



การศึกษาการดูดซับตะกั่วของดินชุดบางเลน



ฉบับแก้ไขเพิ่มเติม  
จาก  
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยมหิดล

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม  
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยมหิดล

พ.ศ. 2545

ISBN 974-04-2044-3

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยมหิดล

วพ  
จ 492ก  
2545  
ฉ. ๒

วิทยานิพนธ์  
เรื่อง  
การศึกษาการดูดซับตะกั่วของดินหุคบางเลน



นางสาว วาสิตรี ouchachan  
ผู้วิจัย



รองศาสตราจารย์เชาว์ยุทธ พรพิมลเทพ, M.S. I.E.  
ประธานกรรมการควบคุมวิทยานิพนธ์



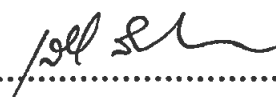
รองศาสตราจารย์สุทิน อยู่สุข, D.Tech.  
กรรมการควบคุมวิทยานิพนธ์



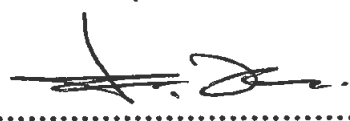
ผู้ช่วยศาสตราจารย์อุคมศักดิ์ คงเมือง, M.S.  
กรรมการควบคุมวิทยานิพนธ์



ผู้ช่วยศาสตราจารย์กัญชน์ เชียรชมประสิทธิ์, M.S.  
กรรมการควบคุมวิทยานิพนธ์



ศาสตราจารย์เลียงชัย ลิมล่อมวงศ์, Ph.D.  
คณบดี  
บัณฑิตวิทยาลัย



รองศาสตราจารย์สุวิทย์ ชุมชุมศิริวัฒน์, M.S.  
ประธานคณะกรรมการประจำหลักสูตร  
วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต  
สาขาวิชาเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม  
คณะสาธารณสุขศาสตร์

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การศึกษาการดูดซับตะกั่วของดินชุดบางเลน

ได้รับการพิจารณาให้นับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม

วันที่ 15 พฤษภาคม พ.ศ. 2545



นางสาว วาสิตฐิ์ อุดชาชน

ผู้วิจัย



รองศาสตราจารย์ไชยยุทธ พรพิมลเทพ, M.S. I.E.

ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



รองศาสตราจารย์เนาวรัตน์ เจริญค้า, Dr.P.H.

กรรมการสอบวิทยานิพนธ์



รองศาสตราจารย์วีระ สิงหะเคนทร์, M.A.

กรรมการสอบวิทยานิพนธ์



ศาสตราจารย์เลียงชัย ลิมล่อมวงศ์, Ph.D.

คณบดี

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยมหิดล



รองศาสตราจารย์กานดา วัฒนโกส,

M.Sc. in Hygiene

คณบดี

คณะสาธารณสุขศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความช่วยเหลือและสนับสนุนอย่างดียิ่งของรองศาสตราจารย์เชาวฤทธิ์ พรพิมลเทพ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ที่กรุณาให้คำแนะนำและข้อคิดเห็นต่างๆ ตลอดจนแนวทางการแก้ไขที่พบในระหว่างการวิจัย รองศาสตราจารย์ปรีดา พากเพียร สถาบันเทคโนโลยีแห่งเอเชีย ที่กรุณาให้ความรู้และคำแนะนำแก่ผู้วิจัยด้วยดีเสมอมา คณาจารย์ควบคุมวิทยานิพนธ์ทุกท่านที่กรุณาให้แนวคิดอันประโยชน์ในการศึกษา คณาจารย์สอบวิทยานิพนธ์ทุกท่านที่กรุณาใช้เวลาในการสอบวิทยานิพนธ์และแก้ไขวิทยานิพนธ์ให้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น และคณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมสุขาภิบาลทุกท่าน ที่กรุณาประสิทธิ์ ประสาทความรู้ให้แก่ผู้วิจัย ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ภาควิชาวิศวกรรมสุขาภิบาลทุกท่านที่อำนวยความสะดวกแก่ผู้วิจัย ประโยชน์อันใดที่เกิดจากงานวิจัยนี้ย่อมเป็นผลมาจากความกรุณาของทุกท่านดังกล่าวข้างต้นผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งเป็นอย่างยิ่ง จึงใคร่ขอขอบพระคุณอย่างสูงมา ณ โอกาสนี้

ท้ายนี้ ผู้วิจัยใคร่ขอกราบขอบพระคุณ บิดามารดา คุณชายและน้องสาวที่ได้ส่งเสริมสนับสนุนและให้กำลังใจในการศึกษาแก่ผู้วิจัยเสมอมา และขอขอบคุณคุณวรภรณ์ หิรัญวัฒน์ศิริ และเพื่อนๆ ทุกคน ที่ได้ให้กำลังใจและให้ความสนับสนุนแก่ผู้วิจัยเป็นอย่างดี

วาสิฎฐี อุดชาชน

4036216 PHET/M : สาขาวิชา : เทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม ; วท.ม. (เทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม)

คำสำคัญ : การดูดซับ / ดินชุดบางเลน / ตะกั่ว

วาสิฏฐี อุดชาชน : การศึกษาการดูดซับตะกั่วของดินชุดบางเลน (LEAD ADSORPTION OF BANGLAN SERIES SOILS) คณะกรรมการควบคุมวิทยานิพนธ์ : เขาวิบูลย์ พรทิมาเทพ, M.S. I.E. (Operations Research), สุทิน อยู่สุข, D.Tech.(Env. Engineer), กฤษณ์ เทียรฆประสิทธิ์, M.S. (Env.H.), อุคมศักดิ์ คงเมือง, M.S. (Env. Eng.). 125 หน้า. ISBN 974-04-2044-3.

การศึกษาค้นคว้าครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการดูดซับตะกั่วของดินชุดบางเลนและผลของค่าพีเอช และปริมาณอินทรีย์วัตถุต่อการดูดซับตะกั่วของดิน โดยตัวอย่างดินที่ใช้ในการศึกษา เป็นตัวอย่างดินชั้นบนของดินชุดบางเลน จากอำเภอบางเลน จังหวัดนครปฐม โดยวิเคราะห์หาคุณสมบัติทางกายภาพและเคมีทั่วไป ก่อนนำไปศึกษาการดูดซับตะกั่วของดินในสภาพเดิมตามธรรมชาติ การดูดซับที่ระดับพีเอช 6.7 (ค่าพีเอชตามธรรมชาติ), 4.5 และ 7.5 และ การดูดซับที่ปริมาณอินทรีย์วัตถุร้อยละ 3 (ปริมาณอินทรีย์วัตถุตามธรรมชาติ) ร้อยละ 4 และร้อยละ 5 ด้วยวิธีศึกษาการดูดซับแบบ Batch Method Adsorption Study

ผลจากการศึกษาพบว่า ดินชุดบางเลนมีคุณสมบัติเป็นดินเหนียวปนซิลต์ (Silty Clay) ปฏิกริยาดิน เป็นกลาง โดยมีค่าพีเอช 6.7 ปริมาณอินทรีย์วัตถุสูงปานกลางคือร้อยละ 3 และมีค่า CEC อยู่ในระดับสูง (32.40 meq/100 g) สมการที่สามารถนำมาอธิบายลักษณะการดูดซับที่เกิดขึ้นได้ดีที่สุด ในทุกสภาพของการศึกษา ได้แก่ สมการของ Freundlich ซึ่งอธิบายได้ว่าการดูดซับตะกั่วของดินจะสามารถเกิดขึ้นได้เรื่อยๆ ตามความเข้มข้นของตะกั่วในสารละลายดินที่เพิ่มขึ้น โดยพบว่าดินบางเลนในสภาพตามธรรมชาติมีความสามารถในการดูดซับตะกั่วได้สูงมาก โดยเส้นไอโซเทอมการดูดซับมีรูปแบบเป็นชนิดตัวเอช (H) คำนวณค่า K ได้ 5.98 ค่า  $1/n$  ได้ 0.60 ส่วนการศึกษาผลของค่าพีเอชต่อการดูดซับตะกั่วของดิน พบว่า การเปลี่ยนแปลงของค่าพีเอชและความสามารถในการดูดซับตะกั่วของดิน มีความสัมพันธ์กันในทิศทางเดียวกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $P\text{-value} < 0.001$ ) โดยเมื่อค่าพีเอชเพิ่มขึ้นดินมีความสามารถในการดูดซับตะกั่วได้สูงขึ้น ส่วนค่า  $1/n$  มีความสัมพันธ์ในทิศทางตรงกันข้ามกับค่าพีเอชของดิน รูปแบบของเส้นไอโซเทอมการดูดซับที่ พีเอช 4.5 มีลักษณะคล้ายไอโซเทอมชนิดตัวแอล (L) ส่วนที่พีเอช 6.7 และ 7.5 มีลักษณะเป็นชนิดตัวเอช จากการศึกษาผลของปริมาณอินทรีย์วัตถุ พบว่า การเปลี่ยนแปลงของปริมาณอินทรีย์วัตถุมีความสัมพันธ์ในทิศทางเดียวกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $P\text{-value} = 0.001$ ) กับค่า K ส่วนค่า  $1/n$  ไม่พบว่ามีสัมพันธ์กับการเปลี่ยนแปลงของปริมาณอินทรีย์วัตถุแต่อย่างใด สำหรับรูปแบบการดูดซับพบว่า เส้นไอโซเทอมมีลักษณะเป็นชนิดตัวเอช ที่ปริมาณอินทรีย์วัตถุทุกระดับ

4036216 PHET/M : MAJOR : ENVIRONMENTAL TECHNOLOGY ;

M.Sc. (ENVIRONMENTAL TECHNOLOGY)

KEY WORD : ADSORPTION / BANGLEN SERIES SOILS/ LEAD

WASITTEE UDCHACHONE : LEAD ADSORPTION OF BANGLEN SERIES SOILS.

THESIS ADVISORS : CHAOVAYUT PHORNPIMOLTHAPE, M.S. I.E. (Operations Research), SUDHIN YOOSOOK, D.Tech. (Env. Engineer), KRISANA TEANKAPRASITH, M.S. (Env.H.), UDOMSAK KHONGMUANG, M.S. (Env. Eng.). 125 p. ISBN 974-04-2044-3

Adsorption of Lead (Pb) by Banglen Series soils including the influence of pH and organic matter on Lead adsorption was investigated in this study.

Soil samples used in the study were top soils taken from Amphoe Banglen in Nakornpathom province. General physical and chemical characteristics of soils were analyzed prior to adsorption study performed. Batch method adsorption study was used to study the lead adsorption of the soils with original characteristics as well as pH and organic matter adjusted soils. The experiments to investigate pH influence on lead adsorption of soils were undertaken at pH 4.5, 6.7 (original pH) and 7.5. The experiments to study the influence of organic matter on lead adsorption were undertaken at organic matter level 3 % (original), 4 % and 5 %.

The results indicated that Banglen Series Soils could be identified as Silty Clay soils. Soil reaction was considered medium according to its pH of 6.7. Organic content was moderately high (3%) and CEC was 32.40 meq/100 g, which is considered very high. It was found that Freundlich was the best fit equation for all the experiments. The curve, according to Freundlich's equation exhibits that there is no single point indicator for completion of the process. A lead adsorption study of an original soil indicated that the soils has a very high potential for adsorption of lead. The adsorption isotherm curve could be classified as "H" type. Average K was 5.98 and average  $1/n$  was 0.60. The study of pH effect on lead adsorption showed a significant direct relation between soil solution pH and K value that the higher the pH level the greater the adsorption capacity (K). The results also indicated a low significant reverse relation between pH level and  $1/n$ . The adsorption isotherm curve at pH 4.5 was considered to be similar to the "L" type and at pH 6.7 and 7.5 was considered to be "H" type.

Results from the study of organic matter influence indicated a significant direct relation between soil organic matter and K value. However, it was not found a relation between organic matter and  $1/n$ . Adsorption Isotherms found could be identified as "H" type in all organic matter experiments, however it was found that the higher organic matter content, the higher slope or adsorption capacity.

## สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	ก
บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
สารบัญตาราง	ฉ
สารบัญภาพ	ญ
บทที่	
1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา	3
1.3 สมมติฐานของการวิจัย	3
1.4 ขอบเขตของการวิจัย	4
1.5 ตัวแปรที่ใช้ในการวิจัย	4
1.6 คำนิยามศัพท์ที่เกี่ยวข้องกับการวิจัย	5
1.7 กรอบแนวคิดการวิจัย	7
2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	8
2.1 ดิน	8
2.2 ระบบการจำแนกดินในประเทศไทย	13
2.3 คุณสมบัติทั่วไปของดินชุดบางเลน	16
2.4 ภาวะมลพิษของดิน	16
2.5 ตะกั่วในดิน	17
2.6 ประโยชน์ของตะกั่ว	18
2.7 ปริมาณตะกั่วในดินและพืช	19
2.8 แหล่งที่มาและการปนเปื้อนตะกั่วในดิน	21

## สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
2.9 ผลลัพธ์การปนเปื้อน	25
2.10 พิษของตะกั่วต่อร่างกาย	26
2.11 การดูดซับธาตุโลหะในดิน	27
2.12 ลักษณะนิสัยของตะกั่วในดิน	39
2.13 ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อลักษณะนิสัยของโลหะไอออนบวกในดิน	40
2.14 การปรับปรุงฟื้นฟูคุณภาพดินที่ปนเปื้อนโลหะหนัก	45
3 ขั้นตอนการวิจัย	47
3.1 รูปแบบการวิจัย	47
3.2 วัสดุ อุปกรณ์และสารเคมีที่ใช้ในการวิจัย	47
3.3 สถานที่ดำเนินการวิจัย	49
3.4 วิธีดำเนินการวิจัย	49
4 ผลการวิจัย	54
4.1 คุณสมบัติทั่วไปของดินชุดบางเลน	54
4.2 การศึกษาการดูดซับตะกั่วของดิน	54
4.3 การศึกษาผลของค่าพีเอชต่อการดูดซับตะกั่วของดิน	61
4.4 การศึกษาผลของปริมาณอินทรีย์วัตถุต่อการดูดซับตะกั่วของดิน	67
4.5 ความสัมพันธ์ของค่าพีเอชและปริมาณอินทรีย์วัตถุกับความสามารถในการดูดซับตะกั่วของดิน	77
5 การอภิปรายผล	79
5.1 การศึกษาการดูดซับตะกั่วของดินชุดบางเลนในสภาพธรรมชาติ	79
5.2 การศึกษาผลของค่าพีเอชต่อการดูดซับตะกั่วของดิน	80
5.3 การศึกษาผลของปริมาณอินทรีย์วัตถุต่อการดูดซับตะกั่วของดิน	83
6 สรุปและข้อเสนอแนะ	86
-6.1 สรุป	86
6.2 ข้อจำกัดในการวิจัย	88
6.3 ข้อเสนอแนะที่ได้จากการวิจัยในครั้งนี้	89
6.4 ข้อเสนอแนะสำหรับการวิจัยครั้งต่อไป	89

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
รายการอ้างอิง	91
ภาคผนวก	
ก. วิธีวิเคราะห์คุณสมบัติทั่วไปของดิน	96
ข. การปรับปริมาณอินทรีย์วัตถุในดิน	105
ค. ผลการทดลอง	107
ง. สมการการดูดซับของ Freundlich และ Langmuir ของแต่ละ การทดลอง	117
จ. ภาพถ่ายประกอบ	120
ประวัติผู้วิจัย	125
Executive Summary	126

## สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	ปริมาณตะกั่วในดินชั้นบนชนิดต่างๆ (ppm)	19
2	ปริมาณตะกั่วในดินชั้นบนที่มีการปนเปื้อน (ppm)	20
3	คุณสมบัติของดิน	38
4	ความสามารถของโลหะในการถูกดูดซับโดยดินชนิดต่างๆ	40
5	แสดงคุณสมบัติทั่วไปของดินชุดบางเลน	55
6	สรุปค่า $K$ และ $1/n$ ของ Freundlich สำหรับดินชุดบางเลนที่ระดับพีเอช ต่าง ๆ	58
7	สรุปค่า $K$ และ $1/n$ ของ Freundlich สำหรับดินชุดบางเลนที่ปริมาณ อินทรีย์วัตถุระดับต่าง ๆ	68
8	สรุปค่าการวิเคราะห์ทางสถิติ (Simple Correlation Coefficient)	78

## สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
1 กรอบแนวคิดการวิจัย	7
2 ประเภทของหน่วยโครงสร้างดิน	10
3 ไอโซเทอมของการดูดซับที่พบทั่วไป	30
4 รูปแบบของ Adsorption Isotherm จาก (a) สมการ Langmuir (b) สมการ Freundlich	34
5 สภาพเคลื่อนที่ได้ของ ไอออนบวกในดิน	38
6 สภาพเคลื่อนที่ได้ของ ไอออนลบในดิน	39
7 ผลของระดับพีเอชระดับการดูดซับตะกั่ว ทองแดง สังกะสี และ นิกเกิล สูงสุดในดิน Dekalb และ Hagerstown ชั้น A และ B	42
8 การดูดซับซิลิเกตไนท์ของดิน 5 ชนิด	42
9 การดูดซับทองแดง ( $50 \text{ mmol m}^{-3}$ (50mM)) ของ Na-Montmorillonite ในกรณีที่มีและไม่มีสารสกัดจากกากตะกอนน้ำโสโครก	44
10 แผนภูมิการศึกษาการดูดซับตะกั่วของดิน	53
11 เส้นไอโซเทอมการดูดซับตะกั่วของดินชุดบางเลนที่ระดับพีเอชต่างๆ (ซ้ำที่ 1)	56
12 เส้นไอโซเทอมการดูดซับตะกั่วของดินชุดบางเลนที่ระดับพีเอชต่างๆ (ซ้ำที่ 2)	56
13 เส้นไอโซเทอมการดูดซับตะกั่วของดินชุดบางเลนที่ระดับพีเอชต่างๆ (ซ้ำที่ 3)	57
14 Freundlich Adsorption Isotherm ที่ระดับพีเอช 6.7 (ซ้ำที่ 1)	59
15 Freundlich Adsorption Isotherm ที่ระดับพีเอช 6.7 (ซ้ำที่ 2)	59
16 Freundlich Adsorption Isotherm ที่ระดับพีเอช 6.7 (ซ้ำที่ 3)	59
17 Langmuir Adsorption Isotherm ที่ระดับพีเอช 6.7 (ซ้ำที่ 1)	60
18 Langmuir Adsorption Isotherm ที่ระดับพีเอช 6.7 (ซ้ำที่ 2)	60
19 Langmuir Adsorption Isotherm ที่ระดับพีเอช 6.7 (ซ้ำที่ 3)	60
20 Freundlich Adsorption Isotherm ที่ระดับพีเอช 4.5 (ซ้ำที่ 1)	62
21 Freundlich Adsorption Isotherm ที่ระดับพีเอช 4.5 (ซ้ำที่ 2)	62

## สารบัญภาพ(ต่อ)

ภาพที่		หน้า
22	Freundlich Adsorption Isotherm ที่ระดับพีเอช 4.5 (ซ้ำที่ 3)	62
23	Langmuir Adsorption Isotherm ที่ระดับพีเอช 4.5 (ซ้ำที่ 1)	63
24	Langmuir Adsorption Isotherm ที่ระดับพีเอช 4.5 (ซ้ำที่ 2)	63
25	Langmuir Adsorption Isotherm ที่ระดับพีเอช 4.5 (ซ้ำที่ 3)	63
26	Freundlich Adsorption Isotherm ที่ระดับพีเอช 7.5 (ซ้ำที่ 1)	64
27	Freundlich Adsorption Isotherm ที่ระดับพีเอช 7.5 (ซ้ำที่ 2)	65
28	Freundlich Adsorption Isotherm ที่ระดับพีเอช 7.5 (ซ้ำที่ 3)	65
29	Langmuir Adsorption Isotherm ที่ระดับพีเอช 7.5 (ซ้ำที่ 1)	66
30	Langmuir Adsorption Isotherm ที่ระดับพีเอช 7.5 (ซ้ำที่ 2)	66
31	Langmuir Adsorption Isotherm ที่ระดับพีเอช 7.5 (ซ้ำที่ 3)	66
32	เส้น ไอโซเทอมการดูดซับตะกั่วของดินหุคบางเลนที่ปริมาณอินทรีย์วัตถุ ระดับต่างๆ (ซ้ำที่ 1)	68
33	เส้น ไอโซเทอมการดูดซับตะกั่วของดินหุคบางเลนที่ปริมาณอินทรีย์วัตถุ ระดับต่างๆ (ซ้ำที่ 2)	69
34	เส้น ไอโซเทอมการดูดซับตะกั่วของดินหุคบางเลนที่ปริมาณอินทรีย์วัตถุ ระดับต่างๆ (ซ้ำที่ 3)	69
35	Freundlich Adsorption Isotherm ที่ปริมาณอินทรีย์วัตถุร้อยละ 3 (ซ้ำที่ 1)	70
36	Freundlich Adsorption Isotherm ที่ปริมาณอินทรีย์วัตถุร้อยละ 3 (ซ้ำที่ 2)	70
37	Freundlich Adsorption Isotherm ที่ปริมาณอินทรีย์วัตถุร้อยละ 3 (ซ้ำที่ 3)	70
38	Langmuir Adsorption Isotherm ที่ปริมาณอินทรีย์วัตถุร้อยละ 3 (ซ้ำที่ 1)	71
39	Langmuir Adsorption Isotherm ที่ปริมาณอินทรีย์วัตถุร้อยละ 3 (ซ้ำที่ 2)	71
40	Langmuir Adsorption Isotherm ที่ปริมาณอินทรีย์วัตถุร้อยละ 3 (ซ้ำที่ 3)	71
41	Freundlich Adsorption Isotherm ที่ปริมาณอินทรีย์วัตถุร้อยละ 4 (ซ้ำที่ 1)	73
42	Freundlich Adsorption Isotherm ที่ปริมาณอินทรีย์วัตถุร้อยละ 4 (ซ้ำที่ 2)	73
43	Freundlich Adsorption Isotherm ที่ปริมาณอินทรีย์วัตถุร้อยละ 4 (ซ้ำที่ 3)	73
44	Langmuir Adsorption Isotherm ที่ปริมาณอินทรีย์วัตถุร้อยละ 4 (ซ้ำที่ 1)	74

## สารบัญภาพ(ต่อ)

ภาพที่		หน้า
45	Langmuir Adsorption Isotherm ที่ปริมาณอินทรีย์วัตถุร้อยละ 4 (ซ้ำที่ 2)	74
46	Langmuir Adsorption Isotherm ที่ปริมาณอินทรีย์วัตถุร้อยละ 4 (ซ้ำที่ 3)	74
47	Freundlich Adsorption Isotherm ที่ปริมาณอินทรีย์วัตถุร้อยละ 5 (ซ้ำที่ 1)	75
48	Freundlich Adsorption Isotherm ที่ปริมาณอินทรีย์วัตถุร้อยละ 5 (ซ้ำที่ 2)	75
49	Freundlich Adsorption Isotherm ที่ปริมาณอินทรีย์วัตถุร้อยละ 5 (ซ้ำที่ 3)	75
50	Langmuir Adsorption Isotherm ที่ปริมาณอินทรีย์วัตถุร้อยละ 5 (ซ้ำที่ 1)	76
51	Langmuir Adsorption Isotherm ที่ปริมาณอินทรีย์วัตถุร้อยละ 5 (ซ้ำที่ 2)	76
52	Langmuir Adsorption Isotherm ที่ปริมาณอินทรีย์วัตถุร้อยละ 5 (ซ้ำที่ 3)	76



## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ตะกั่วเป็น โลหะหนักที่มีความเป็นพิษอย่างรุนแรงต่อสิ่งมีชีวิตและระบบนิเวศน์ นอกจากนี้ยังสามารถสะสมอยู่ในดินและตะกอน ได้ดีเนื่องจากมีความสามารถในการละลายได้ต่ำ และทนทานต่อการย่อยสลายของจุลินทรีย์ ทำให้มันคงอยู่ในดินได้นานเมื่อเทียบกับสารมลพิษชนิดอื่น การปนเปื้อนของตะกั่วลงสู่ดินนั้นเกิดได้จากหลายแหล่งด้วยกัน ได้แก่ จากโรงงานอุตสาหกรรม การทำเหมืองแร่ โรงงานถลุง/หลอมตะกั่ว การเผาไหม้ น้ำมัน สารเคมีในการเกษตร ของเหลือใช้จากโรงงานและจากชุมชน ตลอดจนการใช้ที่ดินเป็นที่ถมวัสดุเหลือใช้ เป็นต้น

สำหรับในประเทศไทยแหล่งกำเนิดของการปนเปื้อนตะกั่วลงสู่ดินที่สำคัญแหล่งหนึ่ง ได้แก่ โรงงานหลอมตะกั่วจากแบตเตอรี่เก่า ซึ่งจากการศึกษาพบว่า ในประเทศไทยมีโรงงานประเภทดังกล่าวตั้งอยู่ที่จังหวัดราชบุรี ระยอง สระบุรี นครปฐม นครสวรรค์และสมุทรปราการ จำนวนรวม ทั้งสิ้น 7 โรง และมีสถานที่ที่เคยใช้เป็นที่หลอมตะกั่วอีก 3 แห่งที่จังหวัดราชบุรี การหลอมตะกั่วจากแบตเตอรี่เก่านั้นเป็นกิจการที่นำกากวัสดุเหลือใช้มาแปรสภาพเพื่อใช้ประโยชน์ใหม่ ประเภทหนึ่งซึ่งจะช่วยลดปริมาณกากวัสดุเหลือใช้หรือกากของเสียจากแบตเตอรี่เก่าอัน ได้แก่ แผ่นธาตุ เศษชิ้นส่วนประเภทพลาสติกที่สามารถนำกลับไปใช้ประโยชน์ใหม่ วัสดุเหลือใช้ เปลือก และชิ้นส่วนแบตเตอรี่อื่นๆ ได้เป็นอย่างมาก อย่างไรก็ตามกิจการดังกล่าวเป็นกิจการที่ก่อให้เกิดปัญหามลพิษและส่งผลกระทบต่อสุขภาพของประชาชนตลอดจนสภาพแวดล้อมทั่วไป กระทรวงอุตสาหกรรมจึงได้วางหลักเกณฑ์ในการดำเนินการสำหรับผู้ประกอบการกิจการ โรงงานหลอมตะกั่วจากแบตเตอรี่เก่าไว้ ดังปรากฏในประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม เรื่อง หลักเกณฑ์สำหรับโรงงานหลอมตะกั่วจากแบตเตอรี่เก่า ประกาศ ณ วันที่ 28 มีนาคม พ.ศ. 2540 (1) แต่เนื่องจาก โรงงานหลอมตะกั่วจากแบตเตอรี่เก่าที่มีอยู่ในปัจจุบันส่วนใหญ่ได้เปิดดำเนินการมาก่อนที่ประกาศดังกล่าวจะมีผลบังคับใช้ สภาพที่ตั้งและสภาพแวดล้อมของบาง โรงงานจึงไม่เป็นไปตามหลักเกณฑ์ฯ ซึ่งกำหนด

ไว้ว่าสภาพที่ตั้งและสภาพแวดล้อมของโรงงานหลอมตะกั่วจากแบคเตอร์เก่าจะต้องเป็นไปตามหลักเกณฑ์ดังต่อไปนี้

1. ต้องไม่มีบึง บ่อ หรือแหล่งน้ำธรรมชาติภายในบริเวณโรงงาน ไม่เป็นพื้นที่ลุ่มน้ำท่วมถึงและต้องอยู่ห่างจากแหล่งน้ำธรรมชาติ(ผิวดิน) เช่น แม่น้ำลำคลองหรือแหล่งน้ำสาธารณะ ประโยชน์ อย่างน้อย 1 กิโลเมตร
2. โรงงานต้องตั้งอยู่ในบริเวณที่มีระดับน้ำใต้ดินในชั้นที่ตื้นที่สุดจากระดับผิวดินไม่น้อยกว่า 10 เมตร
3. ที่ตั้งโรงงานต้องห่างจาก โรงเรียน วัด โรงพยาบาล ไม่น้อยกว่า 2 กิโลเมตร
4. ต้องไม่เป็นพื้นที่ใช้ประโยชน์ทางด้านเกษตรกรรมและกสิกรรม

สภาพที่ตั้งและสภาพแวดล้อมที่ไม่เหมาะสมดังกล่าวจึงอาจก่อให้เกิดผลกระทบต่อคุณภาพสิ่งแวดล้อมและสุขภาพของประชาชนในพื้นที่ใกล้เคียงได้มากและควรมีการติดตามตรวจสอบหรือเฝ้าระวังอย่างเข้มงวดเนื่องจากตะกั่วเป็นสารอันตรายที่สามารถสะสมในร่างกายคนได้ยาวนานถึง 16-27 ปี และอาจก่อให้เกิดอันตรายต่อระบบเลือด ระบบประสาท ไตและระบบสืบพันธุ์ได้ (2)

การดำเนินงานของโรงงานหลอมตะกั่วจากแบคเตอร์เก่าอาจก่อให้เกิดมลพิษจากตะกั่วได้หลายทางด้วยกัน ได้แก่ การระบายฝุ่นตะกั่วออกมาทางปล่องควัน การปนเปื้อนของตะกั่วออกมากับน้ำทิ้ง ตะกรัน (Slag) ที่เกิดจากการหลอม กากตะกอน (Sludge)จากระบบบำบัดน้ำเสีย กากขี้ตะกั่ว(Dross)และกากตะกั่วอื่นๆ ซึ่งท้ายที่สุดก็จะสะสมลงสู่ดิน ซึ่งสารประกอบของตะกั่วมีสภาพละลายได้ดีมากและคงทนต่อการสลายตัวด้วยกิจกรรมของจุลินทรีย์ดิน จึงยังคงอยู่ในดินได้นาน จากการศึกษาในประเทศกรีซ พบว่า ในสภาพดินที่ราบสูงที่มีภูมิสัมฐานที่คงตัว การปนเปื้อนของตะกั่วในดินจะยังคงอยู่ในดินนับได้เป็นล้านปี (3)

การศึกษาการดูดซับตะกั่วของดินมีความสำคัญเนื่องจากสัดส่วนของตะกั่วที่อยู่ในสารละลายดิน (Soil Solution) กับตะกั่วที่ถูกดูดซับอยู่บริเวณพื้นผิวของคอลลอยด์มักเป็นปัจจัยหลักที่ควบคุมการเคลื่อนที่และ Bioavailability ของตะกั่วในดิน (4) การศึกษาการดูดซับตะกั่วทำให้ทราบถึงความสามารถของดินในการดูดซับตะกั่วไว้ ซึ่งโดยทั่วไปการเคลื่อนย้ายในแนวตั้งของโลหะหนักจะเกิดขึ้นน้อยหากปริมาณโลหะหนักที่ปนเปื้อนยังอยู่ในขีดความสามารถของดินที่จะดูดซับไว้ได้ (5) หากเกิดการเคลื่อนย้ายในแนวตั้งของโลหะหนักก็หมายความว่ามีโอกาสที่จะเกิดการปนเปื้อนต่อน้ำใต้ดิน โดยเฉพาะอย่างยิ่งหากระดับน้ำใต้ดินอยู่ในระดับตื้น นอกจากนี้ปริมาณโลหะหนักที่เกินขีด

ความสามารถของดินที่จะดูดซับไว้ได้บางส่วนจะละลายออกมาในสารละลายดินซึ่งเป็นรูปที่สิ่งมีชีวิตสามารถดูดซึมได้ ทำให้มีความเสี่ยงที่จะเกิดความเป็นพิษสูงขึ้น การศึกษาการดูดซับโลหะหนักของดินยังมีความสำคัญในการศึกษาประเมินพื้นที่ (Site Assessment) การออกแบบวิธีการฟื้นฟูพื้นที่ที่ดินมีการปนเปื้อน โลหะหนักและการใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ทำนายการแพร่กระจายของโลหะหนักในดินและน้ำใต้ดินอีกด้วย (6,7,8)

ในการศึกษาครั้งนี้ มุ่งเน้นความสนใจไปในชุดดินบริเวณใกล้เคียงกับโรงงานหลอมตะกั่วจากแบตเตอรี่เก่า เนื่องจากเป็นพื้นที่ที่มีโอกาสเสี่ยงต่อการปนเปื้อนตะกั่วได้มาก โดยจะเลือกทำการศึกษาดูดซับตะกั่วของดินชุดบางเลน ในเขตอำเภอบางเลน จังหวัดนครปฐม เนื่องจากบริเวณพื้นที่ที่จัดอยู่ในชุดดินนี้ ส่วนใหญ่มีการใช้พื้นที่ในการทำเกษตรกรรม มีระดับน้ำใต้ดินอยู่ในระดับตื้น นอกจากนี้ประชาชนบางส่วนยังใช้น้ำใต้ดินในการอุปโภค พร้อมกันนี้จะทำการศึกษาผลของค่าพีเอชและปริมาณอินทรีย์วัตถุที่มีต่อการดูดซับตะกั่วในดินดังกล่าว

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

### 1.2.1 วัตถุประสงค์ทั่วไป

ศึกษาดูดซับตะกั่วของดินชุดบางเลน

### 1.2.2 วัตถุประสงค์เฉพาะ

1. ศึกษาการดูดซับตะกั่วของดินชุดบางเลนที่มีค่าพีเอชต่างกัน
2. ศึกษาการดูดซับตะกั่วของดินชุดบางเลนที่มีปริมาณอินทรีย์วัตถุต่างกัน

## 1.3 สมมติฐานของการวิจัย

1. ความสามารถในการดูดซับตะกั่วของดินชุดบางเลนมีความสัมพันธ์กับค่าพีเอชของดิน โดยดินที่มีค่าพีเอชสูงสามารถดูดซับตะกั่วได้ดีกว่าดินที่มีค่าพีเอชต่ำ

2. ความสามารถในการดูดซับตะกั่วของดินชุดบางเลนมีความสัมพันธ์กับปริมาณอินทรีย์วัตถุในดิน โดยดินที่มีปริมาณอินทรีย์วัตถุสูงสามารถดูดซับตะกั่วได้ดีกว่าดินที่มีปริมาณอินทรีย์วัตถุต่ำ

#### 1.4 ขอบเขตของการวิจัย

1. ทำการศึกษาการดูดซับตะกั่วของดินชุดบางเลน ในเขตอำเภอบางเลน จังหวัดนครปฐม
2. ทำการศึกษาการดูดซับตะกั่วของดินชั้นบน และผลของค่าพีเอชและปริมาณอินทรีย์วัตถุต่อการดูดซับตะกั่วของดินโดยใช้การทดลองแบบ Batch Method Adsorption Study โดยใช้ความเข้มข้นของตะกั่วในสารละลายเริ่มต้น 6 ระดับ ได้แก่ 0 มิลลิกรัมต่อลิตร, 282.40-361.84 มิลลิกรัมต่อลิตร, 564.80-723.68 มิลลิกรัมต่อลิตร, 847.20-1,085.52 มิลลิกรัมต่อลิตร, 1,129.60-1,447.36 มิลลิกรัมต่อลิตร และ 1,482.60-1,899.66 มิลลิกรัมต่อลิตร
3. ค่าพีเอชที่ทำการศึกษาคือ พีเอช 4.5, 6.7 และ 7.5 โดยใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เจือจางและกรดไฮโดรคลอริกเจือจางในการปรับค่าพีเอชให้อยู่ในระดับที่ต้องการศึกษา
4. ปริมาณอินทรีย์วัตถุที่ทำการศึกษาคือ ร้อยละ 3, ร้อยละ 4 และร้อยละ 5 โดยดินตามสภาพธรรมชาติมีปริมาณอินทรีย์วัตถุร้อยละ 3 การปรับปริมาณอินทรีย์วัตถุในดินให้เป็นร้อยละ 4 และร้อยละ 5 ใช้ปุ๋ยพืชสดที่ผ่านการหมักแล้วซึ่งจำหน่ายในท้องตลาดทั่วไปมาผึ่งแห้งผสมในตัวอย่างดินเพื่อให้มีปริมาณอินทรีย์วัตถุในระดับที่ต้องการศึกษา

#### 1.5 ตัวแปรที่ใช้ในการวิจัย

##### 1.5.1 ตัวแปรอิสระ

- ค่าพีเอชของดิน
- ปริมาณอินทรีย์วัตถุในดิน

##### 1.5.2 ตัวแปรตาม

- ความสามารถในการดูดซับตะกั่วของดิน

### 1.5.3 ตัวแปรควบคุม

- ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายตะกั่ว

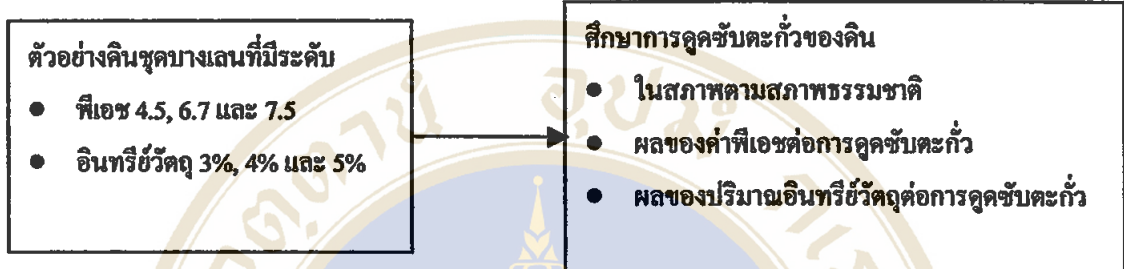
## 1.6 คำนิยามศัพท์ที่เกี่ยวข้องกับการวิจัย

1. ดินรูดบางเลน หมายถึง ดินที่ถูกจำแนกตามรายงานการสำรวจดินและแผนที่ดินจัดทำโดยกรมพัฒนาที่ดิน(14) ว่ามีคุณสมบัติจัดอยู่ในชุดดินบางเลน พบในอำเภอบางเลน จังหวัดนครปฐม รวมถึงดินที่พบในท้องที่อื่นที่มีคุณสมบัติใกล้เคียงกับชุดดินบางเลน ดินรูดบางเลนที่กล่าวถึงในการวิจัยนี้หมายถึงดินรูดบางเลนที่เก็บตัวอย่างจากอำเภอบางเลน จังหวัดนครปฐม มีดินชั้นบนลึกไม่เกิน 30 เซนติเมตร เนื้อดินเป็นดินเหนียวปนซิลต์ ปฏิกริยาดินเป็นกลาง โดยมีค่าพีเอชประมาณ 6.7 ปริมาณอินทรีย์วัตถุสูงปานกลางคือประมาณร้อยละ 3 มีค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนแคตไอออน (CEC)สูง กล่าวคือประมาณ 32.40 meq/ 100 g
2. สารละลายดิน (Soil Solution) หมายถึง ส่วนที่เป็นของเหลวในดินรวมทั้งตัวถูกละลาย (Solute) ด้วย (9)
3. มลพิษทางดิน ( Soil Pollution) หมายถึง ภาวะการปนเปื้อนของดินด้วยสารมลพิษมากเกินไปซึ่งจำกัด ขนมีอันตรายต่อสุขภาพ อนามัย ตลอดจนการเจริญเติบโตของมนุษย์และสิ่งมีชีวิตทั้งพืชและสัตว์ (2)
4. การดูดซับ (Adsorption) หมายถึง กระบวนการที่อะตอม โมเลกุลหรือไอออนของสาร (Adsorbate) ถูกดูดซับไว้ที่พื้นผิวของอนุภาคดิน (Adsorbent) ด้วยแรงทางเคมีหรือฟิสิกส์ (9)
5. สารที่ถูกดูดซับ (Adsorbate) หมายถึง อะตอม โมเลกุล หรือไอออนของสารที่ถูกดูดซับไว้
6. สารดูดซับ (Adsorbent) หมายถึง สารที่มีอะตอม โมเลกุลหรือไอออนของสารที่ถูกดูดซับเข้ามายึดเกาะอยู่บริเวณพื้นผิวอนุภาคในดินนี้ ได้แก่ อนุภาคดิน
7. Batch Method Adsorption Study เป็นวิธีการหนึ่งที่ใช้ในการศึกษาความสามารถในการดูดซับสารของดิน โดยใช้วิธีเขย่าดินที่น้ำหนักคงที่กับสารละลายปริมาตรหนึ่งที่แปรผันความเข้มข้นหรือใช้สารละลายที่มีความเข้มข้นคงที่แต่แปรผันอัตราส่วนระหว่างน้ำหนักดินต่อปริมาตรสารละลาย โดยทำการเขย่าให้เกิดการดูดซับจนถึงสภาวะสมดุล (6)
8. ความเข้มข้นของสารที่สภาวะสมดุล (Equilibrium Concentration,  $C_e$ ) หมายถึง ความเข้มข้นของสาร ในสารละลายดิน ณ จุดที่อนุภาคดินเกิดการดูดซับสารจนถึงสภาวะสมดุล

9. ปริมาณของสารที่ถูกดูดซับ (Amount Adsorped ,  $Q_t$ ) หมายถึง ปริมาณของสารในสารละลายเริ่มต้นลบด้วยปริมาณสารในสารละลายดินที่สภาวะสมดุล
10. ไอโซเทอมของการดูดซับ (Adsorption Isotherm) หมายถึง กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของสารที่ถูกดูดซับไว้ด้วยอนุภาคดินกับความเข้มข้นของสารในสารละลายดินที่สภาวะสมดุล โดยการดูดซับเกิดในสภาวะที่มีอุณหภูมิคงที่ (10)
11. ไอโซเทอมชนิดตัวเอส (S-curve Isotherm) หมายถึง ไอโซเทอมของการดูดซับที่เส้นกราฟมีลักษณะความชันต่ำในช่วงเริ่มต้นและเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของสารในสารละลายดิน เส้นกราฟจะมีลักษณะเป็น S-shape กล่าวคือมีลักษณะคล้ายอักษรตัวเอส (38)
12. ไอโซเทอมชนิดตัวแอล (L-curve (Langmuir) Isotherm) หมายถึง ไอโซเทอมของการดูดซับที่เส้นกราฟมีความชันสูงมากในช่วงเริ่มต้นและค่อยๆลดลงเมื่อความเข้มข้นของสารในสารละลายดินเพิ่มขึ้น (38)
13. ไอโซเทอมชนิดตัวเอช (H-curve (High affinity) Isotherm) หมายถึง ไอโซเทอมของการดูดซับที่เส้นกราฟมีความชันสูงมากในช่วงเริ่มต้น (เมื่อเปรียบเทียบกับไอโซเทอมชนิดตัวแอล) ลักษณะดังกล่าวแสดงว่าตัวดูดซับมีความสามารถในการดูดซับได้สูงมาก (38)
14. ไอโซเทอมชนิดตัวซี (C-curve (Constant) Isotherm) หมายถึง ไอโซเทอมของการดูดซับที่เส้นกราฟมีความชันคงที่ไม่แปรผันตามความเข้มข้นของสารในสารละลายดิน (38)
15. สัมประสิทธิ์การกระจาย((Soil-Water) Distribution Coefficient,  $K_d$ ) เป็นค่าคงที่ที่ได้จากสมการ Freundlich แสดงถึงอัตราส่วนของปริมาณสารที่ถูกดูดซับต่อน้ำหนักแห้งของดินกับความเข้มข้นของสารในสารละลายดินที่สภาวะสมดุล (6) เป็นค่าที่ใช้บอกถึงความสามารถในการดูดซับสารของดิน
16.  $1/n$  หมายถึง ค่าคงที่ (Correction Factor) ของสมการ Freundlich สามารถนำมาใช้อธิบายลักษณะการดูดซับที่เกิดขึ้นได้
17. ความจุแลกเปลี่ยนแคตไอออน ( Cation Exchange Capacity, CEC) หมายถึง ปริมาณแคตไอออนแลกเปลี่ยน ได้ทั้งหมดที่ดินสามารถดูดซับไว้ได้ (2)

## 1.7 กรอบแนวคิดการวิจัย

สำหรับกรอบแนวคิดในการวิจัยได้แสดงไว้ในภาพที่ 1



ภาพที่ 1 กรอบแนวคิดการวิจัย

## บทที่ 2

### ทฤษฎีและงานวิจัยที่เก็วข้อง

#### 2.1 ดิน

##### 2.1.1 ความหมายและส่วนประกอบ

ดินเป็นทรัพยากรธรรมชาติ เกิดขึ้นจากผลของการแปรสภาพหรือผุพังของหิน และแร่กับอินทรีย์วัตถุผสมคลุกเคล้ากัน เกิดขึ้นเป็นชั้นบางๆ ห่อหุ้มผิวโลก (2) โดยทั่วไปดินเกิดจากการสลายตัวผุพังของวัตถุดินกำเนิด ซึ่งกระบวนการเกิดดินนี้เป็นกระบวนการร่วมระหว่างกระบวนการทางธรณี ทางอุทกและทางชีวะ ส่วนการผสมคลุกเคล้านั้นเป็นการผสมคลุกเคล้าระหว่างส่วนของหินและแร่กับอินทรีย์วัตถุเกิดเป็นชั้นดินต่างๆ

ดินประกอบด้วยองค์ประกอบหลัก 4 ส่วนคือ 1) อนินทรีย์วัตถุ (Inorganic Matter) เป็นส่วนที่เกิดจากการสลายตัวผุพังของหินและแร่ 2) อินทรีย์วัตถุ (Organic Matter) ได้แก่ ส่วนที่เกิดจากการเน่าเปื่อยผุพังของเศษเหลือพืชและสัตว์ที่ทับถมบนดิน 3) น้ำ เป็นส่วนที่พบในช่องของดิน น้ำที่อยู่ในดินไม่ใช่ น้ำบริสุทธิ์แต่มีไอออนของธาตุต่างๆ ปนอยู่จึงนิยมเรียกว่า สารละลายดิน (Soil Solution) และ 4) อากาศซึ่งอยู่ในช่องว่างดินเช่นกัน

##### 2.1.2 สมบัติด้านฟิสิกส์

###### 2.1.2.1 เนื้อดิน (Soil Texture)

หมายถึง สัดส่วนโดยน้ำหนักของกลุ่มอนุภาคที่มีขนาดเล็กกว่า 2 มิลลิเมตร ซึ่งประกอบด้วยทราย (Sand) ทรายแป้ง (Silt) และดินเหนียว (Clay) ที่วิเคราะห์ได้ในห้องปฏิบัติการ (9) เป็นประเภทโคลนขึ้นอยู่กับสมบัติเด่นของกลุ่มขนาดหลักในดินชนิดนั้น ในทางปฏิบัตินิยมจัดกลุ่มประเภทเนื้อดินเป็น 3 กลุ่ม คือ (2)

**ดินเนื้อหยาบ (Coarse-Textured Soils) หรือดินทราย (Sandy Soils)** หมายถึง ดินที่แสดงสมบัติเด่นของอนุภาคในกลุ่มขนาดทรายในระดับความเด่นชัดที่มากกว่าสมบัติเด่นของอนุภาคในกลุ่มขนาดหลักอีก 2 กลุ่มมาก ประเภทเนื้อดินที่จัดอยู่ในกลุ่มนี้ ได้แก่ ทราย (Sand) และทรายร่วน (Loamy Sand)

**ดินร่วน (Loamy Soils)** หมายถึง ดินที่แสดงสมบัติเด่นของอนุภาคในกลุ่มขนาดหลักทั้งสามกลุ่มในระดับความเด่นชัดที่ไม่แตกต่างกันหรือแตกต่างกันเพียงเล็กน้อย ดินที่จัดอยู่ในกลุ่มนี้ ได้แก่

**ดินเนื้อค่อนข้างหยาบ (Moderately Coarse-Textured Soils)** ซึ่งได้แก่ดินที่มีประเภทเนื้อดินเป็นร่วนปนทราย (Sandy Loam)

**ดินเนื้อปานกลาง (Medium-Textured Soils)** ซึ่งได้แก่ดินที่มีประเภทเนื้อดินเป็นดินร่วน (Loam) ร่วนปนทรายแป้ง (Silt Loam) และทรายแป้ง (Silt)

**ดินเนื้อค่อนข้างละเอียด (Moderately Fine-Textured Soils)** ซึ่งได้แก่ ดินที่มีประเภทเนื้อดินเป็น ดินร่วนเหนียว (Clay Loam) ร่วนเหนียวปนทราย (Sandy Clay Loam) และร่วนเหนียวปนทรายแป้ง (Silty Clay Loam)

**ดินเนื้อละเอียด (Fine-textured Soils) หรือ ดินเหนียว (Clayey Soils)** หมายถึงดินที่แสดงสมบัติเด่นของอนุภาคในกลุ่มขนาดดินเหนียวในระดับความเด่นชัดที่มากกว่าสมบัติเด่นของอนุภาคในกลุ่มขนาดหลักอีก 2 กลุ่มมาก ประเภทเนื้อดินที่จัดอยู่ในกลุ่มนี้ ได้แก่ เหนียวปนทราย (Sandy Clay) เหนียวปนทรายแป้ง (Silty Clay) และเหนียว (Clay)

### 2.1.2.2 โครงสร้างของดิน (Soil Structure)

อนุภาคของดินส่วนมากไม่ได้ยึดติดกันแต่เชื่อมยึดกับอนุภาคข้างเคียงโดยอิทธิพลของสารเชื่อม (Cementing Agent) กลายเป็นอนุภาคซ้อนหรืออนุภาคทุติยภูมิซึ่ง



ภาพที่ 2 ประเภทของหน่วยโครงสร้างดิน

นิยามเรียกว่า เม็ดดิน (Soil Aggregate) ลักษณะการจัดเรียงและการเชื่อมยึดกันของอนุภาคเดี่ยวของดินเป็นเม็ดดินและลักษณะของการเชื่อมยึดกันของเม็ดดินเหล่านั้น คือสิ่งที่เรียกว่า โครงสร้างของดิน ตัวอย่างของหน่วยโครงสร้างดิน (11) ได้แสดงไว้ในภาพที่ 2

### 2.1.2.3 ความหนาแน่นและความพรุนของดิน (Density and Porosity of Soil)

ความหนาแน่นของดินมี 2 ประการ คือ ความหนาแน่นรวมและความหนาแน่นอนุภาค ความหนาแน่นรวม (Bulk Density) หมายถึง อัตราส่วนระหว่างมวลของดินขณะที่แห้งสนิทกับปริมาตรทั้งหมดของดิน (ปริมาตรของส่วนประกอบทุกส่วนรวมกัน) ส่วนความหนาแน่นอนุภาค (Particle Density) หมายถึง อัตราส่วนระหว่างมวลของดินขณะที่ดินแห้งสนิทกับปริมาตรของส่วนที่เป็นอนุภาคดิน (Soil Particle) เท่านั้น

สำหรับความพรุนของดินนิยามบอกเป็นค่าความพรุนทั้งหมด (Total Porosity) ซึ่งหมายถึงปริมาตรของส่วนที่ไม่ว่างของแข็งในดิน เมื่อคิดเป็นร้อยละของปริมาตรทั้งหมดของดิน

### 2.1.2.4 สี (Colour)

สีของดินเป็นสมบัติที่สามารถมองเห็นได้ชัดเจนกว่าสมบัติอื่นๆ ดินชนิดต่างๆ โดยปกติมักมีสีหรือแนว (Pattern) ของการเปลี่ยนสีภายในหน้าตัดที่เป็นลักษณะเฉพาะตัวไม่เหมือนกับของดินชนิดอื่น นอกจากนี้ดินในชั้นต่างๆ ของหน้าตัดเดียวกันก็มักมีสีที่แตกต่างกัน สีของดินส่วนมากมักมีปริมาณของฮิวมัส ชนิดของสารประกอบของธาตุเหล็กและปริมาณความชื้นที่มีอยู่ในดินเป็นตัวกำหนด อย่างไรก็ตามธาตุอะลูมิเนียมและแร่ดั้งเดิมที่ยังไม่ผุพังในส่วนที่เป็นอนุภาคทรายและส่วนที่เป็นอนุภาคทรายแป้งก็อาจมีผลกระทบต่อสีของดิน

การบอกสีของดินนิยามใช้ระบบสีมันเชลล์ (Munsell Color System) ซึ่งใช้ระดับความสัมพันธ์ของตัวแปร 3 ชนิดคือ สีฐาน (Hue) ค่าสี (Value) และค่ารงค์ (Chroma) การวัดสีจะใช้แผ่นเทียบสีมาตรฐาน เช่น สีดินมีค่า 10 YR 6/4 โดยที่ 10 YR = ค่าสีฐาน 6 = ค่าสี และ 4 = ค่ารงค์

## 2.1.3 สมบัติด้านเคมี

### 2.1.3.1 ค่าความเป็นกรด-ด่างของดิน (Soil pH)

ระดับความเป็นกรด-ด่างของดินจะบอกเป็นค่าพีเอชเช่นเดียวกับน้ำแต่ที่แตกต่างกันเป็นอย่างมากคือ ดินมีความเป็นกรดอยู่ 2 ชนิด คือ กรดจริง (Active Acidity) และกรดแฝง (Potential Acidity) สภาพกรดจริงจะเกิดจากส่วนของไฮโดรเจนไอออนที่ไม่ถูกดูดซับ ซึ่งแสดงด้วยค่าพีเอชของดิน สภาพกรดจริงเป็นส่วนหนึ่งของกรดที่มีบทบาทต่อความสามารถในการละลายได้ของธาตุและความเป็นประโยชน์ของธาตุอาหารพืช ส่วนสภาพกรดแฝงเกิดจากส่วนของไฮโดรเจนไอออนที่ถูกดินดูดซับไว้และสามารถแลกเปลี่ยนได้โดยอาจถูกไอออนอื่นเข้าไปใส่ที่ให้ออกมาอยู่ในสารละลายดิน การบอกปริมาณกรดแฝงนิยมใช้หน่วยเซนติโมลต่อกิโลกรัม

### 2.1.3.2 ความจุแลกเปลี่ยนแคตไอออน (Cation Exchange Capacity – CEC)

การที่ดินมีประจุไฟฟ้าเป็นผลเนื่องมาจากอนุภาคดินเหนียวและอินทรีย์วัตถุในดิน ซึ่งประจุที่เกิดขึ้นส่วนใหญ่เป็นประจุลบ ดินจึงมีความสามารถในการดึงดูดแคตไอออนได้ แคตไอออนที่ถูกดูดซับไว้กับคอลลอยด์ดินเหล่านี้จะสามารถแลกเปลี่ยนกันได้ด้วยแคตไอออนในสารละลายดิน จึงมีชื่อเรียกว่า แคตไอออนแลกเปลี่ยนได้ (Exchangeable Cation) ดังนั้น ความจุแลกเปลี่ยนแคตไอออน จึงหมายถึง ปริมาณแคตไอออนแลกเปลี่ยนได้ทั้งหมดที่ดินสามารถดูดซับไว้ได้ ค่าที่วัดได้มีหน่วยเป็น meq/100 g ซึ่งปัจจุบันนิยมบอกเป็นเซนติโมลต่อกิโลกรัมดินแห้ง

การที่ดินมีแคตไอออนที่ถูกดูดซับสมดุลกับแคตไอออนในสารละลายดิน ทำให้ดินมีสภาพคล้ายสารละลายบัฟเฟอร์ การเปลี่ยนแปลงใดๆ ในดิน เช่น การขกรดค่าพีเอช การใส่  $\text{Na}^+$  ออกจากดิน จึงเป็นไปได้ค่อนข้างน้อยไป เพราะเมื่อแคตไอออนในสารละลายดินมีปริมาณน้อยลงแคตไอออนส่วนที่แลกเปลี่ยนได้จะค่อยๆ ถูกปลดปล่อยจากส่วนที่เป็นของแข็งออกมาสู่ส่วนที่เป็นสารละลายดิน ดินที่มีค่า CEC สูงจึงมีกำลังบัฟเฟอร์สูงด้วย

### 2.1.3.3 สภาพออกซิเดชัน – รีดักชันของดิน

สถานะออกซิเดชัน (Oxidation State) ของดินเป็นผลมาจากการระบายน้ำและอากาศของดิน ซึ่งสภาพอากาศในดินเป็นตัวกำหนดชนิดจุลินทรีย์ดินที่จะเป็นตัวการย่อยสลายสารอินทรีย์และการเปลี่ยนแปลงรูปไนโตรเจนในดิน หากดินมีการระบายอากาศที่ดี การสลายตัวของคาร์บอนอินทรีย์ย่อมจะได้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ แต่หากดินขาดออกซิเจนการสลายตัวจะไม่สมบูรณ์ทำให้ได้กรดอินทรีย์แทน การเปลี่ยนแปลงของไนโตรเจนก็เช่นกัน ไนโตรเจนอินทรีย์จะเปลี่ยนแปลงเป็นแอมโมเนียก่อน หากดินมีการถ่ายเทอากาศดีก็จะเกิดกระบวนการไนตริฟิเคชันโดยจุลินทรีย์ดินซึ่งก็คือการออกซิไดซ์แอมโมเนียเป็นไนเตรต แต่ถ้าดินเกิดขาดออกซิเจน จุลินทรีย์จะใช้ไนเตรตในกระบวนการหายใจได้ก๊าซไนโตรเจน อันเป็นกระบวนการรีดิวส์ไนเตรตนั่นเอง ดังนั้น ศักย์รีดอกซ์ (Redox Potential) ของดินจึงเป็นปัจจัยสำคัญที่กำหนดคพบาพการกระบวนการทางชีวเคมีในดิน

## 2.2 ระบบการจำแนกดินในประเทศไทย

ในปัจจุบันมีระบบการจำแนกดินที่แพร่หลายในเขตต่างๆของโลกหลายระบบ แต่ระบบที่เป็นที่ยอมรับกันในสมัยหนึ่งมีผู้ใช้มากที่สุดคือ ระบบการจำแนกดินของกระทรวงเกษตรสหรัฐอเมริกา (United State Department of Agriculture) ที่เสนอต่อสภาวิทยาศาสตร์ทางดินของโลกในปี ค.ศ. 1938 ที่รู้จักกันในชื่อว่า USDA 1938 แต่ในปัจจุบันระบบที่อยู่ในความสนใจของประเทศต่างๆในโลก คือ ระบบอนุกรมวิธานดิน (Soil Taxonomy) ของสหรัฐอเมริกาและหน่วยดินของแผนที่ดินโลกที่จัดทำขึ้นโดยองค์การอาหารและเกษตรแห่งสหประชาชาติ (FAO/UNESCO Soil Map of the World) ในปี ค.ศ. 1974 และแก้ไขเมื่อ ค.ศ. 1990 ในระดับมาตราส่วน 1:5,000,000 ส่วนระบบอื่นๆนั้น พบว่ามีการใช้แพร่หลายน้อยกว่า

สำหรับประเทศไทยระบบการจำแนกดินที่ใช้จะเป็นระบบของสหรัฐอเมริกามาโดยตลอดตั้งแต่สมัยของระบบ USDA 1938 และได้มีการดัดแปลงตามข้อมูลใหม่ๆ ที่เพิ่มขึ้นในการปรับปรุงการจำแนกในเขตเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ (Dudal and Moomann, 1964) ซึ่งใช้หน่วยการจำแนกเป็นกลุ่มดินหลัก (Great Soil Group) เริ่มตั้งแต่ปี พ.ศ. 2519 (ค.ศ. 1976) การจำแนกดินในประเทศไทย ได้ปรับมาใช้อนุกรมวิธานดินอย่างกว้างขวาง จนปัจจุบันนี้อาจจะกล่าวได้ว่า ประเทศ

ไทยใช้อนุกรมวิชาดินเป็นระบบการจำแนกดิน โดยไม่มีการคัดแปลงแต่อย่างใด แต่มีการแก้ไขลักษณะการจำแนกต่างๆ ของหน่วยดินที่พบในประเทศให้เป็นไปตามระบบนี้ (12)

ขั้นตอนการจำแนกดินตามระบบอนุกรมวิชาดินมีดังนี้ คือ

### 1. อันดับ (Orders) มีทั้งหมด 10 อันดับ คือ

1.1 อัลติโซลส์ (Alfisol) ลักษณะของดินในอันดับนี้คืออนุภาคดินเหนียวจะถูกเคลื่อนย้ายหรือชะล้างจากดินชั้นบน ไปสะสมอยู่ในดินชั้นล่างอยู่กระจัดกระจายทั่วทุกภาคของประเทศ

1.2 แอริดิโซลส์ (Aridisols) จะพบในบริเวณแห้งแล้งหรือกึ่งแห้งแล้ง คือเป็นบริเวณที่ขาดแหล่งน้ำเกือบตลอดปี มีปริมาณอินทรีย์วัตถุต่ำ ซึ่งดินในอันดับนี้ไม่มีในประเทศไทย

1.3 เอนติโซลส์ (Entisols) เป็นดินที่เกิดขึ้นมาใหม่ ซึ่งมีชั้นหน้าดินยังไม่ครบสมบูรณ์ อาจจะมีชั้น A, C แต่ไม่มีชั้น B พบอยู่ทั่วไปทุกภาคของประเทศ

1.4 ฮิสโตโซลส์ (Histosols) เป็นลักษณะของดินที่มีการสะสมของอินทรีย์วัตถุในระดับลึกถึง 80 เซนติเมตรสูงมาก บางครั้งเรียกดินอินทรีย์ (Organic Soils) เช่น ดินพีท (Peat) และดินม็อค (Muck) ฯลฯ พบในบริเวณภาคใต้และภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศ

1.5 อินเซปติโซลส์ (Inceptisols) ลักษณะของดินมีการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมี เช่นดินนาบริเวณภาคกลางของประเทศและเป็นดินกรด เริ่มมีชั้น B เกิดขึ้น แต่ดินอันดับนี้ยังมีอายุไม่มากนัก

1.6 มอลลิโซลส์ (Mollisols) เป็นดินที่มีลักษณะสีคล้ำในดินชั้นบน มีโครงสร้างดี หน้าดินลึก และมีความสามารถในการอุ้มน้ำด้วยค่าสูง จะพบดินชนิดนี้บริเวณจังหวัดลพบุรี เพชรบูรณ์ นครปฐม และราชบุรี ฯลฯ

1.7 ออกซิโซลส์ (Oxisols) ลักษณะของดินมีการสะสมเหล็กและอลูมิเนียมออกไซด์สูง (Sesquioxide) ชนิดของแร่ดินเหนียวเป็น Kaolinite (1:1)

1.8 สปอดโซลส์ (Spodosols) เป็นดินที่เกิดบริเวณฝนตกชุกมีการสะสมเหล็กออกไซด์ ฮิวมัสในดินชั้นล่าง ทำให้ดินชั้นล่างมีสีเข้มกว่าดินชั้นบน วัตถุต้นกำเนิดของดินเป็นดินทราย พบในภาคใต้ ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ โดยเฉพาะจังหวัดนครพนม

1.9 อุลติโซลส์ (Ultisols) มีลักษณะคล้ายดิน Alfisols แต่มีการชะล้างมากกว่า มีความอุดมสมบูรณ์ต่ำ พบมากและในทุกภาคของประเทศ

1.10 เวอร์ติโซลส์ (Vertisols) เป็นดินที่มีลักษณะการซึบและหดตัวสูง คือมีการแตก  
ระแหงในช่วงฤดูแล้ง ชนิดของแร่ดินเหนียว คือ Montmorillonite (2:1) ปฏิริยาของดินเป็นค่า พบ  
ในบริเวณภาคกลาง เช่น สระบุรี นครสวรรค์ ลพบุรี เพชรบูรณ์ ฯลฯ

2. อันดับย่อย (Suborders) การจัดแบ่งดินโดยอาศัยความชื้นในดิน สภาพการสลายตัว  
ของวัตถุต้นกำเนิดของดินที่แตกต่างกัน สามารถแบ่งออกได้ 47 อันดับย่อย สำหรับในประเทศไทย  
พบเพียง 20 อันดับย่อยเท่านั้น

3. กลุ่มดิน (Great Group) คือการจัดแบ่งแยกกลุ่มดิน โดยอาศัยการจัดเรียงและความซัด  
เจนของหน้าตัดดิน ตามสภาพความชื้นและอุณหภูมิในดิน ฐานสภาพของธาตุที่เป็นค่า มีทั้งหมด  
227 กลุ่มดิน สำหรับในประเทศไทยพบประมาณ 40 กลุ่มดิน เช่น กลุ่มดิน Sulfaquents กลุ่มดิน  
Tropaqucepts ฯลฯ

4. กลุ่มดินย่อย (Subgroups) เป็นจำแนกดิน โดยอาศัยคุณสมบัติของภายในกลุ่มดินที่  
แตกต่างกันมาแบ่งย่อยลงอีกชั้นหนึ่ง เป็นกลุ่มดินย่อยที่มีลักษณะของดินเชื่อมโยงกันระหว่างดิน 2  
กลุ่มดิน มีประมาณ 1000 กลุ่มดินย่อย

5. วงศ์ (Family) เป็นลักษณะการนำชุดดินที่ใกล้เคียงกันมารวมไว้ในวงศ์เดียวกัน โดย  
อาศัยชั้นดินชนิดต่างๆ เช่น อนุภาคของดิน ความเป็นกรด-ด่างของดิน ความลึกของดิน ความลาดเท  
การแตกระแหง การคงตัวของชั้นดิน ซึ่งการจำแนกดินเป็นวงศ์นั้น ก่อนข้างจะมีความสำคัญต่อการ  
เกษตรมากและสามารถนำไปถ่ายทอดเทคโนโลยีในการจัดการและการอนุรักษ์ปรับปรุงดินให้อยู่ใน  
สภาพที่เหมาะสมต่อการปลูกพืชได้ สำหรับการจำแนกดินในระดับวงศ์ของประเทศไทยนั้น นิยมใช้  
ลักษณะของชั้นดิน 4 อย่าง คืออนุภาคของดิน ความเป็นกรด-ด่างของดิน อุณหภูมิและแร่ที่เป็นองค์  
ประกอบของดิน

6. ชุดดิน (Soil Series) เป็นการจำแนกดินที่ต่ำสุดสำหรับระบบอนุกรมวิธานดิน (Soil  
Taxonomy) โดยยึดหลักสัณฐานของดิน (Soil Morphology) เป็นเครื่องจำแนก ได้แก่ คุณสมบัติทาง  
กายภาพและทางเคมีของดิน สีของดิน การเรียงตัวของชั้นดินและวัตถุต้นกำเนิดของดิน ตลอดจน  
ปัจจัยต่างๆที่ให้กำเนิดดิน ฯลฯ ในการให้ชื่อดินนั้นจะอาศัย จังหวัด อำเภอ หรือตำบล ตลอดจนชื่อ  
สถานที่ที่มักจะรู้จักกันทั่วไป เช่น ชุดดินรังสิต หมายความว่าพบชุดดินนี้ครั้งแรกที่ตำบลรังสิต  
จังหวัดปทุมธานี และมีพื้นที่ไม่น้อยกว่า 20 ตารางกิโลเมตร ถ้าท้องที่ใดๆมีคุณสมบัติของดินใกล้เคียง  
กับชุดดินรังสิต ก็สามารถตั้งชื่อเป็นชุดดินรังสิตได้เช่นเดียวกัน สำหรับประเทศไทยนั้นมี  
ประมาณ 250 ชุดดิน เช่น ชุดดินสันป่าตอง ชุดดินเสนา ชุดดินท่าม่วง ฯลฯ(13)

## 2.3 คุณสมบัติทั่วไปของดินชุดบางเลน

ดินชุดบางเลน ( B1 : Banglen Series) เกิดจากตะกอนน้ำกร่อยที่ถูกพัฒนามาที่บดมสภาพพื้นที่ที่พบมีลักษณะราบเรียบ มีความลาดชันต่ำ 0-1 เปอร์เซ็นต์ ดินชุดนี้เป็นดินลึกมีการระบายน้ำเร็ว ดินมีความสามารถในการให้น้ำซึมผ่านได้ช้าตลอดทุกชั้น มีการไหลบ่าของน้ำบนผิวดินช้าตามปกติแล้วระดับน้ำใต้ดินต่ำกว่า 120 เซนติเมตร ในช่วงฤดูแล้ง ดินบนลึกไม่เกิน 30 เซนติเมตร มีเนื้อดินเป็นดินเหนียว สีพื้นเป็นสีเทาเข้มมากถึงสีดำ มีจุดประสีน้ำตาลเหลืองปนแดง ปฏิกริยาของดินเป็นกรดเล็กน้อยถึงเป็นกลาง มีค่าพีเอชประมาณ 6.5-7.0 ดินล่างเนื้อดินเป็นดินเหนียว สีพื้นเป็นสีเทา จุดประสีน้ำตาลปนเหลือง ปฏิกริยาของดินเป็นด่างปานกลาง มีค่าพีเอชประมาณ 8.0 จะพบผลึกยิปซัมช่วงต่อระหว่างดินบนและดินล่าง สำหรับในช่วงความลึก 120-160 เซนติเมตร ดินจะมีสีเทาเข้ม หรือสีเข้มของเทาปนเขียว จากผลการวิเคราะห์ทางเคมีของตัวแทนดินชุดนี้ปรากฏว่า ดินตอนบนหนาประมาณ 30 เซนติเมตร มีปริมาณอินทรีย์วัตถุสูงปานกลาง มีการอึดตัวด้วยเบสสูงมาก มีความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวกสูงมาก ส่วนดินตอนล่างลึกตั้งแต่ 30 เซนติเมตรลงไป มีการอึดตัวด้วยเบสสูง มีความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวกสูงมาก(14)

## 2.4 ภาวะมลพิษของดิน

ภาวะมลพิษของดิน (Soil Pollution) หมายถึง ภาวะการปนเปื้อนของดินด้วยสารมลพิษ (Soil Pollutant) มากเกินขีดจำกัด จนมีอันตรายต่อสุขภาพ อนามัย ตลอดจนการเจริญเติบโตของมนุษย์และสิ่งมีชีวิตทั้งพืชและสัตว์ (2) การเกิดภาวะมลพิษของดินอาจเกิดจากสาเหตุโดยธรรมชาติ เช่น ดินเค็ม ดินเปรี้ยว โดยกำเนิด หรืออาจเกิดจากการกระทำของมนุษย์ เช่น ภาวะมลพิษของดินจากการปนเปื้อนของสารกำจัดศัตรูพืช ปุ๋ย หรือ ธาตุพิษ โดยภาวะมลพิษของดินมักเกิดจากการกระทำของมนุษย์เป็นสำคัญ

ระดับของภาวะมลพิษในดินนั้นขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของสารมลพิษในสารละลายดิน (Soil Solution) มากกว่าปริมาณของสารมลพิษทั้งหมดในดิน ตัวอย่างเช่น สารมลพิษชนิดหนึ่งอาจมีมากในดินจนยากแก่การกำจัด แต่หากสามารถบังคับให้สารมลพิษชนิดนั้น มีความเข้มข้นน้อยในสารละลายดิน เช่น อาจโดยการปรับค่าพีเอชของดิน หรือบังคับให้ตกตะกอนกับสารอื่น หรือเปลี่ยนแปลงสภาวะออกซิเดชัน-รีดักชันของดิน ก็ย่อมจะควบคุมหรือบรรเทาระดับภาวะมลพิษของสารนั้นลงได้ในระดับหนึ่ง

ภาวะมลพิษของดินนั้น ได้ทำให้ดินสูญเสียภาระหน้าที่ของความเป็นดินไปกล่าวคือ 1) หน้าที่ของการเป็นปัจจัยเบื้องต้นของการดำรงชีวิตในโลก เช่น เป็นปัจจัย 4 ของมนุษย์ 2) หน้าที่ของการเป็นเครื่องกรองสารมลพิษไม่ให้ปนเปื้อนแหล่งน้ำและน้ำใต้ดิน โดยดินอาศัยสมบัติของการมีประจุเพื่อดูดซับสารมีประจุเป็นสถานที่สำหรับการเกิดปฏิกิริยาเคมีระหว่างสารต่างๆในดินอาศัยสมบัติของการมีพื้นที่ผิวจำเพาะสูงเพื่อกักเก็บสารมลพิษหรือยึดเหนี่ยวเชื้อโรคเอาไว้และอาศัยจุลินทรีย์ในดินเพื่อย่อยสลายสารต่างๆ คราบเก่าที่ดินยังไม่ได้รับสารมลพิษจนเกินขีดความสามารถที่จะรับไว้ได้ เมื่อเกิดภาวะมลพิษของดิน ก็หมายความว่า สภาพความเป็นเครื่องกรองของดินได้หมดสิ้นไป ดินก็จะปลดปล่อยสารมลพิษออกสู่สิ่งแวดล้อม โดยทางต่างๆ ได้แก่

- ถูกพืชดูดซึม ไปใช้ ซึ่งสารมลพิษจะสะสมในพืช เมื่อคนนำไปบริโภคก็จะเป็นอันตรายได้
- ลงสู่แหล่งน้ำโดยการไหลบ่าหน้าดิน (Runoff) สารมลพิษที่สะสมในแหล่งน้ำจะถูกดูดซึมไปใช้โดยแพลงก์ตอนพืชหรือแพลงก์ตอนสัตว์ที่เป็นอาหารของปลาซึ่งเป็นอาหารของมนุษย์และสัตว์อื่นๆ นอกจากนั้น หากนำน้ำในแหล่งน้ำไปบริโภคก็อาจเป็นอันตรายได้
- ลงสู่แหล่งน้ำใต้ดิน หากน้ำใต้ดินถูกนำไปใช้โดยตรง ก็ย่อมเกิดอันตรายได้และเมื่อน้ำใต้ดินไหลลงสู่แหล่งน้ำใดก็ย่อมนำสารมลพิษไปปนเปื้อนแหล่งน้ำนั้นได้
- ความชื้นและละอองน้ำจากดินที่มีสารมลพิษปนเปื้อน จะสามารถแพร่กระจายสารมลพิษนั้นสู่สิ่งแวดล้อมได้

## 2.5 ตะกั่วในดิน

ตะกั่วเป็นโลหะธาตุที่มีน้ำหนักอะตอมเท่ากับ 207.2 และอยู่ในกลุ่มธาตุหมู่ IV A ของตารางธาตุ มีวาเลนซ์ได้หลายระบบ เช่น 1, 2 และ 4 แต่ตะกั่วส่วนมากจะอยู่สภาวะวาเลนซ์ 2 ซึ่งมีความเสถียรมากที่สุด (15) ตะกั่วและสารประกอบตะกั่วสามารถสะสมอยู่ในดินและตะกอนได้ดี เนื่องจากมีความสามารถในการละลายได้ต่ำและทนทานต่อการย่อยสลายของจุลินทรีย์ทำให้มันคงอยู่ในดินได้นานเมื่อเทียบกับสารมลพิษชนิดอื่น ซึ่งการที่ตะกั่วสะสมอยู่ในดินได้ดีและคงอยู่ได้นานนั้นทำให้มีความเป็นไปได้ที่จะเกิดภาวะ Bioavailable ในอนาคต (3)

## 2.6 ประโยชน์ของตะกั่ว

มนุษย์เรารู้จักและนำตะกั่วมาใช้ประโยชน์มากกว่า 6,000 ปีแล้ว ในปัจจุบันได้มีการใช้ตะกั่วในอุตสาหกรรมแขนงต่างๆอย่างกว้างขวาง โดยอาจแบ่งตามชนิดของตะกั่วได้ 2 ชนิด คือ

### 1. สารประกอบอนินทรีย์ตะกั่ว เช่น

1.1 โลหะตะกั่ว ใช้ผสมในแท่งโลหะผสมหรือผงเชื่อมบัดกรีโลหะ

1.2 ออกไซด์ของตะกั่ว ได้แก่

- ตะกั่ว โมโนออกไซด์ ใช้เป็นสีเหลืองผสมสีทาบ้าน
- ตะกั่ว ไดออกไซด์ ใช้ทำเป็นขั้วอิเล็กโทรดของแบตเตอรี่รถยนต์และ

เครื่องจักร

- ตะกั่วออกไซด์หรือตะกั่วแดงใช้เป็นสีทาโลหะเพื่อกันสนิม

1.3 สารประกอบของเกลือตะกั่วจะมีสีต่างๆกัน จึงนิยมใช้เป็นแม่สี หรือสีผสมทำ

ให้เกิดสีต่างๆใช้ในอุตสาหกรรมการทำสี เช่น

- ตะกั่วคาร์บอเนต ผสมกับตะกั่วไฮดรอกไซด์ รวมกัน เรียกว่า “ตะกั่วขาว”
- ตะกั่วโครเมต หรือ “Chrome Yellow”
- ตะกั่วอาร์เซนเนต ใช้เป็นยาปราบแมลงและศัตรูพืช
- ตะกั่วซัลไฟด์ ใช้ผสมในกระเบื้อง เครื่องเคลือบ หรือเซรามิค เพื่อให้เกิด

ความเป็นเงางามและมีผิวเรียบ เป็นต้น

2. สารประกอบอินทรีย์ของตะกั่ว เช่น ตะกั่วเตตระเอซิดและตะกั่วเตตระเมทิล ใช้เป็น “สารกันน้ำ” หรือสารป้องกันการกระตุกของเครื่องยนต์เวลาทำงาน ทำให้ค่าออกเทนของน้ำมันสูงขึ้น จึงใช้ผสมในน้ำมันเบนซิน สารนี้มีสีสีแดง ดังนั้น น้ำมันชนิดพิเศษทั้งหลายจึงมีสีแดงด้วย สารประกอบอินทรีย์ของตะกั่วค่อนข้างจะเป็นพิษมากกว่าตะกั่วอนินทรีย์ เพราะระเหยกระจายไปในอากาศได้ดี สำหรับตะกั่วที่ออกมาจากท่อไอเสียรถยนต์จะอยู่ในรูปของตะกั่วออกไซด์ชนิดต่างๆ ซึ่งเป็นตะกั่วอนินทรีย์ (16)

## 2.7 ปริมาณตะกั่วในดินและพืช

ตะกั่วในดินบนมีปริมาณตั้งแต่ 15 ถึง 189 ppm โดยค่าเฉลี่ยสูงสุดไม่ควรเกิน 70 ppm ค่าที่ถือเป็นพื้นฐานจากตารางที่ 1 ในดินฮิสโตซอลส์ (Histosols) มีค่าเฉลี่ยถึง 44 ppm และค่าเฉลี่ยของดินชนิดต่างๆ มีค่าระหว่าง 22 ถึง 29 ppm ดังนั้น โดยทั่วไปตะกั่วในดินบนควรมีค่าเฉลี่ย 25 ppm ส่วนตะกั่วในดินที่มีการปนเปื้อนมีปริมาณสูงมาก (ตารางที่ 2) เช่น ดินในเหมืองแร่เก่าอาจมีค่าได้ตั้งแต่ 50 ppm ขึ้นไป ปริมาณตะกั่วในพืชปกติมีค่าระหว่าง 0.5 ถึง 3 ppm (17) แต่ในกรุงเทพมหานคร พืชพรรณที่ขึ้นทั่วไปมีปริมาณตะกั่วสูง เช่น ผักบุ้ง ผักคบขวาและหญ้าขน มีปริมาณตะกั่ว 4 ถึง 23 ppm ไม้ที่ขึ้นริมถนน เช่น หญ้า แคนแสดและहुกวาง เป็นต้น อาจมีตะกั่วได้มาก 10 ถึง 806 ppm ถ้าสำหรับปริมาณตะกั่วที่เป็นพืชต่อพืชนั้นมีค่าอยู่ระหว่าง 50 ถึง 500 ppm (2)

ตารางที่ 1 ปริมาณตะกั่วในดินชั้นบนชนิดต่างๆ (ppm)

ชนิดดิน	ค่าเฉลี่ย	พิสัย	ประเทศ
พอดซอลส์ (Podzols) และดินเนื้อหยาบ	17	10-70	อเมริกา
	20	17-22	โซเวียต (USSR)
ดินร่วนถึงเหนียว	22	10-70	อเมริกา
	25	12.5-52	โปแลนด์
ดินนา	16.6	1.5-50	แคนาดา
	29	6-189	ญี่ปุ่น
ฮิสโตซอลส์ (Histosols) และ	44	26-142	สหราชอาณาจักร
ดินอินทรีย์อื่น	24	10-50	อเมริกา
	12.6	1.5-50	แคนาดา
ดินต่างๆ	29	15.5-41	สหราชอาณาจักร
	35	5-129	ญี่ปุ่น
	26	10-70	อเมริกา

ตารางที่ 2 ปริมาณตะกั่วในดินชั้นบนที่มีการปนเปื้อน (ppm)

แหล่งปนเปื้อน	พิสัย	ประเทศ
เหมืองแร่เก่า	51-21,546	สหราชอาณาจักร
อุตสาหกรรมโลหะ	500-6,500	อเมริกา
	53-2,100	ญี่ปุ่น
	92-2,580	แชมเบีย
โรงงานแบตเตอรี่	135,000	อเมริกา
	93-3,800	โปแลนด์
ดินสวน,พื้นที่ข้างเคียง	270-15,240	สหราชอาณาจักร
	218-10,900	อเมริกา
	127-388	เยอรมันตะวันออก
กากตะกอน (Sludge) (ใส่ในฟาร์ม)	175-3,916	สหราชอาณาจักร
	60-253	ญี่ปุ่น (คินนา)
ข้างทางหลวง	960-7,000	อเมริกา
	114-885	เยอรมันตะวันออก
	132-397	ญี่ปุ่น
	213	ไทย

## 2.8 แหล่งที่มาและการปนเปื้อนตะกั่วในดิน

การปนเปื้อนของตะกั่วลงสู่ดินเกิดได้จากหลายแหล่งด้วยกันคือ จากโรงงานอุตสาหกรรม โรงถลุงแร่ การเผาไหม้ น้ำมัน สารเคมีในการเกษตร ของเหลือใช้จากโรงงานและจากชุมชน ตลอดจนการใช้ที่ดินเป็นที่ถมวัสดุเหลือใช้ ซึ่งจะกล่าวถึงเฉพาะแหล่งที่มาที่สำคัญ ดังนี้

### 2.8.1 เหมืองแร่และโรงงานถลุง/หลอมตะกั่ว

ดินบริเวณท้ายเหมือง ดินในเหมืองร้างหรือดินรอบบริเวณโรงถลุงโดยส่วนใหญ่จะมีปริมาณตะกั่วที่สูงมากผิดปกติ ทั้งนี้เพราะตะกั่วถูกปลดปล่อยออกไปกับน้ำเสียหรือเป็นอนุภาคลอยไปตามลมและตกลงบริเวณใกล้ๆ ตะกั่วในธรรมชาติจะอยู่ร่วมกับธาตุต่างๆ เกิดเป็นสินแร่ตะกั่ว ซึ่งสามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้โดยสินแร่ตะกั่วที่รู้จักกันดีได้แก่ กาลีนา (Galena, PbS) การขุดและการถลุงสินแร่กาลีนาในสหราชอาณาจักรทำให้เกิดการปนเปื้อนตะกั่วในพื้นที่ถึง ประมาณ 4,000 ตารางกิโลเมตร ที่ตำบลฟิค เมืองเคอร์บีเซอร์ ในเวลส์ พบปริมาณตะกั่วในดินที่ใช้ทำเกษตรกรรมในปริมาณสูงมาก กล่าวคือ ภายในรัศมี 100 เมตรของโรงหลอมตะกั่วเก่า ดินมีปริมาณตะกั่วเฉลี่ย 30,090 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม และภายในรัศมี 100 เมตรของพื้นที่แต่งแร่เก่า พบค่าเฉลี่ยของตะกั่วในดิน 19,400 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม (18)

สำหรับสถานการณ์ปนเปื้อนตะกั่วจากการทำเหมืองในประเทศไทยพบบริเวณพื้นที่รอยต่อทั้งทางตอนเหนือและตอนใต้ของเขตรักษาพันธุ์สัตว์ป่าทุ่งใหญ่นเรศวร จังหวัดกาญจนบุรี ในพื้นที่ตอนใต้ของเขตรักษาพันธุ์สัตว์ป่าทุ่งใหญ่นเรศวร มีเหมืองผลิตแร่ตะกั่ว 2 แห่ง คือ เหมืองแร่เค็มไก่อ๊ (เหมืองสองท่อ) และ เหมืองแร่ป่องาม และในพื้นที่ตอนเหนือมีเหมืองผลิตตะกั่ว คือ เหมืองแร่พู่จือ เหมืองแร่เกาหลี เหมืองพุ่มองและเหมืองเถื่อนปรองดี วุดแฟรม นอกจากนี้ยังมีกิจกรรมที่ต่อเนื่องจากเหมืองแร่อีก 3 แห่ง คือ โรงลอยแร่ของเหมืองเค็มไก่อ๊ ตั้งอยู่บริเวณใกล้เคียงกับเหมืองเค็มไก่อ๊ โรงลอยแร่คลิตี้ ตั้งอยู่ห่างจากเหมืองป่องามทางทิศใต้ 6 กม. และโรงลอยแร่เถื่อนพู่จือ ตั้งอยู่ที่เหมืองพู่จือ ถูกสั่งปิดการดำเนินการเมื่อปี 2538 จากการศึกษาการแพร่กระจายของสารตะกั่วบริเวณรอบอ่างเก็บน้ำเขื่อนศรีนครินทร์ โดยกองสิ่งแวดล้อมทรัพยากรธรณีบนบก กรมทรัพยากรธรณี เมื่อปี 2533 - 2536 ได้ศึกษาคุณภาพน้ำของห้วยสายต่าง ๆ เมื่อไหลผ่านพื้นที่เหมืองแร่ตะกั่วและโรงลอยแร่เค็มไก่อ๊ เหมืองแร่ป่องาม และโรงลอยแร่คลิตี้ พบว่ามีการปนเปื้อนของตะกั่วในปริมาณที่เพิ่มมากขึ้นอย่างชัดเจน โดยสามารถแยกแยะได้ดังนี้

- เหมืองแร่บ่องามพบว่าบ่อกักเก็บตะกอนไม่มีประสิทธิภาพในการกักเก็บ เนื่องจากตั้งอยู่ในบริเวณที่มีหลุมซบ (Sink Hole) ขนาดใหญ่เล็กอยู่มากมายและต่อเนื่องกัน ทำให้น้ำทิ้งในบ่อกักเก็บตะกอนจากการล้างแร่ตะกั่วสามารถไหลมุดจากหลุมซบหนึ่งไปยังอีกหลุมหนึ่งและไหลออกสู่ทาง น้ำธรรมชาติในที่สุด โดยพบว่า บริเวณห้วยปลาเมา น้ำตกสะมุเต็งและห้วยคือในพื้นที่เขตรักษาพันธุ์สัตว์ป่าทุ่งใหญ่นเรศวร มีการปนเปื้อนสารตะกั่วสูงถึง 0.26-0.87 ppm (หนึ่งในล้านส่วน) ในขณะที่มาตรฐานคุณภาพน้ำในแหล่งน้ำผิวดินและมาตรฐานน้ำบาดาลเพื่อการบริโภคได้กำหนดปริมาณตะกั่วไว้ไม่เกิน 0.05 ppm เท่านั้น หรือเกินค่ามาตรฐานถึง 5-17 เท่าซึ่งคาดว่าได้รับการปนเปื้อนจากน้ำทิ้งในบ่อกักเก็บตะกอนที่ไหลลงหลุมซบ

- โรงลอยแร่คลิตี้ ซึ่งตั้งอยู่ริมห้วยคลิตี้ ซึ่งสารตะกั่วในดินตะกอนธารน้ำ มีค่าถึง 165,720-552,380 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ในขณะที่ค่ามาตรฐานตะกั่วในดินสำหรับการอยู่อาศัยมีค่าเพียง 200 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม เท่านั้น หรือมีค่าเกินค่ามาตรฐานมากกว่า 28,000 เท่า

- เหมืองแร่เค็มไก่อ้ และ โรงลอยแร่ มีห้วยชะนีไหลผ่านพื้นที่ พบว่าก่อนไหลผ่านพื้นที่เหมืองแร่มีค่าตะกั่ว 0.00 - 0.09 ppm เมื่อไหลผ่านพื้นที่เหมืองเค็มไก่อ้ มีการปนเปื้อนของสารตะกั่วเพิ่มขึ้นเป็น 1.1 ppm หรือสูงเกินค่ามาตรฐานคุณภาพน้ำผิวดิน 22 เท่า ทั้งนี้มีสาเหตุมาจากในบริเวณบ่อกักเก็บตะกอนมีหลุมซบเกิดขึ้นหลายจุด ทำให้น้ำและตะกอนไหลลงหลุมซบ (Sink Hole) ออกสู่ห้วยธรรมชาติและจากการที่เหมืองได้ปิดกั้นทางน้ำของห้วยชะนีเพื่อใช้เป็นบ่อกักเก็บตะกอน ทั้งนี้ ห้วยชะนี เมื่อไหลผ่านพื้นที่เหมืองแร่เค็มไก่อ้ ก็จะไหลลงสู่ลำคลองงู ผ่านถ้ำสาหิน ถ้ำนกนางแอ่น ในพื้นที่อุทยานแห่งชาติลำคลองงู ซึ่งเป็นพื้นที่ทางธรรมชาติที่มีความเปราะบางเป็นพิเศษ น้ำปนเปื้อนสารพิษเหล่านี้ก่อให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิตและระบบนิเวศในถ้ำ เช่น ปลาเฉพาะถิ่นหลายชนิดอาจต้องสูญหายไป

นอกจากนี้ กรมควบคุมมลพิษได้ทำการตรวจวัดปริมาณตะกั่วในน้ำและตะกอนธารน้ำ ในลำห้วยคลิตี้ เมื่อปี พ.ศ.2541 ถึง 2542 พบว่า ปริมาณตะกั่วในน้ำบริเวณท้ายน้ำของโรงแต่งแร่ คลิตี้ มีค่าอยู่ในช่วง 0.036-1.38 ppm โดยปริมาณตะกั่วในตะกอนธารน้ำบริเวณใต้โรงแต่งแร่ มีค่าระหว่าง 29,978 – 65,771 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม หน่วยงานทางสาธารณสุขได้เข้ามาตรวจวัดผลตะกั่วในเลือดชาวบ้านคลิตี้ล่างหลายครั้ง พบว่าชาวบ้านทุกคนที่ใช้น้ำและจับปลา มีตะกั่วในเลือดในปริมาณสูงมาก โดยส่วนใหญ่อยู่ในช่วง 20 - 50 มก./เดซิลิตร ค่าระดับตะกั่วที่เป็นอันตรายอยู่ในระดับ 40 มก./เดซิลิตร และหากระดับตะกั่วมีตั้งแต่ 10 มก./เดซิลิตร แต่ละ 1 เดซิลิตร ที่เพิ่มขึ้นจะทำให้เด็กมี ระดับสติปัญญา (ไอคิว) ลดลง 0.25 จุด (19)

สำหรับการปนเปื้อนตะกั่วในดินจากโรงหลอมตะกั่ว มีรายงานผลการสำรวจ บริเวณพื้นที่รอบโรงหลอมตะกั่ว พบว่าปริมาณตะกั่วสูงสุดมักจะเกิดที่บริเวณใกล้กับปล่องควันของ โรงงานและลดลงอย่างรวดเร็วตามระยะห่างที่เพิ่มขึ้น โดยความสัมพันธ์ระหว่างระยะห่างและการ ลดลงมักเป็นแบบ Exponential (20,21,22) ที่สหราชอาณาจักรมีรายงานว่าภายในพื้นที่ 3 กิโลเมตร ของโรงหลอมตะกั่วที่มีการจัดการอย่างดี ดินมีการปนเปื้อนตะกั่วประมาณ 1,500 ถึง 2,200 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม

สำหรับในประเทศไทยมีโรงงานหลอมตะกั่วจากแบตเตอรี่เก่าตั้งอยู่ที่จังหวัด ราชบุรี ระยอง สระบุรี นครปฐม และสมุทรปราการ จำนวนรวมทั้งสิ้น 7 โรงงานและมีสถานที่ที่ เคยใช้เป็นที่หลอมตะกั่วอีก 3 แห่งที่จังหวัดราชบุรี กระบวนการผลิตของโรงงานหลอมตะกั่ว ดังกล่าวจะทำให้เกิดการปนเปื้อนตะกั่วเข้าสู่สิ่งแวดล้อมได้ในหลายขั้นตอน ได้แก่ การผ่านแบตเตอรี่ การหลอมแผ่นตะกั่ว การทำให้ตะกั่วบริสุทธิ์ เป็นต้น โดยตะกั่วอาจปนเปื้อนมากับซีโลหะ (Slag) Dross ผุ่นตะกั่ว ไอตะกั่วและน้ำเสีย กรมโรงงานอุตสาหกรรม ได้ทำการสำรวจการปนเปื้อนตะกั่ว ในดินและน้ำใต้ดินบริเวณ โรงงานหลอมตะกั่วและสถานที่ที่เคยใช้เป็นที่หลอมตะกั่วดังกล่าวรวมถึง พื้นที่โดยรอบภายในรัศมี 500 เมตร พบว่ามีการปนเปื้อนตะกั่วในดินในระดับค่อนข้างรุนแรง

### 2.8.2 ไอเสียจากยานพาหนะ

ยานพาหนะที่ใช้น้ำมันที่มีการเติมเตตระเอทิลเลดหรือเตตระเมทิลเลดเพื่อเพิ่มค่า ออกเทนเป็นแหล่งกำเนิดที่สำคัญอีกแหล่งหนึ่งของตะกั่วที่ปลดปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อม มีการ สำรวจพบว่า ตัวอย่างดินและพืชที่เก็บจากบริเวณใกล้กับถนน มีระดับตะกั่วที่สูงกว่าปกติ (23) Cannon และ Bowles (24) ทำการศึกษาที่เมืองเคนเวอร์ โคโลราโด สหรัฐอเมริกา พบว่าในระยะ 152 เมตรทางด้านใต้ลมของถนนในเมืองเคนเวอร์ หญ้ามีการปนเปื้อนตะกั่ว และความสัมพันธ์ ระหว่างปริมาณตะกั่วกับระยะทางเป็นแบบ Exponential นอกจากนี้ยังมีผู้ศึกษาอีกหลายคนในสหรัฐ อเมริกาซึ่งพบผลการศึกษาในทำนองเดียวกัน

ในประเทศอื่น ๆ ได้แก่ อังกฤษ สวิตเซอร์แลนด์ นิวซีแลนด์ ออสเตรเลีย ญี่ปุ่น อียิปต์ เวเนซุเอลา เบลเยียม อิตาลี กรีซ และฮ่องกง ได้มีผู้ทำการศึกษาและปรากฏผลออกมาใน ลักษณะสอดคล้องกัน กล่าวคือ ระดับของตะกั่วในดินและหญ้าบริเวณใกล้กับถนนมีระดับสูงกว่า ระดับปกติ และตะกั่วจะมีปริมาณลดลงตามระยะห่างจากถนนที่เพิ่มขึ้น และมีผลการศึกษาที่ระบุว่า

ในถนนส่วนใหญ่จะพบระดับความเข้มข้นของตะกั่วในดินที่สูงกว่าระดับปกติ ภายในระยะห่าง 15 เมตรจากขอบถนนทั้งสองด้าน (3) สำหรับบริเวณถนนที่มีการจราจรหนาแน่นมาก ๆ อาจพบการปนเปื้อนของตะกั่วได้ที่ระยะห่าง 100 ถึง 150 เมตร (25) สำหรับในประเทศไทยมีรายงานว่าดินบริเวณสองข้างทางของถนนบางนา-ตราด มีปริมาณตะกั่วประมาณ 213 ppm (15)

### 2.8.3 วัสดุทางการเกษตร

ในหลายประเทศได้มีการนำกากตะกอนน้ำโสโครก (Sewage Sludge) ที่ผ่านการหมักฆ่าเชื้อโรคและแยกน้ำแล้วมาใช้เป็นปุ๋ยในการเกษตร ซึ่งอาจเป็นแหล่งหนึ่งที่ทำให้เกิดการสะสมของตะกั่วลงสู่ดิน เนื่องจากในกากตะกอนน้ำโสโครกจะมีตะกั่วปนเปื้อนอยู่ Coker และ Matthews (26) พบว่าในอุจจาระของคนมีระดับตะกั่วโดยทั่วไปประมาณ 11 มิลลิกรัม/กิโลกรัม (น้ำหนักแห้ง) ในขณะที่ระดับตะกั่วเฉลี่ยในกากตะกอนจากพื้นที่ที่ไม่ใช่อุตสาหกรรมมีค่าประมาณ 121 มิลลิกรัม/กิโลกรัม Berrow และ Webber (27) ทำการวิเคราะห์กากตะกอนจากพื้นที่อุตสาหกรรมและเขตเมืองในอังกฤษและเวลส์ จำนวน 42 ตัวอย่าง พบว่ามีระดับตะกั่วอยู่ในช่วง 120 – 3,000 มิลลิกรัม/กิโลกรัม (น้ำหนักแห้ง) Sommers (28) รายงานว่า ปริมาณตะกั่วในกากตะกอนในอินเดียที่สหรัฐอเมริกาอยู่ในช่วง 13-19,700 มิลลิกรัม/กิโลกรัมปริมาณตะกั่วในกากตะกอนจะมีค่าแปรผันเป็นอย่างมาก แต่โดยทั่วไปแล้วจะมีค่าต่ำกว่า 1,000 มิลลิกรัม/กิโลกรัม (3)

สำหรับการปนเปื้อนของตะกั่วในดินที่ใช้กากตะกอนน้ำโสโครกเป็นปุ๋ยนั้น Le Riche (29) พบว่ามีการปนเปื้อนของโลหะหนักในดินในพื้นที่ที่มีการใช้กากตะกอนน้ำโสโครกเป็นระยะเวลานาน ในประเทศไทยได้มีการศึกษาความเป็นไปได้ในการนำกากตะกอนน้ำโสโครกมาใช้ในการเกษตร ผลสรุปว่าการใช้กากตะกอนน้ำโสโครกเป็นปุ๋ยจะทำให้มีปริมาณโลหะหนักถูกทิ้งลงสู่ดินเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตาม ความเข้มข้นที่เหลือน้อยในดินและพืชที่ปลูกอยู่ในระดับที่ปลอดภัย (30)

นอกจากการนำกากตะกอนน้ำโสโครกมาใช้เป็นปุ๋ยแล้ว การใช้ขี้เถ้าแมลงและปราบศัตรูพืชประเภทตะกั่วอาร์เซนเตด (PbHASO<sub>4</sub>) ก็ทำให้เกิดการสะสมของตะกั่วในดินได้เช่นกัน (16) อย่างไรก็ตามปัจจุบันการใช้สารปราบศัตรูพืชมีแนวโน้มที่จะใช้ประเภทอินทรีย์สารเพิ่มขึ้น (2)

## 2.9 ผลลัพธ์จากการปนเปื้อน

ตะกั่วเป็น โลหะหนักที่มีความเป็นพิษอย่างรุนแรงต่อสิ่งมีชีวิตทุกชนิดและระบบนิเวศน์ มีการสลายตัวได้ช้ามากเมื่อตกค้างในดิน มีขีดความสามารถที่จะแทรกซึมเข้าสู่ห่วงโซ่อาหารได้โดย ผ่านทางการดูดซึมของรากพืช สารตะกั่วในรูป Bioavailable Fractions ซึ่งเป็นสารตะกั่วในรูปที่สิ่งมีชีวิตดูดซึมได้ จะเป็นตัวชี้วัดที่ดีกว่าสารตะกั่วในดินทั้งหมด (Total Pb) เพราะเป็นรูปที่เข้าสู่ห่วงโซ่อาหารได้โดยตรง อย่างไรก็ตาม ตะกั่วในดินบนแทบทั้งหมดอยู่ในรูปที่พืชดูดกินไม่ได้ ตะกั่วในปริมาณเพียง 0.003 ถึง 0.005 % ของปริมาณตะกั่วทั้งหมดในดินเท่านั้นที่พืชดูดกินได้ (2) สำหรับความสามารถในการดูดซึมตะกั่วของพืชนั้นจะขึ้นอยู่กับสภาพละลายได้ของตะกั่วในดิน ดินที่มีค่า CEC ต่ำมีปริมาณอินทรีย์วัตถุในดินน้อยและมีสภาพเป็นกรดจัดย่อมเป็นปัจจัยสำคัญที่ทำให้ตะกั่วละลายได้มาก

ตะกั่วเข้าสู่พืชได้ 2 ทางคือทางรากและทางใบ พิษของตะกั่วเกิดขึ้นโดยไปยับยั้งการเปลี่ยนแปลงของพลาสติก ยับยั้งการออกซิโดส์ซัคซิเนตในกระบวนการหายใจที่ไมโทคอนเดรีย มีผลต่อกระบวนการสังเคราะห์แสง ยับยั้งการเจริญเติบโตของรากและใบ และยืดเวลาการงอกของเมล็ด

ตะกั่วในพืชสามารถถ่ายทอดเข้าสู่ห่วงโซ่อาหารในลำดับถัดไป ได้แก่ สัตว์และคนได้ โดยถูกกินเป็นอาหาร ดินในสภาพปกติจะมีตะกั่วละลายได้อยู่ประมาณ 1 ppm และระดับปกติของตะกั่วที่พบในพืชคือ 0.5-3 ppm ข้อเสียที่สำคัญมากประการหนึ่งคือ พืชสามารถรับตะกั่วได้ในปริมาณที่สูงมากโดยไม่แสดงอาการเป็นพิษ (17) กล่าวคือ พืชจะไม่แสดงอาการเป็นพิษแม้จะมีตะกั่วในเนื้อเยื่อสูงถึง 50 ppm ของน้ำหนักแห้ง ซึ่งโดยทั่วไปพืชอาจมีตะกั่วในระดับปกติเพียง 1 ppm จึงนับเป็นอันตรายต่อคนและสัตว์เป็นอย่างมาก ตะกั่วอาจเข้าสู่สัตว์สี่กระเพาะที่เลี้ยงในบริเวณพื้นที่ที่ดินปนเปื้อนตะกั่วได้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งวัวและแกะ โดยอาจเกิดการสะสมตะกั่วในน้ำนมและเนื้อ ในประเทศไทยได้เคยมีกรณีการเสียชีวิตของโคนมเกิดขึ้นที่จังหวัดราชบุรี เมื่อเดือนกุมภาพันธ์ 2533 โดยโคนมของเกษตรกรได้ป่วยตายด้วยอาการทางประสาท มีน้ำลายฟูมปาก กัดฟัน ขาสั่นเกร็งเป็นพักๆ หายใจลำบากและชักตายในที่สุด เมื่อทำการตรวจสอบพบว่า ใกล้กับบริเวณไร่ข้าวโพดที่เกษตรกรปลูกไว้เป็นอาหารแก่โคเป็นที่ตั้งของ โรงหลอมหล่อ โลหะจำพวกตะกั่วซึ่งปิดกิจการแล้ว คาดว่าการเสียชีวิตของโคนมน่าจะมาจากการหลอมโลหะ โดยเฉพาะอย่างยิ่งการหลอมตะกั่วจากแบตเตอรี่เก่า โดยไม่มีระบบกำจัดเขม่า คาร์บอน ผุ่นละอองและไอตะกั่ว ทำให้มลพิษเหล่านี้

ปลิวไปตามกระแสลมแรงของเตาหลอมและกระแสลมธรรมชาติ ปลิวไปตกในไร่ข้าวโพดโดยเกาะตามใบซึ่งใช้เลี้ยงโคนมของเกษตรกรส่วนหนึ่งและอีกส่วนหนึ่งจะปลิวไปในบรรยากาศซึ่งคนและสัตว์เลี้ยงในบริเวณนั้นใช้หายใจ

พิษของตะกั่วจากดินสู่คนนั้นมีได้น้อยมาก อย่างไรก็ตามในปี พ.ศ. 2519 ได้พบว่าเด็กที่อาศัยอยู่ในหมู่ที่ 8 ตำบลบางครุ อำเภอพระประแดง จังหวัดสมุทรปราการ เกิดอาการเป็นพิษเนื่องจากตะกั่ว กล่าวคือเด็กกลุ่มอายุตั้งแต่แรกเกิดจนถึง 6 ขวบ แสดงลักษณะผิดปกติในการพัฒนาภาษา สายตาบกพร่องหรือผิดปกติและระดับสติปัญญามีแนวโน้มที่จะต่ำกว่าระดับปกติ การวิจัยในขณะนั้นพบว่าสาเหตุตะกั่วเป็นพิษนี้เกิดจากการที่ชาวบ้านนำเอาขี้ตะกั่วจากหม้อแบตเตอรี่เก่ามาถมถนนเมื่อนำดินในบริเวณหมู่บ้านนี้มาวิเคราะห์พบว่ามีตะกั่วสูงถึง 3,900 ppm ซึ่งสูงกว่าดินที่ไม่ได้ถมด้วยขี้ตะกั่วถึง 25 เท่า การวิเคราะห์ระดับตะกั่วในน้ำ พืช ผัก ปลา ตลอดจนในเลือดและเส้นผมเด็กที่อาศัยในบริเวณหมู่บ้านแห่งนี้ก็พบว่าสูงกว่าระดับเกณฑ์ปกติมากเช่นกัน (31)

ในเวลส์ สหราชอาณาจักร มีการตรวจเลือดมารดาที่อาจได้รับการปนเปื้อนของตะกั่วจากผักที่ปลูกบริโภคในดินใกล้เหมืองแร่ พบว่า ผู้ไม่ปลูกผักกินเลยมีตะกั่วในเลือดเท่ากับ 0.54 ไมโครโมล/ลิตร ที่ปลูกผักกินบ้างเท่ากับ 0.62 ไมโครโมล/ลิตร และที่ปลูกผักกินเป็นประจำมีค่า 0.69 ไมโครโมล/ลิตร ซึ่งผักที่บริโภคมีค่าตะกั่วอยู่สูงมาก เช่น หัวบีทมีค่า 12.2 มิลลิกรัม/กิโลกรัม หอมหัวใหญ่มีค่า 35.3 มิลลิกรัม/กิโลกรัม และผักกาดหอมมีค่า 29.0 มิลลิกรัม/กิโลกรัม ซึ่งมีค่าสูงกว่าค่ากำหนดที่ยอมให้มีได้ คือ 1 มิลลิกรัม/กิโลกรัม เป็นอย่างมาก

ในกรณีที่เกิดการปนเปื้อนตะกั่วในดินในปริมาณที่สูงมากจนเกินขีดความสามารถของดินที่จะรับไว้ได้ซึ่งมักเกิดในบริเวณพื้นที่ที่มีการถลุงหรือฝังกากของเสียที่ปนเปื้อนตะกั่วอาจเกิดการปนเปื้อนลงสู่ชั้นน้ำใต้ดินและเกิดอันตรายต่อผู้ที่นำไปบริโภคได้ ในสหรัฐอเมริกาพื้นที่ที่เคยมีการทำเหมืองแร่และโรงหลอมตะกั่วได้เกิดการปนเปื้อนตะกั่วในดินและแพร่ลงสู่ชั้นน้ำใต้ดินในหลายพื้นที่ซึ่งบางแห่งมีการใช้น้ำใต้ดินบริโภค (32,33,34,35)

## 2.10 พิษของตะกั่วต่อร่างกาย

ตะกั่วเป็นโลหะที่ร่างกายคนเราไม่ต้องการ กล่าวคือ ไม่มีส่วนเกี่ยวข้องกับระบบเมตาบอลิซึมกระบวนการย่อยอาหาร ยิ่งไปกว่านั้นตะกั่วยังเป็นพิษต่อร่างกายอย่างมากถ้าร่างกายรับเข้าไป

ในปริมาณสูง โดยปกติร่างกายคนเราสามารถทนต่อตะกั่วในปริมาณสูงพอสมควร มีการวิจัยพบว่า คนทั่วไปมีตะกั่วในเลือดประมาณ 0.25 ppm จะไม่ก่อให้เกิดอาการเป็นพิษแต่อย่างใด แต่ถ้าร่างกายรับตะกั่วเข้าไปในปริมาณมากในทันทีทันใด เช่นในเลือดมีมากกว่า 0.8 ppm จะเกิดอาการเป็นพิษอย่างเฉียบพลันซึ่งมักเกิดกับคนงานที่ทำงานในอุตสาหกรรมที่ใช้ตะกั่วในกระบวนการผลิต แต่สำหรับคนทั่วไปพิษของตะกั่วที่เกิดขึ้นเป็นแบบสะสม กล่าวคือ ร่างกายรับตะกั่วเข้าไปทีละน้อย แต่ก็ยังมากกว่าที่ร่างกายสามารถขับถ่ายออกไปได้ ซึ่งเมื่อตะกั่วเข้าสู่ร่างกายจนถึงขีดอันตรายจะแสดงอาการให้เห็นดังนี้

1. อาการทางระบบทางเดินอาหาร จะเริ่มมีอาการเบื่ออาหาร คลื่นไส้ อาเจียน ท้องผูก บางรายอาจมีท้องเสีย อาการที่สำคัญคือ ปวดท้องอย่างรุนแรง นอกจากนี้อาจพบแนวเส้นตะกั่ว (Lead Line) จับอยู่ที่ขอบเหงือกของผู้ป่วย
2. อาการทางระบบประสาทส่วนปลาย ผู้ป่วยจะมีอาการกล้ามเนื้อแขนและขาอ่อนแรง บางครั้งปวดตามกล้ามเนื้อและข้อต่างๆ และอาจเกิดอัมพาตของกล้ามเนื้อได้
3. อาการทางสมอง เป็นอาการที่พบว่ารุนแรงที่สุด มักพบในเด็กที่ได้รับตะกั่วเข้าสู่ร่างกายในปริมาณค่อนข้างสูง อาการมักเริ่มจากการตื่นเต้น นอนไม่หลับ ผื่นร้ำขุย อารมณ์ฉุนเฉียว ปฏิกริยาสะท้อนกลับไวกว่าปกติ สติคุ้มค้ำคุ้มร้าย ในที่สุดอาจชัก หมคสติและอาจถึงแก่กรรมได้
4. อาการทางเลือด ตะกั่วจะไปยับยั้งเอนไซม์ที่ทำหน้าที่สร้างเม็ดเลือดแดง ทำให้มีเม็ดเลือดแดงน้อย เม็ดเลือดผิดปกติและแตกง่าย เลือดจาง อวัยวะต่างๆทำงานไม่ปกติเนื่องจากขาดเลือด
5. ตะกั่วทำให้อสุจิของเพศชายและไข่ของเพศหญิงผิดปกติทำให้เป็นหมัน ประจำเดือนผิดปกติและตะกั่วยังทำลายระบบไตด้วย

## 2.11 การดูดซับธาตุโลหะในดิน

การดูดซับในดินเป็นกระบวนการที่อะตอม โมเลกุลหรือไอออนของสารใดๆที่อยู่ในดิน ถูกยึดเอาไว้กับพื้นผิวของอนุภาคดิน โดยการดูดซับอาจเกิดจากแรงยึดเหนี่ยวทางเคมีหรือฟิสิกส์ ซึ่งจุลธาตุแต่ละชนิดอาจถูกดูดซับได้ด้วยกระบวนการที่แตกต่างกันและถูกดูดซับในอัตราที่ไม่เท่ากัน

### 2.11.1 ประเภทของการดูดซับ

การดูดซับอาจแบ่งได้เป็น 2 ประเภทตามลักษณะการดูดซับดังนี้ (36)

1. การดูดซับประจุของดิน (Positive Adsorption) เป็นการดูดซับที่ความเข้มข้นของสารที่ถูกดูดซับในบริเวณสารละลายดินส่วนที่อยู่ตรงพื้นผิวของอนุภาคดิน (Inner Solution) นั้นมีมากกว่าในสารละลายดินส่วนนอก (Outer Solution)
2. การผลักประจุให้ออกห่างจากพื้นผิว (Negative Adsorption) เกิดขึ้นเมื่อสารที่ถูกดูดซับถูกผลักออกจากพื้นผิวของอนุภาคดิน ทำให้ความเข้มข้นของสารที่ถูกดูดซับในสารละลายดินส่วนนอกมีมากกว่าที่บริเวณพื้นผิวอนุภาคดิน

### 2.11.2 แรงที่ทำให้เกิดการดูดซับ

แรงที่ทำให้เกิดกระบวนการดูดซับขึ้นมีหลายประเภทด้วยกันคือ

1. แรงแวนเดอร์วาลส์ (Van der Waals Force) เป็นแรงยึดเหนี่ยวทางกายภาพที่สำคัญที่สุด (36) แต่เป็นแรงที่อ่อนมาก เกิดขึ้นเมื่ออนุภาคอยู่ใกล้ชิดกันมาก และจะลดลงอย่างรวดเร็วตามระยะทางที่ห่างออกไป (37) แรงแวนเดอร์วาลส์ เกิดจากปฏิกิริยาสัมพันธระหว่างประจุบวกและเกิดจากปฏิกิริยาสัมพันธระหว่างประจุบวกกับประจุลบของอะตอมหรือโมเลกุลที่อยู่ใกล้กัน ซึ่งพอจะจำแนกย่อยได้ดังนี้
  - ปฏิกิริยาสัมพันธระหว่างไดโพลกับไดโพล (Dipole-Dipole Interaction) แรงชนิดนี้เกิดจากการกระทำร่วมกันระหว่างไดโพลกับไดโพล ซึ่งเป็นการดูดซับระหว่างสารที่มีประจุด้วยกัน
  - ปฏิกิริยาสัมพันธระหว่างไดโพลกับไดโพลที่ถูกชักนำ (Dipole-Induced Dipole Interaction) แรงชนิดนี้จะพบในปฏิกิริยาการดูดซับระหว่างสารที่มีประจุกับสารที่ถูกชักนำให้มีประจุ
  - ปฏิกิริยาสัมพันธระหว่างไดโพลที่ถูกชักนำกับไดโพลที่ถูกชักนำ (Induced Dipole-Induced Dipole Interaction) แรงชนิดนี้เกิดจากการกระทำร่วมกันระหว่างสารที่ถูกชักนำให้มีประจุกับสารที่ถูกชักนำให้มีประจุ

2. พันธะไฮโดรเจน (Hydrogen Bonding) เป็นพันธะที่มีอะตอมของไฮโดรเจนเป็นตัวเชื่อม พันธะไฮโดรเจนอาจเป็นการดูดซับทางกายภาพหรือทางเคมีทั้งนี้ขึ้นอยู่กับพลังงานความร้อน แต่ถ้าเป็นการดูดซับทางเคมีจะมีความร้อนเกิดขึ้นสูงและมีพันธะที่แข็งแรง

3. พันธะไฮโดรโฟบิก (Hydrophobic Bonding) จะเกี่ยวข้องกับการดูดซับสารประกอบที่ไม่มีขั้ว โดยสารประกอบจะเข้าไปใส่ที่โมเลกุลของน้ำที่เกาะอยู่บนพื้นผิวของอนุภาค ทำให้โมเลกุลของน้ำถูกขับออกมาในสารละลายดิน

4. แรงคูลอมบิก (Coulombic Force) เป็นแรงทางไฟฟ้าที่เกิดจากการดึงดูดไอออนเข้าไปยึดเกาะกับพื้นผิวหรือไอออนที่มีประจุตรงกันข้าม ตัวอย่างเช่น การที่ไอออนบวกยึดเกาะอยู่บนผิวของแร่ดินเหนียวซึ่งมีประจุลบ

5. การถ่ายเทประจุ (Charge Transfer) เป็นกระบวนการที่เกี่ยวข้องกับการซ้อนทับกันของ Molecular Orbital บางส่วนและการแลกเปลี่ยนความหนาแน่นของอิเล็กตรอนบางส่วนของโมเลกุลที่รับอิเล็กตรอน (Electron-Acceptor Molecule) และ โมเลกุลที่ให้อิเล็กตรอน (Electron-Donor Molecule) เกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อน

### 2.11.3 ไอโซเทอมของการดูดซับ (Adsorption Isotherm)

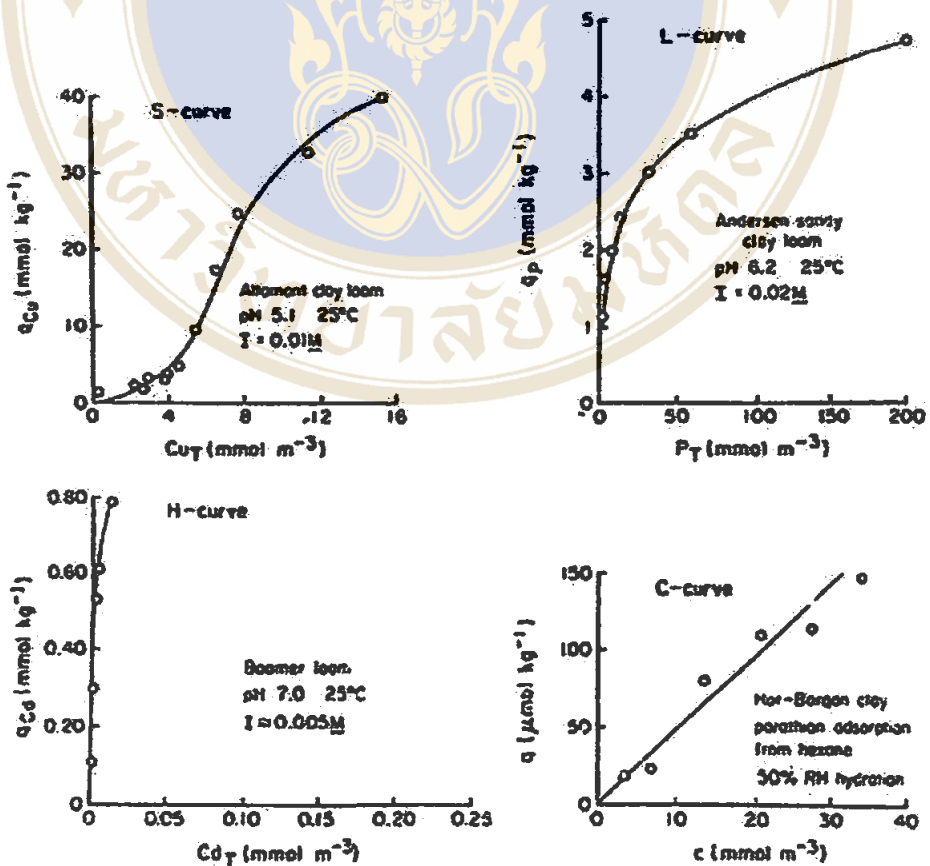
ไอโซเทอมของการดูดซับเป็นเส้นที่ลากขึ้นเพื่อบอกถึงปริมาณการดูดซับของสารหรือไอออนบนผิวของอนุภาคดินแร่ต่างๆ เส้นนี้ได้จากการลากเส้นต่อกันของจุดต่างๆ ระหว่างปริมาณของสารหรือไอออนที่ถูกดูดซับไว้กับความเข้มข้นของสารหรือไอออนในสารละลายดินที่อยู่ในสภาพสมดุลกัน ณ อุณหภูมิคงที่ เส้นไอโซเทอมจะมีรูปร่างแตกต่างกันออกไปแล้วแต่แรงที่ดึงดูดกันระหว่างพื้นผิวอนุภาคกับชนิดของไอออนนั้น ๆ (37) โดยทั่วไปในการศึกษาการดูดซับในดินมักพบเส้นไอโซเทอมใน 4 ลักษณะดังแสดงในภาพที่ 3 (38)

1. ไอโซเทอมชนิดตัวเอส (S-Curve Isotherm) เป็นกราฟที่มีลักษณะความชันต่ำในช่วงเริ่มต้นและเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นในสารละลายดินพฤติกรรมดังกล่าวอธิบายได้ว่าดินมีความสามารถในการดูดซับได้น้อยกว่าสารละลายดินในตัวอย่างของการดูดซับไอออนทองแดง ( $\text{Cu}^{2+}$ ) ที่แสดงในภาพที่ 3 นั้นไอโซเทอมมีลักษณะเป็นรูปตัวเอสเนื่องจากอินทรีย์วัตถุที่ละลายอยู่

ในสารละลายดินดูดซับไอออนทองแดง ได้ดีกว่าอนุภาคดินจึงมีปริมาณทองแดงในสารละลายดินมากกว่าในดินในช่วงเริ่มต้น เมื่อการดูดซับของอินทรีย์วัตถุเกิดขึ้นจนถึงจุดสูงสุดแล้ว จึงจะเกิดการดูดซับไอออนทองแดง บนพื้นผิวอนุภาคดินกราฟจึงมีความชันสูงขึ้นในช่วงหลัง

2. ไอโซเทอมชนิดตัวแอล (L-Curve (Langmuir) Isotherm) กราฟชนิดนี้เป็นผลมาจากการที่ดินมีความสามารถในการดูดซับได้สูง ในช่วงเริ่มต้นของการดูดซับจึงมีปริมาณตัวถูกดูดซับในสารละลายดินในระดับต่ำและมีปริมาณที่ถูกดูดซับไว้สูง กราฟจึงมีลักษณะชันในช่วงเริ่มต้น หลังจากนั้นพื้นที่ผิวในการยึดเกาะของอนุภาคดินมีน้อยลงจึงมีปริมาณตัวถูกดูดซับในสารละลายดินเพิ่มขึ้น ไอโซเทอมชนิดตัวแอล เป็นไอโซเทอมที่พบมากที่สุดที่ดิน (38)

3. ไอโซเทอมชนิดตัวเอช (H-Curve (High affinity) Isotherm) มีลักษณะลาดชันสูงมากตั้งแต่ช่วงเริ่มต้น (เมื่อเปรียบเทียบกับไอโซเทอมชนิดตัวแอล) ลักษณะดังกล่าวแสดงว่าอนุภาคดินมีความสามารถในการดูดซับได้สูงมาก สภาวะนี้มักเกิดขึ้นได้ทั้งจาก Inner-Sphere Surface Complexation หรือจากแรงแวนเดอร์วาลส์



ภาพที่ 3 ไอโซเทอมของการดูดซับที่พบทั่วไป

4. ไอโซเทอมชนิดตัวชี้ (C-Curve (Constant) Isotherm) ความชันของกราฟชนิดนี้จะไม่แปรผันตามความเข้มข้นในสารละลายดิน ไอโซเทอมชนิดนี้อาจเกิดจากสัดส่วนที่คงที่ของปริมาณการดูดซับ โดยอนุภาคดินกับปริมาณตัวถูกดูดซับในสารละลายดินหรือเกิดจากการเพิ่มขึ้นอย่างเป็นสัดส่วนของปริมาณสารที่ถูกดูดซับกับปริมาณสารในสารละลายดิน

โดยทั่วไปแล้วข้อมูลเกี่ยวกับการดูดซับไอออนบนพื้นผิวอนุภาค สามารถอธิบายได้ด้วยสมการหลายสมการ เนื่องจากมีหลายทฤษฎีได้นำมาอธิบายสมดุลของการดูดซับที่เกิดขึ้น แต่ที่นิยมใช้งานมากที่สุดได้แก่ สมการแลงเมียร์ (Langmuir Equation) และสมการฟรอนด์ลิค (Freundlich Equation)

1) สมการแลงเมียร์

เดิมสมการแลงเมียร์ใช้ในการอธิบายลักษณะการยึดเกาะบนพื้นผิวของแข็งสมการนี้มีสมมติฐานว่า 1) การยึดเกาะของไอออนเกิดขึ้นบนพื้นผิวที่มีแรงดึงดูดเท่ากันทุกจุด 2) ไอออนบนพื้นผิวที่ถูกเกาะยึดไว้จะไม่ทำปฏิกิริยาซึ่งกันและกัน คือไอออนที่ยึดเกาะบนพื้นผิวแต่ละตัว จะเป็นอิสระแก่กัน 3) มีการเกาะยึดในปริมาณที่สูงสุดได้ นั่นก็คือ พื้นผิวจะปกคลุมไปด้วยชั้น ของไอออน

สมการแลงเมียร์มีดังนี้

$$\frac{x}{m} = \frac{KCb}{(1+KC)} \dots(2-1)$$

เมื่อ

- x/m = ปริมาณของ ไอออนที่ถูกดูดซับต่อน้ำหนักของอนุภาคดิน
- K = ค่าคงที่ซึ่งมีความสัมพันธ์กับแรงดึงดูดระหว่างพื้นผิวกับ ไอออน
- C = ความเข้มข้นของ ไอออน ในสารละลายดินที่อยู่ในสภาพสมดุลกับความเข้มข้นของ ไอออนที่เกาะยึดบนผิวอนุภาค
- b = ปริมาณ ไอออนที่พื้นผิวดูดซับไว้ได้ในระดับสูงสุด

สมการดังกล่าวมักถูกคิดแปลงให้เป็นสมการเส้นตรง ทั้งนี้เพื่อความสะดวกและง่ายต่อการที่จะนำเอาสมการนี้ไปทดสอบกับข้อมูลที่ได้รับ เพื่อที่จะได้ทราบว่า การดูดซับบนพื้นผิวนั้นเป็นไปตามสมการหรือไม่

สมการเส้นตรงมีดังนี้

$$\frac{C}{(x/m)} = \frac{1}{Kb} + \frac{C}{b} \quad \dots(2-2)$$

หากข้อมูลที่ต้องการทราบมีลักษณะที่อธิบายได้ด้วยสมการแลงเมียร์แล้ว เส้นตรงที่ลากจากจุดระหว่าง  $C/(x/m)$  กับ  $C$  จะให้ค่าลาดเอียงเท่ากับ  $1/b$  และตรงจุดตัดของเส้นมีค่าเท่ากับ  $1/Kb$  ค่าคงที่  $K$  ได้จาก  $1/b$  หาค่าด้วย  $1/Kb$

ข้อได้เปรียบจากการใช้สมการแลงเมียร์ในการบอกลักษณะการดูดซับ ไอออนก็คือ สมการนี้จะให้ค่าปริมาณ ไอออนที่พื้นผิวเกาะยึด ไว้ในระดับสูงสุด

## 2) สมการฟรอยด์ลิต

หากว่าข้อมูลไม่สามารถใช้กับสมการแลงเมียร์ได้ นักวิทยาศาสตร์ก็มักจะหันมาใช้สมการ ฟรอยด์ลิตซึ่งมีสมการดังนี้

$$\frac{x}{m} = KC^{1/n} \quad \dots(2-3)$$

เมื่อ

$x/m$  = ปริมาณของ ไอออนที่ถูกเกาะยึดต่อน้ำหนักของอนุภาคดิน

$C$  = ความเข้มข้นของไอออนในสารละลายดินที่อยู่ในสภาพสมดุลกับ

ความเข้มข้นของไอออนที่ถูกดูดซับบนพื้นผิวของอนุภาคดิน

$K$  = ค่าคงที่



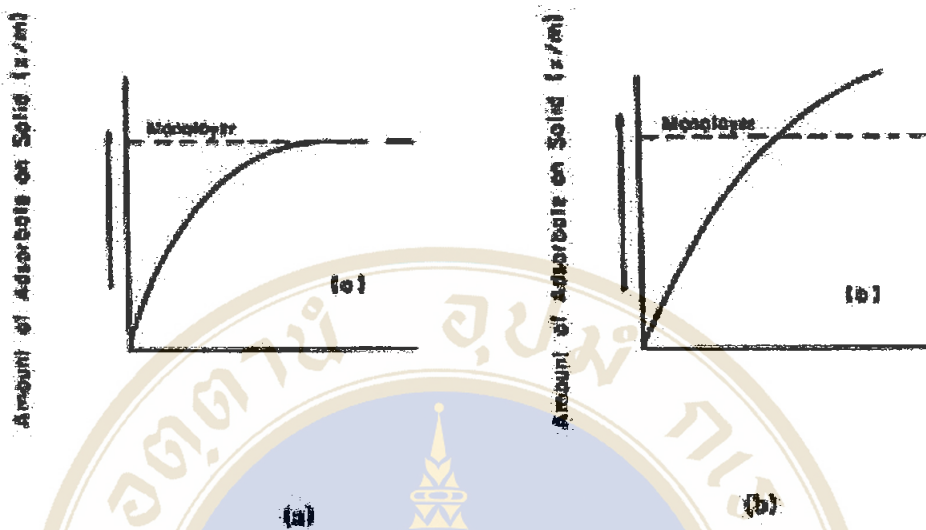
$n$  = ค่าคงที่

สมการเส้นตรงแบบฟรอนด์ลิค คือ

$$\log \frac{x}{m} = \frac{1}{n} \log C + \log K \quad \dots(2-4)$$

ข้อมูลที่ใช้ได้กับสมการฟรอนด์ลิคนี้มีลักษณะที่บอกได้ว่าการเกาะยึดของไอออนจะเกิดขึ้นต่อไปเรื่อยๆ トラบเท่าที่ความเข้มข้นของไอออนในสารละลายคินมีเพิ่มมากขึ้น

สมการ Freundlich เป็นสมการ Empirical ซึ่งแสดงถึงการลดลงแบบลอการิทึมของพลังงานในการดูดซับ เมื่อสัดส่วนในการถูกดูดซับถูกปกคลุมมากขึ้น ในขณะที่สมการ Langmuir จะแสดงถึงพลังงานในการดูดซับบนพื้นผิวเดียวกันจะไม่ขึ้นอยู่กับพื้นที่ผิวที่ถูกปกคลุมด้วยตัวดูดซับ ดังนั้น สมการ Freundlich จึงสามารถสร้างสมมติฐานได้ว่า การลดลงของพลังงานในการดูดซับเมื่อการปกคลุมพื้นที่ผิวเพิ่มขึ้นนั้น เนื่องมาจากความแตกต่างของพื้นที่ผิว (Surface Heterogeneity) อย่างไรก็ตามระดับของความแตกต่างของพื้นผิวนั้นไม่มีใครทราบแน่ชัด ดังนั้น การใช้สมการ Langmuir และ Freundlich ที่ดีที่สุดคือ การนำเอาสมการทั้งสองมาใช้อธิบายกระบวนการดูดซับที่เกิดขึ้นในการทดลองมากกว่าจะพิสูจน์หาความเหมือนหรือต่างกันของบริเวณพื้นที่ที่เกิดการดูดซับ สำหรับรูปแบบของไอโซเทอมการดูดซับที่อธิบายได้ด้วยสมการ Langmuir และ สมการ Freundlich แสดงดังภาพที่ 4 (39)



ภาพที่ 4 รูปแบบของ Adsorption Isotherm จาก (a) สมการ Langmuir (b) สมการ Freundlich

#### 2.11.4 การศึกษาการดูดซับ

โดยทั่วไปการศึกษากการดูดซับในดินทำเพื่อศึกษากการดูดซับโลหะไว้ในดินหรือองค์ประกอบของดิน และยังพบอยู่บ่อยครั้งที่มีการศึกษากการดูดซับเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์การกระจาย (Distribution Coefficient, K) ของสารมลพิษในดินซึ่งจำเป็นในการทำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เพื่อทำนายการแพร่กระจายของโลหะ นอกจากนี้มีการศึกษากการดูดซับในดินเพื่อเปรียบเทียบความสามารถของดินชนิดหนึ่งในการดูดซับโลหะชนิดต่างๆหรือเปรียบเทียบความสามารถของดินแต่ละชนิดในการดูดซับโลหะชนิดใดชนิดหนึ่ง หรือศึกษาผลของการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของสารละลายดินหรือดิน เช่น ค่าพีเอช ความแรงของไอออน การเพิ่มไอออนชนิดอื่นและการเพิ่มลิแกนด์เข้าไปในสารละลายดิน เป็นต้น ซึ่งวิธีการในการศึกษาข้อมูลการดูดซับไอออนบนพื้นผิวอนุภาคดินสามารถทำได้ 2 วิธี ได้แก่

### 2.11.4.1 Batch Method Adsorption Study

ทำได้โดยการผสมดินที่ทราบน้ำหนักจำนวนหนึ่งกับสารละลายของไอออนที่ต้องการศึกษา ความเข้มข้นต่างๆ ในปริมาตรที่คงที่หรืออาจใช้ความเข้มข้นของสารละลายที่คงที่ค่าหนึ่งแล้วแปรผันอัตราส่วนของดินต่อสารละลาย จากนั้นทำให้ดินและไอออนในสารละลายทำปฏิกิริยากันจนสมดุล  $Q$  อุณหภูมิคงที่ ซึ่งอาจทำได้โดยการกวนหรือเขย่าส่วนผสมดังกล่าว จากนั้นทำการแยกอนุภาคดินออกจากสารละลายดินโดยการเหวี่ยง (Centrifuge) หรือการกรอง (Filtration) แล้ววัดหาความเข้มข้นของไอออนในสารละลายดิน ปริมาณไอออนที่ดินดูดซับไว้จะเท่ากับปริมาณไอออนในสารละลายตั้งต้นลบด้วยปริมาณไอออนในสารละลายดินที่สภาพสมดุล โดยทั่วไปปริมาณไอออนที่ดินดูดซับไว้จะแสดงในหน่วยน้ำหนักไอออนที่ถูกดูดซับไว้ต่อน้ำหนักของดิน ข้อมูลปริมาณการดูดซับไอออนที่ได้จากการทดลองจะถูกนำไปพลอตกับความเข้มข้นของไอออนในสารละลายดินที่สภาพสมดุลและนำไปหาความสัมพันธ์ทางสถิติโดยใช้สมการ Regression ต่างๆ เช่น สมการพหุคูณกำลังหรือสมการแลงเมียร์ ค่าสัมประสิทธิ์การกระจาย ((Soil/Water) Distribution Coefficient,  $K$ ) ของสมการที่ได้จะทำให้ทราบถึงความสามารถในการดูดซับไอออนของดินในช่วงความเข้มข้นที่ทำการศึกษา Batch Method เป็นวิธีที่นำมาใช้มากที่สุดในการศึกษาการดูดซับไอออนของดิน (5) เนื่องจากมีข้อดีคือ

- วิธีการทดลองและการจัดการข้อมูลสามารถทำได้ง่าย
- ใช้ระยะเวลาในการทดลองสั้นกว่าวิธีอื่น

อย่างไรก็ตามวิธีนี้มีข้อเสีย คือ

- ข้อมูลที่ได้มีความอ่อนไหวต่ออัตราส่วนของดินและสารละลายที่ใช้
- เทคนิคการแยกอนุภาคดินออกจากสารละลายอาจส่งผลต่อข้อมูลที่ได้
- เทคนิคที่ใช้ในการกวนอนุภาคดินและสารละลายอาจทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงหรือทำลาย คุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของดิน (40)

### 2.11.4.2 Column Method Adsorption Study

การศึกษาการดูดซับไอออนของดินโดยใช้ Column Method จะซับซ้อนและใช้เวลานานกว่า Batch Method แต่ข้อมูลที่ได้อาจมีความเฉพาะเจาะจงมากกว่าหากสามารถควบคุมสภาวะการทดลองเหมาะสมได้ การศึกษาแบบ Column Method ทำได้โดยการอัดดินลงไปในแท่งแก้วหรือพลาสติกแล้วผ่านสารละลายของไอออนที่ทราบความเข้มข้นระดับหนึ่งลงไปดินด้วยอัตราไหลที่คงที่ จากนั้นทำการเก็บตัวอย่างสารละลายที่ไหลผ่านชั้นดิน ไปวิเคราะห์หาความเข้มข้นของไอออนที่เหลืออยู่ในสารละลายดิน จนกระทั่งถึงจุด Break Through ซึ่งได้แก่จุดที่ความเข้มข้นของสารละลายดินที่ผ่านชั้นดินมีค่าเท่ากับความเข้มข้นของสารละลายตั้งต้นแล้วพลอต Breakthrough Curve

การศึกษาแบบ Column Method มีข้อดีได้แก่

- สามารถใช้อัตราส่วนของดินต่อสารละลายที่ต่ำได้
- ไม่ต้องทำการแยกอนุภาคดินออกจากสารละลายดินซึ่งเป็นปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อข้อมูลที่ได้อีก
- ไม่ต้องทำการกวนดินกับสารละลายจึงลดความผิดพลาดของข้อมูลจากเทคนิคการกวนที่ใช้
- การใช้ Column สามารถจำลองสถานการณ์ได้ใกล้เคียงกับสภาพธรรมชาติมากกว่าวิธี Batch

อย่างไรก็ตาม Column Method มีข้อเสียหลายประการที่ต้องคำนึงถึงได้แก่

- ข้อมูลที่ได้จะขึ้นอยู่กับอัตราการไหลที่ใช้
- การออกแบบและควบคุมการทำงานของ Column ให้ใกล้เคียงกับสภาพในธรรมชาติทำได้ยาก
- การอัดแท่งดินให้มีความสม่ำเสมอทำได้ยากเมื่อใส่สารละลายลงไปดินจึงมักเกิด Channel Flow
- ใช้เวลานานกว่า Batch Method มาก เนื่องจากไม่สามารถทำพร้อมหลายๆคอลัมน์ในเวลาเดียวกัน

### 2.11.5 คุณสมบัติของดินที่มีอิทธิพลต่อการดูดซับโลหะหนัก

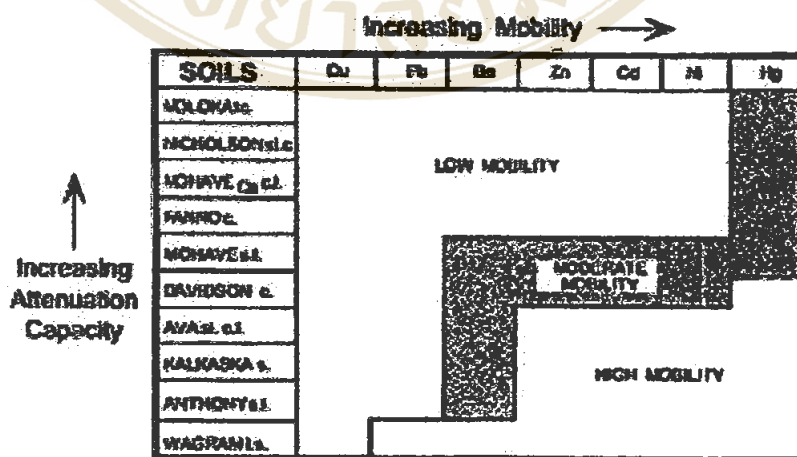
คุณสมบัติของดินที่มีอิทธิพลต่อการดูดซับไอออนนั้นมีหลายประการด้วยกัน การดูดซับโลหะไอออนบวกจะมีความสัมพันธ์กับค่าพีเอชของดิน, ศักย์รีดอกซ์ (Redox Potential), อนุภาคดินเหนียว, อินทรีย์วัตถุ, ออกไซด์ของเหล็กและแมงกานีส และปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนต ส่วนการดูดซับไอออนลบนั้นจะมีความสัมพันธ์กับออกไซด์ของเหล็กและแมงกานีส, พีเอชและ ศักย์รีดอกซ์ นอกจากนี้ปัจจัยทางด้านคุณสมบัติของดินดังกล่าวข้างต้นแล้ว รูปของโลหะและตัวทำละลายของโลหะที่เติมลงสู่ดินก็มีผลต่อการดูดซับไอออนไว้ในดิน ซึ่งส่งผลให้โลหะสามารถเคลื่อนที่ไปในสารละลายดินได้มากขึ้นหรือน้อยลง

Korte และคณะ (41) ได้ทำการศึกษาการเคลื่อนที่ของไอออนโลหะภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจนในพื้นที่ฝังกลบโดยทำการจำลองสถานการณ์ และได้จัดลำดับการเคลื่อนที่ของโลหะหนัก 11 ชนิดในดิน 10 ชนิดไว้ดังตารางที่ 3 โดยในการศึกษาได้ปรับพีเอชของดินไว้ที่ 5 พบว่า ในจำนวนโลหะไอออนบวกที่ศึกษาทั้งหมด ตะกั่วและทองแดงเคลื่อนที่ได้ น้อยที่สุด และปรอท (II) เคลื่อนที่ได้มากที่สุด (ภาพที่ 5) ดินที่มีเนื้อดินแน่นและพีเอชสูงจะสามารถยึดโลหะไว้ได้มาก ในขณะที่ดินทราย และ/หรือดินที่มีพีเอชต่ำดูดซับโลหะไว้ได้น้อย สำหรับโลหะไอออนลบ ดินเหนียวที่มีออกไซด์ และมีค่าพีเอชต่ำจะสามารถยึดเอาไอออนลบไว้ได้มาก (ภาพที่ 6) และโครเมียม (VI) เป็นโลหะที่สามารถเคลื่อนที่ได้มากที่สุด โดย Griffin และ Shimp (42) ได้จัดลำดับความสามารถในการเคลื่อนที่ของโลหะหนัก 9 ชนิดในดินเหนียวชนิดมอนต์โมริลโลไนท์และคาโอลิไนท์ไว้ดังนี้

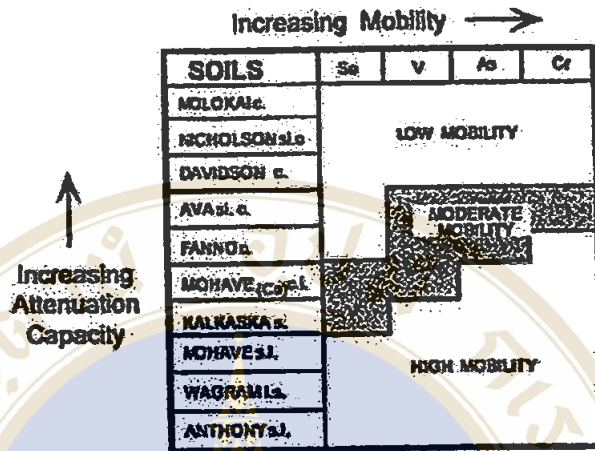


ตารางที่ 3 คุณลักษณะของดิน

Soil	Order	pH	CEC meq/100g	Surface	Free	Clay	Texture
				Area %	Fe Oxides %		
Wagram	Ultisol	4.2	2	8.0	0.6	4	Loamy Sand
Ava	Alfisol	4.5	19	61.5	4	31	Silty Clay Loam
Kalkaska	Spodosol	4.7	10	8.9	1.8	5	Sand
Davidson	Ultisol	6.2	9	61.3	17	61	Clay
Molokai	Oxisol	6.2	14	67.3	23	52	Clay Silty Clay
Nicholson	Alfisol	6.7	37	120.5	5.6	49	Silty Clay
Fanno	Alfisol	7	33	122.1	3.7	46	Clay
Mohave	Aridisol	7.3	10	38.3	1.7	11	Sandy Loam
Mohave ca	Aridisol	7.8	12	127.5	2.5	40	Clay Loam
Anthony	Entisol	7.8	6	19.8	1.8	15	Sandy Loam



ภาพที่ 5 สภาพเคลื่อนที่ได้ของไอออนบวกในดิน



ภาพที่ 6 สภาพเคลื่อนที่ได้ของไอออนลบในดิน

### 2.12 ลักษณะนิสัยของตะกั่วในดิน

ตะกั่วในรูปละลายได้ที่ปนเปื้อนลงสู่ดิน ส่วนใหญ่จะทำปฏิกิริยากับอนุภาคดินเหนียว ฟอสเฟต ซัลเฟต คาร์บอเนต ไฮดรอกไซด์ และอินทรีย์วัตถุในดิน ทำให้ความสามารถในการละลายลดลงเป็นอย่างมาก จึงอยู่ในรูปที่พืชไม่สามารถดูดกินได้ นอกเสียจากดินสภาพกรดจัด ในดินที่มีพีเอช มากกว่า 6 ตะกั่วอาจจะดูดซับไว้ที่พื้นผิวของอนุภาคดินเหนียวหรือเกิดเป็นสารประกอบเลคคาร์บอเนต ตามข้อมูลที่แสดงในตารางที่ 4 จะพบว่า ภายได้สถานะที่ทำการทดลอง ตะกั่วเป็นโลหะหนักที่ถูกดูดซับไว้ในดินได้ดีที่สุดซึ่งการศึกษาดังกล่าวส่วนใหญ่ใช้ 0.01 M CaCl<sub>2</sub> เป็น Background Solution Plus และคณะ (43) และ Kotuby- Amacher และ Gambrell (44) รายงานว่า ในสถานะที่มีลิแกนด์เชิงซ้อน (Complexing Ligands) และไอออนบวกชนิดอื่นที่ถูกดูดซับได้ (Competing Cation) ตะกั่วจะถูกดูดซับได้น้อยลง และตะกั่วสามารถยึดเกาะกับลิแกนด์ประเภทออร์แกนิกได้ดี ทำให้เกิดเป็นสารเชิงซ้อนซึ่งจะสามารถลดสภาพเคลื่อนที่ได้ของตะกั่วได้เป็นอย่างมาก นอกจากนี้พบว่าตะกั่วส่วนใหญ่จะอยู่ในดินชั้นบนและมีการเคลื่อนย้ายลงสู่ดินชั้นล่างน้อยมาก

#### ตารางที่ 4 ความสามารถของโลหะในการถูกดูดซับโดยดินชนิดต่างๆ

Soil or Soil Constituent	Relative Order of Sorption	Reference
Goethite	Cu>Pb>Zn>Co>Cd	Forbe et al., 1976
Fe Oxide	Pb>Cu>Zn>Cd	Benjamin and Leckie, 1981
Monmorillonite	Cd=Zn>Ni	Puls and Bohn, 1988
Kaolinite	Cd>Zn>Ni	Puls and Bohn, 1988
Soils	Pb>Cu>Zn>Cd>Ni	Biddappa et al., 1981
Soils	Zn>Ni>Cd	Tiller et al., 1984
Mineral Soils	Pb>Cu>Zn>Cd	Elliot et al., 1986
Organic Soils	Pb>Cu>Cd>Zn	Elliot et al., 1986
Soil	Pb>Cu>Zn>Ni	Harter, 1983

### 2.13 ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อลักษณะนิสัยของโลหะไอออนบวกในดิน

#### 2.13.1 Competing Cations

โลหะไอออนบวกชนิดอื่นที่มีอยู่ในดินอาจมีผลทำให้การดูดซับไอออนบวกชนิดหนึ่งๆ เป็นไปได้ดีขึ้นหรือน้อยลง เนื่องจากจะเกิดการแย่งตำแหน่งในการยึดเกาะบนอนุภาคดิน Cavallaro และ McBride (45) พบว่า การดูดซับทองแดง (Cu) และแคดเมียม (Cd) จะลดลงหากมีแคลเซียมอยู่ด้วย โดยแคดเมียมจะได้รับผลกระทบมากกว่าทองแดง จึงทำให้สภาพเคลื่อนที่ได้ของแคดเมียมเพิ่มขึ้น ในทำนองเดียวกัน Harter (46) รายงานว่า แคลเซียมในสารละลายส่งผลต่อการดูดซับตะกั่วมากกว่าการดูดซับทองแดง นอกจากนี้ Harter (47) ได้ทำการศึกษาในปี 1992 โดยเติมทองแดง นิกเกิล และโคบอลต์ ลงไปในดินที่อิ่มตัวด้วยแคลเซียม พบว่า การมีแคลเซียมซึ่งเป็นไอออนที่พบโดยทั่วไปในดินที่มีพีเอชสูงกว่า 5.6 ไม่มีผลต่อการดูดซับทองแดง แต่มีผลต่อการดูดซับโคบอลต์และนิกเกิล ดังนั้นในการจัดการดินที่ปนเปื้อนด้วยโลหะหนักจึงมักจะทำโดยการปรับค่าพีเอชของดินด้วย สารประกอบแคลเซียมให้มีค่าประมาณ 7 อย่างไรก็ตามการเติมแคลเซียมถึงแม้ในปริมาณต่ำเพียง 0.01 M ก็อาจทำให้สภาพเคลื่อนที่ได้ของโลหะบางชนิดเพิ่มขึ้น เนื่องจากแคลเซียมไปแย่งตำแหน่งยึดเกาะบนอนุภาคดิน

นอกจากแคลเซียมซึ่งเป็นตัวอย่างของโลหะไอออนบวกที่พบมากในดิน (Major Cations) แล้ว โลหะปริมาณน้อย (Trace metal) ก็อาจเข้ามาแทนที่กันเองได้ Kuo และ Baker (48) รายงานว่า ทองแดงจะขัดขวางการดูดซับสังกะสีและแคดเมียมในดิน ส่วน Kurdi และ Doner (49) พบว่า การเติมสังกะสีลงในดินจะไม่ส่งผลต่อปริมาณทองแดงที่ดินดูดซับไว้ ในขณะที่การเติมทองแดงลงในดินชนิดหนึ่งที่มีค่า CEC ต่ำ จะยับยั้งการดูดซับสังกะสีโดยสิ้นเชิง

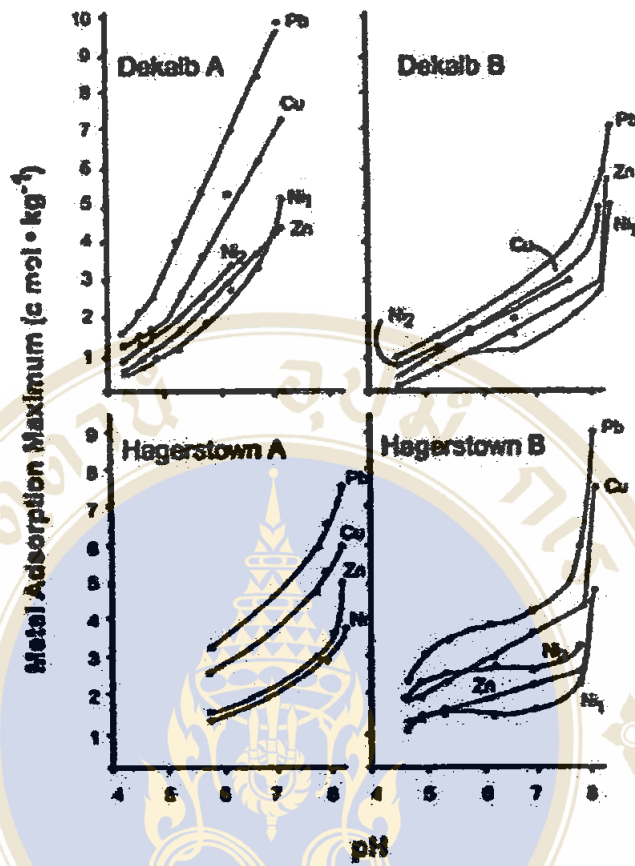
### 2.13.2 การเกิดสารประกอบเชิงซ้อน

โลหะไอออนบวก สามารถทำปฏิกิริยากับลิแกนด์ทั้งประเภทสารอินทรีย์และอนินทรีย์เกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนซึ่งจะทำให้มีประจุบวกลดลงจนอาจกลายเป็นโมเลกุลที่ไม่มีประจุ หรือเป็นประจุลบได้ Benjamin และ Leckie (50) รายงานว่า สารประกอบเชิงซ้อนของไอออนโลหะกับลิแกนด์เชิงซ้อนอาจส่งผลให้ถูกดูดซับได้น้อยลง หรือมากขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับไอออนโลหะอิสระ ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของโลหะ ชนิดและปริมาณของลิแกนด์ คุณสมบัติของพื้นผิวอนุภาคดิน องค์ประกอบในสารละลายดิน ค่าพีเอช และสภาพรีดอกซ์

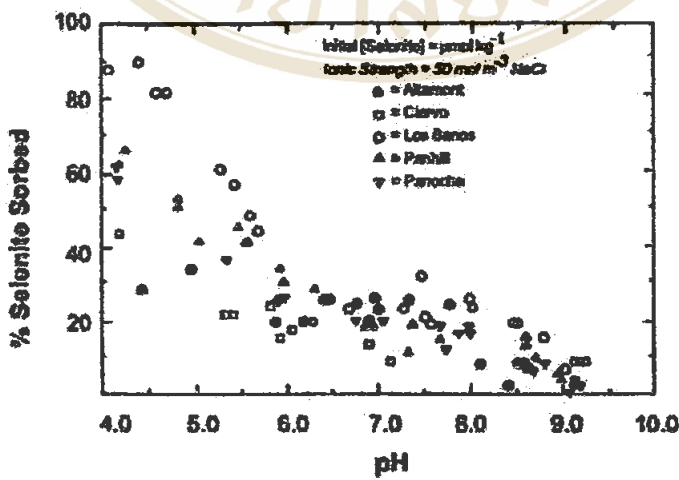
### 2.13.3 ค่าพีเอช

ค่าพีเอชของดินเป็นปัจจัยที่สำคัญมาก และมีผลกระทบทั้งทางตรงและทางอ้อมต่อการดูดซับโลหะไว้ในดิน เนื่องจากมีผลต่อกระบวนการต่าง ๆ ได้แก่ การดูดซับ (Adsorption) / การคาย (Desorption) การตกตะกอน (Precipitation) / การละลาย (Dissolution) การเกิดสารประกอบเชิงซ้อน (Complex Formation) และปฏิกิริยาออกซิเดชัน-รีดักชัน (Oxidation-Reduction) ภาพที่ 7 แสดงถึงผลของค่าพีเอชของดินต่อการดูดซับตะกั่ว นิกเกิล สังกะสีและทองแดงในดิน 2 ชนิดซึ่งค่าพีเอชที่ศึกษาอยู่ระหว่าง 4.3 ถึง 8.3 (51) ผลการศึกษาชี้ว่าการดูดซับโลหะไอออนบวกในดินจะเพิ่มขึ้นตามค่าพีเอช โดยเฉพาะอย่างยิ่งที่ระดับพีเอชมากกว่า 7 ส่วนภาพที่ 8 แสดงการดูดซับซีเลไนท์ ( $\text{SeO}_3^{2-}$ ) ในดิน 5 ชนิดที่ระดับพีเอชต่าง ๆ พบว่า การดูดซับจะแปรผกผันกับค่าพีเอช

การที่ปฏิกิริยาการดูดซับโลหะไอออนบวกในดินขึ้นอยู่กับค่าพีเอชนั้น มีสาเหตุส่วนหนึ่งมาจากการที่โลหะจะถูกไฮโดรไลซ์ได้เพิ่มขึ้นเมื่อพีเอชเพิ่มขึ้นและโลหะที่ถูกไฮโดรไลซ์นี้จะถูกดูดซับได้ดีกว่าไอออนอิสระ Cavallaro และ McBride (52) พบว่า พีเอชมีอิทธิพล



ภาพที่ 7 ผลของระดับพีเอชระดับการดูดซับตะกั่ว ทองแดง สังกะสี และ นิกเกิลสูงสุด ในดิน Dekalb และ Hagerstown ชั้น A และ B



ภาพที่ 8 การดูดซับซีลีไนท์ของดิน 5 ชนิด

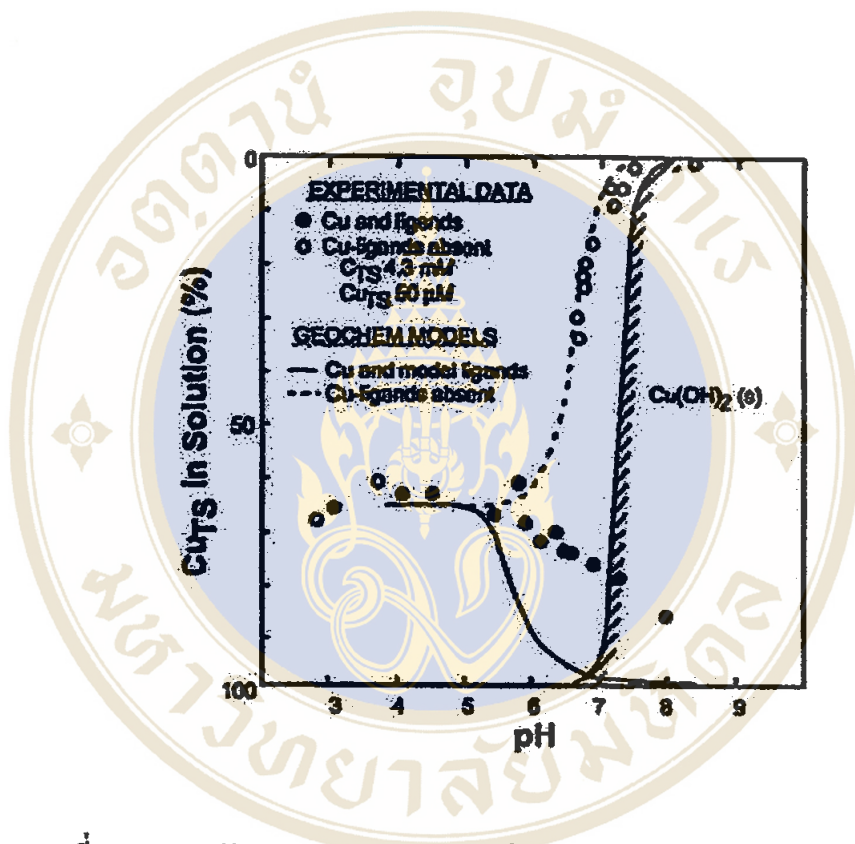
ต่อการดูดซับทองแดงมากกว่าการดูดซับแคดเมียม ผลการศึกษานี้สอดคล้องกับสมมติฐานที่ว่า การที่ทองแดงถูกไฮโดรไลซ์ที่พีเอช 6 จะทำให้ดินดูดซับทองแดงได้ดีขึ้น ในขณะที่การไฮโดรไลซ์แคดเมียมจะเกิดที่พีเอช 8

ตำแหน่งการดูดซับ (Adsorption Site) หลายประเภทในดิน ได้แก่ ออกไซด์ของเหล็กและแมงกานีส อินทรีย์วัตถุ คาร์บอนเนต และขอบของอนุภาคแร่ดินเหนียว จะขึ้นอยู่กับค่าพีเอชของดิน เมื่อพีเอชลดลง จำนวนของตำแหน่งการดูดซับไอออนบวกจะลดลงในขณะที่ตำแหน่งการดูดซับไอออนลบจะเพิ่มขึ้น นอกจากนั้นที่พีเอชเป็นกรด จะเกิด  $Al^{3+}$  และ  $H^+$  ซึ่งอาจเข้ามาแทนที่ตำแหน่งของไอออนบวกในดิน

Lindsay (53) พบว่าตะกอนไฮดรอกไซด์ ออกไซด์ คาร์บอนเนต และฟอสเฟตของโลหะ จะเกิดที่สภาวะเป็นด่างเท่านั้น การละลายของตะกอนโลหะเหล่านี้จึงขึ้นกับค่า พีเอชดินเป็นอย่างมาก โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ไฮดรอกไซด์ของเหล็กและแมงกานีส เป็นปัจจัยหลักในการยึดโลหะไว้ในดิน (54) การละลายของออกไซด์ดังกล่าว จะเกิดที่พีเอชต่ำกว่า 6 จึงทำให้เกิดการปลดปล่อยโลหะที่ถูกดูดซับไว้ในดินออกมาสู่สารละลายดิน (55)

McBride และ Blasiak (56) ได้ทำการศึกษาในปี 1979 พบว่า การดูดซับสังกะสีในดินเพิ่มขึ้นตามค่าพีเอช อย่างไรก็ตามเมื่อพีเอชมีค่าสูงกว่า 7.5 ความเข้มข้นของสังกะสีในสารละลายดินกลับมีมากขึ้น และยังมีนักวิจัยหลายคนที่พบปรากฏการณ์ที่คล้ายคลึงกัน ในการศึกษาการดูดซับโลหะในดินกรดที่ถูกปรับพีเอชให้สูงกว่า 7 (48) ซึ่งสาเหตุของปรากฏการณ์ดังกล่าวมาจากการที่โลหะไอออนบวกเข้าไปจับกับลิแกนด์เชิงซ้อนของสารอินทรีย์ (Organic Complexing Ligand) แทนที่จะจับกับอนุภาคดิน และสารประกอบดังกล่าวเกิดการละลายออกมาในสารละลายดิน หมู่ฟังก์ชันของลิแกนด์เชิงซ้อนส่วนใหญ่เป็นกรดอ่อน ดังนั้นความเสถียรของสารประกอบโลหะเชิงซ้อนจึงขึ้นกับพีเอช Baham และ Sposito (57) และ Inskeep และ Baham (58) รายงานว่าการดูดซับทองแดงของมอนต์โมริลไลไนท์ ในสารละลายที่สกัดออกจากตะกอนและอินทรีย์สารต่าง ๆ จะลดลงเมื่อพีเอชสูงขึ้น ซึ่งพฤติกรรมดังกล่าวตรงกันข้ามกับความสัมพันธ์โดยทั่วไปของการดูดซับโลหะไอออนบวกในดินกับค่าพีเอชของดิน จากการศึกษาของ Baham และ Sposito (57) ดังกล่าวข้างต้นปรากฏผลการศึกษาดังภาพที่ 9 ซึ่งพบว่าในกรณีที่ไม่มิลิแกนด์อินทรีย์สาร ทองแดงจะถูกดูดซับไว้ในดินเหนียวได้เกือบทั้งหมดที่พีเอชมากกว่า 7 ในขณะที่กรณีมิลิแกนด์อินทรีย์สาร การดูดซับสูงสุดเกิดที่พีเอช 5.5 และเมื่อพีเอชสูงกว่า 5.5 การดูดซับจะลดลง ปรากฏการณ์นี้ อธิบายได้ว่า ที่ พีเอชค่า  $H^+$  จะแข่งขันกับทองแดงในการเกิดสารเชิงซ้อนกับอินทรีย์วัตถุ

และเมื่อพีเอชเพิ่มขึ้น ทองแดงจะเกิดสารเชิงซ้อนกับอินทรีย์วัตถุได้มากขึ้น จึงมีปริมาณที่ดูดซับกับอนุภาคดินน้อยลง ปรากฏการณ์นี้มีความสำคัญมากในการพิจารณาเคมีปนขาวเพื่อแยกค่าพีเอชของดินให้สามารถยึดโลหะไว้ได้มากขึ้น เนื่องจากในดินที่มีปริมาณอินทรีย์วัตถุที่ละลายได้อยู่สูง การเพิ่มค่าพีเอชของดินอาจทำให้โลหะมีสภาพเคลื่อนที่ได้เพิ่มขึ้นจากการเกิดสารเชิงซ้อนกับอินทรีย์วัตถุ



ภาพที่ 9 การดูดซับทองแดง ( $50 \text{ mmol m}^{-3}$  (50mM)) ของ Na-Montmorillonit ในกรณีที่มีและไม่มีสารสกัดจากกากตะกอนน้ำโสโครก

### 2.13.4 สภาพออกซิเดชัน-รีดักชันของดิน

ปฏิกิริยารีดอกซ์เป็นปัจจัยที่มีอิทธิพลเป็นอย่างมากต่อการเคลื่อนที่ของสารมลพิษในดินที่เป็นกรดเล็กน้อยจนถึงที่เป็นด่าง ตัวอย่างเช่น ตะกอนของ Fe (III) เช่น เฟอร์ริคไฮดรอกไซด์ จะมีความสามารถในการดูดซับสารมลพิษได้ดี ในขณะที่ Fe (II) ละลายได้ดีมากและไม่สามารถดูดซับโลหะชนิดอื่นไว้ได้ การที่ Fe(III) ถูกรีดิวซ์เป็น Fe(II) นั้นจะทำให้เฟอร์ริคไฮดรอกไซด์และโลหะอื่น ๆ ที่ยึดเกาะอยู่กับพื้นผิวของเฟอร์ริคไฮดรอกไซด์ถูกปลดปล่อยออกมาสู่สารละลาย ลักษณะนิสัยของ โครเมียมและซีเลเนียมเป็นตัวอย่างที่ดีอีกตัวอย่างหนึ่งของอิทธิพลของปฏิกิริยา

รีดอกซ์ Cr(VI) จะมีความเป็นพิษมากและสามารถเคลื่อนที่ไปในดินได้ดี ในขณะที่ Cr(III) มีความเป็นพิษน้อยกว่า ละลายน้อย และสามารถยึดเกาะกับพื้นผิวอนุภาคได้ดี สำหรับซีเลเนียมนั้น Se(VI) จะเคลื่อนที่ได้ดี แต่มีความเป็นพิษน้อยกว่า Se(IV) ซึ่งเคลื่อนที่ได้น้อยกว่า โดยทั่วไปแล้ว การเกิดสภาวะออกซิเดชันจะทำให้โลหะถูกดูดซับไว้ในดินได้ดี ในขณะที่สภาพเคลื่อนที่ได้ของโลหะจะเพิ่มขึ้นเมื่อเกิดสภาวะรีดักชัน

### 2.13.5 ของเสียอื่นที่ปนมากับไอออน

ในการศึกษาปฏิสัมพันธ์ระหว่างดินและโลหะส่วนใหญ่ จะใช้ Background Solution ต่าง ๆ เช่น 0.01 M  $\text{CaCl}_2$ ,  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  หรือสารสกัดของอินทรีย์วัตถุ เพื่อจำลองสภาพทางเคมีของสารละลายดินในธรรมชาติ อย่างไรก็ตามในการศึกษาเกี่ยวกับของเสียประเภทโลหะจากโรงงานอุตสาหกรรมหรือแหล่งกำเนิดอื่น ๆ ในสภาพที่เป็นจริง มักมีของเสียอื่น ๆ ปะปนมากับโลหะซึ่งส่งผลกระทบต่อกระบวนการดูดซับโลหะเหล่านั้น Kotuby-Amacher และ Gambrell (44) ได้ทำการศึกษาการดูดซับแคดเมียมและตะกั่วในดินบน โดยทำการสังเคราะห์ของเสียชุมชนและน้ำชะของเสียโลหะที่มีฤทธิ์เป็นกรด แล้วใช้เป็น Background Solution เปรียบเทียบกับกรณีใช้  $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$  เป็น Background Solution พบว่า ในของเสียสังเคราะห์ทั้ง 2 ชนิด ดินไม่เกิดการดูดซับแคดเมียมและตะกั่ว นอกจากนี้ Puls และคณะ(43) ทำการศึกษาการดูดซับตะกั่วและแคดเมียมบนแร่คาร์โอลิ-ไนท์ โดยมีกรดอินทรีย์ 3 ชนิด ที่พบบ่อยบริเวณสถานที่กำจัดขยะอันตรายในสารละลาย พบว่าการดูดซับตะกั่วในสารละลายที่มีกรดทั้ง 3 ชนิด มีปริมาณลดลง เนื่องจากตะกั่วจับกับกรดอินทรีย์เกิดเป็นสารเชิงซ้อนซึ่งมีความเสถียร

## 2.14 การปรับปรุงฟื้นฟูคุณภาพดินที่ปนเปื้อนโลหะหนัก

### 2.14.1 การใช้วิธีทางเคมีบำบัด

โดยทั่วไปทำได้โดยการทำให้สารมลพิษในดินตกตะกอน การดูดซับด้วยอินทรีย์สารหรือแร่ดินเหนียวหรือแปรสภาพให้อยู่ในรูปที่ละลายน้ำได้น้อย สารเคมีที่แนะนำให้ใช้เดิมเพื่อการปรับปรุงสภาพดินประกอบด้วย หินปูนบด ปูนขาว ปุ๋ยอินทรีย์ ปุ๋ยหมัก ปุ๋ยคอก ปุ๋ยพืชสด แร่ซีโอไลท์ หินฟอสเฟตบด เป็นต้น

### 2.14.2 การใช้วิธีทางชีวภาพบำบัด

เป็นการนำเอาสิ่งมีชีวิตมาช่วยดูดซับสารพิษออกจากดินได้อย่างปลอดภัย แนวทางที่นิยมใช้กัน ได้แก่ การคัดเลือกเอาพืชตระกูลถั่ว, กระจดินเทพา, กระจดินยักษ์, กระจดินณรงค์ (ตริงก้าชโน ไตรเจนจากอากาศได้เป็นปุ๋ยแก่ดินและพืชต่อไป) ปลุกเป็นระบบกับพืชหลักชนิดต่างๆ เช่น ไม้ยืนต้นโตเร็ว (ยูคาลิปตัส) ไม้ผลและไม้ดอก-ไม้ประดับ (ทานตะวัน) ถ้าหากในดินยังคงมีสารพิษ-โลหะหนักสูงไม่ควรปลูกพืชอาหารหรือพืชอาหารสัตว์ วิธีการทางชีวภาพบำบัดมักใช้ประกอบกับการใช้วิธีทางเคมีเพื่อควบคุมมลพิษในดินให้อยู่ในระดับที่ปลูกพืชเจริญเติบโตต่อไปได้ ไม่ทำอันตรายต่อทั้งพืช (Phytotoxicity) และจุลินทรีย์ต่างๆที่ช่วยในการย่อยสลายสารพิษในธรรมชาติเช่นกัน

### 2.14.3 การใช้วิธีทางวิศวกรรม

วิธีนี้นำมาใช้ในกรณีที่สารพิษในดินปนเปื้อนในเขตพื้นที่ต้นน้ำลำธาร พื้นที่ลาดชัน ง่ายต่อการถูกชะล้างหรืออยู่ในบริเวณชุมชน สวนสาธารณะ โรงเรียน ฯลฯ กรรมวิธีมีหลายวิธีให้เลือกขึ้นอยู่กับงบประมาณในการกำจัด อาทิเช่น การขุดลอกดินที่ปนเปื้อนออกไปจากพื้นที่ การทำแนวคั่นกันดิน (Contour Line) การทำขั้นบันได (Terrace) การวางระบบชะล้าง (Leaching System) โลหะหนักออกจากดิน น้ำ (Leachate) ที่ได้ต้องนำไปบำบัดและตรวจสอบก่อนปล่อยลงสู่แหล่งน้ำหรือนำไปใช้ประโยชน์อย่างอื่นต่อไป การทำแนวกันลม (Wind Break) อาจใช้ไม้ยืนต้นโตเร็ว เช่น สน ยูคาลิปตัส เป็นต้น

## บทที่ 3

### ขั้นตอนการวิจัย

#### 3.1 รูปแบบการวิจัย

การศึกษานี้ใช้รูปแบบการวิจัยแบบ Experimental Research Design โดยทำการทดลองที่ห้องปฏิบัติการภาควิชาวิศวกรรมสุขาภิบาล คณะสาธารณสุขศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล

#### 3.2 วัสดุ อุปกรณ์และสารเคมีที่ใช้ในการวิจัย

##### 3.2.1 วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในการเก็บตัวอย่าง

- ถุงพลาสติกสำหรับใส่ตัวอย่างดิน
- เสียม
- กระบอกลอยดิน (Hand Auger)
- แผนที่ดินจังหวัดนครปฐม มาตรฐาน 1:100,000 (14)
- ค้อนยาง
- ตลับเมตร

##### 3.2.2 วัสดุ อุปกรณ์และสารเคมีที่ใช้ในห้องปฏิบัติการ

วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในห้องปฏิบัติการสำหรับการวิเคราะห์คุณสมบัติทั่วไปของดิน ได้แสดงรายละเอียดไว้ในภาคผนวก ก ส่วนวัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในการศึกษาการดูดซับตะกั่วของดินมีดังรายละเอียดต่อไปนี้

- พลาสติกปูพื้นสำหรับนำดินมาฝังลมให้แห้ง
- อุปกรณ์สำหรับบดดิน
- ตะแกรงร่อน (Sieve) ขนาด 2 มิลลิเมตร
- เครื่องชั่งไฟฟ้า ทศนิยม 4 ตำแหน่ง
- เครื่องเหวี่ยงพร้อมหลอดพลาสติกที่ใช้กับเครื่องขนาด 50 มิลลิลิตร
- กระจกนาฬิกา
- ตู้อบ (Oven)
- โถอบแห้ง (Desicator)
- เครื่องเขย่า (Orbital Shaker) ยี่ห้อ IKA-VIBRAX รุ่น VXR
- กระดาษกรอง Whatman เบอร์ 42
- เครื่องอะตอมมิกแอบซอร์บชัน สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (AAS) รุ่น Spectr

AA-640 พร้อมด้วยอุปกรณ์

- เครื่องวัดพีเอช
- พาราฟิล์ม
- เครื่องแก้วต่าง ๆ ที่จำเป็น ได้แก่ บีกเกอร์ ปิเปต บิวเรต ขวดรูปชมพู่ กรวยแก้ว

กระบอกล้าง แก้วคนสาร ซ้อนดักสาร เป็นต้น

### 3.2.3 สารเคมี

สารเคมีที่ใช้ในการวิเคราะห์คุณสมบัติทั่วไปของดินแสดงไว้ในภาคผนวก ก สำหรับสารเคมีที่ใช้ในการศึกษาการดูดซับตะกั่วของดินมีดังนี้

- เลดคลอไรด์ ( $PbCl_2$ )
- แคลเซียมคลอไรด์ ( $CaCl_2$ )
- กรดไฮโดรคลอริก (HCl)
- โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH)

### 3.3 สถานที่ดำเนินการวิจัย

ห้องปฏิบัติการภาควิชาวิศวกรรมสุขาภิบาล

### 3.4 วิธีดำเนินการวิจัย

#### 3.4.1 การกำหนดจุดเก็บตัวอย่างดิน

กำหนดตำแหน่งจุดเก็บตัวอย่างดินโดยพิจารณาจากแผนที่ดินของจังหวัด นครปฐม (14) มาตราส่วน 1:100,000 ซึ่งจัดทำโดยกรมพัฒนาที่ดินเป็นหลัก ทั้งนี้ได้กำหนดจุดเก็บ ตัวอย่างดินในพื้นที่ที่จัดอยู่ในดินร่วนซุยและอยู่ห่างไกลจากกิจกรรมที่เป็นแหล่งกำเนิดตะกั่ว ได้แก่ ถนน โรงงานผลิตตะกั่วและหลอมตะกั่วและโรงงานอื่นๆ อยู่ช่อม-พันสิริรถยนต์ เป็นต้น ทั้งนี้ ดินที่นำมาศึกษาจะมีปริมาณตะกั่วทั้งหมดอยู่ในระดับที่พบในดินชั้นบนทั่วไป กล่าวคือ อยู่ระหว่าง 12.6 ถึง 44 ppm (ตารางที่ 1)

#### 3.4.2 การเก็บตัวอย่างและเตรียมตัวอย่างดิน

ทำการเก็บตัวอย่างดินชั้นบน (Surface Soil) จากจุดเก็บตัวอย่างดินแต่ละจุด โดย ดินร่วนซุยมีดินชั้นบนลึกไม่เกิน 30 เซนติเมตร จึงทำการเก็บตัวอย่างดินชั้นบนที่ระดับความลึก 0 ถึง 30 เซนติเมตร ในการเก็บตัวอย่างดินเป็นเก็บตัวอย่างแบบ Composite โดยเก็บตัวอย่างจำนวน 3 จุด เมื่อเก็บตัวอย่างจากแต่ละจุดแล้วจะนำมาใส่ในถุงพลาสติกสะอาดที่เตรียมไว้แล้วนำกลับมา ทำการ เตรียมตัวอย่างที่ห้องปฏิบัติการ โดยอันดับแรกทำการแยกเศษใบไม้ รากไม้ หิน ขยะอื่นๆ ออก แล้วนำตัวอย่างดินมาผึ่งให้แห้งในที่ร่ม (Air-Dried Soil) นำมาบดให้ละเอียด จากนั้นนำมาร่อน ผ่านตะแกรงขนาด 2 มิลลิเมตร และนำดินทั้ง 3 จุดมารวมเป็นตัวอย่างเดียวกันโดยชั่งให้มีน้ำหนัก เท่าๆกัน เก็บไว้ในถุงพลาสติกสะอาด เพื่อร่อนนำไปวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพและเคมี และ ศึกษาการดูดซับตะกั่วของดินต่อไป โดยจำนวนตัวอย่างที่ทำการศึกษามีจำนวนทั้งสิ้น 108 ตัวอย่าง แบ่งเป็นจำนวนตัวอย่างในการศึกษาการดูดซับตะกั่วในดินตามสภาพธรรมชาติ จำนวน 36 ตัวอย่าง เป็นจำนวนตัวอย่างในการศึกษาผลของค่าพีเอชต่อการดูดซับตะกั่ว จำนวน 36 ตัวอย่างและเป็น จำนวนตัวอย่างในการศึกษาผลของปริมาณอินทรีย์วัตถุต่อการดูดซับตะกั่ว จำนวน 36 ตัวอย่าง

### 3.4.3 การวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของดิน

นำตัวอย่างดินที่ Composite แล้วมาทำการวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพและเคมี ดังนี้

#### 3.4.3.1 คุณสมบัติทางกายภาพ

3.4.3.1.1 การวิเคราะห์การกระจายของอนุภาคดิน (Particle Size Analysis) โดยวิธีไปเปต (Pipett Method) ผลที่ได้จากการวิเคราะห์นำมาแจกแจงประเภทของเนื้อดิน (Soil Texture Classes) โดยการเปรียบเทียบกับชั้นเนื้อดินตามข้อกำหนดของกระทรวงเกษตรสหรัฐ (USDA Textural Classes) ส่วนประเภทชั้นอนุภาคดิน (Particle Size Classes) ให้แบ่งตามเกณฑ์ของอนุกรมวิธานดิน

3.4.3.1.2 วิเคราะห์ความหนาแน่นรวม โดยวิธี Core Method

#### 3.4.3.2 คุณสมบัติทางเคมี

3.4.3.2.1 วิเคราะห์ค่าปฏิกิริยาดิน หรือค่าพีเอช โดยใช้วิธี Potentiometric Method

3.4.3.2.2 วิเคราะห์ปริมาณอินทรีย์วัตถุในดิน โดยวิธีของ Walkley-Black Modified Acid-dichromate Saturated Method

3.4.3.2.3 วิเคราะห์ หาค่าความจุในการแลกเปลี่ยนแคตไอออน (Cation Exchange Capacity, CEC) โดยวิธี Sodium Saturated Method

3.4.3.2.4 วิเคราะห์หาค่าการนำไฟฟ้า (Electrical Conductivity) โดยใช้วิธี Potentiometric Method

3.4.3.2.5 วิเคราะห์ปริมาณตะกั่วทั้งหมดในดิน โดยใช้วิธีอะตอมมิก แอบซอร์พชัน สเปกโตรเมทรี

### 3.4.4 การศึกษาความสามารถในการดูดซับตะกั่วของดิน

ทำการศึกษาปริมาณการดูดซับตะกั่วในดินตามขั้นตอนดังต่อไปนี้

1. นำตัวอย่างดิน 5 กรัมมาใส่ในขวดรูปชมพู่
2. เตรียมสารละลาย  $PbCl_2$  ใน 0.01 M  $CaCl_2$  ให้มีความเข้มข้นเริ่มต้นในช่วงความเข้มข้น 6 ระดับ ได้แก่ 0 มิลลิกรัมต่อลิตร, 282.40-361.84 มิลลิกรัมต่อลิตร, 564.80-723.68 มิลลิกรัมต่อลิตร, 847.20-1085.52 มิลลิกรัมต่อลิตร, 1129.60-1447.36 มิลลิกรัมต่อลิตร และ 1482.60-1899.66 มิลลิกรัมต่อลิตร
3. ผสมสารละลายแต่ละช่วงความเข้มข้นจำนวน 50 มิลลิลิตร ใส่ลงในขวดรูปชมพู่ที่บรรจุดิน
4. วัดค่าพีเอชของสารละลายดิน แล้วทำการปรับพีเอชของสารละลายดินในแต่ละขวดให้อยู่ในช่วง 6.7 โดยใช้ 0.1 M  $NaOH$  หรือ 0.1 M  $HCl$
5. นำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่า (Shaker) เพื่อให้เกิดการดูดซับตะกั่วจนถึงสภาพสมดุล โดยใช้เวลานาน 24 ชั่วโมง (5)
6. นำส่วนผสมดังกล่าวมาแยกตะกอนดินออกโดยใช้เครื่องเหวี่ยง ที่ความเร็วรอบ 4,500 รอบต่อนาทีนาน 10 นาทีแล้วนำส่วนน้ำใสมารองตะกอนแขวนลอยออกด้วยกระดาษกรอง Whatman No. 42
7. นำสารละลายดินที่ได้ไปตรวจวัดปริมาณตะกั่วด้วยเครื่องอะตอมมิกแอบซอร์บชัน สเปกโตรโฟโตเมทรี (AAS)
8. หาปริมาณตะกั่วที่ดูดซับเอาไว้ โดยคำนวณได้จากความแตกต่างระหว่างปริมาณตะกั่วในสารละลายเริ่มต้นและปริมาณตะกั่วที่คงอยู่ในสารละลายดินที่สภาพสมดุลแต่ละตัวอย่างกระทำซ้ำ 3 ครั้ง
9. พล็อตกราฟระหว่าง  $Q_e$  (ปริมาณการดูดซับตะกั่วต่อน้ำหนักดิน, มิลลิกรัม/กรัม) และ  $C_e$  (ความเข้มข้นของตะกั่วในสารละลายดินที่จุดสมดุล, มิลลิกรัม/ลิตร) โดยให้  $Q_e$  อยู่ในแกน Y และ  $C_e$  อยู่ในแกน X กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าดังกล่าวเรียกว่า ไอโซเทอมของการดูดซับตะกั่ว ซึ่งจะช่วยให้ทราบถึงลักษณะของการดูดซับที่เกิดขึ้น
10. นำเอาชุดข้อมูลที่ได้จากการทดลองไปพล็อตกับกราฟเส้นตรงของสมการ Freundlich และ Langmuir และนำเอาสมการที่ดีที่สุด โดยพิจารณาจากสมการที่มีค่า  $r^2$  หรือค่าสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจที่สูงที่สุด มาอธิบายการดูดซับที่เกิดขึ้นพร้อมหาค่าคงที่ต่างๆจาก

สมการ โดยค่าคงที่ของสมการ Freundlich ได้แก่ ค่า  $K$  (ความสามารถในการดูดซับตะกั่วของดิน) และค่า  $1/n$  (Correction Factor)

### 3.4.5 การศึกษาผลของค่าพีเอชต่อการดูดซับตะกั่วในดิน

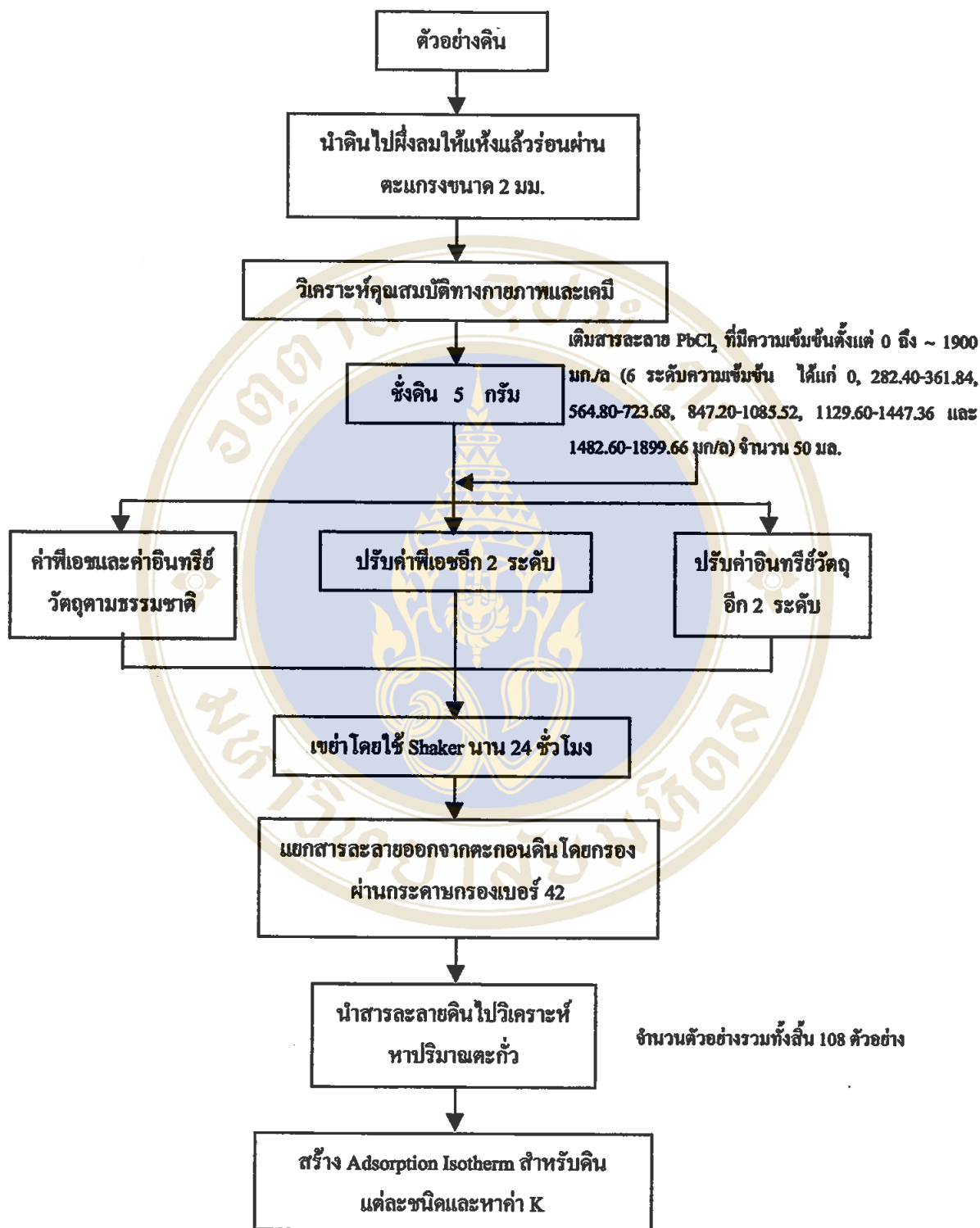
ในการศึกษาผลของค่าพีเอชจะทำการทดลองเหมือนข้อ 1 ถึง 3 ดังกล่าวข้างต้น จากนั้นวัดค่าพีเอชของสารละลายดินและปรับค่าพีเอชของสารละลายดินโดยใช้สารละลายเจือจางของกรดไฮโดรคลอริก (HCl) หรือ สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ให้มีค่าพีเอช 4.5 และ 7.5 จากนั้นนำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่า (Shaker) โดยใช้เวลานาน 24 ชั่วโมงแล้วทำการทดลองซ้ำกับข้อ 5 ถึง ข้อ 10

### 3.4.6 การศึกษาผลของปริมาณอินทรีย์วัตถุต่อการดูดซับตะกั่วในดิน

ในการศึกษาผลของปริมาณอินทรีย์วัตถุ จะทำการศึกษาในดินที่มีปริมาณอินทรีย์วัตถุ ร้อยละ 3 (ปริมาณอินทรีย์วัตถุตามสภาพเดิมของดินที่ศึกษา) ร้อยละ 4 และร้อยละ 5 โดยในการเพิ่มปริมาณอินทรีย์วัตถุในดินจะใช้ปุ๋ยพืชสดที่ผ่านการหมักแล้วซึ่งจำหน่ายในท้องตลาดทั่วไปนำมาฝังลมให้แห้งแล้วบดละเอียด และใช้ผสมในดินในอัตราส่วนที่เหมาะสมจนมีปริมาณอินทรีย์วัตถุตามที่ต้องการ (รายละเอียดแสดงดังภาคผนวก ข) จากนั้นทำการทดลองเหมือนข้อ 1 ถึง 10 ในการศึกษาปริมาณการดูดซับตะกั่วในดิน

### 3.4.7 การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

1. สถิติเชิงพรรณนา ใช้ค่าเฉลี่ยทางเลขคณิต จำนวนและร้อยละ
2. สถิติเชิงอนุมาน โดยทำการวิเคราะห์ค่าสหสัมพันธ์ระหว่างความสามารถในการดูดซับตะกั่วของดินซึ่งพิจารณาจากค่า  $K$  ของ Freundlich กับค่าพีเอชและปริมาณอินทรีย์วัตถุในดิน โดยใช้ Pearson Simple Correlation ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95.0



ภาพที่ 10 แผนภูมิการศึกษาการดูดซับตะกั่วของดิน

## บทที่ 4

### ผลการวิจัย

จากการศึกษาการดูดซับตะกั่วของดินชุดบางเลน ซึ่งได้ทำการเก็บตัวอย่างดินชั้นบนของดินชุดบางเลน จากอำเภอบางเลน จังหวัดนครปฐม มาทำการศึกษาการดูดซับตะกั่ว โดยใช้สารละลายตะกั่วสังเคราะห์ พร้อมทั้งได้ทำการศึกษาผลของค่าพีเอชและปริมาณอินทรีย์วัตถุในดินต่อความสามารถในการดูดซับตะกั่วของดิน ผลการทดลองปรากฏดังรายละเอียดต่อไปนี้

#### 4.1 คุณสมบัติทั่วไปของดินชุดบางเลน

ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติทั่วไปของดินชุดบางเลน แสดงไว้ในตารางที่ 5 ซึ่งสามารถสรุปได้ว่าดินชั้นบนของดินชุดบางเลนที่นำมาศึกษา มีลักษณะเนื้อดินเป็นดินเหนียวปนซิลต์ (Silty Clay) ปฏิกริยาของดินเป็นกลาง โดยมีค่าพีเอชประมาณ 6.7 มีปริมาณอินทรีย์วัตถุสูงปานกลางคือประมาณร้อยละ 3 โดยที่ในดินทั่วไปมักพบปริมาณอินทรีย์วัตถุอยู่ในช่วงร้อยละ 2 ถึง 5 (10) มีค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวก(CEC)สูงมาก กล่าวคือ ประมาณ 32.40 meq/100 g สำหรับการวิเคราะห์ปริมาณการปนเปื้อนตะกั่วของดินที่นำมาทำการทดลอง พบว่ามีปริมาณการปนเปื้อนน้อยจนไม่สามารถตรวจวิเคราะห์ได้

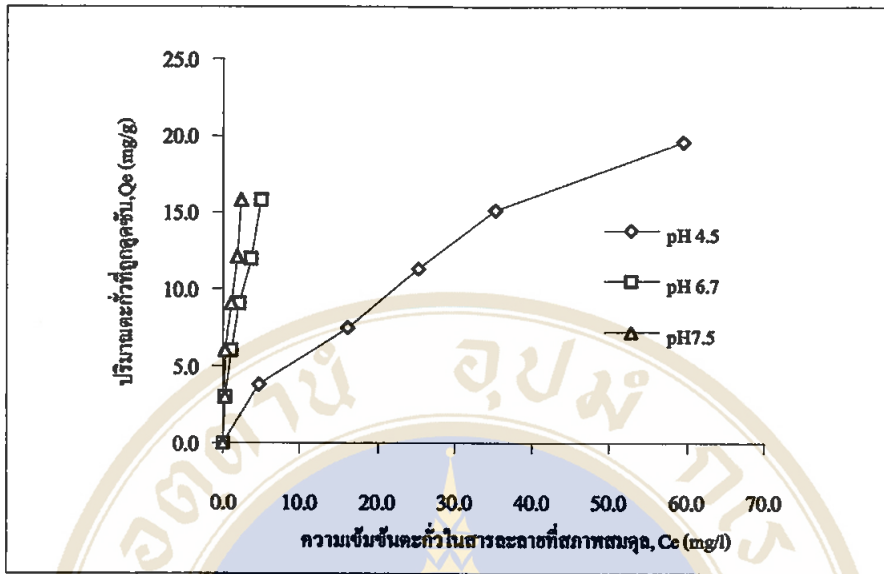
#### 4.2 การศึกษาการดูดซับตะกั่วของดิน

ผลการศึกษาการดูดซับตะกั่วของดินชุดบางเลน โดยไม่ได้มีการปรับสภาพใด ของดิน ซึ่งดินมีค่าพีเอชประมาณ 6.7 และมีปริมาณอินทรีย์วัตถุประมาณร้อยละ 3 ปรากฏผลดังภาคผนวก ค โดยได้ทำการทดลอง 3 ชั่วโมง และนำข้อมูลที่ได้นำมา plot เส้นไอโซเทอมของการดูดซับตะกั่ว (Adsorption Isotherm) เส้นไอโซเทอมของการดูดซับเป็นเส้นที่ได้จากการลากต่อกันของจุดต่างๆ

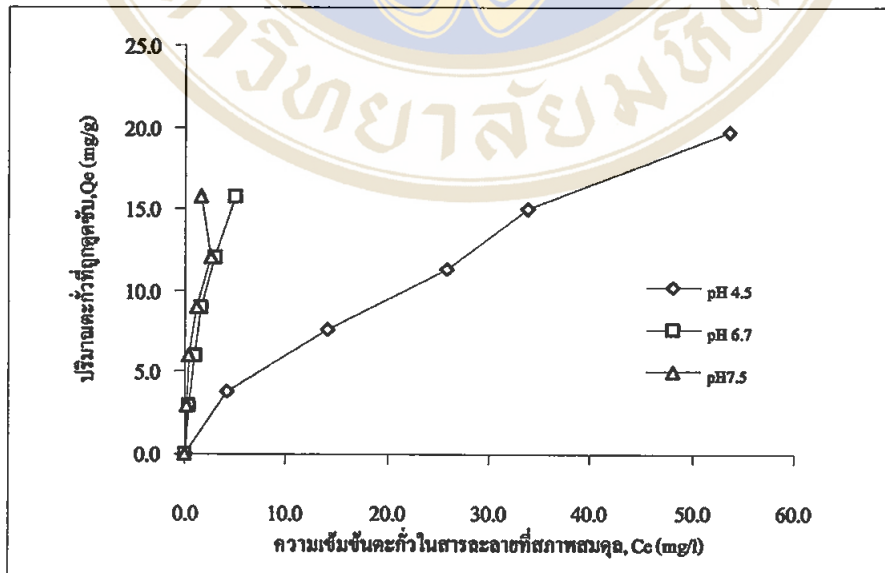
ระหว่างปริมาณของสารหรือไอออนที่ถูกดูดซับไว้ ซึ่งในกรณีนี้หมายถึง ตะกั่ว ( $Q_s$ ) กับความเข้มข้นของสารหรือไอออนในสารละลายคินที่อยู่ใสภาพสมดุลกัน ( $C_s$ ) ณ อุณหภูมิคงที่ เส้นไอโซเทอมของการดูดซับตะกั่วที่ลากขึ้นนี้ จะทำให้เราทราบถึงปริมาณการดูดซับตะกั่วบนผิวของอนุภาคคินที่ทำการศึกษา รวมถึงทำให้สามารถอธิบายถึงลักษณะของการดูดซับที่เกิดขึ้นได้ โดยได้แสดงเส้นไอโซเทอมการดูดซับตะกั่วของคินชุดบางเลนไว้ในภาพที่ 11 ถึงภาพที่ 13 โดยได้แสดงรวมไว้กับการดูดซับตะกั่วที่พีเอช 4.5 และ 7.5 ซึ่งพบว่าเส้นไอโซเทอมของการดูดซับตะกั่วของคินในสภาพธรรมชาติมีลักษณะเป็นไอโซเทอมชนิดตัวเอช (H) บ่งชี้ว่าคินมีความสามารถในการดูดซับตะกั่วได้สูงมาก โดยจะเห็นได้จากการที่เส้นกราฟมีความชันสูงเนื่องจากอนุภาคตะกั่วถูกดูดซับไว้ในคินมากกว่าอยู่ในสารละลายคิน

**ตารางที่ 5 แสดงคุณสมบัติทั่วไปของคินชุดบางเลน**

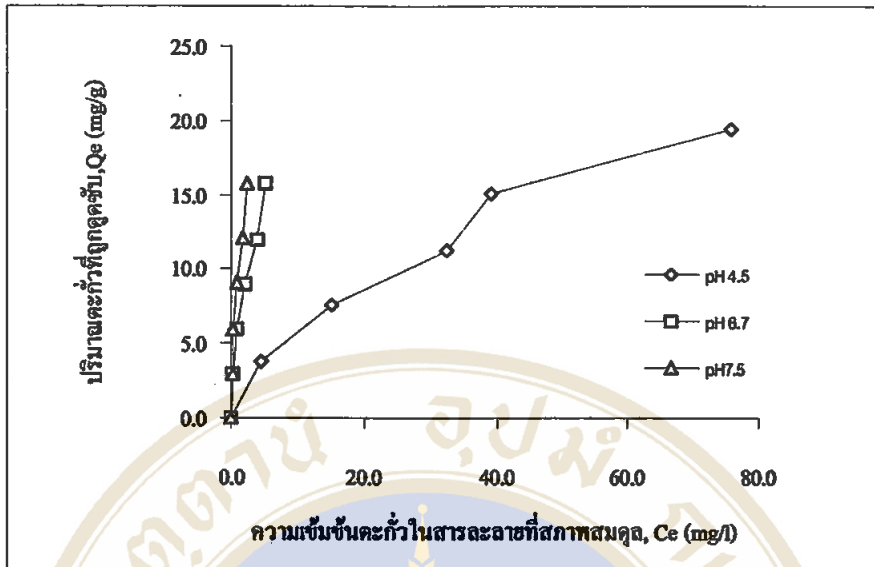
คุณสมบัติของคิน	ผลการวิเคราะห์
1. การกระจายของอนุภาค	
- ทราช, ร้อยละ	15
- ซิลท์, ร้อยละ	45
- คินเหนียว, ร้อยละ	40
2. ความหนาแน่นรวม, ต้น/ลูกบาศก์เมตร	1.93
3. ค่าพีเอช	6.7
4. ปริมาณอินทรีย์วัตถุ, ร้อยละ	3.0
5. ปริมาณอินทรีย์คาร์บอน, ร้อยละ	1.7
6. ค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวก (CEC), meq/100 g	32.40
7. ค่าการนำไฟฟ้า, ไมโครซีเมนต์	1.29
8. ปริมาณตะกั่ว, มิลลิกรัมต่อลิตร	ND



ภาพที่ 11 เส้นไอโซเทอมการดูดซับตะกั่วของดินรูดบางเลนที่ระดับพีเอชต่างๆ (ซ้ำที่ 1)



ภาพที่ 12 เส้นไอโซเทอมการดูดซับตะกั่วของดินรูดบางเลนที่ระดับพีเอชต่างๆ (ซ้ำที่ 2)



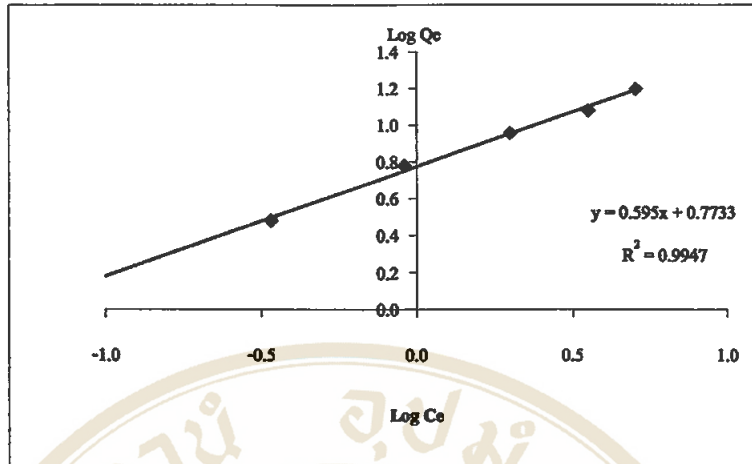
ภาพที่ 13 เส้นไอโซเทอมการดูดซับตะกั่วของดินรูดบางเลนที่ระดับพีเอชต่างๆ (ซ้ำที่ 3)

เมื่อนำข้อมูลที่ได้จากการศึกษาไปพลอตกับทั้งสมการของ Freundlich และ Langmuir เพื่อหาสมการที่สามารถนำมาอธิบายการดูดซับตะกั่วของดินรูดบางเลนที่ดีที่สุดโดยพิจารณาจากค่า  $r^2$  เป็นหลัก ผลการพลอตแสดงดังภาพที่ 14 ถึงภาพที่ 19 พบว่าชุดของข้อมูลที่ได้จากการทดลองจะเข้ากันได้กับสมการของ Freundlich ( $r^2 = 0.9881-0.9947$ ) มากกว่าสมการ Langmuir ( $r^2 = 0.941 - 0.9826$ ) ซึ่งสอดคล้องกับกราฟไอโซเทอมการดูดซับที่ได้ โดยจากเส้นกราฟสามารถอธิบายได้ว่าดินจะสามารถดูดซับตะกั่วไปได้เรื่อยๆ ครอบคลุมถึงความเข้มข้นของไอออนใน สารละลายดินมีเพิ่มมากขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับสมมติฐานของสมการ Freundlich อย่างไรก็ตามค่า  $r^2$  ของสมการ Langmuir ก็มีค่าสูงพอที่จะยอมรับได้เช่นกัน เช่นเดียวกับการศึกษาของ Desauziers และคณะ (59) ซึ่งพบว่าการศึกษาการดูดซับ Methylmercury ด้วยแร่ดินเหนียวและแร่ออกไซด์ เข้ากันได้กับทั้งสมการของ Langmuir และ Freundlich อย่างไรก็ตามดังที่ได้กล่าวข้างต้น ในการศึกษาครั้งนี้ จะนำเอาเฉพาะสมการที่เข้ากันกับชุดข้อมูลได้ดีที่สุดมาอธิบายการดูดซับที่เกิดขึ้น ซึ่งได้แก่ สมการ Freundlich โดยจากสมการของ Freundlich สามารถคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การกระจาย (K) ได้ 5.93, 6.22 และ 5.80 ในการทดลองซ้ำที่ 1, 2 และ 3 ตามลำดับ โดยมีค่าเฉลี่ย 5.98 และค่า Correction Factor (1/n) มีค่า 0.60, 0.61 และ 0.59 ในการทดลองซ้ำที่ 1, 2 และ 3 ตามลำดับและมีค่าเฉลี่ย 0.60 สอดคล้องกับการศึกษาของ Buchter และคณะ (61) ซึ่งได้ทำการศึกษาค่า Freundlich Parameters ของโลหะหนัก 15 ชนิด ในดิน 11 ชนิด พบว่า ค่า n ของโลหะหนักส่วนใหญ่มีค่าน้อยกว่า 1 ยกเว้นตะกั่วและปรอทซึ่งมีค่า n มากกว่า 1 ซึ่งค่า  $n > 1$  หรือ  $1/n < 1$  จะอธิบายได้ว่าพลังงานในการดูดซับจะลดลงเมื่อพื้นที่ผิวถูกปกคลุมด้วยไอออนของโลหะหนักมากขึ้น นอกจากนี้ ค่า  $1/n$  ที่น้อยกว่า 1 ยังสามารถ

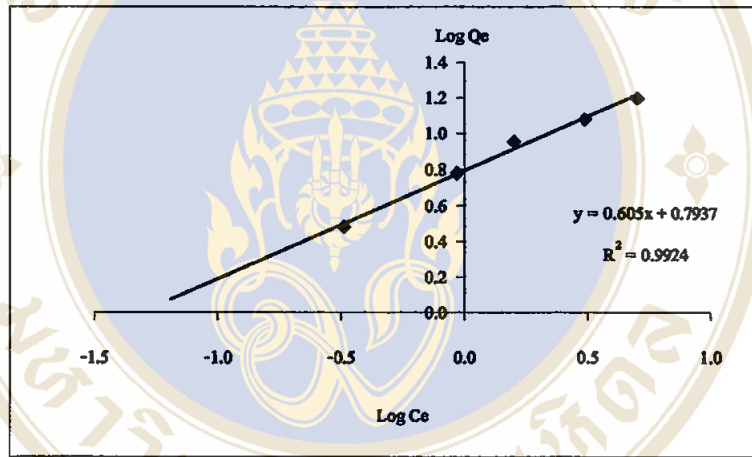
ทำนายได้ถึงลักษณะการดูดซับได้ว่า ดินสามารถดูดซับตะกั่วได้ดีที่ความเข้มข้นต่ำ สำหรับค่าคงที่ต่างๆที่ได้จากสมการ สรุปไว้ในตารางที่ 6

ตารางที่ 6 สรุปค่า K และ  $1/n$  ของ Freundlich สำหรับดินชุดบางเลนที่ระดับพีเอชต่าง ๆ

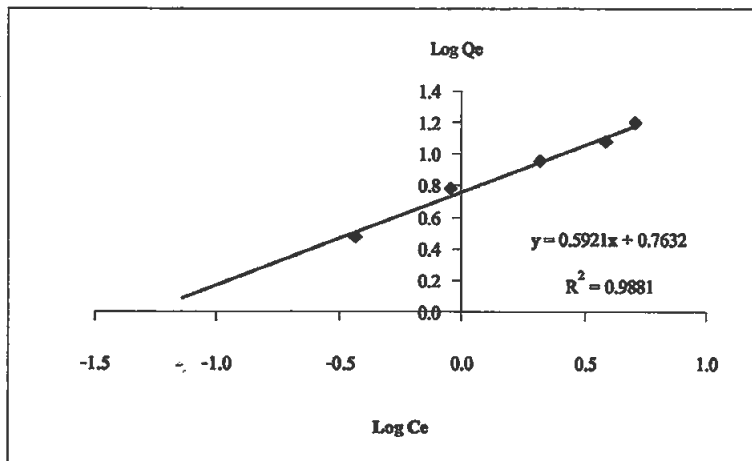
ชุดการทดลอง	ค่า K	ค่า $1/n$
ระดับพีเอช 4.5 (ซ้ำที่ 1)	1.30	0.67
ระดับพีเอช 4.5 (ซ้ำที่ 2)	1.45	0.65
ระดับพีเอช 4.5 (ซ้ำที่ 3)	1.51	0.60
ค่าเฉลี่ย	1.42	0.64
ระดับพีเอช 6.7 (ซ้ำที่ 1)	5.93	0.60
ระดับพีเอช 6.7 (ซ้ำที่ 2)	6.22	0.61
ระดับพีเอช 6.7 (ซ้ำที่ 3)	5.80	0.59
ค่าเฉลี่ย	5.98	0.60
ระดับพีเอช 7.5 (ซ้ำที่ 1)	9.23	0.58
ระดับพีเอช 7.5 (ซ้ำที่ 2)	8.98	0.54
ระดับพีเอช 7.5 (ซ้ำที่ 3)	9.50	0.58
ค่าเฉลี่ย	9.24	0.57



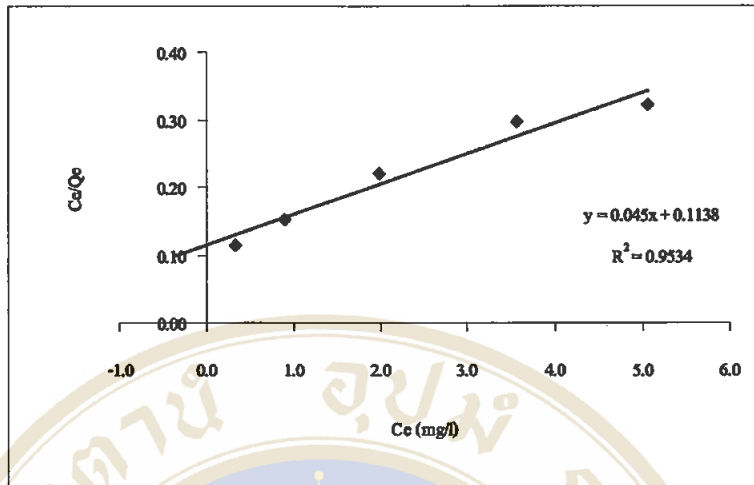
ภาพที่ 14 Freundlich Adsorption Isotherm ที่ระดับพีเอช 6.7 (ซ้ำที่ 1)



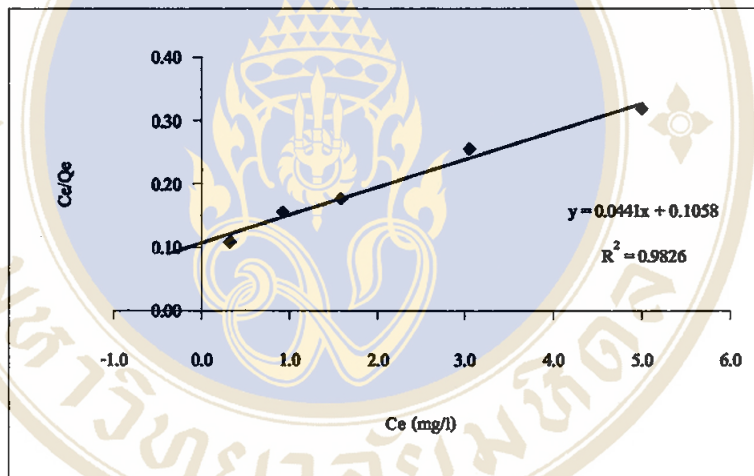
ภาพที่ 15 Freundlich Adsorption Isotherm ที่ระดับพีเอช 6.7 (ซ้ำที่ 2)



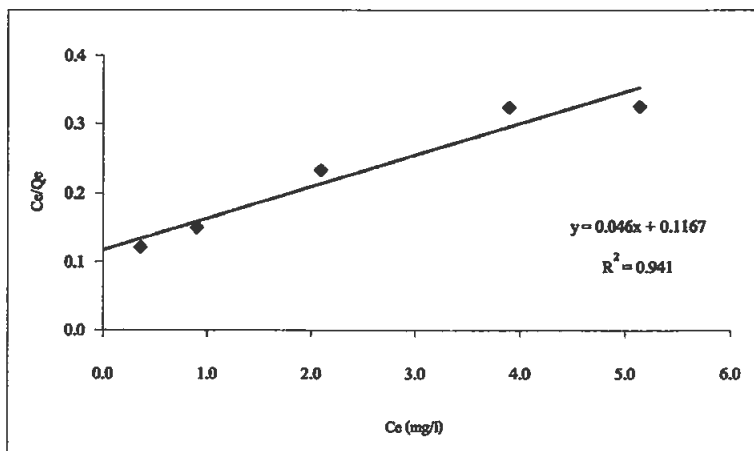
ภาพที่ 16 Freundlich Adsorption Isotherm ที่ระดับพีเอช 6.7 (ซ้ำที่ 3)



ภาพที่ 17 Langmuir Adsorption Isotherm ที่ระดับพีเอช 6.7 (ซ้ำที่ 1)



ภาพที่ 18 Langmuir Adsorption Isotherm ที่ระดับพีเอช 6.7 (ซ้ำที่ 2)



ภาพที่ 19 Langmuir Adsorption Isotherm ที่ระดับพีเอช 6.7 (ซ้ำที่ 3)

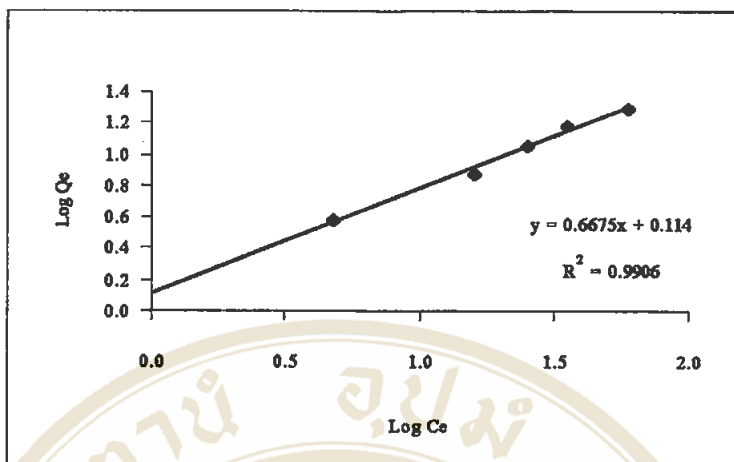
### 4.3 การศึกษาผลของค่าพีเอชต่อการดูดซับตะกั่วของดิน

นอกจากศึกษาการดูดซับตะกั่วของดินชุดบางเลนในสภาพธรรมชาติแล้ว ยังได้ศึกษาถึงผลของค่าพีเอชต่อการดูดซับตะกั่ว โดยได้ปรับค่าพีเอชของสารละลายดินอีก 2 ระดับได้แก่ ค่าพีเอชที่ 4.5 และ 7.5 ทั้งนี้ทำการปรับค่าพีเอชโดยใช้กรดไฮโดรคลอริกเจือจาง (HCl) และสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เจือจาง (NaOH) ผลการศึกษามีดังต่อไปนี้

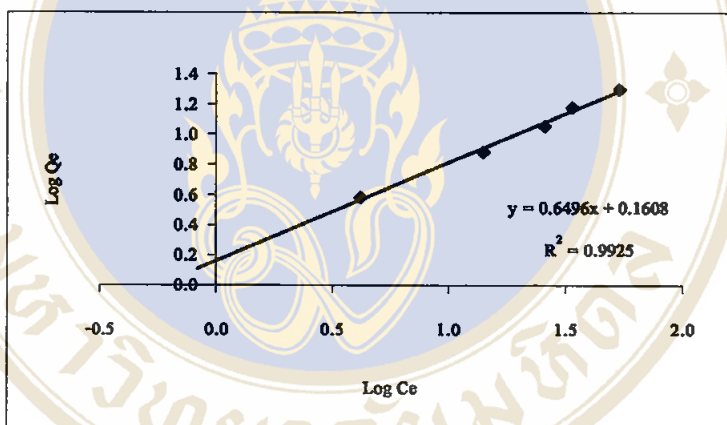
#### 4.3.1 การดูดซับตะกั่วที่ระดับพีเอช 4.5

ผลการศึกษาการดูดซับตะกั่วของดินชุดบางเลนที่ระดับพีเอช 4.5 ปรากฏดังตารางในภาคผนวกที่ ข ซึ่งเมื่อนำผลการทดลองที่ได้ไปสร้างเส้นไอโซเทอมของการดูดซับตะกั่ว จะปรากฏผลดังภาพที่ 11 ถึงภาพที่ 13

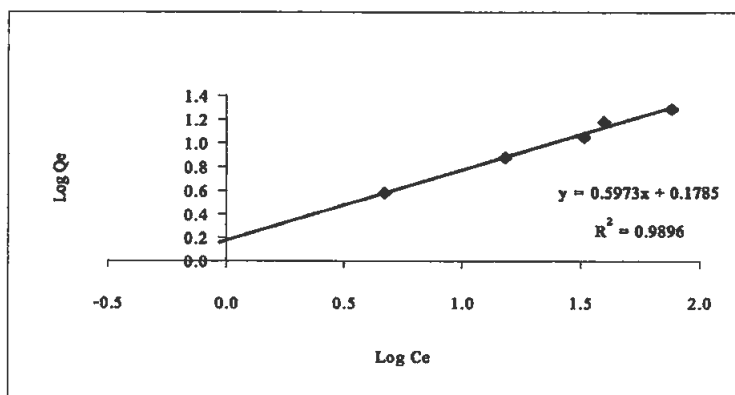
ลักษณะของเส้นไอโซเทอมที่ได้จะมีลักษณะคล้ายไอโซเทอมชนิดตัวแอล (L) แต่ต่างกันที่การดูดซับมีแนวโน้มที่จะเกิดเรื่อยๆ ตามความเข้มข้นของตะกั่วในสารละลายดินที่เพิ่มขึ้น ลักษณะของไอโซเทอมดังกล่าว แสดงให้เห็นว่าดินมีความสามารถในการดูดซับตะกั่วได้ดี แต่น้อยกว่าที่ระดับพีเอช 6.7 โดยการดูดซับตะกั่วของดินมีความสัมพันธ์แบบไม่เป็นเส้นตรงกับความเข้มข้นของตะกั่วในสารละลายดินและความสามารถในการดูดซับตะกั่วของดินมีแนวโน้มลดลงเมื่อความเข้มข้นของตะกั่วในสารละลายดินเพิ่มขึ้น แต่อย่างไรก็ตามในช่วงความเข้มข้นที่ทำการศึกษาพบว่า ดินยังมีความสามารถในการดูดซับตะกั่วได้เรื่อยๆ ตามความเข้มข้นที่เพิ่มขึ้นในสารละลายดิน โดยยังไม่ปรากฏว่าพบ จุดที่ความชันของกราฟเป็นศูนย์ ซึ่งหมายถึง จุดที่ดินมีความสามารถในการดูดซับตะกั่วสูงสุด ในการหาสมการการดูดซับเพื่อนำมาอธิบายข้อมูลที่ได้จากการทดลอง พบว่าสมการ Freundlich (ภาพที่ 20 ถึงภาพที่ 22 ) สามารถนำมาใช้อธิบายได้ดีกว่าสมการของ Langmuir โดยมีค่า  $r^2$  อยู่ในช่วงระหว่าง 0.9896 ถึง 0.9925 และสมการ Langmuir (ภาพที่ 23 ถึงภาพที่ 25) มีค่า  $r^2$  อยู่ในช่วง 0.8668 ถึง 0.9282 สำหรับค่า K ที่ได้จากสมการ Freundlich (ตารางที่ 6) มีค่า 1.30, 1.45 และ 1.51 ในการทดลองซ้ำที่ 1, 2 และ 3 ตามลำดับ ค่าเฉลี่ย 1.42 ส่วนค่า  $1/n$  มีค่า 0.67, 0.65 และ 0.60 ในการทดลองซ้ำที่ 1, 2 และ 3 ตามลำดับคิดเป็นค่าเฉลี่ย 0.64 ซึ่งค่า  $1/n$  ที่น้อยกว่า 1 ดังกล่าวสามารถอธิบายได้ว่าดินสามารถดูดซับตะกั่วได้ดีที่ความเข้มข้นต่ำๆเช่นเดียวกับที่ค่าพีเอช 6.7



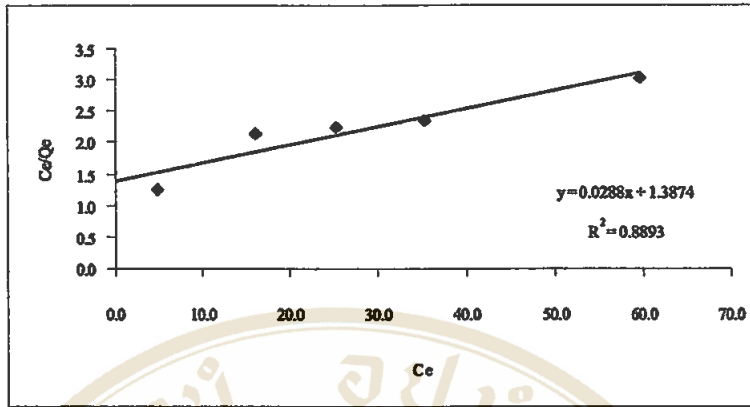
ภาพที่ 20 Freundlich Adsorption Isotherm ที่ระดับพีเอช 4.5 (ซ้ำที่ 1)



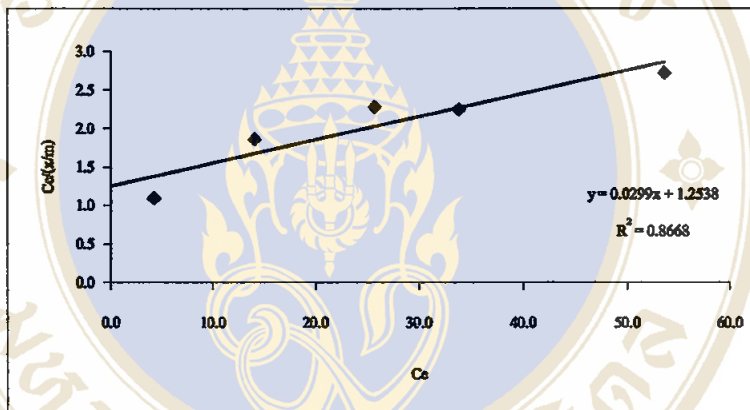
ภาพที่ 21 Freundlich Adsorption Isotherm ที่ระดับพีเอช 4.5 (ซ้ำที่ 2)



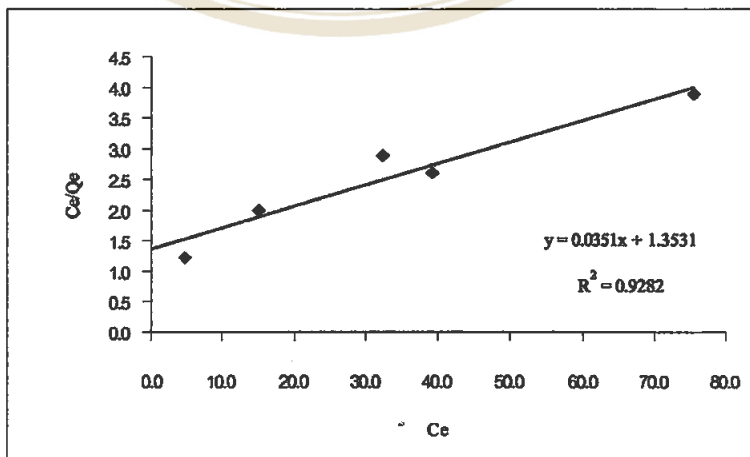
ภาพที่ 22 Freundlich Adsorption Isotherm ที่ระดับพีเอช 4.5 (ซ้ำที่ 3)



ภาพที่ 23 Langmuir Adsorption Isotherm ที่ระดับพีเอช 4.5 (ซ้ำที่ 1)



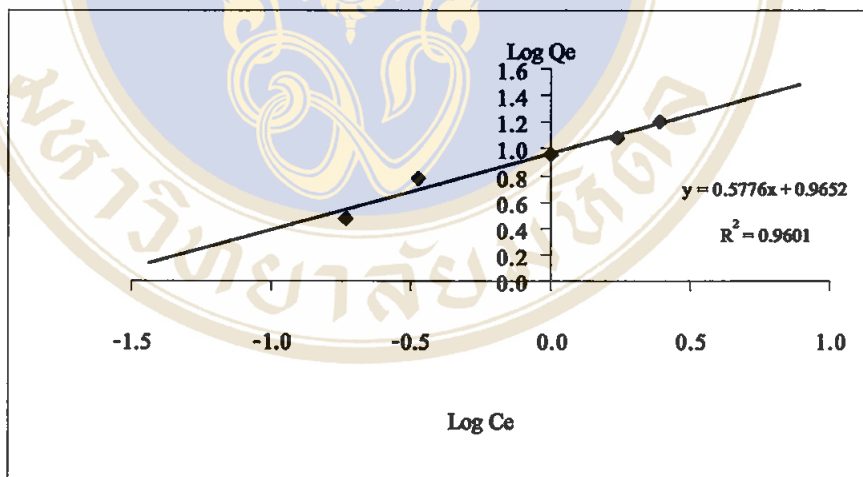
ภาพที่ 24 Langmuir Adsorption Isotherm ที่ระดับพีเอช 4.5 (ซ้ำที่ 2)



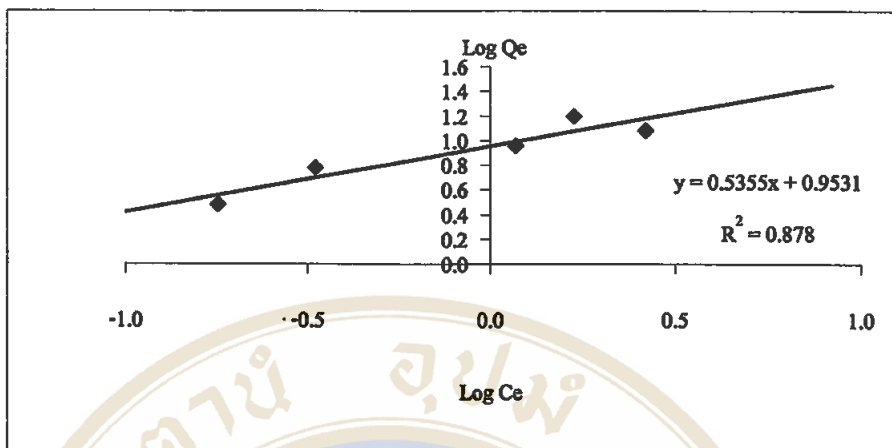
ภาพที่ 25 Langmuir Adsorption Isotherm ที่ระดับพีเอช 4.5 (ซ้ำที่ 3)

### 4.3.2 การดูดซับตะกั่วที่ระดับพีเอช 7.5

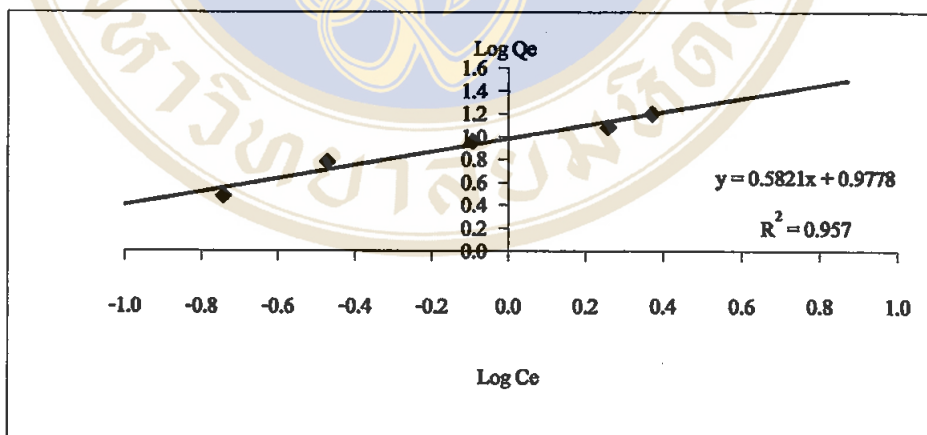
ที่ระดับพีเอช 7.5 พบว่าดินมีความสามารถในการดูดซับตะกั่วได้สูงขึ้น โดยแสดงเส้นไอโซเทอมของการดูดซับไว้ในภาพที่ 11 ถึงภาพที่ 13 ซึ่งมีลักษณะเป็นไอโซเทอมชนิดตัวเอช (H) เช่นเดียวกับการดูดซับของดินในสภาพธรรมชาติแต่กราฟมีความชันสูงกว่าแสดงถึงความสามารถในการดูดซับที่ดีกว่า และสมการที่นำมาอธิบายได้ดีที่สุด คือ สมการ Freundlich โดยมีค่า  $r^2$  อยู่ในช่วง 0.878 ถึง 0.9601 (ภาพที่ 26 ถึงภาพที่ 28) ส่วนสมการ Langmuir มีค่า  $r^2$  อยู่ในช่วง 0.8840 ถึง 0.9452 (ภาพที่ 29 ถึงภาพที่ 31) สำหรับค่า K ที่ได้จากสมการ Freundlich มีค่า 9.23, 8.98 และ 9.50 ในการทดลองซ้ำที่ 1, 2 และ 3 ตามลำดับ โดยคิดเป็นค่าเฉลี่ย 9.24 ส่วนค่า  $1/n$  มีค่า 0.58, 0.54 และ 0.58 ในการทดลองซ้ำที่ 1, 2 และ 3 ตามลำดับ คิดเป็นค่าเฉลี่ย 0.57 และค่า  $1/n$  ที่น้อยกว่า 1 แสดงว่าดินมีความสามารถในการดูดซับตะกั่วได้ดีในช่วงความเข้มข้นต่ำ



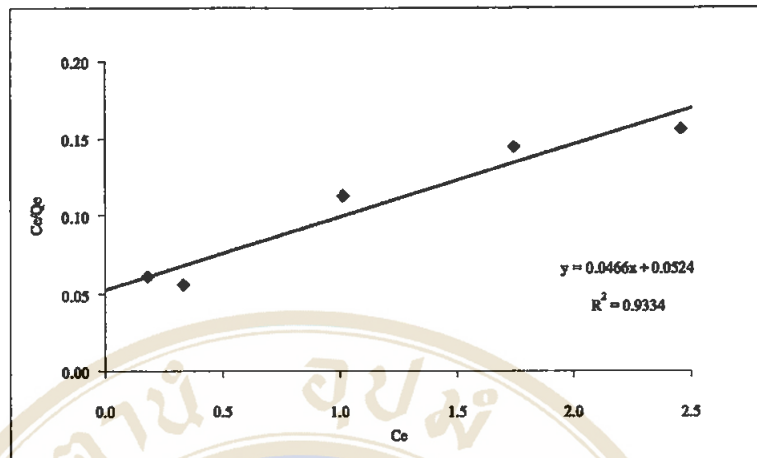
ภาพที่ 26 Freundlich Adsorption Isotherm ที่ระดับพีเอช 7.5 (ซ้ำที่ 1)



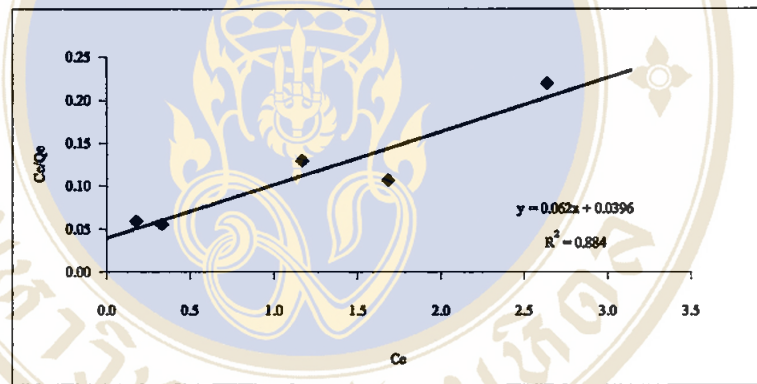
ภาพที่ 27 Freundlich Adsorption Isotherm ที่ระดับพีเอช 7.5 (ซ้ำที่ 2)



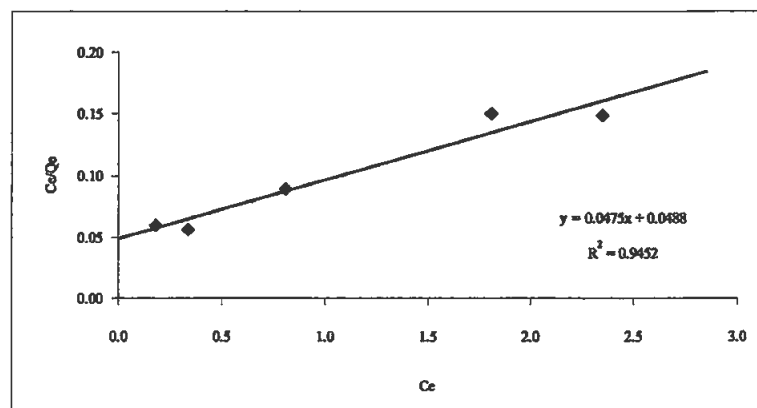
ภาพที่ 28 Freundlich Adsorption Isotherm ที่ระดับพีเอช 7.5 (ซ้ำที่ 3)



ภาพที่ 29 Langmuir Adsorption Isotherm ที่ระดับพีเอช 7.5 (ซ้ำที่ 1)



ภาพที่ 30 Langmuir Adsorption Isotherm ที่ระดับพีเอช 7.5 (ซ้ำที่ 2)



ภาพที่ 31 Langmuir Adsorption Isotherm ที่ระดับพีเอช 7.5 (ซ้ำที่ 3)

#### 4.4 การศึกษาผลของปริมาณอินทรีย์วัตถุต่อการดูดซับตะกั่วของดิน

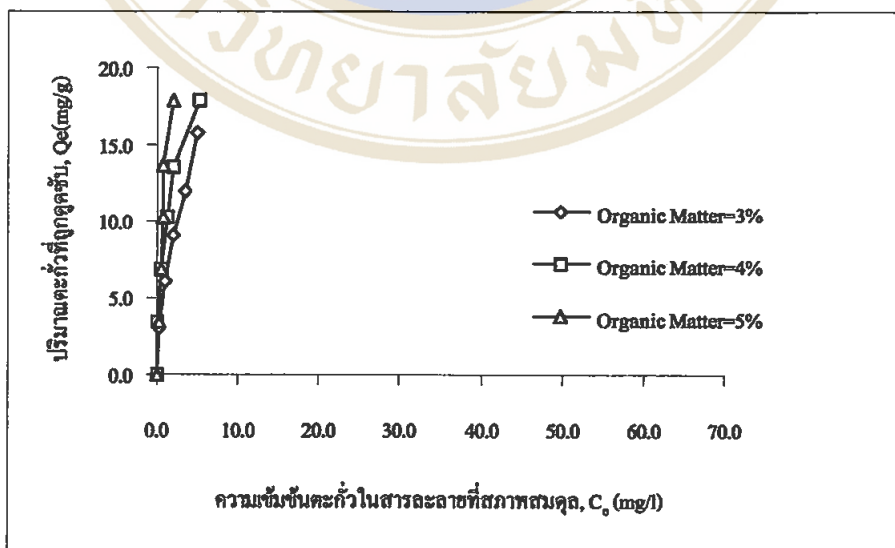
ในการศึกษาผลของปริมาณอินทรีย์วัตถุต่อการดูดซับตะกั่วของดินนั้น จะทำการศึกษาที่ปริมาณอินทรีย์วัตถุร้อยละ 3 (ตามธรรมชาติ) และศึกษาเพิ่มเติมจากระดับที่มีอยู่ในดินตามธรรมชาติอีก 2 ระดับ คือ ปริมาณอินทรีย์วัตถุร้อยละ 4 และ ร้อยละ 5 ซึ่งผลการศึกษากการดูดซับตะกั่วที่ระดับปริมาณอินทรีย์วัตถุดังกล่าวมีดังต่อไปนี้

##### 4.4.1 การศึกษาผลการดูดซับตะกั่วที่ปริมาณอินทรีย์วัตถุร้อยละ 3

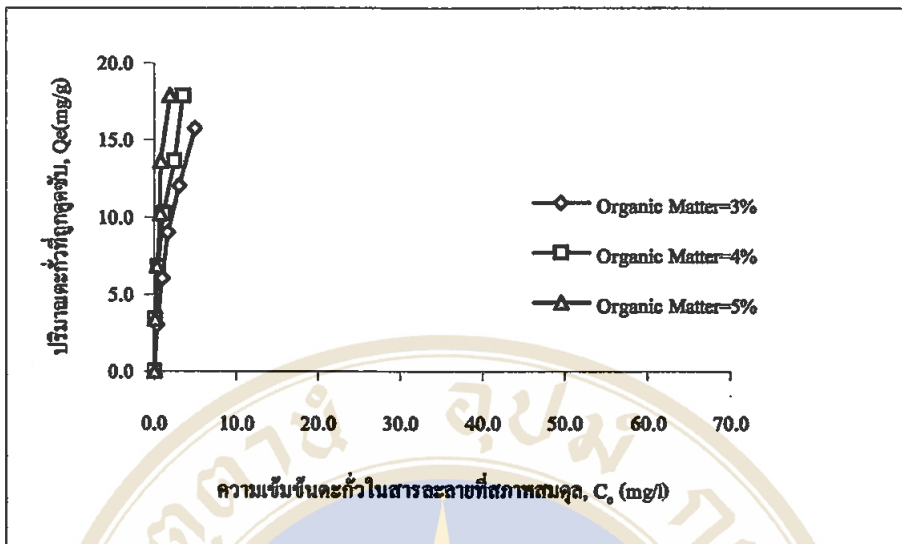
จากการศึกษาการดูดซับตะกั่วของดินชุดบางเลนที่มีปริมาณอินทรีย์วัตถุประมาณร้อยละ 3 ปรากฏเส้นไอโซเทอมของการดูดซับดังภาพที่ 32 ถึงภาพที่ 34 ซึ่งได้แสดงรวมไว้กับเส้นไอโซเทอมการดูดซับตะกั่วของดินที่มีปริมาณอินทรีย์วัตถุร้อยละ 4 และร้อยละ 5 โดยลักษณะการดูดซับดังกล่าวจะเป็นชนิดคัมพอส (H) หมายความว่า ดินมีความสามารถในการดูดตะกั่วได้ดีมาก ดังจะเห็นได้จากกราฟว่าปริมาณตะกั่วส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปถูกดูดซับและมีปริมาณคงเหลือในสารละลายดินที่สภาพสมดุลในระดับต่ำ สำหรับสมการที่นำมาอธิบายลักษณะการดูดซับได้ดีที่สุด คือ สมการ Freundlich (ภาพที่ 35 ถึงภาพที่ 37) โดยมีค่า  $r^2$  อยู่ในช่วง 0.9881 ถึง 0.9947 ในขณะที่สมการ Langmuir (ภาพที่ 38 ถึงภาพที่ 40) มีค่า  $r^2$  จัดอยู่ในระดับที่สูงเช่นกัน กล่าวคือ 0.941 ถึง 0.9826 สำหรับค่า K และ  $1/n$  ที่ได้จากสมการ Freundlich ได้แสดงไว้ในตารางที่ 7 ซึ่งพบว่า ค่า K ของการดูดซับตะกั่วที่ปริมาณอินทรีย์วัตถุร้อยละ 3 มีค่า 5.93, 6.22 และ 5.80 ในการทดลองซ้ำที่ 1, 2 และ 3 ตามลำดับ โดยมีค่าเฉลี่ย 5.98 สำหรับค่า  $1/n$  มีค่า 0.60, 0.61 และ 0.59 ในการทดลองซ้ำที่ 1, 2 และ 3 ตามลำดับและมีค่าเฉลี่ย 0.60

ตารางที่ 7 สรุปค่า K และ 1/n ของ Freundlich สำหรับดินหุบบางเลนที่ปริมาณอินทรีย์วัตถุ ระดับต่างๆ

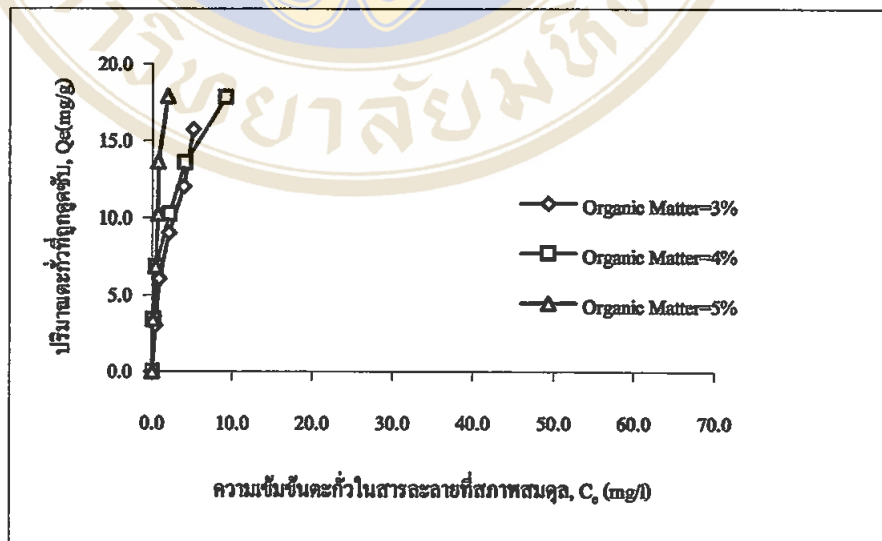
ชุดการทดลอง	ค่า K	ค่า 1/n
ปริมาณอินทรีย์วัตถุร้อยละ 3.0 (ซ้ำที่ 1)	5.93	0.60
ปริมาณอินทรีย์วัตถุร้อยละ 3.0 (ซ้ำที่ 2)	6.22	0.61
ปริมาณอินทรีย์วัตถุร้อยละ 3.0 (ซ้ำที่ 3)	5.80	0.59
ค่าเฉลี่ย	5.98	0.60
ปริมาณอินทรีย์วัตถุร้อยละ 4.0 (ซ้ำที่ 1)	9.46	0.42
ปริมาณอินทรีย์วัตถุร้อยละ 4.0 (ซ้ำที่ 2)	9.71	0.42
ปริมาณอินทรีย์วัตถุร้อยละ 4.0 (ซ้ำที่ 3)	7.81	0.39
ค่าเฉลี่ย	8.99	0.41
ปริมาณอินทรีย์วัตถุร้อยละ 5.0 (ซ้ำที่ 1)	13.33	0.70
ปริมาณอินทรีย์วัตถุร้อยละ 5.0 (ซ้ำที่ 2)	13.00	0.59
ปริมาณอินทรีย์วัตถุร้อยละ 5.0 (ซ้ำที่ 3)	13.26	0.63
ค่าเฉลี่ย	13.20	0.64



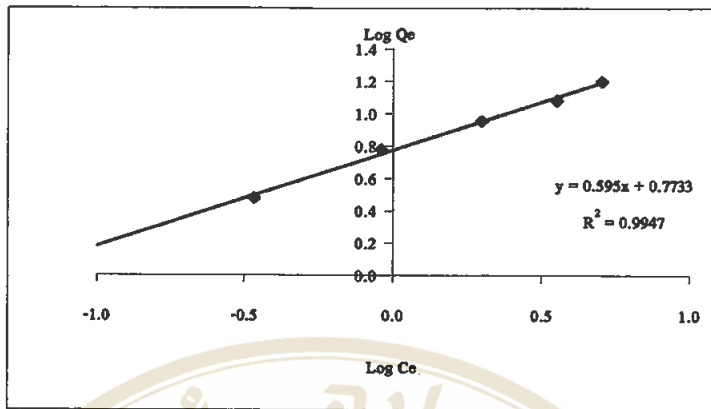
ภาพที่ 32 เส้นไอโซเทอมการดูดซับตะกั่วของดินหุบบางเลนที่ปริมาณอินทรีย์วัตถุระดับต่างๆ (ซ้ำที่ 1)



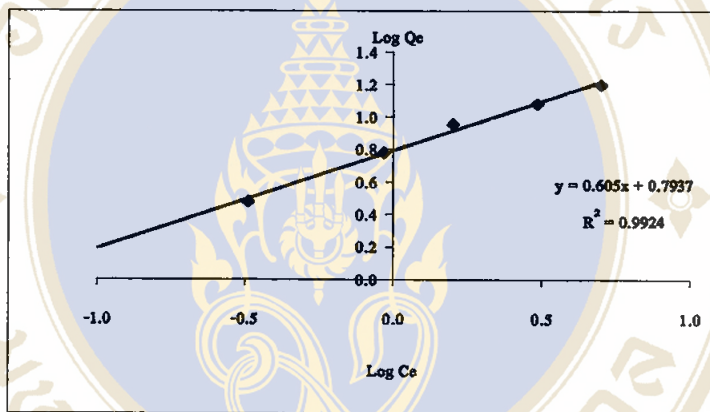
ภาพที่ 33 เส้นไอโซเทอมการดูดซับตะกั่วของดินหุคบางเลนที่ปริมาณอินทรีย์วัตถุระดับต่างๆ (ซ้ำที่ 2)



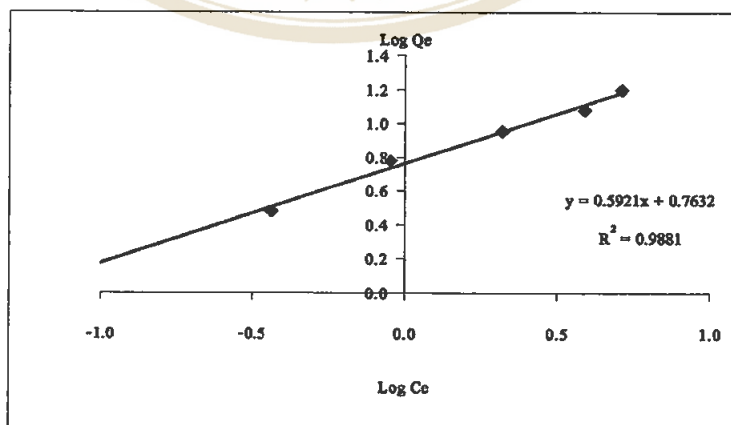
ภาพที่ 34 เส้นไอโซเทอมการดูดซับตะกั่วของดินหุคบางเลนที่ปริมาณอินทรีย์วัตถุระดับต่างๆ (ซ้ำที่ 3)



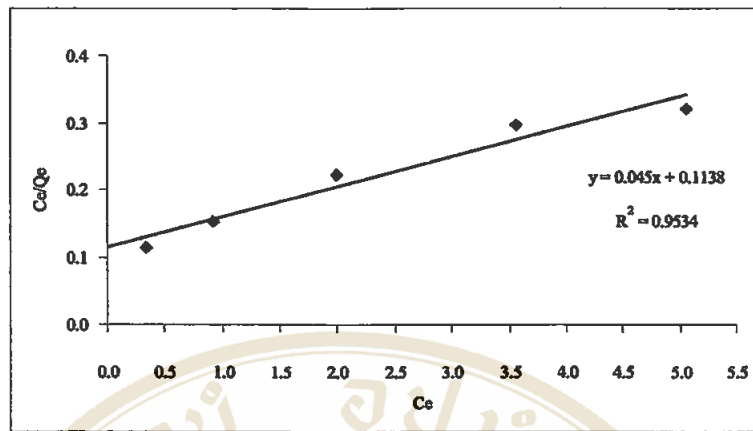
ภาพที่ 35 Freundlich Adsorption Isotherm ที่ปริมาณอินทรีย์วัตถุร้อยละ 3 (ซ้ำที่ 1)



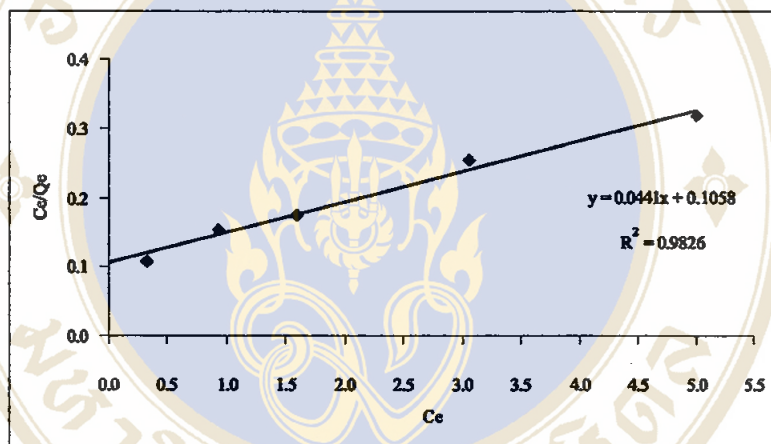
ภาพที่ 36 Freundlich Adsorption Isotherm ที่ปริมาณอินทรีย์วัตถุร้อยละ 3 (ซ้ำที่ 2)



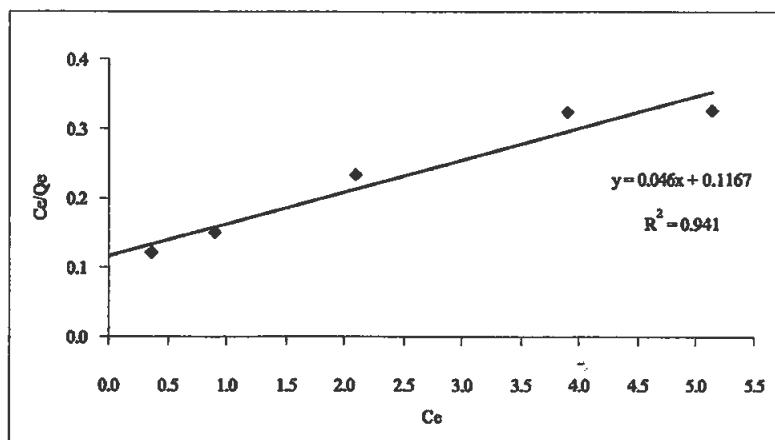
ภาพที่ 37 Freundlich Adsorption Isotherm ที่ปริมาณอินทรีย์วัตถุร้อยละ 3 (ซ้ำที่ 3)



ภาพที่ 38 Langmuir Adsorption Isotherm ที่ปริมาณอินทรีย์วัตถุร้อยละ 3 (ซ้ำที่ 1)



ภาพที่ 39 Langmuir Adsorption Isotherm ที่ปริมาณอินทรีย์วัตถุร้อยละ 3 (ซ้ำที่ 2)



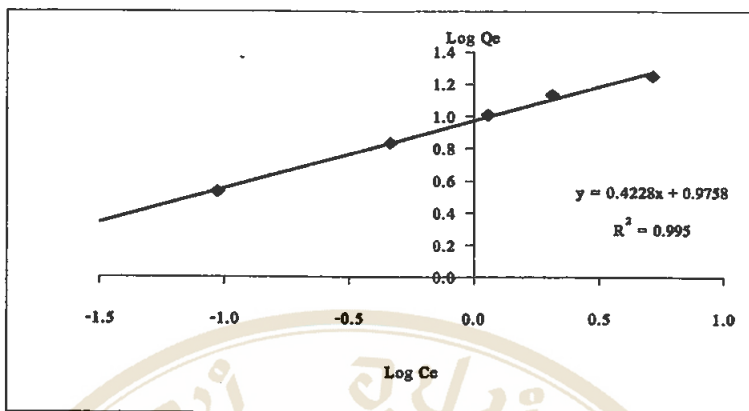
ภาพที่ 40 Langmuir Adsorption Isotherm ที่ปริมาณอินทรีย์วัตถุร้อยละ 3 (ซ้ำที่ 3)

#### 4.4.2 การศึกษาผลการดูดซับตะกั่วที่ปริมาณอินทรีย์วัตถุร้อยละ 4

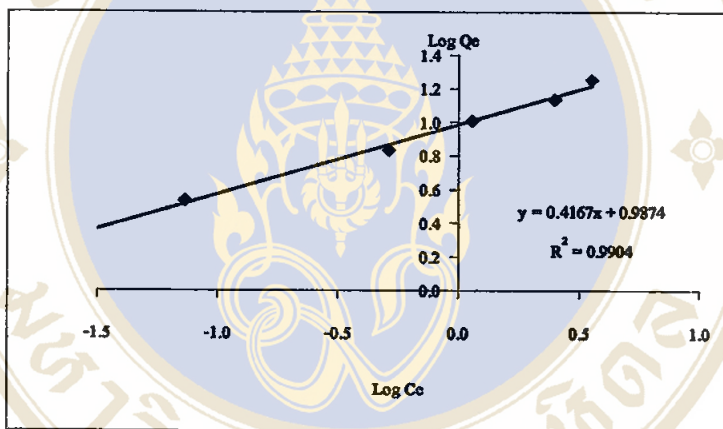
จากการศึกษาการดูดซับตะกั่วของดินร่วนบางเลนที่มีปริมาณอินทรีย์วัตถุประมาณร้อยละ 4 ปรากฏเส้นไอโซเทอมของการดูดซับดังแสดงไว้ในภาพที่ 32 ถึงภาพที่ 34 ซึ่งเส้นไอโซเทอมมีลักษณะเป็นชนิดตัวเอช (H) แสดงถึงการที่ดินมีความสามารถในการดูดซับตะกั่วได้สูงมาก ทั้งนี้สมการที่นำมาอธิบายลักษณะการดูดซับได้ดีที่สุด คือ สมการ Freundlich (ภาพที่ 41 ถึงภาพที่ 43) โดยมีค่า  $r^2$  อยู่ในช่วง 0.9789 ถึง 0.995 ส่วนสมการ Langmuir (ภาพที่ 44 ถึงภาพที่ 46) มีค่า  $r^2$  อยู่ในช่วง 0.9321 ถึง 0.9838 ค่า K ที่ได้จากสมการ Freundlich ซึ่งสรุปไว้ในตารางที่ 7 มีค่า 9.46, 9.71 และ 7.81 ในการทดลองซ้ำที่ 1, 2 และ 3 ตามลำดับ คิดเป็นค่าเฉลี่ย 8.99 ส่วนค่า  $1/n$  มีค่า 0.42, 0.42 และ 0.39 ในการทดลองซ้ำที่ 1, 2 และ 3 ตามลำดับ คิดเป็นค่าเฉลี่ย 0.41

#### 4.4.3 การศึกษาผลการดูดซับตะกั่วที่ปริมาณอินทรีย์วัตถุร้อยละ 5

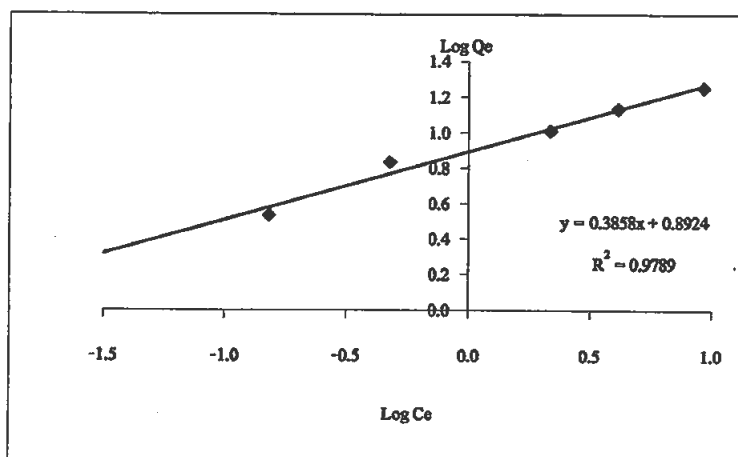
จากการศึกษาการดูดซับตะกั่วของดินร่วนบางเลนที่มีปริมาณอินทรีย์วัตถุประมาณร้อยละ 5 ปรากฏเส้นไอโซเทอมของการดูดซับดังภาพที่ 47 ถึงภาพที่ 52 ซึ่งเส้นไอโซเทอมมีลักษณะเป็นชนิดตัวเอช (H) เช่นเดียวกับดินที่มีปริมาณอินทรีย์วัตถุร้อยละ 3 และร้อยละ 4 แสดงถึงการที่ดินมีความสามารถในการดูดซับตะกั่วได้สูงมาก ทั้งนี้สมการที่นำมาอธิบายลักษณะการดูดซับได้ดีที่สุด คือ สมการ Freundlich โดยมีค่า  $r^2$  อยู่ในช่วง 0.9514 ถึง 0.9746 ส่วนสมการ Langmuir มีค่า  $r^2$  อยู่ในช่วง 0.9327 ถึง 0.9476 ค่า K ที่ได้จากสมการ Freundlich ซึ่งสรุปไว้ในตารางที่ 7 มีค่า 13.33, 13.00 และ 13.26 ในการทดลองซ้ำที่ 1, 2 และ 3 ตามลำดับ คิดเป็นค่าเฉลี่ย 13.20 ส่วนค่า  $1/n$  มีค่า 0.70, 0.59 และ 0.63 ในการทดลองซ้ำที่ 1, 2 และ 3 ตามลำดับ คิดเป็นค่าเฉลี่ย 0.64



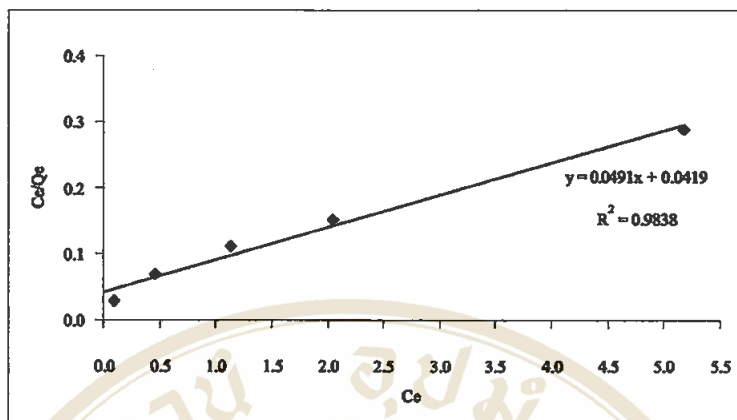
ภาพที่ 41 Freundlich Adsorption Isotherm ที่ปริมาณอินทรีย์วัตถุร้อยละ 4 (ซ้ำที่ 1)



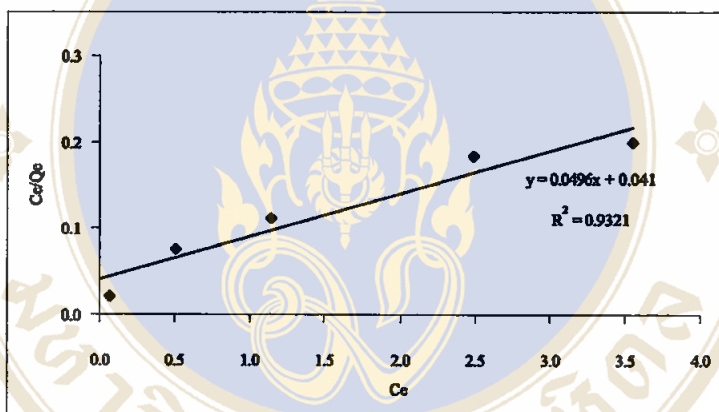
ภาพที่ 42 Freundlich Adsorption Isotherm ที่ปริมาณอินทรีย์วัตถุร้อยละ 4 (ซ้ำที่ 2)



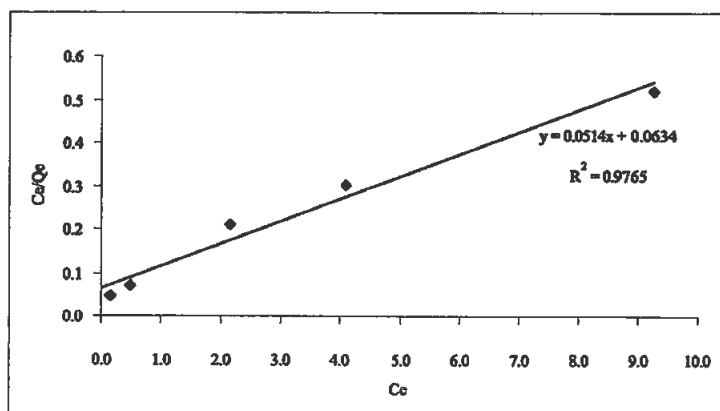
ภาพที่ 43 Freundlich Adsorption Isotherm ที่ปริมาณอินทรีย์วัตถุร้อยละ 4 (ซ้ำที่ 3)



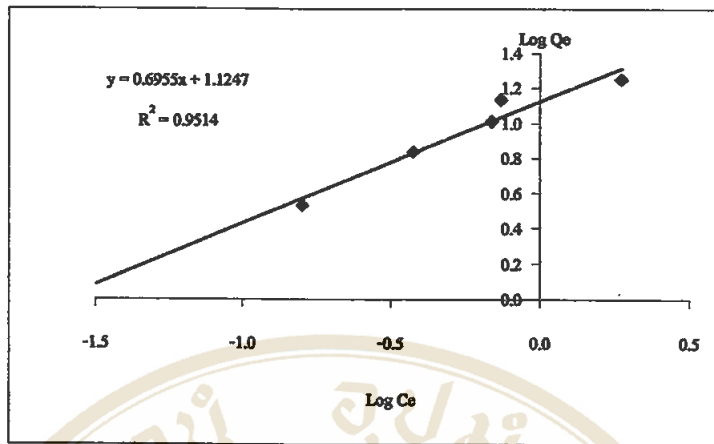
ภาพที่ 44 Langmuir Adsorption Isotherm ที่ปริมาณอินทรียี่วัตถุร้อยละ 4 (ซ้ำที่ 1)



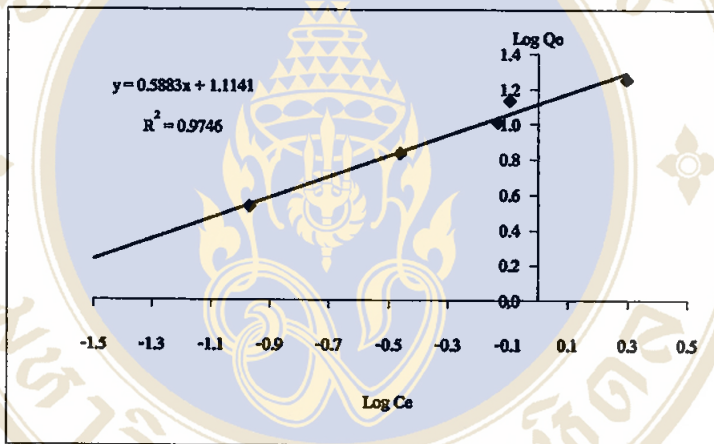
ภาพที่ 45 Langmuir Adsorption Isotherm ที่ปริมาณอินทรียี่วัตถุร้อยละ 4 (ซ้ำที่ 2)



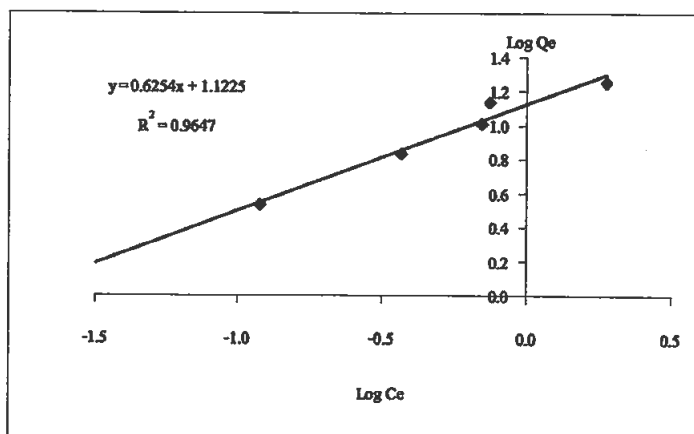
ภาพที่ 46 Langmuir Adsorption Isotherm ที่ปริมาณอินทรียี่วัตถุร้อยละ 4 (ซ้ำที่ 3)



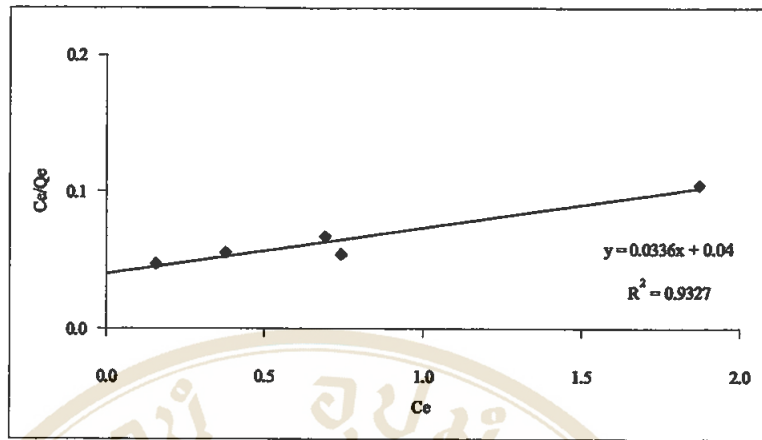
ภาพที่ 47 Freundlich Adsorption Isotherm ที่ปริมาณอินทรีย์วัตถุร้อยละ 5 (ซ้ำที่ 1)



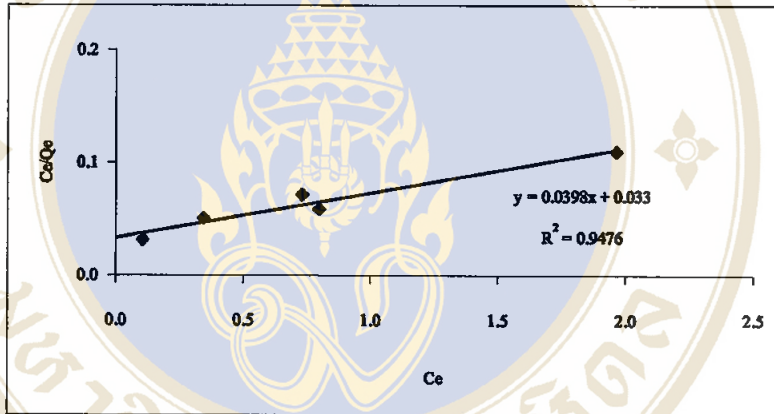
ภาพที่ 48 Freundlich Adsorption Isotherm ที่ปริมาณอินทรีย์วัตถุร้อยละ 5 (ซ้ำที่ 2)



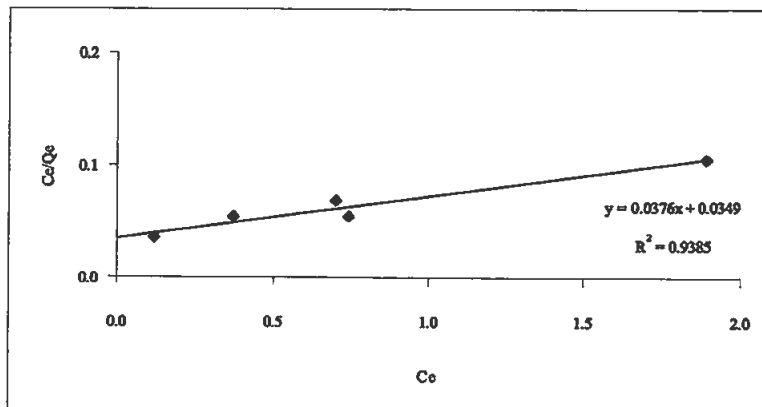
ภาพที่ 49 Freundlich Adsorption Isotherm ที่ปริมาณอินทรีย์วัตถุร้อยละ 5 (ซ้ำที่ 3)



ภาพที่ 50 Langmuir Adsorption Isotherm ที่ปริมาณอินทรียั้วัดถู้อยละ 5 (จำที่ 1)



ภาพที่ 51 Langmuir Adsorption Isotherm ที่ปริมาณอินทรียั้วัดถู้อยละ 5 (จำที่ 2)



ภาพที่ 52 Langmuir Adsorption Isotherm ที่ปริมาณอินทรียั้วัดถู้อยละ 5 (จำที่ 3)

#### 4.5 ความสัมพันธ์ของค่าพีเอชและปริมาณอินทรีย์วัตถุกับความสามารถในการดูดซับตะกั่วของดิน

##### 4.5.1 ความสัมพันธ์ของค่าพีเอชกับความสามารถในการดูดซับตะกั่วของดิน

จากการคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์อย่างง่าย ( Simple Correlation Coefficient) โดยใช้วิธีของ Pearson ดังแสดงในตารางที่ 8 พบว่า ความสามารถในการดูดซับตะกั่วของดินชุดบางเลน ซึ่งจะพิจารณาจากค่า K ของสมการ Freundlich นั้น มีสหสัมพันธ์ในทิศทางเดียวกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $P\text{-value} < 0.001$ ) กับค่าพีเอชของดิน โดยมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ ( $r$ ) เท่ากับ 0.725 ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ ( $r^2$ ) เท่ากับ 0.525

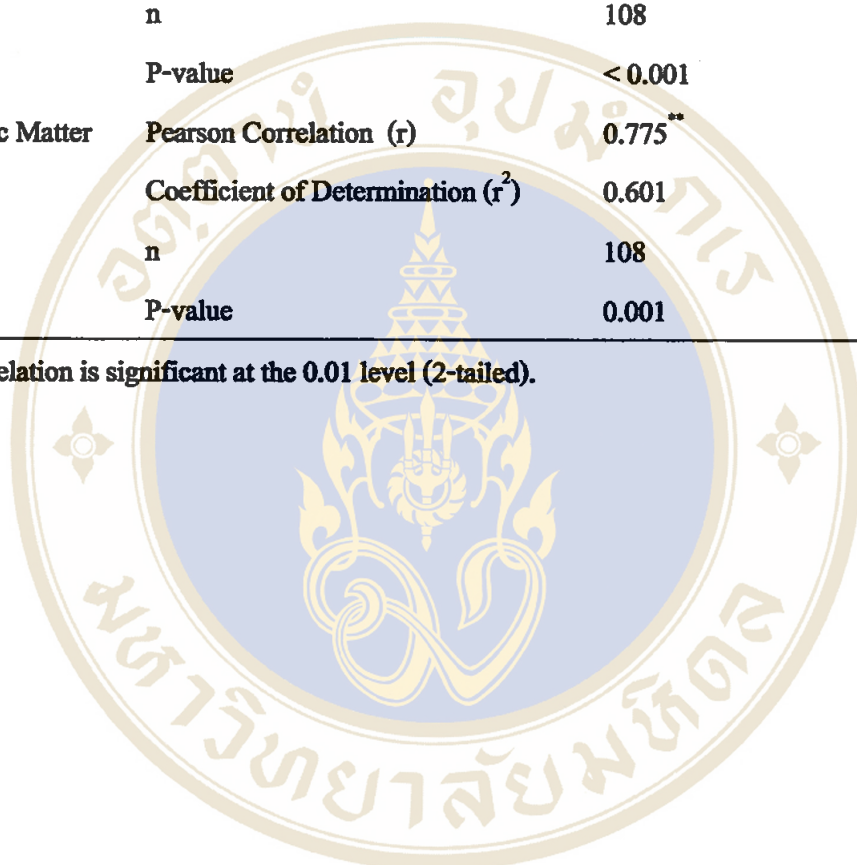
##### 4.5.2 ความสัมพันธ์ของปริมาณอินทรีย์วัตถุกับความสามารถในการดูดซับตะกั่วของดิน

จากการคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์อย่างง่าย ( Simple Correlation) โดยใช้วิธีของ Pearson ดังแสดงในตารางที่ 8 พบว่า ความสามารถในการดูดซับตะกั่วของดินชุดบางเลน ซึ่งจะพิจารณาจากค่า K ของสมการ Freundlich นั้น มีสหสัมพันธ์ในทิศทางเดียวกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $P\text{-value} = 0.001$ ) กับปริมาณอินทรีย์วัตถุในดิน โดยมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ ( $r$ ) เท่ากับ 0.775 ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ ( $r^2$ ) เท่ากับ 0.601

**ตารางที่ 8** สรูลค่าการวิเคราะห์ทางสถิติ (Simple Correlation Coefficient)

		Distribution Coefficient (K)
pH	Pearson Correlation (r)	0.725**
	Coefficient of Determination (r <sup>2</sup> )	0.525
	n	108
	P-value	< 0.001
Organic Matter	Pearson Correlation (r)	0.775**
	Coefficient of Determination (r <sup>2</sup> )	0.601
	n	108
	P-value	0.001

\*\* Correlation is significant at the 0.01 level (2-tailed).



## บทที่ 5

## การอภิปรายผล

จากผลการศึกษาการดูดซับตะกั่วของดินหุคบางเลน ดังได้กล่าวรายละเอียดไว้ในบทที่ 4 นั้น สามารถอภิปรายได้ดังนี้

### 5.1 การศึกษาการดูดซับตะกั่วของดินหุคบางเลนในสภาพธรรมชาติ

จากการศึกษาพบว่าเส้น ไอโซเทอมของการดูดซับที่พบมีลักษณะเป็น ไอโซเทอมชนิดตัว เอช (H) บ่งชี้ว่าดินมีความสามารถในการดูดซับตะกั่วได้สูงมาก โดยจะเห็นได้จากการที่เส้นกราฟมีความชันสูงเนื่องจากอนุภาคตะกั่วถูกดูดซับไว้ในดินมากกว่าอยู่ในสารละลายดิน โดยคำนวณค่า K ของ Freundlich ได้เฉลี่ย 5.98 และ  $1/n$  เฉลี่ย 0.60 การดูดซับในลักษณะนี้อาจเกิดได้ทั้งจาก Inner-Sphere Complexation ( Specific Adsorption) หรือ แรงแวนเดอร์วาลส์ ( 38) โดย Inner-Sphere Complexation เป็นการเกาะยึด ไอออนที่เกิดระหว่างโมเลกุลหรือ ไอออนที่ถูกดูดซับกับหมู่ฟังก์ชันที่ อยู่บริเวณพื้นผิวอนุภาคดิน โดยตรง โดยไม่มีโมเลกุลของน้ำอยู่ระหว่างพื้นผิวทั้งสอง ซึ่งการดูดซับประเภทนี้จะเกิดแรงดูดยึดทางเคมีที่แข็งแรงมากและมักเป็นกระบวนการที่ผันกลับไม่ได้ (Irreversible) ส่วนแรงแวนเดอร์วาลส์เป็นแรงยึดเหนี่ยวทางกายภาพเกิดขึ้นเมื่ออนุภาคอยู่ใกล้กันมากและจะลดลงอย่างรวดเร็วตามระยะทางที่ห่างออกไป ซึ่งแรงยึดเหนี่ยวประเภทนี้มีความแข็งแรง น้อยกว่า Inner-Sphere Complexation

เมื่อพิจารณาระหว่างสมการ Freundlich และสมการ Langmuir สมการที่สามารถนำมา อธิบายการดูดซับตะกั่วของดินหุคบางเลนที่ดีที่สุด โดยมีค่าสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจ ( $r^2$ ) สูงที่สุด ได้แก่ สมการของ Freundlich โดยมีค่า  $r^2 = 0.9881-0.9947$  (ภาคผนวก ง) ซึ่งสอดคล้องกับกราฟ ไอโซเทอมการดูดซับที่ได้ โดยเส้นกราฟบ่งชี้ถึงลักษณะการดูดซับที่จะเกิดต่อไปเรื่อยๆ トラบเท่าที่

ความเข้มข้นของ ไอออนในสารละลายดินมีเพิ่มมากขึ้นซึ่งสอดคล้องกับสมมติฐานของสมการ Freundlich

การที่ดินสามารถดูดซับตะกั่วได้นั้น สาเหตุสำคัญประการหนึ่งมาจากคุณสมบัติของดิน โดยดินชุดบางเลนที่ทำการศึกษามีลักษณะเป็นดินเหนียว ซึ่งอนุภาคดินเหนียวเป็นอนุภาคที่มีขนาดเล็กมาก มีพื้นที่ผิวจำเพาะสูงและที่ขอบอนุภาคของดินเหนียวจะมีประจุเป็นลบ (2) ทำให้สามารถดูดซับตะกั่วซึ่งเป็นโลหะไอออนบวกได้ดี นอกจากนี้ประจุลบที่อนุภาคดินส่วนหนึ่งจะมาจากอินทรีย์วัตถุ ซึ่งจากผลการวิเคราะห์ ตัวอย่างดินมีปริมาณอินทรีย์วัตถุอยู่ในระดับสูงปานกลาง ค่าพีเอชของดินเป็นคุณสมบัติอีกประการหนึ่งที่มีความสำคัญเป็นอย่างมาก มีรายงานว่า ในดินที่มีพีเอชมากกว่า 6 ตะกั่วอาจจะถูกดูดซับไว้ที่พื้นผิวของอนุภาคดินเหนียวหรือเกิดเป็นสารประกอบ เกล็ดไนเตรต ( $PbNO_3$ ) (5) อย่างไรก็ตาม คุณสมบัติของดินที่สามารถบ่งชี้ถึงความสามารถในการดูดซับไอออนบวกได้ดีที่สุด ได้แก่ ค่า CEC ซึ่งมีค่าในระดับที่จัดว่าสูง โดยค่า CEC จะแสดงถึงปริมาณไอออนบวกแลกเปลี่ยนได้ทั้งหมดที่ดินสามารถดูดซับไว้ได้ ระดับของค่า CEC จะได้รับอิทธิพลจากคุณสมบัติต่างๆ ดังกล่าวข้างต้นของดิน ได้แก่ การมีอนุภาคดินเหนียว อินทรีย์วัตถุ รวมถึงค่าพีเอชของดิน

## 5.2 การศึกษาผลของค่าพีเอชต่อการดูดซับตะกั่วของดิน

จากผลการศึกษาผลของค่าพีเอชต่อการดูดซับตะกั่วของดิน โดยทำการศึกษาเปรียบเทียบค่าพีเอชของดินที่ระดับ 6.7 (ตามธรรมชาติ) และที่ระดับ 4.5 และ 7.5 นั้น จะพบว่าที่ระดับพีเอช 4.5 ปรากฏรูปแบบของเส้นไอโซเทอมการดูดซับที่แตกต่างออกไปจากที่ระดับพีเอช 6.7 และ 7.5 โดยที่พีเอช 4.5 เส้นไอโซเทอมของการดูดซับจะปรากฏเป็นลักษณะคล้ายไอโซเทอมชนิดตัวแอล (L) ในขณะที่ที่ระดับพีเอช 6.7 และ 7.5 มีลักษณะการดูดซับเป็นไอโซเทอมชนิดตัวเอช (H)

สำหรับเส้นไอโซเทอมที่ระดับพีเอช 4.5 นั้น จะมีลักษณะคล้ายไอโซเทอมชนิดตัวแอล (L) แต่ต่างกันที่การดูดซับมีแนวโน้มที่จะเกิดเรื่อยๆ คราบเท่าที่มีความเข้มข้นของตะกั่วในสารละลายดินเพิ่มขึ้น ในขณะที่การดูดซับที่มีลักษณะเป็นรูปตัวแอลนั้นเมื่อความเข้มข้นของตะกั่วเพิ่มขึ้นถึงระดับหนึ่งความสามารถในการดูดซับตะกั่วของดินจะถึงจุดสูงสุด ลักษณะของไอโซเทอมที่คล้ายไอโซเทอมชนิดตัวแอลดังกล่าว แสดงให้เห็นว่าดินมีความสามารถในการดูดซับตะกั่วได้ดี

แต่น้อยกว่าที่ระดับพีเอช 6.7 โดยการดูดซับตะกั่วของดินมีความสัมพันธ์แบบไม่เป็นเส้นตรงกับ ความเข้มข้นของตะกั่วในสารละลายดินและความสามารถในการดูดซับตะกั่วของดินมีแนวโน้มลดลงเมื่อความเข้มข้นของตะกั่วในสารละลายดินเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากพื้นผิวอนุภาคดินถูกปกคลุมด้วยตะกั่วมากขึ้น ทำให้มีตำแหน่งยึดเกาะน้อยลง จึงมีปริมาณตะกั่วเหลืออยู่ในสารละลายดินมากขึ้น จะเห็นได้ว่าในช่วงความเข้มข้นต่ำกราฟจะมีความชันมากหมายถึงดินมีความสามารถในการดูดซับตะกั่วได้ดี จึงมีปริมาณตะกั่วที่ถูกดูดซับไว้ในดินมากกว่าปริมาณตะกั่วในสารละลายดิน หลังจากนั้นเมื่อพื้นผิวอนุภาคดินถูกปกคลุมด้วยตะกั่วมากขึ้นและมีตำแหน่งยึดเกาะน้อยลงจึงมีปริมาณตะกั่วเหลืออยู่ในสารละลายดินมากขึ้น ซึ่งจะเห็นได้ว่าในช่วงความเข้มข้นที่สูงขึ้นกราฟจะมีความชันลดลง สำหรับเส้นไอโซเทอมชนิดตัวเอช สามารถอธิบายได้ว่าดินมีความสามารถในการดูดซับตะกั่วได้สูงมากและดีกว่าไอโซเทอมชนิดตัวแอล

สมการที่สามารถนำมาอธิบายลักษณะการดูดซับที่เกิดขึ้นได้ดีที่สุด ได้แก่ สมการของ Freundlich โดยที่ระดับพีเอช 4.5 มีค่า  $r^2$  อยู่ในช่วง 0.9896 ถึง 0.9925 คำนวณค่า K เหลือได้ 1.42 และ  $1/n$  เหลือ 0.64 ส่วนที่ระดับพีเอช 6.5 มีค่า  $r^2$  อยู่ในช่วง 0.9881 ถึง 0.9947 คำนวณค่า K เหลือได้ 5.98 และ  $1/n$  เหลือ 0.60 ที่ระดับพีเอช 7.5 มีค่า  $r^2$  อยู่ในช่วง 0.878 ถึง 0.9601 ค่า K เหลือ 9.24 และ  $1/n$  เหลือ 0.57 ซึ่งจะสังเกตได้ว่าเมื่อระดับพีเอชเพิ่มขึ้น ค่า K จะมีค่าสูงขึ้นเช่นเดียวกัน

เมื่อทำการทดสอบความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถในการดูดซับตะกั่วของดิน ซึ่งพิจารณาได้จากค่า K ของสมการ Freundlich กับค่าพีเอชของดิน ตามสมมติฐานที่ตั้งไว้ว่าความสามารถในการดูดซับตะกั่วของดินชุดบางเลนมีความสัมพันธ์กับค่าพีเอชของดิน โดยดินที่มีค่าพีเอชสูงสามารถดูดซับตะกั่วได้ดีกว่าดินที่มีค่าพีเอชต่ำ โดยใช้ Pearson Simple Correlation Coefficient พบว่าความสามารถในการดูดซับตะกั่วของดินมีสหสัมพันธ์ในทิศทางเดียวกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $P\text{-value} < 0.001$ ) กับค่าพีเอชของดิน โดยมีค่า  $r$  เท่ากับ 0.725 ค่าสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจ ( $r^2$ ) เท่ากับ 0.525 หรืออาจกล่าวได้ว่า ความสามารถในการดูดซับตะกั่วของดินจะเพิ่มขึ้นตามค่าพีเอชที่เพิ่มขึ้น ดังจะเห็นได้จากค่า K ที่เพิ่มขึ้นเมื่อพีเอชเพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาที่ได้เคยมีผู้ทำการศึกษาไว้หลายคน ได้แก่ Harter (51) ได้ทำการศึกษาผลของค่าพีเอชดินต่อการดูดซับตะกั่วทองแดง สังกะสีและนิกเกิลในดิน 2 ชนิด โดยทำการศึกษาในช่วงพีเอช 4.3 ถึง 8.3 ผลการศึกษาชี้ว่าค่าพีเอชของดินมีผลต่อการดูดซับโลหะหนักเป็นอย่างมาก และมีลักษณะแตกต่างกันไปตามแต่ลักษณะของดินและโลหะที่ทำการศึกษา โดยความสามารถในการดูดซับจะเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัดที่ระดับพีเอชมากกว่า 7 นอกจากนี้ ศิริโรจน์ (60) ได้ทำการทดลองการดูดซับตะกั่ว สังกะสี แคดเมียม และ โครเมียม ด้วยตัวดูดซับต่างๆ ได้แก่ แร่ดินเหนียว Kaolinite และ Bentonite และดินเหนียวจาก

อำเภอชัยบาดาล จังหวัดลพบุรี ดินเหนียวจากอำเภอบางคล้า จังหวัดฉะเชิงเทรา และดินเหนียวจากเหมือง MRD-ECC จังหวัดลำปาง ผลการศึกษาพบว่า เมื่อเพิ่มค่าพีเอชของสารละลายดินโลหะหนักเริ่มต้น ความสามารถในการดูดซับของตัวดูดซับต่างๆ ก็จะเพิ่มขึ้นตามไปด้วย Buchter และคณะ (61). ได้ทำการศึกษาความสัมพันธ์ของค่า Freundlich Parameters กับคุณสมบัติต่างๆของดิน ในดิน 11 ชนิดและโลหะหนัก 15 ชนิด สรุปผลได้ว่า ค่าพีเอชเป็นคุณลักษณะของดินที่มีผลต่อค่า K และ n มากที่สุด โดยเมื่อพีเอชเพิ่มขึ้นจะทำให้ค่า K เพิ่มขึ้นด้วย

ซึ่งการที่การดูดซับตะกั่วในดินขึ้นอยู่กับค่าพีเอชนั้น อาจมีสาเหตุส่วนหนึ่งมาจากการที่ค่าพีเอชมีผลต่อกระบวนการแลกเปลี่ยน ไอออนบวก (Cation Exchange) และกระบวนการ Protonation (5) นอกจากนี้โลหะไอออนบวกจะถูกไฮโดรไลซ์ได้เพิ่มขึ้นเมื่อพีเอชเพิ่มขึ้น ซึ่งโลหะที่ถูกไฮโดรไลซ์นี้จะถูกดูดซับได้ดีกว่าไอออนอิสระ นอกจากนี้ตำแหน่งการดูดซับหลายประเภทในดินยังขึ้นอยู่กับค่าพีเอชของดิน เมื่อพีเอชลดลงจำนวนตำแหน่งการดูดซับไอออนบวกจะลดลงและเมื่อพีเอชเพิ่มขึ้นตำแหน่งการดูดซับไอออนบวกจะเพิ่มขึ้น และการเปลี่ยนแปลงของค่าพีเอชจะมีผลต่อรูปแบบ (Species) ของโลหะ ซึ่งไอออนของตะกั่วจะมีรูปแบบต่างๆกันขึ้นอยู่กับค่าพีเอชของสารละลายดิน โดยที่พีเอชต่ำกว่า 6 ตะกั่วจะอยู่ในรูป  $Pb^{2+}$  เป็นส่วนใหญ่ แต่ที่พีเอชสูงๆ ไอออนของตะกั่วจะรวมตัวกับโมเลกุลของน้ำเกิดเป็นสารประกอบประเภท hydroxocomplexes ชนิดต่างๆ เช่น  $Pb^{2+}$ ,  $Pb(OH)^+$ ,  $Pb_2(OH)^+$ ,  $Pb_3(OH)^+$  และ  $Pb_4(OH)^+$  นอกจากนี้แล้วค่าพีเอชของสารละลายดินจะมีผลต่อประจุที่ผิวของดินด้วย (pH dependent charge) ซึ่งเป็นผลมาจากการ Ionization ของหมู่ฟังก์ชันที่ผิวของอินทรีย์วัตถุและอนินทรีย์วัตถุในดิน

สำหรับค่า  $1/n$  นั้น เมื่อพิจารณาจากผลการทดลองพบว่าค่า  $1/n$  ที่ได้จากการดูดซับของทุกระดับพีเอชมีค่าต่ำกว่า 1 ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Inskip และ Baham (58) ที่ทำการศึกษาการดูดซับทองแดงและแคดเมียมด้วย Na-montmorillonite โดยพบว่า การดูดซับทองแดงและแคดเมียมที่พีเอชต่างๆ (พีเอช 3.82-7.45) สอดคล้องกับสมการการดูดซับของ Freundlich และค่า  $1/n$  ที่ได้มีค่าต่ำกว่า 1 เสมอ จากการศึกษาการดูดซับตะกั่ว สังกะสี แคดเมียมและโครเมียมด้วยตัวดูดซับต่างๆของสิโรรัตน์ (60) พบว่าการดูดซับเกือบทั้งหมดมีค่า  $1/n$  ต่ำกว่า 1 ซึ่งค่า  $1/n$  ที่ต่ำกว่า 1 สามารถอธิบายได้ว่าค่าพลังงานในการดูดซับจะลดลงเมื่อพื้นที่ผิวถูกปกคลุมด้วยไอออนของโลหะหนักมากขึ้น หรืออาจกล่าวได้ว่าดินสามารถดูดซับตะกั่วได้ดีที่ระดับความเข้มข้นต่ำ นอกจากนี้ยังเป็นที่น่าสนใจว่าค่า  $1/n$  มีความสัมพันธ์ในทิศทางตรงกันข้ามกับค่าพีเอช กล่าวคือผลการศึกษาการดูดซับที่ระดับพีเอชสูงจะมีค่า  $1/n$  ต่ำกว่าที่ระดับพีเอชต่ำ

### 5.3 การศึกษาผลของปริมาณอินทรีย์วัตถุต่อการดูดซับตะกั่วของดิน

จากการศึกษาผลของปริมาณอินทรีย์วัตถุต่อการดูดซับตะกั่วของดินชุดบางเลนซึ่งได้ทำการศึกษาผลของปริมาณอินทรีย์วัตถุที่ 3 ระดับ กล่าวคือ ปริมาณอินทรีย์วัตถุร้อยละ 3 (ตามธรรมชาติ) ปริมาณอินทรีย์วัตถุร้อยละ 4 และ ร้อยละ 5 พบว่า เส้นไอโซเทอมของการดูดซับที่ปริมาณอินทรีย์วัตถุทุกระดับมีลักษณะเป็นรูปตัวเอช(H) ซึ่งอาจสรุปได้ว่าดินมีความสามารถในการดูดซับตะกั่วได้สูงมาก สมการที่นำมาอธิบายลักษณะการดูดซับได้ดีที่สุด คือ สมการ Freundlich โดยที่ปริมาณอินทรีย์วัตถุร้อยละ 3 มีค่า  $r^2$  อยู่ในช่วง 0.9881 ถึง 0.9947 คำนวณค่า K เฉลี่ยได้ 5.98 และค่า  $1/n$  เฉลี่ย 0.60 ที่ปริมาณอินทรีย์วัตถุร้อยละ 4 มีค่า  $r^2$  อยู่ในช่วง 0.9789 ถึง 0.995 คำนวณค่า K เฉลี่ยได้ 8.99 และค่า  $1/n$  เฉลี่ย 0.41 และที่ปริมาณอินทรีย์วัตถุร้อยละ 5 มีค่า  $r^2$  อยู่ในช่วง 0.9514 ถึง 0.9746 คำนวณค่า K เฉลี่ยได้ 13.20 และค่า  $1/n$  เฉลี่ย 0.64 ซึ่งจะพบว่าเมื่อปริมาณอินทรีย์วัตถุเพิ่มขึ้นค่า K จะสูงขึ้น

จากผลการศึกษาดังกล่าว พบว่า การเปลี่ยนแปลงของปริมาณอินทรีย์วัตถุในดินมีผลต่อความสามารถในการดูดซับตะกั่วของดิน โดยความสามารถในการดูดซับตะกั่วมีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้นเมื่อมีปริมาณอินทรีย์วัตถุในดินเพิ่มขึ้น เมื่อทำการทดสอบความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถในการดูดซับตะกั่วของดิน ซึ่งพิจารณาได้จากค่า K ของสมการ Freundlich กับปริมาณอินทรีย์วัตถุของดิน ตามสมมติฐานที่ตั้งไว้ว่าความสามารถในการดูดซับตะกั่วของดินชุดบางเลนมีความสัมพันธ์กับปริมาณอินทรีย์วัตถุในดิน โดยดินที่มีปริมาณอินทรีย์วัตถุสูงสามารถดูดซับตะกั่วได้ดีกว่าดินที่มีปริมาณอินทรีย์วัตถุต่ำ โดยใช้ Pearson Simple Correlation Coefficient พบว่าความสามารถในการดูดซับตะกั่วของดินมีสหสัมพันธ์ในทิศทางเดียวกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $P\text{-value} = 0.001$ ) กับปริมาณอินทรีย์วัตถุ โดยมีค่า  $r$  เท่ากับ 0.775 ค่าสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจ ( $r^2$ ) เท่ากับ 0.601 สาเหตุที่ปริมาณอินทรีย์วัตถุในดินมีผลต่อความสามารถในการดูดซับตะกั่ว เนื่องมาจากอินทรีย์วัตถุในดินประกอบด้วยองค์ประกอบหลักที่สำคัญ 3 องค์ประกอบด้วยกันได้แก่ 1) สิ่งมีชีวิต 2) สารชีวเคมีที่ละลายได้ ได้แก่ กรดอะมิโน, โปรตีน, คาร์โบไฮเดรต, กรดอินทรีย์, โพลีแซคคาไรด์, ลิกลิน เป็นต้น และ 3) สารชีวเคมีที่ไม่สามารถละลายได้ ซึ่งส่วนที่เป็นสารชีวเคมีและสารชีวเคมีทำให้อินทรีย์วัตถุมีตำแหน่งที่ไอออนโลหะสามารถเข้าไปยึดเกาะได้ (5) นอกจากนี้ การเพิ่มปริมาณอินทรีย์วัตถุให้กับดินจะเป็นการช่วยเพิ่มพื้นที่ผิวให้กับดินเนื่องจากอินทรีย์วัตถุ มีเนื้อที่ผิวจำเพาะสูงมากและอินทรีย์วัตถุเองมีประจุเป็นลบ ดังนั้นการเพิ่มปริมาณอินทรีย์วัตถุให้กับดินจึงเท่ากับเป็นการเพิ่มพื้นที่ผิวในการดูดซับประจุบวกได้มากขึ้น คุณสมบัติอีกประการหนึ่งของดินที่มีความสำคัญ

ต่อความสามารถในการดูดซับประจุบวกเป็นอย่างมากได้แก่ค่าความจุในการแลกเปลี่ยนไอออนบวก หรือค่า CEC ซึ่งหมายถึง ค่าปริมาณไอออนบวกแลกเปลี่ยนได้ทั้งหมดที่ดินสามารถดูดซับไว้ได้ Bucher และคณะ (61) ได้ทำการศึกษาความสัมพันธ์ของค่า Freundlich Parameters กับคุณสมบัติต่างๆของดิน ในดิน 11 ชนิดและโลหะหนัก 15 ชนิด ได้ผลสรุปประการหนึ่งว่า ค่า CEC มีผลต่อค่า K สำหรับไอออนบวก ซึ่งค่า CEC ที่สูงขึ้นมีผลให้ดินสามารถดูดซับไอออนบวกได้ดีขึ้น ปัจจัยที่ควบคุมค่า CEC ของดินนั้นมีหลายประการด้วยกัน และปริมาณอินทรีย์วัตถุก็เป็นหนึ่งในปัจจัยดังกล่าว เนื่องจากฮิวมัสในดินจะมีค่า CEC สูงมาก ดังนั้น ดินที่มีอินทรีย์วัตถุสูงย่อมมีค่า CEC สูงด้วยการเพิ่มปริมาณอินทรีย์วัตถุในดินจะช่วยเพิ่มค่า CEC ให้แก่ดินโดย ค่า CEC ของดินจะเพิ่มขึ้นประมาณ 2 มิลลิอิควิวาเลนตต่อดิน 100 กรัม เมื่อฮิวมัสในดินมีปริมาณเพิ่มขึ้นทุกๆ 1 % ดังนั้น ในดินที่มีเนื้อดินเป็นทรายและมีค่า CEC เพียง 4 มิลลิอิควิวาเลนตต่อดิน 100 กรัม การเพิ่มปริมาณอินทรีย์วัตถุ 1 % จะทำให้สามารถเพิ่มค่า CEC ของดินได้ถึงครึ่งหนึ่ง (38)

จากผลการศึกษาซึ่งพบว่า ความสามารถในการดูดซับตะกั่วมีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้นเมื่อมีปริมาณอินทรีย์วัตถุในดินเพิ่มขึ้นดังได้กล่าวข้างต้น สอดคล้องกับผลการศึกษาของนักวิจัยหลายคน อาทิ Petruzzelli และคณะ (62) พบว่า การกำจัดอินทรีย์วัตถุออกจากดินโดยใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ( $H_2O_2$ ) มีผลทำให้ดินมีความสามารถในการดูดซับตะกั่วได้ลดลง Lion และคณะ (63) ได้ทำการศึกษาการดูดซับตะกั่วและแคดเมียม ในตะกอนดินภายหลังการสกัดส่วนประกอบบางส่วนออก ผลการศึกษาพบว่า อินทรีย์วัตถุและออกไซด์ของเหล็กและแมงกานีสเป็นปัจจัยสำคัญที่ควบคุมการดูดซับตะกั่วและแคดเมียมในดินตะกอนดังกล่าว ศิโรรัตน์ (60) ได้ทำการศึกษาผลของอินทรีย์วัตถุและสารประกอบเหล็กออกไซด์ต่อการดูดซับตะกั่ว สังกะสี แคดเมียมและโครเมียม ในดินเหนียวจากจังหวัดลพบุรี จังหวัดฉะเชิงเทราและจากเหมืองในจังหวัดลำปาง พบว่า บทบาทของอินทรีย์วัตถุและสารประกอบเหล็กออกไซด์ต่อการดูดซับโลหะหนักของดินเหนียวจะให้ผลแบบผสมผสาน กล่าวคือ อินทรีย์วัตถุและสารประกอบเหล็กออกไซด์ในดินเหนียวจากจังหวัดลพบุรีและจากเหมืองในจังหวัดลำปาง จะมีบทบาทสำคัญที่ช่วยในการดูดซับโลหะหนักดังกล่าว อย่างไรก็ตาม สำหรับดินเหนียวจากจังหวัดฉะเชิงเทรากลับพบว่าอินทรีย์วัตถุและสารประกอบเหล็กออกไซด์เป็นตัวขัดขวางการดูดซับ นอกจากนี้การศึกษากการดูดซับโลหะหนักไอออนบวกชนิดอื่นๆหลายชนิดในดิน ก็พบผลการศึกษาที่สอดคล้องกัน โดย Shuman (64) พบว่า การกำจัดอินทรีย์วัตถุในดิน Davidson จากรัฐจอร์เจีย ประเทศสหรัฐอเมริกา ทำให้ความสามารถในการดูดซับสังกะสีน้อยลง การที่อินทรีย์วัตถุมีส่วนสำคัญในการดูดซับโลหะหนักหรือไอออนบวกนั้น เนื่องมาจากอินทรีย์วัตถุมีประจุลบที่เกิดขึ้นหลังการแตกตัว (Dissociation) ของสารประกอบบางกลุ่ม เช่น หมู่คาร์บอกซิลิก และหมู่ฟีนอลิก Yermiyahu, Karen และ Chen (65) ทำการศึกษาผลของปริมาณอินทรีย์วัตถุในดิน

ต่อการดูดซับ โบรอน(B) โดยใช้ปุ๋ยหมักจากฟางข้าวเป็นแหล่งอินทรีย์วัตถุที่เพิ่มเข้าไปในดิน พบว่าความสามารถในการดูดซับ โบรอนของดินจะเพิ่มขึ้นตามสัดส่วนของอินทรีย์วัตถุในดินที่เพิ่มขึ้น Elrashidi และ O'Connor (66) พบว่า ความสามารถในการดูดซับ โบรอนมีความสัมพันธ์ในทิศทางเดียวกันกับปริมาณอินทรีย์วัตถุในดิน

สำหรับค่า  $1/n$  นั้น เมื่อพิจารณาจากผลการทดลองพบว่าค่า  $1/n$  ที่ได้จากสมการการดูดซับที่ปริมาณอินทรีย์วัตถุทุกระดับมีค่าต่ำกว่า 1 เช่นเดียวกับการศึกษาผลของพีเอช ซึ่งค่า  $1/n$  ที่ต่ำกว่า 1 สามารถอธิบายได้ว่าค่าพลังงานในการดูดซับจะลดลงเมื่อพื้นที่ผิวถูกปกคลุมด้วยไอออนของโลหะหนักมากขึ้น หรืออาจกล่าวได้ว่าดินสามารถดูดซับตะกั่วได้ดีที่ระดับความเข้มข้นต่ำ สำหรับความสัมพันธ์ของค่า  $1/n$  กับปริมาณอินทรีย์วัตถุในดินนั้น พบว่า ไม่มีความสัมพันธ์กัน



## บทที่ 6

### สรุปและข้อเสนอแนะ

#### 6.1 สรุป

การศึกษาการดูดซับตะกั่วของดินซุดบางเลนในครั้งนี้ ได้ทำการศึกษาโดยทำการเก็บตัวอย่างดินชั้นบน จากอำเภอบางเลน จังหวัดนครปฐม มาทำการศึกษาคุณสมบัติทั่วไปและการดูดซับตะกั่วของดิน โดยใช้สารละลายตะกั่วสังเคราะห์ ทำการทดลองแบบ Batch Method Adsorption Study ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายตะกั่วอยู่ในช่วงความเข้มข้น 6 ระดับ ได้แก่ 0 มิลลิกรัมต่อลิตร, 282.40-361.84 มิลลิกรัมต่อลิตร, 564.80-723.68 มิลลิกรัมต่อลิตร, 847.20-1085.52 มิลลิกรัมต่อลิตร, 1129.60-1447.36 มิลลิกรัมต่อลิตร และ 1482.60-1899.66 มิลลิกรัมต่อลิตร นอกจากนั้นได้ทำการศึกษาผลของค่าพีเอชต่อความสามารถในการดูดซับตะกั่วของดิน โดยทำการศึกษาพีเอชที่ 3 ระดับคือ ที่ระดับ 6.7 (ตามธรรมชาติ) และปรับค่าพีเอชของสารละลายดินเป็น 4.5 และ 7.5 นอกจากนี้ได้ทำการศึกษาผลของปริมาณอินทรีย์วัตถุในดินต่อความสามารถในการดูดซับตะกั่วของดิน โดยทำการศึกษาที่ปริมาณอินทรีย์วัตถุร้อยละ 3 (ตามธรรมชาติ)และทำการเพิ่มปริมาณอินทรีย์วัตถุในดินอีก 2 ระดับเป็นร้อยละ 4 และร้อยละ 5 ตามลำดับ ผลการศึกษาสามารถสรุปได้ดังนี้

จากการวิเคราะห์คุณสมบัติทั่วไปของดินซุดบางเลน พบว่า ดินชั้นบนของดินซุด บางเลนที่นำมาศึกษามีลักษณะเนื้อดินเป็นดินเหนียวปนซิลต์ (Silty Clay) ปฏิกริยาของดินเป็นกลาง โดยมีค่าพีเอชประมาณ 6.7 มีปริมาณอินทรีย์วัตถุสูงปานกลางคือประมาณร้อยละ 3 มีค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวก (CEC) สูง กล่าวคือประมาณ 32.40 meq/100 g

จากการศึกษาพบว่า ดินซุดบางเลนในสภาพธรรมชาติมีความสามารถในการดูดซับตะกั่วได้สูงมาก โดยเส้น ไอโซเทอมของการดูดซับที่พบมีลักษณะเป็น ไอโซเทอมชนิดตัวเอช(H)

สมการที่สามารถนำมาอธิบายกระบวนการดูดซับที่เกิดขึ้นได้ดีที่สุดได้แก่ สมการของ Freundlich โดยพบว่า ดินที่ทำการศึกษา มีความสามารถในการดูดซับตะกั่ว(K)เฉลี่ย 5.98 และมีค่า Correction Factor (1/n)เฉลี่ย 0.60 เส้นกราฟไอโซเทอมที่พบมีลักษณะเป็นไอโซเทอมชนิดตัวเอช (H) บ่งชี้ว่า ดินมีความสามารถในการดูดซับตะกั่วได้สูงมากและการดูดซับสามารถเกิดขึ้นได้เรื่อยๆ คราบเก่าที่ระดับความเข้มข้นของตะกั่วในสารละลายดินเพิ่มขึ้น ค่า 1/n ที่น้อยกว่า 1 อธิบายได้ว่าพลังงานในการดูดซับจะลดลงเมื่อพื้นที่ผิวถูกปกคลุมด้วย ไอออนของโลหะหนักมากขึ้นและดินสามารถดูดซับตะกั่วได้ดีที่ความเข้มข้นต่ำ คุณสมบัติสำคัญของดินชุดบางเลนที่ส่งผลให้ดินสามารถดูดซับตะกั่วได้ดี ได้แก่ การที่เนื้อดินมีลักษณะเป็นดินเหนียวซึ่งอนุภาคดินเหนียวจะมีขนาดเล็กมาก มีพื้นที่ผิวจำเพาะสูงและมีประจุเป็นลบทำให้สามารถดูดซับไอออนบวกได้ดี นอกจากนี้ การที่ดินมีปริมาณอินทรีย์วัตถุในระดับสูงปานกลาง ค่าพีเอชของดินและค่า CEC ที่จัดว่าอยู่ในระดับสูงของดิน ล้วนส่งผลให้ดินมีความสามารถในการดูดซับตะกั่วซึ่งเป็นไอออนบวกได้ดีทั้งสิ้น

จากการศึกษาผลของค่าพีเอชต่อความสามารถในการดูดซับตะกั่ว อาจสรุปได้ว่า ความสามารถในการดูดซับตะกั่วของดินชุดบางเลน ซึ่งพิจารณาจากค่า K ของสมการ Freundlich นั้น มีความสัมพันธ์ในทิศทางเดียวกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (P-value < 0.001)กับค่าพีเอชของดิน โดยมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Pearson Simple Correlation Coefficient, r) เท่ากับ 0.725 ค่าสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจ ( $r^2$ ) เท่ากับ 0.525 โดยค่า K เฉลี่ยมีค่าเพิ่มขึ้นตามระดับพีเอชที่เพิ่มขึ้น โดยมีค่า 1.42, 5.98 และ 9.24 ที่ระดับพีเอช 4.5, 6.7 และ 7.5 ตามลำดับ นอกจากนี้รูปแบบของเส้นไอโซเทอมการดูดซับที่พบที่ระดับพีเอช 4.5 มีความแตกต่างไปจากที่เส้นไอโซเทอมที่พบที่ระดับพีเอชที่สูงขึ้น โดยที่พีเอช 4.5 การดูดซับมีลักษณะคล้ายไอโซเทอมชนิดตัวแอล ในขณะที่การดูดซับที่ระดับพีเอช 6.7 และ 7.5 มีลักษณะเป็นไอโซเทอมชนิดตัวเอช ซึ่งไอโซเทอมชนิดตัวแอลจะบ่งชี้ถึงความสามารถในการดูดซับของดินที่ต่ำกว่าไอโซเทอมชนิดตัวเอช สาเหตุที่ค่าพีเอชมีผลต่อการดูดซับตะกั่วของดินอาจเนื่องมาจากค่าพีเอชส่งผลต่อกระบวนการสำคัญหลายประการในดิน ได้แก่ กระบวนการแลกเปลี่ยนไอออนบวก กระบวนการ Protonation กระบวนการไฮโดรไลซิสของโลหะ เป็นต้น นอกจากนี้ ค่าพีเอชของดินยังมีผลต่อตำแหน่งการดูดซับไอออนบวกในดิน รูปแบบ (species) ของโลหะในดินและมีผลต่อประจุที่ผิวของดินอีกด้วย นอกจากนี้พบว่าค่า 1/n ที่ทุกระดับพีเอชมีค่าต่ำกว่า 1 ซึ่งอธิบายได้ว่าพลังงานในการดูดซับจะลดลงเมื่อพื้นที่ผิวถูกปกคลุมด้วยไอออนของโลหะหนักมากขึ้นและดินสามารถดูดซับตะกั่วได้ดีที่ความเข้มข้นต่ำ และพบว่าค่า 1/n มีความสัมพันธ์ในทิศทางตรงกันข้ามกับค่าพีเอช

สำหรับผลของปริมาณอินทรีย์วัตถุต่อการดูดซับตะกั่วของดินชุดบางเลนนั้น พบว่ารูปแบบการดูดซับเป็นลักษณะเส้นไฮโปเทอมชนิดตัวเอช(H) ในทุกปริมาณอินทรีย์วัตถุที่ทำการศึกษา ซึ่ง ได้แก่ ปริมาณอินทรีย์วัตถุร้อยละ 3, ร้อยละ 4 และ ร้อยละ 5 รูปแบบการดูดซับดังกล่าวจะพบในดินที่มีความสามารถในการดูดซับในระดับสูงมาก สมการการดูดซับที่สามารถนำมาอธิบายลักษณะการดูดซับที่เกิดขึ้นได้ดีที่สุด เมื่อพิจารณาจากค่า  $r^2$  ได้แก่ สมการของ Freundlich ซึ่งการดูดซับที่สามารถอธิบายได้ด้วยสมการ Freundlich จะมีลักษณะการดูดซับที่สามารถเกิดขึ้นได้เรื่อยๆ ตราบเท่าที่ความเข้มข้นของตะกั่วในสารละลายดินเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตาม การดูดซับตะกั่วของดินมีความสัมพันธ์กับการเปลี่ยนแปลงของปริมาณอินทรีย์วัตถุในดิน โดยสามารถคำนวณค่า K เฉลี่ยได้ 5.98, 8.99 และ 13.20 ที่ปริมาณอินทรีย์วัตถุร้อยละ 3, ร้อยละ 4 และร้อยละ 5 ตามลำดับ เมื่อทำการทดสอบค่าความสัมพันธ์ทางสถิติระหว่างค่า K กับปริมาณอินทรีย์วัตถุในดิน พบว่า ตัวแปรทั้งสองมีความสัมพันธ์ในทิศทางเดียวกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (P-value = 0.001) โดยมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (r) เท่ากับ 0.775 และค่าสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจ ( $r^2$ ) เท่ากับ 0.601 จากการศึกษาพบว่าเมื่อปริมาณอินทรีย์วัตถุเพิ่มขึ้น ดินจะสามารถดูดซับตะกั่วได้มากขึ้น ซึ่งสาเหตุที่ปริมาณอินทรีย์วัตถุในดินมีผลต่อความสามารถในการดูดซับตะกั่ว เนื่องจากองค์ประกอบที่เป็นสารชีวเคมีและสารฮิวมิกของอินทรีย์วัตถุทำให้อินทรีย์วัตถุมีตำแหน่งที่ไอออนโลหะสามารถเข้าไปยึดเกาะได้ นอกจากนี้อินทรีย์วัตถุ มีพื้นที่ผิวจำเพาะสูงมากและมีประจุเป็นลบ ดังนั้นการเพิ่มปริมาณอินทรีย์วัตถุให้กับดินจึงเท่ากับเป็นการเพิ่มพื้นที่ผิวในการดูดซับประจุบวกได้มากขึ้น การที่อินทรีย์วัตถุสามารถช่วยเพิ่มค่า CEC ให้กับดิน ก็เป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่ส่งผลให้ดินสามารถดูดซับตะกั่วได้ดีขึ้นอีกประการหนึ่ง สำหรับค่า  $1/n$  นั้น พบว่ามีค่าต่ำกว่า 1 ที่ปริมาณอินทรีย์วัตถุทุกระดับ อธิบายได้ว่าค่าพลังงานในการดูดซับจะลดลงเมื่อพื้นที่ผิวถูกปกคลุมด้วยไอออนของโลหะหนักมากขึ้น หรืออาจกล่าวได้ว่าดินสามารถดูดซับตะกั่วได้ดีที่ระดับความเข้มข้นต่ำ สำหรับความสัมพันธ์ของค่า  $1/n$  กับปริมาณอินทรีย์วัตถุในดินนั้น พบว่า ไม่มีความสัมพันธ์กัน

## 6.2 ข้อจำกัดในการวิจัย

1. ผลการศึกษาไฮโปเทอมของการดูดซับในครั้งนี้เป็นการศึกษาในระดับ Macro ซึ่งไม่สามารถสรุปได้แน่ชัดถึงกลไกของปฏิกิริยาการดูดซับที่เกิดขึ้นได้ ซึ่งการทราบถึงกลไกดังกล่าวควรต้องทำการศึกษาในระดับที่ละเอียดลงไป เช่น Molecular Investigation ทั้งนี้บางส่วนของตะกั่วที่หายไป โดยเฉพาะอย่างยิ่งที่ระดับพีเอชสูง อาจเกิดจากการตกตะกอน (Precipitation)

2. ในการนำเอาค่า  $K$  ไปใช้ในสมการทำนายการเคลื่อนตัวของสารมลพิษในดิน ควรประยุกต์ใช้กับเฉพาะความเข้มข้นที่อยู่ในช่วงที่ทำการศึกษา

### 6.3 ข้อเสนอแนะที่ได้จากการวิจัยครั้งนี้

1. จากการศึกษาครั้งนี้พบว่าดินชุดบางเลนมีคุณสมบัติในการดูดซับตะกั่วได้ดี อย่างไรก็ตาม พบว่าการเปลี่ยนแปลงค่าพีเอชมีผลต่อความสามารถในการดูดซับตะกั่วของดิน โดยค่าพีเอชที่ลดต่ำลงจะส่งผลให้ความสามารถในการดูดซับตะกั่วของดินลดลง ดังนั้นในพื้นที่ที่มีกิจกรรมที่อาจก่อให้เกิดการปนเปื้อนตะกั่วลงสู่ดิน ควรมีการพิจารณาติดตามตรวจสอบและควบคุมค่าพีเอชของดินให้อยู่ในระดับที่เป็นกลางอยู่เสมอเพื่อลดโอกาสเสี่ยงในการแพร่กระจายของตะกั่วลงสู่แหล่งน้ำใต้ดิน

2. จากการศึกษาพบว่าเมื่อทำการเปรียบเทียบระหว่างสมการของ Freundlich และสมการของ Langmuir โดยพิจารณาจากค่าสัมประสิทธิ์ของการตัดสิ้นใจ ( $r^2$ ) ที่สูงที่สุด สมการที่สามารถนำมาใช้อธิบายการดูดซับตะกั่วของดินได้ดีที่สุด ได้แก่ สมการของ Freundlich ดังนั้นจึงสามารถนำเอาสมการดังกล่าวไปใช้อธิบายการดูดซับตะกั่วของดินชุดบางเลนได้

### 6.4 ข้อเสนอแนะสำหรับการวิจัยครั้งต่อไป

1. จากผลการศึกษา สรุปได้ว่า ค่าพีเอชของสารละลายดินมีความสัมพันธ์ในทิศทางเดียวกันกับความสามารถในการดูดซับตะกั่วของดินชุดบางเลน อย่างไรก็ตาม ควรทำการศึกษาในสภาพพื้นที่จริงซึ่งมีสภาพแตกต่างจากการศึกษาในห้องปฏิบัติการและทดลองใช้สารเคมีชนิดอื่น เช่น ปูนขาว หินปูนบด ผงซิมেন্ট จีเถ้าลอย เป็นต้น ทั้งนี้ผลการศึกษาดังกล่าวจะเป็นประโยชน์ในการนำไปประยุกต์ใช้ในกรณีต้องการฟื้นฟูสภาพพื้นที่ที่ได้รับการปนเปื้อนจากตะกั่ว

2. ในกรณีของปริมาณอินทรีย์วัตถุ ควรทำการศึกษาเพิ่มเติมในสภาพพื้นที่จริงเช่นกัน เนื่องจากการเพิ่มปริมาณอินทรีย์วัตถุในดินนอกจากจะช่วยเพิ่มความสามารถในการดูดซับตะกั่วของดินแล้ว ยังเป็นการช่วยปรับปรุงคุณภาพของดินให้เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของพืชได้อีกด้วย ซึ่งการปลูกพืชช่วยดูดซับโลหะหนัก เป็นวิธีการฟื้นฟูสภาพพื้นที่ที่ได้รับการปนเปื้อนวิธีหนึ่งที่เหมาะสมกับประเทศที่กำลังพัฒนา เนื่องจากไม่ต้องการเทคโนโลยีขั้นสูงและใช้งบประมาณต่ำ

3. ปัจจัยที่มีผลต่อความสามารถในการดูดซับตะกั่วมีอยู่หลายประการด้วยกัน ซึ่งนอกจากคุณสมบัติของดินเองแล้ว การมีโลหะไอออนบวกชนิดอื่น (Competing Cation) ในดินอาจ

ส่งผลให้ดินสามารถดูดซับตะกั่วได้ดีขึ้นหรือน้อยลงเช่นกัน โดยในสภาพที่เป็นจริง การปนเปื้อนของตะกั่วลงสู่ดินหรือสิ่งแวดล้อมอื่นๆมักจะเป็นไปในลักษณะที่พบร่วมกับโลหะหนักชนิดอื่นๆ จึงควรมีการศึกษาถึงผลของโลหะไอออนบวกชนิดอื่นเพิ่มเติม

4. ปัจจุบันในประเทศไทยมีพื้นที่ที่จัดให้เป็นเขตอุตสาหกรรมอยู่หลายพื้นที่ด้วยกัน ซึ่งความสามารถในการดูดซับมลพิษแต่ละชนิด ของดินในแต่ละพื้นที่มีแตกต่างกันออกไปตามคุณลักษณะของดินชนิดนั้นๆ จึงควรมีการศึกษาความสามารถในการดูดซับมลพิษของดินในพื้นที่จริง ทั้งนี้ผลการศึกษาดังกล่าวอาจนำมาใช้ประกอบการพิจารณาเลือกประเภทของอุตสาหกรรมที่อนุญาตให้มีได้ในพื้นที่นั้นๆ เพื่อลดผลกระทบที่จะมีต่อคุณภาพดินและน้ำใต้ดินในพื้นที่รวมถึงชุมชนที่อยู่บริเวณใกล้เคียง



## รายการอ้างอิง

1. ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม เรื่อง หลักเกณฑ์สำหรับ โรงงานหลอมตะกั่วจากแบตเตอรี่เก่า, 2540.
2. ศุภมาส พนิชศักดิ์พัฒนา. ภาวะมลพิษของดินจากการใช้สารเคมี. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร: มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ; 2539.
3. Davies BE. Lead. In: Alloway BJ, editor. Heavy metals in soils. 2<sup>nd</sup> ed. Glasgow: Blackie Academic and Professional; 1995. P.207-23.
4. Hassett JJ, Banwart WL. Soils and their environment. Englewood Cliffs (NJ): Prentice Hall; 1992.
5. McLean JE, Bledsoe BE. Ground water issue: Behavior of metals in soils. Oklahoma: 1992.
6. Sara MN. Standard handbook for solid and hazardous waste facility assessments. Chelsea (MI): Lewis; 1994.
7. Zheng C , Bennett GD. Applied contaminant transport modeling: Theory and practice. New York: Van Nostrand Reinhold; 1995.
8. Yaron B, Calvel R, Prost R. Soil pollution : Processes and dynamics. Berlin: Springer-Verlag; 1996.
9. คณะกรรมการจัดทำปทานุกรมปฐพีวิทยา. ปทานุกรมปฐพีวิทยา. พิมพ์ครั้งที่ 1 . กรุงเทพมหานคร: มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์; 2541.
10. Wingardner DL. An introduction to soils for environmental professionals. Boca Raton (FL): CRC Press; 1995.
11. คณาจารย์ภาควิชาปฐพีวิทยา คณะเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัย เกษตรศาสตร์. ปฐพีวิทยาเบื้องต้น. พิมพ์ครั้งที่ 7. กรุงเทพมหานคร: ชวนพิมพ์; 2535.
12. เอ็ม เขียวรัตน์รมย์. การสำรวจดิน:มโนทัศน์ หลักการและเทคนิค. กรุงเทพมหานคร:มหาวิทยาลัย เกษตรศาสตร์;2542.
13. เกษมศรี ชับซ้อน. ปฐพีวิทยา. พิมพ์ครั้งที่ 2. ไบร่นูปีที่พิมพ์; 2536.
14. กองสำรวจดิน กรมพัฒนาที่ดิน. รายงานการสำรวจดินจังหวัดนครปฐมและแผนที่ดิน. กรุงเทพมหานคร: กองสำรวจดิน; 2522.

15. ไมตรี สุทธิจิตต์. สารพิษรอบตัวเรา : สาเหตุ กลไกการเกิดพิษและการป้องกัน. เชียงใหม่: คาวคอมพิวกราฟิค; 2531.
16. ศูนย์ข้อมูลคณะกรรมการประสานงาน องค์การพัฒนาเอกชนเพื่อการสาธารณสุขมูลฐาน. ตะกั่ว. กรุงเทพมหานคร: ศูนย์ข้อมูลฯ; 2535.
17. Bolt GH, Bruggenwart MGM, editors. Soil chemistry : A. basic elements. New York : Elsevier Scientific; 1978.
18. Colbourn P, Thornton I. In: Alloway BJ, editor. Heavy metals in soils. 2<sup>nd</sup> ed. Glasgow: Blackie Academic and Professional; 1995.
19. ศูนย์กะเหรี่ยงศึกษาและพัฒนา. เหมือนแร่กับมลพิษและอนาคคของ โลก. [Online] มิถุนายน 2545; [3 screens]. เข้าถึงได้จาก : [http:// www.geocities.com/klity\\_creek/lead2.htm](http://www.geocities.com/klity_creek/lead2.htm) [6 มิถุนายน 2545].
20. Langerwerff JV, Brower DL, Biersdorf GT. In: Alloway BJ, editor. Heavy metals in soils. 2<sup>nd</sup> ed. Glasgow: Blackie Academic and Professional; 1995.
21. Ragaini RC, Falston HR, Roberts GT. In: Alloway BJ, editor. Heavy metals in soils. 2<sup>nd</sup> ed. Glasgow: Blackie Academic and Professional; 1995.
22. Kobayashi J. In: Alloway BJ, editor. Heavy metals in soils. 2<sup>nd</sup> ed. Glasgow: Blackie Academic and Professional; 1995.
23. Warren HV, Delavault RE. In: Alloway BJ, editor. Heavy metals in soils. 2<sup>nd</sup> ed. Glasgow: Blackie Academic and Professional; 1995.
24. Cannon HL, Bowles JM. In: Alloway BJ, editor. Heavy metals in soils. 2<sup>nd</sup> ed. Glasgow: Blackie Academic and Professional; 1995.
25. Orlov DS. Soil chemistry. New York: A.A. Balkema; 1992.
26. Coker EG, Matthews PJ. In: Alloway BJ, editor. Heavy metals in soils. 2<sup>nd</sup> ed. Glasgow: Blackie Academic and Professional; 1995.
27. Berrow JL, Webber J. In: Alloway BJ, editor. Heavy metals in soils. 2<sup>nd</sup> ed. Glasgow: Blackie Academic and Professional; 1995.
28. Sommers LE. In: Alloway BJ, editor. Heavy metals in soils. 2<sup>nd</sup> ed. Glasgow: Blackie Academic and Professional; 1995.
29. Le Riche HH. In: Alloway BJ, editor. Heavy metals in soils. 2<sup>nd</sup> ed. Glasgow: Blackie Academic and Professional; 1995.



30. Parkpian P, Polprasert C, Eckhardt H, Tinsley R. Sewage sludge reuse in agriculture of Thailand. In: Department of Drainage and Sewerage, Bangkok Metropolitan Administration, Japan International Cooperation Agency. Sewage sludge treatment/disposal and reclaimed wastewater reuse in Bangkok; 1999 Sep 10; JW Marriot Hotel, Bangkok.
31. คณะอนุกรรมการปรับปรุงหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาเคมี ตามโครงการปรับปรุงหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิตมหาวิทยาลัยของทบวงมหาวิทยาลัย. เคมี เล่ม 2. พิมพ์ครั้งที่ 4. กรุงเทพมหานคร: อักษรเจริญทัศน์; 2535.
32. United States Environmental Protection Agency. Record of decision (ROD) abstract. [Online] 1999 Jan; [1 screen]. Available from : <http://www.epa.gov/superfund/sites/query/rods/r0493129.htm> [Accessed 1999 Aug 19].
33. United States Environmental Protection Agency. Record of decision (ROD) abstract. [Online] 1999 Jul; [3 screens]. Available from : <http://www.epa.gov/superfund/sites/rodsites/0200397.htm> [Accessed 1999 Aug 19].
34. United States Environmental Protection Agency. Record of decision (ROD) abstract. [Online] 1999 Jul; [15 screens]. Available from : <http://www.epa.gov/superfund/sites/rodsites/0200397.htm> [Accessed 1999 Aug 23].
35. United States Environmental Protection Agency. NPL site narrative at listing. [Online] 1995 Feb; [2 screens]. Available from : <http://www.epa.gov/superfund/sites/npl/nar1448.htm> [Accessed 1999 Aug 19].
36. Tan KH. Principles of soil chemistry. 2<sup>nd</sup> ed. New York: Marcel Dekker; 1993.
37. เพิ่มพูน กীরติกสิกร. เคมีของดิน. ม.ป.ท. ; 2528.
38. Sposito G. The chemistry of soils. New York: Oxford University Press; 1989.
39. Bohn HL, McNeal BL, O'Connor GA. Soil Chemistry. New York: John Wiley and Son; 1979.
40. Zehner AJB, editor. Soil and groundwater pollution: Fundamentals, risk assessment and legislation. Netherlands: Kluwer Academic; 1995.
41. Korte NE, Skopp J, Fuller WH, Nieble EE, Alesshii BA. Trace element movement in soils: Influence of soil physical and chemical properties. Soil Sci 1976; 122: 350-9.
42. Griffin RA, Shimp NF. Attenuation of pollutants in municipal landfill leachate by clay minerals. EPA-600/2-78-157. 1978.

43. Puls RW, Powell RM, Clark D, Eldred CJ. Effect of pH, solid/solution ratio, ionic strength and organic acids on Pb and Cd sorption on kaolinite. *Water, Air and Soil Pollution* 1991; 57-58: 423-30.
44. Kotuby-Amacher J, Gambrell RP, editors. Factors affecting trace metal mobility in subsurface soils. EPA/600/2-88/036.
45. Cavallaro N, McBride MB. Copper and cadmium adsorption characteristics of selected acid and calcareous soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 1978; 42: 550-6.
46. Harter RD. Adsorption of copper and lead by Ap and B2 horizons of several northeastern United States soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 1979; 43:679-83.
47. Harter RD. Competitive sorption of cobalt, copper and nickel ions by calcium saturated soil. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 1992; 56:444-9.
48. Kuo S, Baker AS. Sorption of copper, zinc and cadmium by some acid soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 1980; 44:969-74.
49. Kurdi F, Doner HE. Zinc and copper sorption and interaction in soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 1983; 47:873-6.
50. Benjamin MM, Leckie JO. Effects of complexation by Cl, SO<sub>4</sub> and S<sub>2</sub>O<sub>3</sub> on adsorption behavior of Cd on oxide surfaces. *Environ. Sci. Technol.* 1982; 16:162-70.
51. Harter RD. Effect soil pH on adsorption of lead, copper, zinc and nickel. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 1983; 47:47-51.
52. Cavallaro N, McBride MB. Activities of Cu<sup>2+</sup> and Cd<sup>2+</sup> in soil solutions as affected by pH. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 1980; 44:729-32.
53. Lindsay WL. *Chemical equilibria in soils.* New York: John Wiley and Sons; 1979.
54. Jenne EA. Control of Mn, Fe, Co, Ni, Cu and Zn concentrations in soils and water-the dominant role of hydrous manganese on iron oxides. *Adv. In Chem.* 1968; 7:337-87.
55. Essen J, El Bassam N. On the mobility of cadmium under aerobic soil conditions. *Environ. Pollut. Ser. A.* 1981; 15-31.
56. McBride MB, Blasiak JJ. Zinc and copper solubility as a function of pH in an acidic soil. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 1979; 43: 866-70.
57. Baham J, Sposito G. Proton and metal complexation by water-soluble ligands extracted from anaerobically digested sewage sludge. *J. Environ. Qual.* 1986; 15:239-44.

58. Inskeep WP, Baham J. competitive complexation of Cd(II) and Cu(II) by water-soluble organic ligands and Na-montmorillonite. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 1983; 47: 1109-15.
59. Desauziers V, Castre N, Cloirec PL. Sorption of Methylmercury by Clays and Mineral Oxides. *Environ. Tech.* 1997; 18: 1009-18.
60. ศิโรรัตน์ ศรีเกษเพ็ชร. การดูดซับสารละลายโลหะหนักด้วยดินเหนียวและดินเหนียวปรับปรุง  
วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม ] .  
กรุงเทพฯ: คณะพลังงานและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี; 2543.
61. Buchter B, Davidoff B, Amacher MC, Hinz C, Iskandar IK, Selim HM. *Soil Sci*, 1989, 148, 370-379.
62. Petruzzelli G, Guidi G, Lubrano L. In Shuman L. Effect of removal of organic matter and iron-oxides or manganese oxides on zinc adsorption by soil. *Soil Science*. 1988; 146: 248-54.
63. Lion L, Altmann RS, Leckie JO. Trace-metal adsorption characteristics of estuarine particulate matter: Evaluation of contributions of Fe/Mn oxide and organic surface coating *Environ. Sci. Technol.* 1982; 16: 660-6.
64. Shuman L. Effect of removal of organic matter and iron-oxides or manganese oxides on zinc adsorption by soil. *Soil Science*. 1988; 146: 248-54.
65. Yermiyahu U, Keren R, Chen Y. Boron sorption by soil in the presence of composted organic matter. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 1995; 59: 405-9.
66. Elrashidi MA, O'Connor GA. Boron sorption and desorption in soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 1982; 46: 27-31.



### ก.1 การตรวจวิเคราะห์เนื้อดิน (Soil Texture) และการแจกแจงเนื้อดิน (Textural Class) (Pipette Method)

#### อุปกรณ์

- Beaker ขนาด 600ml
- Cylinder ขนาด 1000 ml
- Automatic Pipette
- เครื่องชั่งไฟฟ้า
- High Speed Stirrer
- เครื่อง Centrifuge พร้อมหลอดที่ใช้กับเครื่องขนาด 100 ml
- Waterbath
- Plunger
- เครื่องเขย่าไฟฟ้าพร้อมตะแกรงร่อนขนาด 1, 0.5, 0.25 และ 0.1 มม.

(เพื่อแยกขนาดของทราย)

- นาฬิกาจับเวลา
- เทอร์โมมิเตอร์
- Stainless can
- ตะแกรงสำหรับใช้ร่อน (Sieve) ขนาด 300 mesh
- กระจกนาฬิกา
- เตาระเหย

#### สารเคมี

- ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ( $H_2O_2$ ) เข้มข้น 50 %
- สารละลายโซเดียมอะซิเตท (NaOAc) pH 5.0 เตรียมดังนี้

ชั่ง NaOAc 82 กรัม ใส่ลงใน Volumetric Flask ขนาด 1000 ml เติมน้ำกลั่น ประมาณ 500 ml คนให้ละลาย เติม glacial acetic 25 ml แล้วเติมน้ำกลั่นให้เป็น 1000 ml ปรับ pH ของสารละลายที่เตรียมให้ได้เท่ากับ 5.0 โดยใช้ glacial acetic acid

- ตัวทำให้สารละลายเกิดการแจกกระจาย (Dispersing Agent) ในที่นี้ใช้ Calgon เตรียม  
ดังนี้

ชั่ง Sodium hexametaphosphate 35.7 กรัม ใส่ใน beaker ขนาด 1000 ml เติมน้ำกลั่น  
ประมาณ 500 ml คนให้ละลาย เติมน้ำ Sodium carbonate 7.94 กรัม ลงไป คนให้ละลายเข้ากัน แล้ว  
ปรับปริมาตรให้เป็น 1000 ml ด้วยน้ำกลั่น

- Demineralized-water ผลิตจากเครื่องกรองน้ำ

### วิธีการ

ถ้าเป็นดินที่มีเกลือคาร์บอเนตและดินเค็ม ต้องกำจัดออกก่อน มิฉะนั้นจะทำให้สาร  
แขวนลอยที่จะ pipette นอนกัน (Flocculate) ทำให้ไม่สามารถแยกอนุภาคดินเหนียว (clay) ออกมา  
ได้

#### ขั้นตอนที่ 1

1. ชั่งตัวอย่างดินแห้ง (Air dry soil) ที่ผ่านตะแกรงร่อน (sieve) ขนาด 2 มม. แล้ว 10  
กรัม ลงใน centrifuge tube ขนาด 100 ml (ซึ่งเหมือนกัน 2 ชุด)
2. เติมน้ำละลาย NaOAc pH 5.0 50 ml
3. อุณหภูมิ water bath อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส นาน 30 นาที
4. นำตัวอย่างไปชั่งสมดุลย์ (Balance) แล้วนำเข้าเครื่อง Centrifuge
5. เทน้ำใสข้างบนทิ้ง
6. เติมน้ำกลั่น 50 ml อุณหภูมิ water bath อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส นาน 30 นาที
7. Centrifuge อีกครั้ง เทน้ำใสที่ได้ทิ้ง
8. ถ่ายตัวอย่างลงใน Beaker ขนาด 600 ml เพื่อปฏิบัติในขั้นตอนที่ 2 ต่อไป

กรณีตัวอย่างไม่มีเกลือคาร์บอเนตและไม่ใช่อินดินเค็ม ไม่จำเป็นต้องผ่านขั้นตอนนี้

#### ขั้นตอนที่ 2

1. เติมน้ำประมาณ 50 ml แล้วค่อยๆเติม  $H_2O_2$  ประมาณ 50 ml ลงใน beaker ดินที่มี  
ปริมาณอินทรีย์วัตถุมาก จะเกิดปฏิกิริยารุนแรง ทำให้ตัวอย่างดินล้นออกนอก beaker ได้ จึงต้องเติม

$H_2O_2$  ที่ละลายอย่างระมัดระวัง ถ้าเกิดปฏิกิริยารุนแรงสามารถลดปฏิกิริยาดังกล่าวโดยการนำ beaker ไปแช่อ่างน้ำเย็น

2. ปิด beaker ด้วยกระดาษฟิวส์
3. นำ beaker ไปตั้งบน hot plate ที่อุณหภูมิ ประมาณ 400 องศาเซลเซียส
4. สังเกตว่า  $H_2O_2$  ทำปฏิกิริยากับอินทรีย์วัตถุหมดหรือไม่ (ดูจากฟลายแอสและสีของดิน) ถ้ายังไม่หมดก็สามารถเติม  $H_2O_2$  ลงไปอีก จนไม่ปรากฏปฏิกิริยาเกิดขึ้นอีก
5. อุณหภูมิ beaker ไว้บน hot plate ที่อุณหภูมิประมาณ 100 องศาเซลเซียส ต่อไปอีก ประมาณ 1-2 เพื่อไล่  $H_2O_2$  ที่มากเกินไปออก (แต่ระวังอย่าให้แห้ง)
6. นำ beaker ชุดที่หนึ่งไปอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส นาน 24 ชม. (หรือจนน้ำหนักคงที่) แล้วนำออกจากเตาอบ เข้า desicator เมื่อเย็นลง นำไปชั่งเพื่อหาน้ำหนักดินรวม เก็บไว้ใช้คำนวณต่อไป อีกชุดหนึ่งนำไปดำเนินการในขั้นตอนที่ 3 ต่อไป

### ขั้นตอนที่ 3 ทำให้ตัวอย่างดินเกิดการแตกตัว (Dispersing the sample)

1. เติม calgon ลงไปในตัวอย่าง ตัวอย่างละ 10 ml เขย่าให้เข้ากัน ทิ้งไว้ประมาณ 24 ชม.
2. ปั่นด้วย high-speed stirrer ประมาณ 3-5 นาที

ขั้นตอนที่ 4 การแยกทรายออกจากทรายแป้งและดินเหนียว (Separating sands from silt and clay)

1. ถ่ายตัวอย่างจากขั้นตอนที่ 3 ลงในกระบอกตวงขนาด 1000 ml ผ่านกรวยกรองที่มีตะแกรงร่อนขนาด 300 mesh อนุภาคทรายแป้งและอนุภาคดินเหนียว จะผ่านลงไปใ้ในกระบอกตวง ถ้างดต่อไปด้วยน้ำกรอง (Demineralized Water) จนอนุภาคทรายแป้งและอนุภาคดินเหนียวออกจากอนุภาคทรายจนหมดปรับปริมาตรให้เป็น 1000 ml

2. ถ่ายอนุภาคทรายที่แยกได้ลงใน can ที่ทราบน้ำหนักแล้ว นำไปอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส นาน 24 ชม. หรือจนน้ำหนักคงที่แล้วชั่งหาน้ำหนัก

### ขั้นตอนที่ 5 การแยกอนุภาคดินเหนียวโดยใช้วิธีดูด

ตัวอย่างที่อยู่ในกระบอกตวงจะมีเฉพาะอนุภาคทรายแป้งและอนุภาคดินเหนียว กวนให้ทั่วด้วย plunger จับเวลาเมื่อเริ่มกวน

ใช้ automatic pipette ดูคตัวอย่างอนุภาคดินเหนียวซึ่งอยู่ในสภาพสารแขวนลอย 20 ml ใส่ลงใน can ที่ทราบน้ำหนัก นำไปอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส นาน 24 ชม. หรือจนน้ำหนักคงที่ ชั่งหาน้ำหนักอนุภาคดินเหนียว

**ขั้นตอนที่ 6 การคำนวณเปอร์เซ็นต์ของอนุภาคดินแต่ละชนิด**

**1. วิธีการคำนวณเปอร์เซ็นต์ของอนุภาคทราย**

ค่าของน้ำหนักดินแห้งที่ได้จากการนำไปอบแห้ง จากขั้นตอนที่ 2 ซึ่งกำหนดไว้ว่า จะใช้เป็นฐานในการคำนวณ

สมมติว่าดินที่ผ่านขั้นตอนที่ 2 เมื่อแห้งแล้วมีน้ำหนัก = a กรัม  
 ชั่งน้ำหนักอนุภาคทรายที่ผ่านการอบแห้ง = b กรัม  
 จะมีอนุภาคทราย =  $(100 \times b)/a$  %

**2. วิธีการคำนวณเปอร์เซ็นต์อนุภาคดินเหนียว**

นำเอาน้ำหนักของอนุภาคดินเหนียวที่ได้จากขั้นตอนที่ 5

สมมติว่าชั่งน้ำหนักอนุภาคดินเหนียวได้ = c กรัม  
 นั่นคือสารแขวนลอยดิน 20 ml มี clay หนัก = c กรัม  
 สารแขวนลอย 1000 ml มี clay =  $(100 \times c)/20$  กรัม  
 เพราะฉะนั้นดิน a กรัม มี clay =  $(100 \times c)/20$  กรัม  
 ดิน 100 กรัม จะมี clay =  $100 \times (1000c/20)$   
 =  $(5 \times 1000 c)/a$   
 เพราะฉะนั้นอนุภาคดินเหนียว =  $5000 c/a$  %

**3. วิธีการคำนวณเปอร์เซ็นต์อนุภาคทรายแป้ง**

% ทรายแป้ง =  $100 - (\text{ทราย} + \text{ดินเหนียว})$

ดังนั้น เมื่อทราบน้ำหนักทราย ทรายแป้ง ดินเหนียว ครบแล้วจะสามารถแยก textural class ได้โดยอ่านค่าจากตารางสามเหลี่ยมมาตรฐาน

### ขั้นตอนที่ 7 การแยกขนาดอนุภาคทราย (Sand Fractios)

1. ถ่ายปริมาณทรายทั้งหมดลงบนชั้นบนสุดของชุดตะแกรงร่อน
2. นำชุดตะแกรงร่อนเข้าเครื่องเขย่า เพื่อแยกอนุภาคทรายขนาดต่างๆ ออกจากกัน
3. จดบันทึกน้ำหนักทรายในแต่ละชั้นตะแกรง คำนวณหาปริมาณทรายแต่ละขนาด วิธี

เดียวกันกับคำนวณหาปริมาตรทรายทั้งหมด

### ก.2 ความหนาแน่นรวม (Core Method)

#### อุปกรณ์และเครื่องชั่ง

1. วงแหวน โลหะ พร้อมฝาปิดทั้งสองข้าง เส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 7 ซม. สูงประมาณ 4 ซม.

2. ตู้อบ (Oven)

3. เครื่องชั่ง (Balance)

#### วิธีการ

1. ตัวอย่างดินที่เก็บ โดยใช้วงแหวนโลหะและปิดฝาทั้งสองด้าน นำมาเปิดฝาทิ้งสองด้านออกและวางลงในกระป๋องเก็บความชื้น นำไปอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส จนได้น้ำหนักคงที่

2. ชั่งน้ำหนักของดิน + น้ำหนักวงแหวน + น้ำหนักกระป๋อง

3. ชั่งน้ำหนักวงแหวน + น้ำหนักกระป๋อง

4. วัดปริมาตรของวงแหวนโลหะ

#### การคำนวณ

ความหนาแน่น = น้ำหนักดินแห้ง/ปริมาตรของวงแหวนโลหะด้านใน (กรัม/ลบ.ซม.)

### ก.3 ค่ำพีเอษของคิน (Potentiometric Method)

อูบกรณั้ แคร่ืองว้คพีเอษ

วิธีวิคระห้ แคร่ว้คพีเอษในน้้ำ โดยใช้อัตราส่วคิน:น้้ำ = 1:2

ซ้ังคิน 20 กรั้ม ใส้ใน beaker เติมน้้ำกลั้น 40 ml คนให้เข้้ากั้นด้วยแ่งงแ้วเป็นระษษๆ ในซ้ัง 30 นห้ะแรค หลังจกนั้ันค้ังท้ังไว้จนครบ 1 ซ้ังโมง ใส้แ่งงแ้วคนให้เข้้ากั้นแล้วจ้ิงวัด pH ของคินด้วยแคร่ืองว้คพีเอษ

### ก.4 ค่ำการน้้าไฟฟ้้า (Potentiometric Method)

อูบกรณั้ แคร่ืองว้คการน้้าไฟฟ้้า

วิธีวิคระห้ แคร่ว้คค่ำการน้้าไฟฟ้้าของคิน โดยใช้อัตราส่วคิน:น้้ำ = 1:5

ซ้ังคิน 5 กรั้ม ใส้ใน vial ขนหค 40 ml ใส้น้้ำ 25 ml ปิดจุก เขย้้าด้วยแคร่ืองเขย้้า 1 ซม. ในกรณั้ที่ไม้มีแคร่ืองเขย้้าให้เขย้้าด้วยมือ โดยเขย้้า 4 คร้ังๆละ 1 นห้ะ ในคร้ังซ้ังโมงแรค กรองเฮษษสรละลษย แล้้วน้้าไปหหปริหมล EC ด้วยแคร่ืองว้คการน้้าไฟฟ้้า

### ก.5 ปริหมลอินทริย้่วคดู (Walkley-black modified acid-dichromate digestion)

สษรคมี

1. สษรละลษยมษตรฐษน  $K_2Cr_2O_7$ , 1.0 N
2. กรคซ้ลฟ้ริกเข้้มซ้ัน (Conc.  $H_2SO_4$ )
3. สษรละลษย Ferrous Ammonium Sulfate 0.5 N
4. O-Phosphoric acid
5. Diphenylamine indicator
6. Solid NaF

### วิธีเตรียมน้ำยาเคมี

1. Standard 1.0 N  $K_2Cr_2O_7$  solution : ละลาย  $K_2Cr_2O_7$  (A.R. grade อบที่ 105 องศาเซลเซียส 24 ชั่วโมง) 49.04 กรัม ในน้ำกลั่น แล้วทำสารละลายให้เป็น 1 ลิตร ด้วยน้ำกลั่น
2. Conc.  $H_2SO_4$  : ใช้กรด  $H_2SO_4$  (A.R. grade) ที่มีความเข้มข้นไม่ต่ำกว่า 96 %
3. Diphenylamine indicator: ชั่ง Diphenylamine 0.5 กรัม ละลายในน้ำกลั่น 20 ml แล้วเติม  $H_2SO_4$  เข้มข้น 100 ml
4. Ferrous Ammonium Sulfate Solution (FAS) 0.5 N: ละลาย  $Fe(NH_4)_2(SO_4)_2 \cdot 6H_2O$  196.1 กรัม ในน้ำกลั่น 800 ml ที่มีกรด  $H_2SO_4$  เข้มข้นอยู่ 20 ml แล้วทำให้เป็นสารละลาย 1 ลิตร ด้วยน้ำกลั่น เก็บไว้ในขวดสีน้ำตาล
5. O-phosphoric acid: ความเข้มข้นไม่น้อยกว่า 85 %
6. Solid NaF

### วิธีทำ

1. ชั่งดิน 1 กรัม ใส่ใน Erlenmeyer Flask ขนาด 250 ml เติม Standard 1.0 N  $K_2Cr_2O_7$  10 ml โดยใช้ pipette แก้ว Flask เบาๆ เพื่อให้ดินและสารละลายผสมกัน แล้วเติม Conc.  $H_2SO_4$  20 ml โดยพยายามให้กรดไหลลงข้างๆ flask ให้ระคายตัวอย่างลงไปอยู่ใน flask ให้หมด เพื่อป้องกันไม่ให้เม็ดดินเกาะติดอยู่ตามข้าง flask ให้เขย่าดินเป็นเวลาประมาณ 1 นาที ตั้งทิ้งไว้จนสารละลายเย็นเท่าอุณหภูมิห้อง
2. เติมน้ำกลั่น 100 ml แล้วจึงทิ้งไว้ให้เย็น แล้วเติม O-phosphoric acid 10 ml และ NaF 0.2 กรัม เขย่าให้เข้ากัน แล้วเติม indicator ประมาณ 30 หยด เขย่าอีกครั้งจนผสมกันดี สีของสารละลายจะเป็นสีม่วงปนน้ำเงิน (ถ้ามีสีเขียวแสดงว่ามีปริมาณอินทรีย์วัตถุมากเกินไป ต้องทำใหม่โดยชั่งตัวอย่างดินให้น้อยลง)
3. ไตเตรท mixture ด้วย FAS 0.5 solution ที่จุดยุติสีของสารละลายจะเปลี่ยนจากสีม่วงแกมน้ำเงินเป็นสีเขียวแกมน้ำเงิน
4. ทำ Blank เปรียบเทียบทุกครั้ง

### วิธีคำนวณ

$$\% \text{ organic matter (O.M.)} = 10 \times [(B-S)/B] \times [0.6716/ \text{g.soil}] \times N$$

$$\% \text{ organic carbon (O.C.)} = 10 \times [(B-S)/B] \times [0.3896/ \text{g.soil}] \times N$$

B = ปริมาณ FAS ที่ใช้ในการไตเตรท Blank

S = ปริมาณ FAS ที่ใช้ในการไตเตรท Sample

g = น้ำหนักดินที่ใช้

N = ความเข้มข้นของ  $K_2Cr_2O_7$

#### ก.6 ค่าความจุในการแลกเปลี่ยนแคตไอออน (Sodium Saturated Method)

##### สารเคมี

1. Sodium acetate (NaOAc) 1.0 N
2. Ammonium acetate ( $NH_4OAc$ )
3. Isopropyl 99%

##### วิธีวิเคราะห์

1. ชั่งดินประมาณ 4 กรัม ใส่ลงในขวดหรือหลอด centrifuge ขนาด 50 ml
2. เติม 1.0 N NaOAc 33 ml ปิดหลอดแล้วนำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่า 5 นาที แล้วจึงนำไป centrifuge จนสารละลายใสแล้วจึงเทสารละลายออก ทำซ้ำประมาณ 3 ครั้ง แล้วจึงล้างดินด้วย Isopropyl alcohol ประมาณ 3 ครั้ง โดยทำเช่นเดียวกับการเติม NaOAc
3. แทนที่ Na ที่ถูกดูดซับด้วย  $NH_4OAc$  โดยการเติม  $NH_4OAc$  ลงในดินครึ่งละ 33 ml นำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่า 5 นาที แล้วจึงนำไปแยกสารละลายส่วนใสออกด้วยการ centrifuge เทสารละลายส่วนใสลงใน volumetric flask ขนาด 100 ml ทำซ้ำ 3 ครั้ง ปรับปริมาตรด้วย  $NH_4OAc$  จากนั้นนำไปหาปริมาณของ Na ที่ถูกสกัดออกมาด้วยเครื่อง atomic absorption spectrometer



## การปรับปริมาณอินทรีย์วัตถุในดิน

ในการศึกษาผลของปริมาณอินทรีย์วัตถุต่อความสามารถในการดูดซับตะกั่วของดินนั้น จะทำการศึกษาที่ปริมาณอินทรีย์วัตถุ 3 ระดับคือ ปริมาณอินทรีย์วัตถุร้อยละ 3 (ตามสภาพธรรมชาติ) ปริมาณอินทรีย์วัตถุร้อยละ 4 และปริมาณอินทรีย์วัตถุร้อยละ 5 ในการปรับปริมาณอินทรีย์วัตถุในดินให้มีปริมาณตามที่ต้องการจะใช้ปุ๋ยพืชสดที่ผ่านการหมักแล้วซึ่งมีจำหน่ายอยู่ในท้องตลาดทั่วไป โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1. นำปุ๋ยพืชสดมาผึ่งลมให้แห้งแล้วนำไปบดให้ละเอียด
2. ทำการวิเคราะห์หาปริมาณอินทรีย์วัตถุในปุ๋ยพืชสด โดยใช้วิธีของ Walkley-black modified acid-dichromate digestion
3. ทำการคำนวณหาอัตราส่วนของการผสมปุ๋ยพืชสดและดินอย่างคร่าวๆเพื่อให้ได้ปริมาณอินทรีย์วัตถุในส่วนผสมของดินและปุ๋ยพืชสดตามที่ต้องการกล่าวคือ ร้อยละ 4 และร้อยละ 5
4. ผสมดินและปุ๋ยพืชสดในอัตราส่วนตามที่คำนวณได้ คลุกเคล้าให้ผสมเป็นเนื้อเดียวกันแล้วนำส่วนผสมดังกล่าวไปทำการวิเคราะห์หาปริมาณอินทรีย์วัตถุ หากยังไม่ได้ปริมาณตามที่ต้องการทำการปรับอัตราส่วนผสม ไปเรื่อยๆและทำการวิเคราะห์หาปริมาณอินทรีย์วัตถุใหม่จนกว่าจะได้ปริมาณในระดับที่ต้องการ
5. เตรียมส่วนผสมของดินกับปุ๋ยพืชสดตามอัตราส่วนที่ได้จากการทดลองในข้อ 4 ในปริมาณมากเพียงพอที่จะนำไปศึกษาการดูดซับตะกั่ว แล้วคลุกเคล้าให้ส่วนผสมเป็นเนื้อเดียวกันและนำไปใช้ในการศึกษาการดูดซับตะกั่วต่อไป



**ตารางที่ ค-1 ผลการทดลองการดูดซับตะกั่วของดินหุคบางเลนที่ระดับที่เอช 4.5 (ซ้ำที่ 1)**

ความเข้มข้นของตะกั่วใน สารละลายเริ่มต้น, (มก./ล.)	ความเข้มข้นของตะกั่วในสารละลาย ที่สภาพสมดุล(C <sub>o</sub> ) , (มก./ล.)	ปริมาณตะกั่วที่ถูกดูดซับ (Q <sub>o</sub> ) , (มก./ก.)
0	0	0
361.84	4.764	3.81
723.68	16.11	7.55
1,085.52	25.38	11.31
1,447.36	35.37	15.08
1,899.66	59.57	19.65

**ตารางที่ ค-2 ผลการทดลองการดูดซับตะกั่วของดินหุคบางเลนที่ระดับที่เอช 4.5 (ซ้ำที่ 2)**

ความเข้มข้นของตะกั่วใน สารละลายเริ่มต้น, (มก./ล.)	ความเข้มข้นของตะกั่วในสารละลาย ที่สภาพสมดุล(C <sub>o</sub> ) , (มก./ล.)	ปริมาณตะกั่วที่ถูกดูดซับ (Q <sub>o</sub> ) , (มก./ก.)
0	0	0
361.84	4.183	3.82
723.68	14.08	7.58
1,085.52	25.77	11.31
1,447.36	33.83	15.08
1,899.66	53.63	19.72

**ตารางที่ ก-3 ผลการทดลองการดูดซับตะกั่วของดินหุคบางเลนที่ระดับพีเอช 4.5 (ซ้ำที่ 3)**

ความเข้มข้นของตะกั่วใน สารละลายเริ่มต้น, (มก./ล.)	ความเข้มข้นของตะกั่วในสารละลาย ที่สภาพสมดุล(C <sub>e</sub> ), (มก./ล.)	ปริมาณตะกั่วที่ถูกดูดซับ (Q <sub>e</sub> ), (มก./ก.)
0	0	0
361.84	4.69	3.81
723.68	15.15	7.56
1,085.52	32.48	11.23
1,447.36	39.37	15.03
1,899.66	75.62	19.46

**ตารางที่ ก-4 ผลการทดลองการดูดซับตะกั่วของดินหุคบางเลนที่ระดับพีเอช 6.7 (ซ้ำที่ 1)**

ความเข้มข้นของตะกั่วใน สารละลายเริ่มต้น, (มก./ล.)	ความเข้มข้นของตะกั่วในสารละลาย ที่สภาพสมดุล(C <sub>e</sub> ), (มก./ล.)	ปริมาณตะกั่วที่ถูกดูดซับ (Q <sub>e</sub> ), (มก./ก.)
0	0	0
282.40	0.342	3.01
564.80	0.915	6.02
847.20	1.996	9.03
1,129.60	3.563	12.02
1,482.60	5.061	15.78

**ตารางที่ ก-5 ผลการทดลองการดูดซับตะกั่วของดินหุคบางเลนที่ระดับที่เอช 6.7 (ซ้ำที่ 2)**

ความเข้มข้นของตะกั่วใน สารละลายเริ่มต้น, (มก./ล.)	ความเข้มข้นของตะกั่วในสารละลาย ที่สภาพสมดุล( $C_e$ ), (มก./ล.)	ปริมาณตะกั่วที่ถูกดูดซับ ( $Q_e$ ), (มก./ก.)
0	0	0
282.40	0.324	3.01
564.80	0.929	6.02
847.20	1.589	9.03
1,129.60	3.056	12.01
1,482.60	5.004	15.76

**ตารางที่ ก-6 ผลการทดลองการดูดซับตะกั่วของดินหุคบางเลนที่ระดับที่เอช 6.7 (ซ้ำที่ 3)**

ความเข้มข้นของตะกั่วใน สารละลายเริ่มต้น, (มก./ล.)	ความเข้มข้นของตะกั่วในสารละลาย ที่สภาพสมดุล( $C_e$ ), (มก./ล.)	ปริมาณตะกั่วที่ถูกดูดซับ ( $Q_e$ ), (มก./ก.)
0	0	0
282.40	0.365	3.01
564.80	0.901	6.02
847.20	2.097	9.01
1,129.60	3.896	12.02
1,482.60	5.133	15.77

**ตารางที่ ค-7 ผลการทดลองการดูดซับตะกั่วของดินหุคบางเลนที่ระดับพีเอช 7.5 (ซ้ำที่ 1)**

ความเข้มข้นของตะกั่วใน สารละลายเริ่มต้น, (มก./ล.)	ความเข้มข้นของตะกั่วในสารละลาย ที่สภาพสมดุล(C <sub>e</sub> ), (มก./ล.)	ปริมาณตะกั่วที่ถูกดูดซับ (Q <sub>e</sub> ), (มก./ก.)
0	0	0
282.40	0.184	3.01
564.80	0.334	6.02
847.20	1.014	9.03
1,129.60	1.74	12.04
1,482.60	2.457	15.81

**ตารางที่ ค-8 ผลการทดลองการดูดซับตะกั่วของดินหุคบางเลนที่ระดับพีเอช 7.5 (ซ้ำที่ 2)**

ความเข้มข้นของตะกั่วใน สารละลายเริ่มต้น, (มก./ล.)	ความเข้มข้นของตะกั่วในสารละลาย ที่สภาพสมดุล(C <sub>e</sub> ), (มก./ล.)	ปริมาณตะกั่วที่ถูกดูดซับ (Q <sub>e</sub> ), (มก./ก.)
0	0	0
282.40	0.179	3.01
564.80	0.332	6.02
847.20	1.173	9.03
1,129.60	2.639	12.03
1,482.60	1.687	15.80

**ตารางที่ ค-9 ผลการทดลองการดูดซับตะกั่วของดินหุคบางเลนที่ระดับที่เอช 7.5 (ซ้ำที่ 3)**

ความเข้มข้นของตะกั่วใน สารละลายเริ่มต้น, (มก./ล.)	ความเข้มข้นของตะกั่วในสารละลาย ที่สภาพสมดุล( $C_e$ ), (มก./ล.)	ปริมาณตะกั่วที่ถูกดูดซับ ( $Q_e$ ), (มก./ก.)
0	0	0
282.40	0.181	3.01
564.80	0.338	6.03
847.20	0.808	9.04
1,129.60	1.809	12.03
1,482.60	2.349	15.79

**ตารางที่ ค-10 ผลการทดลองการดูดซับตะกั่วของดินหุคบางเลนที่ปริมาณอินทรีย์วัตถุร้อยละ 3 (ซ้ำที่ 1)**

ความเข้มข้นของตะกั่วใน สารละลายเริ่มต้น, (มก./ล.)	ความเข้มข้นของตะกั่วในสารละลาย ที่สภาพสมดุล( $C_e$ ), (มก./ล.)	ปริมาณตะกั่วที่ถูกดูดซับ ( $Q_e$ ), (มก./ก.)
0	0	0
282.40	0.342	3.01
564.80	0.915	6.02
847.20	1.996	9.03
1,129.60	3.563	12.02
1,482.60	5.061	15.78

**ตารางที่ ค-11 ผลการทดลองการดูดซับตะกั่วของดินหุคบางเลนที่ปริมาณอินทรีย์วัตถุร้อยละ 3 (ซ้ำที่ 2)**

ความเข้มข้นของตะกั่วใน สารละลายเริ่มต้น, (มก./ล.)	ความเข้มข้นของตะกั่วในสารละลาย ที่สภาพสมดุล( $C_e$ ), (มก./ล.)	ปริมาณตะกั่วที่ถูกดูดซับ ( $Q_e$ ), (มก./ก.)
0	0	0
282.40	0.324	3.01
564.80	0.929	6.02
847.20	1.589	9.03
1,129.60	3.056	12.01
1,482.60	5.004	15.76

**ตารางที่ ค-12 ผลการทดลองการดูดซับตะกั่วของดินหุคบางเลนที่ปริมาณอินทรีย์วัตถุร้อยละ 3 (ซ้ำที่ 3)**

ความเข้มข้นของตะกั่วใน สารละลายเริ่มต้น, (มก./ล.)	ความเข้มข้นของตะกั่วในสารละลาย ที่สภาพสมดุล( $C_e$ ), (มก./ล.)	ปริมาณตะกั่วที่ถูกดูดซับ ( $Q_e$ ), (มก./ก.)
0	0	0
282.40	0.365	3.01
564.80	0.901	6.02
847.20	2.097	9.01
1,129.60	3.896	12.02
1,482.60	5.133	15.77



**ตารางที่ ค-15 ผลการทดลองการดูดซับตะกั่วของดินหุคบางเลนที่ปริมาณอินทรีย์วัตถุร้อยละ 4 (ซ้ำที่ 3)**

ความเข้มข้นของตะกั่วใน สารละลายเริ่มต้น, (มก./ล.)	ความเข้มข้นของตะกั่วในสารละลาย ที่สภาพสมดุล(C <sub>e</sub> ), (มก./ล.)	ปริมาณตะกั่วที่ถูกดูดซับ (Q <sub>e</sub> ), (มก./ก.)
0	0	0
319.50	0.152	3.41
639.00	0.475	6.81
958.50	2.153	10.21
1,278.00	4.096	13.60
1,677.38	9.249	17.80

**ตารางที่ ค-16 ผลการทดลองการดูดซับตะกั่วของดินหุคบางเลนที่ปริมาณอินทรีย์วัตถุร้อยละ 5 (ซ้ำที่ 1)**

ความเข้มข้นของตะกั่วใน สารละลายเริ่มต้น, (มก./ล.)	ความเข้มข้นของตะกั่วในสารละลาย ที่สภาพสมดุล(C <sub>e</sub> ), (มก./ล.)	ปริมาณตะกั่วที่ถูกดูดซับ (Q <sub>e</sub> ), (มก./ก.)
0	0.002	0
319.50	0.16	3.41
639.00	0.378	6.82
958.50	0.69	10.23
1,278.00	0.741	13.63
1,677.38	1.874	17.89

ตารางที่ ค-17 ผลการทดลองการดูดซับตะกั่วของดินหุคบางเลนที่ปริมาณอินทรีย์วัตถุร้อยละ 5  
(ซ้ำที่ 2)

ความเข้มข้นของตะกั่วใน สารละลายเริ่มต้น, (มก./ล.)	ความเข้มข้นของตะกั่วในสารละลาย ที่สภาพสมดุล( $C_e$ ), (มก./ล.)	ปริมาณตะกั่วที่ถูกดูดซับ ( $Q_e$ ), (มก./ก.)
0	0.002	0
319.50	0.107	3.41
639.00	0.345	6.82
958.50	0.732	10.22
1,278.00	0.799	13.64
1,677.38	1.964	17.89

ตารางที่ ค-18 ผลการทดลองการดูดซับตะกั่วของดินหุคบางเลนที่ปริมาณอินทรีย์วัตถุร้อยละ 5  
(ซ้ำที่ 3)

ความเข้มข้นของตะกั่วใน สารละลายเริ่มต้น, (มก./ล.)	ความเข้มข้นของตะกั่วในสารละลาย ที่สภาพสมดุล( $C_e$ ), (มก./ล.)	ปริมาณตะกั่วที่ถูกดูดซับ ( $Q_e$ ), (มก./ก.)
0	0.002	0
319.50	0.12	3.41
639.00	0.37	6.82
958.50	0.701	10.22
1,278.00	0.745	13.64
1,677.38	1.89	17.89



ตารางที่ ง-1 สมการ Freundlich และ สมการ Langmuir ที่แต่ละระดับพีเอช

ค่าพีเอช	Freundlich		Langmuir	
	สมการ	R <sup>2</sup>	สมการ	R <sup>2</sup>
พีเอช 4.5 (ซ้ำที่ 1)	Y=0.6675x+0.114	0.9906	Y=0.0288x+1.3874	0.8893
พีเอช 4.5 (ซ้ำที่ 2)	Y=0.6496x+0.1608	0.9925	Y=0.0299x+1.538	0.8668
พีเอช 4.5 (ซ้ำที่ 3)	Y=0.5973x+0.1785	0.9896	Y=0.0351x+1.3531	0.9282
พีเอช 6.7 (ซ้ำที่ 1)	Y=0.595x+0.7733	0.9947	Y=0.045x+0.1138	0.9534
พีเอช 6.7 (ซ้ำที่ 2)	Y=0.605x+0.7937	0.9924	Y=0.0441x+0.1058	0.9826
พีเอช 6.7 (ซ้ำที่ 3)	Y=0.5921x+0.7632	0.9881	Y=0.046x+0.1167	0.941
พีเอช 7.5 (ซ้ำที่ 1)	Y=0.5776x+0.9652	0.9601	Y=0.0466x+0.0524	0.9334
พีเอช 7.5 (ซ้ำที่ 2)	Y=0.5355x+0.9531	0.878	Y=0.062x+0.0396	0.884
พีเอช 7.5 (ซ้ำที่ 3)	Y=0.5821x+0.9778	0.957	Y=0.0475x+0.0488	0.9452

หมายเหตุ :

สมการ Freundlich : Y = Log Q<sub>e</sub>

X = Log C<sub>e</sub>

สมการ Langmuir : Y = C<sub>e</sub>/Q<sub>e</sub>

X = C<sub>e</sub>

ตารางที่ ๑-2 สมการ Freundlich และ สมการ Langmuir ที่ปริมาณอินทรีย์วัตถุระดับต่างๆ

ปริมาณอินทรีย์วัตถุ	Freundlich		Langmuir	
	สมการ	R <sup>2</sup>	สมการ	R <sup>2</sup>
ปริมาณอินทรีย์วัตถุ ร้อยละ 3 (ซ้ำที่ 1)	Y= 0.595x+0.7733	0.9947	Y=0.045x+0.1138	0.9534
ปริมาณอินทรีย์วัตถุ ร้อยละ 3 (ซ้ำที่ 2)	Y=0.605x+0.7937	0.9924	Y=0.0441x+0.1058	0.9826
ปริมาณอินทรีย์วัตถุ ร้อยละ 3 (ซ้ำที่ 3)	Y=0.5921x+0.7632	0.9881	Y=0.046x+0.1167	0.941
ปริมาณอินทรีย์วัตถุ ร้อยละ 4 (ซ้ำที่ 1)	Y=0.4228x+0.9758	0.995	Y=0.0491x+0.0419	0.9838
ปริมาณอินทรีย์วัตถุ ร้อยละ 4 (ซ้ำที่ 2)	Y=0.4167x+0.9874	0.9904	Y=0.0496x+0.041	0.9321
ปริมาณอินทรีย์วัตถุ ร้อยละ 4 (ซ้ำที่ 3)	Y=0.3858x+0.8924	0.9789	Y=0.0514x+0.0634	0.9765
ปริมาณอินทรีย์วัตถุ ร้อยละ 5 (ซ้ำที่ 1)	Y=0.6955x+1.1247	0.9514	Y=0.336x+0.04	0.9327
ปริมาณอินทรีย์วัตถุ ร้อยละ 5 (ซ้ำที่ 2)	Y=0.5883x+1.1141	0.9746	Y=0.0398x+0.033	0.9476
ปริมาณอินทรีย์วัตถุ ร้อยละ 5 (ซ้ำที่ 3)	Y=0.6254x+1.1225	0.9647	Y=0.0376x+0.0349	0.9385

หมายเหตุ :

สมการ Freundlich :

$$Y = \text{Log } Q_e$$

$$X = \text{Log } C_e$$

สมการ Langmuir :

$$Y = C_e/Q_e$$

$$X = C_e$$





ภาพถ่ายที่ จ-1 การเก็บตัวอย่างดิน



ภาพถ่ายที่ จ-2 ขั้นตอนการนำตัวอย่างดินมาผึ่งลมให้แห้ง



ภาพถ่ายที่ จ-3 เครื่อง Mechanical Sieve



ภาพถ่ายที่ จ-4 ตัวอย่างดินหลังผ่านการแยกด้วยตะแกรงขนาด mesh 2 มม.



ภาพถ่ายที่ จ-5 Orbital Shaker



ภาพถ่ายที่ จ-6 เครื่อง Centrifuge



ภาพถ่ายที่ ๑-7 สารละลายดินก่อนและหลังผ่านการ Centrifuge

## ประวัติผู้วิจัย

ชื่อ	นางสาว วาสิฏฐิ์ อุดชาชน
วัน เดือน ปีเกิด	27 พฤศจิกายน 2513
สถานที่เกิด	จังหวัดอุรธานี
ประวัติการศึกษา	มหาวิทยาลัย ธรรมศาสตร์ พ.ศ. 2531-2535 วิทยาศาสตรบัณฑิต (วิทยาศาสตรสิ่งแวดลอม) มหาวิทยาลัยมหิดล พ.ศ. 2540-2545 วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (เทคโนโลยีสิ่งแวดลอม)
ตำแหน่งและสถานที่ทำงานปัจจุบัน	นักวิชาการสิ่งแวดลอมอาวุโส บริษัท อีอาร์เอ็ม สยาม จำกัด
ที่อยู่ปัจจุบัน	26/158 ซอยพหลโยธิน 48 ถนนพหลโยธิน แขวงอนุสาวรีย์ เขตบางเขน กรุงเทพมหานคร โทร. 02-5216681

## EXECUTIVE SUMMARY

### Introduction

Lead is a highly toxic substance to environment and can accumulate in soils for a long time and hardly decomposed by microorganism. Lead contamination to soil can be generated from several activities eg, industry, mining, lead smelting factory, oils combustion, use of chemicals in agricultural, recycles of industrial and domestic wastes etc. One of the major sources of lead contamination in Thailand is a lead smelting factory. It was found that some of lead smelting factories are located in the improper locations according to the Notification of Ministry of Industry Regarding Criteria for a Secondary Lead Smelting Factory. As a consequence, impact on environment quality and human health could be generated. Therefore a particular monitoring should be undertaken in order to investigate such impacts.

Study of lead adsorption into soils plays an important role due to ratio between lead in soil solution and lead adsorped at soils surface is an important factor in controlling of its movement and availability in soils. Lead adsorption capacity of soils can be achieved by undertaking lead adsorption capacity. Generally, downward transportation of metals does not occur to any great extent unless the metal reaction capacity of the soils is overloaded. Downward transportation of metals could generate groundwater contamination and increase a risk to impact human health. Soils heavy metal adsorption study also play an important rules in site assessment, remediation of metals contaminated area and prediction of metal distribution in soil and groundwater using mathematics model.

This study focus on area located adjacent to a secondary lead smelting factory, which have a high potential to be contaminated by lead. Banglen series soils found in Amphoe Banglen, Nakorn Pathom province were choosing due to several reasons, eg one of a secondary lead smelting factory located in the area, most of the areas are used for agricultural purposes, a shallow ground water level was reported and some part of the areas use groundwater for domestic purposes.

Adsorption of Lead (Pb) by Banglen Series Soils including the influence of pH and organic matter on lead adsorption was investigated in this study.

## Methodology

In this study an Experimental Research Design had been undertaken at the Sanitary Engineering Laboratory, Department of Public Health, Mahidol University. Soil samples used in the study were top soils taken from Amphoe Banglen in Nakornpathom province. Sampling locations were designed to be in the areas where are located away from lead generated sources. Soils samples used would have lead concentration between 12.6 to 44 ppm, of which are found in general non-contaminated top soils.

Number of a soil sampling location was 3 in total. Soil samples were taken to the laboratory and being prepared to be ready for the study. The soil samples were pass a screening processes, of which undesirable materials eg rock, debris etc. were separated before being air-dried. Each of air-dried soil sample was then sieved in a 2 mm mesh sieve prior to be mixed as one composite sample and stored for use.

Prior to a lead adsorption study, soil physical and chemical characteristics were analyzed. Parameters being analyzed include particle size analysis, bulk density, pH, organic matter content, cation exchange capacity (CEC), electrical conductivity (EC), and total lead (Pb) concentration. Batch Method Adsorption study was employed in the study. For the study of lead adsorption of original soils, five grams of air-dried soil was mix with 50 ml of lead solution ( $PbCl_2$  in 0.01 M  $CaCl_2$ ). Six ranges of initial lead concentration used in the study were 0 mg/l, 282.40-361.84 mg/l, 564.80-723.68 mg/l, 847.20-1085.52 mg/l, 1129.60-1447.36 mg/l and 1482.60-1899.66 mg/l. Soil solution pH were adjusted to be 6.7 using 0.1 M NaOH or 0.1 M HCl. The mixtures of soil samples and lead solution were allowed to equilibrate on a shaker for 24 hr, after which time they were centrifuged to clarify the solution. The solution were then filtered and analyzed for lead remaining in solution by atomic absorption spectrophotometry. The difference between lead added and lead remaining in solution (Equilibrium Concentration,  $C_e$ ), was assumed

to be adsorbed. Adsorption Isotherm were developed by plotting a graph of the amount of lead adsorbed ( $Q_e$ , mg/g) against equilibrium concentration of lead ( $C_e$ , mg/l). The linearized form of Freundlich and Langmuir equation were plot in order to find the best fit equation. Adsorption constants, eg K and  $1/n$ , derived from the best fit equation were used to described lead adsorption by soils.

In addition to the pH 6.7 of the original soils, in the study of effect of pH on lead adsorption, pH of the mixtures of soil samples and lead solution were adjusted to be 4.5 and 7.5,

The study of effect of organic matter on lead adsorption were undertaken using soil samples contain organic matter 3% (original), 4 % (adjusted) and 5% (adjusted). Soil organic matter content were adjusted by using a composted fertilizer. Correlation between adsorption constant and pH and organic matter were analyzed using Pearson Simple Correlation.

## Results and Discussion

The results indicated that Banglen Series Soils could be identified as Silty Clay soils. Soil reaction was considered medium according to its pH of 6.7. Organic content was moderately high (3%) and CEC was 32.40 meq/100 g, which is considered very high. Lead concentration in the soil samples was not detectable.

A lead adsorption study of an original soil indicated that the soils has a very high potential for adsorption of lead. The adsorption isotherm curve could be classified as "H" type. Average K was 5.98 and average  $1/n$  was 0.60. Freundlich was the best fit equation for lead adsorption of an original soil. The curve, according to Freundlich's equation exhibits that there is no single point indicator for completion of the process.  $1/n$  which is less than 1 indicated that adsorption energy decrease with an increase of surface coverage. It also indicated that soil has a high potential to adsorb lead at a low concentration. There are many characteristics of Banglen series soil, which promote lead adsorption capacity of the soil eg, its high content of clay particle, medium organic matter content, high pH and high CEC.

The study of pH effect on lead adsorption showed a significant direct relation ( $P$ -value < 0.001) between soil solution pH and  $K$  value that the higher the pH level the greater the adsorption capacity ( $K$ ). Pearson Simple Correlation Coefficient ( $r$ ) of the study is equal to 0.725 and Coefficient of Determination ( $r^2$ ) is equal to 0.525. Freundlich was the best fit equation for lead adsorption of all the pH of interest.  $K$  value at pH 4.5, 6.7 and 7.5 were 1.42, 5.98 and 9.24, respectively. The results also indicated a low significant reverse relation between pH level and  $1/n$ . It was found that  $1/n$  value at pH 4.5, 6.7 and 7.5 were 0.64, 0.60 and 0.57, respectively. The adsorption isotherm curve at pH 4.5 was considered to be similar to the "L" type and at pH 6.7 and 7.5 was considered to be "H" type. The "L" type isotherm indicated a lower adsorption capacity comparing to the "H" type isotherm. The pH affects lead adsorption capacity of soils due to it has influence on several mechanisms in soils eg cation exchange, protonation, hydrolysis of metal etc. The pH also affects cation adsorption site of soil particles, metal species and type of charge at soil surface.  $1/n$  which is less than 1 indicated that adsorption energy decrease with an increase of surface coverage and soil has a high potential to adsorb lead at a low concentration.

Results from the study of organic matter influence indicated a significant direct relation ( $P$ -value = 0.001) between soil organic matter and  $K$  value. Pearson Simple Correlation Coefficient ( $r$ ) of the study is equal to 0.775 and Coefficient of Determination ( $r^2$ ) is equal to 0.601. However, it was not found a relation between organic matter and  $1/n$ . Adsorption Isotherms found could be identified as "H" type in all organic matter experiments. This type of adsorption isotherm indicated a very high potential for lead adsorption. Freundlich was the best fit equation for lead adsorption of all the organic matter level studied. The curve, according to Freundlich's equation exhibits that there is no single point indicator for completion of the process. However, it was found that the higher organic matter content, the higher slope or adsorption capacity.  $K$  value at organic matter 3%, 4% and 5% were 5.98, 8.99 and 13.20, respectively.  $1/n$  value at organic matter 3%, 4% and 5% were 0.60, 0.41 and 0.64, respectively. Due to organic matter has very high specific areas and has negative charge surfaces, increase of organic matter content therefore provided to soils a great additional positive charge adsorption sites. Increase of organic matter can also increase CEC which consequently raise lead adsorption capacity of soils.

$1/n$  which is less than 1 indicated that adsorption energy decrease with an increase of surface coverage and soil has a high potential to adsorb lead at a low concentration.

## Conclusion

The results indicated that Banglen Series Soils could be identified as Silty Clay soils. Soil reaction was considered medium according to its pH of 6.7. Organic content was moderately high (3%) and CEC was 32.40 meq/100 g, which is considered very high.

It was found that Freundlich was the best fit equation for all the experiments. The curve, according to Freundlich's equation exhibits that there is no single point indicator for completion of the process. A lead adsorption study of an original soil indicated that the soils has a very high potential for adsorption of lead. The adsorption isotherm curve could be classified as "H" type. Average K was 5.98 and average  $1/n$  was 0.60. The study of pH effect on lead adsorption showed a significant direct relation between soil solution pH and K value that the higher the pH level the greater the adsorption capacity (K). The results also indicated a low significant reverse relation between pH level and  $1/n$ . The adsorption isotherm curve at pH 4.5 was considered to be similar to the "L" type and at pH 6.7 and 7.5 was considered to be "H" type. Results from the study of organic matter influence indicated a significant direct relation between soil organic matter and K value. However, it was not found a relation between organic matter and  $1/n$ . Adsorption Isotherms found could be identified as "H" type in all organic matter experiments, however it was found that the higher organic matter content, the higher slope or adsorption capacity.

## Limitation

1. Adsorption isotherms are purely descriptions of macroscopic data and do not definitively prove a reaction mechanism. Mechanism must be gleaned from molecular investigation.



2. Application of the derived K values in transport model should be applied to only the concentration of interested which are fall between the concentration range covered in the study

### **Recommendation**

1. Although, results from the study showed that Banglen Series soils has a very high potential for the adsorption of lead, the monitoring and control measures relating to soil pH should be provided to the areas that have a high risk to be contaminated by lead. Due to soil capacity to adsorbed lead can be reduced by decrease of soil pH, a medium soil pH level should be maintained to minimize a risk of groundwater contamination

2. According to results of the study, the best fit adsorption equation which can be used to describe lead adsorption of Banglen Series soils is the Freunlich Isotherm equation.

3. An on-site study of pH effect on lead adsorption should be undertaken by using others applicable chemicals eg lime, crushed limestone, cement powder, fly ash etc.

4. An on-site study of organic matter effect on lead adsorption should be undertaken.

5. Effect of competing cation on lead adsorption should be studied.

6. The on-site studies of soil adsorption capacity for a various types of pollutant were recommended to be undertaken in the potential industrial areas. Results from the studies could be used in selection of type of industry allowed to operate in order to minimize a potential impact on soil and ground water in surrounding communities.