



ใบรับรองวิทยานิพนธ์  
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต (ปฐพีวิทยา)

ปริญญา

ปฐพีวิทยา

ปฐพีวิทยา

สาขา

ภาควิชา

เรื่อง การดูดซับตะกั่ว ทองแดง สังกะสี และแคดเมียมของสเมกไทต์ในเวอร์ทิซอลส์ที่ดอน

Adsorption of Lead, Copper, Zinc and Cadmium of Smectite in Upland Vertisols

นามผู้วิจัย นางสาวเกศรา จิตนิคม

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

( รองศาสตราจารย์อัญชลี สุทธิประการ, Ph.D. )

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

( ศาสตราจารย์เอิบ เขียวรัตน์, Ph.D. )

หัวหน้าภาควิชา

( ผู้ช่วยศาสตราจารย์สมชัย อนุสนธิ์พรเพิ่ม, Ph.D. )

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

( รองศาสตราจารย์กัญจนา ชีระกุล, D.Agr. )

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ ..... เดือน ..... พ.ศ. ....

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การดูดซับตะกั่ว ทองแดง สังกะสี และแคดเมียมของสเมกไทต์  
ในเวอร์ทิซอลส์ที่ดอน

Adsorption of Lead, Copper, Zinc and Cadmium of Smectite  
in Upland Vertisols

โดย

นางสาวเกษรา จิตนิยม

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์  
เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (ปฐพีวิทยา)

พ.ศ. 2555

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เกษรา จิตนิยม 2555: การดูดซับตะกั่ว ทองแดง สังกะสี และแคดเมียมของสเมกไทต์ใน  
เวอร์ทีซอลส์ที่ค่อน ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (ปฐพีวิทยา) สาขาปฐพีวิทยา ภาควิชา  
ปฐพีวิทยา อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: รองศาสตราจารย์อัญชลี สุทธิประการ, Ph.D.  
134 หน้า

การศึกษาดูดซับ ตะกั่ว แคดเมียม สังกะสี และ ทองแดง ของสเมกไทต์ในเวอร์ทีซอลส์ที่ค่อน  
โดยศึกษาในตัวอย่างอนุภาคขนาดดินเหนียวของดินชั้นบนและดินชั้นล่างในเวอร์ทีซอลส์ที่ค่อน ได้แก่  
ชุดดินบุรีรัมย์ (Br) ชุดดินลพบุรี (Lb) ชุดดินชัยบาดาล (Cd1, Cd2) ชุดดินสมอทอด (Sat1, Sat2) และชุดดิน  
วังชมภู (Wc1, Wc2) ซึ่งมีสเมกไทต์เป็นองค์ประกอบหลัก ทำการทดลองแบบแบตช์ (batch experiment)  
ปัจจัยที่ศึกษาได้แก่ค่าพีเอช และความเข้มข้นของโลหะหนักในสารละลาย

จากการศึกษาพบว่าความสามารถของสเมกไทต์ในการดูดซับมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นเมื่อพีเอชมีค่า  
สูงขึ้น ตะกั่ว ทองแดง และสังกะสี ถูกดูดซับได้มากที่สุด ในช่วงพีเอช 5-8 ร้อยละ 89.48, 84.94, 85.91  
ตามลำดับ สำหรับ แคดเมียมถูกดูดซับได้มากที่สุดในช่วงพีเอช 6-8 โดยดูดซับได้สูงสุดร้อยละ 49.77  
การศึกษาผลของความเข้มข้นของตะกั่ว ทองแดง สังกะสี และแคดเมียม พบว่าการดูดซับโลหะหนักจะ  
เพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของโลหะหนักในสารละลายที่เพิ่มขึ้นจนถึงความเข้มข้นที่ 50 มิลลิกรัมต่อลิตร  
หลังจากนั้นปริมาณการดูดซับจะคงที่ โดยปริมาณการดูดซับตะกั่ว สังกะสี ทองแดง และแคดเมียม มาก  
ที่สุดเท่ากับ 44.59, 42.43, 42.37 และ 22.17 มิลลิกรัมต่อกรัม ซึ่งปริมาณการดูดซับโลหะหนักจะขึ้นอยู่กับ  
ปริมาณสเมกไทต์ที่มีอยู่ในอนุภาคดินเหนียวโดยปริมาณการดูดซับสูงสุดจะอยู่ในกลุ่มตัวอย่างที่มี  
สเมกไทต์สูง (80-90%) และดูดซับได้น้อยที่สุดในกลุ่มตัวอย่างที่มีสเมกไทต์ต่ำ (20-40%) จากค่าการ  
ดูดซับสูงสุดแสดงว่าสเมกไทต์สามารถดูดซับตะกั่วได้มากที่สุดรองลงมา คือ ทองแดง สังกะสี และ  
แคดเมียมถูกดูดซับได้น้อยที่สุดโดยสมการที่สามารถอธิบายการดูดซับได้เหมาะสมที่สุด คือ สมการของ  
Langmuir

ปริมาณการดูดซับโลหะหนักจะขึ้นอยู่กับปริมาณสเมกไทต์ที่มีอยู่ในกลุ่มอนุภาคดินเหนียว โดยที่  
ค่าพีเอชที่สูงขึ้นสามารถเพิ่มการดูดซับโลหะหนักให้สูงขึ้น ชนิดและปริมาณโลหะหนักในสารละลายเป็น  
ปัจจัยจำกัดความสามารถในการดูดซับโลหะหนักของสเมกไทต์ ดังนั้นในเวอร์ทีซอลส์ที่ค่อนซึ่งมีค่า  
พีเอชในช่วงที่เป็นกลาง-ด่าง และมีปริมาณสเมกไทต์ที่มีเสถียรสูงสามารถลดการแพร่กระจายของโลหะ  
หนักได้โดยมีอิทธิพลของพีเอช ชนิดและปริมาณของโลหะหนักที่ปนเปื้อนเป็นกรณีวัดระดับความเป็น  
พิษที่จะเกิดขึ้นในสภาพแวดล้อมของดิน

---

ลายมือชื่อนิสิต

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

Kessara Jitniyom 2012: Adsorption of Lead, Copper, Zinc and Cadmium of Smectite in Upland Vertisols. Master of Science (Soil Science), Major Field: Soil Science, Department of Soil Science. Thesis Advisor: Associate Professor Anchalee Suddhiprakarn, Ph.D. 134 pages.

The study on adsorption of lead, copper, zinc and cadmium by smectite in upland Vertisols was conducted using clay fraction samples from topsoil and subsoil of Buri Rum (Br), Lop Buri (Lb), Chai Badan (Cd1, Cd2), Samo Thod (Sat1, Sat2) and Wang Chomphu (Wc1, Wc2) series, where smectite dominates their clay fraction. The batch experiment technique was employed emphasizing on the effects of pH and concentrations of heavy metals in the soil solution.

Results of the study revealed that the ability of smectite for adsorption tended to increase with increasing pH. The highest amount of lead, copper and zinc were selectively adsorbed in the pH range between 5-8 at 89.48, 84.94 and 85.91 percent respectively. Cadmium was best adsorbed in pH range between 6-8 at 49.77 percent. For study on the effect of lead, copper, zinc and cadmium concentrations on adsorption capacity, it was found that the adsorptive capacity increased with the increase of heavy metal concentrations up to 50 mg L<sup>-1</sup> where the constant rate for adsorption was observed. The highest content of lead, copper, zinc and cadmium adsorbed were 44.59, 42.43, 42.37 and 22.17 mg g<sup>-1</sup> respectively. Adsorption capacity for heavy metals depended on the amount of smectite in the clay. Clay samples with high smectite content (80-90%) had the highest capacity for adsorption whereas the ones with low smectite contents (20-40%) had the lowest adsorption capacity. Based on the highest adsorption values obtained, smectite could adsorb lead highest followed by zinc and copper. Cadmium was adsorbed lowest. The equation suitable for characterizing the adsorption was Langmuir equation.

Adsorption of heavy metals depends on the content of smectite in the clay fraction. The high solution pH can increase the adsorption capacity. Kind and concentration of heavy metals are limiting factors for ability to adsorb heavy metals of smectite. Therefore, the upland neutral-alkaline Vertisols dominated by stable smectite clay could effectively limit the distribution of heavy metals. This also depends on soil pH, kind and concentration of heavy metals. These parameters should thus provide the index for assessing toxicity of heavy metals in soil environmental setting.

---

Student's signature

---

Thesis Advisor's signature

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ไม่สามารถสำเร็จลุล่วงได้หากปราศจากท่านอาจารย์ทั้งสอง ขอขอบพระคุณ รศ. ดร. อัญชลี สุทธิประการ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลักที่คอยให้คำแนะนำอบรมสั่งสอน และให้แง่คิดในการทำงาน ขอขอบคุณศาสตราจารย์ ดร. เอิบ เขียวรีนรมณ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วมที่คอยชี้แนะ เพิ่มเติมความรู้ และประสบการณ์อันมีค่าที่ไม่สามารถหาได้จากที่ไหน ขอขอบคุณ ดร. ณัฐพล จิตมาตย์ ที่คอยให้คำปรึกษาทางด้านงานวิชาการ และข้อมูลประกอบการทำวิทยานิพนธ์ครั้งนี้

ขอขอบคุณพี่ ๆ น้อง ๆ และเพื่อน ๆ ห้อง ป.412 ทุกคนที่คอยให้ความช่วยเหลือทั้งแรงกายแรงใจ ขอขอบคุณพี่ขวัญตา พี่ดาวจรัส พี่วิทยา ที่ให้กำลังใจให้ฝ่าฟันอุปสรรคต่าง ๆ มากมายที่เข้ามา ขอขอบคุณ ดร. กมลวรรณ เหล่าพูลกิจ ที่เป็นทั้งพี่และเพื่อนที่แสนดีทั้ง ยามทุกข์ และยามสุข และนางสาวกานต์มณี จันทร์ขาว ที่เป็นกำลังใจ และอยู่เคียงข้างเสมอมา

สุดท้ายนี้ขอขอบคุณครอบครัว จิตนิม คุณพ่อ คุณแม่ พี่ชายที่ผลักดันให้มีชีวิตที่ดีได้ถึงทุกวันนี้ไม่ว่าจะล้มลงสักกี่ครั้งก็ไม่เคยทอดทิ้งและห่างหายไปไหน

เกษรา จิตนิม

มีนาคม 2555

## สารบัญ

## หน้า

สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(3)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	3
การตรวจเอกสาร	4
อุปกรณ์และวิธีการ	34
อุปกรณ์	34
วิธีการ	35
ผลและวิจารณ์	40
สรุปและข้อเสนอแนะ	77
สรุป	77
ข้อเสนอแนะ	79
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	80
ภาคผนวก	96
ประวัติการศึกษาและการทำงาน	134

## สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	สูตรอุณหภูมิต่างเคมีของสมกไทต์	10
2	การจัดจำแนก สภาพแวดล้อม และตำแหน่งของเวอรัทโซลส์ที่ตอนที่ทำการศึกษา	42
3	สมบัติทางฟิสิกส์ในตัวอย่างดินชั้นบนและล่างที่ทำการศึกษา	50
4	สมบัติทางเคมีในตัวอย่างดินชั้นบนและล่างที่ทำการศึกษา	52
5	ปริมาณ ตะกั่ว ทองแดง สังกะสี และแคดเมียม ในตัวอย่างอนุภาคขนาดดินเหนียว	57
<b>ตารางผนวกที่</b>		
1	การแบ่งกลุ่มเนื้อดิน	115
2	ข้อกำหนดที่ใช้ในการประเมินระดับสมบัติทางเคมี และการประเมินความอุดมสมบูรณ์ของดิน	116
3	เกณฑ์การแบ่งระดับความหนาแน่นรวมของดิน	119
4	สมบัติของดินทั่วไปเปรียบเทียบกับดินเค็ม ดินโซดิก และดินเค็ม โซดิก	119
5	X-ray diffraction spacing from (001) planes of layer silicate species related to sample treatment.	120
6	ผลการวิเคราะห์ปริมาณองค์ประกอบเชิงแร่ในกลุ่มอนุภาคขนาดดินเหนียว	121
7	ผลการทดลองอิทธิพลของพีเอชที่มีผลต่อการดูดซับ ตะกั่ว ทองแดง สังกะสี และแคดเมียมในตัวอย่างอนุภาคขนาดดินเหนียว	122
8	ค่าสหสัมพันธ์ที่ได้จากสมการ Langmuir และสมการ Freundlich ในการดูดซับ ตะกั่ว ทองแดง สังกะสี และแคดเมียม	130

## สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	ตัวอย่างภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่งผ่าน (Transmission electron microscope: TEM) ลักษณะรูปร่างและขนาดเร็ดินเหนียวชนิดต่าง ๆ	6
2	ความสัมพันธ์ของสารละลายดินและการเคลื่อนที่ของไอออนในสารละลายไปสู่แหล่งต่าง ๆ	22
3	ลักษณะเส้นกราฟไอโซเทิร์มของการดูดซับ	27
4	ไอโซเทิร์มการดูดซับแบบเชิงเส้นของ Freundlich	29
5	ไอโซเทิร์มการดูดซับแบบเชิงเส้นของ Langmuir	31
6	หน้าตัดดิน และการใช้ที่ดินของเวอร์ทิซอลส์ที่ดอน	41
7	ร้อยละการดูดซับของตะกั่ว ทองแดง สังกะสี และแคดเมียมในตัวอย่างอนุภาคขนาดดินเหนียวที่มีปริมาณสเมกไทต์ร้อยละ 80-90 ที่ค่าพีเอช 3-8	59
8	ร้อยละการดูดซับของตะกั่ว ทองแดง สังกะสี และแคดเมียมในตัวอย่างอนุภาคขนาดดินเหนียวที่มีปริมาณสเมกไทต์ร้อยละ 50-60 ที่ค่าพีเอช 3-8	60
9	ร้อยละการดูดซับของตะกั่ว ทองแดง สังกะสี และแคดเมียมในตัวอย่างอนุภาคขนาดดินเหนียวที่มีปริมาณสเมกไทต์ร้อยละ 30-40 ที่ค่าพีเอช 3-8	61
10	ปริมาณการดูดซับตะกั่ว ทองแดง สังกะสี และแคดเมียม ในตัวอย่างอนุภาคขนาดดินเหนียวที่มีปริมาณสเมกไทต์ร้อยละ 80-90 ที่ความเข้มข้นของสารละลายต่าง ๆ ที่พีเอช 6	65
11	ปริมาณการดูดซับตะกั่ว ทองแดง สังกะสี และแคดเมียมในตัวอย่างอนุภาคขนาดดินเหนียวที่มีปริมาณสเมกไทต์ร้อยละ 50-60 ที่ความเข้มข้นของสารละลายต่าง ๆ ที่พีเอช 6	66
12	ปริมาณการดูดซับตะกั่ว ทองแดง สังกะสี และแคดเมียมในตัวอย่างอนุภาคขนาดดินเหนียวที่มีปริมาณสเมกไทต์ร้อยละ 30-40 ที่ความเข้มข้นของสารละลายต่าง ๆ ที่พีเอช 6	67
13	การดูดซับตะกั่ว โดยสมการ Langmuir (A) และสมการ Freundlich (B)	70
14	การดูดซับทองแดง โดยสมการ Langmuir (A) และสมการ Freundlich (B)	71
15	การดูดซับสังกะสี โดยสมการ Langmuir (A) และสมการ Freundlich (B)	72

## สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
16	ดูดซับแอดเมียมโดยสมการ Langmuir (a) และสมการ Freundlich (b)	73
17	ลักษณะ L-curve การดูดซับในตัวอย่างอนุภาคขนาดดินเหนียวที่มีปริมาณ สเมกไทต์แตกต่างกันที่ได้จากการทดลอง	74
<b>ภาพผนวกที่</b>		
1	กราฟการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ขององค์ประกอบเชิงแร่ในตัวอย่างอนุภาคขนาด ดินเหนียวที่มีแร่สเมกไทต์เป็นองค์ประกอบหลัก (Br_Topsoil)	133
2	กราฟการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ขององค์ประกอบเชิงแร่ในตัวอย่างอนุภาคขนาด ดินเหนียวที่มีแร่สเมกไทต์เป็นองค์ประกอบหลัก (Cd1_Subsoil)	133

## การดูดซับตะกั่ว ทองแดง สังกะสี และแคดเมียม ของสเมกไทต์ในเวอร์ทิซอลส์ที่ดอน

### Adsorption of Lead, Copper, Zinc and Cadmium of Smectite in Upland Vertisols

#### คำนำ

ดินเป็นปัจจัยสำคัญในระบบนิเวศเป็นแหล่งธาตุอาหารของพืช และเป็นแหล่งมวลชีวภาพของสิ่งแวดลอม ดินเป็นองค์ประกอบของสิ่งต่างชนิดกันทั้งในส่วนที่เป็นของแข็ง อินทรีย์วัตถุแร่ และในส่วนที่เป็นของเหลวซึ่งรวมส่วนที่เป็นอากาศ และน้ำทำให้เกิดการแลกเปลี่ยนไอออนต่าง ๆ ในระบบ ดินสามารถดูดซับ โลหะหนักที่อยู่ในรูปของสารละลายเมื่อโลหะหนักอยู่ในสารละลายเป็นจำนวนมากอาจก่อให้เกิดปัญหาทางสิ่งแวดล้อมและมลภาวะในดินได้ (Alloway, 1995)

ปัญหาจากการปนเปื้อนโลหะหนักมีความสำคัญทำให้เกิดความเป็นพิษ และขยายเป็นวงกว้างจากพื้นที่หนึ่งสู่อีกพื้นที่หนึ่ง โดยโลหะหนักจะอยู่ในสารละลายดินและถูกดูดซับบริเวณผิวหน้าของแข็ง ซึ่งเป็นกลไกสำคัญในการควบคุมปริมาณของโลหะหนักในสารละลายดินและป้องกันการปนเปื้อนของโลหะหนักออกสู่แหล่งน้ำธรรมชาติ โลหะหนักเป็นอันตรายต่อสิ่งแวดล้อมโดยเฉพาะหากปนเปื้อนเข้าสู่ห่วงโซ่อาหาร ทำให้เกิดอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตหากได้รับในปริมาณมาก หรือบางชนิดสามารถเป็นพิษแม้ได้รับในปริมาณเล็กน้อย

สเมกไทต์เป็นแร่ดินเหนียวในกลุ่มฟิลโลซิลิเกตมีโครงสร้างพื้นฐานแบบชนิด 2:1 ประกอบด้วย แผ่นเตตระฮีดรอล (tetrahedral) 2 แผ่น และแผ่นออกทะฮีดรอล (octahedral) 1 แผ่น สเมกไทต์ที่พบในดินส่วนใหญ่ คือ มอนต์มอริลโลไนต์ (montmorillonite) และไบเดลไลต์ (beidellite) แม้ว่าสเมกไทต์สามารถพบได้ในดินหลายชนิดแต่จะพบมากในเวอร์ทิซอลส์และเป็นแร่เด่นในดินอันดับนี้ (Soil Survey Staff, 1999; Pal *et al.*, 2009) สเมกไทต์มีค่าความจุแลกเปลี่ยนแอนไอออน (anion exchange capacity: AEC) ต่ำ ค่าความจุแลกเปลี่ยนแคตไอออน (cation exchange capacity: CEC) สูง ทำให้ดินที่มีสเมกไทต์มีความอุดมสมบูรณ์สูง เนื่องจากสเมกไทต์สามารถยึดปุ๋ยที่มีลักษณะเป็นแคตไอออน เช่น โพแทสเซียม และแอมโมเนียม และยังดูดซับธาตุอาหารพืช เช่น แคลเซียม แมกนีเซียม ทองแดง และสังกะสี สเมกไทต์มีพื้นที่ผิวจำเพาะ (specific surface) สูงและสามารถเกิดสารเชิงซ้อนกับอินทรีย์วัตถุในดิน ยาฆ่าแมลง ยาปราบศัตรูพืชซึ่งได้มีการประยุกต์มอนต์มอริลโลไนต์เพื่อกำจัดโลหะหนักและสารประกอบที่มาจากยาฆ่าแมลง (Borchardt, 1989; Nater; 2000; Reid and Ulery, 2002; Khaorapong, 2006; Brady and Weil, 2008)

แคดเมียม (Cd) สังกะสี (Zn) ทองแดง (Cu) นิกเกิล (Ni) ปรอท (Hg) และโครเมียม (Cr) เป็นโลหะที่มักพบจากของเสียอุตสาหกรรมที่เกิดจากโรงหล่อโลหะ การทำเหมืองแร่ โรงงานผลิตแบตเตอรี่ และโรงงานผลิตสารเคมีกำจัดศัตรูพืช ซึ่งเป็นแหล่งทำให้เกิดการปนเปื้อนโลหะเหล่านี้ ออกสู่สิ่งแวดล้อม (Kadirvelu *et al.*, 2001; Balistreri and Bank, 2008; Bhattacharyya *et al.*, 2008) วิธีการบำบัดโลหะหนักจากแหล่งปนเปื้อนประกอบไปด้วย การตกตะกอนทางเคมี การแลกเปลี่ยนไอออน การสกัดด้วยน้ำยาเคมี และการใช้วัสดุที่มีความสามารถในการดูดซับ เช่น คาร์บอนกัมมันต์ (activated carbon) ซึ่งเป็นวัสดุที่ได้รับความนิยมที่ใช้ดูดซับโลหะหนักได้ดีในแหล่งน้ำเสียแต่มีข้อจำกัดในด้านราคาที่สูง (Kumar, 2006)

เนื่องจากสมกไทต์มีความจุแลกเปลี่ยนแคตไอออน (CEC) และมีพื้นที่ผิวจำเพาะสูงสมบัติดังกล่าวมีส่วนช่วยในการดูดซับโลหะหนักที่เป็นแคตไอออนไว้ได้ ด้วยเหตุนี้การศึกษาสมบัติของสมกไทต์ที่มีต่อโลหะหนักจะสามารถอธิบายถึงลักษณะการดูดซับโลหะหนักของสมกไทต์รวมทั้งความสัมพันธ์ของโลหะหนักกับสมกไทต์และปัจจัยที่มีผลต่อความสัมพันธ์นี้ การศึกษานี้จะทำให้เข้าใจถึงบทบาทและความสำคัญของสมกไทต์ ซึ่งนอกจากเป็นแหล่งกักเก็บธาตุอาหารและแลกเปลี่ยนให้แก่พืชแล้ว ในทางสิ่งแวดล้อมยังช่วยในการดูดซับสารที่เป็นพิษในดินและช่วยลดปัญหาการปนเปื้อนของโลหะหนักในห่วงโซ่อาหาร ซึ่งจะเป็นสาเหตุที่ก่อให้เกิดอันตรายแก่มนุษย์และสิ่งมีชีวิตอื่น ๆ ได้

## วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาลักษณะการดูดซับตะกั่ว ทองแดง สังกะสี และแคดเมียม ของสเมกไทต์ในเวอร์ทิซอลส์ที่คอน
2. เพื่อศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับการดูดซับตะกั่ว ทองแดง สังกะสี และแคดเมียม ของสเมกไทต์ในเวอร์ทิซอลส์ที่คอน



## การตรวจเอกสาร

### 1. แร่ดินเหนียว

แร่ดินเหนียว (clay minerals) หมายถึง แร่กลุ่มอะลูมิโนซิลิเกตซึ่งส่วนใหญ่มีขนาดเล็กกว่า 2 ไมโครเมตร มีโครงสร้างเป็นแผ่นโดยจะประกอบไปด้วยแผ่นซิลิกาและแผ่นอะลูมินาซ้อนกันแบบ 1:1 หรือ 2:1 มีทั้งขยายตัวได้และขยายตัวไม่ได้ แร่ดินเหนียวที่พบได้ในดินเขตร้อนมักประกอบด้วย แร่กลุ่มเคโอลิน สเมกไทต์ อิลไลต์ เวอร์มิคิวไลต์ และคลอไรต์ เมื่อศึกษาแร่ดินเหนียวเหล่านี้โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนจะพบว่าแร่มีรูปร่างเรขาคณิตแตกต่างกัน อาจเป็นแผ่นยาว เป็นเส้น เป็นหลอดหรือเป็นท่อ (อัญชลี, 2534, 2553; คณะกรรมการจัดทำพจนานุกรมปฐพีวิทยา, 2551; Olson *et al.*, 2000)

แร่ดินเหนียวแต่ละชนิดมีสภาพแวดล้อมและกระบวนการในการเกิดแตกต่างกัน กระบวนการหลักได้แก่ การเกิดขึ้นใหม่ (neof ormation) และการเปลี่ยนสภาพ (transformation หรือ alteration) แร่ดินเหนียวสามารถสร้างผลึกขึ้นมาใหม่ได้จากสารละลายในสภาพแวดล้อมที่มีการผุพังสลายตัวอยู่กับที่ เช่น เคโอลินต์เกิดขึ้นได้ในสภาพที่เป็นกรด และสเมกไทต์เกิดขึ้นได้ในสภาพที่เป็นด่างเป็นต้น ทั้งนี้ยังขึ้นอยู่กับองค์ประกอบอย่างอื่นด้วย เช่น สเมกไทต์นอกจากจะเกิดในสภาพด่างแล้วในสารละลายนั้นจะต้องมีแมกนีเซียมสูง การชะละลายต่ำ เพื่อไม่ให้ไอออนที่จำเป็นต่อการสร้างตัวของสเมกไทต์ถูกชะละลายออกไปจึงพบสเมกไทต์ได้มากในเวอร์ทิซอลส์ เนื่องจากมีสภาพแวดล้อมที่เหมาะสม เพราะฉะนั้นชนิดของแร่ดินเหนียวที่พบในดินจะขึ้นอยู่กับสมบัติของไอออนในสารละลายหลังจากเกิดการผุพังสลายตัว และอีกกระบวนการหนึ่ง คือ แร่ดินเหนียวอาจเปลี่ยนสภาพจากชนิดหนึ่งไปเป็นอีกชนิดหนึ่งได้ โดยที่โครงสร้างหลักไม่เปลี่ยนแปลง เช่น การเปลี่ยนมัสโคไวต์ไปเป็นอิลไลต์ ซึ่งมัสโคไวต์มีโครงสร้างแบบชนิด 2:1 ที่ไม่ขยายตัวเมื่อเกิดการปลดปล่อยโพแทสเซียมและอะลูมินัมจะเปลี่ยนเป็นอิลไลต์ โดยที่โครงสร้างยังคงเป็น 2:1 เช่นเดิม และเมื่อการเคลื่อนย้ายโพแทสเซียมยังคงดำเนินต่อไปแมกนีเซียมจะแทนที่อะลูมินัมบางตัวในแผ่นอะลูมินาทำให้เกิดสเมกไทต์ขึ้นได้ (เทียนชัย, 2539; Churchman, 2000; Brady and Weil, 2008)

### 2. สมบัติที่สำคัญของแร่ดินเหนียว

แร่ดินเหนียวมีบทบาทสำคัญต่อสมบัติเคมีและสมบัติฟิสิกส์ในดิน โดยมีลักษณะสมบัติที่สำคัญ ดังนี้

## 2.1 รูปร่างและขนาดของแร่ดินเหนียว

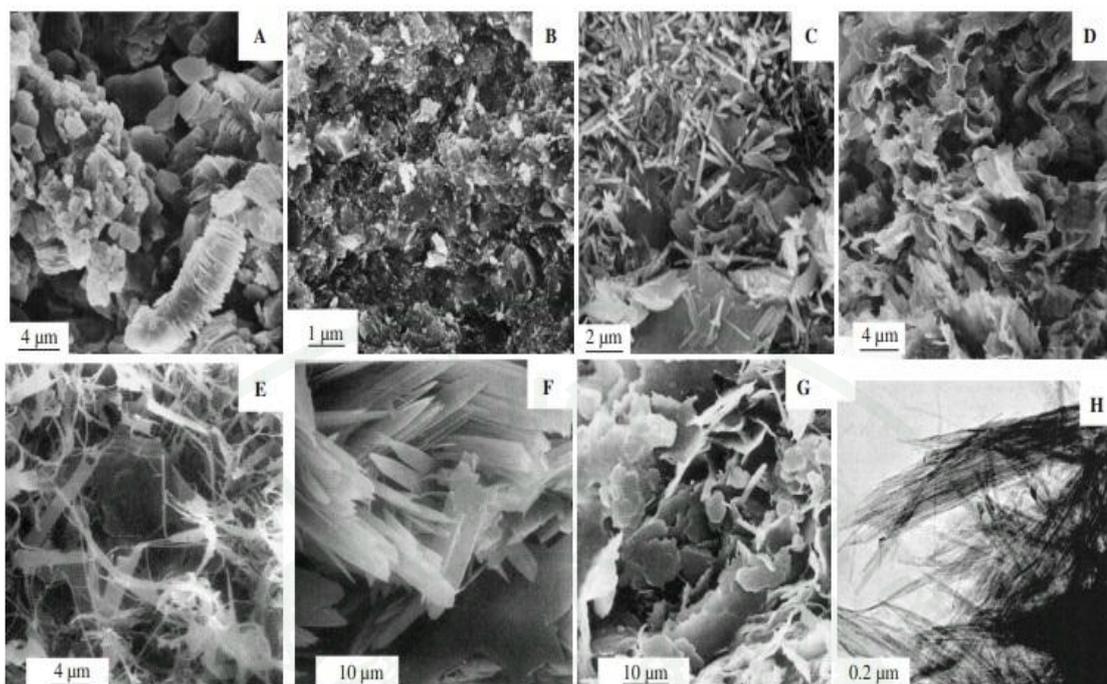
ลักษณะรูปร่างของแร่ดินเหนียวเกิดจากการซ้อนทับระหว่างแผ่นเทระฮิเดรลที่มีซิลิกาเป็นองค์ประกอบและแผ่นออกทอะฮิเดรลที่มีอะลูมินา ( $Al_2(OH)_6$  หรือ  $Al(OH)_3$ ) เป็นองค์ประกอบ จึงให้รูปร่างและลักษณะเป็นแผ่นลักษณะดังกล่าวทำให้สามารถดูดซับแคตไอออนต่าง ๆ ได้ดี รูปร่างและลักษณะของแร่ดินเหนียวแต่ละกลุ่มจะมีลักษณะที่แตกต่างกัน

แร่ในกลุ่มเคโอลินเป็นจัดเป็นแร่ฟิลโลซิลิเกตชนิด 1:1 มีลักษณะรูปร่างขนาดเล็ก เป็นแผ่นบางรูปหกเหลี่ยมซึ่งเป็นลักษณะที่พบมากที่สุดและทนทานต่อการสลายตัว (David and Patrick, 1998) เมื่อเปรียบเทียบกับสมกไทด์ที่เป็นแร่ดินเหนียวในกลุ่ม 2:1 ที่มีลักษณะรูปร่างเป็นก้อนกลมแบบลิ้น หรือเป็นผิวเคลือบหลายเหลี่ยม (polygonal coating) (อัญชติ, 2553) โดยลักษณะรูปร่างและขนาดของแร่ดินเหนียวสามารถศึกษาได้จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่งผ่าน (transmission electron microscope: TEM) ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่สามารถดูรูปร่างแร่ดินเหนียวรวมทั้งขนาดได้อย่างชัดเจน (ภาพที่ 1)

รูปร่างและขนาดของแร่ดินเหนียวมีความสำคัญทั้งในด้านการยืดขยายตัว (flexible) ความแข็งแรงของอนุภาค (strength) และการเสียดสีผิวหน้าระหว่างอนุภาค (friction surface) สมบัติดังกล่าวมีความสำคัญอย่างยิ่งทางวิศวกรรมการปลูกสร้างอาคารบ้านเรือน โดยต้องศึกษาถึงโครงสร้างและลักษณะของแร่ดินเหนียวที่อยู่ในดินซึ่งเป็นที่รองรับสิ่งปลูกสร้างเพื่อลดปัญหาและความเสียหายที่จะเกิดจากการเปลี่ยนแปลงของแร่ดินเหนียวในสภาวะต่าง ๆ (Berilgen *et al.*, 2006; Youn and Tonon, 2010)

## 2.2 พื้นที่ผิวและพื้นที่ผิวจำเพาะ

ด้วยลักษณะรูปร่างและขนาดของแร่ดินเหนียวที่มีขนาดเล็ก โครงสร้างเป็นแผ่นจึงทำให้มีพื้นที่ผิวสัมผัสสูง ทั้งในส่วนที่พื้นที่ผิวสัมผัสบริเวณผิวหน้า (external surface) และบริเวณพื้นที่ผิวด้านในของแร่ดินเหนียว (internal surface) โดยเฉพาะแร่ดินเหนียวในกลุ่มของ 2:1 ที่มีหลิบระหว่างชั้นของแร่ทำให้สามารถเพิ่มพื้นที่ในการสัมผัสได้มากขึ้น ลักษณะของพื้นที่ผิวสัมผัสสูงทำให้ความจุในการดูดซับแคตไอออนต่าง ๆ ในดินเพิ่มสูงขึ้นได้ พื้นที่ผิวของแร่ดินเหนียวมีความสัมพันธ์กับการแลกเปลี่ยนแคตไอออน ในแร่ดินเหนียวที่มีพื้นที่ผิวสัมผัสมากจะมีค่าความจุแลกเปลี่ยนแคตไอออนสูง



**ภาพที่ 1** ตัวอย่างภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (Transmission electron microscope: TEM) ลักษณะรูปร่างและขนาดแร่ดินเหนียวชนิดต่าง ๆ (A) kaolinite, (B) lint clay, (C) halloysite, (D) smectite or illite/smectite, (E) filament illite, (F) lath-shaped illite, (G) pseudo-hexagonal illite, (H) fibrous palygorskite

**ที่มา:** Bergaya and Lagaly (2006)

การศึกษาพื้นที่ผิวสัมผัสของแร่ดินเหนียวจึงเป็นสิ่งสำคัญที่จะช่วยให้เข้าใจ การดูดซับ อินทรีย์วัตถุ สารอนินทรีย์ ธาตุอาหาร และการแลกเปลี่ยนแคตไอออนต่าง ๆ รวมทั้งการละลายได้ ของแร่ (Macht *et al.*, 2011)

### 2.3 การขยายตัวและหดตัว

การขยายตัวของดินเหนียวขึ้นอยู่กับลักษณะโครงสร้าง แร่ดินเหนียวในกลุ่มของแร่ 1:1 ไม่สามารถยึดขยายตัวได้เนื่องจากไม่มีหลักระหว่างชั้นของแร่ทำให้โมเลกุลของน้ำไม่สามารถเข้าไปแทรกและทำให้เกิดการขยายตัว การขยายตัวและการหดตัวของแร่ดินเหนียวเป็นสมบัติเด่นของแร่ในกลุ่ม 2:1 เนื่องจากมีหลักระหว่างชั้น (interlayer) ของแร่ ซึ่งคูยึดกันด้วยแรงที่อ่อนทำให้โมเลกุลของน้ำสามารถแทรกเข้าไปได้ง่าย เมื่อน้ำเข้าไปอยู่ในหลักระหว่างชั้นมากขึ้นทำให้ช่องว่างระหว่างดินเหนียวเพิ่มมากขึ้นทำให้เมื่อเปียกน้ำสามารถขยายตัวได้ แต่ถ้าทำให้แร่ดินเหนียวแห้งลง

น้ำที่อยู่ภายในช่องว่างของแร่ดินเหนียวจะสูญหายไป ทำให้ช่องว่างภายในหีบระหว่างชั้นของแร่เกิดการยุบตัวและเกิดการหดตัวของแร่ดินเหนียว

สมบัติการขยายตัวของแร่เกี่ยวข้องกับ การแทรกตัวของโมเลกุลของน้ำภายในหีบระหว่างชั้นของแร่สมบัติดังกล่าวมีทั้งข้อดีและข้อเสีย ข้อเสีย คือ ลักษณะดังกล่าวจะทำให้เกิดความเสียหายกับสิ่งปลูกสร้างที่ปลูกในพื้นที่ที่มีแร่ดินเหนียวชนิด 2:1 แต่ในทางอุตสาหกรรมและวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม แร่ดินเหนียวที่สามารถยึดขยายตัวได้ดีสามารถนำมาเป็นวัสดุรองพื้นในหลุมฝังกลบขยะเพื่อดูดซับและกักเก็บน้ำชะขยะที่มีการปนเปื้อนของโลหะหนักเอาไว้ในวัสดุรองพื้นเพื่อไม่ให้ออกสู่สภาพแวดล้อมภายนอก (Kalkan and Akbulut, 2004)

#### 2.4 ประจุลบและการดูดซับแคตไอออน

ประจุลบที่เกิดขึ้นในแร่ดินเหนียวจะเกิดจากการแทนที่ขนาดเท่าของแคตไอออนโดย  $Al^{3+}$  แทนที่  $Si^{4+}$  ในแผ่นของเททระฮีดรอล และ  $Mg^{2+}$   $Fe^{2+}$   $Fe^{3+}$  แทนที่  $Al^{3+}$  ในแผ่นออกทะฮีดรอล ซึ่งการแทนที่ไอออนที่เกิดขึ้นทำให้เกิดประจุลบบนแร่ดินเหนียว โดยเฉพาะในแร่ของกลุ่ม 2:1 ที่มีการแทนที่ของไอออนได้มาก เนื่องจากมีหีบระหว่างชั้นของแร่ซึ่งทำให้เกิดการแลกเปลี่ยนไอออนได้มากกว่า โดยลักษณะประจุที่เกิดขึ้นเป็นประจุถาวร (permanent charge) นอกจากการแทนที่ไอออนแล้วการเปลี่ยนแปลงพีเอชในสารละลายเป็นปัจจัยหนึ่งที่ทำให้เกิดประจุลบบนแร่ดินเหนียว ซึ่งการเกิดประจุที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงของพีเอชเรียกว่า ประจุผันแปร (variable charge) ซึ่งแร่ในกลุ่มของ 1:1 (เค โอลิไนต์) จะเกิดประจุลบจากการเปลี่ยนแปลงพีเอชได้ดี (Naidu *et al.*, 1998)

ลักษณะประจุลบที่เกิดบนแร่ดินเหนียวทำให้เกิดการดูดซับของแคตไอออนบนแร่ดินเหนียวทั้งแคตไอออนที่เป็นธาตุอาหารของพืช เช่น  $K^+$   $NH_4^+$   $Ca^{2+}$   $Mg^{2+}$  หรือ แคตไอออนที่เป็นธาตุพิษ เช่น  $Cd^{2+}$   $Pb^{2+}$   $Cs^+$   $Sr^{2+}$  เป็นต้น จากการศึกษานี้ของ Apple and Lena (2002) ได้ศึกษาผลของความเข้มข้นโลหะหนักในสารละลาย พีเอช และประจุบนผิวของอนุภาคดินที่มีผลต่อการดูดซับของตะกั่วและแคดเมียมในดินเขตร้อน โดยศึกษาในออกซิซอลต์ มอลลิซอลต์ และอัลทิซอลต์ พบว่าการดูดซับโลหะหนักสูงสุดจะอยู่ในออกซิซอลต์และอัลทิซอลต์ ซึ่งการดูดซับดังกล่าวตอบสนองต่อลักษณะของแร่ที่เป็นองค์ประกอบและค่าพีเอชที่เปลี่ยนไป โดยดินทั้งสองอันดับมีแร่เค โอลิไนต์เป็นองค์ประกอบหลัก ซึ่งแร่ดังกล่าวมีลักษณะประจุที่เกิดขึ้นจะตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงของพีเอช ทำให้การดูดซับที่เกิดขึ้นเพิ่มขึ้นเมื่อพีเอชเพิ่ม (Naidu *et al.*, 1998; Puls *et al.*, 1991; Yong and Phadungchewit, 1993)

### 3. สมกไทต์

สมกไทต์เป็นกลุ่มของแร่ดินเหนียวที่มีความสำคัญที่พบได้ทั้งในดินและในตะกอนต่าง ๆ เป็นแร่ซิลิเกตที่ขยายตัวได้ จัดอยู่ในกลุ่มแร่ฟิลาโลซิลิเกต (phyllosilicate) มีโครงสร้างพื้นฐานเป็นแบบชนิด 2:1 โดยแผ่นออกทอะฮิดรอลจะใช้ออกซิเจนร่วมกันกับแผ่นเททระฮิดรอลอีก 2 แผ่น ในหนึ่งหน่วยสูตรของสมกไทต์มีประจุตั้งแต่ 0.20-0.60 การจำแนกชนิดของแร่ในกลุ่มสมกไทต์พิจารณาจากการแทนที่ของแคตไอออนทั้งในแผ่นออกทอะฮิดรอลและแผ่นเททระฮิดรอล สมบัติที่แตกต่างกันจากการแทนที่ของแคตไอออน รวมทั้งองค์ประกอบที่แตกต่างกันโดยเปรียบเทียบกับโครงสร้างพื้นฐานของแร่ไฟโรฟิลโลสซิลิเกตซึ่งจัดเป็นแบบไดออกทอะฮิดรอล (dioctahedral) และแร่ทัลก์ซึ่งจัดเป็นแบบไตรออกทอะฮิดรอล (trioctahedral)

สมกไทต์จำแนกได้เป็น 2 กลุ่ม (ตารางที่ 1) สมกไทต์ที่อยู่ในกลุ่มไดออกทอะฮิดรอล ได้แก่ มอนต์มอริลโลไนต์ มีแมกนีเซียมเป็นองค์ประกอบในปริมาณสูง ไบเคลไลต์มีอะลูมิเนียมเป็นองค์ประกอบในปริมาณสูง และนอนโทรไนต์ (nontronite) มีเหล็กเป็นองค์ประกอบในปริมาณสูง ในมอนต์มอริลโลไนต์  $Mg^{2+}$  จะเข้าแทนที่  $Al^{3+}$  ในแผ่นออกทอะฮิดรอล ส่วนไบเคลไลต์และนอนโทรไนต์  $Al^{3+}$  และ  $Fe^{3+}$  จะเข้าแทนที่  $Si^{4+}$  ในแผ่นเททระฮิดรอล ส่วนสมกไทต์ที่อยู่ในกลุ่มไตรออกทอะฮิดรอล ได้แก่ เฮกทอไรต์ (hectorite) มีลิเทียมเป็นองค์ประกอบในปริมาณสูง ซาโปไนต์ (saponite) มีแมกนีเซียมเป็นองค์ประกอบในปริมาณสูง และซอโคไนต์ (sauconite) มีสังกะสีเป็นองค์ประกอบในปริมาณสูง ซึ่งแร่ดินเหนียวทุกชนิดที่พบในดินส่วนใหญ่จะเป็นประเภทไดออกทอะฮิดรอล เนื่องจากทนทานกว่าประเภทไตรออกทอะฮิดรอล (คณะกรรมการจัดทำพจนานุกรมปฐพีวิทยา, 2551; Thomas, 1998; Nater, 2000; Olson *et al.*, 2000)

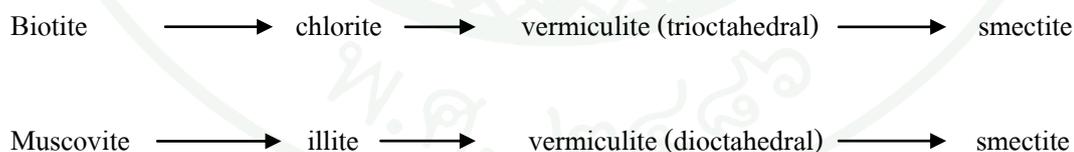
สภาพแวดล้อมในการเกิดสมกไทต์ต่างจากแร่ชนิดอื่น ๆ แต่มีกระบวนการในการกำเนิดหรือการสร้างตัวขึ้นมาคล้ายคลึงกัน คือ เกิดขึ้นใน 3 ลักษณะของการเกิดแร่ดินเหนียว สำหรับสมกไทต์อาจเกิดจากการตกค้าง หรืออาจเปลี่ยนสภาพมาจากแร่ในกลุ่มฟิลาโลซิลิเกตชนิดอื่น เมื่อเกิดการผุพังสลายตัวโดยเฉพาะไมกาซึ่งเมื่อเปลี่ยนสภาพแล้วโครงสร้างพื้นฐานยังคงเป็นแบบชนิด 2:1 เช่นเดิม และอาจเกิดขึ้นใหม่เมื่อสภาพแวดล้อมทางดินเหมาะสม (Churchman, 2000; Reid and Ulery, 2002) ที่สำคัญ คือ การเคลื่อนย้ายของน้ำอย่างช้า ๆ หรือมีสภาพน้ำขังเพื่อให้ความเข้มข้นของซิลิกาสูงพอที่จะทำให้สามารถเกิดเป็นสมกไทต์ได้

### 3.1 การตกค้าง

สเมกไทต์เป็นส่วนประกอบของหินตะกอน โดยเฉพาะหินตะกอนที่เกิดขึ้นหลังจากการเกิดภูเขาไฟ เช่น ในยุคเพอร์เมียน (280-230 ล้านปี) ยุคไทรแอสซิก (230-195 ล้านปี) และยุคจูแรสซิก (195-141 ล้านปี) ดินที่พัฒนามาจากหินตะกอนท้องทะเลในยุคครีเทเชียส (141-65 ล้านปี) เป็นตัวอย่างของดินที่มีการตกค้างของสเมกไทต์ เช่น ดินที่พัฒนามาจากหินดินดานในยุคครีเทเชียส (141-65 ล้านปี) และมหายุคซีโนโซอิก (65-1.8 ล้านปี) ในแคลิฟอร์เนียซึ่งมีสเมกไทต์ตกค้างเป็นจำนวนมาก วัตถุประสงค์กำเนิดมีผลทำให้สารละลายน้ำร้อนในสภาพต่างยังคงมีสเมกไทต์หลงเหลืออยู่บ้างในดิน สเมกไทต์ชนิดซาโฟไนต์อาจเกิดในบริเวณแนวแตก (joint) และรอยแตก (fracture) จากการแปรสภาพของหินปูนในสภาพแวดล้อมน้ำร้อนได้ (Reid and Ulery, 2002)

### 3.2 การเปลี่ยนสภาพ

สเมกไทต์สามารถเปลี่ยนสภาพมาจากไมกา คลอไรต์ และเวอร์มิควไลต์ ซึ่งในสภาพบางอย่างไมกาอาจจะผุพังให้เวอร์มิควไลต์แต่เกิดขึ้นอย่างรวดเร็วและไม่คงสภาพ เมื่อเกิดการสูญเสียโพแทสเซียมและประจุของชั้นลดลงจะเกิดเป็นสเมกไทต์ขึ้น การที่ไมกาจะเปลี่ยนไปเป็นสเมกไทต์ต้องผ่าน 3 กระบวนการ ได้แก่ การเคลื่อนย้ายโพแทสเซียม (depotassiation) การเคลื่อนย้ายอะลูมิเนียม (dealumination) ออกจากแผ่นเททระอีครัลและการเพิ่มซิลิกอน (silication) ในแผ่นเททระอีครัล



ดังนั้นสภาพแวดล้อมที่จะทำให้ไมกาเปลี่ยนไปเป็นสเมกไทต์ได้ต้องประกอบไปด้วย การมีอุณหภูมิและความดันต่ำพอที่จะทำให้อะลูมิเนียมในแผ่นเททระอีครัลไม่คงสภาพ ความเข้มข้นของอะลูมิเนียมต่ำ ความเข้มข้นของโพแทสเซียมและซิลิกอนสูง โดยพีเอชของดินจะต้องสูงกว่า 6 หรือ 7 หากพีเอชของดินต่ำกว่า 6 ไมกาจะเปลี่ยนสภาพไปเป็นเวอร์มิควไลต์ และเคโอลิไนต์ตามลำดับ (Thomas, 1998; Nater, 2000; Reid and Ulery, 2002)

## ตารางที่ 1 สูตรอุดมคติทางเคมีของสเมกไทต์

Subgroup	Species	Idealized formula
Diocahedral	Montmorillonite	$\text{Ca}_{0.66}\text{H}_2\text{O}[(\text{Si}_8)(\text{AlMg})_{0.66}\text{O}_{20}(\text{OH})_4]$
	Beidellite	$\text{Ca}_{0.66}\text{H}_2\text{O}[(\text{Si}_{7.34}\text{Al}_{0.66})(\text{Al}_4)\text{O}_{20}(\text{OH})_4]$
	Nontronite	$\text{Ca}_{0.66}\text{H}_2\text{O}[(\text{Si}_{7.34}\text{Al}_{0.66})(\text{Fe}_4^{3+})\text{O}_{20}(\text{OH})_4]$
Triocahedral	Saponite	$\text{Ca}_{0.66}\text{H}_2\text{O}[(\text{Si}_{7.34}\text{Al}_{0.66})(\text{Mg}_6)\text{O}_{20}(\text{OH})_4]$
	Hectorite	$\text{Ca}_{0.66}\text{H}_2\text{O}[(\text{Si}_{7.34}\text{Al}_{0.66})(\text{Mg}_{5.34}\text{Li}_{0.66})\text{O}_{20}(\text{OH})_4]$
	Sauconite	$\text{Ca}_{0.66}\text{H}_2\text{O}[(\text{Si}_{6.8}\text{Al}_{1.2})(\text{Zn}_4\text{Mg}_2)\text{O}_{20}(\text{OH})_4]$

ที่มา: Thomas (1998)

### 3.3 การเกิดขึ้นใหม่

แร่ดินเหนียวจะเกิดขึ้นใหม่ได้เมื่อมีสภาพทางเคมีและฟิสิกส์เหมาะสม ในสภาพแวดล้อมที่มีการผุพังสลายตัว พิเอช องค์ประกอบ และความเข้มข้นของสารละลายในดิน ลักษณะธรรมชาติของวัสดุตั้งต้น และปัจจัยสภาพแวดล้อมภายนอก เช่น อุณหภูมิ ปริมาณน้ำฝน อัตราการไหลซึมผ่าน (percolation rate) ของน้ำต้องเหมาะสมเช่นเดียวกัน (Wilson, 1999)

ข้อมูลเกี่ยวกับการเกิดขึ้นใหม่ของสเมกไทต์ที่มีในดินสามารถประเมินได้จากการทดลองในห้องปฏิบัติการ สภาพที่มีส่วนช่วยให้เกิดการสร้างตัวและความมีเสถียรในสภาพแวดล้อมทางดินประกอบด้วย การที่มีกิจกรรมของซิลิคอนและแมกนีเซียมสูง เป็นด่าง และมีการระบายน้ำเร็ว ภายใต้การระบายน้ำที่ถูกจำกัดสเมกไทต์จะตกตะกอนจากสารละลายดิน ซึ่งวัสดุตั้งต้นกำเนิดจะให้ธาตุที่เป็นองค์ประกอบหลักในสเมกไทต์ การที่สารละลายดินมีแมกนีเซียมอยู่ในภาวะที่เข้มข้นจึงเป็นสิ่งสำคัญต่อการเกิดขึ้นใหม่ และการคงสภาพอยู่ได้ของสเมกไทต์ (Reid and Ulery, 2002) Fesharaki *et al.* (2007) พบว่ามอนต์มอริลโลไนต์เกิดขึ้นใหม่ได้จากกระบวนการไฮโดรไลซิส และการผุพังสลายตัวของแร่ปฐมภูมิ เช่น เฟลด์สปาร์ และมัสโคไวต์

#### 4. สมบัติของสเมกไทต์

ด้วยลักษณะและสมบัติของสเมกไทต์ที่ได้กล่าวมาข้างต้น ทำให้มีการใช้สเมกไทต์ในงานด้านต่าง ๆ มากมายโดยเฉพาะในด้านสิ่งแวดล้อมที่สามารถเป็นวัสดุดูดซับสารพิษต่าง ๆ จากน้ำเสียที่เกิดจากกระบวนการการผลิตในโรงงานอุตสาหกรรมต่าง ๆ

Christianah *et al.* (2008) ได้ทำการศึกษาสมบัติผิวของมอนต์มอริลโลไนต์ และลักษณะการดูดซับโลหะหนักจากสารละลายโดยศึกษาจากสมบัติของจุดประจุศูนย์ (point of zero charge: PZC) และจุดประจุมวลศูนย์ (point of zero net proton charge: PZNPC) ที่ความเข้มข้นของไอออนต่าง ๆ และใช้สมการของ Langmuir model เพื่อดูปริมาณการดูดซับของโลหะหนักที่ต่างชนิดกันพบว่า มอนต์มอริลโลไนต์มีประสิทธิภาพในการดูดซับไอออนของโลหะได้ดี ด้วยลักษณะประจุผันแปรภายในหลักระหว่างชั้นของโครงสร้าง รวมทั้งประจุถาวรที่เกิดขึ้นบริเวณผิวของแผ่นซิลิกา และจากสมการของ Langmuir พบว่า  $Ni^{2+}$  ถูกดูดซับได้ดีกว่า  $Cu^{2+}$

นอกจากสามารถดูดซับแคตไอออนที่เป็นโลหะหนักได้เป็นอย่างดีแล้ว จุลินทรีย์ที่ก่อให้เกิดโรคทั้งในพืชและสิ่งมีชีวิต โดยสเมกไทต์ยังมีความสามารถในการดูดซับจุลินทรีย์เหล่านี้ไว้ได้ Deng *et al.* (2010) ได้นำสเมกไทต์มาผสมในอาหารสัตว์เพื่อดูดซับสารอะฟลาทอกซินที่เกิดจากการผลิตขึ้นของเชื้อรา โดยสารนี้จะเป็นอันตรายต่อสัตว์เลี้ยงหากได้รับเข้าไป พบว่าสเมกไทต์สามารถดูดซับสารอะฟลาทอกซินที่เชื้อราผลิตขึ้นได้เป็นอย่างดีทำให้ลดปริมาณสารเหล่านี้ในอาหารสัตว์ซึ่งการดูดซับดังกล่าวเกิดขึ้นบริเวณผิวภายนอก และภายในหลักระหว่างชั้นของแร่สเมกไทต์

นอกจากการใช้สเมกไทต์ในการดูดซับสารพิษต่าง ๆ ทางด้านวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมยังใช้สเมกไทต์เป็นวัสดุรองพื้นในหลุมฝังกลบขยะเพื่อป้องกันการชะละลายของน้ำขยะลงสู่แหล่งน้ำใต้ดิน ด้วยสมบัติทางฟิสิกส์ของสเมกไทต์ Gautier *et al.* (2010) ได้ศึกษาการเปลี่ยนแปลงสมบัติฟิสิกส์และเคมีของสเมกไทต์เพื่อนำมาใช้เป็นวัสดุรองพื้นในหลุมฝังกลบขยะ โดยให้สเมกไทต์อิมตัวด้วยแอมโมเนียมไอออน ( $NH_4$ -smectite) ซึ่งพบว่าสเมกไทต์ที่อิมตัวด้วยแอมโมเนียมไอออนทำให้ความกว้างของหลักระหว่างชั้นของแร่เพิ่มมากขึ้น ซึ่งทำให้พื้นที่ผิวในการดูดซับไอออนและโมเลกุลของน้ำได้เพิ่มขึ้น ทำให้มีสมบัติที่เหมาะสมที่จะใช้เป็นวัสดุรองพื้นในหลุมฝังกลบขยะได้เป็นอย่างดี นอกจากนี้สเมกไทต์ยังมีบทบาทในการเป็นวัสดุที่ใช้ในการปรับปรุงสมบัติของแร่อื่น เช่น ผสมกับเคโอลิไนต์ หรืออิลไลต์เพื่อเพิ่มสมบัติทางเคมีและฟิสิกส์ (Dudek *et al.*, 2007; Hong *et al.*, 2012; Vingiani *et al.*, 2004)

## 5. เวย์ทิลซอลล์

เวย์ทิลซอลล์มาจากรากศัพท์ *Vertere* ในภาษาละติน ซึ่งแปลว่า *turn* (กลับหน้าดินตามธรรมชาติ) (Deckers *et al.*, 2001) เวย์ทิลซอลล์พบได้ในระหว่างละติจูด 50 องศาเหนือ และ 45 องศาใต้ แต่ส่วนใหญ่พบระหว่างละติจูด 30 องศาเหนือ และ 30 องศาใต้ มีพื้นที่ประมาณ 310 ล้านเฮกตาร์ หรือประมาณร้อยละ 2.4 ของพื้นที่โลก มีการแจกกระจายอยู่ตามทวีปต่าง ๆ ทั่วโลก ยกเว้นทวีปแอนตาร์กติกา (Buol *et al.*, 2003; Özsoy and Aksoy, 2007; Brady and Weil, 2008) บริเวณที่พบมากได้แก่ ตอนกลางของออสเตรเลียและทางตะวันตกเฉียงเหนือของอินเดียแถบที่ราบสูงเดกคาน (แต่ละแห่งมี 80 ล้านเฮกตาร์) ชูคาน (50 ล้านเฮกตาร์) และสหรัฐอเมริกา จีน และเอธิโอเปีย (แต่ละแห่งมี 12-15 ล้านเฮกตาร์) นอกจากนี้ยังพบในอีกหลายประเทศได้แก่ กานา อียิปต์ ซาอุดีอาระเบีย เปรู โตรินโก ไลบีเรีย และอูรุกวัย (Coulombe *et al.*, 2000; Buol *et al.*, 2003) ดินในอันดับนี้จะมีระบอบความชื้นดินแบบอัสติกร้อยละ 65 แอริคกร้อยละ 18 ยูคิกร้อยละ 13 และเซอร์ริกกร้อยละ 4 ของพื้นที่ที่ดินเป็นเวย์ทิลซอลล์ทั้งหมด (Soil Survey Staff, 1999)

เวย์ทิลซอลล์ในประเทศไทย พบในบริเวณ ละติจูด 14 องศา 30 ลิปดาเหนือ ถึง 17 องศาเหนือ และลองจิจูด 100 องศาตะวันออก ถึง 105 องศาตะวันออก พบมากในบริเวณที่ราบภาคกลาง เทือกเขาสูงตอนกลางของประเทศ และพบได้ในบางบริเวณของภาคเหนือ ภาคตะวันตกและในบริเวณที่ราบสูงภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ครอบคลุมพื้นที่ประมาณ 336,500 เฮกตาร์ หรือประมาณร้อยละ 0.65 ของพื้นที่ทั้งประเทศ (Panichapong, 1982; Vijarnsorn, 1982)

### 5.1 คำจำกัดความของเวย์ทิลซอลล์

เวย์ทิลซอลล์เป็นดินแรกที่มีลักษณะดังต่อไปนี้ (Soil Survey Staff, 2006)

- 1) ภายในความลึก 100 เซนติเมตรจากผิวดินแรก จะพบรอยไถลหรือก้อนดินมีลักษณะคล้ายลิ่ม ผิวยเรียบเป็นมัน ตั้งเอียงทำมุมกับแนวนอนระหว่าง 10-60 องศา เกิดเป็นชั้นหนาตั้งแต่ 25 เซนติเมตรขึ้นไป
- 2) มีปริมาณดินเหนียวเฉลี่ยตั้งแต่ร้อยละ 30 ขึ้นไปในทุกชั้นที่มีความลึกระหว่าง 18-50 เซนติเมตร หรือถึงแนวสัมผัสดินแน่น แนวสัมผัสดินแข็ง หรือแนวสัมผัสดินอ่อน ถ้าพบในระดับตื้นกว่า

3) ดินแตกกระแหง กว้าง และลึกปิดเปิดในบางช่วงของปี ดินมีผิวหน้าตะปุ่มตะป่ำ เนื่องจากมีการยึดและหดตัวของดินสูง

ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการเกิดเวอร์ทิซอลส์ประกอบด้วย วัตถุดิบกำเนิด สภาพภูมิอากาศ และสภาพภูมิประเทศ สำหรับเวลาและพืชพรรณนั้น ไม่สามารถกำหนดได้ชัดเจนว่าเป็นปัจจัยที่ควบคุมการเกิดที่มีอิทธิพลมากพอในการทำให้เกิดลักษณะเด่นของเวอร์ทิซอลส์ (Buol *et al.*, 1980)

ในประเทศไทยเวอร์ทิซอลส์ส่วนใหญ่เกิดจากวัตถุดิบกำเนิด ที่มีสมกไทต์เป็นแร่หลักในอนุภาคขนาดดินเหนียว (Vijarnsorn, 1982) ซึ่งวัตถุดิบกำเนิดเหล่านี้ส่วนมากจะเกี่ยวข้องกับ หินปูน หรือมาร์ล ที่พัฒนามาจากวัตถุตะกอนน้ำพา หรือตะกอนตกร้างของหินอัคนีที่เป็นค้าง เช่น บะซอลต์ หรือหินแอนดีไซต์ กิจจา (2529) พบว่าทุกชุดดินที่ศึกษาเกิดจากการทับถมของตะกอนน้ำพาแบบผสม ตะกอนน้ำพาท้องถิ่น และตะกอนตกร้างของหินปูน และหินมาร์ล

พิเชษฐ (2531) พบว่าทุกบริเวณที่ศึกษามีส่วนสัมพันธ์กับหินปูนแทบทั้งสิ้น และพบมากในบริเวณที่ราบภาคกลางที่ระดับความสูง 4 ถึง 25 เมตร ในบริเวณเทือกเขาสูงตอนกลางของประเทศที่ระดับความสูง 60 ถึง 100 เมตร ส่วนบริเวณภาคตะวันออกเฉียงเหนือที่ระดับความสูง 150 ถึง 180 เมตร จาระดับน้ำทะเลปานกลางแต่ในภาคเหนือจะอยู่สูงกว่า 350 เมตรขึ้นไป บริเวณที่พบเกี่ยวข้องกับตะกอนน้ำพาท้องถิ่น หรือตะกอนน้ำพาอ่อนข้างใหม่ ในบริเวณที่เกี่ยวข้องกับภูเขาอาจมีสภาพผิวหน้าการกร่อน (erosion surface) ที่มีลักษณะแบบลูกคลื่นลอนลาด ในสัณฐานภูมิประเทศแบบคาสต์ศูนย์สูตร หรือคาสต์เขตร้อน (tropical karst) และเชิงเขา (เอิบ, 2534)

ในเวอร์ทิซอลส์ที่ค่อนข้างพบลักษณะของพืชพรรณที่เป็นพวกทุ่งหญ้า และไม้พุ่มต่าง ๆ มีการใช้ประโยชน์ที่ดินในการปลูกพืชไร่ เช่น ข้าวโพด ข้าวฟ่าง ฝ้าย อ้อย ถั่วบางชนิด ไม้ผล และบางบริเวณยังคงสภาพเป็นป่าเบญจพรรณ ส่วนบริเวณที่ลุ่มมีการใช้ประโยชน์ในการปลูกข้าว (เอิบ, 2534; กรมพัฒนาที่ดิน, 2548)

## 5.2 สมบัติของเวอร์ทิซอลส์

เวอร์ทิซอลส์เป็นดินเหนียวจัด สีคล้ำ สามารถยึดหดตัวได้สูง โดยทั่วไปแล้วมีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเชิงเส้น (coefficient of linear extensibility: COLE) อยู่ในช่วง 0.07-0.2 ความหนาแน่นรวมของก้อนดินสูง การซาบซึมน้ำเป็นไปตามสภาพในสนามซึ่งสังเกตได้จากระดับของน้ำใต้ดินที่พบ (Soil Survey Staff, 1999; Heidari and Mahmodi, 2006)

กิจจา (2529) พบว่าสมบัติด้านความอุดมสมบูรณ์ของเวอร์ทิซอลส์อยู่ในระดับปานกลาง ความจุแลกเปลี่ยนแคตไอออนสูงถึงสูงมาก อัตราร้อยละความอิ่มตัวเบสสูง ปริมาณอินทรีย์วัตถุปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ ปริมาณโพแทสเซียมที่เป็นประโยชน์มีค่าสูงในดินบน และมีแนวโน้มลดลงตามความลึก ปริมาณของธาตุที่เป็นองค์ประกอบพบว่ามีธาตุซิลิโคนและอะลูมิเนียมสูงในเวอร์ทิซอลส์ทุกชุดดิน

ในประเทศไทยแร่ที่พบในกลุ่มอนุภาคขนาดดินเหนียวของเวอร์ทิซอลส์ส่วนใหญ่เป็นแร่ในกลุ่มสมกไทต์ อิลไลต์ และมีเคโอลิไนต์อยู่บ้างในปริมาณไม่มากนัก นอกจากแร่ดินเหนียวดังกล่าว พบว่า มีแร่ควอตซ์ เฟลด์สปาร์ แคลไซต์ และดินเหนียวชั้นผสมรวมอยู่ด้วย ส่วนในกลุ่มอนุภาคขนาดทรายแป้งมีควอตซ์เป็นแร่หลัก ดินอาจมีเฟลด์สปาร์ แคลไซต์ ไมกา และเคโอลิไนต์เป็นองค์ประกอบเช่นเดียวกัน (กิจจา, 2529; พิเชษฐ, 2531; Vijamsorn, 1982)

### 5.3 การจำแนกดินในเวอร์ทิซอลส์

เวอร์ทิซอลส์สามารถแจกแจงออกได้เป็น 6 อันดับย่อย ได้แก่ 1. Aquerts 2. Cryerts 3. Xererts 4. Torrerts 5. Usterts 6. Uderts (Soil Survey Staff, 2006)

สำหรับในประเทศไทยมีเพียง 2 อันดับย่อยคือ Aquerts และ Usterts (สำนักสำรวจดินและวางแผนการใช้ที่ดิน, 2548)

#### 5.3.1 Aquerts

Aquerts เป็นดินที่อิ่มตัวด้วยน้ำ หรืออยู่ในสภาพแอกวิกเป็นระยะเวลาานจนเป็นข้อจำกัดในการปลูกพืชไร่ เว้นแต่จะมีการระบายน้ำออก ดินจะมีชั้นดินชั้นหนึ่ง หรือมากกว่าที่อยู่ในสภาพน้ำขัง หรืออิ่มตัวด้วยน้ำในช่วงหนึ่งของปี ซึ่งพบภายในความลึก 50 เซนติเมตรจากผิวดินดินแร่ และดินในชั้นที่กล่าวนี้จะมีสีเทา หรือมีค่าแรงค์เท่ากับ 2 หรือน้อยกว่าตั้งแต่ร้อยละ 50 ขึ้นไปของพีคอน หรือสังเกตได้ว่าสารประกอบหลักอยู่ในรูปเฟรริรัส (คณะกรรมการจัดทำพจนานุกรมปฐพีวิทยา, 2551; Buol *et al.*, 2003; Soil Survey Staff, 2006)

Aquerts พบในบริเวณที่ราบต่ำ หรือที่ลุ่ม ระดับน้ำใต้ดินตื้น หรือมีน้ำขังในช่วงหนึ่งของปีใช้ทำนาเป็นส่วนใหญ่ พบมากในภาคกลาง และภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ตัวอย่าง

ชุดดินที่จำแนกไว้ในอันดับย่อยนี้ เช่น ชุดดินบุรีรัมย์ บ้านหมี่ พิมาย โครกกระเทียม บางเลน สระบุรี (สำนักสำรวจดินและวางแผนการใช้ที่ดิน, 2548)

### 5.3.2 Usterts

เป็นดินที่พบในเขตอบอุ่นหรือเขตร้อน ถ้าไม่มีการชลประทานดินจะแตกกระแหงมีความกว้างตั้งแต่ 5 มิลลิเมตร และลึกตั้งแต่ 25 เซนติเมตรขึ้นไปภายใน 50 เซนติเมตร จากผิวดินแร่ เป็นระยะเวลาตั้งแต่ 90 วันขึ้นไปต่อปีโดยนับสะสม (คณะกรรมการจัดทำพจนานุกรม ปฐพีวิทยา, 2551; Buol *et al.*, 2003; Soil Survey Staff, 2006)

ในประเทศไทยดินนี้พบสารคาร์บอนเนตอิสระในหน้าตัดดินตอนล่าง และพบบริเวณที่ดอนหรือที่ราบต่ำในภาคกลาง และที่ราบสูงตอนกลางของประเทศ ใช้ปลูกพืชไร่และไม้ผล ชุดดินที่จำแนกไว้ในดินอันดับย่อยนี้ เช่น ชุดดินชัยบาดาล สมอทอด วังชมภู และลพบุรี (สำนักสำรวจดินและวางแผนการใช้ที่ดิน, 2548)

## 6. โลหะหนัก

โลหะหนัก หมายถึง โลหะที่มีความถ่วงจำเพาะสูงตั้งแต่ 5 ขึ้นไป (Alloway, 1995) ธาตุในกลุ่มโลหะหนักอาจเรียกเป็น “กลุ่มโลหะที่เป็นพิษ” เนื่องจากในกลุ่มของธาตุนี้มีหลายชนิดที่มีความเป็นพิษต่อสิ่งมีชีวิตและอวัยวะต่าง ๆ ของร่างกาย อย่างไรก็ตามนอกจากกลุ่มที่มีความเป็นพิษแล้ว ยังมีธาตุที่อยู่ในกลุ่มนี้ ที่มีความสำคัญต่อการเจริญเติบโตของพืช ธาตุเหล่านี้จัดอยู่ในกลุ่มของจุลธาตุ เช่น ทองแดง (Cu) เหล็ก (Fe) แมงกานีส (Mn) และสังกะสี (Zn) เป็นต้น

โลหะหนักเป็นวัตถุพิษที่ถูกนำมาใช้ในหลายด้านด้วยกัน เช่น ในด้านอุตสาหกรรมได้ใช้โลหะหนักในการผลิตพลาสติก พีวีซี สี ถ่านไฟฉาย สำหรับทางด้านการเกษตรโลหะหนักเป็นส่วนผสมของยาฆ่าแมลง และปุ๋ยเคมี ขณะเดียวกันทางการแพทย์ใช้โลหะหนักเป็นส่วนผสมของอุปกรณ์ทางการแพทย์ และเครื่องสำอาง น้ำทิ้งจากกระบวนการผลิตเหล่านี้จึงเป็นปัจจัยสำคัญให้เกิดความเสื่อมโทรมของแหล่งน้ำซึ่งเป็นสิ่งสำคัญในการดำรงชีพของสิ่งมีชีวิต (Arias *et al.*, 2002; Chaignon *et al.*, 2003)

## 6.1 ตะกั่ว

ปริมาณเฉลี่ยของตะกั่วในเปลือกโลกมีค่าประมาณ 15 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม พบมากในหินอัคนีสีจาง (acid igneous rocks) และในหินตะกอนที่เกิดจากการทับถมของดินเหนียวซึ่งพบปริมาณของตะกั่วอยู่ในช่วง 10 ถึง 25 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม

ตะกั่วในธรรมชาติเป็นธาตุองค์ประกอบในแร่ชนิดต่าง ๆ โดยพบมากในแร่ กาลีนา (galena:  $PbS$ ) ซึ่งเป็นตะกั่วอยู่ในรูปของแร่ปฐมภูมิ (primary form) ส่วนในรูปของทุติยภูมิ (secondary form) ได้แก่ แองกลีไซต์ (anglesite:  $PbSO_4$ ), เซรัสไซต์ (cerussite:  $PbCO_3$ ), มินิเยม (minium:  $Pb_3O_4$ ), ไพโรมอร์ไฟต์ (pyromorphite:  $Pb_5(PO_4)_3Cl$ ) และมิเมทีไซต์ (mimetesite:  $Pb_5(AsO_4)_3Cl$ ) (Kabata-Pendias, 2010)

ตะกั่วสามารถนำมามาใช้ประโยชน์เป็นส่วนผสมของวัสดุที่ใช้ในการสร้างอุปกรณ์ต่าง ๆ ได้มากมาย เช่น แบตเตอรี่ อัลลอยด์ สายเคเบิล และสารเคมีต่าง ๆ นอกจากนี้แหล่งที่มาดังกล่าวที่ทำให้เกิดการปนเปื้อนของตะกั่วในสิ่งแวดล้อมแล้ว ควันจากท่อไอเสียของรถยนต์เป็นอีกสาเหตุหนึ่งที่ทำให้เกิดการปนเปื้อนลงสู่ดิน เนื่องจากในช่วงระยะเวลาหนึ่งมีการใช้ตะกั่วเป็นสารใช้ในการเติมลงในน้ำมันเบนซินเพื่อเพิ่มค่าออกเทนและช่วยลดการสะดุดของเครื่องยนต์ ซึ่งปัจจุบันได้มีการเลิกใช้ตะกั่วเป็นสารตัวเติมแต่ยังคงส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมมาจนถึงปัจจุบัน (Lin, 1996; Nriagu, 1990)

## 6.2 ทองแดง

ทองแดงที่พบอยู่ในเปลือกโลกมีปริมาณความเข้มข้นอยู่ระหว่าง 25-75 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม โดยค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 55 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ซึ่งส่วนมากจะพบในหินอัคนีสีเข้ม (mafic igneous rocks) และตะกอนดินเหนียว (argillaceous sediments) โดยแร่ที่มีทองแดงเป็นองค์ประกอบได้แก่ แร่คาลโคไพไรต์ (chalcopyrite:  $CuFeS_2$ ) บอร์ไนต์ (bornite:  $Cu_5FeS_4$ ) คาลโคไซต์ (chalcocite:  $Cu_2S$ ) และโคเวลไลต์ (covellite:  $CuS$ ) โดยปริมาณทองแดงที่มีอยู่ในแร่เหล่านี้จะเกิดได้ดีกับแร่ที่มีองค์ประกอบกำมะถัน เมื่อเกิดการผุพังสลายตัวจากแร่ดังกล่าวจะให้สารประกอบที่เป็นทองแดงซัลไฟด์ นอกจากนี้กำมะถันแล้วทองแดงยังสามารถรวมตัวกับสารประกอบออกไซด์และคาร์บอเนตได้เช่นกัน โดยเกิดเป็นแร่ได้แก่ คิวไพรต์ (cuprite:  $Cu_2O$ ) เทนอไรต์ (tenarite:  $CuO$ ) มาลาไคต์ (malachite:  $Cu_2CO_3(OH)_2$ ) และ อะซัวร์ไรต์ (azurite:  $Cu(CO_3)_2(OH)_2$ ) โดยทั่วไปทองแดงจะมีความสัมพันธ์กับกับแร่สฟาเลอไรต์ (Sphalerite:  $ZnS$ ),

ไพไรต์ (Pyrite: FeS) และกาเลียนา ซึ่งสามารถพบได้ในหินอัคนีที่เป็นกรด (acid igneous rocks) (Arias *et al.*, 2002; Chaignon *et al.*, 2003; Kabata-Pendias, 2010)

การผลิตทองแดงทั่วโลกมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นในทุกปี เนื่องจากการนำทองแดงมาใช้ประโยชน์ในด้านต่าง ๆ ไม่ว่าจะเป็นส่วนของภาคอุตสาหกรรม และภาคการเกษตรล้วนมีทองแดงมาเป็นส่วนผสมในวัตถุดิบในการผลิต โดยเฉพาะในภาคการเกษตรที่ใช้ทองแดงเป็นส่วนผสมในการผลิตปุ๋ยเคมี ซึ่งทองแดงจัดเป็นธาตุอาหารเสริม (micronutrient) ที่มีความสำคัญในการเจริญเติบโตของพืช และเป็นส่วนผสมในสารเคมีกำจัด โรคพืช แมลงศัตรูพืชต่าง ๆ จึงทำให้มีปริมาณของแดงสะสมบนผิวดินเพิ่มมากขึ้น รวมทั้งความต้องการทองแดงมาใช้เป็นวัตถุดิบในการสร้างผลิตภัณฑ์ก็มีเพิ่มขึ้นเช่นกัน (Nicolau *et al.*, 2006; Pardini and Gispert, 2006)

ทองแดงที่มีอยู่ในดินทั่วโลกโดยทั่วไปจะมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 14 ถึง 109 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม โดยปริมาณทองแดงที่มีอยู่ในดินจะมีความสัมพันธ์กับลักษณะของเนื้อดิน ในดินเนื้อหยาบจะมีปริมาณของทองแดงน้อยเมื่อเทียบกับดินที่มีเนื้อละเอียด นอกจากนี้ความต้องการของทองแดงมีปริมาณเพิ่มมากขึ้นทำให้ของเสียที่เกิดจากระบวนการผลิตมีมากขึ้น ทั้งน้ำเสียและกากของเสียซึ่งของเสียเหล่านี้จะมีทองแดงปนเปื้อนอยู่ในปริมาณสูง โดยเฉพาะในน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมที่เป็นสาเหตุสำคัญที่ทำให้เกิดการปนเปื้อนออกสู่สภาพแวดล้อมภายนอก (Boonjar and Goodarzi, 2007)

รูปของทองแดงที่อยู่ในดินส่วนมากจะอยู่ในรูปของ  $\text{Cu}(\text{H}_2\text{O})_6^{2+}$  โดยไอออนดังกล่าวจะถูกดูดซับบนผิวแร่ดินเหนียว หรือเกิดการตกตะกอนกับแร่ชนิดอื่นและสารอินทรีย์ที่เป็นองค์ประกอบอยู่ในดิน โดยกระบวนการดังกล่าวจะตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงค่าพีเอชของดิน และรูปของทองแดงที่มีอยู่ในดิน ( $\text{Cu}^{2+}$ ,  $\text{Cu}^+$ ,  $\text{Cu}(\text{Cl})_2^-$ ,  $\text{CuSO}_4^0$ ,  $\text{Cu}(\text{OH})_2^0$ ,  $\text{CuCO}_3^0$ ,  $\text{CuCl}^0$ ) (Alloway, 1995)

รูปของทองแดงในดินที่สามารถเคลื่อนที่ได้และเป็นประโยชน์ต่อการใช้ของพืช ต้องมีปัจจัยที่มีส่วนช่วยส่งเสริมให้เกิดรูปดังกล่าวซึ่งได้แก่ อินทรีย์วัตถุในดิน (soil organic matter) อินทรีย์วัตถุที่ละลายได้ (dissolved organic matter) ค่าพีเอช และปริมาณทองแดงที่มีอยู่ในดิน (Ponizovsky *et al.*, 2007)

การปนเปื้อนทองแดงในดินเกิดจากสาเหตุที่สำคัญได้แก่ ปุ๋ยเคมี กากตะกอนของเสีย ปุ๋ยคอก สารเคมีกำจัดแมลงและศัตรูพืช ของเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม และการให้น้ำในระบบ

ชลประทาน โดยเป็นการเพิ่มปริมาณทองแดงในพื้นที่ทำการเกษตร ซึ่งระดับของทองแดงที่มีปริมาณสูงและเป็นอันตรายส่วนใหญ่จะอยู่พื้นที่โดยรอบของการทำเหมืองแร่ และโรงแต่งแร่ (Mantovi *et al.*, 2003)

### 6.3 สังกะสี

โดยทั่วไปค่าเฉลี่ยปริมาณของสังกะสีที่มีอยู่ในแผ่นเปลือกโลกมีปริมาณ 70 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม และค่าเฉลี่ยดังกล่าวยังอยู่ในระดับที่มีอยู่ในดินทั่วโลกเช่นกัน รูปของสังกะสีจะกระจายตัวอยู่ในหินที่เกิดจากการเย็นตัวของแมกมา (magmatic rocks) และหินตะกอนที่เกิดจากการทับถมของดินเหนียว โดยในหินตะกอนจะมีปริมาณของสังกะสีมากกว่า 120 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม (Alloway, 1995)

สังกะสีเป็นธาตุที่ง่ายต่อการสลายตัวและละลายได้ง่ายในสารละลาย รวมทั้งสามารถตกตะกอนรวมกับคาร์บอเนตได้ง่าย หรือถูกดูดซับโดยแร่ดินเหนียวและสารประกอบอินทรีย์ โดยเฉพาะแอนไอออนของกำมะถัน สังกะสีจะอยู่ในองค์ประกอบของแร่ต่าง ๆ โดยแร่ที่มีสังกะสีเป็นองค์ประกอบได้แก่ สะฟาเลอไรต์ (sphalerite:  $\alpha$ -ZnS), เวิร์ตไซต์ (wuzite:  $\beta$ -ZnS), ซิงไซต์ (zincite: ZnO), สมิทโซไนต์ (smithsonite:  $\text{ZnCO}_3$ ), วิลเลไมต์ (willemite:  $\text{Zn}_2\text{SiO}_4$ ) และเฮมิมอร์ไฟต์ (hemimorphite:  $\text{Zn}_4\text{Si}_2\text{O}_7(\text{OH})_2\text{H}_2\text{O}$ ) ซึ่งแร่เหล่านี้จะมีสังกะสีเป็นองค์ประกอบคิดเป็นร้อยละ 50 ของปริมาณธาตุที่มีอยู่ในแร่ (Kabata-Pendias, 2010)

ในปี 2008 การผลิตสังกะสีทั่วโลกมีปริมาณทั้งหมด 11.33 เมตริกตัน (USDI, 2011): ซึ่งแร่ที่มีความสำคัญในการผลิตสังกะสี คือ สะฟาเลอไรต์ เวิร์ตไซต์ และสมิทโซไนต์ นอกจากนี้สินแร่สังกะสีจะมีธาตุที่โลหะหนักอื่นเป็นองค์ประกอบรวมอยู่ด้วย เช่น ตะกั่ว ทองแดง เงิน และแคดเมียม โดยเฉพาะแคดเมียมที่มีความสัมพันธ์กับสังกะสีมากที่สุด

สังกะสีใช้ประโยชน์มากในด้านอุตสาหกรรม โดยเฉพาะการใช้เป็นสารเคลือบเหล็ก เพื่อป้องกันการกัดกร่อน อีกทั้งเป็นส่วนผสมที่สำคัญในการผลิตอัลลอยด์ และสารเร่งในการผลิตเคมีภัณฑ์ต่าง ๆ (ยาง เม็ดสี พลาสติก สารหล่อลื่น และสารกำจัดศัตรูพืช) (Urriaga *et al.*, 2005)

โดยทั่วไปปริมาณสังกะสีที่มีมากในดินสามารถดูได้จากวัตถุต้นกำเนิด กระบวนการสร้างตัวของดิน และอินทรีย์วัตถุ เป็นส่วนสำคัญในการกำหนดสถานะของสังกะสีที่อยู่ในดิน อนุภาคดินเหนียวที่มีเวอร์มิคิวไรต์ และกิบบิไซต์เป็นส่วนประกอบจะมีปริมาณของสังกะสีอยู่ด้วย

ทำให้ดินที่มีแร่เหล่านี้เป็นองค์ประกอบจะมีสังกะสีอยู่ในปริมาณที่ค่อนข้างสูง และการดูดซับสังกะสีในช่องว่างภายในแร่ดินเหนียวจะถูกดูดซับได้ดีกว่าแคดเมียมซึ่งมีขนาดไอออนใกล้เคียงกัน (Antoniadis *et al.*, 2008) ความสามารถในการดูดซับของอินทรีย์วัตถุมีส่วนสำคัญที่ทำให้เกิดการสะสมของสังกะสีบริเวณผิวหน้าดิน

สังกะสีในรูปที่สามารถเคลื่อนที่ได้เป็นรูปที่พืชสามารถนำไปใช้และสามารถละลายได้ในดิน แต่สังกะสีมักจะอยู่ในรูปที่สามารถละลายได้อย่างรวดเร็ว การที่สังกะสีจะถูกตรึงไว้ในดินจะมีความสัมพันธ์กับค่าพีเอชในดิน และรูปของโลหะที่เพิ่มเติมลงไป นอกจากนี้การตรึงและการกักเก็บสังกะสีนั้นยังต้องอาศัยระยะเวลาในการสะสมเช่นกัน โดยแร่ดินเหนียวเป็นส่วนที่มีบทบาทสำคัญในการตรึงสังกะสีไว้ในดิน

ในสารละลายดินรูปของสังกะสีจะอยู่ในรูปของไอออนอิสระและไอออนเชิงซ้อนในรูปของแคดไอออน ได้แก่  $Zn^{2+}$ ,  $ZnCl^+$ ,  $ZnOH^+$  และ  $ZnHCO_3^+$  และในรูปของแอนไอออน ได้แก่  $ZnO_2^{2-}$ ,  $Zn(OH_3)^-$  และ  $ZnCl_3^-$  (Alloway, 1995; Kabata-Pendias, 2010)

การปนเปื้อนสังกะสีในดินจะเกิดจากการเพิ่มเติมจากภายนอกโดยกิจกรรมของมนุษย์ (antropogenic) มากกว่าที่มาจากวัตถุดิบกำเนิดดิน ทั้งการใช้สารเคมีในการเกษตรที่มีส่วนผสมของสังกะสีทำให้มีการสะสมของสังกะสีบริเวณผิวหน้าดิน แม้ว่าส่วนหนึ่งพืชจะนำสังกะสีไปใช้ประโยชน์ในการเจริญเติบโต แต่ปริมาณที่ยังตกค้างและสะสมบริเวณผิวหน้าดินซึ่งจะถูกชะล้างโดยน้ำ ทั้งจากการให้น้ำในระบบการเกษตรและน้ำฝน ทำให้สังกะสีเกิดการสะสมลงสู่พื้นที่แอ่งต่ำที่เป็นแหล่งน้ำ หรือแม่น้ำ เมื่อสังกะสีเกิดการปนเปื้อนลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติทำให้สัตว์น้ำ หรือพืชน้ำได้รับสังกะสีเข้าไปสะสมในร่างกายหรือส่วนต่าง ๆ ของพืช และเมื่อมนุษย์นำสัตว์น้ำหรือพืชน้ำมาบริโภคก็จะได้รับสังกะสี โดยการสะสมลักษณะเหล่านี้เป็นลักษณะของห่วงโซ่อาหาร (food chain) หากสังกะสีสามารถเข้าสู่วงจรของห่วงโซ่อาหารก็จะสามารถถ่ายทอดไปสู่ผู้บริโภคได้ (Rao *et al.*, 2008; Voegelin and Kretzschmar, 2003; Voegelin *et al.*, 2008)

#### 6.4 แคดเมียม

ค่าเฉลี่ยปริมาณของแคดเมียมในเปลือกโลกอยู่ที่ 0.1 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม มักพบเป็นส่วนประกอบของแร่ที่อยู่ในหินอัคนีและหินตะกอน โดยแร่ที่มีองค์ประกอบของแคดเมียมได้แก่ กรีนอกไซด์ (greenockite: CdS), ออกทาวด์ (octavite: CdSe) และมอนทิโพไนต์ (monteponite:

CdO) แคลเซียมจะมีความสัมพันธ์กับสินแร่สังกะสีและตะกั่ว ซึ่งทั่วไปจะพบอยู่ในแร่ไบโอไทต์ สเฟอไรต์ ไอโรต์ แอมฟีโบล และสมิธิโซไนต์ (Kabata-Pendias, 2010; WHO, 2000)

แคลเซียมและสังกะสีถึงแม้จะมีลักษณะทางโครงสร้างของอะตอมที่คล้ายกัน แต่แคลเซียมจะมีความเฉพาะในการอยู่รวมกันกับกำมะถันมากกว่าสังกะสี ด้วยเหตุนี้จึงสามารถเคลื่อนที่ได้ในสภาวะที่เป็นกรดได้ดีกว่าสังกะสี (Alloway, 1995)

ถึงแม้ว่าลักษณะของแคลเซียมจะมีค่าแวลเลนซี และรัศมีไอออนใกล้เคียงกับแคลเซียม แต่ไม่สามารถที่จะแทนที่ขนาดใกล้เคียงกันในโครงสร้างของแร่ได้ ในระหว่างกระบวนการผุพังสลายตัวของหินและแร่ ลักษณะของสารประกอบแคลเซียมอย่างง่ายที่ได้จากกระบวนการดังกล่าวจะอยู่ในรูปของ  $\text{CdO}$ ,  $\text{Cd(OH)}_2$ ,  $\text{CdCl}_2$  และ  $\text{CdF}_2$  ซึ่งเป็นรูปที่สามารถเคลื่อนที่ได้ง่ายและรวมตัวกับสังกะสีในกระบวนการตกตะกอน (sedimentation processes) สารประกอบแคลเซียมโดยทั่วไปจะเกิดร่วมกับแคลไอออนอื่นเสมอ เช่น  $\text{Zn}^{2+}$ ,  $\text{CO}^{2+}$ ,  $\text{Ni}^{2+}$ ,  $\text{Fe}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  และเกิดร่วมกับ  $\text{Ca}^{2+}$  ในบางกรณี (Alloway, 1995; Kabata-Pendias, 2010)

แคลเซียมเป็นธาตุที่เป็นอันตรายในระบบนิเวศทั้งกับ มนุษย์ สัตว์ และพืช โดยความเป็นพิษของธาตุจะมีความรุนแรงแม้ได้รับธาตุดังกล่าวเพียงเล็กน้อย โดยได้มีการศึกษาถึงความเป็นพิษของแคลเซียม โดยเฉพาะผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและคุณภาพของอาหาร (Oskarsson *et al.*, 2004)

การสะสมแคลเซียมทั่วโลกมีแนวโน้มสูงขึ้นทุกปี การสะสมจากการทำเหมืองแร่สังกะสีซึ่งในสินแร่สังกะสีจะมีแคลเซียมเจือปนอยู่ด้วย แคลเซียมจึงเป็นผลพลอยได้จากการผลิตสังกะสี ซึ่งโดยทั่วไปการผลิตสังกะสี 1 ตันจะได้แคลเซียมประมาณ 3 กิโลกรัม แคลเซียมยังถูกนำกลับมาใช้ใหม่ในการทำอุตสาหกรรมแบตเตอรี่สังกะสี-แคลเซียมอีกด้วย (USDI, 2011)

ปริมาณแคลเซียมที่มีอยู่ในสารละลายดินมีเพียงเล็กน้อยเท่านั้น โดยมีปริมาณ 0.2-6 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม หากปริมาณแคลเซียมที่มีอยู่ในสารละลายดินมีปริมาณสูงจะก่อให้เกิดมลภาวะในดิน ส่วนใหญ่แล้วจะเกิดในบริเวณที่เป็นพื้นที่ในการทำเหมืองแร่ พื้นที่หลุมฝังกลบขยะ การละลายได้ของแคลเซียมสามารถละลายได้ดีในสารละลายที่มีความเป็นกรด โดยอยู่ในช่วงกรดวิกฤต (critical acidity) ในแร่จะอยู่ในช่วงค่าพีเอช 4.0-4.5 หากค่าพีเอชลดลงจากค่ากรดวิกฤตประมาณ 0.2 หน่วยจะทำให้ปริมาณแคลเซียมที่สามารถเคลื่อนที่ได้มีปริมาณเพิ่มขึ้น (Kabata-Pendias, 2010)

การปนเปื้อนแคดเมียมในดินในสภาวะที่ดินกำลังพัฒนาภายใต้การเปลี่ยนแปลงของสภาพแวดล้อมภายนอก การเคลื่อนที่ของแคดเมียมภายในหน้าตัดดินจะเกิดการสะสมด้านล่างมากกว่าการสะสมบริเวณผิวดิน นอกจากนี้การเพิ่มปริมาณของแคดเมียมบริเวณผิวดินที่เกิดขึ้นทั่วไปต้องขึ้นอยู่กับปัจจัยที่ส่งผลที่ทำให้เกิดการปนเปื้อนลงสู่ดิน การปนเปื้อนแคดเมียมบริเวณผิวดินเป็นสิ่งที่ก่อให้เกิดความกังวลต่อการเข้าสู่ห่วงโซ่อาหาร เนื่องจากพืชสามารถดึงแคดเมียมไปสะสมยังส่วนต่าง ๆ ของพืชโดยเฉพาะพืชกินใบ ปริมาณการสะสมแคดเมียมที่บริเวณผิวดินจะมีปริมาณสูงในเขตเมือง และบริเวณที่มีการทำเหมืองแร่ตะกั่วและสังกะสี กากของเสียการใช้ปุ๋ยฟอสฟอรัสที่ได้จากหินฟอสเฟต เป็นปัจจัยที่ทำให้เกิดการสะสมของแคดเมียมในดิน โดยเฉพาะในพื้นที่เกษตรกรรม (Li *et al.*, 2010; Zubillag and Lavado, 2002)

กากตะกอนของเสียที่มาจากโรงงานอุตสาหกรรมเป็นแหล่งที่ทำให้เกิดการแพร่กระจายของแคดเมียมออกสู่สภาพแวดล้อมได้มากที่สุด เนื่องจากรูปของแคดเมียมที่ง่ายต่อการเคลื่อนที่ และสามารถละลายในสารละลายดินมีมากกว่าในดินที่ไม่มีการปนเปื้อนของกากตะกอนของเสีย (Dudka *et al.*, 1994)

## 7. การปนเปื้อนของโลหะหนัก

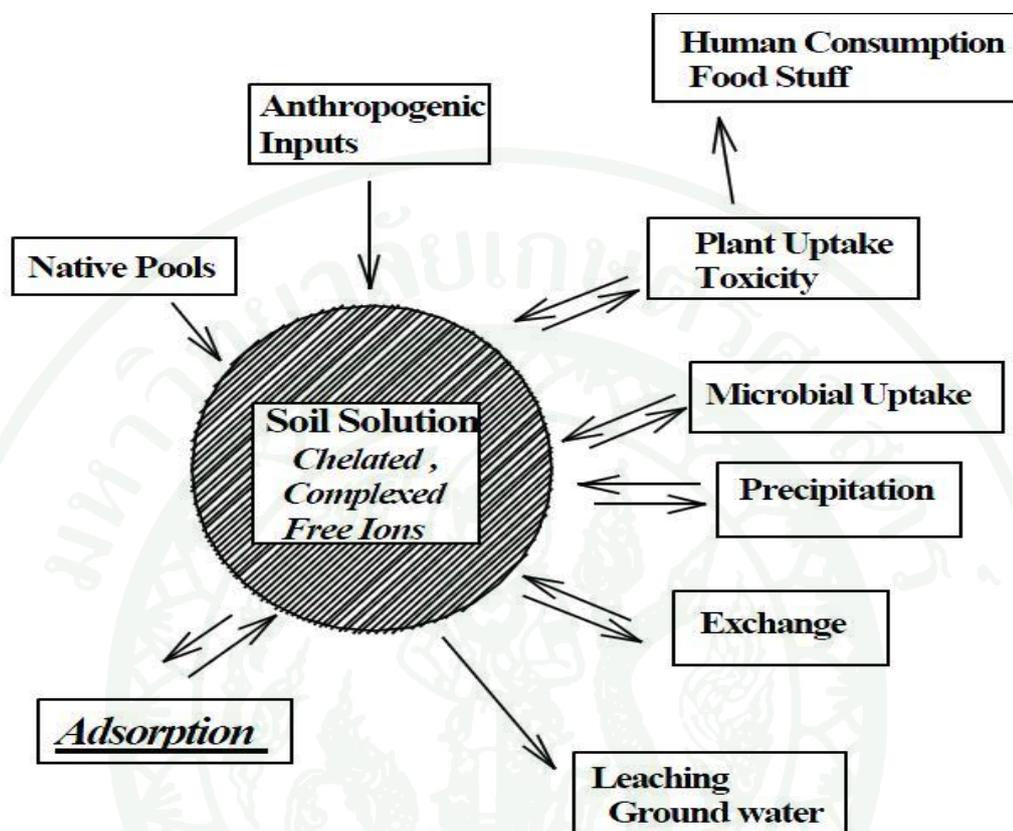
การปนเปื้อนของโลหะหนักในดินอันเป็นผลที่เกิดจากกิจกรรมของมนุษย์สามารถแบ่งแหล่งกำเนิดของโลหะหนักได้เป็น 3 แหล่งใหญ่ ๆ (Alloway, 1995) ดังนี้

1) แหล่งอุตสาหกรรม จากการปล่อยน้ำเสียลงสู่แหล่งน้ำ หรือการกองขยะของเสียบนดิน โรงงานบางประเภทนำโลหะหนักมาเป็นวัตถุดิบในการผลิต เช่น ผลิตแบตเตอรี่รถยนต์ ผลิตถ่านไฟฉาย ทำสีย้อมผ้า โรงงานกระดาษ เป็นต้น โลหะหนักเหล่านี้มักถูกถ่ายเทลงสู่แหล่งน้ำใต้ดิน โดยการชะละลายจากผิวดิน ลงสู่ด้านล่างซึ่งเป็นแหล่งน้ำใต้ดิน

2) แหล่งเกษตรกรรม จากการใช้สารกำจัดศัตรูพืชบางชนิดมีส่วนผสมของโลหะหนัก เช่น ยาฆ่าเชื้อรามีส่วนผสมของทองแดงเป็นองค์ประกอบอยู่ และเกิดการสะสมอยู่ในพื้นที่เกษตรกรรม สารเหล่านี้จะถูกชะล้างลงสู่แหล่งน้ำเมื่อเกิดการกัดเซาะหน้าดินโดยน้ำฝนในรูปของตะกอน

3) แหล่งชุมชน จากการทิ้งขยะมูลฝอยที่มีส่วนผสมของโลหะหนักเป็นองค์ประกอบ เช่น ถ่านไฟฉาย กากแบตเตอรี่ เศษภาชนะที่เคลือบด้วยโลหะ ท่อประปา สังกะสี เป็นต้น สารเหล่านี้จะสะสมและถูกถ่ายเทลงสู่แหล่งน้ำ ทำให้มีปริมาณมากขึ้น และสามารถรวมตัวกับสารประกอบ

อินทรีย์สะสมในห่วงโซ่อาหารของสิ่งมีชีวิต ซึ่งเป็นการเสี่ยงต่อการสะสมอยู่ในมนุษย์ผู้ที่เป็นผู้บริโภคขั้นสุดท้าย



ภาพที่ 2 ความสัมพันธ์ของสารละลายดินและการเคลื่อนที่ของไอออนในสารละลายไปสู่แหล่งต่าง ๆ (Sparks, 2007)

การสะสมของโลหะหนักในดินส่วนหนึ่งเกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ เช่น จากการชะละลายของพวกเกลือแร่ที่มีอยู่บนแผ่นดินโดยน้ำฝน หรือที่เป็นส่วนประกอบของแร่ที่มีอยู่แล้วในธรรมชาติ องค์ประกอบในดินที่มีส่วนสำคัญในการสะสมโลหะหนักในดิน เช่น ขนาดของอนุภาคที่มีขนาดเล็ก (แร่ดินเหนียว) และอนุภาคของสารอินทรีย์ จะมีการสะสมโลหะหนักในปริมาณสูง คาร์บอนेट ออกไซด์ของแมงกานีส และเหล็ก มีผลทำให้โลหะหนักในดินเปลี่ยนแปลงไป (ภาพที่ 2)

Chester and Voutsinos (1981) แยกโลหะหนักที่สะสมในดินออกเป็น 2 ประเภท คือ

1) โลหะหนักตกค้าง (residual heavy metal) จัดเป็นโลหะที่อยู่ในโครงสร้างแร่ซิลิเกตที่สะสมอยู่ในดิน จึงทำให้โลหะเหล่านี้ มีการเปลี่ยนแปลงได้น้อยมากเมื่ออยู่ในธรรมชาติ

2) โลหะหนักที่ไม่ตกค้าง (non-residual heavy metal) โลหะพวกนี้เกิดจากกระบวนการดูดซับระหว่างอนุภาคของดินกับอนุภาคของโลหะหนัก ซึ่งจะอยู่ในรูปของสารประกอบเชิงซ้อนกับสารอินทรีย์ (organometallic complex) ในดินตะกอน โลหะเหล่านี้สามารถละลายออกมาอยู่ในรูปที่สามารถเคลื่อนที่ได้

## 8. การดูดซับ

การดูดซับเป็นการสะสมสาร หรือวัสดุที่พื้นผิวระหว่างของแข็งและของเหลว รวมถึงการเคลื่อนย้ายโมเลกุลของตัวถูกละลายออกจากสารละลายไปอยู่บนผิวของแข็ง แต่ไม่รวมถึงกระบวนการตกตะกอนที่พื้นผิว (surface precipitation process) หรือกระบวนการเกิดพอลิเมอร์ ซึ่งหากไม่สามารถระบุได้ชัดเจนว่ากลไกที่ทำให้ความเข้มข้นของสาร หรือวัสดุในสารละลายตัวทำละลาย หรือพื้นผิวของของแข็งลดลงไปนั้นเกิดจากการดูดซับ หรือการตกตะกอนที่พื้นผิว หรือกระบวนการอื่น ๆ ที่เกิดขึ้นที่ผิวแล้วโดยทั่วไปจะใช้คำว่า sorption (Sparks, 2007) ลักษณะการดูดซับที่เกิดขึ้นระหว่างอนุภาคที่สำคัญได้แก่

### 8.1 การดูดซับทางกายภาพ

เกิดขึ้นจากแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลของตัวดูดซับกับองค์ประกอบที่ถูกดูดซับ ซึ่งมีค่ามากกว่าแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลขององค์ประกอบในสารละลาย ดังนั้นองค์ประกอบจะยึดติดแน่นบนผิวของตัวดูดซับถ้าอนุภาคดูดซับมีความพรุนสูง ของเหลวหรือก๊าซที่ควบแน่นนั้นจะซึมผ่านเข้าสู่ช่องว่างภายในของตัวดูดซับได้ (Riebe *et al.*, 2004) ถึงแม้ว่าความดันของระบบจะต่ำกว่าความดันไอของระบบนั้นก็ตาม ปฏิกิริยานี้เกิดขึ้นได้ที่อุณหภูมิปกติ จะให้ความร้อนออกมาเล็กน้อยแต่มากกว่าความร้อนของการควบแน่น เมื่อลดความดันของระบบ หรืออุณหภูมิลดจะทำให้ความสามารถในการดูดซับลดลง ทำให้อนุภาคที่ถูกดูดซับเคลื่อนที่ออกจากอนุภาคดูดซับ ปฏิกิริยานี้เรียกว่า desorption ซึ่งเป็นวิธีการนำอนุภาคดูดซับกลับมาใช้ประโยชน์ใหม่อีกครั้ง (reversible) การดูดซับนี้สารถูกดูดซับไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางเคมี การดูดซับทางกายภาพจึงเป็นการดูดซับแบบ van der Waal's adsorption (Bailey *et al.*, 1999; Sposito, 2008)

### 8.2 การดูดซับทางเคมี

เกิดขึ้นได้ดีที่อุณหภูมิสูง ซึ่งแตกต่างจากการดูดซับทางกายภาพทุกประการ โดยที่เกิดปฏิกิริยาเคมีระหว่างอนุภาคดูดซับกับองค์ประกอบของอนุภาคที่ถูกดูดซับที่ต้องการดูดซับ การ

สร้างสารประกอบระหว่างอนุภาคถูกดูดซับกับอนุภาคดูดซับบริเวณพื้นผิวของอนุภาคดูดซับทำให้ปริมาณของอนุภาคถูกดูดซับลดลง เนื่องจากการดูดซับเกิดจากปฏิกิริยาทางเคมีบนพื้นผิวจึงทั้งหมดและการดูดซับแบบนี้จะไม่สามารถเกิดการคายการดูดซับ (desorption) (Ganor *et al.*, 2003) ทั้งนี้เนื่องจากองค์ประกอบที่ถูกดูดซับมีการเปลี่ยนแปลงทางเคมี และปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเป็นแบบผันกลับไม่ได้ (irreversible) ปฏิกิริยานี้ขึ้นอยู่กับองค์ประกอบและสภาวะแวดล้อมที่เหมาะสม ซึ่งพบว่าที่อุณหภูมิปกติองค์ประกอบบางชนิดจะไม่เกิดการดูดซับทางเคมี แต่เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นก็สามารถเกิดการดูดซับทางเคมีได้ (Jung *et al.*, 1998; Kipton *et al.*, 1992; Kosmulski, 1999)

## 9. ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ

### 9.1 พื้นผิวและโครงสร้างของรูพรุน

พื้นผิวเป็นสมบัติที่มีผลต่อความสามารถในการดูดซับของสารดูดซับ คือความสามารถในการดูดซับเพิ่มขึ้นเมื่อพื้นที่ผิวของอนุภาคดูดซับมากขึ้น อย่างไรก็ตามพื้นที่ผิวของอนุภาคดูดซับเพียงอย่างเดียวไม่เพียงพอที่จะอธิบายความสามารถในการดูดซับได้ดี โครงสร้างของรูพรุนมีส่วนช่วยให้พื้นที่ที่มีความสามารถในการดูดซับเพิ่มขึ้น เนื่องจากขนาดโมเลกุลสามารถถูกดูดซับอยู่ในช่องว่างของรูพรุน (Zhang and Hou, 2008)

### 9.2 ขนาดของอนุภาค

ในกรณีที่สารดูดซับไม่มีลักษณะของรูพรุน พื้นผิวสัมผัสที่สามารถดูดซับจะมีปริมาณลดลง ทำให้ความสามารถในการดูดซับลดลง แต่ถ้าขนาดของอนุภาคมีขนาดเล็กมาก ลักษณะดังกล่าวสามารถดูดซับโมเลกุลได้มากกว่าอนุภาคดูดซับที่มีขนาดใหญ่ (Christianah *et al.*, 2008)

### 9.3 ธรรมชาติของอนุภาคถูกดูดซับ

ความสามารถในการละลายอนุภาคดูดซับที่มีความสามารถในการละลายสูง จะถูกดูดซับได้น้อย เพราะก่อนที่จะเกิดกระบวนการดูดซับขึ้นจะต้องมีการทำลายพันธะระหว่างตัวถูกละลายและตัวทำละลาย (Sparks, 2007) น้ำหนักและขนาดของโมเลกุลเมื่อน้ำหนักและขนาดของโมเลกุลของสารถูกดูดซับเพิ่มขึ้น ความจุในการดูดซับจะเพิ่มขึ้น เช่นถ้าโมเลกุลของอนุภาคที่ถูก

ดูดซับเป็นสารอินทรีย์ เมื่อจำนวนคาร์บอนอะตอมมากขึ้นการดูดซับก็จะมากขึ้น เพราะการเพิ่มน้ำหนักโมเลกุลจะเป็นผลทำให้ความสามารถในการละลายได้ลดลง (Antoniadis *et al.*, 2008)

#### 9.4 สภาพแวดล้อม

9.4.1 ผลของอุณหภูมิของสารละลาย เนื่องจากการยึดเกาะระหว่างอนุภาคที่ดูดซับกับอนุภาคที่ถูกดูดซับ เกี่ยวข้องกับชนิดของพันธะที่ยึดเหนี่ยวกัน ดังนั้นการดูดซับจะเกิดได้มากหรือน้อยจึงขึ้นกับอุณหภูมิที่ใช้ทดลองด้วย กล่าวคือ ปฏิริยาการดูดซับเป็นชนิดคายความร้อนการดูดซับจะมากขึ้นเมื่ออุณหภูมิลดลงแต่ในกรณีที่เป็นปฏิริยาดูดความร้อนความสามารถในการดูดซับจะมากขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น แต่อย่างไรก็ตามการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเพียงเล็กน้อยนั้นไม่มีผลต่อการดูดซับ (Kipton *et al.*, 1992)

9.4.2 ผลของความเป็นกรด-ด่างของสารละลาย เนื่องจากพีเอชมีผลต่อลักษณะชนิด (species) ของโลหะหนัก (Alloway, 1995) เช่น ไอออนของตะกั่วจะมีรูปแบบต่าง ๆ กันขึ้นอยู่กับพีเอชของสารละลายที่พีเอชต่ำกว่า 6 ตะกั่วจะอยู่ในรูปของ  $Pb^{2+}$  เป็นส่วนใหญ่แต่ที่พีเอชสูง ไอออนของตะกั่วจะมีการรวมตัวกับโมเลกุลน้ำเกิดเป็นสารประกอบประเภท hydroxocomplexes ชนิดต่าง ๆ เช่น  $Pb^{2+}$ ,  $Pb(OH)_4^{4+}$ ,  $Pb_6(OH)_8^{4+}$  และ  $Pb_3(OH)_4^{2+}$  (Lin, 1996)

นอกจากค่าพีเอชของสารละลายจะมีผลต่อประจุของไอออนของโลหะแล้ว ยังส่งผลต่อประจุที่ผิวของอนุภาคดูดซับด้วย (pH dependent charge) ซึ่งเป็นผลมาจากการเกิดการแตกตัวของไอออน (ionization) ของหมู่ฟังก์ชันที่ผิวของอินทรีย์วัตถุ และอนินทรีย์วัตถุในดิน (Li *et al.*, 2010)

### 10. สมดุลและไอโซเทิร์มของการดูดซับ

การดูดซับด้วยของแข็งที่เกิดขึ้นในสารละลาย (liquid-solid adsorption) จะสัมพันธ์กับความเข้มข้นของตัวถูกละลายบนผิวของแข็ง เมื่อกระบวนการดูดซับดำเนินไปเรื่อย ๆ จะมีการคายการดูดซับ (desorption) เกิดขึ้นพร้อม ๆ กัน จนในที่สุดจำนวนอนุภาคที่ถูกดูดซับกับที่คายออกมามีปริมาณเท่ากันผลที่เกิดตามมา คือ อัตราการดูดซับและอัตราการคายจะเท่ากัน หรือระบบเข้าสู่สภาวะสมดุล เรียกว่า สมดุลของการดูดซับ (adsorption equilibrium) ที่สภาวะสมดุลของการดูดซับความเข้มข้นของอนุภาคถูกดูดซับบนผิวของของแข็งจะไม่เปลี่ยนแปลง ตำแหน่งที่เกิดการดูดซับหนึ่ง ๆ จะเป็นสมบัติของระบบนั้น ๆ ซึ่งขึ้นอยู่กับตัวถูกละลาย อนุภาคดูดซับ ตัวทำละลาย

อุณหภูมิ และความเป็นกรด-ด่างของระบบ ปริมาณการดูดซับที่สมดุลจะเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของอนุภาคที่ถูกดูดซับเพิ่มขึ้น ซึ่งโดยทั่วไปจะใช้ไอโซเทิร์มของการดูดซับ เป็นตัวแทนในการอธิบายสมดุลที่เกิดขึ้น (Naidu *et al.*, 1998; Sposito, 2008)

ไอโซเทิร์มของการดูดซับ คือ ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการละลายได้ของอนุภาคที่ถูกดูดซับต่อหน่วยน้ำหนักอนุภาคดูดซับ กับความเข้มข้นของอนุภาคที่ถูกดูดซับในสารละลายที่เหลืออยู่ที่สภาวะสมดุล ณ อุณหภูมิคงที่ (Chaignon *et al.*, 2003; Naidu *et al.*, 1998)

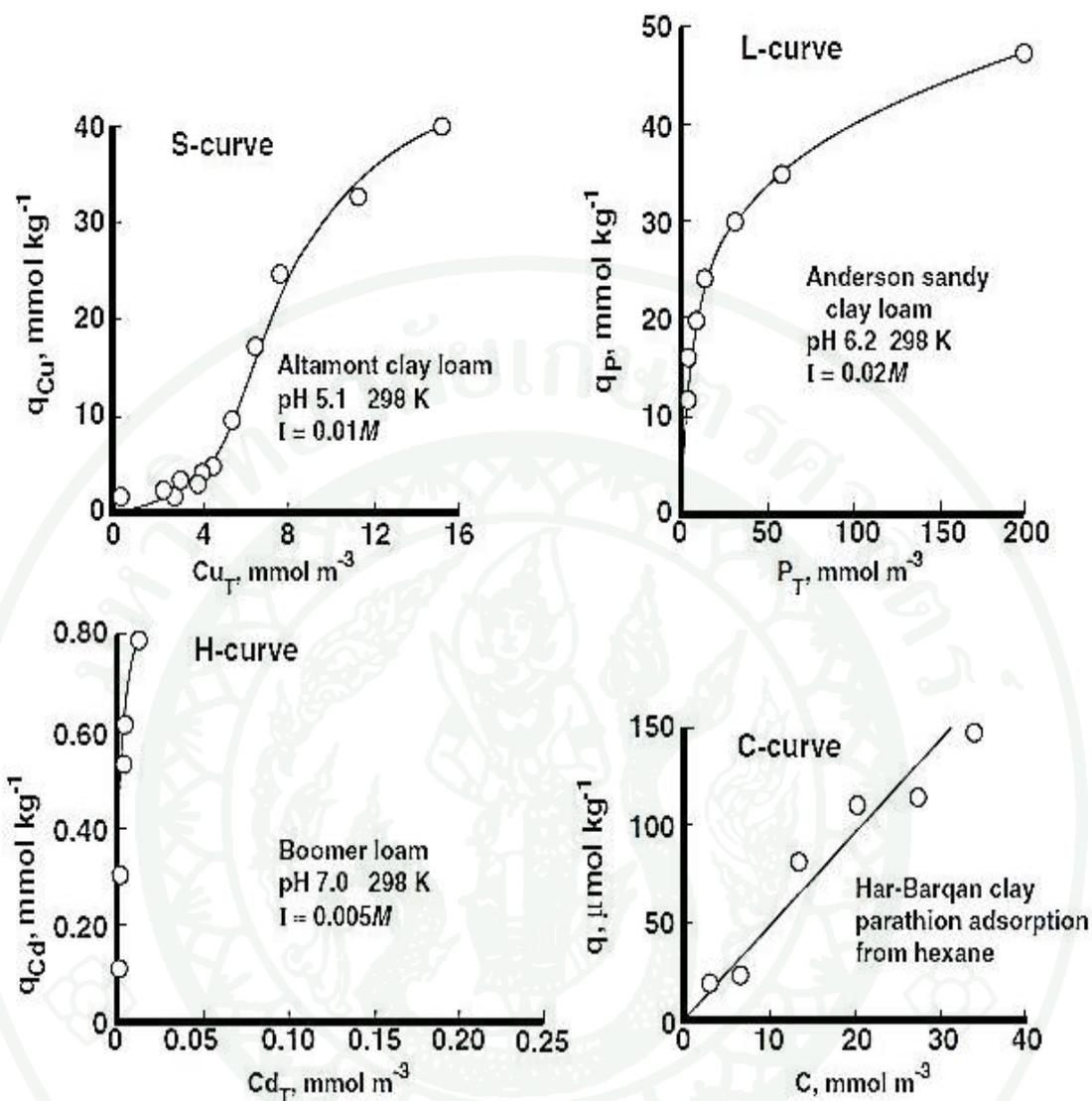
### 10.1 ไอโซเทิร์มของการดูดซับ

ไอโซเทิร์มของการดูดซับเป็นลักษณะเส้นกราฟเพื่อบอกถึงปริมาณการดูดซับสาร หรือไอออนบนผิวของตัวดูดซับต่าง ๆ เส้นกราฟที่ได้จากการลากเส้นต่อกันระหว่างจุดต่าง ๆ ซึ่งได้จากความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของสารหรือไอออนที่ถูกดูดซับไว้ต่อหน่วยน้ำหนักของอนุภาคดูดซับกับความเข้มข้นของสาร หรือไอออนที่เหลืออยู่ในสารละลายที่สภาวะสมดุล ณ อุณหภูมิคงที่ โดยทั่วไปการศึกษาการดูดซับในดินมักพบไอโซเทิร์มใน 4 ลักษณะ (ภาพที่ 3) (Sposito, 2008) ซึ่งสามารถจำแนกได้ด้วยลักษณะความโค้งของความชันของเส้นไอโซเทิร์มในช่วงเริ่มต้น ดังนี้

1) S-curve isotherm ความชันในช่วงเริ่มต้นจะต่ำและจะค่อย ๆ เพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของสารละลายเพิ่มขึ้น และลดลงเมื่อพื้นที่ในการดูดซับมีพื้นที่ลดลง ไอโซเทิร์มชนิดนี้ชี้ให้เห็นว่าความเข้มข้นต่ำ ๆ พื้นที่ผิวของสารดูดซับจะมีแรงดึงดูด (affinity) ต่อสารที่ถูกดูดซับต่ำ แต่จะเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นสูงขึ้น

2) L-curve (langmuir) isotherm ความชันในช่วงเริ่มต้นจะสูงมากแล้วจะค่อย ๆ ลดลงเมื่อความเข้มข้นสูงขึ้น พฤติกรรมการดูดซับเช่นนี้สามารถอธิบายได้ว่า สารดูดซับมีแรงดึงดูด หรือมีความสามารถในการดูดซับสาร หรือไอออนในสารละลายที่ความเข้มข้นต่ำ และจะลดลงเมื่อความเข้มข้นสูงขึ้นเนื่องจากพื้นที่ว่างในการดูดซับมีน้อยลง

3) H-curve (high affinity) isotherm มีลักษณะความชันในช่วงเริ่มต้นสูงมาก (เมื่อเปรียบเทียบกับ L-curve isotherm) ลักษณะดังกล่าวแสดงว่าสารดูดซับมีความสามารถในการดูดซับได้สูง ซึ่งอาจจะเกิด inner-sphere complexation หรือเกิดปฏิกิริยาด้วยแรงแวนเดอร์วาล



ภาพที่ 3 ลักษณะเส้นกราฟไอโซเทิร์มของการดูดซับ

ที่มา: Sposito (2008)

4) C-curve isotherm ความชันของกราฟนี้จะไม่ผันแปรตามความเข้มข้นของสารละลายแสดงถึงกลไกการแยกส่วน (partition mechanism) ซึ่งไอออนหรือโมเลกุลที่สามารถถูกดูดซับถูกทำให้แพร่กระจายหรือแยกออกระหว่างบริเวณใกล้ผิวตัวดูดซับ (interfacial phase) กับสารละลาย โดยปราศจากพันธะจำเพาะใด ๆ (specific bonding) ระหว่างตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับ

## 10.2 สมการที่ใช้อธิบายไอโซเทิร์ม

โดยทั่วไปสมการที่ใช้อธิบายไอโซเทิร์มของการดูดซับมีหลายชนิด เนื่องจากมีหลายทฤษฎีที่ได้ถูกนำมาอธิบายเกี่ยวกับกับสมดุลของการดูดซับที่เกิดขึ้น แต่ที่นิยมใช้ในการศึกษาเกี่ยวกับการดูดซับด้วยคินคือสมการ Langmuir และ Freundlich (Wang *et al.*, 2007)

ไอโซเทิร์มการดูดซับมีหลายชนิด เนื่องจากมีหลายทฤษฎีที่ใช้อธิบายเกี่ยวกับสมดุลของการดูดซับที่เกิดขึ้น แต่ที่นิยมใช้มากที่สุดในการอธิบายการดูดซับในระบบของเหลว คือ ไอโซเทิร์มการดูดซับแบบ Freundlich (Freundlich adsorption isotherm) และไอโซเทิร์มของการดูดซับแบบ Langmuir (Langmuir adsorption isotherm) (Naidu, 1998; Sparks, 2007; Srivastava *et al.*, 2005)

### 10.2.1 ไอโซเทิร์มการดูดซับแบบ Freundlich

สมการของ Freundlich เป็นสมการที่ถูกสร้างขึ้น เพื่อที่จะอธิบายสมดุลของการดูดซับ โดยมีรูปแบบที่เป็น empirical equation สมการของ Freundlich เป็นที่นิยมกันอย่างกว้างขวางอันเป็นผลเนื่องมาจากที่สมการของ Freundlich สามารถอธิบายข้อมูลของกระบวนการดูดซับส่วนใหญ่ได้อย่างถูกต้องและแม่นยำ (Apple and Leana, 2002; Boonjar *et al.*, 2007) โดยสมการ Freundlich สามารถเขียนอยู่ในรูปสมการ (1) และสามารถเปลี่ยนให้อยู่ในรูปสมการเชิงเส้นได้ดังสมการ (2)

$$q = K_F C^{1/n} \quad (1)$$

โดยที่  $q$  = ปริมาณของตัวถูกละลายที่ถูกดูดซับต่อหน่วยน้ำหนักของสารดูดซับ มีหน่วยเป็น มิลลิกรัมต่อกรัม

$C$  = ความเข้มข้นของตัวถูกละลายในสารละลายที่จุดสมดุล มีหน่วยเป็นมิลลิกรัมต่อลิตร หรือมิลลิกรัมต่อกิโลกรัม

$K_F, 1/n$  = ค่าคงที่ของระบบ

และสามารถเปลี่ยนให้อยู่ในรูปสมการเชิงเส้นได้ดังนี้

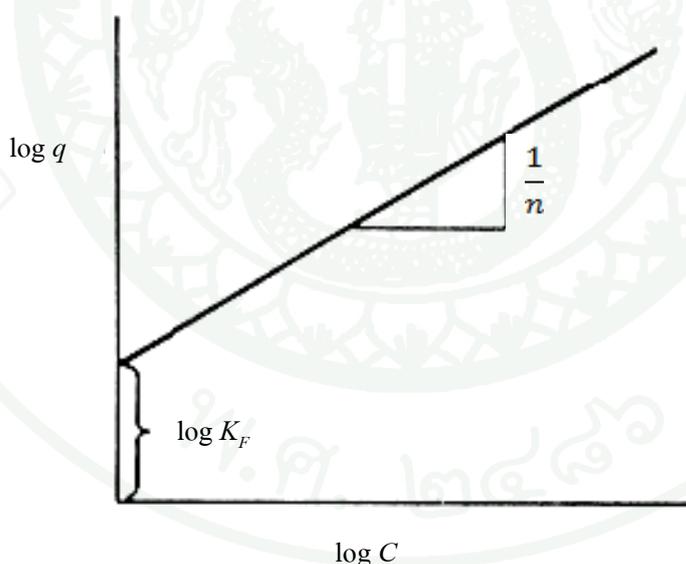
$$\text{Log } q = \text{Log } K_F + \frac{1}{n} \text{Log } C \quad (2)$$

เมื่อเขียนกราฟระหว่าง  $\log q$  กับ  $\log C$  จะได้เส้นตรง ซึ่งมีความชัน  $1/n$  และจุดตัดแกน  $y$  เท่ากับ  $\log K_F$  โดยความสัมพันธ์ของสมการ (2) แสดงได้ดังภาพที่ 4

ถ้า  $1/n = 1$  ไอโซเทิร์มการดูดซับเป็นแบบเส้นตรง

ถ้า  $1/n < 1$  บอกถึงความสามารถในการดูดซับของตัวดูดซับต่ำในทุกค่าของความเข้มข้น  $C$  หรือ กล่าวว่ามีปริมาณพื้นที่ผิวบนตัวดูดซับในปริมาณจำกัดในการดูดซับ

ถ้า  $1/n > 1$  บอกถึงความสามารถในการดูดซับของตัวดูดซับจะดูดซับได้มาก หรือกล่าวว่ามีปริมาณพื้นที่ผิวบนตัวดูดซับปริมาณมากในการดูดซับ



ภาพที่ 4 ไอโซเทิร์มการดูดซับแบบเชิงเส้นของ Freundlich

#### 10.2.2 ไอโซเทิร์มการดูดซับแบบ Langmuir

Langmuir isotherm บางครั้งเรียกว่า ideal localized monolayer model มีสมมุติฐานที่สำคัญ ดังนี้ (Alloway, 1995; Sparks, 2007; Sposito, 2008)

- 1) แต่ละตำแหน่งที่ถูกดูดซับบนผิวจะรับได้เพียงหนึ่งโมเลกุลเท่านั้น หรือกล่าวได้ว่าการดูดซับผิวเพียงชั้นเดียว
- 2) มีพื้นที่ที่ถูกดูดซับจำกัด โมเลกุลที่ถูกดูดซับที่ผิวของของแข็งอยู่ในตำแหน่งแน่นอน
- 3) ตรงบริเวณดูดซับที่ผิวจะเกิดอัตราการดูดซับและอัตราการคายซึ่งอัตราการดูดซับมีมากกว่าอัตราการคายจนกระทั่งถึงสถานะสมดุล (อัตราการดูดซับเท่ากับอัตราการคาย)
- 4) พลังงานในการดูดซับมีค่าเท่ากันในทุก ๆ ตำแหน่ง

นอกจากนี้โมเลกุลที่ถูกดูดซับผิวไม่สามารถเคลื่อนย้ายไปมาอย่างอิสระระหว่างพื้นที่ผิว หรือทำปฏิกิริยากับโมเลกุลอื่นที่อยู่ใกล้ได้ โดยสมการ Langmuir แสดงได้ดังนี้

$$q_e = \frac{Q_m}{1 + K C_e} \quad (3)$$

เมื่อ  $q_e$  = จำนวนโมเลกุลอนุภาคถูกดูดซับต่อหน่วยน้ำหนักที่ความเข้มข้น  $C$

$Q_m$  = จำนวนโมเลกุลอนุภาคที่ถูกดูดซับต่อหน่วยน้ำหนักอนุภาคดูดซับที่จัดเรียงตัวเพียงชั้นเดียว (monolayer) บนพื้นที่ผิวดูดซับ

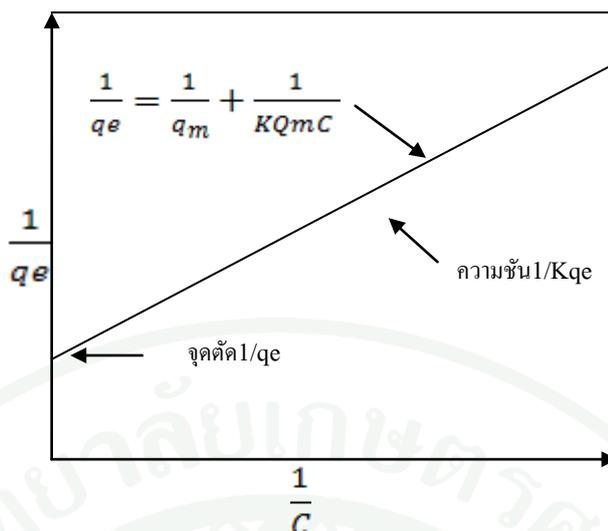
$C_e$  = ความเข้มข้นที่จุดสมดุล (มิลลิกรัมต่อลิตร)

$K$  = ค่าคงที่ซึ่งสัมพันธ์กับพลังงาน

และเปลี่ยนอยู่ในรูปสมการเชิงเส้น ดังนี้

$$\frac{1}{q_e} = \frac{1}{Q_m} + \frac{1}{K Q_m C} \quad (4)$$

เขียนกราฟระหว่าง  $1/q_e$  และ  $1/C$  จะได้กราฟที่เป็นเส้นตรงมีค่าความชันเท่ากับ  $1/Kq_e$  และจุดตัด ดังภาพที่ 5



ภาพที่ 5 ไอโซเทิร์มการดูดซับแบบเชิงเส้นของ Langmuir

## 10. งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับอิทธิพลของสมกไทต์ต่อโลหะหนัก

จากสมบัติของสมกไทต์ที่ได้กล่าวถึงมาแล้วทำให้มีผู้สนใจศึกษาเกี่ยวกับการนำสมกไทต์มาใช้ประโยชน์ โดยเฉพาะงานทางด้านสิ่งแวดล้อม ใช้เป็นวัสดุรองพื้นในหลุมฝังกลบขยะเพื่อป้องกันการชะละลายขยะที่มีโลหะหนักเป็นส่วนผสม ไม่ให้ลงสู่แหล่งน้ำใต้ดิน

Brigatti *et al.* (2008) ได้ศึกษาความจุในการดูดซับปรอท (Hg) โดยแรมอนต์มอริลโลไนต์ และเวอร์มิคิวไลต์ด้วยวิธี X-ray diffraction (XRD), Thermogravimetry coupled with mass spectroscopy (TG-MS), และ Extended X-ray Absorption Fine Structure (EXAFS) พบว่า มอนต์มอริลโลไนต์สามารถดูดซับปรอทได้  $37.7 \text{ cmol kg}^{-1}$  ซึ่งมากกว่าเวอร์มิคิวไลต์ที่ดูดซับได้เพียง  $28 \text{ cmol kg}^{-1}$  เมื่อวิเคราะห์ด้วย XRD พบว่าค่าระยะห่างระหว่างผลึก (d-spacing) ของมอนต์มอริลโลไนต์มีค่าเท่ากับ 1.52 นาโนเมตร และเวอร์มิคิวไลต์อยู่ที่ 1.45 นาโนเมตร เมื่อดูดซับปรอททำให้ค่าระยะห่างระหว่างผลึกมีค่าเพิ่มขึ้นทั้งในมอนต์มอริลโลไนต์ และเวอร์มิคิวไลต์ โดยทั่วไปเมื่อเผาที่อุณหภูมิ 230 องศาเซลเซียสปรอทจะสูญหายไป ในมอนต์มอริลโลไนต์จะใช้อุณหภูมิถึง 600 องศาเซลเซียส ในขณะที่เวอร์มิคิวไลต์จะอยู่ที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส แสดงให้เห็นว่าการดูดซับไอออนของปรอทในมอนต์มอริลโลไนต์ใช้พลังงานในการดูดซับที่สูงกว่าจึงต้องใช้อุณหภูมิที่สูงในการทำให้ปรอทหลุดออกจากตำแหน่งที่ถูกตรึงไว้ จากงานวิจัยนี้แสดงให้เห็นว่าปริมาณการดูดซับปรอทจะไม่ได้ขึ้นอยู่กับค่าความจุแลกเปลี่ยนแคตไอออนเสมอไป เนื่องจากมอนต์มอริลโลไนต์มีค่าความจุแลกเปลี่ยนแคตไอออนต่ำกว่าเวอร์มิคิวไลต์แต่มีประสิทธิภาพในการดูดซับได้ดีกว่า ซึ่งขึ้นอยู่กับปริมาณของปรอทภายในหลุมระหว่างชั้น และตำแหน่งของการเกิดประจุ รวมทั้ง

ความสามารถในการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนที่เกิดขึ้นกับปรอท มอนด์มอริลโลไนต์จะเกิดสารเชิงซ้อนได้ดีกว่า เนื่องจากมีความเป็นเบสและมีหมู่ไฮดรอกซิล (OH) ในการจับสารปรอทให้เกิดเป็นสารเชิงซ้อนได้มากกว่าเวอร์มิคิวไลต์

Bedoui *et al.* (2007) ได้ทำการศึกษาประสิทธิภาพการเคลื่อนย้าย Cd(II) ออกจากสารละลายโดยใช้สมกไทต์ และ Lewatite S 100 ซึ่งเป็นเรซินที่มีความจุในการดูดซับไอออนได้ดี โดยมีปัจจัยที่เกี่ยวข้อง คือ เวลาที่ใช้ในการดูดซับและความเข้มข้นของโลหะ พบว่า ที่ระยะเวลา 120 นาที เรซิน Lewatite S 100 สามารถดูดซับโลหะหนักที่อยู่ในสารละลายได้มากที่สุด ในขณะที่สมกไทต์ใช้เวลาถึงประมาณ 6 ชั่วโมง โดยทั้งสองมีประสิทธิภาพในการดูดซับ Cd(II) ได้ดี แต่ต่างกันที่ระยะเวลาที่ใช้ในการดูดซับ ถึงแม้ว่าสมกไทต์จะใช้เวลาในการดูดซับนานกว่าเรซิน งานวิจัยนี้แสดงให้เห็นว่า สมกไทต์มีประสิทธิภาพในการดูดซับได้ดีแม้ว่าจะด้อยกว่าเรซิน Lewatite S 100 ซึ่งเป็นวัสดุที่สังเคราะห์ขึ้น และมีราคาสูงเมื่อเทียบกับสมกไทต์ซึ่งเป็นวัสดุที่หาได้ง่ายจากธรรมชาติ

Islem *et al.* (2007) ได้ใช้สมกไทต์ในสภาพธรรมชาติของประเทศ Tunisian เพื่อการดูดซับตะกั่ว โดยใช้ตัวอย่างสมกไทต์จากแหล่งที่แตกต่างกันในประเทศ Tunisian มีด้วยกัน 4 ตัวอย่าง (AYD, AYDh, AYDs, AYDc) ซึ่งสมบัติและองค์ประกอบเชิงแร่มีความแตกต่างกัน โดยพบว่าตัวอย่าง AYDs มีประสิทธิภาพในการดูดซับได้ดีถึงร้อยละ 69 ของปริมาณตะกั่วที่มีอยู่ในสารละลาย โดยใช้เวลาในการดูดซับเพียง 20 นาที เมื่อเปรียบเทียบกับคาร์บอนกัมมันต์ ปริมาณของดินเหนียว 1 กรัม จะมีประสิทธิภาพเทียบเท่ากับคาร์บอนกัมมันต์ 0.125 กรัม

นอกจากสมบัติของสมกไทต์ที่มีความจุแลกเปลี่ยนแคตไอออนสูง การศึกษาลักษณะของการเกิดประจุใน โครงสร้างและตำแหน่ง ก็มีบทบาทสำคัญในการดูดซับและมีผลต่อโลหะหนักหรือ แคตไอออนที่อยู่ในสารละลายดิน ประจุที่เกิดขึ้นเป็นลักษณะที่สำคัญในการระบุชนิดของแร่ในกลุ่มสมกไทต์ และการกักเก็บแคตไอออนในดิน ซึ่งเป็นธาตุอาหารที่สำคัญในการเจริญเติบโตของพืช (Guggenheim *et al.*, 2006)

Chittamart *et al.* (2010) ได้ศึกษาเกี่ยวกับประจุและองค์ประกอบเชิงแร่ในสมกไทต์จากวัตถุดิบกำเนิดที่แตกต่างกัน โดยศึกษาจากสมบัติของสมกไทต์ ได้แก่ ค่าความจุแลกเปลี่ยนแคตไอออน และการยึดหดตัวภายในหีบระหว่างชั้นของแร่โดยวิธีแอลคิลแอมโมเนียม (alkylammonium) พบว่า สมกไทต์เป็นชนิดไบเซลล์ไลต์ซึ่งเป็นสมกไทต์ที่มีความหนาแน่นประจุ (charge density) และมีเหล็กในปริมาณสูง เห็นได้ว่าสมกไทต์มีความจุในการตรึง

แคตไอออนได้ดีเนื่องจากมีค่าความหนาแน่นประจุสูง จึงมีความสำคัญในการปลดปล่อย และตรึงธาตุอาหาร โดยเฉพาะ แอมโมเนียม ( $\text{NH}_4^+$ ) และโพแทสเซียม ( $\text{K}^+$ )



## อุปกรณ์และวิธีการ

### อุปกรณ์

1. แผนที่สภาพภูมิประเทศมาตราส่วน 1:50,000 ของกรมแผนที่ทหาร ระยะเวลาที่ 5140 II, 5240 I, 5241 II, 5241 IV, 5239 III, 5139 III (กรมแผนที่ทหาร, 2516ก, 2516ข, 2516ค, 2516ง, 2523, 2524)
2. แผนที่ดินของจังหวัดเพชรบูรณ์และลพบุรี มาตราส่วน 1:100,000 ของกรมพัฒนาที่ดิน กระทรวงเกษตรและสหกรณ์ (กองสำรวจและจำแนกดิน, 2519; 2524)
3. แผนที่ธรณีวิทยาประเทศไทย มาตราส่วน 1:250,000 ของกรมทรัพยากรธรณี (กรมทรัพยากรธรณี, 2528)
4. เครื่องมือการสำรวจดินภาคสนามมาตรฐาน (เอิบ, 2552; Soil Survey Division Staff, 1993)
5. เครื่องมือ อุปกรณ์และสารเคมีที่ใช้ในการวิเคราะห์ดินทางเคมี ฟิสิกส์ จุลสัณฐานวิทยา และแร่วิทยา
6. เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องอื่น ๆ

## วิธีการ

### 1. การศึกษาข้อมูลเบื้องต้น และวางแผนก่อนออกสำรวจภาคสนาม

1.1 ศึกษาและรวบรวมข้อมูลด้านต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องจากเอกสารและแผนที่ชนิดต่าง ๆ เพื่อใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานในการกำหนดจุดเก็บตัวอย่างดิน ในบริเวณพื้นที่ที่ทำการศึกษา

1.2 กำหนดจุดเก็บตัวอย่างเพื่อเป็นตัวแทนครอบคลุมบริเวณทั้งหมดของพื้นที่ที่ทำการศึกษา

### 2. การปฏิบัติงานในภาคสนาม

2.1 กำหนดตำแหน่งเก็บตัวอย่างดินที่จะใช้เป็นตัวแทน

2.2 ขุดหน้าตัดดินตามตำแหน่งที่กำหนดไว้ โดยมีขนาด กว้าง 1.5 เมตร ยาว 2 เมตร ลึก 2 เมตร แต่งหน้าตัดดินให้สามารถมองเห็นชั้นดินในสนามได้ชัดเจน แบ่งชั้นดินตามชั้นกำเนิดดิน (genetic horizon) ตรวจสอบสมบัติดินในแต่ละชั้นพร้อมทำคำอธิบายหน้าตัดดินตามวิธีการศึกษาชั้นดินในภาคสนาม (พิสุทธิ์, 2518; เอิบ, 2552) เพื่อศึกษาการเกิดดิน

2.3 การเก็บตัวอย่างดินเพื่อทำการวิเคราะห์ในห้องปฏิบัติการ แยกออกเป็น 2 วิธี คือ

2.3.1 ตัวอย่างดินที่ถูกรบกวน (disturbed soil samples) เก็บดินทุกชั้น ตามชั้นกำเนิดดิน ที่ได้แบ่งไว้ตลอดหน้าตัดดิน ชั้นละประมาณ 1-2 กิโลกรัม ก่อนนำดินไปวิเคราะห์ต้องผึ่งดินให้แห้งในที่ร่ม บดดินด้วยโกร่งบดดินแล้วร่อนผ่านตะแกรงขนาดช่องเปิด 2 มิลลิเมตรสำหรับการวิเคราะห์ทั่วไป บดดินให้ละเอียดโดยใช้เครื่องบดให้มีขนาดเล็กกว่า 0.5 มิลลิเมตร สำหรับการวิเคราะห์ปริมาณอินทรีย์วัตถุ และไนโตรเจน (เอิบ, 2552; Buol *et al*, 1980)

2.3.2 เก็บตัวอย่างดินที่ไม่ถูกรบกวน (undisturbed soil samples) เลือกเก็บเฉพาะชั้นที่ต้องการนำมาศึกษาสภาพนำน้ำของดิน (hydraulic conductivity) โดยใช้กระบอกเก็บตัวอย่าง (core)

### 3. การวิเคราะห์ในห้องปฏิบัติการ

#### 3.1 การวิเคราะห์สมบัติทางฟิสิกส์

3.1.1 การกระจายของอนุภาคดิน (particle size distribution) โดยวิธีไปเปตต์ (pipette method) (Kilmer and Alexander, 1949; Day, 1965) ผลที่ได้จากการวิเคราะห์นำมาแจกแจงประเภทของเนื้อดิน (soil textural class) โดยการเปรียบเทียบกับชั้นเนื้อดินตามเกณฑ์ของกระทรวงเกษตร สหรัฐ (USDA textural class) (Soil Survey Staff, 2006)

3.1.2 ความหนาแน่นรวมของดิน (bulk density) โดยวิธี core method ใช้กระบอบอกเก็บตัวอย่างดินโดยไม่ทำลายโครงสร้าง และโดยวิธี clod method ซึ่งได้จากเก็บตัวอย่างดินที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 3 เซนติเมตร (Blake and Hartge, 1986)

3.1.3 สัมประสิทธิ์การขยายตัวเชิงเส้น (coefficient of linear extensibility: COLE) โดยวิธี อบแห้งในขณะที่ดินอิ่มตัวด้วยน้ำ (soil pastes) (Schafer and Singer, 1976) โดยมีอุปกรณ์และวิธีการดังนี้

#### อุปกรณ์

- 1) ถ้วยพลาสติกขนาด 200 มิลลิลิตร
- 2) Spatula (ช้อนตักดิน)
- 3) กระบอบนึ่งพลาสติก ขนาด 25 มิลลิลิตร เส้นผ่าศูนย์กลาง 1 เซนติเมตร
- 4) Calipers หรือ travelling microscope สำหรับวัดความยาวของแท่งดิน

#### วิธีการ

1) ใส่ดินที่มีขนาดอนุภาคเล็กกว่า 2 มิลลิเมตร ลงในถ้วยพลาสติกประมาณ 1/2 ถ้วย เติมน้ำลงไปแล้วใช้ช้อนตักดินจนจนกระทั่งดินอิ่มตัวด้วยน้ำ คือผิวหน้าดินมีลักษณะมันวาว และดินไม่ไหลเมื่อเอียงถ้วย เมื่อเคาะเบา ๆ ผิวหน้าต้องเรียบ จากนั้นปิดฝาแล้วตั้งทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง

2) ปรับให้ดินอยู่ในลักษณะอิ่มตัวด้วยน้ำ จากนั้นบรรจุดินใส่ในหลอดชนิดดินให้ดินออกเป็นแท่ง ยาว 5-7 เซนติเมตร ลงบนถาด หรือภาชนะที่เคลือบด้วยเทฟลอน เพราะจะไม่ทำให้แท่งดินโค้งเมื่อหดตัว

3) วัดความยาวของแท่งดินด้วย caliper และนำเข้าสู่อบจนดินแห้งสนิทแล้วนำมาวัดความยาวอีกครั้ง แล้วนำค่าที่ได้ไปคำนวณ

วิธีคำนวณ

$$COLE = \frac{Lm - Ld}{Ld} = \frac{Lm}{Ld} - 1$$

Lm = ความยาวของแท่งดินเมื่อชื้น (moist)

Ld = ความยาวของแท่งดินหลังจากอบแห้ง (dry)

### 3.2 การวิเคราะห์สมบัติทางเคมี

3.2.1 พีเอชดิน (pH) โดยใช้เครื่องมือวัดพีเอช (pH meter) ใช้อัตราส่วนดินต่อน้ำ และดินต่อสารละลาย 1 M KCl เท่ากับ 1:1 (National Soil Survey Center, 1996)

3.2.2 สภาพการนำไฟฟ้า (electrical conductivity) โดยวัดสภาพการนำไฟฟ้าของสารสกัดอิ่มตัวของดิน (saturation extract) วัดที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ด้วยเครื่อง electrical conductivity bridge (Richards, 1954)

3.2.3 อินทรีย์วัตถุในดิน โดยวิธี Walkley and Black Titration (Walkley and Black, 1934) ซึ่งค่าที่ได้จะอยู่ในรูปของคาร์บอนอินทรีย์สามารถนำค่าที่ได้คูณด้วย 1.724 ก็จะได้ค่าของอินทรีย์วัตถุในดิน

3.2.4 ไนโตรเจนรวม (total nitrogen) โดยวิธี Kjeldahl method (Jackson, 1965)

3.2.5 ฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ (available phosphorous) โดยวิธี Bray II แล้ววัดปริมาณฟอสฟอรัสด้วยเครื่อง Spectrophotometer (Bray and Kurtz, 1945)

3.2.6 โปแทสเซียมที่เป็นประโยชน์ (available potassium) โดยสกัดด้วย 1 M  $\text{NH}_4\text{OAc}$  ที่เป็นกลาง (pH 7.0) (Thomas, 1982b) แล้ววัดปริมาณโปแทสเซียมด้วยเครื่อง atomic absorption spectrophotometer (AAS)

3.2.7 เบสที่สกัดได้ (extractable bases) ซึ่งประกอบด้วย แคลเซียม แมกนีเซียม โปแทสเซียม และโซเดียม โดยสกัดด้วยสารละลาย 1 M  $\text{NH}_4\text{OAc}$  ที่เป็นกลาง (pH 7.0) (Peech, 1945) แล้ววัดปริมาณด้วยเครื่อง atomic absorption spectrophotometer (AAS)

3.2.8 ความจุแลกเปลี่ยนแคตไอออน (cation exchange capacity) โดยการชิมชะ แคตไอออน ด้วยสารละลาย 1 M  $\text{NH}_4\text{OAc}$  ที่เป็นกลาง (pH 7.0) และแทนที่แอมโมเนียมไอออนด้วย สารละลายโซเดียมคลอไรด์ (10%) ในสภาพเป็นกรด กลั่นหาแอมโมเนียมไอออน แล้วคำนวณค่า ความจุแลกเปลี่ยนแคตไอออนของดิน (Chapman, 1965)

3.2.9 อัตราร้อยละความอิ่มตัวเบส (base saturation percentage) โดยการคำนวณจาก ค่าเบสรวมที่สกัดได้ (sum bases) ซึ่งได้แก่ผลรวมของแคลเซียม แมกนีเซียม โปแทสเซียม และ โซเดียม และความเป็นกรดที่สกัดได้ (National Soil Survey Center, 1996; Thomas, 1982a) จาก สูตร

$$\%BS = \frac{\text{sum bases}}{\text{extractable bases} + \text{extractable acidity}} \times 100$$

### 3.3 การวิเคราะห์องค์ประกอบเชิงแร่ของดิน

วิเคราะห์ชนิด และปริมาณของแร่ในกลุ่มอนุภาคขนาดดินเหนียว (clay fraction) ที่มี ขนาดเล็กกว่า 2 ไมโครเมตร โดยวิธีเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-ray diffraction: XRD) (Whittig and Allardice, 1986)

### 3.3 การศึกษาอิทธิพลและปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ

การศึกษาอิทธิพลและปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับของสารละลายแอมเมียม ตะกั่ว สังกะสี และทองแดง โดยใช้วิธีการดูดซับแบบแบตช์ (batch experiment) โดยปัจจัยที่ทำการศึกษา

ได้แก่ ค่าพีเอช และความเข้มข้นของตะกั่ว สังกะสี ทองแดง และแคดเมียมในสารละลาย (Andrejkovicova *et al.*, 2010)

ซึ่งตัวอย่างอนุภาคขนาดดินเหนียว 100 มิลลิกรัม ใส่ลงในหลอดทดลองเดิมสารละลาย 10 มิลลิลิตรของสารละลายโลหะหนักที่เตรียมใน 0.01 M  $\text{CaCl}_2$  ซึ่งเป็นอิเล็กโทรไลต์เพื่อจำลองลักษณะสารละลายที่มีอยู่ในสภาพธรรมชาติของดิน โดยศึกษาผลของพีเอชในช่วง 3-8 ใช้ความเข้มข้นของโลหะหนักที่ 50 มิลลิกรัมต่อลิตร และปรับค่าพีเอชโดยใช้ 0.1 M NaOH และ 0.1 M HCl

การศึกษาผลของความเข้มข้นของสารละลายโลหะหนักทำการศึกษาที่ความเข้มข้น 10, 20, 30, 40, 50 และ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ค่าพีเอช 6 จากนั้นนำหลอดทดลองที่ปรับค่าพีเอชเรียบร้อยแล้วไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าที่ความเร็ว 180 รอบต่อนาทีเป็นเวลา 24 ชั่วโมงเพื่อให้สารละลายและอนุภาคดูดซับถึงจุดสมดุล เมื่อครบ 24 ชั่วโมง นำหลอดทดลองมาปรับค่าพีเอชสุดท้ายที่กำหนดไว้ตั้งทิ้งไว้ 3 ชั่วโมง จากนั้นนำหลอดทดลองเข้าเครื่องเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง ที่ความเร็วรอบ 1500 รอบต่อนาทีเป็นเวลา 10 นาที เก็บสารละลายใสด้านบนที่ได้เพื่อวัดหาความเข้มข้นของ ตะกั่ว ทองแดง สังกะสี และแคดเมียมด้วยเครื่อง atomic absorpton spectrophotometer

### 3.5 สมดุลและไอโซเทิร์มของการดูดซับ

เมื่อพิจารณาจากการดูดซับที่เกิดขึ้นระหว่างอนุภาคที่ถูกดูดซับในสารละลายและอนุภาคดูดซับที่จุดสมดุล กระบวนการที่เกิดขึ้นจะเกิดขึ้นได้ต่อเมื่อปริมาณของตัวถูกละลายที่ถูกดูดซับบนพื้นผิวของอนุภาคดูดซับ และปริมาณอนุภาคที่ถูกดูดซับถูกละลายหลุดออกจากพื้นผิวเข้าสู่สภาวะสมดุล (equilibrium state) ซึ่งที่จุดนี้เรียกว่า จุดสมดุลการดูดซับ โดยที่จุดสมดุลของการดูดซับจะไม่มี การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของอนุภาคที่ถูกละลายบนพื้นผิวของอนุภาคดูดซับ สมดุลนี้เป็นลักษณะเฉพาะของระบบทั้งหมด โดยทั่วไปปริมาณตัวถูกละลายที่ถูกดูดซับ ณ จุดสมดุลจะเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของตัวถูกละลาย การแสดงปริมาณตัวถูกละลายต่อน้ำหนักของอนุภาคดูดซับ ซึ่งสัมพันธ์กับความเข้มข้นที่จุดสมดุลในสารละลายที่อุณหภูมิคงที่เรียกว่า ไอโซเทิร์มการดูดซับ (adsorption isotherm) ซึ่งมีประโยชน์มากในการหาความสามารถในการดูดซับสิ่งสกปรกในน้ำ เพื่อเปรียบเทียบหาชนิดของสารดูดซับที่ดีที่สุด

## ผลและวิจารณ์

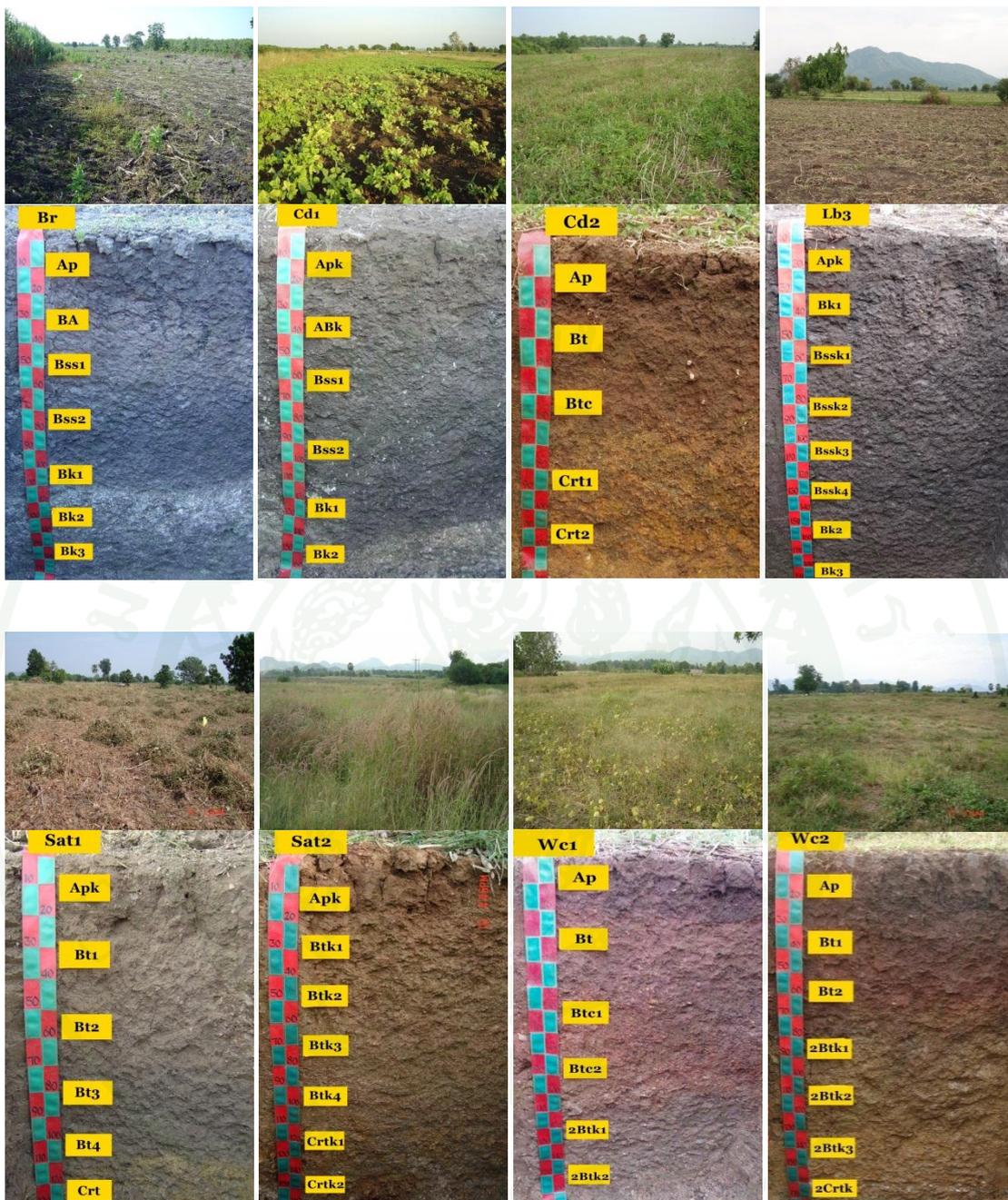
การศึกษาการดูดซับ ตะกั่ว ทองแดง สังกะสี และแคลเซียม ของสมกไทต์ในเวอร์ทิซอลส์ที่คอน โดยศึกษาในตัวอย่างอนุภาคขนาดดินเหนียวของดินชั้นบนและดินชั้นล่างในเวอร์ทิซอลส์ที่คอน ได้แก่ ชุดดินบุรีรัมย์ (Br) ชุดดินลพบุรี (Lb) ชุดดินชัยบาดาล (Cd1, Cd2) ชุดดินสมอทอด (Sat1, Sat2) และชุดดินวังชมภู (Wc1, Wc2) การศึกษาประกอบด้วย ลักษณะทั่วไปของดินและสัญญาณวิทยาสนาม สมบัติทางเคมีและฟิสิกส์ วิเคราะห์ชนิดและปริมาณของแร่ในกลุ่มของอนุภาคแร่ดินเหนียว การดูดซับตะกั่ว ทองแดง สังกะสี และแคลเซียมของอนุภาคดินเหนียว ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับตะกั่ว แคลเซียม สังกะสี และทองแดง และไอโซเทอร์มของการดูดซับตะกั่ว ทองแดง สังกะสี และแคลเซียม

### 1. ลักษณะทั่วไปและสัญญาณวิทยาสนามของดิน

ดินที่ใช้ทำการศึกษาจัดอยู่ในอันดับเวอร์ทิซอลส์ อยู่ในบริเวณที่คอน สภาพแวดล้อมและการใช้ที่ดินของชุดดินที่ใช้ในการศึกษาแสดงในภาพที่ 6 และตารางที่ 2 โดยดินในอันดับเวอร์ทิซอลส์ที่คอน มีวัตถุต้นกำเนิดมาจากการผสมของตะกอนน้ำพาท้องถิ่น การชะล้างและผุพังอยู่กับที่ของหินปูน แอนดริไซต์ และบะซอลต์ โดยพื้นที่อยู่ในตำแหน่งที่มีลักษณะลูกคลื่นลอนลาด (ความลาดชัน 1-2%) มีพิสัยความสูงจากระดับทะเลปานกลางเฉลี่ยอยู่ที่ 5-102 เมตร (MSL) การใช้ประโยชน์ของที่ดินโดยทั่วไปใช้ปลูกพืชไร่ เช่น อ้อย ข้าว โปด ถั่วเขียว เป็นต้น

#### 1.1 ชุดดินบุรีรัมย์ (Br: Typic Haplustert, very fine, smectitic, isohyperthermic)

ชุดดินบุรีรัมย์ อยู่ในบริเวณบ้านชัยบาดาลยุคใหม่ ตำบลชัยบาดาล อำเภอชัยบาดาล จังหวัดลพบุรี อยู่ในบริเวณส่วนตัดของเชิงเขาตอนล่าง มีความสูง 40 เมตร จากระดับทะเลปานกลาง ลักษณะดินเป็นดินลึก พัฒนาการของหน้าตัดดินเป็น Ap-BA-Bss-Bk วัตถุต้นกำเนิดเป็นตะกอนน้ำพาท้องถิ่นสลายตัวมาจากหินปูน (local alluvium derived from limestone) สภาพพื้นที่เป็นลูกคลื่นลอนลาด ความชันร้อยละ 1 ดินมีการระบายน้ำดีปานกลาง การซาบซึมน้ำช้า การไหลบ่าของน้ำบนผิวดินช้า สภาพการใช้ที่ดิน มีการปลูกอ้อย มะขาม พริก และพืชผักสวนครัว



ภาพที่ 6 หน้าตัดดิน และการใช้ที่ดินของเวอร์ทิซอลส์ที่ดอน

Br = ชุดดินบุรีรัมย์, Cd1, Cd2 = ชุดดินชัยบาดาล, Lb = ชุดดินลพบุรี, Sat1, Sat2 = ชุดดินสมอทอด, Wc1, Wc2 = ชุดดินวังชมพู

ตารางที่ 2 การจัดจำแนก สภาพแวดล้อม และตำแหน่งของเวอร์ทิซอลส์ที่ตอนที่ทำการศึกษา

Soil series	Classification	Landform	Parent material	Surrounding landform	Slope (%)	Elevation (m MSL)	Coordination	Land use
Upland Vertisols								
Buri Ram (Br)	Typic Haplustert	Dissected lower footslope	Local alluvium derived from limestone	Gently undulating	1.5	40	47P 0723218 E 1669816 N	Sugarcane, chili, teak, tamarind, mango,
Chai Badan 1 (Cd1)	Calcic Haplustert	Dissected upper footslope	Local alluvium derived from lime containing rocks	Undulating	2	52	47P 0721140 E 1668275 N	Mung bean, cassava, sugarcane,
Chai Badan 2 (Cd2)	Typic Haplustert	Lower middle slope on basalt corrosion plain	Residuum derived from weathered basalt	Undulating	1	99	47Q 0722140 E 1771808 N	Mung bean and corn
Lop Buri 3 (Lb3)	Typic Haplustert	Lower footslope	Local alluvium derived from limestone	Undulating	2	35	47P 0681855 E 1660992 N	Sesame and sorghum
Samo Thod 1 (Sat1)	Chromic Haplustert	Dissected upper footslope	Local alluvium on residuum derived from both weathered andesite and limestone	Undulating	1	83	47P 0715371 E 1745008 N	Mung bean field, bamboo, coconut, local trees and chili
Samo Thod 2 (Sat2)	Chromic Haplustert	Upper footslope	Local alluvium derived from limestone on residuum derived from weathered andesite	Undulating	2	93	47P 0711956 E 1745327 N	Corn and mung bean
Wang Chomphu 1 (Wc1)	Chromic Haplustert	Lower footslope	Local alluvium mixed wash over residuum derived from calcareous rocks	Undulating	1	96	47Q 0720488 E 1787343 N	Mango intercropped with mung bean, teak, eucalyptus and banana
Wang Chomphu 2 (Wc2)	Typic Haplustert	Lower dissected footslope	Local alluvium derived from calcareous rocks	Undulating	1	102	47Q 0722441 E 1795993 N	Pasture for grazing, livestock

ดินบนมีสีดํา หนาประมาณ 20 เซนติเมตร เนื้อดินเป็นดินเหนียว พิเศษดินในสนามเป็นต่างปานกลาง (field pH 8.0) ดินล่างลึก 20-170 เซนติเมตร มีสีดํา และดําปนเทา เนื้อดินเป็นดินเหนียวที่ระดับความลึก 20-110 เซนติเมตร เป็นดินเหนียว และเป็นดินร่วนเหนียว ที่ระดับความลึก 110-170+ เซนติเมตร พิเศษดินในสนามเป็นกรดเล็กน้อยถึงต่างปานกลาง (field pH 6.0-8.0)

พบรอยแตกกระแหงตลอดหน้าตัดดิน ดินบนพบรอยแตกขนาดใหญ่ในปริมาณค่อนข้างมาก รอยแตกต่อเนื่องกันตามแนวตั้งลงลึกถึงบางส่วนของดินล่างที่ระดับความลึก 15-40 เซนติเมตร ภายในดินล่างพบรอยแตกกระแหงขนาดเล็ก โดยแนวโน้มลดลงตามความลึก พบผิวหน้าอัดมัน (slickensides) ตลอดหน้าตัดดิน พบก้อนทรงมนของปูนขนาดเล็กในปริมาณน้อยถึงค่อนข้างมากที่ระดับความลึก 110-170 เซนติเมตร

#### 1.2 ชุดดินชัยบาดาล 1 (Cd1: Calcic Haplustert, very fine, smectitic, isohyperthermic)

ชุดดินชัยบาดาลในบริเวณบ้านถนนโค้ง ตำบลชัยบาดาล อำเภอชัยบาดาล จังหวัดลพบุรีอยู่ในบริเวณส่วนตัดของเชิงเขาตอนบน อยู่ที่ความสูง 52 เมตรจากระดับทะเลปานกลาง ลักษณะดินเป็นดินลึกลับมาก พัฒนาการของหน้าตัดดินเป็น Apk-ABk-Bss-Bk วัตถุต้นกำเนิดเป็นตะกอนน้ำพาท้องถิ่นที่สลายตัวมาจากหินที่สลายตัวแล้วให้ปูนเป็นองค์ประกอบภายในดิน (local alluvium derived from lime producing rocks) สภาพพื้นที่เป็นลูกคลื่นลอนลาด ความชันร้อยละ 2 ดินมีการระบายน้ำดี การซาบซึมน้ำปานกลาง การไหลบ่าของน้ำบนผิวดินปานกลาง ขณะทำการศึกษาระดับน้ำใต้ดินอยู่ลึกเกินกว่า 160 เซนติเมตรจากผิวดิน สภาพการใช้ที่ดิน มีการปลูกถั่วเขียว มันสำปะหลัง และอ้อย

ดินบนมีสีเทาเข้มมาก หนาประมาณ 20 เซนติเมตร เนื้อดินเป็นดินเหนียว พิเศษดินในสนามเป็นต่างปานกลาง (field pH 8.0) ดินล่างลึก 20-160+ เซนติเมตร มีสีเทาเข้มมาก สีดําและสีเทาเข้ม เนื้อดินเป็นดินเหนียว ที่ระดับความลึก 140-160+ เซนติเมตร เป็นดินร่วนเหนียวปนกรวด ที่ระดับความลึก 20-47 และ 110-140 เซนติเมตร พิเศษดินในสนามเป็นต่างปานกลาง (field pH 8.0)

ดินบนที่ระดับความลึก 0-20 เซนติเมตร พบชิ้นส่วนของปูนและหินผุ ขนาดเล็กในปริมาณน้อย พบรอยแตกกระแหงขนาดเล็ก ที่ระดับความลึก 20-140 เซนติเมตร ในปริมาณน้อยถึงมาก โดยพบมากที่ระดับความลึก 80-110 เซนติเมตร พบผิวหน้าอัดมันขนาดเล็กในปริมาณน้อยถึงมากที่ระดับความลึก 20-110 เซนติเมตรมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามความลึก พบรอยไหลในปริมาณค่อนข้างมากที่ระดับความลึก 47-80 เซนติเมตร และ 80-110 เซนติเมตร พบคราบดินเหนียวบนผนัง

ช่องว่างที่ระดับความลึก 140-160 เซนติเมตรในปริมาณน้อยและไม่ค่อยชัดเจน สำหรับที่ระดับความลึก 47-140 เซนติเมตร พบก้อนทรงมนของปูนที่สลายตัวได้ง่ายมีลักษณะเป็นจุดในปริมาณน้อยถึงมาก โดยพบมากที่ระดับความลึก 110-140 เซนติเมตร และ 140-160+ เซนติเมตรพบก้อนทรงมนของปูนที่มีความคงทนหลายขนาดในปริมาณมาก

### 1.3 ชุดดินชัยบาดาล 2 (Cd2: Typic Hapluster, fine, smectitic, isohyperthermic)

ชุดดินชัยบาดาลในบริเวณบ้านน้อย ตำบลหนองไผ่ อำเภอนองไผ่ จังหวัดเพชรบูรณ์ อยู่ในบริเวณส่วนต่ำของความลาดชันตอนกลางบนที่ราบหินบะซอลต์ที่ถูกกัดกร่อน มีความสูง 99 เมตรจากระดับทะเลปานกลาง ลักษณะดินเป็นดินลึกพัฒนาการของหน้าตัดดินเป็น Ap-Bt-Btc-Crt วัตถุต้นกำเนิดเป็นตะกอนตกค้างที่สลายตัวมาจากหินบะซอลต์ (residuum derived from weathered basalt) สภาพพื้นที่เป็นลูกคลื่นลอนลาดความชันร้อยละ 1 ดินมีการระบายน้ำดี การซาบซึมน้ำปานกลาง การไหลบ่าของน้ำบนผิวดินปานกลาง ขณะทำการศึกษาระดับน้ำใต้ดินอยู่ลึกเกินกว่า 130 เซนติเมตรจากผิวดิน สภาพการใช้ที่ดิน มีการปลูกข้าวโพดและถั่วเขียว

ดินบนมีสีน้ำตาลเข้ม หนาประมาณ 15 เซนติเมตร เนื้อดินเป็นดินเหนียวฟิเอชดินในสนามเป็นด่างปานกลาง (field pH 8.0) ดินล่างลึก 15-130 เซนติเมตรมีสีน้ำตาลเข้ม สีน้ำตาลปนเทา และสีน้ำตาลปนเทาเข้มเนื้อดินเป็นดินเหนียว ที่ระดับความลึก 15-40 เซนติเมตรเป็นดินเหนียวปนกรวดเล็กน้อย และที่ระดับความลึก 40-70 เซนติเมตร และ 70-130+ เซนติเมตรเป็นดินเหนียวปนทรายปนกรวด ฟิเอชดินในสนามเป็นกลางถึงด่างปานกลาง (field pH 7.0-8.0)

พบรอยแตกกระแหงตลอดหน้าตัดดิน ดินบนพบรอยแตกขนาดใหญ่ในปริมาณค่อนข้างมาก รอยแตกต่อเนื่องกันตามแนวตั้งลงลึกถึงบางส่วนของดินล่างที่ระดับความลึก 15-40 เซนติเมตร ภายในดินล่าง พบรอยแตกกระแหงขนาดเล็ก โดยมีแนวโน้มลดลงตามความลึก พบผิวน้ำอึดมันตลอดหน้าตัดดินไม่ค่อยชัดเจน และพบในปริมาณค่อนข้างมากที่ระดับความลึก 15-70 เซนติเมตรพบคราบดินเหนียวบนผนังช่องว่างไม่ค่อยชัดเจนที่ระดับความลึก 15-130 เซนติเมตร โดยพบในปริมาณค่อนข้างมากที่ระดับความลึก 40-70 เซนติเมตร และในระดับความลึกนี้ยังพบคราบดินเหนียวบนก้อนทรงมนในปริมาณค่อนข้างมาก พบคราบดินเหนียวบนผิวเม็ดดินไม่ค่อยชัดเจนที่ระดับความลึก 15-70 เซนติเมตรในปริมาณน้อยถึงค่อนข้างมาก พบหินผุกระจายอยู่ทั่วไป พบมากที่ระดับความลึก 70-130 เซนติเมตร เป็นระดับความลึกที่มีการผุพังของ mangiferous rock ทำให้พบคราบแมงกานีสบนผิวของหินผุ และพบดินเหนียวเม็ดกลม (clay balls) ขนาดเล็กที่ระดับความลึก 15-100 เซนติเมตร

#### 1.4 ชุดดินลพบุรี (Lb: Typic Haplustert, very fine, smectitic, isohyperthermic)

ชุดดินลพบุรีในบริเวณ บ้านวังขอนขว้าง ตำบลวังขอนขว้าง อำเภอโคกสำโรง จังหวัดลพบุรี อยู่ในบริเวณเชิงเขาตองล่าง มีความสูง 35 เมตร จากระดับทะเลปานกลาง ลักษณะดินเป็นดินลึกมาก พัฒนาการของหน้าตัดดินเป็น Apk-Bk-Bssk วัตถุต้นกำเนิดเป็นตะกอนน้ำพาท้องถิ่นที่สลายตัวมาจากหินปูน (local alluvium derived from limestone) สภาพพื้นที่เป็นลูกคลื่นลอนลาด ความชันร้อยละ 2 ดินมีการระบายน้ำดี การซาบซึมน้ำช้า การไหลบ่าของน้ำบนผิวดินช้าขณะทำการศึกษาระดับน้ำใต้ดินอยู่ลึกเกินกว่า 200 เซนติเมตรจากผิวดิน สภาพการใช้ที่ดินมีการปลูกข้าว ฟาง งา และทุ่งหญ้าเลี้ยงสัตว์

ดินบนมีสีดำ หนาประมาณ 25 เซนติเมตร เนื้อดินเป็นดินเหนียว พิเอชดินในสนามเป็นด่างปานกลาง (field pH 8.0) ดินล่างลึก 25-200+ เซนติเมตร มีสีเทาเข้มมากและเทาเข้ม เนื้อดินเป็นดินเหนียว ที่ระดับความลึก 170-200+ เซนติเมตร เป็นดินเหนียวปนกรวดเล็กน้อย พบโครงสร้างดินแบบก้อนเหลี่ยมมุมคมที่ระดับความลึก 25-115 เซนติเมตร ขนาดปานกลางถึงหยาบ โครงสร้างแบบกึ่งก้อนเหลี่ยมมุมคม ที่ระดับความลึก 115-200+ เซนติเมตร ขนาดปานกลางถึงหยาบความคงทนปานกลางถึงมาก พิเอชดินในสนามเป็นด่างปานกลางถึงด่างจัด (field pH 8.0-8.5)

ตลอดหน้าตัดดิน พบรอยแตกกระแหงขนาดเล็กในปริมาณค่อนข้างมาก และพบในปริมาณน้อย ที่ระดับความลึก 140 เซนติเมตร พบหน้าอัดมัน ไม่ค่อยชัดเจนปริมาณน้อยถึงมากโดยเพิ่มขึ้นตามความลึก ที่ระดับความลึก 25-93 เซนติเมตร และที่ระดับความลึก 140-200+ เซนติเมตร พบปริมาณน้อยถึงค่อนข้างมาก พบรอยไถล พบชิ้นส่วนของปูนขนาดเล็กที่ระดับความลึก 0-93 และ 115-140+ เซนติเมตร ในปริมาณน้อยถึงค่อนข้างมาก พบการสะสมชิ้นส่วนของปูนขนาดเล็กและปูนที่สลายตัวได้ง่ายในปริมาณค่อนข้างมากถึงมาก ที่ระดับความลึก 140-200+ เซนติเมตร

#### 1.5 ชุดดินสมอทอด 1 (Sat1: Chromic Haplustert, fine, smectitic, isohyperthermic)

ชุดดินสมอทอดในบริเวณตำบลบึงสามพัน อำเภอบึงสามพัน จังหวัดเพชรบูรณ์ อยู่ในบริเวณส่วนตัดของเชิงเขาตองบน มีความสูง 83 เมตร จากระดับทะเลปานกลาง ลักษณะดินเป็นดินลึก พัฒนาการของหน้าตัดดินเป็น Apk-Bt-Crt วัตถุต้นกำเนิดเป็นตะกอนน้ำพาท้องถิ่นทับถมอยู่บนตะกอนตกค้างที่สลายตัวมาจากหินแอนดีไซต์และหินปูน (local alluvium on residuum both derived from weathered andesite mixed with limestone) สภาพพื้นที่เป็นลูกคลื่นลอนลาด ความลาดชันร้อยละ 1 ดินมีการระบายน้ำดี การซาบซึมน้ำปานกลาง การไหลบ่าของน้ำบนผิวดินปาน

กลาง ขณะทำการศึกษาระดับน้ำใต้ดินอยู่ลึกเกินกว่า 140 เซนติเมตรจากผิวดิน สภาพการใช้ที่ดิน มีการปลูกถั่วเขียว ไร่ มะพร้าว และพริก

ดินบนมีสีน้ำตาลหนาประมาณ 20 เซนติเมตร เนื้อดินเป็นดินเหนียว พิเอชดินในสนามเป็นด่างปานกลาง (field pH 8.0) ดินล่างลึก 20-140+ เซนติเมตร มีสีน้ำตาล สีผสมระหว่างสีน้ำตาลปนเทาเข้มกับสีเทาเข้ม สีผสมระหว่างสีน้ำตาลปนเทากับสีเทา และสีเทา เนื้อดินเป็นดินเหนียว ที่ระดับความลึก 115-140+ เป็นดินเหนียวปนกรวดเล็กน้อย พิเอชดินในสนามเป็นด่างปานกลาง (field pH 8.0)

พบรอยแตกกระแหงขนาดเล็กในปริมาณน้อยที่ระดับความลึก 0-90 เซนติเมตร พบในปริมาณค่อนข้างมากที่ระดับความลึก 90-115 เซนติเมตร ตลอดหน้าตัดดินพบผิวหน้าอัดมันขนาดเล็กในปริมาณค่อนข้างมาก พบรอยไถลขนาดเล็กในปริมาณน้อยที่ระดับความลึก 70-115 เซนติเมตรตลอดหน้าตัดดินพบคราบดินเหนียวบนผนังช่องว่าง และผิวเม็ดดินในปริมาณน้อยไม่ค่อยชัดเจน พบหินผุที่ได้จากการสลายตัวมีลักษณะเป็นจุดสีขาวกระจายอยู่ทั่วไป และพบก้อนทรงมนของแมงกานีสขนาดเล็กในปริมาณน้อยที่ระดับความลึก 0-20 เซนติเมตร และพบในปริมาณค่อนข้างมากที่ระดับความลึก 45-70 เซนติเมตร

#### 1.6 ชุคดินสมอทอด 2 (Sat2: Chromic Haplustert, very fine, smectitic, isohyperthermic)

ชุคดินสมอทอด 2 ในบริเวณตำบลชัยสมอทอด อำเภอบึงสามพัน จังหวัดเพชรบูรณ์ อยู่ในบริเวณเชิงเขาตอนบนพบที่ความสูง 93 เมตรจากระดับทะเลปานกลาง ลักษณะดินเป็นดินลึกมากพัฒนาการของหน้าตัดดินเป็น Apk-Btk-Crk วัตถุต้นกำเนิดเป็นตะกอนน้ำพาท้องถิ่นสลายตัวมาจากหินแกรนิตทับถมอยู่บนตะกอนตกร้างที่สลายตัวมาจากหินแอนดีไซต์ (local alluvium derived from limestone on residuum derived from weathered andesite) สภาพพื้นที่เป็นลูกคลื่นลอนลาด ความชันร้อยละ 2 ดินมีการระบายน้ำดี การซบซึมน้ำปานกลาง การไหลบ่าของน้ำบนผิวดินปานกลางขณะทำการศึกษาระดับน้ำใต้ดินอยู่ลึกเกินกว่า 160 เซนติเมตรจากผิวดิน สภาพการใช้ที่ดิน มีการปลูกข้าวโพดและถั่วเขียว

ดินบนมีสีน้ำตาล หนาประมาณ 20 เซนติเมตร เนื้อดินเป็นดินเหนียว พิเอชดินในสนามเป็นด่างปานกลาง (field pH 8.0) ดินล่างลึก 20-168+ เซนติเมตร มีสีน้ำตาล สีผสมระหว่างสีน้ำตาลปนเทาเข้มกับสีเทาเข้ม สีผสมระหว่างสีน้ำตาลกับสีน้ำตาลปนเทา สีผสมระหว่างสีน้ำตาลปนเทากับสีเทา และสีน้ำตาลปนเทา เนื้อดินเป็นดินเหนียวที่ระดับความลึก 20-80 เซนติเมตร และที่

ระดับความลึก 80-110 เซนติเมตรเป็นดินเหนียวปนกรวดเล็กน้อย พีเอชดินในสนามเป็นค่าปานกลาง (field pH 8.0)

พบรอยแตกกระแหงขนาดเล็กในปริมาณน้อยที่ระดับความลึก 40-60 เซนติเมตร รอยแตกต่อเนื่องกันที่ระดับความลึก 60-80 เซนติเมตร พบผิวหน้าอัดมันที่ระดับความลึก 0-135 เซนติเมตรแต่ไม่ค่อยชัดเจนในปริมาณค่อนข้างมาก ที่ระดับความลึก 40-60 เซนติเมตรพบรอยไถลแต่ไม่ค่อยชัดเจนโดยพบปริมาณน้อยและค่อนข้างมากที่ระดับความลึก 60-80 เซนติเมตร ตลอดหน้าตัดดินพบคราบดินเหนียวบนผนังช่องว่างไม่ค่อยชัดเจนซึ่งปริมาณน้อยถึงค่อนข้างมาก พบคราบดินเหนียวบนผิวเม็ดดินที่ระดับความลึก 20-40 และ 60-80 เซนติเมตร และพบคราบดินเหนียวเคลือบบนผิวหน้าของหินผุที่ระดับความลึก 110-168+ เซนติเมตร ซึ่งเป็นระดับความลึกที่หินบะซอลต์กำลังผุพัง มีการสะสมปูนเกิดขึ้นทำให้พบชิ้นส่วนของปูนและหินผุกระจายอยู่ทั่วไปตลอดหน้าตัดดิน นอกจากนี้ยังพบชิ้นส่วนของถ่าน (charcoal fragments) ที่ระดับความลึก 20-40 เซนติเมตร

#### 1.7 ชุดดินวังชมภู 1 (Wc1: Chromic Haplustert, fine, smectitic, isohyperthermic)

ชุดดินวังชมภูในบริเวณบ้านอภัยมณีรัตน์ ตำบลห้วยโป่ง อำเภอหนองไผ่ จังหวัดเพชรบูรณ์ อยู่ในบริเวณเชิงเขาตอนล่าง มีความสูง 96 เมตรจากระดับทะเลปานกลาง ลักษณะดินเป็นดินลึกมากพัฒนาการของหน้าตัดดินเป็น Ap-Bt-Btc-2Btk วัตถุต้นกำเนิดเป็นตะกอนน้ำพาท้องถิ่นและตะกอนล้างผิวดินที่สลายตัวมาจากหินที่มีปูนเป็นองค์ประกอบ (local alluvium and wash over residuum derived from lime containing rock) สภาพพื้นที่เป็นลูกคลื่นลอนลาด ความลาดชันร้อยละ 1 ดินมีการระบายน้ำดี การซึมน้ำปานกลาง การไหลบ่าของน้ำบนผิวดินปานกลางขณะทำการศึกษาระดับน้ำใต้ดินอยู่ลึกเกินกว่า 160 เซนติเมตรจากผิวดิน สภาพการใช้ที่ดินมีการปลูกมะม่วง ถั่วเขียว มะขาม ต้นสัก ยูคาลิปตัส และกล้วย

ดินบนมีสีน้ำตาลเข้มมากหนาประมาณ 20 เซนติเมตร เนื้อดินเป็นดินเหนียว พีเอชดินในสนามเป็นกรดปานกลาง (field pH 6.0) ดินล่างลึก 20-160+ เซนติเมตร มีสีน้ำตาล สีน้ำตาลปนเทา สีผสมระหว่างสีน้ำตาลมะกอกอ่อนกับสีเทา หรือสีเทาเข้ม ลักษณะเนื้อดินเป็นดินเหนียว พีเอชดินในสนามเป็นกรดจัดถึงเป็นด่างปานกลาง (field pH 5.5-8.0)

พบรอยแตกกระแหงที่ระดับความลึก 0-20 เซนติเมตรในปริมาณค่อนข้างมาก รอยแตกมีความยาวตามแนวตั้งประมาณ 12 เซนติเมตร และพบรอยแตกกระแหงขนาดเล็กในปริมาณน้อยที่

ระดับความลึก 135-160+ เซนติเมตร ตลอดหน้าตัดดินพบผิวหน้าอัดมันแต่ไม่ค่อยชัดเจนในปริมาณน้อยถึงค่อนข้างมาก (ไม่พบที่ระดับความลึก 45-75 เซนติเมตร) พบรอยไถลในปริมาณน้อยที่ระดับความลึก 105-135 เซนติเมตร พบคราบดินเหนียวบนผนังช่องว่างแต่ไม่ค่อยชัดเจนในปริมาณน้อยถึงค่อนข้างมากที่ระดับความลึก 20-164+ เซนติเมตรและพบในปริมาณค่อนข้างมากที่ระดับความลึก 105-135 เซนติเมตร นอกจากนี้ยังพบคราบดินเหนียวบนก้อนทรงมนแต่ไม่ชัดเจนในปริมาณน้อยที่ระดับความลึก 45-105 และ 135-160+ เซนติเมตร และพบคราบดินเหนียวบนผิวเม็ดดินแต่ไม่ค่อยชัดเจนในปริมาณค่อนข้างมากที่ระดับความลึก 105-135 เซนติเมตร พบก้อนทรงมนและมวลสารพอกของเหล็กและแมงกานีสออกไซด์ขนาดเล็กในปริมาณน้อยที่ระดับความลึก 20-45 เซนติเมตร และพบในปริมาณมากที่ระดับความลึก 45-105 เซนติเมตร มีผลทำให้พบคราบแมงกานีสบนผิวหินผุอย่างชัดเจนในปริมาณค่อนข้างมาก นอกจากนี้พบจุดสีเข้มขนาดเล็กของแมงกานีสออกไซด์ในปริมาณค่อนข้างมากที่ระดับความลึก 135-160+ เซนติเมตร พบหินผุขนาดเล็กในปริมาณน้อยที่ระดับความลึก 0-45 เซนติเมตร และที่ระดับความลึก 105-160+ เซนติเมตร พบชิ้นส่วนของปูนขนาดเล็กในปริมาณค่อนข้างมากถึงมาก

#### 1.8 ชุดดินวังชมภู 2 (Wc2: Typic Haplustert, fine, smectitic, isohyperthermic)

ชุดดินวังชมภู 2 ในบริเวณบ้านชัยเจริญ ตำบลห้วยสะแก อำเภอเมือง จังหวัดเพชรบูรณ์ อยู่ในบริเวณส่วนตัวของเชิงเขาตองล่าง พบที่ระดับความสูง 102 เมตรจากระดับทะเลปานกลาง ลักษณะดินเป็นดินลึกมาก พัฒนาการของหน้าตัดดินเป็น Ap-Bt-2Btk-2Crik วัตถุต้นกำเนิดเป็นตะกอนน้ำพาท้องถิ่นทับถมอยู่บนตะกอนตกร้างที่สลายตัวมาจากหินเนื้อปูน (local alluvium on residuum derived from calcareous rock) สภาพพื้นที่เป็นลูกคลื่นลอนลาด ความลาดชันร้อยละ 1 ดินมีการระบายน้ำดี การซาบซึมน้ำปานกลาง ขณะทำการศึกษาระดับน้ำใต้ดินอยู่ลึกเกินกว่า 180 เซนติเมตรจากผิวดิน มีสภาพการใช้ที่ดินเป็นทุ่งหญ้าเลี้ยงสัตว์

ดินบนมีสีดำนแดงหนาประมาณ 25 เซนติเมตร เนื้อดินเป็นดินเหนียว พิเอชดินในสนามเป็นกรดเล็กน้อย (field pH 6.5) ดินล่างลึก 25-182+ เซนติเมตร สีดำนแดง สีเทาปนแดงเข้มมาก สีผสมระหว่างสีน้ำตาลมะกอกอ่อนกับสีเหลืองมะกอก สีผสมระหว่างสีน้ำตาลมะกอกอ่อนกับสีน้ำตาลปนเหลืองอ่อน และสีผสมระหว่างสีน้ำตาลปนเหลืองอ่อนกับสีเหลืองปนน้ำตาล เนื้อดินเป็นดินเหนียว พิเอชดินในสนามเป็นด่างปานกลาง ( field pH 8.0 )

พบรอยแตกกระแหงขนาดเล็กในปริมาณน้อยถึงค่อนข้างมากที่ระดับความลึก 0-48 และ 100-182+ เซนติเมตร โดยพบปริมาณค่อนข้างมากที่ระดับความลึก 0-25 เซนติเมตร รอยแตกลึกถึง

ถึงบางส่วนที่ระดับความลึก 25-48 เซนติเมตร และพบในปริมาณค่อนข้างมากที่ระดับความลึก 150-180+ เซนติเมตร พบลักษณะของผิวหนังน้ำอืดมันที่ระดับความลึก 0-70 เซนติเมตรในปริมาณค่อนข้างมากและปริมาณมากที่ระดับความลึก 70-150 เซนติเมตร ในระดับความลึกนี้พบรอยไถลในปริมาณค่อนข้างน้อยถึงน้อยและค่อนข้างมากบนผิวหนังหิ้งที่ระดับความลึก 150-182+ เซนติเมตร พบคราบดินเหนียวบนผนังช่องว่างแต่ไม่ค่อยชัดเจนที่ระดับความลึก 25-182+ เซนติเมตร โดยพบในปริมาณค่อนข้างมากที่ระดับความลึก 70-150 เซนติเมตรและยังพบคราบดินเหนียวบนผิวเม็ดดินแต่ไม่ชัดเจนในปริมาณค่อนข้างมาก และที่ระดับความลึก 150-182+ เซนติเมตร พบคราบดินเหนียวบนผิวหนังของหิ้ง ซึ่งหิ้งมีขนาดเล็ก โดยพบที่ระดับความลึก 0-70 เซนติเมตรในปริมาณค่อนข้างมาก และที่ระดับความลึก 70-100 เซนติเมตร พบหิ้งในปริมาณน้อย โดยพบก้อนทรงมนของปูขนาดเล็กในปริมาณน้อยถึงค่อนข้างมากที่ระดับความลึก 100-150 เซนติเมตร

## 2. สมบัติทางฟิสิกส์ของดิน

ผลการวิเคราะห์สมบัติทางฟิสิกส์ (ตารางที่ 3) ของดินที่ทำการศึกษา ประกอบด้วย การแจกกระจายของอนุภาคและชั้นเนื้อดิน ความหนาแน่นรวมของดิน และสัมประสิทธิ์การขยายตัวเชิงเส้น

### 2.1 การแจกกระจายอนุภาคและชั้นเนื้อดิน

การวิเคราะห์การแจกกระจายอนุภาคในเนื้อดินดังแสดงในตารางที่ 3 พบว่า ในตัวอย่างดินชั้นบนและล่างที่ทำการศึกษา ส่วนมากมีอนุภาคขนาดดินเหนียวมากกว่าอนุภาคทรายและทรายแป้ง โดยชุดดินบุรีรัมย์ ชุดดินชัยบาดาล 1 ชุดดินชัยบาดาล 2 ชุดดินสมอทอด 2 และชุดดินวังชมภู 2 มีร้อยละของอนุภาคดินเหนียวมากทั้งในดินชั้นบนและล่าง

ซึ่งชุดดินดังกล่าวส่วนใหญ่มีวัตถุต้นกำเนิดมาจากตะกอนน้ำพาท้องถิ่นที่สลายตัวมาจากหินปูน ซึ่งวัตถุต้นกำเนิดดังกล่าวเมื่อเกิดการสลายตัวจะให้อนุภาคขนาดดินเหนียวเป็นส่วนมาก

ส่วนในชุดดินลพบุรี ชุดดินสมอทอด 1 และชุดดินวังชมภู 1 มีปริมาณของอนุภาคขนาดดินเหนียว ทรายแป้ง และทรายในปริมาณใกล้เคียงกัน โดยมีร้อยละของอนุภาคขนาดดินเหนียวมากกว่าเล็กน้อย ซึ่งมีอิทธิพลมาจากวัตถุต้นกำเนิดที่เกิดจากการผสมของตะกอนน้ำพาท้องถิ่นที่สลายตัวมาจากหินแอนดีไซต์ หินแกรนิต และหินปูน

ตารางที่ 3 สมบัติทางฟิสิกส์ในตัวอย่างดินชั้นบน และล่างที่ทำการศึกษา

Soil series	Depth (cm)	Horizon	Particle size distribution (g kg <sup>-1</sup> )			Textural <sup>1/</sup> Class	Bulk density (Mg m <sup>-3</sup> )	COLE <sup>2/</sup> Lm/Ld <sup>3/</sup>
			(USDA grading)					
			Sand	Silt	Clay			
Br	0-20	Ap	87	168	746	C	1.72	0.30
	60-90	Bss2	54	170	776	C	1.71	0.26
Cd1	0-20	Apk	36	83	881	C	1.48	0.28
	47-80	Bss1	43	72	885	C	1.51	0.23
Cd2	0-15	Ap	199	224	577	C	1.59	0.22
	40-40/70	Btc	276	214	510	C	1.37	0.19
Lb	0-25	Apk	135	461	404	SiC	1.81	0.22
	70-93	Bssk2	132	156	712	C	1.91	0.21
Sat1	0-20	Apk	291	237	473	C	1.61	0.15
	70-90	Bt3	218	200	512	C	1.72	0.29
Sat2	0-18/20	Apk	112	167	721	C	1.60	0.26
	40-60	Btk2	86	172	742	C	1.62	0.25
Wc1	0-20	Ap	490	194	316	SCL	1.63	0.09
	45-75	Btc1	446	228	346	C	1.78	0.14
Wc2	0-25	Ap	364	214	422	C	1.60	0.10
	70-100	2Btk1	223	131	646	C	1.77	0.27

<sup>1/</sup>SCL= sandy clay loam, SC= sandy clay, SiC= silty clay, C= clay

<sup>2/</sup> Coefficient of Linear Extensibility

<sup>3/</sup> Lm = ความยาวแห้งดินเมื่อชื้น (moist), Ld = ความยาวแห้งดินเมื่ออบแห้ง (dry)

## 2.2 ความหนาแน่นรวมของดิน

ผลการวิเคราะห์ความหนาแน่นรวมของดินโดยวิธี clod method พบว่า ดินที่ทำการศึกษาทั้ง 8 พืดอนมีค่าความหนาแน่นรวมของดินอยู่ในระดับค่อนข้างต่ำถึงสูง มีค่าอยู่ในพิสัย 1.37-1.91 เมกะกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และความหนาแน่นรวมของดินในทุกพืดอนมีแนวโน้มสม่ำเสมอตลอดหน้าตัดดิน

ความหนาแน่นรวมของดินอันดับเวอร์ทิซอลส์ขึ้นอยู่กับปริมาณความชื้นในดิน มีค่าสูงเมื่อดินมีการหดตัวและมีค่าต่ำเมื่อดินมีการขยายตัว ดินที่นำมาศึกษาอยู่ในช่วงที่ดินหดตัว

เนื่องจากบริเวณที่ทำการศึกษาพบรอยแตกกระแหงบนผิวน้ำดิน และเนื้อดินเป็นดินเหนียวทำให้เกิดการอัดตัวกันแน่นส่งผลให้ความหนาแน่นรวมของดินอยู่ในระดับค่อนข้างสูงถึงสูง (Bhattacharyya *et al.*, 2008)

### 2.3 สัมประสิทธิ์การขยายตัวเชิงเส้น (COLE)

ผลการวิเคราะห์สัมประสิทธิ์การขยายตัวเชิงเส้น โดยวิธีอบแห้ง ในขณะที่ดินอ้อมตัวด้วยน้ำ (soil paste) พบว่า ดินทั้ง 8 พืดอนมีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเชิงเส้นอยู่ในระดับปานกลางถึงสูงมาก โดยมีค่าอยู่ในพิสัย 0.09-0.30 และทุกพืดอนมีแนวโน้มสม่ำเสมอ

ตามระบบการจำแนกดินของกระทรวงเกษตรสหรัฐอเมริกา สัมประสิทธิ์การขยายตัวเชิงเส้นของเวอร์ทิซอลส์ มีค่ามากกว่า 0.09 (Soil Survey Staff, 1999) เป็นค่าที่อยู่ในระดับสูงมาก (Thomas *et al.*, 2000) จากผลการศึกษาที่ระดับความลึก 18-50 เซนติเมตรซึ่งเป็นระดับชั้นตามคำจำกัดความของเวอร์ทิซอลส์ที่ต้องมีปริมาณดินเหนียวมากกว่า 300 กรัมต่อกิโลกรัม พบว่า ทุกพืดอนมีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเชิงเส้นอยู่ในพิสัย 0.09-0.30 โดยสัมประสิทธิ์การขยายตัวเชิงเส้นของดินขึ้นอยู่กับปริมาณดินเหนียว และชนิดของแร่ดินเหนียว แต่จะขึ้นอยู่กับชนิดของแร่ดินเหนียวมากกว่า (Chinn and Pillai, 2008) โดยดินที่มีสเมกไทต์เป็นองค์ประกอบหลักซึ่งมีสมบัติในการหดขยายตัวได้ ส่งผลให้สัมประสิทธิ์การขยายตัวเชิงเส้นของดินมีค่าสูง (Pal *et al.*, 2009) นอกจากนี้ สัมประสิทธิ์การขยายตัวเชิงเส้นยังขึ้นอยู่กับความจุแลกเปลี่ยนแคตไอออน เนื่องจากดินที่มีความจุแลกเปลี่ยนแคตไอออนสูงมีผลต่อการสร้างตัวของสเมกไทต์ (Bühmann and Schoeman, 1995) สำหรับดินที่มีสภาพการนำไฟฟ้าสูงมีส่วนทำให้ความสามารถในการขยายตัวของดินน้อยลง (Nayak *et al.*, 2006)

### 3. สมบัติทางเคมี

ผลการวิเคราะห์สมบัติทางเคมีของดินทั้ง 8 พืดอน (ตารางที่ 4) โดยใช้เกณฑ์แบ่งระดับค่าวิเคราะห์ ตามตารางผนวกที่ 2 ซึ่งผลการวิเคราะห์ทางเคมีมีดังนี้

#### 3.1 พีเอช

ผลการวัดพีเอชของดินโดยใช้ดินต่อน้ำในอัตราส่วน 1:1 พบว่าดินเป็นกรดปานกลางถึงด่างจัดโดยมีค่าพีเอชอยู่ในพิสัย 5.8-8.5 โดยชุดดินบุรีรัมย์ ชุดดินชัยบาดาล 1 ชุดดินชัยบาดาล 2

ตารางที่ 4 สมบัติทางเคมีในตัวอย่างดินชั้นบน และล่างที่ทำการศึกษา

Soil series	Depth (cm)	Horizon	pH		EC (Sat.) dSm <sup>-1</sup>	OM (....g kg <sup>-1</sup> ....)	Total N	Avail.		CEC NH <sub>4</sub> OAc (cmol kg <sup>-1</sup> )	BS %
			H <sub>2</sub> O	KCl				P (.....mg kg <sup>-1</sup> .....)	K		
Br	0-20	Ap	7.6	6.3	0.40	20.0	0.37	8.3	58	67.77	86.7
	60-90	Bss2	6.8	5.7	0.34	10.9	0.23	5.9	51	83.31	81.8
Cd1	0-20	Apk	7.9	6.5	0.31	24.9	1.22	8.3	126	96.80	82.0
	47-80	Bss1	8.0	6.7	0.28	14.9	0.35	1.3	71	93.79	85.0
Cd2	0-15	Ap	6.8	5.2	0.29	25.4	1.31	13.8	110	48.95	76.0
	40-40/70	Btc	7.4	5.7	0.22	13.4	0.64	1.2	29	41.47	71.0
Lb	0-25	Apk	8.1	6.9	0.67	27.0	1.05	19.7	71	56.27	78.0
	70-93	Bssk2	8.5	7.0	0.88	14.3	0.37	6.7	48	34.32	78.0
Sat1	0-20	Apk	8.2	6.8	0.34	15.9	0.91	18.7	86	34.32	90.4
	70-90	Bt3	8.3	6.3	0.30	6.3	0.25	0.7	67	38.30	82.4
Sat2	0-18/20	Apk	8.0	6.8	0.32	19.2	0.93	21.1	121	44.81	82.3
	40-60	Btk2	8.4	7.0	0.49	21.8	0.91	6.5	67	44.09	92.3
Wc1	0-20	Ap	6.3	5.1	0.20	21.5	1.03	4.4	41	27.09	81.0
	45-75	Btc1	5.8	4.5	0.11	5.3	0.31	0.7	21	27.29	68.0
Wc2	0-25	Ap	6.3	5.0	0.20	30.3	1.07	1.3	77	30.67	65.0
	70-100	2Btk1	7.3	5.9	0.24	5.4	0.22	0.5	46	42.16	78.0

ชุดดินสมอทอด 1 ชุดดินสมอทอด 2 และชุดดินลพบุรี ซึ่งมีค่าพีเอชอยู่ในระดับเป็นกลางถึงด่างจัด โดยมีค่าพีเอชอยู่ในพิสัย 6.8-8.5 ส่วนในชุดดินวังชมภู 1 และวังชมภู 2 อยู่ในระดับเป็นกรดปานกลางถึงด่างปานกลางมีค่าพีเอชอยู่ในพิสัย 5.8-8.4 โดยผลต่างของค่าพีเอชที่วัดในโพแทสเซียมคลอไรด์และพีเอชดินต่อน้ำ พบว่า ค่าที่ได้อยู่ในช่วง -1.1 ถึง -2.0 แสดงให้เห็นว่าดินมีปริมาณของประจุลบมากกว่าประจุบวก

ดินที่ทำการศึกษาส่วนใหญ่ เป็นด่างเล็กน้อยถึงด่างจัด (pH 7.4-8.5) เป็นผลมาจากการสลายตัวของวัตถุต้นกำเนิด มีการปลดปล่อยซิลิกาแก่ระบบดิน และภายในหน้าตัดดินยังพบสารประกอบจำพวกคาร์บอเนต ซึ่งเมื่อเกิดกระบวนการไฮโดรไลซิสของสารพวกคาร์บอเนตทำให้พีเอชดินอยู่ในช่วงที่เป็นด่าง (Bloom, 2000)

การปลดปล่อยซิลิกาจากวัตถุต้นกำเนิด เป็นประโยชน์ในการสังเคราะห์สมกไทต์ตามธรรมชาติในสภาพแวดล้อมที่มีพีเอชของดินสูง (Polyak and Guven, 2000) ในสภาพแวดล้อมที่เป็นด่าง สมกไทต์สามารถสร้างตัวขึ้นใหม่ (neof ormation) หรือเกิดการเปลี่ยนแปลงสภาพ (transformation) มาจากแร่เดิม และคงอยู่ในระบบดินได้ (Khresat, 2007; Furquim *et al.*, 2008) พีเอชดินจึงเป็นปัจจัยที่ทำให้พบสมกไทต์เป็นแร่องค์ประกอบหลักในอนุภาคขนาดดินเหนียวของดินที่ทำการศึกษา

### 3.2 สภาพการนำไฟฟ้า

ผลการวิเคราะห์สภาพการนำไฟฟ้าของสารสกัดอิมตัวของตัวอย่างดิน (saturation extract) จากชั้นดินชั้นบนและล่างในทุกชุดดิน พบว่าสภาพการนำไฟฟ้าอยู่ในพิสัย 0.11-0.38 เดซิซีเมนส์ต่อเมตร โดยทุกชุดดินมีค่าการนำไฟฟ้าน้อยกว่า 2 เดซิซีเมนส์ต่อเมตร แสดงว่าดินที่ทำการศึกษาจัดเป็นดินที่ไม่มีการสะสมเกลือ (Khresat, 2007) และไม่มีผลต่อความสามารถในการขยายตัวของดิน ไม่ทำให้ดินขยายตัวได้น้อยลง (Nayak *et al.*, 2006)

### 3.3 อินทรีย์วัตถุ

ผลการวิเคราะห์ปริมาณอินทรีย์วัตถุของดินทั้ง 8 พืดอน พบว่า ปริมาณอินทรีย์วัตถุอยู่ในระดับต่ำถึงค่อนข้างสูงมีค่าอยู่ในพิสัย 5.3-30.3 กรัมต่อกิโลกรัม ดินบนมีปริมาณอินทรีย์วัตถุอยู่ในระดับปานกลางถึงค่อนข้างสูงมีค่าอยู่ในพิสัย 15.9-30.3 กรัมต่อกิโลกรัม ดินล่างมีปริมาณอินทรีย์วัตถุอยู่ในระดับต่ำถึงปานกลางมีค่าอยู่ในพิสัย 5.3-21.8 กรัมต่อกิโลกรัม และทุกพืดอนมีแนวโน้มลดลงตามความลึก

ดินบนมีปริมาณอินทรีย์วัตถุสูงกว่าดินล่างเป็นผลจากการพุ้งสลายตัวของเศษซากอินทรีย์ที่สะสมอยู่ในดินตามธรรมชาติ หรือส่วนตกค้างทางเกษตรกรรม ตลอดจนรากพืชที่ปกคลุมผิวดิน ขณะเดียวกันอัตราการสลายตัวของอินทรีย์วัตถุที่เป็นไปอย่างรวดเร็วในดินบนทำให้การชะละลายลงไปในดินล่างเกิดขึ้นน้อย เมื่อเกิดการสลายตัวจึงสะสมในชั้นดินบนมากกว่าดินล่าง (Virgo and Holmes, 1977; Baize, 1993; Brady and Weil, 2008)

### 3.4 ไนโตรเจนรวม

ผลการวิเคราะห์ปริมาณไนโตรเจนรวมของดินทั้ง 8 พืดอน พบว่าปริมาณไนโตรเจนรวมอยู่ในระดับต่ำมากถึงต่ำโดยมีค่าอยู่ในพิสัย 0.22-1.31 กรัมต่อกิโลกรัม ดินบนอยู่ในพิสัย 0.37-1.31 กรัมต่อกิโลกรัม ดินล่างอยู่ในพิสัย 0.22-0.91 กรัมต่อกิโลกรัม ดินบนมีปริมาณไนโตรเจนรวมสูงกว่าชั้นดินล่างโดยมีแนวโน้มลดลงตามความลึกเป็นไปในลักษณะเดียวกับอินทรีย์วัตถุ (Brady and Weil, 2008) เนื่องจากโดยทั่วไปหินและแร่ที่ให้กำเนิดดินนั้นไม่มีธาตุไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบ ความเป็นประโยชน์ของไนโตรเจนในดินส่วนใหญ่ขึ้นอยู่กับ การเปลี่ยนแปลงของไนโตรเจนอินทรีย์เป็นไนโตรเจนอนินทรีย์ (Mengesha, 2004) ดินมีปริมาณ

ไนโตรเจนรวมต่ำมากถึงต่ำเป็นผลมาจากจุลินทรีย์และพืชนำไปใช้จากกระบวนการชะละลายจากการสูญหายในรูปของแก๊ส หรือถูกตรึงด้วยแร่ดินเหนียว เนื่องจากแร่ดินเหนียวเวอร์มิคิวไลต์ อิลไลต์ และสมกไทต์สามารถตรึงแอมโมเนียมให้อยู่ภายในโครงสร้างของแร่ดินเหนียวได้

### 3.5 ฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์

ผลการวิเคราะห์ปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ของดินทั้ง 8 พืดอน พบว่า ปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์อยู่ในระดับต่ำมากถึงค่อนข้างสูงมีค่าอยู่ในพิสัย 0.5-21.1 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม โดยดินบนมีปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์อยู่ในระดับต่ำมากถึงค่อนข้างสูงมีค่าอยู่ในพิสัย 1.3-21.1 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม และดินล่างมีปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์อยู่ในระดับต่ำมากถึงต่ำมีค่าอยู่ในพิสัย 0.5-6.7 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม

ดินบนมีฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์สูงกว่าดินล่าง เนื่องจากปริมาณฟอสฟอรัสสัมพันธ์กับปริมาณอินทรีย์วัตถุ โดยมีการปลดปล่อยฟอสฟอรัสจากอินทรีย์วัตถุซึ่งมีอยู่มากในดินบนซึ่งการเพิ่มฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์แก่ดินสามารถทำได้โดยการเพิ่มอินทรีย์วัตถุ (Meena *et al.*, 2007; Seiksepour *et al.*, 2008) หรืออาจเป็นผลจากการใส่ปุ๋ยเคมี สำหรับในดินล่างปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์มีความสัมพันธ์ในทางลบกับปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนต โดยฟอสฟอรัสจับกับแคลเซียมเกิดการตกตะกอนกลายเป็นแคลเซียมฟอสเฟตที่ละลายน้ำได้ยาก ซึ่งพืชไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ (Halajnia *et al.*, 2009; Zhuan-xi *et al.*, 2009) ทำให้ปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ในดินล่างมีค่าน้อยกว่าดินบนเนื่องจากดินล่างมีการสะสมของแคลเซียมคาร์บอเนตซึ่งทำให้ฟอสฟอรัสอยู่ในรูปที่ไม่เป็นประโยชน์กับพืช

### 3.6 โปแทสเซียมที่เป็นประโยชน์

ผลการวิเคราะห์ปริมาณโปแทสเซียมที่เป็นประโยชน์ของดินทั้ง 8 พืดอน พบว่า ปริมาณโปแทสเซียมที่เป็นประโยชน์อยู่ในระดับต่ำมากถึงสูงมากมีค่าอยู่ในพิสัย 21-125.6 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ดินบนมีปริมาณโปแทสเซียมที่เป็นประโยชน์อยู่ในระดับต่ำถึงสูงมากมีค่าอยู่ในพิสัย 41-125.6 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ดินล่างมีปริมาณโปแทสเซียมที่เป็นประโยชน์อยู่ในระดับต่ำมากถึงปานกลางมีค่าอยู่ในพิสัย 21-71 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม และทุกพืดอนที่ทำการศึกษามีแนวโน้มลดลงตามความลึก

โพแทสเซียมเป็นธาตุอาหารที่พืชได้มาจากการปลดปล่อยโดยแร่ดินเหนียวและอินทรีย์วัตถุ หรือ การเพิ่มปุ๋ยโพแทสเซียมลงไปดิน (Sparks, 1987; Jalali, 2008) ทำให้ดินบนมีปริมาณโพแทสเซียมที่เป็นประโยชน์สูงกว่าดินล่าง ดินล่างมีปริมาณโพแทสเซียมที่เป็นประโยชน์ต่ำเนื่องจากภายในดินล่างประกอบด้วยสเมกไทต์ที่มีความสามารถในการตรึงโพแทสเซียมสูง (Nursyamsi *et al.*, 2008) จากการศึกษาเวอร์ทิซอลส์ในอินเดียพบว่าไบเบลไลต์มีความสามารถในการตรึงโพแทสเซียมได้ดีกว่ามอนต์มอริลโลไนต์ ไมกา อิลไลต์ และเวอร์มิคิวไลต์ (Murthy *et al.*, 1987; Nursyamsi *et al.*, 2008) ลักษณะการตรึงโพแทสเซียมที่เกิดขึ้นทำให้โพแทสเซียมบางส่วนอยู่ในรูปแลกเปลี่ยนไม่ได้ (non-exchangeable K) โพแทสเซียมรูปนี้จึงเป็นแหล่งกักเก็บโพแทสเซียมที่สำคัญในดินเพื่อให้พืชใช้ประโยชน์ (Mengel and Uhlenbecker, 1993; Jalali and Zarabi, 2006; Jalali, 2008) เนื่องจากแร่ดินเหนียวประเภท 2:1 มีความสามารถในการดูดซับและปลดปล่อยโพแทสเซียมได้สูงกว่าแร่ดินเหนียว 1:1 (Nursyamsi *et al.*, 2008) พืชจึงใช้ประโยชน์ได้เมื่อถูกปลดปล่อยออกมาในรูปที่แลกเปลี่ยนได้เมื่อสภาพในดินเหมาะสม

### 3.7 ความจุแลกเปลี่ยนแคตไอออน

ผลการวิเคราะห์ความจุแลกเปลี่ยนแคตไอออนของดินทั้ง 8 พืดอน พบว่า อยู่ในระดับสูงถึงสูงมากมีค่าอยู่ในพิสัย 27.09-96.8 เซนติโมลต่อกิโลกรัม ทุกพืดอนมีแนวโน้มสม่ำเสมอตลอดหน้าตัดดิน โดยชุดดินบุรีรัมย์ ชุดดินชัยบาดาล 1 และ 2 และชุดดินลพบุรีพบว่ามีปริมาณความจุแลกเปลี่ยนแคตไอออนสูงมาก

ความจุแลกเปลี่ยนแคตไอออนเป็นผลรวมของแคตไอออนที่แลกเปลี่ยนได้ซึ่งวัสดุดูดซับไว้ที่พีเอชเฉพาะเจาะจง โดยขึ้นอยู่กับชนิด ปริมาณดินเหนียวและปริมาณอินทรีย์วัตถุที่มีอยู่ในดิน (Irmak *et al.*, 2007; Özsoy and Aksoy, 2007) ดินที่ทำการศึกษามีค่าความจุแลกเปลี่ยนแคตไอออนอยู่ในระดับสูงเนื่องจาก มีปริมาณดินเหนียวและอินทรีย์วัตถุสูง นอกจากนี้ยังมีสเมกไทต์ซึ่งเป็นแร่ดินเหนียวที่ภายในโครงสร้างเกิดการแทนที่ขนาดเท่า (isomorphous substitution) จึงมีแคตไอออนที่แลกเปลี่ยนได้เพื่อทำให้สมดุลกับประจุลบที่เหลือจากการแทนที่ภายในโครงสร้างเช่น  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Li}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  และ  $\text{Mg}^{2+}$  (Tamura *et al.*, 2000) และโดยทั่วไปแล้ววัตถุต้นกำเนิดเวอร์ทิซอลส์เมื่อสลายตัวจะทำให้แคตไอออน เช่น Ca และ Mg แก่ระบบดิน ทำให้ดินมีความจุแลกเปลี่ยนแคตไอออนอยู่ในระดับสูง ชุดดินชัยบาดาล 1 มีค่ามากกว่าชุดดินอื่น เนื่องจากมีปริมาณดินเหนียวและอินทรีย์วัตถุสูง และเมื่อความจุแลกเปลี่ยนแคตไอออนเมื่อมีค่าสูงขึ้น จึงมีส่วนทำให้เกิดการสร้างตัวของสเมกไทต์เพิ่มขึ้นด้วย (Bühman and Schoeman, 1995)

### 3.8 อัตราร้อยละความอืดตัวเบส

อัตราร้อยละความอืดตัวเบสซึ่งได้จากการคำนวณค่าเบสรวมที่สกัดได้หารด้วยผลรวมระหว่างเบสที่สกัดได้และกรดที่สกัดได้คูณด้วย 100 จะได้ค่าอัตราร้อยละความอืดตัวเบส ซึ่งพบว่าอัตราร้อยละความอืดตัวเบสของดินที่ใช้ทำการศึกษา อยู่ในระดับปานกลางถึงสูง มีค่าอยู่ในพิสัยร้อยละ 65-92.3 แต่ส่วนใหญ่แล้วอยู่ในระดับสูง มีค่าอยู่ในพิสัยร้อยละ 76-98 และทุกพืคอนมีแนวโน้มสม่ำเสมอตลอดหน้าตัดดิน

อัตราร้อยละความอืดตัวเบสสัมพันธ์กับปริมาณเบสรวมที่สกัดได้ โดยเป็นผลมาจากการสลายตัวของวัตถุต้นกำเนิดปลดปล่อยแคตไอออนสภาพเบสแก่ระบบดินและยังคงอยู่ เนื่องจากสภาพแวดล้อมทางดินเหมาะสม การชะละลายเกิดขึ้นน้อย นอกจากนี้อัตราร้อยละความอืดตัวเบสยังขึ้นอยู่กับความจุแลกเปลี่ยนแคตไอออนและปริมาณดินเหนียว ซึ่งดินที่ใช้ทำศึกษามีความจุแลกเปลี่ยนแคตไอออนอยู่ในระดับสูงและมีเนื้อดินส่วนใหญ่เป็นดินเหนียว (Bühman and Schoeman, 1995; Irmak *et al.*, 2007; Özsoy and Aksoy, 2007)

### 3.9 ปริมาณตะกั่ว แคดเมียม สังกะสี และทองแดง ในตัวอย่างอนุภาคขนาดดินเหนียว

การวิเคราะห์หาปริมาณตะกั่ว ทองแดง สังกะสี และแคดเมียมในตัวอย่างอนุภาคดินเหนียวจากดินชั้นบนและล่างในชุดดินบุรีรัมย์ ชุดดินชัยบาดาล 1 ชุดดินชัยบาดาล 2 ชุดดินลพบุรี ชุดดินสมอทอด 1 ชุดดินสมอทอด 2 ชุดดินวังชมภู 1 และชุดดินวังชมภู 2 ทำการศึกษาโดยใช้เทคนิควิเคราะห์ atomic absorption spectrophotometer พบว่า ปริมาณของธาตุทั้งสี่ (ตารางที่ 5) มีปริมาณไม่เกินมาตรฐานของคุณภาพดินที่ใช้ทางการเกษตรที่กรมควบคุมมลพิษกำหนดไว้ โดยตะกั่วมีค่าไม่เกิน 300 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ทองแดงมีค่าไม่เกิน 200 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม สังกะสีมีค่าไม่เกิน 200 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม และแคดเมียมมีค่าไม่เกิน 37 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม

## 4. ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ ตะกั่ว สังกะสี ทองแดง และแคดเมียมในสมอกไก่

การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับตะกั่ว ทองแดง สังกะสี และแคดเมียมในสมอกไก่ โดยศึกษาสองปัจจัยคือ ค่าพีเอช และความเข้มข้นของโลหะหนักในสารละลาย โดยทั้งสองปัจจัยนี้เป็นปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับค่อนข้างมากซึ่งความสามารถของการดูดซับของวัสดุจะมีมากน้อยอย่างไรขึ้นอยู่กับปัจจัยทั้งสองนี้ (Hee Kang *et al.*, 2011; Vejsada *et al.*, 2004)

ตารางที่ 5 ปริมาณ ตะกั่ว ทองแดง สังกะสี และแคดเมียม ในตัวอย่างอนุภาคขนาดดินเหนียว

Soil series	Horizon	Depth (cm)	Pb (.....mg kg <sup>-1</sup> .....)	Cu	Zn	Cd
Br	Ap	0-20	10	17	15	0.0
	Bss2	60-90	8	21	14	0.1
Cd1	Apk	0-20	6	18	19	0.2
	Bss1	47-80	4	22	18	0.0
Cd2	Ap	0-15	7	19	27	0.2
	Btc	40-40/70	8	15	26	0.2
Lb	Apk	0-25	5	13	11	0.0
	Bssk2	70-93	4	12	9	0.3
Sat1	Apk	0-20	5	11	18	0.0
	Bt3	70-90	5	14	14	0.0
Sat2	Apk	0-18/20	7	29	49	0.2
	Btk2	40-60	4	22	21	0.2
Wc1	Ap	0-20	2	9	12	0.1
	Btc1	45-75	5	19	10	0.2
Wc2	Ap	0-25	6	9	7	0.1
	2Btk1	70-100	6	15	13	0.1

#### 4.1. อิทธิพลของพีเอช

การศึกษาอิทธิพลของพีเอชต่อการดูดซับตะกั่ว สังกะสี ทองแดง และแคดเมียมในสมเมกไทต์ทำการศึกษาในช่วงพีเอช 3-8 โดยใช้ความเข้มข้นของโลหะหนักที่ 50 มิลลิกรัมต่อลิตร จากการศึกษา พบว่า ปริมาณการดูดซับของโลหะหนักของสมเมกไทต์ในช่วงพีเอชต่าง ๆ นั้นมีปริมาณการดูดซับที่แตกต่างกัน เพื่อการแสดงผลการทดลองให้เห็นชัดเจนสามารถแยกปริมาณการดูดซับออกได้ตามปริมาณของสมเมกไทต์ที่มีอยู่ในอนุภาคขนาดดินเหนียวดังนี้

##### 4.1.1 ปริมาณสมเมกไทต์สูง (ร้อยละ 80-90)

ในกลุ่มของตัวอย่างที่มีปริมาณสมเมกไทต์สูง พบว่า ตะกั่ว ทองแดง สังกะสี ถูกดูดซับได้สูงสุดในช่วงพีเอช 5-8 โดยตะกั่วถูกดูดซับคิดเป็นร้อยละ 89.48 สังกะสีถูกดูดซับร้อยละ 85.91 และ ทองแดงถูกดูดซับร้อยละ 84.94 ตามลำดับ ส่วนแคดเมียมดูดซับร้อยละ 49.77 ในช่วงพีเอช 6-8 (ภาพที่ 7)

#### 4.1.2 ปริมาณสมเมกไทต์ปานกลาง (ร้อยละ 50-60)

ในกลุ่มของตัวอย่างที่มีปริมาณสมเมกไทต์ปานกลาง พบว่า ตะกั่ว ทองแดง สังกะสี ถูกดูดซับได้สูงสุดในช่วงพีเอช 5-8 โดยตะกั่วถูกดูดซับร้อยละ 69.33 สังกะสีถูกดูดซับร้อยละ 60.33 และ ทองแดงถูกดูดซับร้อยละ 60.94 ตามลำดับ ส่วนแคดเมียมถูกดูดซับร้อยละ 39.94 ในช่วงพีเอช 6-8 (ภาพที่ 8 )

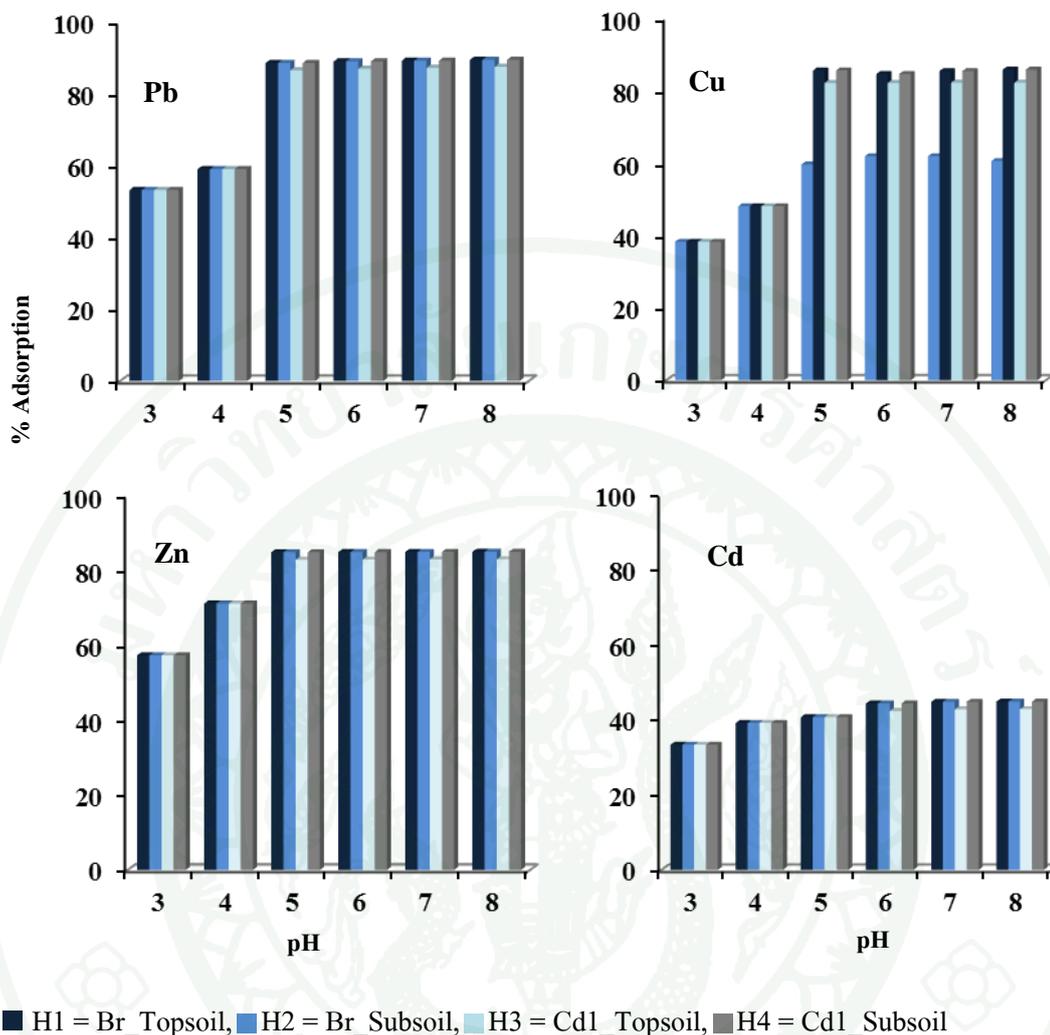
#### 4.1.3 ปริมาณสมเมกไทต์ต่ำ (ร้อยละ 30-40)

ในกลุ่มของตัวอย่างที่มีปริมาณสมเมกไทต์ต่ำ พบว่า ตะกั่ว ทองแดง สังกะสี ถูกดูดซับได้สูงสุดในช่วงพีเอช 5-8 โดยตะกั่วถูกดูดซับร้อยละ 35.85 ทองแดงถูกดูดซับร้อยละ 65.81 และ สังกะสีถูกดูดซับร้อยละ 50.02 ตามลำดับ ส่วนแคดเมียมถูกดูดซับร้อยละ 35.56 ในช่วงพีเอช 6-8 (ภาพที่ 9)

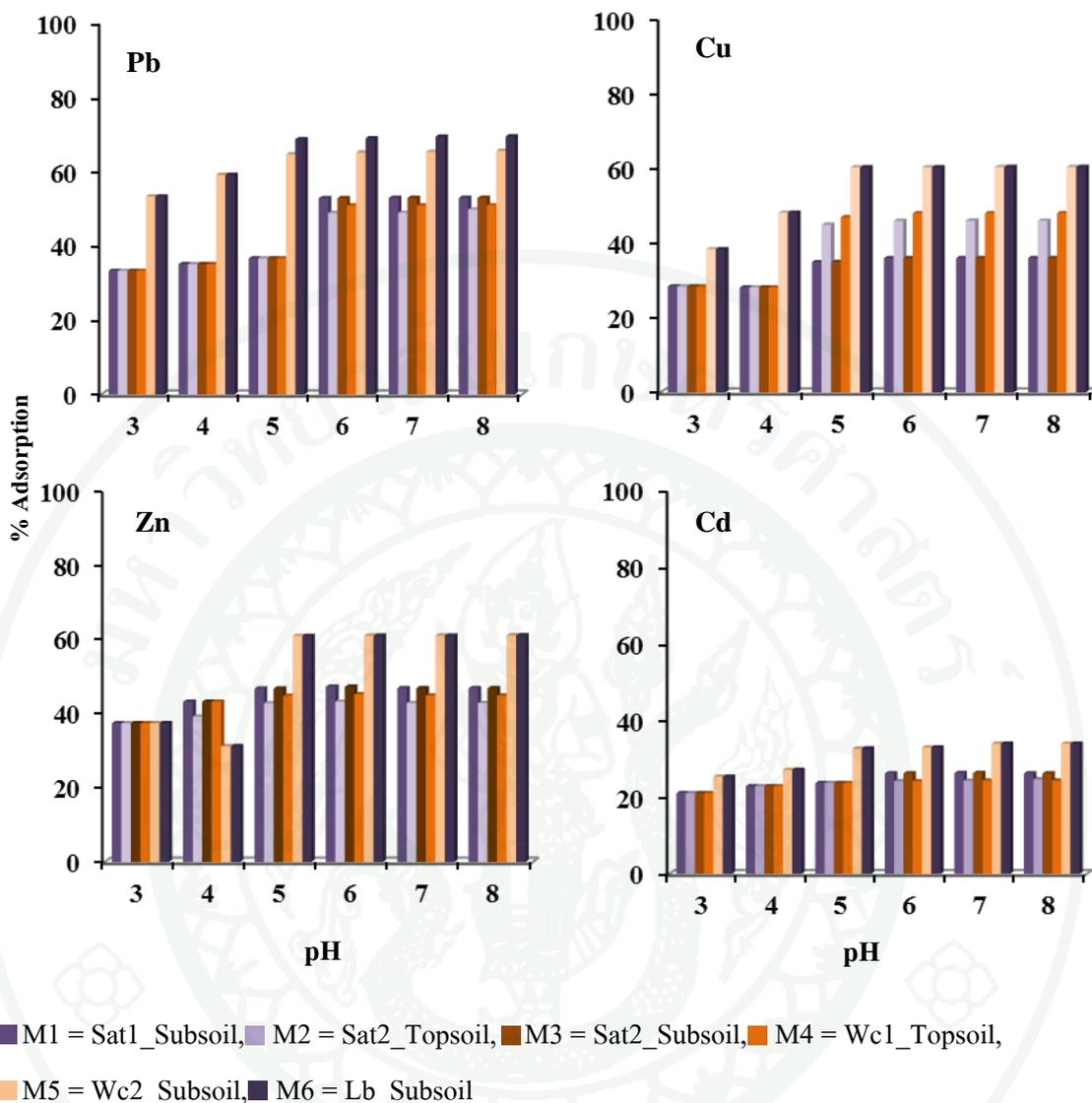
การดูดซับที่ตำแหน่งเฉพาะ (specific adsorption) จะเกิดจากความสัมพันธ์กันระหว่างตำแหน่งที่เกิดเป็นกลุ่ม  $\text{OH}^-$  บริเวณที่เป็นผิวหน้าและการแตกหักของอนุภาคดินเหนียวซึ่งการเกิดขึ้นดังกล่าวทำให้เกิดประจุลบเมื่อค่าพีเอชเพิ่มขึ้น การเปลี่ยนแปลงของ  $\text{H}^+$  และ  $\text{OH}^-$  ในสารละลายจะส่งผลต่อกลุ่มของฟังก์ชันบนผิวหน้าของแร่ดินเหนียวในลักษณะของการรับโปรตอน (protonate) และการสูญเสียโปรตรอน (deprotonate) โดยการดูดซับของ  $\text{H}^+$  หรือ  $\text{OH}^-$  ซึ่งเขียนออกมาในรูปของสมการ (5) และ (6) (Sparks, 2007)



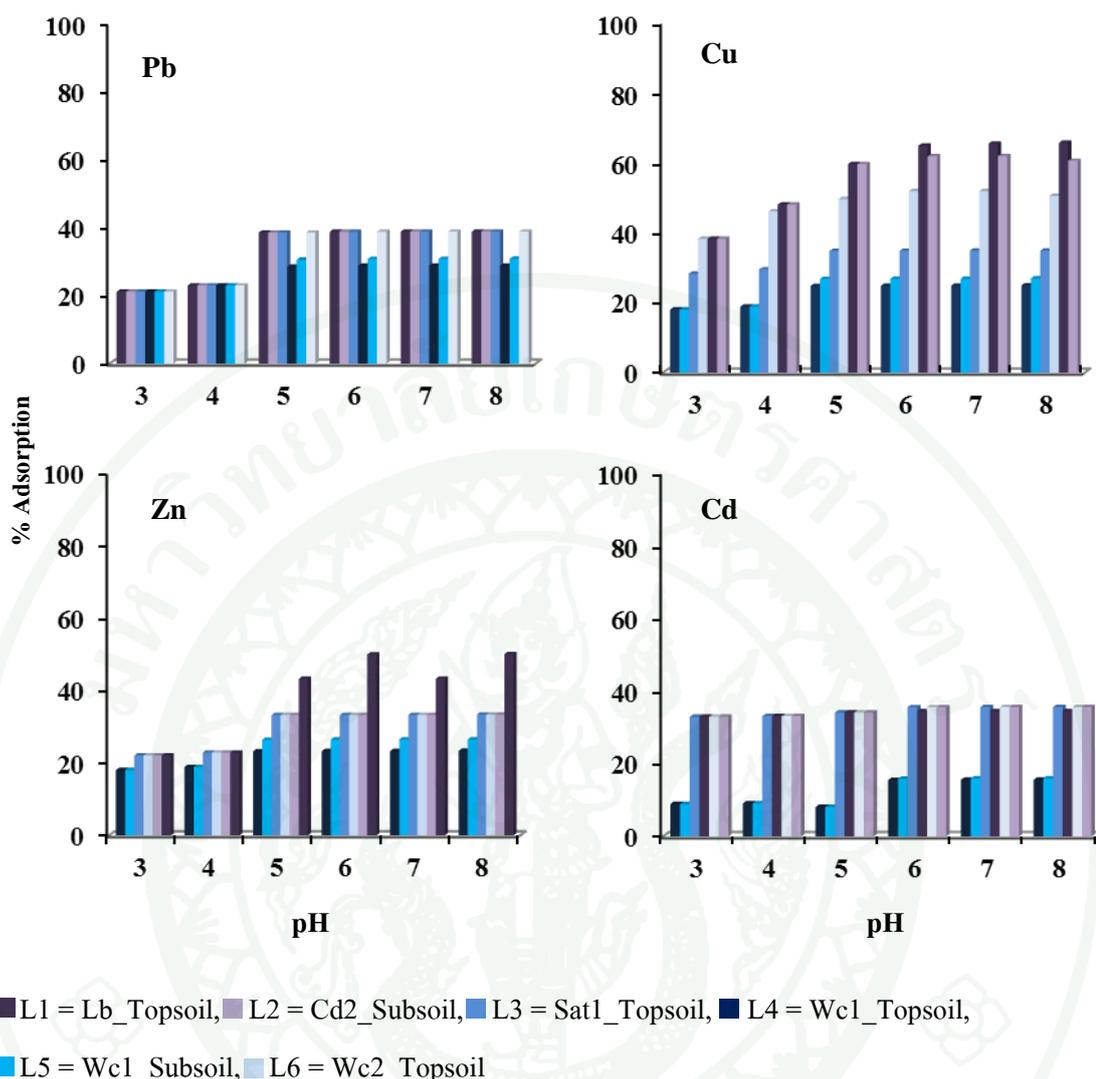
การเพิ่มขึ้นของพีเอชเป็นการลดความเข้มข้นของ  $\text{H}^+$  และเพิ่ม  $\text{OH}^-$  ซึ่งมีบทบาทในการดูดซับไอออนโลหะหนัก ( $\text{Pb}^{2+}$ ,  $\text{Cu}^{2+}$ ,  $\text{Zn}^{2+}$ ,  $\text{Cd}^{2+}$ ) โดยค่าพีเอชในช่วง 5-8 ส่งผลให้ไอออนของโลหะหนักอยู่ในรูปของ  $\text{Pb}(\text{OH})^+$ ,  $\text{Zn}(\text{OH})^+$ ,  $\text{Cu}(\text{OH})^+$  และ  $\text{Cd}(\text{OH})^+$  ซึ่งอยู่ในรูปของแคตไอออนที่สามารถถูกดูดซับที่ตำแหน่งที่เป็นประจุลบบนผิวหน้า อีกทั้งยังเกิดการแลกเปลี่ยนไอออนภายในหลักระหว่างชั้นของแร่



ภาพที่ 7 ร้อยละการดูดซับของตะกั่ว ทองแดง สังกะสี และแคดเมียมในตัวอย่างอนุภาคขนาดดินเหนียวที่มีปริมาณสเมกไทต์ร้อยละ 80-90 ที่ค่าพีเอช 3-8



ภาพที่ 8 ร้อยละการดูดซับของตะกั่ว ทองแดง สังกะสี และแคดเมียมในตัวอย่างอนุภาคขนาดดินเหนียวที่มีปริมาณสมกไทต์ร้อยละ 50-60 ที่ค่าพีเอช 3-8



ภาพที่ 9 ร้อยละการดูดซับของตะกั่ว ทองแดง สังกะสี และแคดเมียมในตัวอย่างอนุภาคขนาดดินเหนียวที่มีปริมาณสเมกไทต์ร้อยละ 30-40 ที่ค่าพีเอช 3-8

จากผลการทดลองอิทธิพลของพีเอชที่มีผลต่อการดูดซับ โดยการเพิ่มขึ้นของพีเอชจะส่งผลทำให้ปริมาณการดูดซับของตะกั่ว ทองแดง สังกะสี และแคดเมียมเพิ่มสูงขึ้น นอกจากนี้ลักษณะและชนิดของไอออนเมื่อมีน้ำเป็นองค์ประกอบก็มีส่วนสำคัญที่ทำให้ปริมาณการดูดซับไอออนในแต่ละไอออนแตกต่างกัน โดยอนุภาคไอออนที่มีขนาดเล็กจะมีความสามารถในการถูกดูดซับได้ดีกว่าไอออนที่มีขนาดใหญ่ซึ่งมีผลต่อการดูดซับที่ตำแหน่งของผิวหน้าและการแทนที่ของไอออนภายในหลักระหว่างชั้นของแร่และในแผ่นออกทระฮีดรัลของแร่ดินเหนียวแบบ 2:1 (Raihsback, 2011)

ปริมาณการดูดซับที่เพิ่มขึ้นยังขึ้นอยู่กับปริมาณของสเมกไทต์ที่มีอยู่ในอนุภาคขนาดดินเหนียวซึ่งจากการทดลองพบว่า ในกลุ่มของตัวอย่างที่มีปริมาณสเมกไทต์สูง (80-90%) สามารถดูดซับโลหะหนักได้มากกว่าในกลุ่มที่มีปริมาณสเมกไทต์ปานกลาง (50-60%) และต่ำ (30-40%)

จากการทดลองดังกล่าวสอดคล้องกับงานวิจัยของ Vejsada *et al.* (2005) โดยนำเบนทอไนต์จากแหล่งธรรมชาติในประเทศสเปนมาดูดซับธาตุซีเซียมซึ่งจัดเป็นธาตุกัมมันตรังสี โดยเบนทอไนต์ที่นำมาใช้เป็นวัสดุดูดซับจากแหล่งที่แตกต่างกันมีความแตกต่างขององค์ประกอบเชิงแร่ โดยตัวอย่างที่มีสเมกไทต์เป็นองค์ประกอบหลักและมีปริมาณสูงมีความสามารถในการดูดซับธาตุซีเซียมได้สูงกว่าในตัวอย่างที่มีปริมาณสเมกไทต์ต่ำกว่า

อิทธิพลของพีเอชที่มีผลต่อการดูดซับของตะกั่ว ทองแดง สังกะสี และแคดเมียมในสเมกไทต์จากการทดลองแสดงให้เห็นว่า มีความแตกต่างของปริมาณการดูดซับโลหะหนักในแต่ละค่าพีเอช โดยพีเอชเป็นปัจจัยที่มีผลต่อการละลายได้ของโลหะหนักในสารละลายรวมทั้งลักษณะชนิดของโลหะหนักในสารละลายที่เปลี่ยนแปลงไป จึงสามารถถูกดูดซับไว้ที่ผิวของอนุภาคได้ นอกจากนี้มีผลต่อไอออนที่ถูกดูดซับแล้วการเปลี่ยนแปลงประจุบนผิววัสดุดูดซับเป็นสิ่งสำคัญที่ทำให้สามารถดูดซับไอออนไว้กับตัววัสดุดูดซับไว้ได้ (Veli and Bilge, 2007) โดยกลไกที่มีส่วนสำคัญในการทำให้เกิดการดูดซับในแร่ดินเหนียวแบบ 2:1 ได้แก่ การละลายได้ของโลหะหนักในสารละลาย (dissolution) การแลกเปลี่ยนไอออนและการดูดซับ (ion exchange and adsorption) และการตกตะกอน (precipitation) โดยการแลกเปลี่ยนไอออนที่เกิดขึ้นจะเกิดการแลกเปลี่ยนภายในหีบระหว่างชั้นของแร่ไอออนที่แลกเปลี่ยนได้อยู่ในรูปของ  $Pb^{2+}$ ,  $Cu^{2+}$ ,  $Zn^{2+}$  และ  $Cd^{2+}$  ซึ่งเป็นแคตไอออน

#### 4.2 อิทธิพลของความเข้มข้นของตะกั่ว ทองแดง สังกะสี และแคดเมียมในสารละลายต่อการดูดซับของสเมกไทต์

ความเข้มข้นของโลหะหนักในสารละลายมีผลต่อความสามารถในการดูดซับของอนุภาคดูดซับ ซึ่งลักษณะของอนุภาคดูดซับจะเป็นสิ่งที่ชี้ให้เห็นถึงความสามารถในการดูดซับของแคตไอออนต่าง ๆ ไว้กับอนุภาค และอนุภาคดูดซับจะมีความจุในการดูดซับแคตไอออนต่าง ๆ ไว้ในปริมาณที่จำกัดซึ่งขึ้นอยู่กับลักษณะและสมบัติของวัสดุดูดซับ จากการทดลองพบว่าปริมาณการดูดซับมีความแตกต่างกันตามปริมาณของสเมกไทต์ที่มีอยู่ในอนุภาคขนาดดินเหนียว เช่นเดียวกับลักษณะการดูดซับที่เกิดขึ้นจากอิทธิพลของพีเอช แต่เมื่อมีปริมาณของโลหะหนักในสารละลายที่แตกต่างกันทำให้ปริมาณการดูดซับมีความแตกต่างกันมากยิ่งขึ้น โดยเมื่อความเข้มข้น

ของโลหะหนักในสารละลายถึงจุดจุดหนึ่งปริมาณการดูดซับจะคงที่ซึ่งแสดงให้เห็นว่าปริมาณการดูดซับของอนุภาคดูดซับมีปริมาณที่ถูกจำกัด และจากผลการทดลองพบว่า ความเข้มข้นของตะกั่ว ทองแดง สังกะสี และแคดเมียมในสารละลายที่มีผลต่อการดูดซับของสเมกไทต์สามารถเห็นความแตกต่างได้ชัดเจนจากการแบ่งกลุ่มของปริมาณของสเมกไทต์ที่มีอยู่ในตัวอย่างอนุภาคนาอดินเหนียวดังนี้

#### 4.2.1 กลุ่มสเมกไทต์สูง (ร้อยละ 80-90)

การศึกษาผลของความเข้มข้นของโลหะหนักที่ความเข้มข้นแตกต่างกันที่ค่าพีเอช 6 พบว่า ในกลุ่มตัวอย่างที่มีปริมาณสเมกไทต์สูงการดูดซับโลหะหนักจะเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของโลหะหนักที่เพิ่มขึ้นจนถึงความเข้มข้นที่ 50 มิลลิกรัมต่อลิตร หลังจากนั้นปริมาณการดูดซับจะคงที่โดยปริมาณการดูดซับตะกั่ว สังกะสี ทองแดง และแคดเมียมมากที่สุดเท่ากับ 44.56, 42.43, 42.37 และ 22.17 มิลลิกรัมต่อกรัมดินเหนียวตามลำดับ

#### 4.2.2 กลุ่มสเมกไทต์ปานกลาง (ร้อยละ 50-60)

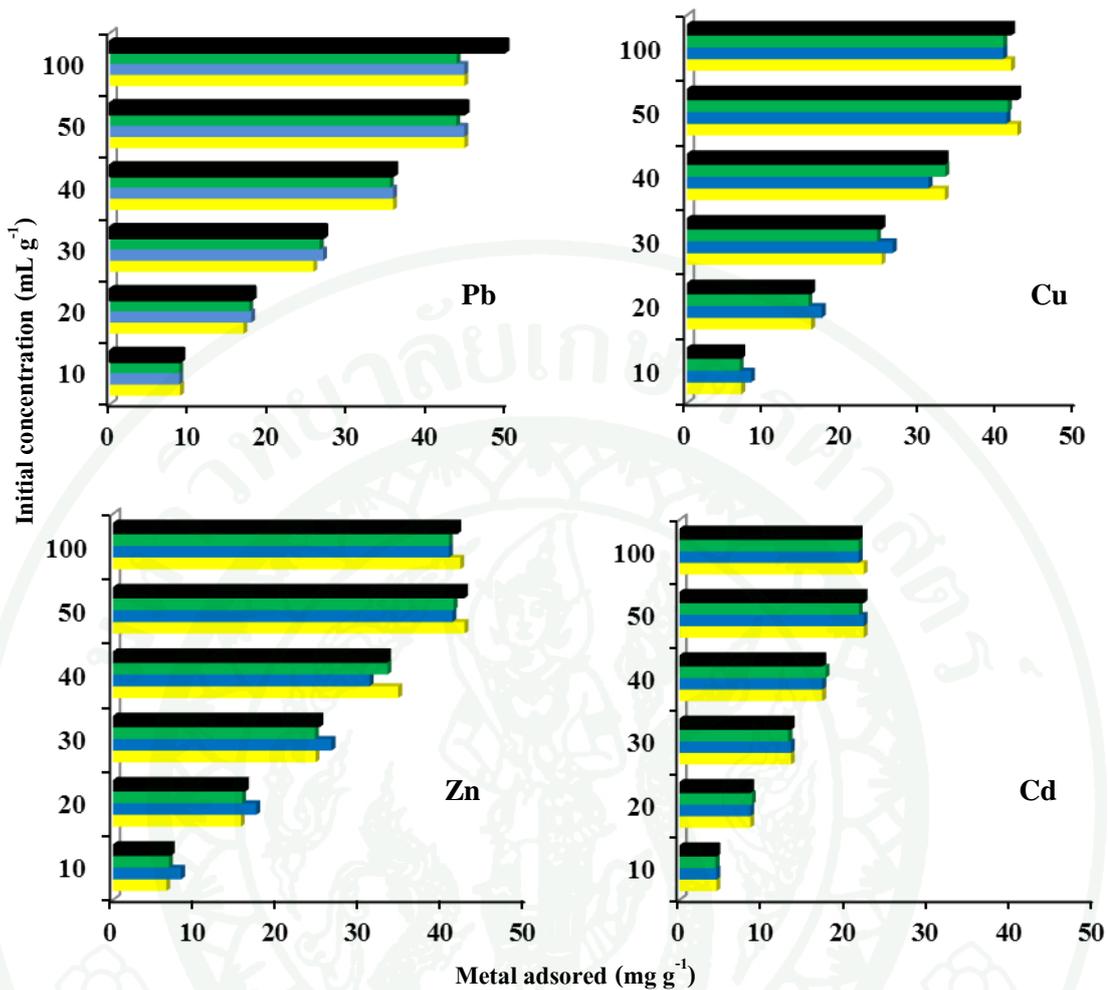
ในกลุ่มตัวอย่างที่มีปริมาณสเมกไทต์ปานกลาง พบว่า ปริมาณการดูดซับตะกั่ว สังกะสี ทองแดง และแคดเมียม มากที่สุดเท่ากับ 34.48, 30.91, 30.57 และ 16.56 มิลลิกรัมต่อกรัมดินเหนียวตามลำดับ โดยการดูดซับโลหะหนักจะเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของโลหะหนักที่เพิ่มขึ้นจนถึงความเข้มข้นที่ 50 มิลลิกรัมต่อลิตร หลังจากนั้นปริมาณการดูดซับจะคงที่เช่นเดียวกับในกลุ่มตัวอย่างที่มีสเมกไทต์สูง

#### 4.2.3 กลุ่มสเมกไทต์ต่ำ (ร้อยละ 30-40)

ในกลุ่มตัวอย่างที่มีปริมาณสเมกไทต์ต่ำ พบว่าปริมาณการดูดซับตะกั่ว สังกะสี ทองแดง และแคดเมียม มากที่สุดเท่ากับ 19.57, 20.91, 23.97 และ 11.77 มิลลิกรัมต่อกรัมดินเหนียวตามลำดับการดูดซับโลหะหนักจะเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของโลหะหนักที่เพิ่มขึ้นจนถึงความเข้มข้นที่ 50 มิลลิกรัมต่อลิตร หลังจากนั้นปริมาณการดูดซับจะคงที่เช่นเดียวกับในกลุ่มตัวอย่างที่มีสเมกไทต์สูงและปานกลาง

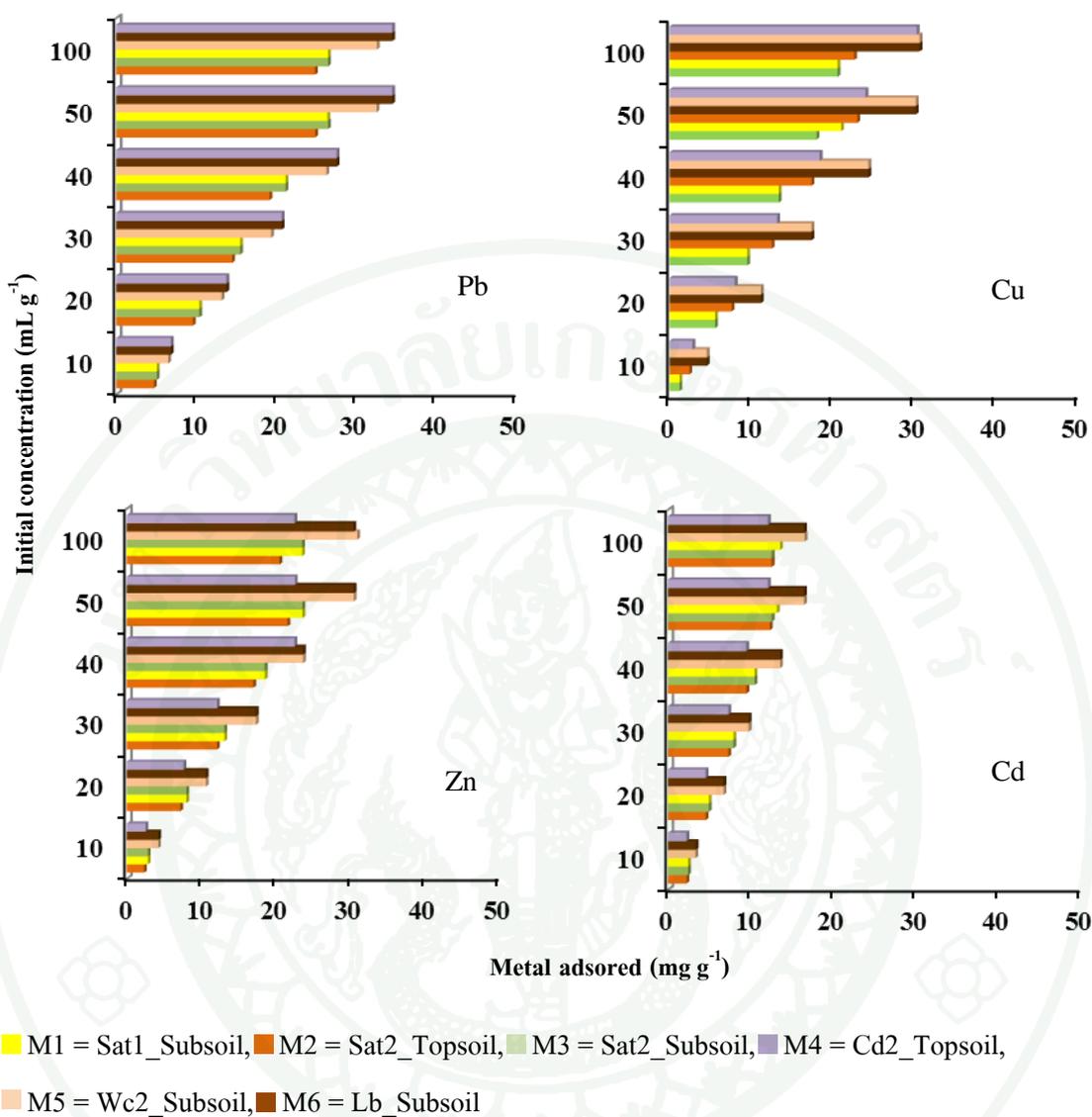
จากการทดลองอิทธิพลของความเข้มข้นของโลหะหนักในสารละลายที่มีผลต่อการดูดซับ พบว่าเมื่อปริมาณความเข้มข้นของโลหะหนักเพิ่มขึ้นการดูดซับก็จะเพิ่มขึ้นด้วยเช่นเดียวกัน ทั้งตะกั่ว ทองแดง สังกะสี และแคดเมียม แต่ปริมาณการดูดซับจะเริ่มลดลงเมื่อถึงความเข้มข้นโลหะหนักในสารละลายที่มากเกินไปเกินความสามารถในการดูดซับของตัวดูดซับ (ภาพที่ 10, 11 และ 12) จากการศึกษาปริมาณการดูดซับของโลหะหนักที่ความเข้มข้นของโลหะหนักในสารละลายที่แตกต่างกัน โดยการดูดซับมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณความเข้มข้นโลหะหนักในสารละลายเพิ่มขึ้น แต่ที่ปริมาณความเข้มข้นที่ 100 มิลลิกรัมต่อลิตรปริมาณการดูดซับจะเท่ากับความเข้มข้นของสารละลายโลหะหนักที่ 50 มิลลิกรัมต่อลิตร นั้นแสดงให้เห็นว่าจุในการดูดซับสูงสุดของอนุภาคดูดซับอยู่ที่ 50 มิลลิกรัมต่อลิตร

ลักษณะการดูดซับที่เกิดขึ้นแสดงว่าปริมาณการดูดซับของสเมกไทต์ถูกจำกัดด้วยปริมาณของโลหะหนักในสารละลาย เนื่องจากปริมาณของการดูดซับเพิ่มสูงขึ้นเมื่อปริมาณโลหะหนักในสารละลายเพิ่มสูงขึ้นเช่นเดียวกันเมื่อปริมาณโลหะหนักในสารละลายเพิ่มขึ้นแต่ความจุในการดูดซับของสเมกไทต์ลดลง เนื่องจากพื้นที่ในการแลกเปลี่ยนไอออนที่เกิดขึ้นของสเมกไทต์ลดลงจากการถูกแทนที่ขนาดใกล้เคียงกันของแคตไอออนของโลหะหนักทำให้พื้นที่ในการดูดซับลดลง ซึ่งปริมาณการดูดซับโลหะต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นจะขึ้นอยู่กับสมบัติของวัสดุนั้นสำหรับแร่ดินเหนียวพบว่าสมบัติที่ช่วยในการดูดซับได้แก่ พื้นที่ผิวสัมผัส ประจุที่เกิดขึ้นบนผิวหน้า พีเอช ความเข้มข้นของไอออนเป็นต้น โดยเฉพาะค่าความจุแลกเปลี่ยนแคตไอออนซึ่งเป็นกลไกสำคัญในการดูดซับแคตไอออน (Izumi *et al.*, 1992)

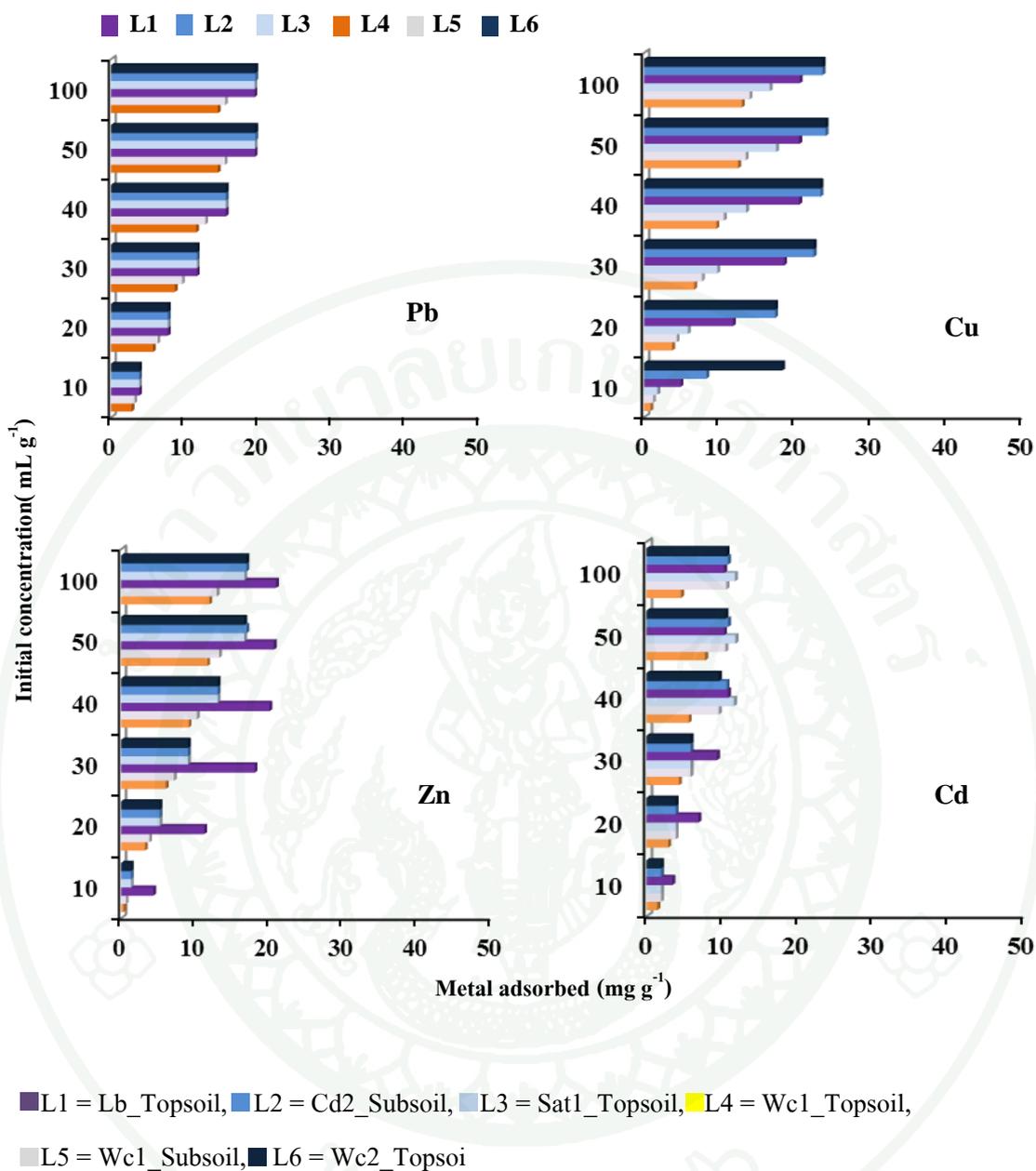


■ H1 = Brh\_Topsoil, ■ H2 = Brh\_Subsoil, ■ H3 = Cd1\_Topsoil, ■ H4 = Cd1\_Subsoil

ภาพที่ 10 ปริมาณการดูดซับตะกั่ว ทองแดง สังกะสี และแคดเมียมในอนุภาคขนาดดินเหนียวที่มีปริมาณสเมกไทต์ร้อยละ 80-90 ที่ความเข้มข้นของสารละลายต่าง ๆ ที่พีเอช 6



ภาพที่ 11 ปริมาณการดูดซับตะกั่ว ทองแดง สังกะสี และแคดเมียมในอนุภาคขนาดดินเหนียวที่มีปริมาณสเมกไทต์ร้อยละ 50-60 ที่ความเข้มข้นของสารละลายต่าง ๆ ที่ พีเอช 6



ภาพที่ 12 ปริมาณการดูดซับตะกั่ว ทองแดง สังกะสี และแคดเมียมในอนุภาคขนาดดินเหนียวที่มีปริมาณสเมกไทต์ร้อยละ 30-40 ที่ความเข้มข้นของสารละลายต่าง ๆ ที่พีเอช 6

## 5. ไอโซเทิร์มการดูดซับ

การศึกษาไอโซเทิร์มของการดูดซับ (adsorption isotherm) สามารถศึกษาในรูปของสมการ Langmuir และ Freundlich โดยดูจากค่า  $r^2$  ของสมการที่ได้จากการสร้างกราฟความสัมพันธ์ของสมการทั้งสองเพื่อพิจารณาค่าสหสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการดูดซับและความเข้มข้นของโลหะหนักในสารละลาย ณ จุดสมดุล โดยกราฟของสมการ Langmuir เป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความเข้มข้นของโลหะหนักที่เหลือในสารละลายในสถานะสมดุล ( $C_e$ ,  $\text{mg L}^{-1}$ ) ในแกน x และอัตราส่วนระหว่างความเข้มข้นของโลหะหนักในสารละลายในสถานะสมดุลต่อปริมาณของโลหะหนักที่ถูกดูดซับต่อน้ำหนักของตัวดูดซับ ( $C_e/q_e$ ,  $\text{g L}^{-1}$ ) เป็นแกน y ซึ่งจะช่วยให้ทราบค่า  $X_m$  หรือปริมาณการดูดซับโลหะหนักในสารละลายได้สูงสุด สำหรับสมการ Freundlich เป็นความสัมพันธ์แบบลอการิทึมระหว่างความเข้มข้นของโลหะหนักที่เหลือในสารละลายในสถานะสมดุล ( $C_e$ ,  $\text{mg L}^{-1}$ ) เป็นแกน x และปริมาณของโลหะหนักที่ถูกดูดซับต่อน้ำหนักของตัวดูดซับ ( $q_e$ ,  $\text{mg g}^{-1}$ ) เป็นแกน y ซึ่งจะช่วยให้ทราบถึงค่าสัมประสิทธิ์การแพร่กระจาย (K) และ correction factor (n)

การศึกษาไอโซเทิร์มการดูดซับของ ตะกั่ว ทองแดง สังกะสี และแคดเมียม ในสเมกไทต์ เป็นการทดลองเพื่อตรวจสอบความสัมพันธ์ของโลหะหนักในสารละลาย และสเมกไทต์ซึ่งเป็นวัสดุดูดซับ โดยการทดลองการดูดซับทำ ณ จุดที่สารละลายและตัวดูดซับเกิดสมดุลระหว่างกัน โดยลักษณะการดูดซับจะมีความแตกต่างของชนิดของโลหะหนักและปริมาณของสเมกไทต์ที่มีอยู่ในตัวอย่างของอนุภาคดินเหนียว ในตารางภาคผนวกที่ 6 ซึ่งแสดงค่าพารามิเตอร์ของการดูดซับของตัวอย่างอนุภาคดินเหนียวจากตัวอย่างอนุภาคดินเหนียวทั้งหมด 16 ตัวอย่าง โดยเลือกตัวอย่างอนุภาคดินเหนียวที่มีปริมาณสเมกไทต์ สูง ปาน กลาง และต่ำ โดยตัวอย่างอนุภาคดินเหนียวที่มีปริมาณสเมกไทต์สูง (90%) ได้แก่ ตัวอย่างอนุภาคดินเหนียวจากดินชั้นบนของชุดดินบุรีรัมย์ ปริมาณสเมกไทต์ปานกลาง (50%) จากตัวอย่างอนุภาคดินเหนียวจากดินชั้นบนของชุดดินสมอทอด 1 และปริมาณสเมกไทต์ต่ำจากตัวอย่างอนุภาคดินเหนียวจากดินชั้นบนในชุดดินวังชมภู 1 ซึ่งได้ผลการทดลองในแต่ละชุดดังต่อไปนี้

### 5.1 ไอโซเทิร์มการดูดซับตะกั่ว

จากการทดลอง พบว่า ไอโซเทิร์มการดูดซับของตะกั่วมีความเหมาะสมในสมการ Langmuir มากกว่าสมการ Freundlich โดยค่าสหสัมพันธ์ ( $r^2$ ) ในสมการ Langmuir อยู่ในช่วง 0.96-0.97 ในขณะที่สมการ Freundlich แสดงค่าสหสัมพันธ์อยู่ในช่วง 0.89-0.90 (ภาพที่ 13)

### 5.2 ไอโซเทิร์มการดูดซับทองแดง (Copper adsorption isotherm)

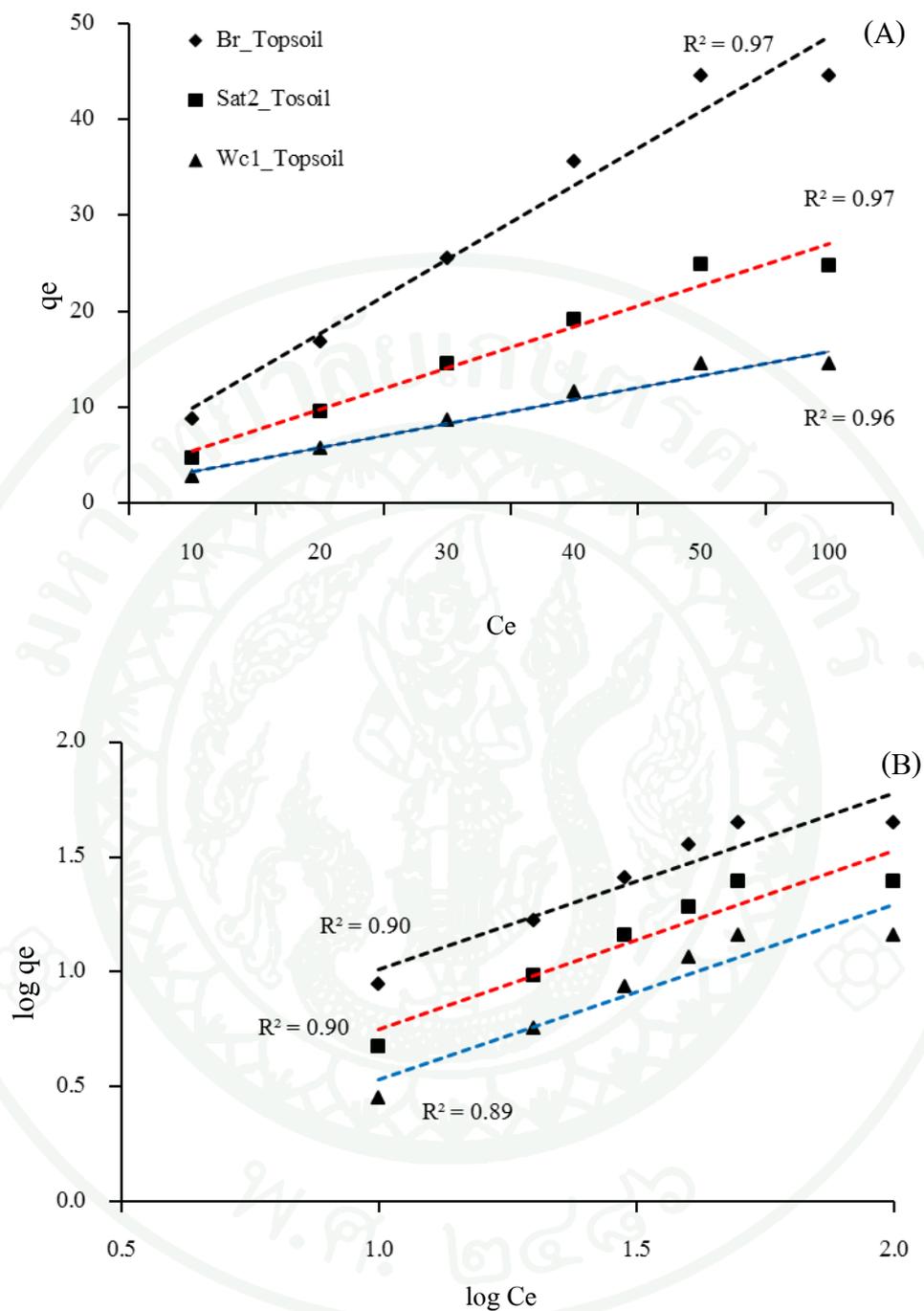
จากการทดลอง พบว่า ไอโซเทิร์มการดูดซับของทองแดงมีความเหมาะสมในสมการ Langmuir มากกว่าสมการ Freundlich โดยค่าสหสัมพันธ์ ( $r^2$ ) ในสมการ Langmuir อยู่ในช่วง 0.96-0.98 ในขณะที่สมการ Freundlich แสดงค่าสหสัมพันธ์อยู่ในช่วง 0.89-0.90 (ภาพที่ 14)

### 5.3 ไอโซเทิร์มการดูดซับสังกะสี (Zinc adsorption isotherm)

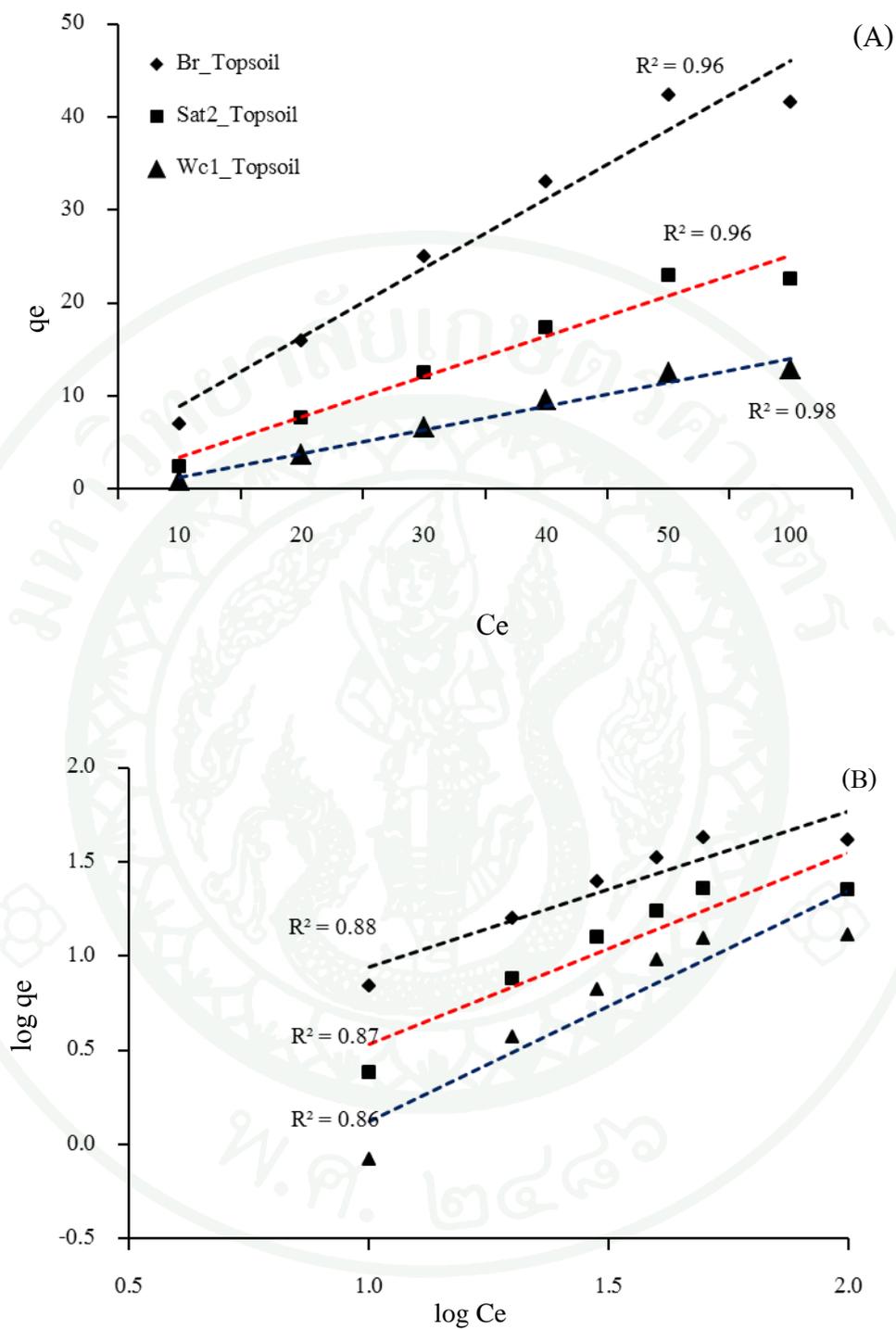
จากการทดลอง พบว่า ไอโซเทิร์มการดูดซับของสังกะสีมีความเหมาะสมในสมการ Langmuir มากกว่าสมการ Freundlich โดยค่าสหสัมพันธ์ ( $r^2$ ) ในสมการ Langmuir อยู่ในช่วง 0.94-0.97 ในขณะที่สมการ Freundlich แสดงค่าสหสัมพันธ์อยู่ในช่วง 0.81-0.88 (ภาพที่ 15)

### 5.4 ไอโซเทิร์มการดูดซับแคดเมียม (Cadmium adsorption isotherm)

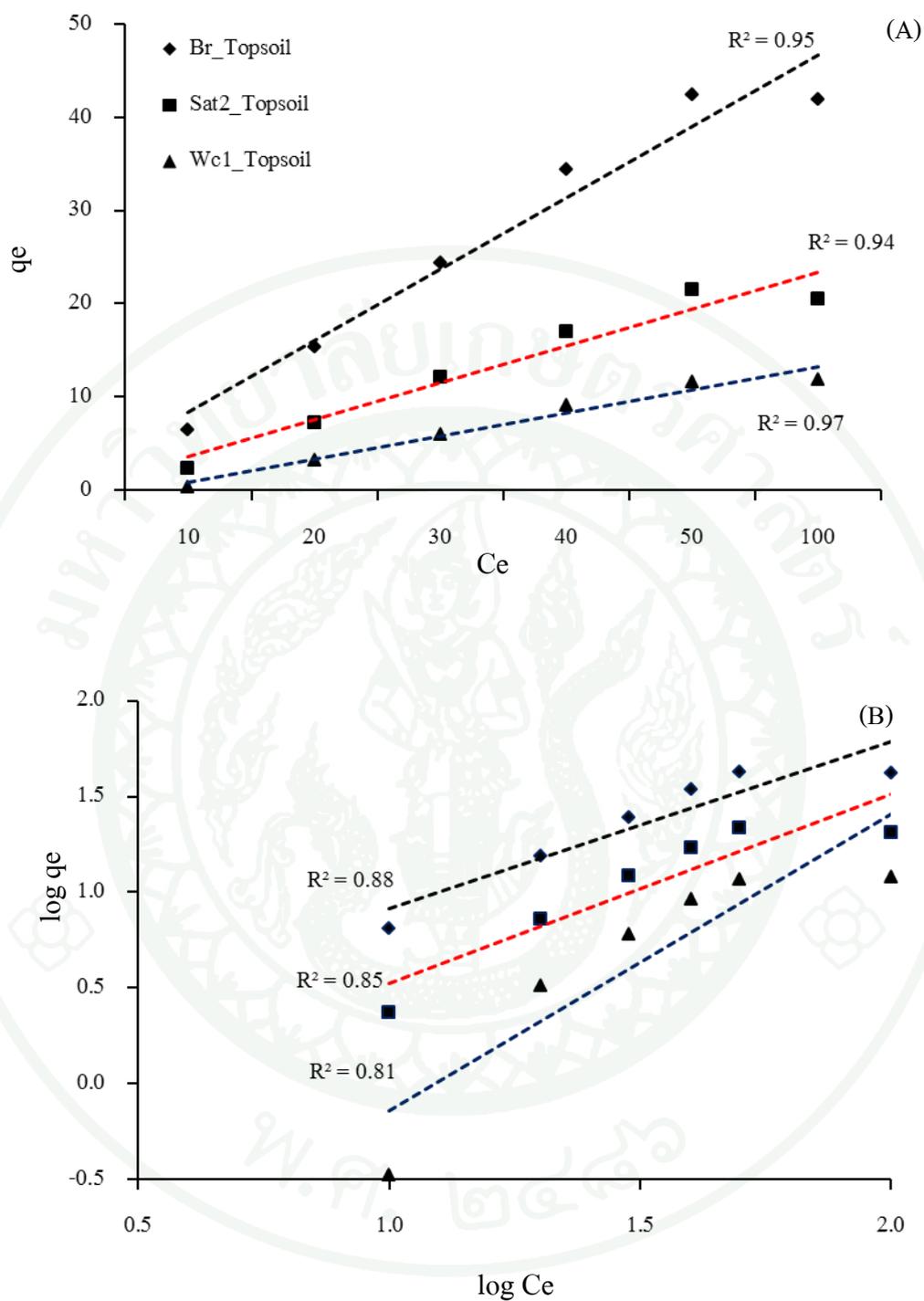
จากการทดลอง พบว่า ไอโซเทิร์มการดูดซับของแคดเมียม มีความเหมาะสมในสมการ Langmuir มากกว่าสมการ Freundlich โดยค่าสหสัมพันธ์ ( $r^2$ ) ในสมการ Langmuir อยู่ในช่วง 0.96-0.97 ในขณะที่สมการ Freundlich แสดงค่าสหสัมพันธ์เท่ากับ 0.90 (ภาพที่ 16)



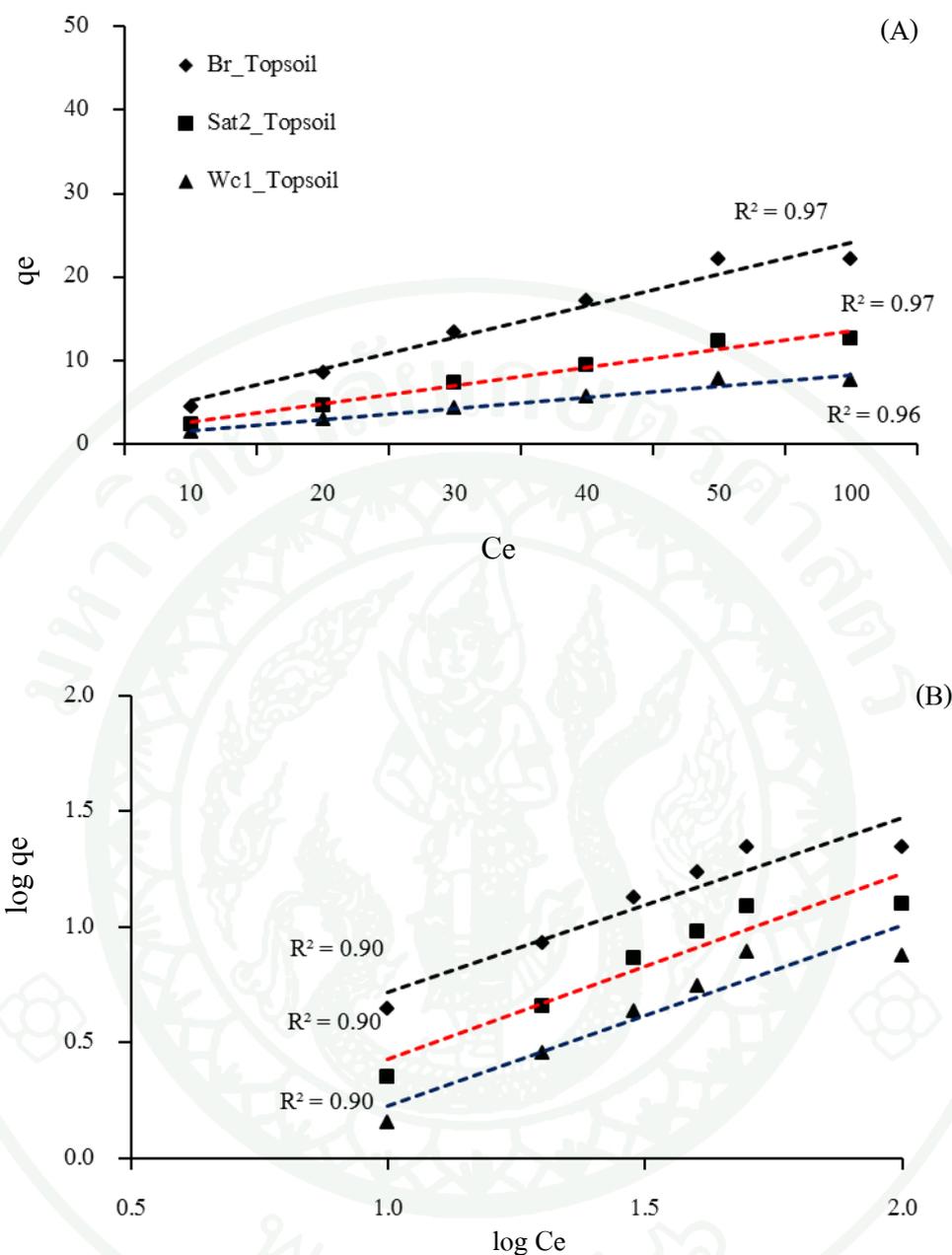
ภาพที่ 13 การดูดซับตะกั่วโดยสมการ Langmuir (A) และสมการ Freundlich (B)



ภาพที่ 14 การดูดซับทองแดงโดยสมการ Langmuir (A) และสมการ Freundlich (B)



ภาพที่ 15 การดูดซับสังกะสีโดยสมการ Langmuir (A) และสมการ Freundlich (B)

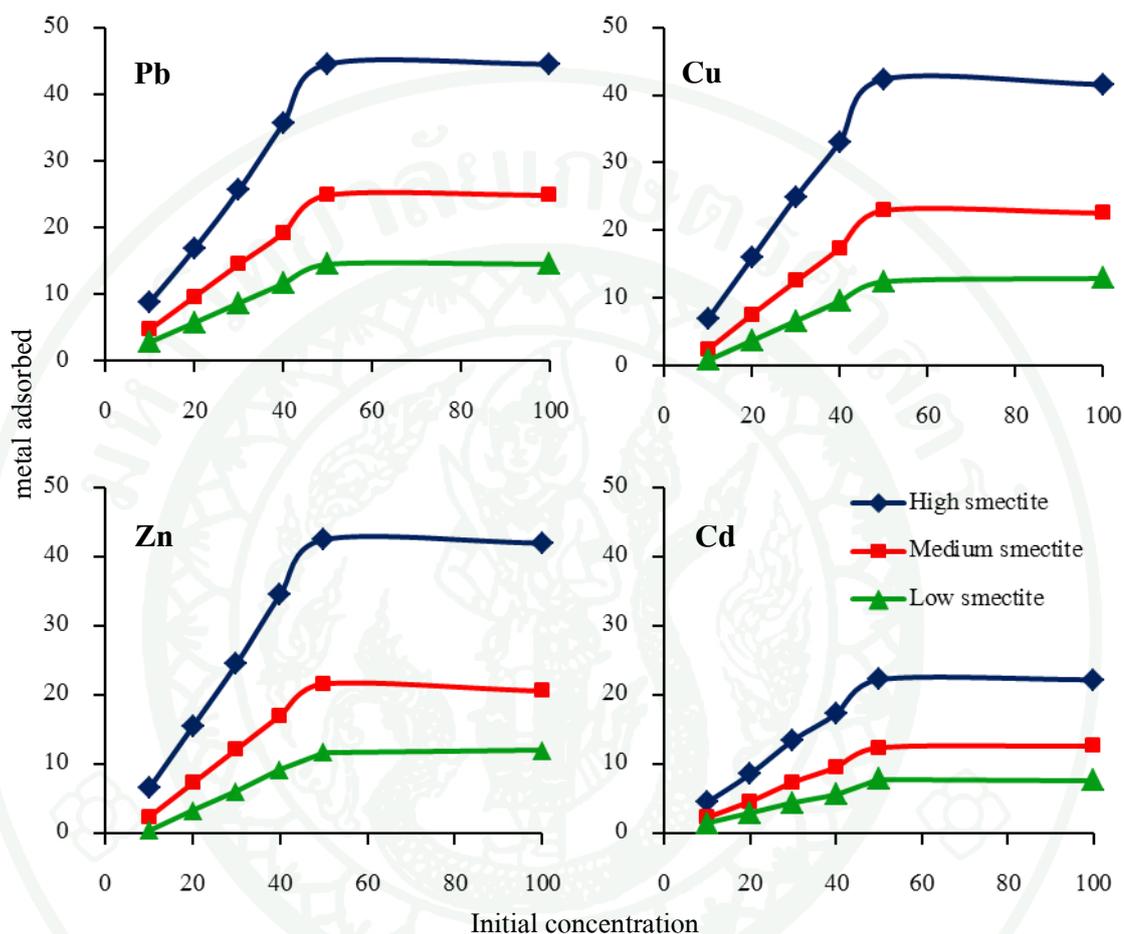


ภาพที่ 16 การดูดซับแคดเมียมโดยสมการ Langmuir (A) และสมการ Freundlich (B)

จากผลการศึกษาไอโซเทิร์มการดูดซับของ ตะกั่ว ทองแดง สังกะสี และแคดเมียมของ สเมกไทต์ดังกล่าวแสดงให้เห็นว่า Langmuir isotherm สามารถอธิบายการดูดซับของโลหะหนัก ชนิดต่าง ๆ ได้ ซึ่งลักษณะการดูดซับที่เกิดขึ้นเป็นการดูดซับแบบชั้นเดียวโดยการดูดซับจะถูกจำกัด ด้วยปริมาณของพื้นผิวที่สามารถดูดซับแคดไอออนต่าง ๆ

จากผลการทดลองที่ได้ดังกล่าวมีความสอดคล้องกับกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของโลหะหนักที่เหลืออยู่ในสารละลายที่จุดสมดุล ( $C_e$ ) เป็นแกน x และ กับปริมาณ

โลหะหนักที่ถูกดูดซับต่อน้ำหนักของอนุภาคดูดซับซึ่งเป็นแกน  $y$  โดยลักษณะของกราฟเป็นแบบ L-curve isotherm ซึ่งสอดคล้องกับสมการ Langmuir โดยลักษณะของกราฟดังกล่าวแสดงถึงปริมาณการดูดซับต่อน้ำหนักของตัวดูดซับมีความคงที่ ณ จุด ๆ หนึ่ง



ภาพที่ 17 ลักษณะ L-curve การดูดซับในตัวอย่างอนุภาคขนาดดินเหนียวที่มีปริมาณสมกไทต์แตกต่างกันที่ได้จากการทดลอง

ไอโซเทิร์มของการดูดซับเป็นลักษณะที่ใช้อธิบายกลไกในการดูดซับระหว่างอนุภาคดูดซับและอนุภาคที่ถูกดูดซับ โดยอธิบายถึงประสิทธิภาพของอนุภาคดูดซับที่มีความจุในการดูดซับอนุภาคต่าง ๆ ไว้ จากการทดลองไอโซเทิร์มของการดูดซับเป็นการทดลองที่ใช้ระยะเวลาสั้น (short-term) และเป็นแบบการดูดซับของไอออนเดียวที่มีความแตกต่างของปัจจัยที่ทำให้เกิดการดูดซับที่แตกต่างกัน ซึ่งสมการไอโซเทิร์มที่สามารถอธิบายลักษณะการดูดซับที่เกิดขึ้นในระยะเวลาสั้นได้แก่ Langmuir isotherm และ Freundlich isotherm (Olivera *et al.*, 2005)

การดูดซับตะกั่วของสเมกไทต์ไอโซเทิร์มที่เหมาะสมที่สุดคือ Langmuir isotherm ซึ่งแสดงค่าสหสัมพันธ์มากกว่าใน Freundlich isotherm จากผลการทดลองดังกล่าวสอดคล้องกับงานวิจัยของ Shu and Wan (2008) ที่ได้ทำการศึกษาการดูดซับและการปลดปล่อยตะกั่วของมอนต์มอริลโลไนต์ซึ่งเป็นแร่ดินเหนียวในกลุ่มของ 2:1 เช่นเดียวกับสเมกไทต์ โดยการดูดซับที่เกิดขึ้นพบว่าสมการที่มีความเหมาะสม คือ สมการของ Langmuir ซึ่งลักษณะการดูดซับเกิดจากการดูดซับบนผิวหน้าของวัสดุดูดซับที่เกิดจากหมู่ฟังก์ชันไฮดรอกซิลที่เป็นประจุลบดูดยึดไอออนของตะกั่วที่แตกตัวเป็นแคตไอออนไว้ นอกจากนี้ยังได้อธิบายกลไกในการดูดซับที่เกิดขึ้นระหว่างมอนต์มอริลโลไนต์และตะกั่วมีทั้งหมดสองขั้นตอนหลักด้วยกัน ขั้นตอนแรกการดูดซับไอออนของตะกั่วเกิดจากพันธะเคมีที่เกิดบริเวณของผิวหน้าที่มีกลุ่มของไฮดรอกซิลและเกิดเป็นไอออนเชิงซ้อนบริเวณพื้นที่ผิวด้านใน (inner sphere) ขั้นที่สองเกิดการดูดยึดด้วยแรงทางไฟฟ้า (electrostatic binding reaction) ระหว่างไอออนของโลหะหนักกับตำแหน่งประจุลบ (negative charge site) ของมอนต์มอริลโลไนต์ และเกิดเป็นสารเชิงซ้อนบริเวณผิวด้านนอกของมอนต์มอริลโลไนต์ กลไกการดูดซับดังกล่าวเป็นกระบวนการดูดซับที่ไม่เฉพาะเจาะจง (non-specific adsorption)

สำหรับไอโซเทิร์มการดูดซับทองแดงและสังกะสีของสเมกไทต์ สมการ Langmuir เป็นสมการที่เหมาะสมที่สุด สำหรับทองแดงและสังกะสีพบปริมาณการดูดซับและค่าไอโซเทิร์มมีค่าใกล้เคียงกันเนื่องจากขนาดของไอออนมีขนาดใกล้เคียงกัน ดังนั้นปริมาณการดูดซับและกระบวนการดูดซับที่เกิดขึ้นจึงมีลักษณะคล้ายกัน โดยเฉพาะการดูดซับที่เกิดขึ้นจากการแทนที่ขนาดใกล้เคียงกันของไอออนภายในหลักระหว่างชั้น ด้วยลักษณะความสามารถของแร่ดินเหนียวในกลุ่มของ 2:1 ที่สามารถดูดซับทองแดงและสังกะสีได้ในปริมาณมาก จึงมีการศึกษาโดยนำแร่ดินเหนียวในกลุ่มดังกล่าวมาดูดซับทองแดงและสังกะสีออกจากน้ำเสีย เพื่อบำบัดน้ำเสียก่อนปล่อยลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติ (Alkan *et al.*, 2008; Alloway, 1995; Egirani, 2005; Eren, 2008; Eren and Afsin, 2008)

สำหรับไอโซเทิร์มการดูดซับแคดเมียม พบว่า สมการ Langmuir ยังคงมีความเหมาะสมมากกว่าสมการ Freundlich เช่นเดียวกับธาตุอื่นแต่ปริมาณการดูดซับของแคดเมียมมีความแตกต่างอย่างชัดเจนเมื่อเปรียบเทียบกับธาตุอื่น ๆ ที่ทำการทดลอง โดยปริมาณการดูดซับแคดเมียมที่น้อยในสเมกไทต์น่าจะเกิดจากลักษณะของความชอบของไอออนที่จะถูกดูดซับบนวัสดุดูดซับ (affinity adsorption) สำหรับแร่ดินเหนียวความจุในการดูดซับแคดเมียมจะมีปริมาณเพียงเล็กน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับ อินทรียวตดู หรือ เหล็กออกไซด์ ซึ่งวัสดุทั้งสองมีความจุในการดูดซับแคดเมียมในปริมาณที่มากกว่า เนื่องจากลิแกนด์ที่เกิดจากวัสดุทั้งสองสามารถเกิดเป็นสารเชิงซ้อนกับแคดเมียมได้ดีกว่าแร่ดินเหนียว ซึ่งความจุในการดูดซับในแร่ดินเหนียวเกิดจากการที่ผิวหน้าของแร่เกิดประจุ

ลบจากการแตกหักของแร่ดินเหนียว การแทนที่ขนาดใกล้เคียงกัน และการเปลี่ยนแปลงของพีเอช  
ในสารละลาย (Alloway, 1995)



## สรุปและข้อเสนอแนะ

### สรุป

จากการศึกษาการดูดซับ ตะกั่ว ทองแดง สังกะสี และทองแดง ของสมเมกไทต์ในเวอร์ทิซอลส์ที่ตอนโดยใช้ตัวอย่างอนุภาคดินเหนียวจากชั้นดินบนและล่างของชุดดินบุรีรัมย์ (Br) ชุดดินลพบุรี (Lb) ชุดดินชัยบาดาล (Cd1, Cd2) ชุดดินสมอทอด (Sat1, Sat2) และชุดดินวังชมภู (Wc1, Wc2) โดยดินมีวัตถุต้นกำเนิดเป็นตะกอนน้ำพาท้องถิ่น ตะกอนตกล้าง ตะกอนน้ำพาท้องถิ่น ทับถมอยู่บนตะกอนตกล้าง และตะกอนล้างผิวดินที่สลายตัวมาจากหินปูน หินแอนดีไซต์ หินบะซอลต์และหินเนื้อปูน สภาพภูมิประเทศเป็นลูกคลื่นลอนลาด ความชันร้อยละ 1-2 บนลัทธิฐานภูมิประเทศที่ส่วนใหญ่เป็นเชิงเขา และส่วนต่ำของความลาดชันตอนกลางบนที่ราบหินบะซอลต์ที่ถูกกัดกร่อน สูงจากระดับทะเลปานกลาง 26-102 เมตร ลักษณะดินเป็นดินลึกถึงลึกมาก พบรอยแตกกระแหงบริเวณผิวหน้าและพบรอยไถล ภายในหน้าตัดดิน มีการใช้ประโยชน์ที่ดินในการปลูกพืชไร่ เช่น งาม ข้าวฟ่าง ข้าวโพด อ้อย มันสำปะหลัง ถั่วเขียว และมีการปลูกพริก มะพร้าว ถั่วฝักยาว มะม่วง มะขาม ต้นสัก ไม้ บางบริเวณทำเป็นทุ่งหญ้าเลี้ยงสัตว์

สมบัติทางฟิสิกส์พบว่า ในตัวอย่างดินชั้นบนและล่างที่ทำการศึกษาส่วนมากมีการกระจายอนุภาคขนาดดินเหนียวมากกว่าอนุภาคทราย และทรายแป้ง โดยชุดดินบุรีรัมย์ ชุดดินชัยบาดาล 1 ชุดดินชัยบาดาล 2 ชุดดินสมอทอด 2 และชุดดินวังชมภู 2 มีร้อยละการกระจายของอนุภาคดินเหนียวปริมาณมากทั้งในดินชั้นบนและล่าง ซึ่งชุดดินดังกล่าวส่วนใหญ่มีวัตถุต้นกำเนิดมาจากตะกอนน้ำพาท้องถิ่นที่สลายตัวมาจากหินปูน ความหนาแน่นรวมของดินอยู่ในระดับค่อนข้างต่ำถึงสูง ซึ่งส่วนใหญ่แล้วอยู่ในระดับค่อนข้างสูงถึงสูง และสำหรับสัมประสิทธิ์ขยายตัวเชิงเส้นอยู่ในระดับปานกลางถึงสูงมาก

สมบัติทางเคมีพบว่า ดินส่วนใหญ่เป็นดินที่มีค่าพีเอชสูงซึ่งได้รับอิทธิพลมาจากวัตถุต้นกำเนิดที่มาจากหินปูน สภาพการนำไฟฟ้าอยู่ในช่วงที่ดินไม่แสดงการสะสมของเกลือ ปริมาณอินทรีย์วัตถุอยู่ในระดับต่ำถึงค่อนข้างสูงมีแนวโน้มลดลงตามความลึก เช่นเดียวกันกับปริมาณไนโตรเจนรวมซึ่งอยู่ในระดับต่ำมากถึง ปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์อยู่ในระดับต่ำมากถึงค่อนข้างสูง ปริมาณโพแทสเซียมที่เป็นประโยชน์อยู่ในระดับต่ำมากถึงสูงมาก ดินบนมีโพแทสเซียมที่เป็นประโยชน์สูงกว่าดินล่างซึ่งเป็นผลจากการปลดปล่อยโดยแร่ดินเหนียวและอินทรีย์วัตถุ หรือการเพิ่มปุ๋ยโพแทสเซียมลงไปดิน ความจุแลกเปลี่ยนแคตไอออนอยู่ในระดับ

ปานกลางถึงสูง นอกจากนี้ปริมาณตะกั่ว ทองแดง สังกะสี และแคดเมียมในอนุภาคขนาดดินเหนียว มีค่าไม่เกินมาตรฐานของดินที่ใช้ในการทำการเกษตรของกรมควบคุมมลพิษกำหนดไว้

การดูดซับ ตะกั่ว ทองแดง สังกะสี และทองแดง ของสเมกไทต์ในเวอร์ทิซอลส์ที่ดอน โดยใช้ตัวอย่างอนุภาคดินเหนียวจากดินชั้นบนและล่างในแต่ละชุดดิน โดยมีปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ ได้แก่ พีเอช และความเข้มข้นของตะกั่ว ทองแดง สังกะสี และแคดเมียมในสารละลาย และจากการศึกษาพบว่าปริมาณการดูดซับโลหะหนักขึ้นอยู่กับปริมาณสเมกไทต์ที่มีอยู่ในอนุภาคดินเหนียว โดยการเพิ่มขึ้นของพีเอชทำให้เพิ่มความจุในการดูดซับโลหะหนักให้สูงขึ้นโดยในกลุ่มตัวอย่างที่มีปริมาณสเมกไทต์สูง (80-90%) สามารถดูดซับ ตะกั่ว ทองแดง สังกะสี และแคดเมียมคิดเป็นร้อยละ 89.48, 85.91, 84.94 และ 49.77 ตามลำดับ ตะกั่ว ทองแดง และสังกะสีถูกดูดซับได้มากที่สุดในช่วงพีเอช 5-8 ส่วนแคดเมียมถูกดูดซับได้สูงสุดในช่วงพีเอช 6-8

สำหรับชนิดและปริมาณโลหะหนักในสารละลายเป็นปัจจัยที่จำกัดความจุในการดูดซับโลหะหนักของสเมกไทต์ โดยปริมาณโลหะหนักในสารละลายที่สเมกไทต์สามารถดูดซับได้สูงสุดอยู่ที่ 50 มิลลิกรัมต่อลิตร หลังจากนั้นปริมาณการดูดซับจะคงที่ถึงแม้ว่าปริมาณความเข้มข้นของโลหะหนักในสารละลายจะเพิ่มสูงขึ้น กลุ่มตัวอย่างที่มีปริมาณสเมกไทต์สูงพบว่าโดยตะกั่ว ทองแดง สังกะสี และแคดเมียมถูกดูดซับมากที่สุดเท่ากับ 44.56, 42.43, 42.37 และ 22.17 มิลลิกรัมต่อกรัมดินเหนียวตามลำดับ ตะกั่วถูกดูดซับได้มากที่สุด ส่วนสังกะสีและทองแดงมีปริมาณการดูดซับใกล้เคียงกัน สำหรับแคดเมียมถูกดูดซับได้น้อยที่สุดโดยสมการ Langmuir เป็นสมการที่สามารถอธิบายการดูดซับ ตะกั่ว ทองแดง สังกะสีและแคดเมียมได้เหมาะสมที่สุด

ดังนั้นในเวอร์ทิซอลส์ที่ดอนซึ่งมีค่าพีเอชในช่วงที่เป็นกลาง-ด่าง ที่ส่งเสริมการเกิดความสามารถของสเมกไทต์และมีปริมาณสเมกไทต์สูง สามารถช่วยลดการแพร่กระจายของโลหะหนักได้ โดยมีอิทธิพลของพีเอช ชนิดและมีปริมาณของโลหะหนักที่ปนเปื้อนเป็นครุชนิวัดระดับความเป็นพิษที่จะเกิดขึ้นในสภาพแวดล้อม

## ข้อเสนอแนะ

ทองแดง และสังกะสี จัดเป็นกลุ่มของธาตุอาหารที่มีความจำเป็นต่อการเจริญเติบโตของพืช แต่พืชต้องการในปริมาณเพียงเล็กน้อย ตะกั่วและแคดเมียมเป็นธาตุที่ไม่มีความจำเป็นในการเจริญเติบโตของพืชแต่พืชสามารถนำไปสะสมในส่วนต่าง ๆ ได้ ธาตุดังกล่าวจึงเป็นธาตุที่ก่อให้เกิดอันตราย ดังนั้นการจัดการดินที่มีการปนเปื้อนโลหะหนักจึงเป็นสิ่งที่ต้องทำด้วยความระมัดระวัง เพื่อป้องกันไม่ให้พืชนำไปสะสม หรือถูกชะละลายลงสู่แหล่งน้ำใต้ดิน หากในดินที่มีองค์ประกอบของแร่ดินเหนียวที่มีสมบัติในการช่วยดูดซับธาตุพิษเหล่านี้ไว้ได้ ก็สามารถที่จะลดการแพร่กระจาย อีกทั้งยังสามารถนำเทคโนโลยีเข้ามามีส่วนร่วมช่วยในการเคลื่อนย้ายธาตุเหล่านี้ออกไป เช่น การใช้พืชบำบัด (phytoremediation) หรือ การใช้จุลินทรีย์บำบัด (bioremediation) เพื่อลดปริมาณและความเป็นพิษของโลหะหนักในดิน

สำหรับการศึกษาการดูดซับโลหะหนักในสมกไทด์ที่อยู่ในสภาพธรรมชาตินั้น ยังมีการศึกษาไม่มากนัก โดยการศึกษาโดยทั่วไปจะเน้นการศึกษาที่นำแร่ดินเหนียวในกลุ่มของสมกไทด์มาดัดแปลงสมบัติให้มีความสามารถในการดูดซับแคดไอออนของโลหะหนักได้มากขึ้น โดยเน้นไปในการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม หรือเป็นวัสดุรองพื้นในหลุมฝังกลบขยะ สำหรับในภาคการเกษตรแร่ดินเหนียวในกลุ่มของสมกไทด์นอกจากจะมีบทบาทสำคัญในการดูดซับธาตุอาหารให้แก่พืชแล้วยังมีส่วนช่วยในการดูดซับโลหะหนักที่มาจากการใช้สารเคมี หรือการใช้วัสดุเหลือใช้จากโรงงานอุตสาหกรรมมาเป็นปุ๋ยทดแทนการใช้ปุ๋ยเคมี ซึ่งในดินที่มีปริมาณของสมกไทด์เป็นองค์ประกอบหลักสามารถนำแร่สมกไทด์มาเป็นวัสดุช่วยในการดูดซับธาตุพิษที่อาจมาจากการใช้สารเคมีต่าง ๆ ในพื้นที่การเกษตร และจากการศึกษาสมบัติของสมกไทด์ต่อการดูดซับโลหะหนักที่เป็นแคดไอออน โดยมีปัจจัยที่ผลต่อความจุในการดูดซับของสมกไทด์ แสดงให้เห็นว่าสมกไทด์ที่มีอยู่ในดินในสภาพธรรมชาติสามารถนำมาประยุกต์เป็นวัสดุดูดซับที่มีประสิทธิภาพในการดูดซับโลหะหนักที่มีราคาถูกที่สามารถหาได้ในท้องถิ่น อีกทั้งยังเป็นวัสดุที่ได้จากธรรมชาติ จึงเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่จะนำแร่ดังกล่าวมาใช้เป็นวัสดุการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม หรือจากแหล่งชุมชน

## เอกสารและสิ่งอ้างอิง

กรมทรัพยากรธรณี. 2528. แผนที่ธรณีวิทยาประเทศไทย มาตรฐาน 1:250,000.

กรมแผนที่ทหาร. 2516ก. แผนที่สภาพภูมิประเทศมาตรฐาน 1:50,000 ระวัง 5140 II.

\_\_\_\_\_. 2516ข. แผนที่สภาพภูมิประเทศมาตรฐาน 1:50,000 ระวัง 5240 I.

\_\_\_\_\_. 2516ค. แผนที่สภาพภูมิประเทศมาตรฐาน 1:50,000 ระวัง 5241 II.

\_\_\_\_\_. 2516ง. แผนที่สภาพภูมิประเทศมาตรฐาน 1:50,000 ระวัง 5241 IV.

\_\_\_\_\_. 2523. แผนที่สภาพภูมิประเทศมาตรฐาน 1:50,000 ระวัง 5239 III.

\_\_\_\_\_. 2524. แผนที่สภาพภูมิประเทศมาตรฐาน 1:50,000 ระวัง 5139 III.

กรมพัฒนาที่ดิน. 2548. รายงานการจัดการทรัพยากรดินเพื่อการปลูกพืชเศรษฐกิจหลักตามกลุ่ม  
ชุดดิน เล่มที่ 2 ดินบนพื้นที่ดอน. กระทรวงเกษตรและสหกรณ์, กรุงเทพฯ.

กองสำรวจดิน. 2519. แผนที่ดินจังหวัดเพชรบูรณ์ มาตรฐาน 1:100,000. กรมพัฒนาที่ดิน  
กระทรวงเกษตรและสหกรณ์, กรุงเทพฯ.

\_\_\_\_\_. 2524. แผนที่ดินจังหวัดลพบุรี มาตรฐาน 1:100,000. กรมพัฒนาที่ดิน กระทรวง  
เกษตรและสหกรณ์, กรุงเทพฯ.

กิจจา โกสะโยคม. 2529. สมบัติทางเคมีและทางแร่วิทยาของดินในอันดับเวอร์ดีโซลส์ในจังหวัด  
ลพบุรี. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

คณะกรรมการจัดทำพจนานุกรมปฐพีวิทยา. 2551. **พจนานุกรมปฐพีวิทยา**. ภาควิชาปฐพีวิทยา คณะเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

เทียนชัย สุวรรณเวช. 2539. **เคมีของดิน**. ภาควิชาปฐพีวิทยา คณะเทคโนโลยีการเกษตร สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, กรุงเทพฯ.

นงคราญ กาญจนประเสริฐ. 2529. **การศึกษาลักษณะวินิจฉัยที่สำคัญในพัฒนาการของดินและศักยภาพของดินอันดับแอลฟิซอลล์และอินเซปติซอลล์บริเวณลุ่มน้ำแม่กลอง**. วิทยานิพนธ์ปริญญาเอก, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

พิเชษฐ ไชยพานิชย์. 2531. **การกำเนิด การแจกกระจาย และธรณีสัณฐานวิทยาของดินอันดับเวอร์ติโซลล์ ในบริเวณลุ่มน้ำแม่กลอง**. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

พิสุทธิ วิจารณ์. 2518. **คู่มือการทำคำบรรยายหน้าตัดดิน. ใน เอกสารวิชาการเล่มที่ 21**. กองสำรวจดิน กรมพัฒนาที่ดิน กระทรวงเกษตรและสหกรณ์, กรุงเทพฯ.

สำนักสำรวจดินและวางแผนการใช้ที่ดิน. 2548. **ลักษณะและสมบัติของชุดดินในภาคกลางของประเทศไทย**. กรมพัฒนาที่ดิน กระทรวงเกษตรและสหกรณ์, กรุงเทพฯ.

อัญชลี สุทธิประการ. 2534. **แร่ในดิน เล่มที่ 2**. ภาควิชาปฐพีวิทยา คณะเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

\_\_\_\_\_. 2553. **แร่ในอนุภาคขนาดดินเหนียวของดินเขตร้อน**. ภาควิชาปฐพีวิทยา คณะเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

เอิบ เขียวรัตน์. 2534. **ดินของประเทศไทย**. ภาควิชาปฐพีวิทยา คณะเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

\_\_\_\_\_. 2548. **การสำรวจดิน**. พิมพ์ครั้งที่ 2. สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

\_\_\_\_\_. 2552. **คู่มือปฏิบัติการ การสำรวจดิน**. พิมพ์ครั้งที่ 6. ภาควิชาปฐพีวิทยา คณะเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

- Andrejkovicova, S., P. Martin, J. Lubose and K. Peter. 2010. Sorption of heavy metal cations on rhyolitic and andesitic bentonites from Central Slovakia. **Geologica Carpathica** 61(2): 163-171.
- Alkan, M., B. Kalay, M. Dogan and O. Demirbas. 2008. Removal of copper ions from aqueous solutions by kaolinite and batch design. **J. Hazard. Mater.** 153: 867-876.
- Alloway, B.J. 1995. **Heavy Metal in Soils**. Halsted Press, John Willey and Son, Inc., New York.
- Antoniadis, V., C.D. Tsadilas and D. J. Asworth. 2008. Monomental and competitive adsorption of heavy metals by sewage sludge-amended . **Soil Chemosphere** 68(3): 489-494.
- Apple, C. and M. Leana. 2002. Concentration, pH and surface charge effects on cadmium and lead sorption in three tropical soils. **J. Environ. Qual.** 31:581-589.
- Arias, M., B. Soto and M.T. Barral. 2002. Copper sorption characteristic on mineral-humic acid substrates. **Agrochimica** 46: 155-164.
- Bailay, S.E., T.J. Olin, R.M. Bricka and D.D. Andrian. 1999. A review of potentially low-cost sorbents for heavy metals. **Water Res.** 33: 2469-2479.
- Baize, D. 1993. **Soil Science Analysis: A Guide to Current Use**. John Wiley and Sons, Ltd., England.
- Balistreri, L.S. and R.G. Blank. 2008. Dissolved and labile concentration of Cd, Cu, Pb and Zn in the South Fork Coeur d'Alene River, Idaho: Comparisons among chemical equilibrium models and implications for the biotic ligand model. **Appl. Geochem.** 23(12): 3355-3371.
- Bedoui, K., I. Beiki-Abbs and E. Sarasra. 2007. Removal of cadmium (II) from aqueous solution using pure smectite and Lewatite S 100: the effect of time and metal concentration. **Desallinisation** 223: 269-273.

- Bergaya, F. and G. Lagary. 2006. General introduction: clays, clay mineral and clay science, pp. 1-8. *In* F. Bergaya, B.K.G. Theng and G. Lagaly, eds. **Handbook of Clay Science**. 1<sup>st</sup> ed. Elsevire Ltd., Oxford, UK.
- Berilgen, S.A., M.M. Berilgen and T.K. Ozaydin. 2006. Compression and peameability relationships in high water content clays. **Appl. Clay Geol.** 31: 249-261.
- Bhattacharyya, K.G. and S.S. Gupta. 2008. Adsorption of few heavy metals on natural and modified kaolinite and montmorillonite: A review. **Adv. Colloid Interface Sci.** 140 (2): 114-131.
- Blake, G.R. and K.H. Hartge. 1986. Bulk density, pp. 363-382. *In* A. Klute, ed. **Methods of Soil Analysis. Part I.** 2<sup>nd</sup>. Agronomy No. 9. Amer. Soc. Agron. Inc., Madison, WI.
- Bloom, P.R. 2000. Soil pH and pH buffering, pp. 333-352. *In* M.E. Sumner, ed. **Handbook of Soil Science: Chemistry**. CRC Press LLC, Boca Raton New York, Washington DC.
- Boonjar, M.M.A. and F. Goodarzi. 2007. The copper tolerance strategies and the role of antioxidative enzymes in three plant species grown on copper mine. **Chemosphere** 67: 2138-2147.
- Borchardt, G.A. 1989. Smectites, pp. 675-727. *In* J.B. Dixon and S.B. Weed, eds. **Minerals in Soil Environments**. Soil Sci. Soc. America, Madison, Wisconsin, USA.
- Brady, N.C. and R.R. Weil. 2008. **The Nature and Properties of Soils**. 14<sup>th</sup> ed. Practice-Hall, Inc., New Jersey, USA.
- Bray, R.H. and L.T. Kurtz. 1945. Determination of total, organic and available forms of phosphorus in soil. **Soil Sci.** 59: 39-45.

- Brigatti, M.F., S. Colonna, D. Malferrai, L. Medici and L. Poppi. 2008. Mercury adsorption by montmorillonite and vermiculite: a combined XRD, TG-MS and EXAFS study. **Appl. Clay Sci.** 28: 1-8.
- Bühmann, C. and J.L. Schoeman. 1995. A mineralogical characterization of Vertisols from the northern regions of the republic of South Africa. **Geoderma** 66: 239-257.
- Buol, S.W., F.D. Hole and R.J. McCracken. 1980. **Soil Genesis and Classification**. The Iowa State Univ. Press, Ames, Iowa.
- Buol, S.W., R.J. Southard, R.C. Graham and P.A. Macdaniel. 2003. **Soil Genesis and Classification**. Iowa State Press, Ames, Iowa.
- Chapman, H.D. 1965. Cation exchange capacity, pp. 891-901. In C.A. Black, ed. **Methods of Soil Analysis. Part II**. 2<sup>nd</sup> ed. Agronomy No. 9. Amer. Soc. of Agron. Inc., Madison, Wisconsin.
- Chester, R. and H. Voutsinos. 1981. The initial assessment of trace metal pollution in coastal sediment. **Marine Pollution** 12: 84-91.
- Chinn, C. and U.P.P. Pillai. 2008. Self-repair of compacted Vertisols from Central Queensland, Australia. **Geoderma** 144: 491-501.
- Chaignon, V., I. Sanchez-Neira, P. Herrman, B. Jailland and P. Hinsinger. 2003. Copper bioavailability and extractability as related to chemical properties of contaminated soil from a vine-growing area. **Environ. Pollut.** 123:229-238.
- Christianah, O., B. Mi-Hwa and K. Dong-Su. 2008. Montmorillonite surface properties and sorption characteristics for heavy metal removal from aqueous solution. **Hazardous Materials** 166: 538-546.

- Churchman, G.J. 2000. The alteration and formation of soil minerals by weathering, pp. 1-76. *In* M.E. Sumner, ed. **Handbook of Soil Science: Mineralogy**. CRC Press LLC, BocaRaton New York, Washington DC.
- Chittamart, N., A. Suddhiprakarn, I. Kheoruenromne and R.J. Gilkes. 2010. Layer charge characteristic of smectite in Thai Vertisols. **Clays Clay Miner.** 58: 247-262.
- Coulombe, C.E., L.P. Wilding and J.B. Dixon. 2000. Vertisols, pp. 269-286. *In* M.E. Sumner, ed. **Handbook of Soil Science: Pedology**. CRC Press LLC, Boca Raton New York, Washington DC.
- David, B.W. and V.B. Patrick. 1998. Effect of Al and organic acids on the surface chemistry of kaolinite. **Clays Clay Miner.** 46(4): 453-465.
- Day, P.R. 1965. Particle fractionation and particle size analysis, pp. 545-567. *In* C.A. Black, ed. **Methods of Soil Analysis. Part I.** 2<sup>nd</sup> ed. Agronomy No. 9. Amer. Soc. of Agron. Inc., Madison, Wisconsin.
- Decker, J., O. Spaargaren and F. Nachtergaele. 2001. Vertisols: genesis, properties and soilscape management for sustainable development, pp. 3-20. *In* J.K. Syers, F.W.T. Penning de Vries and P. Nyamudezama, eds. **The Sustainable Management of Vertisols.** 1<sup>st</sup> ed. Biddle Ltd, Guildford and King's Lynn, UK.
- Deng, Y., L.B. Anna, B. Ferenc and J.B. Dixon. 2010. Bonding mechanisms between alfatoxin B1 and smectite. **Appl. Clay Sci.** 50: 92-98.
- Dudek, T., J. Cuadros and J. Huertas. 2007. Structure of mixed-layer kaolinite-to-smectite and smectite -to -kaolinite transformation mechanism from synthesis. **Am. Mineral.** 92: 179-192.

- Egirani, D.E., A.R. Baker and J.E. Andrews . 2005. Copper and zinc removal from aqueous solution by mixed mineral systems II. The role of solution composition and aging. **Colloid Interface Sci.** 291: 326-333.
- Eren, E. 2008. Removal of copper ions by modified Unye clay, Turkey. **J. Hazard. Mater.** 159: 235-244.
- Eren, E. and B. Afsin. 2008. An investigation of Cu(II) adsorption by raw and acid-activated bentonite: a combined potentiometric, thermodynamic, XRD, IR, DTA study. **J. Hazard. Mater.** 151: 682-691.
- Fesharaki, O., E. Garcia-Romero, J. Cuevas-Gonzalez and N. Lopez-Martinez. 2007. Clay mineral genesis and chemical evolution in Miocene sediments of Somosaguas, Madrid Basin, Spain. **Clay Miner.** 42: 187-201.
- Furquim, S.A.C., R.C. Graham, L. Barbiero, J.P.d. Queiroz and V. Valles. 2008. Mineralogy and genesis of smectites in an alkaline-saline environment of pantanal wetland, Brazil. **Clays Clay Miner.** 56: 579-595.
- Ganor, J., J. Cama and V. Metz. 2003. Surface protonation data of kaolinite-reevaluation based on dissolution experiments. **J. Colloid Interface Sci.** 264: 67-75.
- Guggenheim, S., J.M. Adams, D.C. Bain, F. Berogaya, M.F. Brigatti, V.A. Drits, M.L.L. Fermoso, E Galan, T. Kogure and H. Stanjerk. 2006. Summary of recommendations of nomenclature committees relevant to clay mineralogy: report of the Association Internationale pour l'Etude des Largiles (AIPEA) Nomenclature Committee for 2006. **Clay Miner.** 4: 863-877.
- Halajnia, A., G.H. Haghnia, A. Fotovat and R. Khorasani. 2009. Phosphorus fractions in calcareous soil amended with P fertilizer and cattle manure. **Geoderma** 150: 209-213.

- Hee Kang, D., H. Seunghun, K. Jeong-Gyu and K. Suijung. 2011. Adsorptive removal of aqueous fluoride and ferro-cyanide by liner minerals from SPL landfill leachate: effect of pH and adsorptive competition. **Desalination** 267: 82-87.
- Heidari, A. and S. Mahmoodi. 2006. Mineralogical characteristics and some physical indices of non-smectites Vertisols from Iran. **Geophys. Res. Abs.** 8: 02-12.
- Hong, H., G.J. Churchman, Y. Gu, K. Yin and C. Wang. 2012. Kaolinite–smectite mixed-layer clays in Jiujiang red soils and their climate significance. **Geoderma** 173-174: 75-85.
- Irmak, S., A.K. Surucu and I.H. Aydogdu. 2007. Effects of different parent material on the mineral characteristics of soil in the arid region of Turkey. **Pakistan J. Biol. Sci.** 10(4): 528-536.
- Islem C., E. Fakhfakh, S. Chakroun, J. Bouzid, N. Boujelben, M. feki, F. Rocha and F. jamoussi. 2007. Lead removal from aqueous solution by Tunisian smectitic clay. **J. Hazard. Mater.** 156: 545-551.
- Izumi, Y., K. Urade and M. Onaka. 1992. **Zeolite, Clay and Heteropoly Acid in Organic Reaction**, VHC Press, New York.
- Jackson, M.L. 1965. **Soil Chemistry Analysis. Advanced Courses.** Dept. of Soils, University of Wisconsin, Madison, Wisconsin.
- Jalali, M. and M. Zarabi. 2006. Kinetics of nonexchangeable-potassium release and plant response in some calcareous soils. **J. Plant Nutr. Soil Sci.** 169: 194-204.
- Jalali, M. 2008. Effect of sodium and magnesium on kinetics of potassium release in some calcareous soil of western Iran. **Geoderma** 145: 207-215.
- Jung, J., Y.H. Cho and P. Hahn. 1998. Comparative study of Cu(II) adsorption on goetite, hematite and kaolinite: mechanistic modeling approach. **Bull. Korean Chem. Soc.** 19: 324-327.

Kabata-Pendias, A. 2010. **Trace Elements in Soils and Plants**. CRC Press, New York.

Kalkan, E. and S. Akbulut. 2004. The positive effects of silica fume on the permeability, swelling, pressure and compressive strength of natural clay liners. **Eng. Geol.** 73: 15-156.

Khaorapapong, N. 2006. Li(I), Cu(II), Zn(II) and Mn(II) adsorption by montmorillonite. **KKU Res. J.** 11: 303-310.

Khresat, S.A. 2007. A mineral and morphological characterization of shrink-swell soil of the northern plain of Jordan. **American-Eurasian J. Agric. & Environ. Sci.** 2: 417-422.

Kilmer, V.J. and L.T. Alexander. 1949. Method of making mechanical analysis of soils. **Soil Sci.** 68: 15-24.

Kipton, H., J. Powell and R.M. Town. 1992. Solubility and fractionation of humic acid: effect of pH and ionic medium. **Anal. Chim. Acta** 267: 47-54.

Kadirvelu, K., K. Thamaraiselvi and C. Namasivayam. 2001. Adsorption of nickel(II) from aqueous solution onto activated carbon prepared from coirpith. **Sep. Purif. Technol.** 24: 497-505.

Kosmulski, M. 1999. How to handle the ion adsorption data with variable solid-to-liquid ratios by means of FITEQL. **Colloids Surf.** 149: 397-408.

Kumar, U. 2006. Agricultural products and by-products as a low cost adsorbent for heavy metal removal from water and wastewater. A Review. **Sci. Res. Essay** 1: 33-37.

Li, Z.P., M. Liu, X.C. Wu, F.X. Han and T.L. Zhang. 2010. Effects of long-term chemical fertilization and organic amendments on dynamics of soil organic C and total N in paddy soil derived from barren land in subtropical China. **Soil and Tillage Res.** 106: 268-274.

- Lin, Z. 1996. Secondary mineral phase of metallic lead in soils of shooting ranges from Rebro Country, Sweden. **Environ. Geol.** 27: 370-375.
- Macht, F., E. Karin, J.P. Pronk and K.U. Totsche. 2011. Specific surface area of clay minerals: comparison between atomic force microscopy measurements and bulk-gas ( $N_2$ ) and liquid (EGME) adsorption methods. **Appl. Clay Sci.** 53: 20-26.
- Meena, S., P. Senthilvalavan, M. Malarkodi and R.K. Kaleeswari. 2007. Residual effect of phosphorus from organic manures in sunflower-assessment using radio tracer technique. **Res. J. Agric. & Biol. Sci.** 3: 377-379.
- Mengel, K. and K. Uhlenbecker. 1993. Determination of available interlayer potassium and its uptake by ryegrass. **Soil Sci. Soc. Am. J.** 57: 561-566.
- Mengesha, Y.G.S. 2004. **Modeling of Nitrogen and Phosphorus Fertilizer Recommendation for Maize (*Zea May L.*) Grown on Alfisols of Northwestern Ethiopia.** Ph.D. Dissertation, Kasetsart University.
- Mantovi, P., G. Bonazzi and N. Marmiroli. 2003. Accumulation of copper and zinc from liquid manure in agricultural soils and crop plants. **Plant and Soil** 250: 249-257.
- Murthy, A.S.P., S.K.N. Nath and D.P. Viswanath. 1987. **Mineralogy and Chemistry of Potassium in Vertisols of India.** Potash Review No. 6/1987, International Potash Institute, Switzerland.
- Naidu, R., M.E. Sunner and R.D. Harter. 1998. Sorption of heavy metals in strongly weathered soils: An overview. **J. Environ Geochem. Health** 20: 5-9.
- Nater, E. 2000. **Soil Chemistry and Mineralogy.** Department of Soil, Water and Climate, Minnesota University.

- National Soil Survey Center. 1996. **Soil Survey Laboratory Methods Manual**. Soil Survey Investigation Report No. 42, Version 3.0. Natural Conservation Service, United States Department of Agriculture.
- Nayak, K., A.R. Chinchmalatpure, G.G. Rao and A.K. Vema. 2006. Swell-shrink potential of Vertisols in relation to clay content and exchangeable sodium under different ionic environment. **J. Indian Soc. Soil Sci.** 54 (1): 332-340
- Nicolau, R., A. Galera-Cunha and Y. Lucas. 2006. Transfer of nutrients and labile metals from the continent to sea by a small Mediterranean river. **Chemosphere** 63: 469-476.
- Nriagu, J.U. 1990. Global metal pollution poisoning the biosphere. **Environment** 32: 7-33.
- Nursyamsi, D., K. Idris, S. Sabiham, D.A. Rachim and A. Sofyan. 2008. Dominant soil characteristics influencing available potassium on smectite soils. **Indonesian J. Agric.** 1: 121-131.
- Olivera, E.A., S.F. Mantanher, A.D. Andrade, J.A. Nobrega and M.C. Rollemberg. 2005. Equilibrium studies for the sorption of chromium and nickel from aqueous solutions using raw rice bran. **Process. Biochem.** 40: 3653-3659.
- Olson, C.G., M.L. Thompson and M.A. Wilson. 2000. Phyllosilicates, pp. 77-123. *In* M.E. Sumner, ed. **Handbook of Soil Science Mineralogy**. CRC Press LLC, Boca Raton, New York, Washington DC.
- Oskarsson, A., W. Anna, O. Ing-Marie and G. Kierstin. 2004. Cadmium in food chain and health effects in sensitive population groups. **Biometals** 17: 531-534.
- Özsoy, G. and E. Aksoy. 2007. Characterization, classification and agricultural usage of Vertisols developed on neogen aged calcareous marl parent materials. **J. Biol. Environ. Sci.** 1: 5-10.

- Panichapong, S. 1982. Distribution, characteristics and utilization of problem soil in Thailand. *In Tropical Agriculture Research Series No. 15*. Tropical Agricultural Research Center, Japan.
- Pal, D.K., T. üattacharyya, P. Chandran, S.K. Ray, P.L.A. Satyavathi, S.L. Durge, P. Raja and U.K. Maurya. 2009. Vertisols (cracking clay soils) in a climosequence of Peninsular India: Evidence for Holocene climate changes. **Quatern. Int.** 1-16.
- Pardini, G. and M. Gispert. 2006. Impact of land abandonment on water erosion in soil of the Eastern Iberian Peninsula. **Agrochimica** 50: 13-24.
- Peech, M. 1945. Determinations of exchangeable cations and exchange capacity of soils rapid micromethods utilizing centrifuge and spectrophotometer. **Soil Sci.** 59: 25-28.
- Polyak, V.J. and N. Guven. 2000. Authigenesis of trioctahedral smectites in magnesium-rich carbonate speleothems in Carlsbad cavern and other caves of the Guadalupe mountains, New Mexico. **Clays Clay Miner.** 48: 317-321.
- Ponizovsky, A.A., H.E. Allen and A.J. Ackerman. 2007. Copper activity in soil solution of calcareous soils. **Environmental Pollution** 145: 1-6.
- Puls, R.W., R.M. Powell, D. Clark and C.J. Eldrid. 1991. Effects of pH, solid/solution ratio, ionic strength and organic acid on Pb and Cd sorption on kaolinite. **Water Air Soil Pollut.** 57:423-430.
- Railsback. 2011. **Hydrated Cation Radiious**. Available Source:  
<http://www.gly.uga.edu/railsback/Fundamentals/815HydratedCationRadii04P.pdf>,  
 December 21, 2011.
- Rao, C.R.M., A. Sahuquillo and J.F. Lopez Sanchez. 2008. A review of the different methods applied in environmental geochemistry for single and sequential extraction of trace elements in soil and related materials. **Water Air Soil Pollut.** 189:291-333.

- Reid, D.A. and A.L. Ulery. 2002. Smectites, pp. 467-499. In J.B. Dixon and D.G. Schulze, eds. **Soil Mineralogy with Environmental Application**. Soil Sci. Soc. America, Madison, Wisconsin, USA.
- Richards, L.A. 1954. **Diagnosis and Improvement of Saline and Alkaline Soils**. U.S. Salinity Laboratory, U.S. Dept. Agr. Hbk.
- Riebe, B., D. Stefen and B. Claus. 2004. Temperature effects on iodine adsorption on organo-clay minerals I. influence of pretreatment and adsorption temperature. **Appl. Clay Sci.** 28: 9-16.
- Schafer, W.M. and M.J Singer. 1976. A new method of measuring shrink-swell potential using soil pastes. **Soil Sci. Soc. Am. J.** 40: 805-806.
- Seiksepour, M., M. Rashidi and B.G. Khabbaz. 2008. Prediction of soil available phosphorus based on soil organic carbon. **Am. Euras. J. Agric. & Environ. Sci.** 4(2): 189-193.
- Shu, Q.Z. and G.H. Wan. 2008. Adsorption behavior of Pb(II) on montmorillonite. **Colloid Surf., A** 320: 92-97.
- Soil Survey Division Staff. 1993. **Soil Survey Manual**. Handbook No. 18. United States Dept. of Agr., United States Government Printing Office, Washington DC.
- Soil Survey Staff. 1999. **Soil Taxonomy: A Basic System of Soil Classification for Making and Interpreting Soil Survey**. 2<sup>nd</sup> ed. USDA-NRCS, U.S. Government Printing Office, Washington DC.
- Soil Survey Staff. 2006. **Keys to Soil Taxonomy**. 10<sup>th</sup> ed. Natural Resources Conservation Service, United States Department of Agriculture, Washington DC.
- Sparks, D.L. 1987. Potassium dynamics in soil. **Adv. Soil Sci.** 6: 1-63.

- Sparks, D.L. 2007. **Environmental Soil Chemistry**. Academic Press, New York.
- Sposito, G. 2008. **The Chemistry of Soils**. Oxford Press, USA.
- Srivastava, P., B. Singh and M. Angrove. 2005. Competitive adsorption behavior of heavy metals on kaolinite. **J. Colloid Interf. Sci.** 290: 28-38.
- Tamura, K., H. Yamada and H. Nakazawa. 2000. Stepwise hydration of high-quality synthetic smectite with various cations. **Clays Clay Miner.** 48: 400-404.
- Thomas, G.W. 1982a. Exchange acidity, pp. 161-164. In A.L. Page, ed. **Methods of Soil Analysis. Part II**. 2<sup>nd</sup> ed. Agronomy No. 9. Amer. Soc. of Agron., Inc. Madison, Wisconsin.
- \_\_\_\_\_. 1982b. Exchange and soluble potassium, pp. 228-238. In A.L. Page, ed. **Methods of Soil Analysis. Part II**. 2<sup>nd</sup> ed. Agronomy No. 9. Amer. Soc. of Agron., Inc. Madison, Wisconsin.
- Thomas, P.J. 1998. **Quantifying Properties and Variability of Expansive Soils in Selected Map Units**. Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, Virginia.
- Thomas, P.J., J.C. Baker and L.W. Zelazny. 2000. An expansive soil index for predicting shrink-swell potential. **Soil Sci. Soc. Am. J.** 64: 268-274.
- Urriaga, A.M., M.J. Abellan, J.A. Irabien and I. Qrtiz. 2005. Membrane contactors for the recovery of metallic compounds pollutants: modeling of copper recovery from WPO process. **J. Membr. Sci.** 257(1-2): 161-170.
- Vejsada, J., D. Haradi, Z. Randa, E. Jelinek and K. Stulik. 2005. Adsorption of cesium on Czech smectite-rich clays: A comparative study. **Appl. Clay Sci.** 30:53-66.

USDI. 2011. **Oil and Gas Statistics**. Available Source:

[http://www.blm.gov/wo/st/en/prog/energy/oil\\_and\\_gas/statistics.html](http://www.blm.gov/wo/st/en/prog/energy/oil_and_gas/statistics.html),  
December 21, 2011.

Veli, S. and B. Alyulz. 2007. Adsorption of copper and zinc from aqueous solutions by using natural clay. **J. Hazard. Mater.** 149:226-233.

Vingiani, S., D. Righi, S. Petit and F. Terribile. 2004. Mixed-layer kaolinite-smectite minerals in a red-black soil sequence from basalt in Sardinia, Italy. **Clays Clay Miner.** 52(4): 473-483.

Vijarnsorn, P. 1982. **The Vertisols of Thailand**. Soil Survey Division, Land Development Department, Bangkok.

Virgo, K.J. and D.A. Holmes. 1977. Soils and landform features of mountainous terrain in South Thailand. **Geoderma** 18: 207-225.

Voegelin, A. and R. Kretzchmar. 2003. Modeling sorption and mobility of cadmium and zinc in soil with scaled exchange coefficients. **Eur. J. Soil Sci.** 54: 387-400.

Voegelin, A., G. Tokpa, O. Jacquat, K. Barmettier and R. Kretzmar. 2008. Zinc fractionation in contaminated soil by sequential and single extraction influence of soil properties and zinc content. **J. Environ. Qual.** 37: 190-200.

Walkley, A. and C.A. Black. 1934. An examination of Degtjareff method for determining soil organic matter and a proposed modification of the chroma acid titration method. **Soil Sci.** 37: 29-35.

Wang, Y.P., J.Y. Shi, H. Wang, Q. Lin, X.C. Chen and Y.X. Chen. 2007. The influence of soil heavy metals pollution on soil microbial biomass, enzyme activity and community composition near a copper smelter. **Ecotoxic Environ. Safety** 67: 75-81.

- Whittig, L.D. and W.R. Allardice. 1986. X-ray diffraction technique, pp. 671-698. *In* A. Klute., ed. **Methods of Soil Analysis, Part I Physical and Mineralogical Methods**. 2<sup>nd</sup> ed. Agronomy No. 9. Amer. Soc. Agron. Inc., Madison, Wisconsin.
- WHO. 2000. **Air Quality Guidelines**. 2<sup>nd</sup> ed. World Health Organization (WHO), Regional Office for Europe, Geneva.
- Wilson, M.J. 1999. The origin and formation of clay minerals in soil: past, present and future perspectives. **Clay Miner.** 34: 7-25.
- Yong, R.N. and Y. Phadungchewit. 1993. pH influence on selectivity and retention of heavy metals in some clay soils. **Can. Geotech J.** 30:821-833.
- Youn, H. and F. Tonon. 2010. Effect of air-drying duration on the engineering properties of four clay-bearing rocks in Texas. **Eng. Geol.** 115: 58-67.
- Zhang S.Q. and W.G. Hou. 2008. Adsorption behavior of Pb(II) on montmorillonite. **Colloids and Surfaces** 320: 92-97.
- Zhuan-xi, L., Z. Bo, T. Jia-liang and W. Tao. 2009. Phosphorus retention capacity of agricultural headwater ditch sediments under alkaline condition in purple soils area, China. **Ecol. Eng.** 35: 57-64.
- Zubillag, M.S. and R.S. Lavado. 2002. Heavy metal content in lettuce plant grown in biosolids compost. **Compost Science and Utilization** 10: 363-367.



ภาคผนวก



คำอธิบายหน้าตัดดิน (Soil profile description)

**Buri Ram (Br)****I. Information on the site**

Profile symbol	: Br
Soil name	: Buri Ram variant
Classification	: Typic Haplustert, very fine, smectitic, isohyperthermic
Date of examination	: 9 November 2007
Described by	: Irb Kheoruenromne, Chutamart Kaewmano, Natthapol Chittamart, Worachart Wisawapipat, Timthong Darunsonthaya and Kokkorn Hemtanon.
Location	: Ban Chai Badan Yuk Mai , Tumbon Chai Badan, Amphoe Chai Badan, Lop Buri Province.
Elevation	: Approximately 40 m(MSL)
Map sheet number	: 5256III Coordination 47P 0723218 <sup>E</sup> , 1669816 <sup>N</sup>
Landform	
1. Physiographic position	: Dissected lower footslope
2. Surrounding land form	: Gently undulating
3. Slope on which profile site	: 1.5% Aspect: 336 Azimuth
Land use	: Sugarcane, chilli, teak, tamarind, mango and other house green tree crops, and agriculture and settlement
Annual rainfall	: Approximately 1,207
Mean temperature	: Approximately 28 °C
Climate	: Tropical savanna

**II. General information on the soil**

Parent material	: Local alluvial derived from Limestone
Drainage	: Moderately well drained
Permeability	: Slow
Runoff	: Slow
Depth of groundwater	: >180 cm at time of sampling

**III. Profile description**

<b>Horizon</b>	<b>Depth (cm)</b>	<b>Description</b>
Ap	0-20	Black (10YR 2/1); clay; strong medium and coarse angular blocky structure; very hard dry, very firm moist, very sticky and very plastic; common surface cracks and fine pressure faces; few very fine and fine vesicular and few fine simple tubular pores; common very fine and fine roots; common fine cracks and few traces of dead roots; moderately alkaline (field pH 8.0); clear and smooth boundary to BA.
BA	20-40	Mixed very dark gray (10YR 3/1) 89% and black (10YR 2/1) 10%, few fine distinct yellowish brown (10YR 5/8) mottles; clay; strong medium and coarse angular blocky structure; very hard dry, very firm moist, very sticky and very plastic; common pressure faces of various sizes; few very fine and fine vesicular and few fine simple tubular pores; few very fine and fine roots; common vertical krotovinas, some crossing horizon boundary, common fine cracks and traces of dead roots; slightly acid (field pH 6.5); clear and smooth boundary to Bss1.
Bss1	40-60	Very dark gray (10YR 3/1); few fine distinct dark brown (10YR 3/3) mottles; clay; strong fine and medium semi-angular blocky structure; very hard dry, very firm moist, very sticky and very plastic; many pressure faces and cracks of various sizes and common fine and medium slickensides; few very fine and fine vesicular and few fine simple tubular pores; very few very fine and fine roots; few vertical krotovinas and few traces of dead roots; moderately acid (field pH 6.0); clear and smooth boundary to Bss2.
Bss2	60-90	Black (10YR 2/1); clay; strong fine and medium angular

blocky structure; very hard dry, very firm moist, very sticky and very plastic; many pressure faces, cracks and slickensides of various sizes; few very fine and fine vesicular and very few fine simple tubular pores; very few very fine and fine roots; few traces of dead roots; moderately alkaline (field pH 8.0); clear and smooth boundary to Bk1.

Bk1	90-110	Very dark gray (10YR 3/1); clay; moderate fine and medium semi-angular blocky structure; very hard dry, very firm moist, very sticky and very plastic; common pressure faces and few fine rock and lime fragments; common very fine and fine vesicular and few very fine simple tubular pores; very few very fine and fine roots; very few traces of dead roots; strongly alkaline (field pH 8.5); abrupt and smooth boundary to Bk2.
Bk2	110-140	Dark gray (10YR 4/1); slightly gravelly clay loam; moderate fine and medium subangular blocky structure; hard dry, firm moist, moderately sticky and moderately plastic; few fine cracks and pressure faces, common rock and lime fragments and nodules; common very fine and fine vesicular pores; practically no roots; common hardened lime nodules; strongly alkaline (field pH 8.5); gradual and smooth boundary to Bk3.
Bk3	140-170+	Dark gray (10YR 4/1); slightly gravelly clay loam; moderate fine and medium subangular blocky structure; hard dry, firm moist, moderately sticky and moderately plastic; few fine cracks and pressure faces, common rock and lime fragments and lime nodules; common very fine and fine vesicular pores; practically no roots; fewer hardened lime nodules; strongly alkaline (field pH 8.5).

## Lop Buri (Lb)

### I. Information on the site

Profile symbol	: Lb
Soil name	: Lop Buri series
Classification	: Typic Haplustert, very fine, smectitic, isohyperthermic
Date of examination	: May 3, 2007
Described by	: Irb Kheoruenromne, Chutharmard Kaewmano, Natthapol Chittamart, Worachart Wisawapipat, and Timtong Darunsontaya
Location	: Ban Wung Khon Kwang, Tambon Wung Khon Kwang, Amphoe Khok Samrong, Lop Buri province
Elevation	: Approximately 35 m (MSL)
Map sheet number	: 5139 III Coordination : 47 P 0681855 <sup>E</sup> , 1660992 <sup>N</sup>
Landform	
1. Physiographic position	: Lower footslope
2. Surrounding land form	: Undulating
3. Slope on which profile site	: 2%                      Aspect : 318 Azimuth
Land use	: Sesame and sorghum
Annual rainfall	: Approximately 1,207 mm
Mean temperature	: Approximately 28 °C
Climate	: Tropical savanna
Other	: Livestock pasture

### II. General information on the soil

Parent material	: Local alluvium derived from limestone
Drainage	: Well drained
Permeability	: Slow
Runoff	: Slow
Depth of groundwater	: Deeper than 200 cm at time of sampling

### III. Profile description

Horizon	Depth (cm)	Description
Apk	0-25	Black (10YR 2/1); clay; strong fine and medium subangular blocky structure; very hard dry, very firm moist, very sticky and very plastic; common fine cracks and traces of dead roots; very few very fine and fine vesicular pores; common very fine and fine roots; few fine lime fragments; moderately alkaline (field pH 8.0); clear and smooth boundary to Bk1.
Bk1	25-45	Black (10YR 2/1); clay; strong medium and coarse angular blocky structure; very hard dry, very firm moist, very sticky and very plastic; common fine cracks and few faint slickensides and pressure faces; very few very fine and fine vesicular pores and very few fine simple tubular pores; few very fine and fine roots; common fine lime fragments and traces of dead roots; moderately alkaline (field pH 8.0); gradual and smooth boundary to Bssk1.
Bssk1	45-70	Very dark gray (10YR 3/1), very pale brown (10YR 8/2) lime fragment; clay; strong medium and coarse angular blocky structure; very hard dry, very firm moist, very sticky and very plastic; common fine cracks and faint pressure faces and slickensides; very few very fine, fine and medium vesicular pores and fine simple tubular pores; few very fine and fine roots; few fine lime fragments and traces of dead roots; strongly alkaline (field pH 8.5); gradual and smooth boundary to Bssk2.
Bssk2	70-93	Very dark gray (10YR 3/1), very pale brown (10YR 8/2) lime fragment; clay; strong medium and coarse angular blocky structure; very hard dry, very firm moist, very sticky and very plastic; common fine cracks, many

faint pressure faces and distinct slickensides; very few very fine, fine and medium vesicular pores and fine simple tubular pores; very few very fine and fine roots; common fine lime fragments and very few traces of dead roots; strongly alkaline (field pH 8.5); gradual and smooth boundary to Bssk3.

Bssk3	93-115	Very dark gray (10YR 3/1), very pale brown (10YR 8/2) lime fragment; clay; strong medium and coarse angular blocky structure; very hard dry, very firm moist, very sticky and very plastic; common fine cracks, faint and many faint slickensides; very few very fine, fine and medium vesicular pores and fine simple tubular pores; very few very fine and fine roots; strongly alkaline (field pH 8.5); gradual and smooth boundary to Bssg4.
Bssk4	115-140	Very dark gray (10YR 3/1), very pale brown (10YR 8/2) lime fragment; clay; strong medium and coarse semi-angular blocky structure; very hard dry, very firm moist, very sticky and very plastic; common fine cracks, faint and many faint slickensides; very few very fine and fine vesicular pores and few fine simple tubular pores; very few very fine and fine roots; common fine lime fragments; strongly alkaline (field pH 8.5); clear and smooth boundary to Bk2.
Bk2	140-170	Very dark gray (10YR 3/1), very pale brown (10YR 8/2) lime fragment; clay; strong medium and coarse semi-angular blocky structure; hard dry, firm moist, moderately sticky and very plastic; common fine faint pressure faces and few fine cracks; few very fine and fine vesicular pores and fine simple tubular pores; practically no roots; common soft lime accumulation and lime fragments; strongly alkaline (field pH 8.5); clear and smooth boundary to Bk3.
Bk3	170-200+	Dark gray (10YR 4/1), very pale brown (10YR 8/2) lime fragment; slightly gravelly clay; moderate medium and coarse semi-angular blocky structure; hard dry, firm moist, moderately sticky and very plastic; few fine faint pressure faces and few fine cracks; common very fine and fine vesicular pores; practically no roots; many soft lime accumulations and fine lime fragments; strongly alkaline (field pH 8.5).

### Chai Badan 1 (Cd1)

#### I. Information on the site

Profile symbol	: Cd1
Soil name	: Chai Badan variant 1
Classification	: Calcic Haplustert, very fine, smectitic isohyperthermic
Date of examination	: November 9, 2007
Described by	: Irb Kheoruenromne, Chutharmard Kaewmano, Natthapol Chittamart, Worachart Wisawapipat, Tintong Darunsontaya and Kokkorn Hemtanon
Location	: Ban Thanon Kong, Tambon Chai Badan, Amphoe Chai Badan, Lop Buri province
Elevation	: Approximately 52 m (MSL)
Map sheet number	: 5239 III Coordination : 47 0721140 <sup>E</sup> , 1668275 <sup>N</sup>
Landform	
1. Physiographic position	: Dissected upper footslope
2. Surrounding land form	: Undulating
3. Slope on which profile site	: 2%                      Aspect : 330 Azimuth
Land use	: Mung bean, cassava and sugarcane
Annual rainfall	: Approximately 1,207 mm
Mean temperature	: Approximately 28 °C
Climate	: Tropical savanna
Other	: Agricultural-Poultry farm and settlement

#### II. General information on the soil

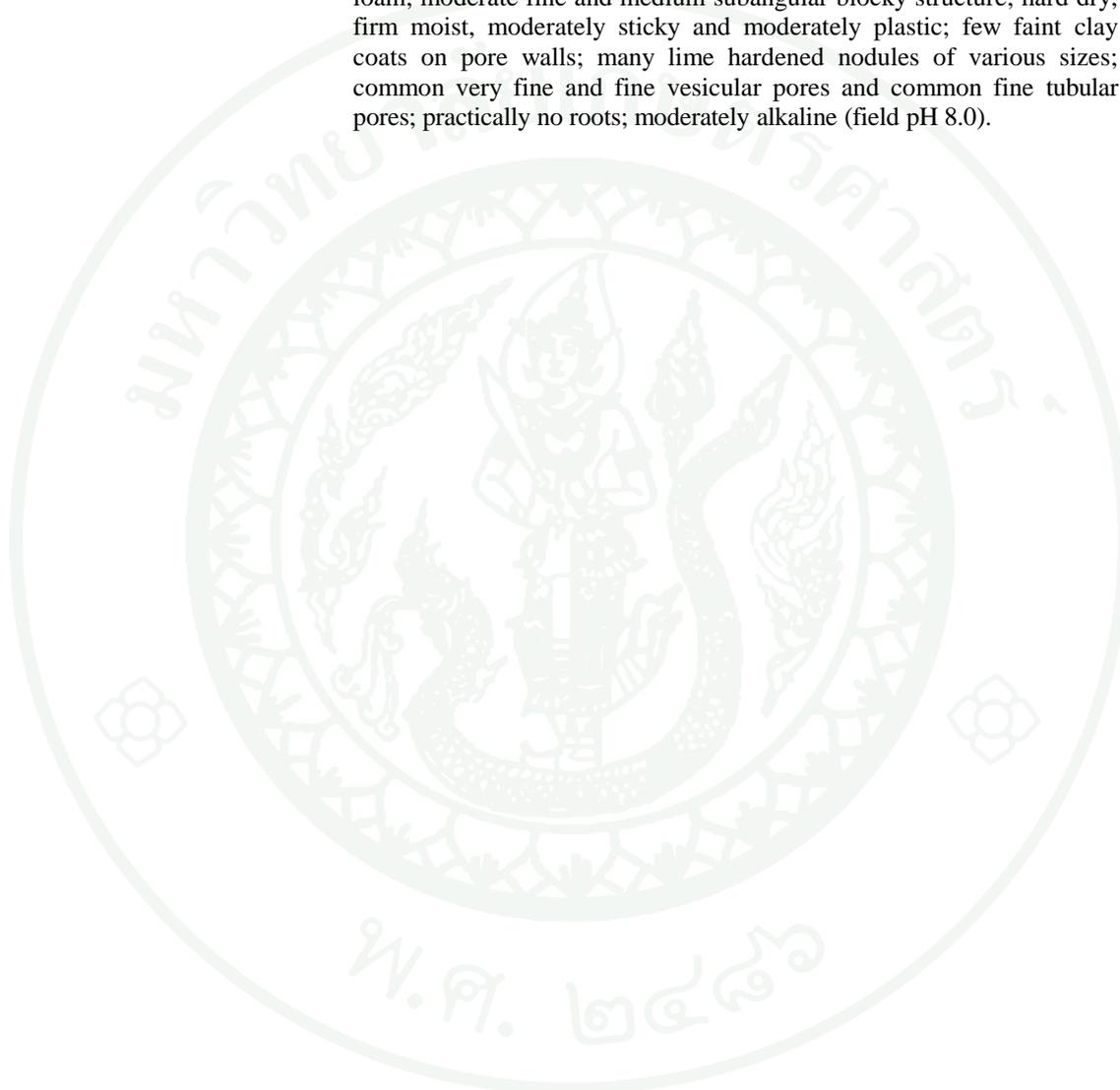
Parent material	: Local alluvium derived from lime producing rocks
Drainage	: Well drained
Permeability	: Moderate
Runoff	: Moderate
Depth of groundwater	: Deeper than 160 cm at time of sampling

#### III. Profile description

Horizon	Depth (cm)	Description
Apk	0-20	Very dark gray (7.5YR 3/1); clay; strong medium and coarse semi-angular blocky structure; very hard dry, very firm moist, very sticky and very plastic; few fine rocks and lime fragments; common very fine and fine vesicular pores and few fine simple tubular pores; few very fine, few fine and few medium roots; few traces of dead roots; moderately alkaline (field pH 8.0); clear and smooth boundary to ABk.
ABk	20-47	Very dark gray (10YR 3/1); clay; strong medium and coarse semi-angular blocky structure; very hard dry, very firm moist, very sticky and very plastic; few fine pressure faces; common very fine and fine vesicular pores and few fine and medium simple tubular pores; few very fine and fine roots; few traces of dead roots and few fine cracks; moderately alkaline (field pH 8.0); clear and smooth boundary to Bss1.
Bss1	47-80	Very dark gray (10YR 3/1); clay; moderate medium and coarse angular blocky structure; very hard dry, very firm moist, very sticky and very plastic; common spots of lime soft nodules, common fine pressure faces and common slickensides of various sizes; few very fine and common fine vesicular pores and few fine simple tubular pores; very few very fine and fine roots; common fine cracks; moderately alkaline (field pH 8.0); clear and smooth boundary to Bss2.
Bss2	80-110	Black (10YR 2/1); clay; moderate medium and coarse angular blocky structure; very hard dry, very firm moist, very sticky and very plastic; many pressure faces and slickensides and common cracks; very few very fine and few fine vesicular pores and simple tubular pores; very few very fine and fine roots; fewer spots of lime soft nodules;

moderately alkaline (field pH 8.0); clear and smooth boundary to Bk1.

- |     |             |  |
|-----|-------------|--|
| Bk1 | 110-130/140 | Black (10YR 2/1); clay; moderate fine and medium semi-angular blocky structure; hard dry, firm moist, moderately sticky and moderately plastic; many spots of lime soft nodules and few fine cracks; very few very fine and few fine vesicular pores and simple tubular pores; practically no root; few rock fragments; moderately alkaline (field pH 8.0); abrupt and smooth boundary to Bk2.                     |
| Bk2 | 140-160+    | Dark gray (10YR 4/1), white (10YR 8/1) of carbonate; gravelly clay loam; moderate fine and medium subangular blocky structure; hard dry, firm moist, moderately sticky and moderately plastic; few faint clay coats on pore walls; many lime hardened nodules of various sizes; common very fine and fine vesicular pores and common fine tubular pores; practically no roots; moderately alkaline (field pH 8.0). |



## Chai Badan 2 (Cd2)

### I. Information on the site

Profile symbol	: Cd2
Soil name	: Chai Badan variant 2
Classification	: Typic Haplustert, fine, smectitic, isohyperthermic
Date of examination	: November 11, 2007
Described by	: Irb Kheoruenromne, Chutharmard Keawmano, Natthapol Chittamart, Worachat Wisawapipat, Tintong Darunsontaya and Kokkorn Hemtanon
Location	: Mung bean and corn growing area, Ban Noi, Tambon Nong Phai, Amphoe Nong Phai, Petchabun province
Elevation	: Approximately 99 m(MSL)
Map sheet number	: 5241 III Coordination: 47Q 0722140 <sup>E</sup> , 1771808 <sup>N</sup>
Landform	
1. Physiographic position	: Lower middle slope on basalt corrosion plain
2. Surrounding land form	: Undulating
3. Slope on which profile site	: 1 %      Aspect: 270 Azimuth
Land use	: Mung bean and corn
Annual rainfall	: Approximately 1,207 mm
Mean temperature	: Approximately 28 °C
Climate	: Tropical savanna
Other	: Agricultural and settlements

### II. General information on the soil

Parent material	: Residuum derived from weathered basalt
Drainage	: Well drained
Permeability	: Moderate
Runoff	: Moderate
Depth of groundwater	: Deeper than 130 cm at time of sampling

### III. Profile description

Horizon	Depth (cm)	Description
Ap	0-15	Dark brown (7.5YR 3/2); clay; strong medium and coarse subangular blocky structure; very hard dry, very firm moist, very sticky and very plastic; few faint pressure faces and few fine weathered rock fragments; many very fine, fine and few medium vesicular pores and few fine simple tubular pores; common very fine and fine roots; common large vertical cracks through Ap down to some part of Bt and few traces of dead roots; moderately alkaline (field pH 8.0); clear and smooth boundary to Bt.
Bt	15-30/40	Dark brown (7.5YR 3/2); clay; moderate fine and medium angular blocky structure; very hard dry, very firm moist, very sticky and very plastic; few faint clay coats on pore walls and some ped faces; common faint pressure faces, fine cracks and few fine weathered rock fragments; few very fine and fine vesicular pores and few fine simple tubular pores; few very fine and fine roots and few coarse roots; few rock fragments and some clay balls; moderately alkaline (field pH 8.0); clear and wavy boundary to Btc.
Btc	40-40/70	Dark brown (7.5YR 3/2), common fine prominent strong brown (7.5YR 5/8) mottles; slightly gravelly clay; moderate fine and medium angular blocky structure; very hard dry, very firm moist, very sticky and very plastic; common faint clay coats on pore walls, ped faces and nodule surface; common faint pressure faces and fine Mn-oxide nodules; common very fine and fine vesicular pores and few fine tubular pores; very few very fine and fine roots and few coarse roots; common fine cracks, weathered rock

fragments and few fine clay balls; moderately alkaline (field pH 8.0); clear and wavy boundary to Crt1.

Crt1	70-100	<p>Grayish brown (10YR 5/2); common medium and coarse prominent strong brown (7.5YR 5/8), common medium and coarse distinct brownish yellow (10YR 6/8) mottles and black (10YR 2/1) of Mn nodules; gravelly sandy clay; moderate fine and medium semi-angular blocky structure; hard dry, firm moist, very sticky and very plastic; few faint clay coats on pore walls and mangan on weathered rock fragment surfaces; few faint pressure faces, many weathered rock fragments and manganiferous rocks; common very fine and few fine vesicular pores and few fine simple tubular pores; very few very fine roots and few fine and medium roots; few fine cracks; neutral (field pH 7.0); clear and smooth boundary to Crt2.</p>
Crt2	100-130+	<p>Dark grayish brown (10YR 4/2), common medium and coarse prominent strong brown (7.5YR 5/8), common medium distinct brownish yellow (10YR 6/8) mottles and black (10 YR 2/1) of Mn nodules; gravelly sandy clay; moderate fine and medium semi-angular blocky structure and some part retaining weathered rock structure; hard dry, firm moist, very sticky and very plastic; few faint clay coats on pore walls and mangan on weathered rock fragment surfaces; few faint pressure faces, many weathered rock fragments and manganiferous rocks; few very fine and fine vesicular pores, and few fine simple tubular pores; few fine cracks; neutral (field pH 7.0).</p>

### Samo Thod 1 (Sat1)

#### I. Information on the site

Profile symbol	: Sat1
Soil name	: Samo Thod variant 1
Classification	: Chromic Haplustert, fine, smectitic, isohyperthermic
Date of examination	: November 10, 2007
Described by	: Irb Kheoruenromne, Chutharmard Keawmano, Natthapol Chittamart, Worachat Wisawapipat, Tintong Darunsontaya and Kokkorn Hemtanon
Location	: Soil Sukhaphiban 24, Tambon Buengsamphan, Amphoe Buengsamphan, Petchabun province
Elevation	: Approximately 83 m (MSL)
Map sheet number	: 5240 IV Coordination: 47Q 0715371 <sup>E</sup> , 1745008 <sup>N</sup>
Landform	
1. Physiographic position	: Dissected upper footslope
2. Surrounding land form	: Undulating
3. Slope on which profile site	: 1%      Aspect: 125 Azimuth
Land use	: Mung bean, Bamboo spp., coconut, local trees, chilli
Annual rainfall	: Approximately 1,207 mm
Mean temperature	: Approximately 28 °C
Climate	: Tropical savanna
Other	: Agricultural and settlement

#### II. General information on the soil

Parent material	: Local alluvium on residuum both derived from weathered andesite mixed with limestone
Drainag	: Well drained
Permeability	: Moderate
Runoff	: Moderate
Depth of groundwater	: Deeper than 140 cm at time of sampling

#### III. Profile description

Horizon	Depth (cm)	Description
Apk	0-20	Brown (10YR 4/3); clay; moderate medium and coarse angular blocky structure; hard dry, firm moist, moderately sticky and moderately plastic; few faint pressure faces and few fine rock fragments and manganese nodules; common very fine and fine vesicular pores and few fine simple tubular pores; few very fine and fine roots; some spots of divided lime fragments, few fine cracks and few traces of dead roots; moderately alkaline (field pH 8.0); clear and smooth boundary to Bt1.
Bt1	20-45	Brown (10YR 4/3); clay; moderate fine and medium semi-angular blocky structure; hard dry, firm moist, moderately sticky and moderately plastic; few faint clay coats on pore walls; common fine pressure faces and few rock fragments; few very fine and fine vesicular pores and few fine simple tubular pores; few very fine and fine roots; few fine cracks and few traces of dead roots; moderately alkaline (field pH 8.0); gradual and smooth boundary to Bt2.
Bt2	45-70	Mixed dark grayish brown (10YR 4/2) 86%, dark gray (10YR 4/1) 10%, few fine distinct yellowish brown (10YR 5/6) and few fine distinct dark yellowish brown (10YR 4/6) mottles; clay; strong fine and medium angular blocky structure; very hard dry, very firm moist, very sticky and very plastic; few faint clay coats on pore walls; common faint pressure faces and common fine rock fragments and manganese nodules; few very fine and

common fine vesicular pores and few fine simple tubular pores; few very fine and fine roots; common white spots of weathered rock fragments, few fine cracks and very few traces of dead roots; moderately alkaline (field pH 8.0); clear and smooth boundary to Bt3.

Bt3	70-90	Mixed dark gray (10YR 4/1) 60%, dark grayish brown (10YR 4/2) 33%; common fine distinct dark yellowish brown (10YR 4/4) and few medium distinct dark yellowish brown (10YR 4/4) mottles; clay; strong fine and medium angular blocky structure; very hard dry, very firm moist, very sticky and very plastic; few faint clay coats on pore walls; common faint pressure faces and few small slickensides; very few very fine and few fine vesicular pores and few fine simple tubular pores; few very fine and fine roots; few white spots of weathered rock fragment, few fine cracks and few traces of dead roots ; moderately alkaline (field pH 8.0); gradual and smooth boundary to Bt4.
Bt4	90-110/115	Mixed grayish brown (10YR 5/2) 75%, gray (10YR 5/1) 20%, common fine distinct yellowish brown (10YR 5/6) mottles; clay; moderate fine and medium angular blocky structure; very hard dry, very firm moist, very sticky and very plastic; few faint clay coats on pore walls; common faint pressure faces and few small slickensides; very few very fine and fine vesicular pores and very few fine simple tubular pores; very few very fine and fine roots; common fine cracks and few fine rock fragments; moderately alkaline (field pH 8.0); abrupt and wavy boundary to Crt.
Crt	115-140+	Gray (10YR 5/1), common medium and coarse distinct yellowish brown (10YR 5/6), common medium and coarse prominent light reddish brown (2.5YR 7/4) and few fine distinct black (10YR 2/1) mottles; slightly gravelly clay; moderate fine and medium semi-angular blocky structure; hard dry, firm moist, moderately sticky and moderately plastic; few faint clay coats on pore walls; common faint pressure faces and many white spots of weathered rock fragments; few very fine and fine vesicular pores; practically no roots; few fine rock fragments and cracks; moderately alkaline (field pH 8.0).

## Samo Thod 2 (Sat2)

### **I. Information on the site**

Profile symbol	: Sat2
Soil name	: Samo Thod
Classification	: Chromic Haplustert, very fine, smectitic, isohyperthermic
Date of examination	: November 10, 2007
Described by	: Irb Kheoruenromne, Chutharmard Keawmano, Natthapol Chittamart, Worachat Wisawapipat, Tingtong Darunsontaya and Kokkorn Hemtanon
Location	: Old corn field, Tambon Sap Samo Thod, Amphoe Buengsamphan, Petchabun province
Elevation	: Approximately 93 m(MSL)
Map sheet number	: 5140 II Coordination: 47P 0711956 <sup>E</sup> , 1745327 <sup>N</sup>
Landform	
1. Physiographic position	: Upper footslope
2. Surrounding land form	: Undulating
3. Slope on which profile site	: 2 %      Aspect: 310 Azimuth
Land use	: Corn and mung bean
Annual rainfall	: Approximately 1,207 mm
Mean temperature	: Approximately 28 °C
Climate	: Tropical savanna
Other	: Agricultural and settlement

### **II. General information on the soil**

Parent material	: Local alluvium derived from limestone on residuum derived from weathered andesite
Drainage	: Well
Permeability	: Moderate
Runoff	: Moderate
Depth of groundwater	: Deeper than 160 cm at time of sampling

### **III. Profile description**

Horizon	Depth (cm)	Description
Apk	0-18/20	Brown (7.5YR 4/3); clay; strong coarse semi-angular blocky structure; very hard dry, very firm moist, very sticky and very plastic; few faint clay coats on pore walls; common fine faint pressure faces and few rock fragments; common very fine and few fine vesicular pores and few fine simple tubular pores; common very fine and few fine roots; few traces of dead roots; moderately alkaline (field pH 8.0); abrupt and smooth boundary to Btk1.
Btk1	20-40	Mixed Brown (10YR 5/3) 75%, brown (7.5YR 4/3) 10% and Brown (10YR 4/3) 5%, common fine distinct strong brown (7.5YR 5/6) and few fine distinct black (10YR 2/1) mottles; clay; moderate fine and medium semi-angular blocky structure; very hard dry, very firm moist, very sticky and very plastic; few faint clay coats on pore walls and ped faces; common faint pressure faces and rock fragments; few very fine, fine and medium vesicular pores and few fine simple tubular pores; few very fine and fine roots; few traces of dead roots and charcoal fragments; moderately alkaline (field pH 8.0); clear and smooth boundary to Btk2.
Btk2	40-60	Mixed dark grayish brown (10YR 4/2) 73%, dark gray (10YR 4/1) 10%, common medium and coarse distinct strong brown (7.5YR 5/6) and few fine faint black (10YR 2/1) mottles; clay; strong medium and coarse angular blocky structure; very hard dry, very firm moist, very sticky and very plastic; few faint clay coats on pore walls; few faint

pressure faces and few fine cracks; common very fine and few fine vesicular pores and few fine simple tubular pores; few very fine and fine roots; common lime fragments and few rock fragments and few traces of dead roots; moderately alkaline (field pH 8.0); gradual and smooth boundary to Btk3.

Btk3	60-80	Mixed dark grayish brown (10YR 4/2) 74%, dark gray (10YR 4/1) 10%; common medium and coarse distinct strong brown (7.5YR 5/6), few fine distinct (5YR 4/4) and few fine faint black (10YR 2/1) mottles; clay; moderate medium and coarse semi-angular blocky structure; very hard dry, very firm moist, very sticky and very plastic; common faint clay coats on ped faces and pore walls; common faint pressure faces, lime fragments and fine rock fragments; common very fine and few fine vesicular pores, and few fine simple tubular pores with some lime filled in pores; few very fine and fine roots; a crack continues from surface down to the lower limit of this horizon; moderately alkaline (field pH 8.0); clear and smooth boundary to Btk4.
Btk4	80-110	Mixed Brown (10YR 5/3) 86%, grayish brown (10YR 5/2) 10%, few fine prominent yellowish brown (10YR 5/8) and few fine distinct black (10YR 2/1) mottles; slightly gravelly clay; moderate fine and medium sub-angular blocky structure; hard dry, very firm moist, very sticky and very plastic; few faint clay coats on pore walls; common faint pressure faces and few manganese-oxide nodules; common very fine and few fine vesicular pores, and few fine simple tubular pores with some lime filled in pores; very few, very fine and fine roots; many lime fragments and few rock fragments; moderately alkaline (field pH 8.0); abrupt and smooth boundary to Crtk1.
Crtk1	110-135	Mixed grayish brown (10YR 5/2) 65%, gray (10YR 5/1) 20%, common fine distinct yellowish brown (10YR 5/6) mottles; gravelly clay; weak medium and coarse angular blocky plus weathered basalt retaining rock structure; hard dry, firm moist, very sticky and very plastic (fine earth); few faint clay coats on pore walls and rock fragment surfaces; some accumulations of lime materials and common faint pressure faces; few very fine and fine vesicular pores and few fine simple tubular pores; very few very fine and fine roots; many fine and medium and few large rock fragments; moderately alkaline (field pH 8.0); gradual and smooth boundary to Crtk2.
Crtk2	135-168+	Grayish brown (10YR 5/2), common fine distinct dark yellowish brown (10YR 4/6) and few fine distinct dark (10YR 2/1) mottles; gravelly clay; weak medium and coarse angular blocky plus weathered basalt retaining rock structure; hard dry, firm moist, very sticky and very plastic fine earth; few faint clay coats on pores walls and rock fragment surfaces; some accumulations of lime materials and common faint pressure faces; few very fine and fine vesicular pores and few fine simple tubular pores; very few very fine and fine roots; more large rock fragments exist; moderately alkaline (field pH 8.0).

## Wang Chomphu 1 (Wc1)

### I. Information on the site

Profile symbol	: Wc1
Soil name	: Wang Chomphu variant 1
Classification	: Chromic Haplustert, fine, smectitic, isohyperthermic
Date of examination	: November 11, 2007
Described by	: Irb Kheoruenromne, Chutharmard Keawmano, Natthapol Chittamart, Worachat Wisawapipat, Tintong Darunsontaya and Kokkorn Hemtanon
Location	: Mung bean intercropping mango area, Ban Aphai Manee Rat, Tambon Huay Pong, Amphoe Nong Phai, Petchabun province
Elevation	: Approximately 96 m(MSL)
Map sheet number	: 5241 III Coordination: 47Q 0720488 <sup>E</sup> , 1787343 <sup>N</sup>
Landform	
1. Physiographic position	: Lower footslope
2. Surrounding land form	: Undulating
3. Slope on which profile site	: 1 %      Aspect: 290 Azimuth
Land use	: Mango intercropping with mung bean, tamarind, teak, eucalyptus, banana
Annual rainfall	: Approximately 1,207 mm
Mean temperature	: Approximately 28 °C
Climate	: Tropical savanna
Other	: Agricultural mainly

### II. General information on the soil

Parent material	: Local alluvium and wash over residuum derived from lime containing rock
Drainage	: Well drained
Permeability	: Moderate
Runoff	: Moderate
Depth of groundwater	: Deeper than 160 cm at time of sampling

### III. Profile description

Horizon	Depth (cm)	Description
Ap	0-20	Very dark brown (7.5YR 2.5/2); clay; strong medium and coarse subangular blocky structure; very hard dry, very firm moist, very sticky and very plastic; few faint pressure faces and few fine rock fragments; common very fine and fine vesicular pores, few medium vesicular pores and few fine simple tubular pores; common very fine and fine roots; traces of dead roots and common vertical cracks down to approximate 12 cm depth; moderately acid (field pH 6.0); abrupt and smooth boundary to Bt.
Bt	20-45	Brown (7.5YR 4/3), few fine prominent red (2.5YR 4/8) mottles; clay; strong fine and medium angular blocky structure; very hard dry, very firm moist, very sticky and very plastic; few faint clay coats on pore walls mainly; few faint pressure faces and few fine rock fragments; common very fine and fine vesicular pores, few medium vesicular pores and few fine simple tubular pores; few very fine and fine roots; traces of dead roots, few iron-manganese nodules and concretions; strongly acid (field pH 5.5); abrupt and smooth boundary to Btc1.
Btc1	45-75	Brown (7.5YR 4/2), few medium prominent brownish yellow (10YR 6/8), common fine prominent red (2.5YR 4/6) mottles and

black 10YR 2/1 of manganese nodules; very gravelly clay; moderate fine and medium subangular blocky structure; hard dry, firm moist, moderately sticky and moderately plastic; few faint clay coats on pore walls and on nodule surfaces, common distinct mangan on faces of rock fragments; many fine nodules and concretions of Fe-Mn oxides, very few pressure faces; few very fine, fine and medium vesicular pores and few fine tubular pores; few very fine and fine roots; traces of dead roots; moderately acid (field pH 6.0); clear and smooth boundary to Btc2.

Btc2	75-105	Grayish brown (10YR 5/2), common fine and medium prominent red (2.5YR 4/8), common fine distinct strong brown (7.5YR 5/8) and few fine distinct brownish yellow (10YR 6/8) mottles; very gravelly clay; moderate medium and coarse semi-angular blocky structure; very hard dry, very firm moist, moderately sticky and moderately plastic; few faint clay coats on pore walls and on nodule surfaces, common distinct mangan on faces of rock fragments; many fine nodules and concretions of Fe-Mn oxides, very few pressure faces; few very fine, fine and medium vesicular pores and few fine tubular pores; few very fine and fine roots; traces of dead roots; slightly acid (field pH 6.5); abrupt and smooth boundary to 2Btk1.
2Btk1	105-135	Mixed light olive brown (2.5Y 5/3) 90% and gray (2.5Y 5/1) 10%; clay; strong medium and coarse angular blocky structure; very hard dry, very firm moist, very sticky and very plastic; common faint clay coats on ped faces and pore walls; common faint pressure faces and few slickensides; few very fine and fine vesicular pores; very few very fine roots; common fine lime materials in the soil, few fine cracks; moderately alkaline (field pH 8.0); gradual and smooth boundary to 2Btk2.
2Btk2	135-160+	Mixed light olive brown (2.5Y 5/3) and dark gray (2.5Y 4/1), few fine distinct light olive brown (2.5Y 5/6) mottles; clay; moderate medium and coarse semi-angular blocky structure; very hard dry, very firm moist, very sticky and very plastic; few faint clay coats on pore walls and nodule surfaces; few faint pressure faces and common fine dark spots of Mn-oxides; few very fine and fine vesicular pores; very few very fine roots; many fine lime materials in soil matrix, few traces of dead roots and few fine cracks; moderately alkaline (field pH 8.0).

## Wang Chomphu 2 (Wc2)

### I. Information on the site

Profile symbol	: Wc2
Soil name	: Wang Chomphu variant 2
Classification	: Typic Haplustert, fine, smectitic, isohyperthermic
Date of examination	: November 11, 2007
Described by	: Irb Kheoruenromne, Chutharmard Keawmano, Natthapol Chittamart, Worachat Wisawapipat, Tingtong Darunsontaya and Kokkorn Hemtanon
Location	: Livestock pasture area about 80 m west of road Number 21, Ban Chai Charoen, Tambon Huay Sakae, Amphoe Mueng, Petchabun province
Elevation	: Approximately 102 m(MSL)
Map sheet number	: 5241 IV Coordination: 47Q 0722441 <sup>E</sup> , 1795993 <sup>N</sup>
Landform	
1. Physiographic position	: Lower dissected footslope
2. Surrounding land form	: Undulating
3. Slope on which profile site	: 1 %      Aspect: 70 Azimuth
Land use	: Livestock pasture for grazing
Annual rainfall	: Approximately 1,207 mm
Mean temperature	: Approximately 28 °C
Climate	: Tropical savanna
Other	: Agricultural and settlement

### II. General information on the soil

Parent material	: Local alluvium on residuum derived from calcareous rock
Drainage	: Well drained
Permeability	: Moderate
Runoff	: Moderate
Depth of groundwater	: Deeper than 180 cm at time of sampling

### III. Profile description

Horizon	Depth (cm)	Description
Ap	0-25	Reddish black (2.5YR 2.5/1); clay; strong medium and coarse semi-angular blocky structure; very hard dry, very firm moist, very sticky and very plastic; common faint pressure faces and fine rock fragments; common very fine and fine vesicular pores and few fine simple tubular pores; common very fine and fine roots and few medium roots; common vertical cracks down to upper part of Bt, some traces of dead roots; slightly acid (field pH 6.5); clear and smooth boundary to Bt1.
Bt1	25-48	Reddish black (2.5YR 2.5/1), common fine prominent red (2.5YR 4/6) mottles; clay; moderate medium and coarse angular blocky structure; very hard dry, very firm moist, very sticky and very plastic; few faint clay coats on pore walls and rock fragment surfaces; common faint pressure faces and fine rock fragments; common very fine and fine vesicular pores and few fine simple tubular pores; few very fine, fine and medium roots; few fine cracks and traces of dead roots; slightly acid (field pH 6.5); gradual and smooth boundary to Bt2.
Bt2	48-70	Dark reddish gray (2.5YR 4/1), common fine and medium prominent red (2.5YR 4/6) mottles; gravelly clay; moderate medium and coarse semi-angular blocky structure; very hard dry, very firm moist, very sticky and very plastic; few faint clay coats on pore walls mainly; common faint pressure faces; few very fine and fine vesicular pores and few fine simple tubular pores; few very fine and fine roots; common rock fragments of various sizes

and traces of dead roots; strongly acid (field pH 5.5); abrupt and smooth boundary to 2Btk1.

2Btk1	70-100	Mixed light olive brown (2.5Y 5/3) 85%, olive yellow (2.5Y 6/6) 10% and gray (2.5Y 6/1) 5%; clay; strong medium and coarse angular blocky structure; very hard dry, very firm moist, very sticky and very plastic; common faint clay coats on pore walls and ped faces; many faint pressure faces and few slickensides; common very fine and fine vesicular pores and few tubular pores; very few very fine and fine roots; few rock fragments and Fe-Mn oxides nodules and few fine lime nodules; moderately alkaline (field pH 8.0); gradual and smooth boundary to 2Btk2.
2Btk2	100-130	Mixed light olive brown (2.5Y 5/3) 90% and light yellowish brown (2.5Y 6/4) 10%; clay; strong medium and coarse angular blocky structure; very hard dry, very firm moist, very sticky and very plastic; common faint clay coats on pore walls and ped faces; many faint pressure faces and few slickensides; common very fine and fine vesicular pores and few tubular pores; very few very fine and fine roots; few fine cracks and common fine lime nodules; moderately alkaline (field pH 8.0); clear and smooth boundary to 2Btk3.
2Btk3	130-150	Mixed light yellowish brown (2.5Y 6/4) 78%, brownish yellow (10YR 6/6) 20%, light gray (10YR 7/1) 2% of weathered rock; clay; moderate fine and medium angular blocky structure; very hard dry, very firm moist, very sticky and very plastic; common faint clay coats on pore walls and ped faces; many faint pressure faces and very few slickensides; common very fine and fine vesicular pores and few tubular pores; practically no roots; few fine cracks and few fine lime nodules; moderately alkaline (field pH 8.0); abrupt and smooth boundary to 2Crtk.
2Crtk	150-182+	Mixed light yellowish brown (2.5Y 6/4) 35%, brownish yellow (10YR 6/6) 35%, light gray (10YR 7/1) 20% and white (2.5Y 8/1) 10%; clay; strong medium and coarse angular blocky retaining weathered rock structure; hard dry, firm moist, moderately sticky and moderately plastic; few faint clay coats on pore walls and some on planar weathered rock surfaces; common pressure faces on planar rock structure surfaces; very few very fine and fine vesicular pores; practically no roots; common fine cracks; moderately alkaline (field pH 8.0).



ตารางผนวกที่ 1 การแบ่งกลุ่มเนื้อดิน

คำเรียกทั่วไป	ชื่อชั้นของเนื้อดินหลัก	
ดินทราย (Sandy)	เนื้อหยาบ	ได้แก่ ทรายชนิดต่าง ๆ ตั้งแต่ทรายหยาบมากถึง ทรายละเอียดมาก และทรายปนดินร่วนถึงทรายละเอียดมากปนดินร่วน
	เนื้อหยาบปานกลาง	ได้แก่ ดินร่วนปนทรายชนิดต่าง ๆ ตั้งแต่ ดินร่วนปนทรายหยาบถึงดินร่วนปนทรายละเอียด
ดินร่วน (Loamy)	เนื้อปานกลาง	ได้แก่ ดินร่วนปนทรายละเอียดมาก ดินร่วน ดินร่วนปนทรายแป้ง และทรายแป้ง
	เนื้อละเอียดปานกลาง	ได้แก่ ดินร่วนเหนียว ดินร่วนเหนียวปนทราย ดินร่วนเหนียวปนทรายแป้ง
ดินเหนียว (Clayey)	เนื้อดินละเอียด	ได้แก่ ดินเหนียวปนทราย ดินเหนียวปนทรายแป้ง และ ดินเหนียว

ที่มา: เอิบ (2552); Soil Survey Division Staff (1993)

ตารางผนวกที่ 2 ข้อกำหนดที่ใช้ในการประเมินระดับสมบัติทางเคมี และการประเมินความอุดมสมบูรณ์ของดิน (เอิบ, 2548; Land Classification Division and FAO Project Staff, 1973; Soil Survey Division Staff, 1993)

1. พีเอชของดิน (Soil pH) (ดิน:น้ำ = 1:1)

ระดับ (rating)	พิสัย (range)
เป็นกรดรุนแรงมากที่สุด (ultra acid)	< 3.5
เป็นกรดรุนแรงมาก (extremely acid)	3.5-4.4
เป็นกรดจัดมาก (very strongly acid)	4.5-5.0
เป็นกรดจัด (strongly acid)	5.1-5.5
เป็นกรดปานกลาง (moderately acid)	5.6-6.0
เป็นกรดเล็กน้อย (slightly acid)	6.1-6.5
เป็นกลาง (neutral)	6.6-7.3
เป็นด่างเล็กน้อย (slightly alkaline)	7.4-7.8
เป็นด่างปานกลาง (moderately alkaline)	7.9-8.4
เป็นด่างจัด (strongly alkaline)	8.5-9.0
เป็นด่างจัดมาก (very strongly alkaline)	> 9.0

2. อินทรีย์วัตถุ (organic matter) (organic carbon x 1.724)

ระดับ (rating)	พิสัย (g kg <sup>-1</sup> )
ต่ำมาก (VL)	< 5
ต่ำ (L)	5-10
ค่อนข้างต่ำ (ML)	10-15
ปานกลาง (M)	15-25
ค่อนข้างสูง (MH)	25-35
สูง (H)	35-45
สูงมาก (VH)	> 45

## 3. ปริมาณไนโตรเจนรวม (total nitrogen)

ระดับ (rating)	พิสัย (g kg <sup>-1</sup> )
ต่ำมาก (VL)	< 1.0
ต่ำ (L)	1.0-2.0
ปานกลาง (M)	2.0-5.0
สูง (H)	5.0-7.5
สูงมาก (VH)	> 7.5

## 4. อัตราร้อยละความอิ่มตัวด้วยเบส (base saturation)

ระดับ (rating)	พิสัย (%)
ต่ำ (L)	< 35
ปานกลาง (M)	35-75
สูง (H)	> 75

## 5. ความจุแลกเปลี่ยนแคตไอออน (CEC)

ระดับ (rating)	พิสัย (cmol kg <sup>-1</sup> )
ต่ำมาก (VL)	<3
ต่ำ (L)	3-5
ค่อนข้างต่ำ (ML)	5-10
ปานกลาง (M)	10-15
ค่อนข้างสูง (MH)	15-20
สูง (H)	20-30
สูงมาก (VH)	> 30

## 6. ปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ (available P) (Bray II)

ระดับ (rating)	ฟอสฟอรัส (mg kg <sup>-1</sup> )
ต่ำมาก (VL)	< 3
ต่ำ (L)	3-6
ค่อนข้างต่ำ (ML)	6-10
ปานกลาง (M)	10-15
ค่อนข้างสูง (MH)	15-25
สูง (H)	25-45
สูงมาก (VH)	> 45

7. ปริมาณโพแทสเซียมที่เป็นประโยชน์ (available K) (NH<sub>4</sub>OAc)

ระดับ (rating)	ฟอสฟอรัส (mg kg <sup>-1</sup> )
ต่ำมาก (VL)	< 30
ต่ำ (L)	30-60
ปานกลาง (M)	60-90
สูง (H)	90-120
สูงมาก (VH)	> 120

หมายเหตุ VL = ต่ำมาก (Very low)

L = ต่ำ (Low)

ML = ค่อนข้างต่ำ (Moderately low)

M = ปานกลาง (Medium)

MH = ค่อนข้างสูง (Moderate high)

H = สูง (High)

VH = สูงมาก (Very high)

**ตารางผนวกที่ 3** เกณฑ์การแบ่งระดับความหนาแน่นรวมของดิน

ระดับ (rating)	พิสัย ( $\text{Mg g}^{-1}$ )
ต่ำมาก	< 1.2
ต่ำ	1.2-1.4
ปานกลาง	1.4-1.6
ค่อนข้างสูง	1.6-1.8
สูง	1.8-2.0
สูงมาก	> 2.0

ที่มา: นงคราญ (2529)

**ตารางผนวกที่ 4** สมบัติของดินทั่วไปเปรียบเทียบกับดินเค็ม ดินโซดิก และดินเค็มโซดิก

Soil	pH	Electrical Conductivity EC ( $\text{dS m}^{-1}$ )	Sodium Adsorption Ratio (SAR)
Normal	6.7-7.2	<4	<13
Saline	<8.5	>4	<13
Sodic	>8.5	<4	>13
Saline-Sodic	<8.5	>4	>13

ที่มา: Brady and Weil (2008)

ตารางผนวกที่ 5 X-ray diffraction spacing obtained from (001) planes of layer-silicate species related to sample treatment.

Diffraction spacing (nm)	Mineral (or minerals) Indicated
	<u>Mg-saturated, air-dried</u>
1.4-1.5	Smectite, vermiculite, chlorite
0.99-1.01	Mica (illite), halloysite
0.72-0.75	Metahalloysite
0.715	Kaolinite, chlorite (2nd-order maximum)
	<u>Mg-saturated, glycerol-solvated</u>
1.77-1.80	Smectite
1.4-1.5	Vermiculite, chlorite
1.08	Halloysite
0.99-1.01	Mica (illite)
0.72-0.75	Metahalloysite
0.75	Kaolinite, chlorite (2nd-order maximum)
	<u>K-saturated, air-dried</u>
1.4-1.5	Chlorite, vermiculite (with interlayer aluminium)
1.24-1.28	Smectite
0.99-1.01	Mica (illite), halloysite, vermiculite (contracted)
0.72-0.75	Metahalloysite
0.715	Kaolinite, chlorite (2nd-order maximum)
	<u>K-saturated, heated (550 °C)</u>
1.4	Chlorite
0.99-1.01	Mica, vermiculite (contracted), smectite (contracted)
0.715	Chlorite (2nd-order maximum)

ที่มา: Whittig and Allardice (1986)

ตารางผนวกที่ 6 ผลการวิเคราะห์ปริมาณองค์ประกอบเชิงแร่ในกลุ่มอนุภาคขนาดดินเหนียว

Soil series	Horizon	Depth cm	Clay fraction						
			Sm	Kao	Inters	Vm	Ill	Qtz	Cal
Br	Ap	0-20	xxxx	tr	-	-	-	tr	-
	Bss2	60-90	xxxx	tr	-	-	-	tr	-
Cd1	Apk	0-20	xxxx	tr	-	-	-	-	-
	Bss1	47-80	xxxx	tr	-	-	-	tr	-
Cd2	Ap	0-15	xxxx	x	-	tr	-	tr	-
	Btc	40-40/70	xxxx	x	-	x	-	tr	-
Lb	Apk	0-25	xxxx	tr	-	-	-	tr	-
	Bssk2	70-93	xxxx	tr	-	-	-	tr	-
Sat1	Apk	0-20	xxxx	tr	-	x	-	tr	-
	Bt3	70-90	xxxx	x	-	tr	-	tr	-
Sat2	Apk	0-18/20	xxxx	xx	-	tr	-	tr	-
	Btk2	40-60	xxxx	x	-	tr	-	tr	-
Wc1	Ap	0-20	xxxx	x	-	-	-	tr	-
	Btc1	45-75	xxxx	x	-	-	-	tr	-
Wc2	Ap	0-25	xxxx	x	-	-	-	tr	-
	2Btk1	70-100	xxxx	x	-	-	-	tr	-

หมายเหตุ: xxxx = Dominant (> 60%), xxx = Large (40-60%), xx = Moderate (20-40%), x = Small (5-20%), tr = trace (<5%), - = non-detectable, Sm = smectite, Kao = kaolinite, Inters = interstratified kaolinite-smectite, Vm = vermiculite, Ill = illite, Qtz = quartz, Cal = calcite

ตารางผนวกที่ 7 ผลการทดลองอิทธิพลของพีเอชที่มีผลต่อการดูดซับ ตะกั่ว ทองแดง สังกะสีและ แคดเมียม ในตัวอย่างอนุภาคขนาดดินเหนียว

Clay sample	pH	Removed metal (mg kg <sup>-1</sup> )				
		Pb	Cu	Zn	Cd	
Br_Topsoil	3	26.67	19.17	28.67	16.67	
		26.65	19.15	28.64	16.64	
		26.47	19.13	28.63	16.65	
	4	29.58	24.08	35.58	19.58	
		29.56	24.06	35.55	19.55	
		29.38	24.04	35.54	19.56	
	5	44.36	42.86	42.44	20.36	
		44.34	42.84	42.41	20.33	
		44.16	42.82	42.40	20.34	
	6	44.59	42.39	42.45	22.19	
		44.57	42.37	42.42	22.16	
		44.39	42.35	42.41	22.17	
	7	44.70	42.78	42.48	22.40	
		44.68	42.76	42.45	22.37	
		44.50	42.74	42.44	22.38	
	8	44.81	42.97	42.49	22.41	
		44.79	42.95	42.46	22.38	
		44.61	42.93	42.45	22.39	
	Br_Subsoil	3	26.67	19.17	28.67	16.67
			26.65	19.13	28.64	16.64
			26.47	19.15	28.63	16.65
		4	29.58	24.08	35.58	19.58
			29.56	24.04	35.55	19.55
			29.38	24.06	35.54	19.56
5		44.36	29.86	42.44	20.36	
		44.34	29.82	42.41	20.33	
		44.16	29.84	42.40	20.34	
6		44.59	30.99	42.45	22.19	
		44.57	30.95	42.42	22.16	
		44.39	30.97	42.41	22.17	
7		44.70	31.00	42.48	22.40	
		44.68	30.96	42.45	22.37	
		44.50	30.98	42.44	22.38	
8		44.81	30.31	42.49	22.41	
		44.79	30.27	42.46	22.38	
		44.61	30.29	42.45	22.39	

## ตารางผนวกที่ 7 (ต่อ)

Clay sample	pH	Removed metal (mg kg <sup>-1</sup> )				
		Pb	Cu	Zn	Cd	
Lb_Topsoil	3	10.67	19.17	11.05	16.47	
		10.65	19.14	11.02	16.44	
		10.47	19.12	11.01	16.45	
	4	11.58	24.08	11.47	16.58	
		11.56	24.05	11.44	16.55	
		11.38	24.03	11.43	16.56	
	5	19.36	29.86	31.63	17.06	
		19.34	29.83	31.60	17.03	
		19.16	29.81	31.59	17.04	
	6	19.49	32.50	31.65	17.25	
		19.47	32.47	31.62	17.22	
		19.29	32.45	31.61	17.23	
	7	19.50	32.78	31.65	17.25	
		19.48	32.75	31.62	17.22	
		19.30	32.73	31.61	17.23	
	8	19.50	32.93	31.70	17.26	
19.48		32.90	31.67	17.23		
19.30		32.88	31.66	17.24		
Lb_Subsoil		3	26.67	19.17	18.67	12.67
			26.65	19.15	18.64	12.64
	26.47		19.13	18.63	12.65	
	4	29.58	24.08	15.58	13.58	
		29.56	24.06	15.55	13.55	
		29.38	24.04	15.54	13.56	
5	34.36	30.13	30.44	16.36		
	34.34	30.11	30.41	16.33		
	34.16	30.09	30.40	16.34		
6	34.49	30.15	30.45	16.50		
	34.47	30.13	30.42	16.47		
	34.29	30.11	30.41	16.48		
7	34.70	30.18	30.48	16.98		
	34.68	30.16	30.45	16.95		
	34.50	30.14	30.44	16.96		
8	34.74	30.18	30.49	16.99		
	34.72	30.16	30.46	16.96		
	34.54	30.14	30.45	16.97		

## ตารางผนวกที่ 7 (ต่อ)

Clay sample	pH	Removed metal (mg kg <sup>-1</sup> )				
		Pb	Cu	Zn	Cd	
Cd1_Topsoil	3	26.67	19.17	28.67	16.67	
		26.65	19.15	28.64	16.64	
		26.47	19.13	28.63	16.65	
	4	29.58	24.08	35.58	19.58	
		29.56	24.06	35.55	19.55	
		29.38	24.04	35.54	19.56	
	5	43.36	41.13	41.44	20.36	
		43.34	41.11	41.41	20.33	
		43.16	41.09	41.40	20.34	
	6	43.59	41.15	41.45	21.19	
		43.57	41.13	41.42	21.16	
		43.39	41.11	41.41	21.17	
	7	43.70	41.18	41.48	21.40	
		43.68	41.16	41.45	21.37	
		43.50	41.14	41.44	21.38	
	8	43.81	41.18	41.49	21.41	
		43.79	41.16	41.46	21.38	
		43.61	41.14	41.45	21.39	
	Cd1_Subsoil	3	26.67	19.17	28.67	16.67
			26.65	19.15	28.64	16.64
			26.47	19.13	28.63	16.65
		4	29.58	24.08	35.58	19.58
			29.56	24.06	35.55	19.55
			29.38	24.04	35.54	19.56
5		44.36	42.86	42.44	20.36	
		44.34	42.84	42.41	20.33	
		44.16	42.82	42.40	20.34	
6		44.59	42.39	42.45	22.19	
		44.57	42.37	42.42	22.16	
		44.39	42.35	42.41	22.17	
7		44.70	42.78	42.48	22.40	
		44.68	42.76	42.45	22.37	
		44.50	42.74	42.44	22.38	
8		44.81	42.97	42.49	22.41	
		44.79	42.95	42.46	22.38	
		44.61	42.93	42.45	22.39	

## ตารางผนวกที่ 7 (ต่อ)

Clay sample	pH	Removed metal (mg kg <sup>-1</sup> )				
		Pb	Cu	Zn	Cd	
Cd2_Topsoil	3	16.67	14.17	18.67	10.67	
		16.65	14.15	18.64	10.27	
		16.47	14.13	18.63	10.64	
	4	17.58	14.08	21.58	11.58	
		17.56	14.06	21.55	11.18	
		17.38	14.05	21.54	11.55	
	5	18.36	23.46	22.36	11.99	
		18.34	23.44	22.33	11.59	
		18.16	23.43	22.32	11.96	
	6	25.46	23.99	22.59	12.25	
		25.44	23.97	22.56	11.85	
		25.26	23.96	22.55	12.21	
	7	25.48	24.00	22.40	12.30	
		25.46	23.98	22.37	11.90	
		25.28	23.97	22.36	12.26	
	8	25.49	23.99	22.40	12.30	
		25.47	23.97	22.37	11.90	
		25.29	23.96	22.36	12.26	
	Cd2_Subsoil	3	10.67	19.17	11.05	16.47
			10.65	19.13	11.02	16.44
			10.47	19.15	11.01	16.45
		4	11.58	24.08	11.47	16.58
			11.56	24.04	11.44	16.55
			11.38	24.06	11.43	16.56
5		19.36	29.86	16.63	17.06	
		19.34	29.82	16.60	17.03	
		19.16	29.84	16.59	17.04	
6		19.49	30.99	16.65	17.79	
		19.47	30.95	16.62	17.76	
		19.29	30.97	16.61	17.77	
7		19.50	31.00	16.65	17.80	
		19.48	30.96	16.62	17.77	
		19.30	30.98	16.61	17.78	
8		19.50	30.31	16.70	17.80	
		19.48	30.27	16.67	17.77	
		19.30	30.29	16.66	17.78	

## ตารางผนวกที่ 7 (ต่อ)

Clay sample	pH	Removed metal (mg kg <sup>-1</sup> )				
		Pb	Cu	Zn	Cd	
Sat1_Topsoil	3	10.67	14.17	11.05	16.47	
		10.65	14.15	11.02	16.44	
		10.47	14.13	11.01	16.45	
	4	11.58	14.80	11.47	16.58	
		11.56	14.78	11.44	16.55	
		11.38	14.76	11.43	16.56	
	5	19.36	17.43	16.63	17.06	
		19.34	17.41	16.60	17.03	
		19.16	17.39	16.59	17.04	
	6	19.49	17.45	16.65	17.79	
		19.47	17.43	16.62	17.76	
		19.29	17.41	16.61	17.77	
	7	19.50	17.48	16.65	17.80	
		19.48	17.46	16.62	17.77	
		19.30	17.44	16.61	17.78	
	8	19.50	17.48	16.70	17.80	
		19.48	17.46	16.67	17.77	
		19.30	17.44	16.66	17.78	
	Sat1_Subsoil	3	16.67	14.17	18.67	10.67
			16.65	14.17	18.64	10.27
			16.47	14.17	18.63	10.64
		4	17.58	14.08	21.58	11.58
			17.56	14.06	21.55	11.18
			17.38	14.04	21.54	11.55
5		18.36	17.46	23.36	11.99	
		18.34	17.43	23.33	11.59	
		18.16	17.40	23.32	11.96	
6		26.46	17.99	23.59	13.25	
		26.44	17.97	23.56	12.85	
		26.26	17.95	23.55	13.21	
7		26.48	18.00	23.40	13.30	
		26.46	17.98	23.37	12.90	
		26.28	17.96	23.36	13.26	
8		26.49	17.99	23.40	13.26	
		26.47	17.97	23.37	12.86	
		26.29	17.95	23.36	13.23	

## ตารางผนวกที่ 7 (ต่อ)

Clay sample	pH	Removed metal (mg kg <sup>-1</sup> )				
		Pb	Cu	Zn	Cd	
Sat2_Topsoil	3	16.67	14.17	18.67	10.67	
		16.65	14.15	18.64	10.27	
		16.47	14.13	18.63	10.64	
	4	17.58	14.08	19.58	11.58	
		17.56	14.05	19.55	11.18	
		17.38	14.02	19.54	11.55	
	5	18.36	22.46	21.36	11.99	
		18.34	22.44	21.33	11.59	
		18.16	22.42	21.32	11.96	
	6	24.46	22.99	21.59	12.25	
		24.44	22.95	21.56	11.85	
		24.26	22.91	21.55	12.21	
	7	24.48	23.00	21.40	12.28	
		24.46	22.98	21.37	11.88	
		24.28	22.96	21.36	12.24	
	8	24.94	22.99	21.40	12.46	
		24.92	22.96	21.37	12.06	
		24.74	22.93	21.36	12.43	
	Sat2_Subsoil	3	16.67	14.17	18.67	10.67
			16.65	14.17	18.64	10.27
			16.47	14.17	18.63	10.64
		4	17.58	14.08	21.58	11.58
			17.56	14.05	21.55	11.18
			17.38	14.06	21.54	11.55
5		18.36	17.46	23.36	11.99	
		18.34	17.43	23.33	11.59	
		18.16	17.44	23.32	11.96	
6		26.46	17.99	23.59	13.25	
		26.44	17.96	23.56	12.85	
		26.26	17.97	23.55	13.21	
7		26.48	18.00	23.40	13.30	
		26.46	17.97	23.37	12.90	
		26.28	17.98	23.36	13.26	
8		26.49	17.99	23.40	13.26	
		26.47	17.96	23.37	12.86	
		26.29	17.97	23.36	13.23	

## ตารางผนวกที่ 7 (ต่อ)

Clay sample	pH	Removed metal (mg kg <sup>-1</sup> )			
		Pb	Cu	Zn	Cd
Wc1_Topsoil	3	10.67	9.05	9.05	4.47
		10.65	9.02	9.02	4.44
		10.47	9.01	9.01	4.45
	4	11.58	9.47	9.47	4.58
		11.56	9.44	9.44	4.55
		11.38	9.43	9.43	4.56
	5	14.36	12.43	11.63	4.06
		14.34	12.40	11.60	4.03
		14.16	12.39	11.59	4.04
	6	14.49	12.45	11.65	7.79
		14.47	12.42	11.62	7.76
		14.29	12.41	11.61	7.77
	7	14.50	12.45	11.65	7.80
		14.48	12.42	11.62	7.77
		14.30	12.41	11.61	7.78
	8	14.50	12.50	11.70	7.80
14.48		12.47	11.67	7.77	
14.30		12.46	11.66	7.78	
Wc1_Subsoil	3	11.17	10.05	10.55	5.47
		11.15	10.02	10.52	5.44
		10.97	10.01	10.51	5.45
	4	12.08	10.47	10.97	5.58
		12.06	10.44	10.94	5.55
		11.88	10.43	10.93	5.56
	5	15.86	14.43	14.73	5.06
		15.84	14.40	14.70	5.03
		15.66	14.39	14.69	5.04
	6	15.99	14.45	14.75	8.95
		15.97	14.42	14.72	8.92
		15.79	14.41	14.71	8.93
	7	16.00	14.45	14.75	8.98
		15.98	14.42	14.72	8.95
		15.80	14.41	14.71	8.96
	8	16.00	14.50	14.76	8.98
15.98		14.47	14.73	8.95	
15.80		14.46	14.72	8.96	

## ตารางผนวกที่ 7 (ต่อ)

Clay sample	pH	Removed metal (mg kg <sup>-1</sup> )			
		Pb	Cu	Zn	Cd
Wc2_Topsoil	3	10.67	19.17	11.05	16.47
		10.65	19.13	11.02	16.44
		10.47	19.15	11.01	16.45
	4	11.58	23.08	11.47	16.58
		11.56	23.04	11.44	16.55
		11.38	23.06	11.43	16.56
	5	19.36	24.86	16.63	17.06
		19.34	24.82	16.60	17.03
		19.16	24.84	16.59	17.04
	6	19.49	25.99	16.65	17.79
		19.47	25.95	16.62	17.76
		19.29	25.97	16.61	17.77
	7	19.50	26.00	16.65	17.80
		19.48	25.96	16.62	17.77
		19.30	25.98	16.61	17.78
	8	19.50	25.31	16.70	17.80
19.48		25.27	16.67	17.77	
19.30		25.29	16.66	17.78	
Wc2_Subsoil	3	26.67	19.17	18.67	12.67
		26.65	19.15	18.64	12.64
		26.47	19.13	18.63	12.65
	4	29.58	24.08	15.58	13.58
		29.56	24.06	15.55	13.55
		29.38	24.04	15.54	13.56
	5	32.36	30.13	30.44	16.36
		32.34	30.11	30.41	16.33
		32.16	30.09	30.40	16.34
	6	32.59	30.15	30.45	16.50
		32.57	30.13	30.42	16.47
		32.39	30.11	30.41	16.48
	7	32.70	30.18	30.48	16.98
		32.68	30.16	30.45	16.95
		32.50	30.14	30.44	16.96
	8	32.81	30.18	30.49	16.99
32.79		30.16	30.46	16.96	
32.61		30.14	30.45	16.97	

ตารางผนวกที่ 8 ค่าสหสัมพันธ์ที่ได้จากสมการ Langmuir และสมการ Freundlich ในการดูดซับ ตะกั่ว ทองแดง สังกะสี และแคดเมียม

Clay sample	Pb					
	Langmuir parameter			Freundlich parameter		
	R <sup>2</sup>	b	Qm	R <sup>2</sup>	1/n	Kf
Br_Topsoil	0.9653	0.1288	13.1665	0.8891	1.3065	1.7624
Br_Subsoil	0.9640	0.1286	13.7812	0.8934	1.3165	1.8264
Lb_Topsoil	0.9638	0.2980	5.9990	0.8938	1.3148	0.7945
Lb_Subsoil	0.9641	0.1690	10.7037	0.8942	1.3243	1.4391
Cd1_Topsoil	0.9629	0.1341	13.7088	0.8928	1.3323	1.8574
Cd1_Subsoil	0.9942	0.1196	12.2539	0.9287	1.2601	1.6546
Cd2_Topsoil	0.9486	0.2347	8.0046	0.8807	1.3254	1.0452
Cd2_Subsoil	0.9648	0.2961	5.9763	0.8949	1.3106	0.7890
Sat1_Topsoil	0.9638	0.2980	5.9990	0.8957	1.3004	1.0394
Sat1_Subsoil	0.9655	0.2181	7.9767	0.8938	1.3148	0.7945
Sat2_Topsoil	0.9680	0.2318	7.2749	0.8993	1.2903	0.9447
Sat2_Subsoil	0.9649	0.2178	7.9827	0.8953	1.2997	1.0385
Wc1_Topsoil	0.9646	0.3995	4.4312	0.8943	1.3077	0.5812
Wc1_Subsoil	0.9579	0.3808	5.0563	0.8876	1.3514	0.6944
Wc2_Topsoil	0.9650	0.2962	5.9744	0.8951	1.3108	0.7892
Wc2_Subsoil	0.9639	0.1794	10.1864	0.8944	1.3342	1.3912
	Cu					
	R <sup>2</sup>	b	Qm	R <sup>2</sup>	1/n	Kf
Br_Topsoil	0.9575	0.1344	12.1743	0.8819	1.2082	1.3038
Br_Subsoil	0.9565	0.1475	13.3528	0.8861	1.3650	1.8715
Lb_Topsoil	0.7772	0.3273	10.2417	0.7598	1.5662	1.5592
Lb_Subsoil	0.9662	0.1805	8.1766	0.8857	1.1425	0.7793
Cd1_Topsoil	0.9552	0.1375	12.0162	0.8788	1.2044	1.2653
Cd1_Subsoil	0.9575	0.1344	12.1743	0.8819	1.2082	1.3038
Cd2_Topsoil	0.9986	0.1840	3.6569	0.9361	0.9399	0.3085
Cd2_Subsoil	0.7138	0.3584	14.5440	0.7202	2.2222	3.8842
Sat1_Topsoil	0.9436	0.3102	4.2569	0.8713	0.7882	0.1020
Sat1_Subsoil	0.9638	0.2386	3.0034	0.8520	0.9781	0.2416
Sat2_Topsoil	0.9611	0.2308	5.2834	0.8693	0.9837	0.3265
Sat2_Subsoil	0.9962	0.2541	2.7087	0.8822	0.8015	0.1070
Wc1_Topsoil	0.9762	0.3917	2.2921	0.8602	0.8167	0.0788
Wc1_Subsoil	0.9723	0.3726	2.8727	0.8297	5.0125	1.3041
Wc2_Topsoil	0.7570	0.7343	18.8063	0.7400	6.7249	16.8927
Wc2_Subsoil	0.9575	0.1344	12.1743	0.8857	1.1425	0.7793

ตารางผนวกที่ 8 (ต่อ)

Clay sample	Zn						
	Langmuir parameter			Freundlich parameter			
	R <sup>2</sup>	b	Qm	R <sup>2</sup>	1/n	Kf	
Br_Topsoil	0.9550	0.1304	11.7896	0.8778	1.1511	1.1153	
Br_Subsoil	0.9550	0.1304	11.7896	0.8778	1.1511	1.1153	
Lb_Topsoil	0.8134	0.3094	9.5643	0.7762	1.4445	1.2560	
Lb_Subsoil	0.9652	0.1780	7.7886	0.8690	6.0459	4.2306	
Cd1_Topsoil	0.9593	0.1339	11.2978	0.8811	1.1494	1.0770	
Cd1_Subsoil	0.9550	0.1304	11.7896	0.8778	1.1511	1.1153	
Cd2_Topsoil	0.8857	0.2256	6.1372	0.8400	0.9863	0.3440	
Cd2_Topsoil	0.9644	0.2991	3.4786	0.8590	0.8734	0.1460	
Sat1_Topsoil	0.9624	0.3049	3.4786	0.8755	1.0308	0.4098	
Sat1_Subsoil	0.9628	0.2251	5.7336	0.8560	0.8798	0.1393	
Sat2_Topsoil	0.9412	0.2521	5.4452	0.8533	1.0045	0.1795	
Sat2_Subsoil	0.9628	0.2251	5.7336	0.8755	1.0308	0.4098	
Wc1_Topsoil	0.9676	0.4059	1.9102	0.8013	0.6427	0.0198	
Wc1_Subsoil	0.9524	0.3772	2.5743	0.8103	0.6427	0.0198	
Wc2_Topsoil	0.9679	0.3014	3.4495	0.8602	0.8752	0.1461	
Wc2_Subsoil	0.9550	0.1304	11.7896	0.8890	1.0928	0.6634	
	Cd						
	R <sup>2</sup>	b	Qm	R <sup>2</sup>	1/n	Kf	
	Br_Topsoil	0.9666	0.2625	6.7190	0.8891	1.3259	0.9207
	Br_Subsoil	0.9553	0.2686	6.9076	0.8934	1.3435	0.9486
	Lb_Topsoil	0.7416	0.7644	6.0162	0.8938	2.0683	1.4699
	Lb_Subsoil	0.9598	0.3546	5.2475	0.8942	1.3432	0.7214
	Cd1_Topsoil	0.9609	0.2710	6.8666	0.8928	1.3374	0.9335
	Cd1_Subsoil	0.9553	0.2686	6.9076	0.9287	1.3435	0.9335
	Cd2_Topsoil	0.9648	0.4722	3.5795	0.8807	1.2698	0.4414
	Cd2_Topsoil	0.8928	0.5023	3.2926	0.8949	1.2098	0.3442
	Sat1_Topsoil	0.8843	0.4467	3.2806	0.8957	1.2525	0.4657
	Sat1_Subsoil	0.9734	0.4225	3.7977	0.8938	1.1435	0.6971
	Sat2_Topsoil	0.9733	0.4543	3.4632	0.8993	1.2461	2.3648
	Sat2_Subsoil	0.9528	0.4609	4.0468	0.8953	1.3086	0.5137
	Wc1_Topsoil	0.9621	0.7499	2.1366	0.8943	1.2789	0.2777
	Wc1_Subsoil	0.9413	0.7580	2.5551	0.8876	1.3323	0.3320
	Wc2_Topsoil	0.9320	0.5252	3.1436	0.8951	1.2361	0.3570
	Wc2_Subsoil	0.9666	0.2625	6.7190	0.8944	1.3392	0.7168

หมายเหตุ R<sup>2</sup> = ค่าสหสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการดูดซับและความเข้มข้นของโลหะหนักในสาร

ละลาย

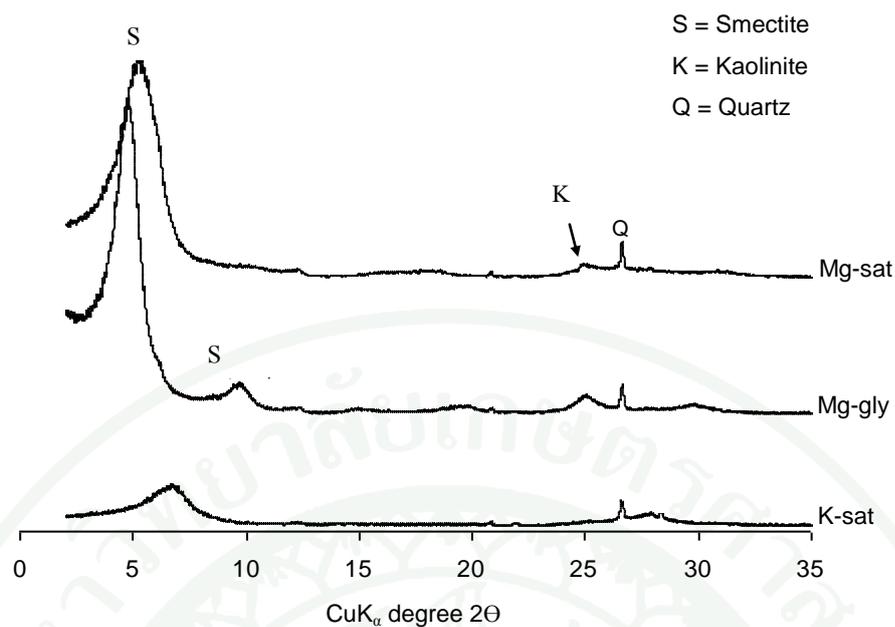
b = ค่าพลังงานจากการดูดซับ

Qm = ค่าความสามารถในการดูดซับ

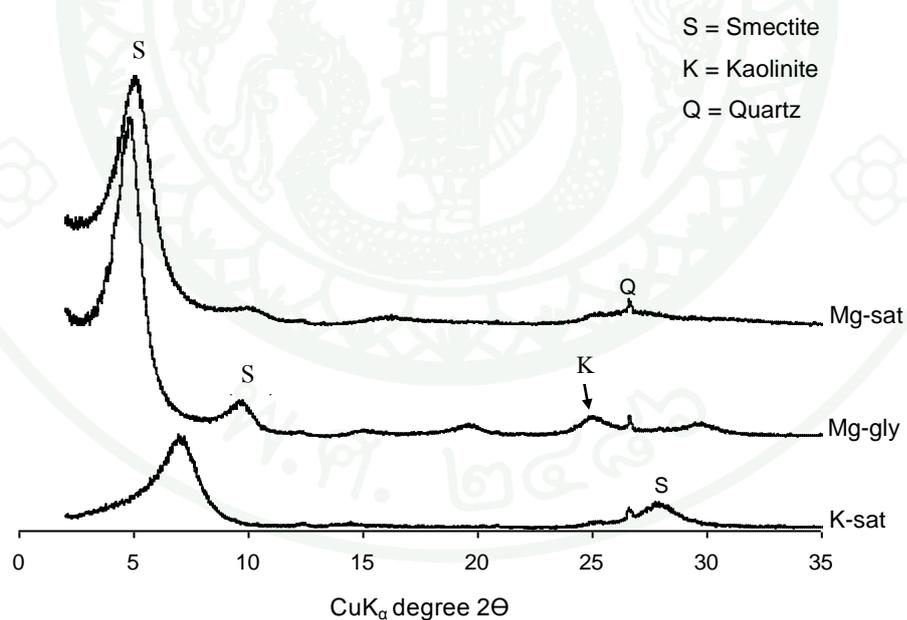
Kf, 1/n = ค่าคงที่ของระบบ



ภาพผนวก



ภาพผนวกที่ 1 กราฟการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ขององค์ประกอบเชิงแร่ในตัวอย่างอนุภาคขนาด  
ดินเหนียวที่มีแร่สมกไทต์เป็นองค์ประกอบหลัก (Br\_Topsoil)



ภาพผนวกที่ 2 กราฟการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ขององค์ประกอบเชิงแร่ในตัวอย่างอนุภาคขนาด  
ดินเหนียวที่มีแร่สมกไทต์เป็นองค์ประกอบหลัก (Cd1\_Subsoil)

## ประวัติการศึกษาและการทำงาน

ชื่อ –นามสกุล	นางสาวเกษรา จิตนิคม
วัน เดือน ปี ที่เกิด	10 เมษายน 2528
สถานที่เกิด	จังหวัดกาญจนบุรี
ประวัติการศึกษา	วิทยาศาสตร์บัณฑิต (เกษตรศาสตร์) มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน
ตำแหน่งหน้าที่การงานปัจจุบัน	-
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	-
ผลงานดีเด่นและรางวัลทางวิชาการ	-
ทุนการศึกษาที่ได้รับ	-