัดได้ในสารละลายสกัด}$$

$$\text{Na}_{\text{soil}} = \text{สารละลาย Na } 0.4 \text{ N NaOAc} - 0.1 \text{ N NaCl}$$

การหาค่าความจุในการแลกเปลี่ยนไอออนบวกของดินกรด

วิธีที่ใช้ในการวิเคราะห์คือ วิธีของ Gillman

เครื่องมือพิเศษ

1. Atomic adsorption spectrometer
2. เครื่องเซนตริฟิวส์
3. ขวดกั้นกลม และหลอดเซนตริฟิวส์คอแคบ ขนาด 50 มล.
4. Ultrasonic disperse
5. เครื่องเขย่า

สารเคมี

1. สารละลายอิ่มตัว 0.1 M  $\text{BaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$   
เตรียมได้โดย : ชั่ง  $\text{BaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  24.4 กรัม ละลายด้วยน้ำกลั่น ปรับปริมาตรให้เป็น 1000 มล.
2. สารละลาย equilibrating , 0.002 M  $\text{BaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$   
เตรียมได้โดย : ชั่ง  $\text{BaCl}_2$  0.4889 กรัม ละลายด้วยน้ำกลั่น ปรับปริมาตรให้เป็น 1000 มล. ปรับ pH = 7 โดยให้  $\text{Ba}(\text{OH})_2$  หรือ HCl
3. สารละลาย reactant 0.005 M  $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$   
เตรียมได้โดย : ชั่ง  $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  1.232 กรัม ละลายด้วยน้ำกลั่น ปรับปริมาตรให้เป็น 1000 มล.
4. สารละลาย ionic strength reference , 0.0015 M  $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$   
เตรียมได้โดย : ชั่ง  $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  0.3700 กรัม ละลายด้วยน้ำกลั่น ปรับปริมาตรให้เป็น 1000 มล.

### วิธีการทดลอง

1. ชั่งดินที่อบแห้งแล้ว 2 กรัม ใส่ในหลอดเซนตริฟิวส์
2. ใส่สารละลาย  $\text{BaCl}_2$  เข้มข้น 0.1 M ปริมาณ 20 มล. ใส่ในหลอดเซนตริฟิวส์ที่ใส่ดินไว้แล้ว
3. ปิดฝาแล้วนำไปเขย่าเป็นเวลา 2 ชั่วโมง
4. จากนั้นนำไปเซนตริฟิวส์ จนสารละลายที่ใส
5. ค่อย ๆ รินสารละลายที่ใสทิ้งไป แล้วใส่สารละลาย  $\text{BaCl}_2$  เข้มข้น 0.002 M ปริมาณ 20 มล. ลงในหลอดเซนตริฟิวส์นั้น
6. แล้วใส่แท่ง sonify ลงไปเพื่อให้ดินที่ตกตะกอนเกิดการกระจายตัว ใช้เวลา 10-30 วินาที
7. นำหลอดเซนตริฟิวส์นั้นไปเขย่า 1 ชั่วโมง
8. นำไปเซนตริฟิวส์ต่อจนได้สารละลายที่ใส
9. เทสารละลายส่วนที่ใสทิ้งไป แล้วทำตามข้อที่ 6-9 ทำเช่นนี้ 3-4 ครั้ง
10. ในครั้งสุดท้ายก่อนที่จะเทสารละลายที่ใสทิ้ง ให้นำหลอดเซนตริฟิวส์ที่มีดินและสารละลายไปซึ่งน้ำหนักก่อน
11. ปรับ EC ของ reactant suspension โดยใช้  $\text{MgSO}_4$  เข้มข้น 0.0015 M เป็น ionic strength reference ที่อุณหภูมิห้อง และใช้  $\text{MgSO}_4$  เข้มข้น 0.005 M เป็นตัวปรับ EC
12. นำไปเขย่าข้ามคืน
13. ชั่งหลอดเซนตริฟิวส์ที่มีดินและสารละลาย จากนั้นนำไปเซนตริฟิวส์จนได้สารละลายที่ใส
14. ค่อย ๆ รินสารละลายที่ใส แล้วนำไปวิเคราะห์

## เอกสารอ้างอิง

1. วารสารวิจัยสภาวะแวดล้อม ปีที่ 15 เล่ม 1 เดือนมกราคม-มิถุนายน , 2536
2. ศิริพร พลาสมูล " ผลกระทบของแคดเมียมในแอคติเวตเตดสลัดจ์ที่มีต่อกิจกรรมของแอมโมเนียฟายเออร์ " วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย , 2527
3. สมเจตน์ จันทวัฒน์ และคณะ ปฐพีวิทยาเบื้องต้น พิมพ์ครั้งที่ 5 คณะเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ , 2526
4. กรองแก้ว จุจันทร์ " การดูดซับและการปลดปล่อยแคดเมียม นิเกิลและสังกะสี ของดินชั้นบน " บัณฑิตวิทยาลัย สาขาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม ภาควิชาสหสาขา จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2533
5. เพิ่มพูน กীরติกสิกร เคมีของดิน ภาควิชาปฐพีศาสตร์ คณะเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
6. Mckenney , D.J. ,and J.R. Vriesacker. " Effect of Cadmium Contamination On Denitrification Processes in Brookston Clay and Fox Sandy Loam. Envi. Poll. (series B) 38, 221-233 , 1985.
7. Farrah , H. and W.F. Pickering. "Influence of Clay-Solute Interactions on Aqueous Heavy Metal Ion Levels". Water , Air and Soil Pollut. , 8 , 189-197 , 1977.
8. Wada , K. and Y. Kakuto. "Selective Adsorption of Zinc on Halloysite". Clay and Clay Minerals. vol.28(5) , 321-327 , 1980.
9. Abd - Elfattah, Aly. and K. Wada. "Adsorption of Lead, Copper, Zinc, Cobalt, and Cadmium by Soils that differ in Cation Exchange Materials". J.Soil Sci. 32 , 271-283 , 1981.

10. Harter , Robert D.. "Effect of Soil pH on Adsorption of Lead ,  
Copper, Zinc, and Nickel. Soil, Sci. Am. J. , 47-51 , 1983.
11. Sander, J.R.M.I.E.L Kherbawy. "The Effect of pH on Zn Adsorption  
Equilibria and Exchangeable Zinc Pools in Soils. Environmental  
Pollution 44 (3), 165-176, 1987.
12. B.J. Alloway Heavy Metals in soils Blackie Glasgow and London  
Halsted Press, John wiley & son ,inc Newyork.
13. Davies, Brian E. Applied Soil Trace Elements. John Willey and  
Sons. pp.259-282, 1980
14. Kim H.Tan Principles of soil chemistry 2<sup>nd</sup> Edition , MACEL  
DEKKER , inc, 1993
15. Brady, Nyle C.. The Nature and Properties of Soils. 8<sup>th</sup> ed.  
New York. Macmillan, 1974
16. ASA-SSSA. Methods of Soils Analysis, Part II Chemical and  
Microbiological Properties, (Page, A.L. ed.) 2<sup>nd</sup> ed. 677 s.  
Segoe Rd.,Madison, Wi 53711, USA. 1982
17. Tiller, Kevin G.,J.Gerth and G.Brummer. "The sorption of Cd Zn  
and Ni by Soil CLay Fraction : Procedures for Partion of Bound  
Forms and their Interpretion". Geoderma 34,1-16 , 1984
18. Tiller, Kevin G.,J.Gerth and G.Brummer." The relative Affinities  
of Cd, Ni and Zn for different Soil Clay Fractions and Geothite".  
Geoderma 34,1-16 ,1984

19. Wada, K., and Aly Abd-Elfattah. "Characterization of zinc Adsorption Sites in two Mineral Soils" Soil Sci Plant Nutri 24(3), 417-426 1978
20. Wada, K., and Aly Abd-Elfattah. "Effect of cation exchange Materials on Zinc Adsorption by soils. J.of soil Science 30,281-290 , 1979