

พฤติกรรมการดูแลรักษาและการเคลื่อนที่ของอาร์เซนในชั้นน้ำใต้ดิน



นางสาวธนัชพร อยู่ยั้งยืน

สถาบันวิทยบริการ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม


คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2547

ISBN 974-17-6083-3

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

SORPTION AND TRANSPORT BEHAVIOR OF ARSENATE IN THE AQUIFER



Miss Tanatchaporn Yooyangyuen

สถาบันวิทยบริการ

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of Master of Engineering in Environmental Engineering

Department of Environmental Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2004

ISBN 974-17-6083-3

ตัวชี้วัดวิทยานิพนธ์	พฤติกรรมการดูแลรักษาและการเคลื่อนที่ของอาร์เซนไนต์ในชั้นน้ำใต้ดิน
โดย	นางสาวธนัชพร อยู่ยั้งยืน
ภาควิชา	วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
อาจารย์ที่ปรึกษา	อาจารย์ ดร. เขมรัฐ โอสถาปนิก
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุธา ขาวเขียว

---

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยรับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์  
(ศาสตราจารย์ ดร. ดิเรก ลาวัญศิริ)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ วงศ์พันธ์ ลิ้มปเสนีย์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษา  
(อาจารย์ ดร. เขมรัฐ โอสถาปนิก)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุธา ขาวเขียว)

..... กรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร. ฐเรศ ศรีสถิตย์)

..... กรรมการ  
(อาจารย์ ดร. มนัสกร ราชากรกิจ)

อภินันท์พร อยู่ยั้งยืน : พฤติกรรมการดูดติดผิวและการเคลื่อนที่ของอาร์เซนเตในชั้นน้ำใต้ดิน.  
(SORPTION AND TRANSPORT BEHAVIOR OF ARSENATE IN THE AQUIFER) อ. ที่ปรึกษา :  
อ.ดร.เขมรัฐ โอสถาพันธุ์, อ.ที่ปรึกษาร่วม : ผศ.ดร.สุภา ขาวเขียว , 183 หน้า. ISBN 974-17-6083-3.

การวิจัยครั้งนี้เป็นการศึกษาความสามารถในการดูดติดผิวของอาร์เซนเตบนดินธรรมชาติในประเทศไทย ความสามารถในการเคลื่อนที่ของอาร์เซนเตในชั้นน้ำใต้ดิน และศึกษาผลของอิออนลบที่มีต่อการดูดติดผิวและการคายตัวอาร์เซนเต ตัวอย่างดิน 3 ชนิด คือ ดินร่วนเหนียวปนทราย ดินร่วนเหนียว และดินทรายปนร่วน ในการทดลองแบบแบตช์ ศึกษาประสิทธิภาพและความสามารถในการดูดติดผิวของดินแต่ละชนิดที่สภาวะพีเอชเริ่มต้น 4 7 และ 10 ศึกษาผลของอิออนลบ 2 ชนิดที่พบได้มากในน้ำใต้ดิน คือฟอสเฟตและไบคาร์บอเนต ที่มีต่อการดูดติดผิวของอาร์เซนเต ส่วนการทดลองแบบคอลัมน์ศึกษาถึงการป้อนสารตามรอยเข้าสู่คอลัมน์เพื่อคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การกระจายตัว ศึกษาการเคลื่อนที่ของอาร์เซนเตในดินทั้งในภาวะมีและไม่มีอิออนลบและเปรียบเทียบกับค่าประมาณจากโปรแกรมคอมพิวเตอร์

การทดลองแบบแบตช์ พบว่าปริมาณอาร์เซนเตที่ถูกดูดติดผิวมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณดินแต่ความสามารถในการดูดติดผิวเทียบกับน้ำหนักดินมีค่าลดลง และพีเอชเป็นปัจจัยที่มีผลต่อการดูดติดผิวโดยที่ทุกพีเอช ดินร่วนเหนียวปนทรายมีความสามารถในการดูดติดผิวสูงที่สุด และความสามารถในการดูดติดผิวลดลงเมื่อ พีเอชของสารละลายเพิ่มขึ้น เมื่อมีอิออนลบ พบว่าฟอสเฟตสามารถยับยั้งการดูดติดผิวของอาร์เซนเตในดินได้ ต่างจากไบคาร์บอเนตที่เพิ่มความสามารถในการดูดติดผิวของอาร์เซนเต และพบว่าไอโซเทอมการดูดติดผิวของอาร์เซนเตเป็นแบบแลงมัวร์

ผลการทดลองแบบคอลัมน์ พบว่าสัมประสิทธิ์การกระจายตัวของดินร่วนเหนียวปนทราย ดินร่วนเหนียวและดินทรายปนร่วน มีค่าเท่ากับ  $2.93 \times 10^{-3}$   $2.75 \times 10^{-3}$  และ  $10.64 \times 10^{-3}$  ซม.<sup>2</sup>/วินาทีตามลำดับ ส่วนผลการเคลื่อนที่ของอาร์เซนเตในคอลัมน์ดินร่วนเหนียวปนทรายจะช้าที่สุด เนื่องจากมีความสามารถในการดูดติดผิวสูงที่สุด และคอลัมน์ที่มีอิออนลบพบว่าฟอสเฟตทำให้การดูดติดผิวของอาร์เซนเตลดลง แต่ไบคาร์บอเนตที่อัตราส่วน 1 : 1 จะเพิ่มความสามารถในการดูดติดผิว และเมื่อทำการประมาณการเคลื่อนที่ด้วยโปรแกรม HYDRUS2D พบว่าโปรแกรมจะประมาณการเคลื่อนที่ช้ากว่าผลการทดลองแบบคอลัมน์

ผลการทดลองดังกล่าวสามารถนำไปใช้ประโยชน์ในเชิงวิศวกรรม ในการบำบัดการปนเปื้อนของอาร์เซนเตในชั้นน้ำใต้ดินได้ โดยโปรแกรมสามารถใช้ร่วมกับการทดลองแบบคอลัมน์ในการวางแผนการบำบัดและฟื้นฟู และสามารถใส่ฟอสเฟตเร่งการชะอาร์เซนเตที่ปนเปื้อนบนดิน ให้หลุดออกจากผิวหน้าดินไปอยู่ในน้ำใต้ดิน และสามารถสูบขึ้นแล้วบำบัดได้เร็วมากยิ่งขึ้น

ภาควิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม  
สาขาวิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม  
ปีการศึกษา 2547

ลายมือชื่อนิสิต.....  
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....  
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม.....

## 4570344021 : MAJOR Environmental Engineering

KEY WORD: Arsenate / Adsorption / Transport / Groundwater / Competitive Anions

TANATCHAPORN YOORYANGYUEN: SORPTION AND TRANSPORT BEHAVIOR OF ARSENATE IN THE AQUIFER. THESIS ADVISOR: KHEMARATH OSATHAPHAN, Ph.D., THESIS COADVISOR: ASST.PROF. SUTHA KHAODHIAR, Ph.D., 183 pp. ISBN 974-17-6083-3.

Mobility of arsenate in sub-surface environment was investigated. The laboratory scale batch reactor was set up to investigate arsenate adsorption capacity by Thailand natural soils. Three types of soils: Sandy clay loam, Clay loam, and Loamy sand were used in this study. The effects of competing anions on arsenate adsorption were studied by adding 2 commonly found anions, phosphate and bicarbonate, to the solution. Solution pH was varied at 4, 7, and 10 to investigate the effects of hydrogen ions concentration on arsenate adsorption. Continuous flow column was set up to determine the dispersion coefficients and arsenate transport behaviors. Calculated parameters from both batch and column studies were used as input in the computer model, HYDRUS2D. HYDRUS2D was then used to predict the transport behaviors of arsenate through soils and the predicted values were compared with the experimental values.

From both batch and column tests, pH was the controlling factor, arsenate adsorption on soils decrease with increasing pH. Types of soils also affected adsorption capacity. Sandy clay loam had the most adsorption capacity, and followed by Clay loam, and Loamy sand, respectively. In competitive tests, the arsenate adsorption capacity was decreased dramatically when phosphate was present. Oppositely with phosphate, bicarbonate was increased arsenate adsorption capacity. Additionally, Langmuir isotherm is with these all adsorption experiments. Derived from the column experiments, the dispersion coefficients of Sandy clay loam, Clay loam and Loamy sand are  $2.93 \times 10^{-3}$ ,  $2.75 \times 10^{-3}$  and  $10.63 \times 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{s}$ , respectively.

The results derived from this studies and computer model can apply in the engineering applications, for instance, pump and treat remediation in arsenate contaminated sites. Phosphate solution, which is injected in contaminated soil, uses in effectively washing arsenate out of contaminated soil phase to the groundwater phase. Then contaminated groundwater is subsequently pumped and continuously treated by appropriate method.

Department	Environmental Engineering	Student's Signature.....
Field of study	Environmental Engineering	Advisor's Signature.....
Academic year	2004	Co-advisor's Signature.....

## กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบพระคุณ อาจารย์ที่ปรึกษา อ.ดร. เขมรรัฐ โอสถาพันธุ์ และ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ผศ.ดร.สุธา ขาวเขียว ที่กรุณาให้ความรู้ คำปรึกษา คำอธิบาย และช่วยแก้ไขปัญหาให้กับผู้เขียนมาโดยตลอด ขอขอบพระคุณอาจารย์กรรมการสอบทุกท่านที่กรุณาให้ความรู้ คำชี้แนะ และแก้ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ ของงานวิจัย

ขอขอบพระคุณคุณพ่อ คุณแม่ คุณยาย พี่แก้ว และน้องบอนด์ ที่ให้ความรัก การส่งเสริม สนับสนุน และเป็นกำลังใจที่สำคัญที่สุด

ขอขอบพระคุณบัณฑิตวิทยาลัย ที่มอบทุนอุดหนุนการทำวิทยานิพนธ์ครั้งนี้ ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม และงานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากโครงการศูนย์วิจัยแห่งชาติด้านการจัดการสิ่งแวดล้อมและของเสียอันตราย ขอขอบคุณห้องปฏิบัติการของเสียอันตรายภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม โดยเฉพาะอย่างยิ่งเจ้าหน้าที่ประจำห้องปฏิบัติการทุกท่าน ครูปอง พี่เหม่ม ปู และปอม ที่ให้ความเอื้อเฟื้อและให้ความรู้จนสามารถทำการทดลองสำเร็จลุล่วงด้วยดี ขอขอบคุณพี่ ๆ ห้องธุรการภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมทุกท่าน ที่ให้ความช่วยเหลือ และอำนวยความสะดวกให้เสมอมา

และขอขอบคุณอาจารย์ทุกท่านของผู้เขียน ที่อบรมสั่งสอนและความรู้ ขอขอบคุณ น้อย กิม ออย ฟ้า สน ตีก ปรีธ อู ชลย์ ที่ให้กำลังใจและเป็นเพื่อนที่น่ารัก ขอขอบคุณ แก้ว ไก่ พี่จูน พี่ก้อง พี่โบ๊ต น้องบิว น้องตี เพื่อน ๆ ร่วมรุ่นปริญญาตรี และปริญญาโท และพี่ ๆ น้อง ๆ ทุกคนที่มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ และจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่คอยให้ความช่วยเหลือและเอาใจช่วยให้วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี

สถาบันนวัตกรรมการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## สารบัญ

	หน้า
แบบคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
กิตติกรรมประกาศ	ฉ
สารบัญ	ช
สารบัญตาราง	ฎ
สารบัญภาพ	ต
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ชื่อวิทยานิพนธ์.....	1
1.2 คำสำคัญ.....	1
1.3 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
บทที่ 2 วัตถุประสงค์และขอบเขตของการศึกษาวิจัย	
2.1 วัตถุประสงค์ของการศึกษาวิจัย.....	3
2.2 ขอบเขตของการศึกษาวิจัย.....	3
2.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
บทที่ 3 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	
3.1 อาร์เซนิก (Arsenic).....	5
3.1.1 ไตรวาเลนต์อาร์เซนิกหรืออาร์เซไนต์.....	8
3.1.2 เพนตะวาเลนต์อาร์เซนิกหรืออาร์เซเนต.....	9
3.1.3 ความสัมพันธ์ระหว่างไตรวาเลนต์อาร์เซนิกและเพนตะวาเลนต์อาร์เซนิก.....	9
3.1.4 ความเป็นพิษของอาร์เซนิก.....	10
3.1.5 การแพร่กระจายอาร์เซนิกในสิ่งแวดล้อม.....	11
3.1.6 มาตรฐานการควบคุมของอาร์เซนิก.....	13
3.2 อีออนประจุลบที่พบทั่วไปในน้ำ.....	15
3.3 กลไกการเคลื่อนที่ของสารปนเปื้อนในชั้นน้ำใต้ดิน.....	16
3.3.1 การพา.....	17
3.3.2 การแพร่และการกระจายตัว.....	17
3.4 การดูดติดผิว.....	19
3.4.1 การดูดติดผิว.....	19

3.4.2	กลไกการดูดติดผิว.....	19
3.4.3	การเคลื่อนที่ของการดูดติดผิว.....	21
3.4.4	การดูดติดผิวแบบสมดุล.....	22
3.4.5	การดูดติดผิวแบบไม่สมดุล.....	26
3.4.6	แบบจำลองการเคลื่อนที่ของสารปนเปื้อนแบบ 1 มิติ.....	27
3.4.7	ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการดูดติดผิว.....	32
3.5	การบำบัดฟื้นฟูโดยระบบสูบแล้วบำบัด.....	33
3.6	ข้อมูลดินประเทศไทย.....	34
3.6.1	คุณสมบัติดิน.....	34
3.6.2	การจำแนกดิน.....	34
3.7	งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	35
บทที่ 4 วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีการวิจัย		
4.1	วัสดุ อุปกรณ์ และสารเคมี.....	40
4.1.1	เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย.....	40
4.1.2	สารเคมีที่ใช้.....	40
4.2	วิธีการทดลอง.....	41
4.2.1	การทดลองหาเวลาสัมผัสน้ำที่เหมาะสมในการดูดติดผิวของอาร์เซนิต.....	41
4.2.2	การทดลองแบบแบตซ์หาไอโซเทอมการดูดติดผิว.....	41
4.2.3	การทดลองหาผลของอิออนลบที่มีต่อการดูดติดผิวของอาร์เซนิต.....	43
4.2.4	การทดลองหาค่าสัมประสิทธิ์การกระจายตัว (Dispersion Coefficient) ของดิน.....	43
4.2.5	การทำกรทดลองแบบคอลัมน์เพื่อตรวจสอบผลการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์.....	44
4.2.6	การทดลองแบบคอลัมน์เพื่อศึกษาการเคลื่อนที่ของอาร์เซนิตเมื่อมีอิออนลบ.....	45
4.2.7	นำผลการทดลองที่ได้ สร้างเป็นแบบจำลอง.....	45
บทที่ 5 ผลการวิเคราะห์ข้อมูล		
5.1	ผลการศึกษาคูณสมบัติของตัวอย่างดิน.....	46



5.2	ผลการศึกษาเวลาสัมพัทธ์ที่เหมาะสมในการดูดติดผิวของอาร์เซเนตด้วย ตัวอย่างดิน.....	47
5.3	การศึกษาถึงความสามารถการดูดติดผิวของอาร์เซเนตด้วยตัวอย่างดินที่ พีเอชต่าง ๆ.....	52
5.4	การศึกษาถึงสมการไอโซเทอมการดูดติดผิว (Adsorption Isotherm) ของการดูดติดผิวของอาร์เซเนตด้วยตัวอย่างดิน โดยการทดลองแบบแบดซ์.....	58
5.5	การหาค่าพารามิเตอร์การดูดติดผิว (Adsorption Parameter).....	69
5.6	การศึกษาผลของอิออนลบที่มีต่อการดูดติดผิวของอาร์เซเนตด้วยตัวอย่างดิน.....	72
5.7	การทดลองหาค่าสัมประสิทธิ์การกระจายตัว (Dispersion Coefficient) ของตัวอย่างดิน ด้วยการทดลองแบบคอลัมน์.....	75
5.8	การทดลองแบบคอลัมน์ .....	78
5.9	การทดลองแบบคอลัมน์เพื่อศึกษาการเคลื่อนที่ของอาร์เซเนตเมื่อมีอิออนลบ.....	84
5.10	การจำลองการเคลื่อนที่ของอาร์เซเนตแบบคอลัมน์ด้วยโปรแกรม HYDRUS2D.....	88
บทที่ 6 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ		
6.1	สรุปผลการวิจัย.....	95
6.2	ความสำคัญทางด้านวิศวกรรมศาสตร์ และการนำไปใช้ประโยชน์.....	98
6.3	ข้อเสนอแนะ.....	99
รายการอ้างอิง.....		
ภาคผนวก		
ภาคผนวก ก.	ผลการศึกษาคูณสมบัติของดิน.....	105
ภาคผนวก ข.	ผลการศึกษาเวลาสัมพัทธ์ที่เหมาะสมในการดูดติดผิว ของอาร์เซเนตด้วยตัวอย่างดิน.....	110
ภาคผนวก ค.	ผลการศึกษาถึงสมการไอโซเทอมการดูดติดผิว (Adsorption Isotherm) ของการดูดติดผิวของอาร์เซเนต ด้วยตัวอย่างดินโดยการทดลองแบบแบดซ์.....	114
ภาคผนวก ง.	การศึกษาผลของพีเอช และชนิดของดินตัวอย่างที่มีต่อ การดูดติดผิวของอาร์เซเนต โดยการแทนค่าสมการไอโซเทอม ด้วยค่า Q และ Ce และค่าพารามิเตอร์การดูดติดผิว a และ b.....	125

ภาคผนวก จ.	ผลการศึกษาผลของอิออนประจุลบที่มีต่อการดูดติดผิวของ อาร์เซเนตด้วยตัวอย่างดิน.....	135
ภาคผนวก ฉ.	การทดลองหาค่าสัมประสิทธิ์การกระจายตัว (Dispersion Coefficient)ด้วยการทดลองแบบคอลัมน์.....	142
ภาคผนวก ช.	ผลการทดลองแบบคอลัมน์.....	149
ภาคผนวก ซ.	ข้อมูลที่ป้อนในโปรแกรม HYDRUS2D.....	177
ประวัติผู้ทำวิทยานิพนธ์.....		183



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1	ลักษณะสมบัติทางกายภาพของอาร์เซนิก.....5
3.2	อาร์เซนิกและสารประกอบอาร์เซนิกที่สำคัญ.....6
3.3	รูปที่มีมากที่สุดของอาร์เซนิก ในสภาพแวดล้อมตามธรรมชาติที่พีเอชต่าง ๆ .....8
3.4	รูปที่มีมากที่สุดของอาร์เซนิก ในสภาพแวดล้อมตามธรรมชาติที่พีเอชต่าง ๆ .....9
3.5	แสดงอาการต่าง ๆ ที่เกิดในคนเมื่อได้รับอาร์เซนิกในปริมาณต่าง ๆ.....11
3.6	มาตรฐานน้ำดื่มของต่างประเทศ.....14
3.7	มาตรฐานน้ำดื่มที่กำหนดโดยหน่วยงานต่าง ๆ ของประเทศไทย.....14
3.8	ปริมาณความเข้มข้นของอาร์เซนิกในน้ำที่จากกิจกรรมประเภทต่าง ๆ.....14
3.9	ปริมาณอาร์เซนิกที่ออกสู่บรรยากาศ.....15
3.10	ค่าสัมประสิทธิ์การกระจายตัวของดินชนิดต่าง ๆ ที่ได้จากทดลองแบบคอลัมน์ โดยใช้สารละลายทริเทียมเป็นสารตามรอย.....29
3.11	ตัวอย่างค่าที่ต้องป้อนเข้าในโปรแกรม HYDRUS2D.....31
5.1	คุณสมบัติของตัวอย่างดินที่ทำการศึกษา.....46
5.2	ค่า R-Square ของกราฟไอโซเทอมของการดูดติดผิวอาร์เซนิก ด้วยดินชนิดต่าง ๆ.....58
5.3	ค่าพารามิเตอร์การดูดติดผิวที่ได้จากสมการไอโซเทอมการดูดติดผิว ของดินแต่ละชนิดต่าง ๆ ที่แต่ละสภาวะพีเอช.....70
ก.1	ผลการวัดปริมาณความเข้มข้นเริ่มต้นของอาร์เซนิกในดินทั้ง 3 ชนิด ด้วยเครื่อง Atomic Absorption Spectrophotometer (AAS).....106
ข.1	ผลการศึกษาเวลาสัมผัสที่เหมาะสมในการดูดติดผิวของอาร์เซนิกด้วยตัวอย่างดิน เมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายอาร์เซนิก เท่ากับ 15 มิลลิกรัมต่อลิตร พีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 4 ความเร็วรอบในการเขย่าที่ 200 รอบต่อนาที .....111
ข.2	ผลการศึกษาเวลาสัมผัสที่เหมาะสมในการดูดติดผิวของอาร์เซนิกด้วยตัวอย่างดิน เมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายอาร์เซนิกเท่ากับ 15 มิลลิกรัมต่อลิตร พีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 7 ความเร็วรอบในการเขย่าที่ 200 รอบต่อนาที.....112
ข.3	ผลการศึกษาเวลาสัมผัสที่เหมาะสมในการดูดติดผิวของอาร์เซนิกด้วยตัวอย่างดิน เมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายอาร์เซนิกเท่ากับ 15 มิลลิกรัมต่อลิตร พีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 10 ความเร็วรอบในการเขย่าที่ 200 รอบต่อนาที.....113



## สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
ค. 8	ผลการศึกษาถึงสมการไอโซเทอมของการดูดติดผิวของตัวอย่างดินทรายปนร่วน ที่พีเอช 7 เวลาสัมผัส 96 ชั่วโมง ในการดูดติดผิว อาร์เซเนตในสารละลาย อาร์เซเนตสังเคราะห์ โดยใช้ตัวอย่างดิน 0.5, 1, 2, 5 และ 10 กรัม ที่ความเข้มข้นของสารละลายอาร์เซเนต 15 มิลลิกรัมต่อลิตร .....122
ค. 9	ผลการศึกษาถึงสมการไอโซเทอมของการดูดติดผิวของตัวอย่างดินทรายปนร่วน ที่พีเอช 10 เวลาสัมผัส 96 ชั่วโมง ในการดูดติดผิว อาร์เซเนตในสารละลาย อาร์เซเนตสังเคราะห์ โดยใช้ตัวอย่างดิน 0.5, 1, 2, 5 และ 10 กรัม ที่ความเข้มข้นของสารละลายอาร์เซเนต 15 มิลลิกรัมต่อลิตร.....123
ค.10	ค่าพีเอชที่สภาวะสมดุลโดยเฉลี่ยของตัวอย่างดินทั้ง 3 ชนิด ในการทดลองแบบแบตช์เพื่อการศึกษาถึงสมการไอโซเทอมการดูดติดผิว.....124
ง. 1	ผลการทดลองการศึกษาผลของพีเอช และชนิดของดินตัวอย่างที่มีต่อ การดูดติดผิวของอาร์เซเนต โดยการแทนค่าสมการไอโซเทอมด้วย ค่า Q และ Ce และค่าพารามิเตอร์การดูดติดผิว a และ b สำหรับการทดลองดินร่วนเหนียวปนทราย พีเอช 4 .....126
ง. 2	ผลการทดลองการศึกษาผลของพีเอช และชนิดของดินตัวอย่างที่มีต่อ การดูดติดผิวของอาร์เซเนต โดยการแทนค่าสมการไอโซเทอมด้วย ค่า Q และ Ce และค่าพารามิเตอร์การดูดติดผิว a และ b สำหรับการทดลองดินร่วนเหนียวปนทราย พีเอช 7 .....127
ง. 3	ผลการทดลองการศึกษาผลของพีเอช และชนิดของดินตัวอย่างที่มีต่อ การดูดติดผิวของอาร์เซเนต โดยการแทนค่าสมการไอโซเทอมด้วย ค่า Q และ Ce และค่าพารามิเตอร์การดูดติดผิว a และ b สำหรับการทดลองดินร่วนเหนียวปนทราย พีเอช 10 .....128
ง. 4	ผลการทดลองการศึกษาผลของพีเอช และชนิดของดินตัวอย่างที่มีต่อ การดูดติดผิวของอาร์เซเนต โดยการแทนค่าสมการไอโซเทอมด้วย ค่า Q และ Ce และค่าพารามิเตอร์การดูดติดผิว a และ b สำหรับการทดลองดินร่วนเหนียว พีเอช 4 .....129

## สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
ง. 5 ผลการทดลองการศึกษาผลของพีเอช และชนิดของดินตัวอย่างที่มีต่อการดูดติดผิวของอาร์เซนิต โดยการแทนค่าสมการไอโซเทอมด้วยค่า Q และ Ce และค่าพารามิเตอร์การดูดติดผิว a และ b สำหรับการทดลองดินร่วนเหนียว พีเอช 7.....	130
ง. 6 ผลการทดลองการศึกษาผลของพีเอช และชนิดของดินตัวอย่างที่มีต่อการดูดติดผิวของอาร์เซนิต โดยการแทนค่าสมการไอโซเทอมด้วยค่า Q และ Ce และค่าพารามิเตอร์การดูดติดผิว a และ b สำหรับการทดลองดินร่วนเหนียว พีเอช 10 .....	131
ง. 7 ผลการทดลองการศึกษาผลของพีเอช และชนิดของดินตัวอย่างที่มีต่อการดูดติดผิวของอาร์เซนิต โดยการแทนค่าสมการไอโซเทอมด้วยค่า Q และ Ce และค่าพารามิเตอร์การดูดติดผิว a และ b สำหรับการทดลองดินทรายปนร่วน พีเอช 4 .....	132
ง. 8 ผลการทดลองการศึกษาผลของพีเอช และชนิดของดินตัวอย่างที่มีต่อการดูดติดผิวของอาร์เซนิต โดยการแทนค่าสมการไอโซเทอมด้วยค่า Q และ Ce และค่าพารามิเตอร์การดูดติดผิว a และ b สำหรับการทดลองดินทรายปนร่วน พีเอช 7 .....	133
ง. 9 ผลการทดลองการศึกษาผลของพีเอช และชนิดของดินตัวอย่างที่มีต่อการดูดติดผิวของอาร์เซนิต โดยการแทนค่าสมการไอโซเทอมด้วยค่า Q และ Ce และค่าพารามิเตอร์การดูดติดผิว a และ b สำหรับการทดลองดินทรายปนร่วน พีเอช 10 .....	134
จ. 1 ผลการศึกษาถึงสมการไอโซเทอมของการดูดติดผิวของตัวอย่างดินร่วนเหนียวที่พีเอช 7 เมื่อมีฟอสเฟต อัตราส่วน 0.1 : 1 เวลาสัมผัสนาน 96 ชั่วโมง โดยใช้ตัวอย่างดิน 0.5, 1, 2, 5 และ 10 กรัม ที่ความเข้มข้นของสารละลายอาร์เซนิต 15 มิลลิกรัมต่อลิตร.....	136
จ. 2 ผลการศึกษาถึงสมการไอโซเทอมของการดูดติดผิวของตัวอย่างดินร่วนเหนียวที่พีเอช 7 เมื่อมีฟอสเฟต อัตราส่วน 1 : 1 เวลาสัมผัสนาน 96 ชั่วโมง โดยใช้ตัวอย่างดิน 0.5, 1, 2, 5 และ 10 กรัม ที่ความเข้มข้นของสารละลายอาร์เซนิต 15 มิลลิกรัมต่อลิตร.....	137

## สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
จ. 3	ผลการศึกษาถึงสมการไอโซเทอมของการดูดติดผิวของตัวอย่างดินร่วนเหนียว ที่พีเอช 7 เมื่อมีฟอสเฟต อัตราส่วน 10 : 1 เวลาสัมผัสด 96 ชั่วโมง โดยใช้ตัวอย่างดิน 0.5, 1, 2, 5 และ 10 กรัม ที่ความเข้มข้นของสารละลายอาร์เซเนต 15 มิลลิกรัมต่อลิตร.....138
จ. 4	ผลการศึกษาถึงสมการไอโซเทอมของการดูดติดผิวของตัวอย่างดินร่วนเหนียว ที่พีเอช 7 เมื่อมีไบคาร์บอเนต อัตราส่วน 0.1 : 1 เวลาสัมผัสด 96 ชั่วโมง โดยใช้ตัวอย่างดิน 0.5, 1, 2, 5 และ 10 กรัม ที่ความเข้มข้นของสารละลายอาร์เซเนต 15 มิลลิกรัมต่อลิตร.....139
จ. 5	ผลการศึกษาถึงสมการไอโซเทอมของการดูดติดผิวของตัวอย่างดินร่วนเหนียว ที่พีเอช 7 เมื่อมีไบคาร์บอเนต อัตราส่วน 1 : 1 เวลาสัมผัสด 96 ชั่วโมง โดยใช้ตัวอย่างดิน 0.5, 1, 2, 5 และ 10 กรัม ที่ความเข้มข้นของสารละลายอาร์เซเนต 15 มิลลิกรัมต่อลิตร.....140
จ. 6	ผลการศึกษาถึงสมการไอโซเทอมของการดูดติดผิวของตัวอย่างดินร่วนเหนียว ที่พีเอช 7 เมื่อมีไบคาร์บอเนต อัตราส่วน 10 : 1 เวลาสัมผัสด 96 ชั่วโมง โดยใช้ตัวอย่างดิน 0.5, 1, 2, 5 และ 10 กรัม ที่ความเข้มข้นของสารละลายอาร์เซเนต 15 มิลลิกรัมต่อลิตร.....141
ฉ. 1	ผลการศึกษาการทดลองแบบคอลัมน์โดยใช้สารละลายโบรไมด์ที่ความเข้มข้น เริ่มต้นเริ่มต้น 15 มิลลิกรัมต่อลิตร ในคอลัมน์ดินร่วนเหนียวปนทราย .....143
ฉ. 2	ผลการศึกษาการทดลองแบบคอลัมน์โดยใช้สารละลายโบรไมด์ที่ความเข้มข้น เริ่มต้นเริ่มต้น 15 มิลลิกรัมต่อลิตร ในคอลัมน์ดินร่วนเหนียว.....145
ฉ. 3	ผลการศึกษาการทดลองแบบคอลัมน์โดยใช้สารละลายโบรไมด์ที่ความเข้มข้น เริ่มต้นเริ่มต้น 15 มิลลิกรัมต่อลิตร ในคอลัมน์ดินทรายปนร่วน .....147
ช. 1	ข้อมูลการดูดติดผิวของอาร์เซเนตด้วยตัวอย่างดินร่วนเหนียวปนทราย โดยการทดลอง แบบคอลัมน์ เมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นของอาร์เซเนตเท่ากับ 15 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่พีเอช 7.....150
ช. 2	ข้อมูลการดูดติดผิวของอาร์เซเนตด้วยตัวอย่างดินร่วนเหนียว โดยการทดลอง แบบคอลัมน์ เมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นของอาร์เซเนตเท่ากับ 15 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่พีเอช 7.....153

## สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่		หน้า
ช. 3	ข้อมูลการดูดติดผิวของอาร์เซเนตด้วยตัวอย่างดินทรายปนร่วน โดยการทดลองแบบคอลัมน์ เมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นของอาร์เซเนตเท่ากับ 15 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่พีเอช 7.....	156
ช. 4	ข้อมูลการดูดติดผิวของอาร์เซเนตด้วยตัวอย่างดินร่วนเหนียว โดยการทดลองแบบคอลัมน์ เมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นของอาร์เซเนตเท่ากับ 15 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่พีเอช 4.....	159
ช. 5	ข้อมูลการดูดติดผิวของอาร์เซเนตด้วยตัวอย่างร่วนเหนียว โดยการทดลองแบบคอลัมน์ เมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นของอาร์เซเนตเท่ากับ 15 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่พีเอช 10.....	162
ช. 6	ข้อมูลการดูดติดผิวของอาร์เซเนตด้วยตัวอย่างดินร่วนเหนียว โดยการทดลองแบบคอลัมน์ เมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นของอาร์เซเนตเท่ากับ 15 มิลลิกรัมต่อลิตร และมีฟอสเฟตต่ออาร์เซเนตอัตราส่วน 10 : 1 ที่พีเอช 7.....	165
ช. 7	ข้อมูลการดูดติดผิวของอาร์เซเนตด้วยตัวอย่างดินร่วนเหนียว โดยการทดลองแบบคอลัมน์ เมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นของอาร์เซเนตเท่ากับ 15 มิลลิกรัมต่อลิตร และมีฟอสเฟตต่ออาร์เซเนตอัตราส่วน 1 : 1 ที่พีเอช 7 .....	168
ช. 8	ข้อมูลการดูดติดผิวของอาร์เซเนตด้วยตัวอย่างดินร่วนเหนียว โดยการทดลองแบบคอลัมน์ เมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นของอาร์เซเนตเท่ากับ 15 มิลลิกรัมต่อลิตร และมีไบคาร์บอเนตต่ออาร์เซเนตอัตราส่วน 10 : 1 ที่พีเอช 7.....	171
ช. 9	ข้อมูลการดูดติดผิวของอาร์เซเนตด้วยตัวอย่างดินร่วนเหนียว โดยการทดลองแบบคอลัมน์ เมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นของอาร์เซเนตเท่ากับ 15 มิลลิกรัมต่อลิตร และมีไบคาร์บอเนตต่ออาร์เซเนตอัตราส่วน 1 : 1 ที่พีเอช 7.....	174
ช. 1	ชุดข้อมูลที่ป้อนเข้าสู่โปรแกรม HYDRUS2D ในการประมาณการเคลื่อนที่ของอาร์เซเนต ในคอลัมน์ดินร่วนเหนียวปนทราย ที่พีเอช 7.....	178
ช. 2	ชุดข้อมูลที่ป้อนเข้าสู่โปรแกรม HYDRUS2D ในการประมาณการเคลื่อนที่ของอาร์เซเนต ในคอลัมน์ดินร่วนเหนียว ที่พีเอช 7 .....	179
ช. 3	ชุดข้อมูลที่ป้อนเข้าสู่โปรแกรม HYDRUS2D ในการประมาณการเคลื่อนที่ของอาร์เซเนต ในคอลัมน์ดินทรายปนร่วน ที่พีเอช 7.....	180
ช. 4	ชุดข้อมูลที่ป้อนเข้าสู่โปรแกรม HYDRUS2D ในการประมาณการเคลื่อนที่ของอาร์เซเนต ในคอลัมน์ดินร่วนเหนียว ที่พีเอช .....	181



สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
ช. 5	
ชุดข้อมูลที่ป้อนเข้าสู่โปรแกรม HYDRUS2D ในการประมาณการเคลื่อนที่ของ อาร์เซนิต ในคอลัมน์ดินร่วนเหนียว ที่พีเอช 10.....	182



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปประกอบ	หน้า
3.1 A predominant diagram for (As(III)) as a function of pH.....	8
3.2 A predominant diagram for (As(V)) as a function of pH.....	9
3.3 Eh – pH ไดอะแกรมสำหรับอาร์เซนิกแต่ละสปีชีส์ที่อุณหภูมิ 25 C และความดันบรรยากาศ 1 บรรยากาศ.....	10
3.4 ปัจจัยที่ทำให้เกิดการกระจายตัวตามยาว (Longitudinal Dispersion, $D_x$ ).....	18
3.5 อธิบายรูปแบบธรรมชาติของพุ่ม (Plume).....	18
3.6 Linear Adsorption Isotherm.....	23
3.7 Langmuir Adsorption Isotherm.....	24
3.8 Freundlich Adsorption Isotherm.....	24
3.9 Breakthrough Curve แสดงให้เห็นผลของการกระจายตัว (Dispersion) และการดูดซับแบบหนึ่งต่อการเคลื่อนที่ 1 มิติของสารปนเปื้อน.....	25
3.10 ผลของการกระจาย การพา และการหนึ่งต่อการเคลื่อนที่ของสารปนเปื้อนในน้ำใต้ดิน.....	25
3.11 ตัวอย่างผลที่ได้จากโปรแกรม HYDRUS.....	31
4.1 การทดลองแบบแบตช์สำหรับดินตัวอย่าง (การทดลอง 1 ชุด).....	42
4.2 แสดงคอลัมน์ดินที่ใช้ในการทดลองแบบคอลัมน์.....	44
5.1 ค่าพีเอชสุดท้ายของดินร่วนเหนียวปนทรายในการศึกษาเวลาสัมผัสที่เหมาะสม.....	48
5.2 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการดูดติดผิวของอาร์เซนิตด้วยดินร่วนเหนียวปนทราย ในการศึกษาเวลาสัมผัสที่เหมาะสม.....	48
5.3 ค่าพีเอชสุดท้ายของดินร่วนเหนียวในการศึกษาเวลาสัมผัสที่เหมาะสม.....	49
5.4 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการดูดติดผิวของอาร์เซนิตด้วยดินร่วนเหนียวในการศึกษาเวลาสัมผัสที่เหมาะสม.....	49
5.5 ค่าพีเอชสุดท้ายของดินทรายปนร่วนในการศึกษาเวลาสัมผัสที่เหมาะสม.....	50
5.6 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการดูดติดผิวของอาร์เซนิตด้วยดินทรายปนร่วนในการศึกษาเวลาสัมผัสที่เหมาะสม.....	51
5.7 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นที่สภาวะสมดุลและความสามารถในการดูดติดผิวของการทดลองชุดดินร่วนเหนียวปนทรายที่สภาวะพีเอชต่าง ๆ .....	53

## สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.8	ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นที่สภาวะสมดุลและความสามารถในการดูดติดผิวของการทดลองชุดดินร่วนเหนียวที่สภาวะพีเอชต่าง ๆ.....53
5.9	ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นที่สภาวะสมดุลและความสามารถในการดูดติดผิวของการทดลองชุดดินทรายปนร่วนที่สภาวะพีเอชต่าง ๆ.....54
5.10	ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นที่สภาวะสมดุลและความสามารถในการดูดติดผิวของการทดลองของชุดดินต่าง ๆ ที่สภาวะพีเอช 4.....55
5.11	ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นที่สภาวะสมดุลและความสามารถในการดูดติดผิวของการทดลองของชุดดินต่าง ๆ ที่สภาวะพีเอช 7.....56
5.12	ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นที่สภาวะสมดุลและความสามารถในการดูดติดผิวของการทดลองของชุดดินต่าง ๆ ที่สภาวะพีเอช 10.....56
5.13	ไอโซเทอมการดูดติดผิวอาร์เซนเดบแบบแลงมัวร์ด้วยตัวอย่างดินร่วนเหนียวปนทราย....60
5.14	ไอโซเทอมการดูดติดผิวอาร์เซนเดบแบบแลงมัวร์ด้วยตัวอย่างดินร่วนเหนียว.....61
5.15	ไอโซเทอมการดูดติดผิวอาร์เซนเดบแบบแลงมัวร์ด้วยตัวอย่างดินทรายปนร่วน.....62
5.16	ไอโซเทอมการดูดติดผิวอาร์เซนเดบแบบฟรุนดลิชด้วยตัวอย่างดินร่วนเหนียวปนทราย.....63
5.17	ไอโซเทอมการดูดติดผิวอาร์เซนเดบแบบฟรุนดลิชด้วยตัวอย่างดินร่วนเหนียว.....64
5.18	ไอโซเทอมการดูดติดผิวอาร์เซนเดบแบบฟรุนดลิชด้วยตัวอย่างดินทรายปนร่วน.....65
5.19	ไอโซเทอมการดูดติดผิวอาร์เซนเดบแบบเชิงเส้นด้วยตัวอย่างดินร่วนเหนียวปนทราย.....66
5.20	ไอโซเทอมการดูดติดผิวอาร์เซนเดบแบบเชิงเส้นด้วยตัวอย่างดินร่วนเหนียว.....67
5.21	ไอโซเทอมการดูดติดผิวอาร์เซนเดบแบบเชิงเส้นด้วยตัวอย่างดินทรายปนร่วน.....68
5.22	ความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถในการดูดติดผิวของอาร์เซนเดบด้วยตัวอย่างดินร่วนเหนียวปนทราย และความเข้มข้นของอาร์เซนเดบที่สภาวะสมดุลในสภาวะพีเอช 4 7 และ 10 โดยแสดงข้อมูลและเส้นแนวโน้มจากสมการแลงมัวร์.....70
5.23	ความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถในการดูดติดผิวของอาร์เซนเดบด้วยตัวอย่างดินร่วนเหนียว และความเข้มข้นของอาร์เซนเดบที่สภาวะสมดุลในสภาวะพีเอช 4 7 และ 10 โดยแสดงข้อมูลและเส้นแนวโน้มจากสมการแลงมัวร์.....71

## สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.24	ความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถในการดูดติดผิวของอาร์เซเนตด้วยตัวอย่างดินทรายปนร่วน และความเข้มข้นของอาร์เซเนตที่สภาวะสมดุลในสภาวะพีเอช 4 7 และ 10 โดยแสดงข้อมูลและเส้นแนวโน้มจากสมการแลงมัวร์.....71
5.25	ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นที่สภาวะสมดุล และความสามารถในการดูดติดผิวของดินร่วนเหนียวที่พีเอช 7 เมื่อมีฟอสเฟต.....72
5.26	ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นที่สภาวะสมดุล และความสามารถในการดูดติดผิวของดินร่วนเหนียวที่พีเอช 7 เมื่อมีไบคาร์บอเนต.....74
5.27	Breakthrough Curve และการประมาณค่าจากโปรแกรม CFITIM ของสารละลายโบรไมด์ที่ไหลผ่านคอลัมน์ดินร่วนเหนียวปนทราย ที่ความเข้มข้นของสารละลายโบรไมด์เริ่มต้น 15 มิลลิกรัมต่อลิตร.....76
5.28	Breakthrough Curve และการประมาณค่าจากโปรแกรม CFITIM ของสารละลายโบรไมด์ที่ไหลผ่านคอลัมน์ดินร่วนเหนียว ที่ความเข้มข้นของสารละลายโบรไมด์เริ่มต้น 15 มิลลิกรัมต่อลิตร.....77
5.29	Breakthrough Curve และการประมาณค่าจากโปรแกรม CFITIM ของสารละลายโบรไมด์ที่ไหลผ่านคอลัมน์ดินทรายปนร่วน ที่ความเข้มข้นของสารละลายโบรไมด์เริ่มต้น 15 มิลลิกรัมต่อลิตร.....77
5.30	ความสัมพันธ์ระหว่าง Pore Volume ในคอลัมน์ดินร่วนเหนียวปนทราย กับอัตราความเข้มข้นของอาร์เซเนตออกต่อความเข้มข้นเข้า ที่ความเข้มข้นสารละลายอาร์เซเนตเริ่มต้น 15 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่พีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 7.....79
5.31	ความสัมพันธ์ระหว่าง Pore Volume ในคอลัมน์ดินร่วนเหนียว กับอัตราความเข้มข้นของอาร์เซเนตออกต่อความเข้มข้นเข้า ที่ความเข้มข้นสารละลายอาร์เซเนตเริ่มต้น 15 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่พีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 7.....80
5.32	ความสัมพันธ์ระหว่าง Pore Volume ในคอลัมน์ดินทรายปนร่วน กับอัตราความเข้มข้นของอาร์เซเนตออกต่อความเข้มข้นเข้า ที่ความเข้มข้นสารละลายอาร์เซเนตเริ่มต้น 15 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่พีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 7.....81
5.33	ความสัมพันธ์ระหว่าง Pore Volume ในคอลัมน์ดินทั้ง 3 ชนิด กับอัตราความเข้มข้นของอาร์เซเนตออกต่อความเข้มข้นเข้า ที่ความเข้มข้นสารละลายอาร์เซเนตเริ่มต้น 15 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่พีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 7.....81

## สารบัญรูปร่าง (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.34	ความสัมพันธ์ระหว่าง Pore Volume ในคอลัมน์ดินร่วนเหนียว กับอัตราความเข้มข้นของอาร์เซนออกต่อความเข้มข้นเข้า ที่ความเข้มข้น สารละลายอาร์เซนเริ่มต้น 15 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่พีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 4.....82
5.35	ความสัมพันธ์ระหว่าง Pore Volume ในคอลัมน์ดินร่วนเหนียว กับอัตราความเข้มข้นของอาร์เซนออกต่อความเข้มข้นเข้า ที่ความเข้มข้น สารละลายอาร์เซนเริ่มต้น 15 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่พีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 10.....83
5.36	ความสัมพันธ์ระหว่าง Pore Volume ในคอลัมน์ดินร่วนเหนียวกับอัตราความ เข้มข้นของอาร์เซนออกต่อความเข้มข้นเข้า ที่ความเข้มข้นสารละลายอาร์เซน เริ่มต้น 15 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่พีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 4 7 และ 10 .....84
5.37	ความสัมพันธ์ระหว่าง Pore Volume ในคอลัมน์ดินร่วนเหนียว กับอัตรา ความเข้มข้นของอาร์เซนออกต่อความเข้มข้นเข้า ที่ความเข้มข้นสารละลาย อาร์เซนเริ่มต้น 15 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่พีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 7 เปรียบเทียบเมื่อ มีฟอสเฟตต่ออาร์เซนอัตราส่วน 10:1 1:1 และไม่มีฟอสเฟต.....86
5.38	ความสัมพันธ์ระหว่าง Pore Volume ในคอลัมน์ดินร่วนเหนียว กับอัตรา ความเข้มข้นของอาร์เซนออกต่อความเข้มข้นเข้า ที่ความเข้มข้นสารละลาย อาร์เซนเริ่มต้น 15 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่พีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 7 เปรียบเทียบเมื่อ มีไบคาร์บอเนตต่ออาร์เซนอัตราส่วน 10:1 1:1 และไม่มีไบคาร์บอเนต.....87
5.39	Breakthrough curve จากการประมาณโดยโปรแกรม HYDRUS2D และจากการทดลองแบบคอลัมน์ ของดินร่วนเหนียวปนทราย ที่พีเอช 7.....88
5.40	Breakthrough curve จากการประมาณโดยโปรแกรม HYDRUS2D และจากการทดลองแบบคอลัมน์ ของดินร่วนเหนียว ที่พีเอช 7.....89
5.41	Breakthrough curve จากการประมาณโดยโปรแกรม HYDRUS2D และจากการทดลองแบบคอลัมน์ ของดินทรายปนร่วน ที่พีเอช 7.....89
5.42	Breakthrough curve จากการประมาณโดยโปรแกรม HYDRUS2D และจากการทดลองแบบคอลัมน์ ของดินร่วนเหนียว ที่พีเอช 4.....91
5.43	Breakthrough curve จากการประมาณโดยโปรแกรม HYDRUS2D และจากการทดลองแบบคอลัมน์ ของดินร่วนเหนียว ที่พีเอช 10.....92
ก.1	ผลการวิเคราะห์แร่ธาตุหลักในดินร่วนเหนียวปนทราย ด้วยเครื่อง X – Ray Diffraction.....107

## สารบัญรูปร่างภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
ก.2	ผลการวิเคราะห์แร่ธาตุหลักในดินร่วนเหนียว ด้วยเครื่อง X – Ray Diffraction.....108
ก.3	ผลการวิเคราะห์แร่ธาตุหลักในดินทรายปนร่วน ด้วยเครื่อง X – Ray Diffraction.....109



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ชื่อวิทยานิพนธ์

ภาษาไทย : พฤติกรรมการดูดติดผิวและการเคลื่อนที่ของอาร์เซเนตในชั้นน้ำใต้ดิน

ภาษาอังกฤษ : Sorption and Transport Behavior of Arsenate in the Aquifer

### 1.2 คำสำคัญ (Keywords)

อาร์เซเนต (Arsenate)

น้ำใต้ดิน (Groundwater)

การดูดติดผิว (Adsorption)

แบบจำลองการเคลื่อนที่ 1 มิติ (One Dimensional Transport Modeling)

การดูดติดผิวแบบแข่งขัน (Competitive Sorption)

ไอออนประจุลบชนิดแข่งขัน (Competitive Anions)

การศึกษาไอโซเทอมการดูดติดผิว (Adsorption Isotherm Test)

### 1.3 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

อาร์เซนิค หรือสารหนูเป็นธาตุที่พบได้ในเปลือกโลก ในน้ำตามธรรมชาติมักพบในรูปของสารอนินทรีย์ อาร์เซนิคเป็นสารพิษที่มีฤทธิ์เฉียบพลันและเรื้อรัง พิษเฉียบพลัน เมื่อสัมผัสจะเกิดอาการระคายเคืองที่ผิวหนัง ถ้าอาร์เซนิคเข้าสู่ระบบการไหลเวียนโลหิตจะก่อให้เกิดการเบื่ออาหาร โลหิตจาง ส่วนอาการของพิษเรื้อรังมักเกี่ยวข้องกับไขกระดูก ประสาทส่วนปลาย และเป็นเหตุให้เกิดโรคมะเร็ง เช่นมะเร็งผิวหนังและมะเร็งตับ จึงถือว่าอาร์เซนิคเป็นสารที่ก่อให้เกิดปัญหาต่อสุขภาพมนุษย์ที่ต้องคำนึงถึง

การปนเปื้อนสู่สิ่งแวดล้อมของอาร์เซนิค มีสาเหตุมาจากการนำมาใช้งานอย่างกว้างขวาง จึงทำให้เกิดการปนเปื้อนของอาร์เซนิคได้หลายทาง เช่น ทางธรรมชาติเกิดจากการสึกกร่อนของพื้นผิวโลกและก๊าซจากภูเขาไฟระเบิด จากอุตสาหกรรมต่าง ๆ เช่น อุตสาหกรรมเหมืองแร่และการถลุงแร่ และอุตสาหกรรมฟอกหนัง จากการเกษตรกรรม มีการใช้อาร์เซนิคอย่างแพร่หลายเพื่อเป็นส่วนประกอบในยาฆ่าแมลง ในปัจจุบันปัญหาที่พบคือ เกิดการปนเปื้อนของอาร์เซนิคใน

ดิน แหล่งน้ำ ในตะกอน และปัญหาอาร์เซนิกในน้ำที่จากอุตสาหกรรมซึ่งผ่านการบำบัดที่ไม่ได้มาตรฐาน โดยในน้ำที่มีออกซิเจน มักพบในรูปอาร์เซนิต (As(V)) ส่วนในภาวะที่มีออกซิเจนต่ำมักพบในรูป อาร์เซนไนต์ (As(III)) และปฏิกิริยาการเปลี่ยนระหว่างอาร์เซนไนต์และอาร์เซนิตไม่ค่อยพบทั่วไปตามธรรมชาติ ส่วนในประเทศไทย พบปัญหาการปนเปื้อนของอาร์เซนิกในดินเช่นกัน ดังเช่นบริเวณอำเภอรัตนพิบูลย์ จังหวัดนครศรีธรรมราช เนื่องจากบริเวณนั้นมีการทำเหมืองแร่ดีบุก และมีสินแร่ไพไรต์ (Pyrites) และอาร์เซนไพไรต์ (Arsenopyrites) ปะปนอยู่ จึงเกิดปัญหาการปนเปื้อนของอาร์เซนิกในดิน จากการตรวจวิเคราะห์ดินในพื้นที่เมื่อปีพ.ศ.2540 พบปริมาณอาร์เซนิกมีค่าตั้งแต่ตรวจไม่พบ จนถึง 3,931 มิลลิกรัม/กิโลกรัมดิน และมีค่าเฉลี่ย 222.8 มิลลิกรัม/กิโลกรัมดิน (ดุชลักษณ์, 2543)

ในงานวิจัยนี้มุ่งเน้นไปที่การศึกษาพฤติกรรมการดูดติดผิวของอาร์เซนิตที่ติดอยู่ที่ดิน และนำออกอนที่มีประจุลบเช่นเดียวกับสารประกอบอาร์เซนิต คือ ฟอสเฟตและไบคาร์บอเนตมาช่วยเร่งการคายตัวของอาร์เซนิตในรูปของการแย่งพื้นที่ผิวจำเพาะในการดูดติดผิว รวมทั้งศึกษาการเคลื่อนที่ของอาร์เซนิตในชั้นน้ำใต้ดิน เพื่อเป็นประโยชน์ต่อไปในการทำการบำบัดอาร์เซนิตด้วยวิธีการสูบน้ำใต้ดินขึ้นมาบำบัด (Pump and Treat)

การเคลื่อนที่ของอาร์เซนิกในชั้นน้ำใต้ดินนั้น จะเกิดการเคลื่อนตัวจาก 2 กระบวนการหลัก คือแบบการพา (Advection) และการแพร่และการกระจายตัว (Diffusion and Dispersion) และกลไกอื่นที่มีผลคือการดูดติดผิว (Adsorption) การย่อยสลายทางชีววิทยา (Biodegradation) และปฏิกิริยาทางเคมี (Chemical Reaction)

การศึกษานี้ยังศึกษาต่อไปในการประยุกต์ใช้โปรแกรมสำเร็จรูป เช่น HYDRUS หรือ STANMOD/CFITIM ซึ่งพัฒนาโดย U.S. Salinity Laboratory, USDA - ARS, Riverside, California นำไปใช้ในการหาพารามิเตอร์ ในการดูดติดผิวและการเคลื่อนที่ และทำนายการเคลื่อนที่ของอาร์เซนิตผ่านตัวกลางที่มีรูพรุนในสภาวะต่าง ๆ

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



## แบบที่ 2

### วัตถุประสงค์และขอบเขตของการศึกษาวิจัย

#### 2.1 วัตถุประสงค์ของการศึกษาวิจัย

1. เพื่อศึกษาความสามารถในการดูดติดผิวของอาร์เซเนตในดินธรรมชาติ
2. เพื่อศึกษาความสามารถในการเคลื่อนที่ของอาร์เซเนตในชั้นน้ำใต้ดิน
3. เพื่อศึกษาผลของพีเอชที่มีต่อความสามารถในการดูดติดผิวของอาร์เซเนตในดิน
4. เพื่อศึกษาผลของไอออนประจุลบ (ฟอสเฟตและไบคาร์บอเนต) ที่มีต่อความสามารถในการดูดติดผิวในดินและการเคลื่อนที่ในชั้นน้ำใต้ดินของอาร์เซเนต
5. เพื่อทำการจำลองการเคลื่อนที่ของอาร์เซเนตในชั้นน้ำใต้ดิน ด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป

#### 2.2 ขอบเขตของการศึกษาวิจัย

การวิจัยครั้งนี้เป็นการวิจัยในระดับห้องปฏิบัติการ ใช้ตัวอย่างดิน 3 ชุดเป็นตัวแทนของชุดดินประเทศไทย และใช้น้ำสังเคราะห์ที่เติมอาร์เซนิกลงไป โดยในการวิจัยนี้ใช้อาร์เซเนตซึ่งเป็นรูปหนึ่งของอาร์เซนิค ทำการเตรียมน้ำใต้ดินสังเคราะห์ให้มีสภาพคล้ายสภาพตามธรรมชาติและสร้างสภาวะต่าง ๆ เช่น การมีไอออนประจุลบชนิดอื่นร่วมอยู่ด้วย หรือการเปลี่ยนแปลงค่าพีเอชในน้ำ

การศึกษาวิจัยครั้งนี้แบ่งออกเป็น 7 ขั้นตอน คือ

1. ผลการศึกษาเวลาสัมผัสที่เหมาะสม
  - ทดลองแบบแบตช์
  - สารปนเปื้อนคือ อาร์เซเนต ในรูปสารละลายอาร์เซเนต
  - ใช้ตัวอย่างดินเป็นดินตัวแทนของดินประเทศไทย 3 ชนิด
2. การทำไอโซเทอมการดูดติดผิว (Adsorption Isotherm Test)
  - ทดลองแบบแบตช์
  - สารปนเปื้อนคือ อาร์เซเนต ในรูปสารละลายอาร์เซเนต
  - ใช้ตัวอย่างดินเป็นดินตัวแทนของดินประเทศไทย 3 ชนิด

3. การทำไอโซโทมการดูดติดผิว เมื่อมีอิออนประจุลบชนิดอื่น
  - ทดลองแบบแบตซ์
  - สารปนเปื้อนคือ อาร์เซเนต ในรูปสารละลายอาร์เซเนต
  - สารรบกวนคืออิออนประจุลบ ได้แก่ ฟอสเฟต และ ไบคาร์บอเนต
  - ใช้ตัวอย่างดินเป็นดินตัวแทนของดินประเทศไทย 3 ชนิด
4. การทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์การกระจายตัว (Dispersion Coefficient) ของดิน
  - ทดลองแบบคอลัมน์
  - สารตามรอยคือ สารละลายโบรไมด์
  - ใช้ตัวอย่างดินเป็นดินตัวแทนของดินประเทศไทย 3 ชนิด
5. การจำลองการเคลื่อนที่ของอาร์เซเนตในชั้นน้ำใต้ดินโดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป
6. การทำการทดลองแบบคอลัมน์เพื่อตรวจสอบผลการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป
  - ทดลองแบบคอลัมน์
  - สารปนเปื้อนคือ อาร์เซเนต ในรูปสารละลายอาร์เซเนต
  - ใช้ตัวอย่างดินเป็นดินตัวแทนของดินประเทศไทย 3 ชนิด
7. การทำการทดลองแบบคอลัมน์ เมื่อมีอิออนประจุลบชนิดอื่น
  - ทดลองแบบคอลัมน์
  - สารปนเปื้อนคือ อาร์เซเนต ในรูปสารละลายอาร์เซเนต
  - สารรบกวนคือแอนไอออนชนิดแข่งขัน ได้แก่ ฟอสเฟต และ ไบคาร์บอเนต
  - ใช้ตัวอย่างดินเป็นดินตัวแทนของดินประเทศไทย 3 ชนิด

### 2.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ทราบถึงความสามารถในการดูดติดผิวของอาร์เซเนตในดินธรรมชาติ
2. ทราบถึงความสามารถในการเคลื่อนที่ของอาร์เซเนตในชั้นน้ำใต้ดิน
3. สามารถนำผลการทดลองที่ได้ไปประยุกต์ใช้กับวิธีการกำจัดอาร์เซเนตที่ปนเปื้อนได้ เช่น วิธี pump and treat หรือวิธีอื่น ๆ
4. เปรียบเทียบผลของอิออนลบที่มีต่อการดูดติดผิวของอาร์เซเนต เพื่อเลือกใช้อิออนลบชนิดที่เหมาะสมที่สุด เพื่อช่วยในการกำจัดอาร์เซเนตในสภาพแวดล้อมจริง
5. นำแบบจำลองไปใช้เป็นแนวทางเพื่อให้ทราบความสัมพันธ์หรือผลการทดลองคร่าว ๆ ได้ และเพื่อพัฒนาการศึกษาโดยอาศัยแบบจำลองต่อไป

### บทที่ 3

#### เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

##### 3.1 อาร์เซนิก (Arsenic)

อาร์เซนิกเป็นธาตุในหมู่ VB มีน้ำหนักอะตอม 74.9216 เลขอะตอม 33 ระเบิดได้ที่อุณหภูมิ 615 องศาเซลเซียส ที่ความดันบรรยากาศ 760 มิลลิเมตรปรอท มีจุดหลอมเหลวที่อุณหภูมิ 817 องศาเซลเซียส และมีเลขออกซิเดชันเท่ากับ  $-3$   $0$   $+3$   $+5$  (ดูษลักษณ์, 2543) มีคุณสมบัติเป็นทั้งโลหะและอโลหะ รูปร่างที่เป็นธาตุหรือเป็นโลหะ (Element or Metallic arsenic) เป็นรูปที่พบได้ยากในธรรมชาติ ส่วนในรูปสารประกอบ (Arsenic compounds) พบทั้งในรูปสารประกอบอนินทรีย์ (Inorganic arsenic) และสารประกอบอินทรีย์ (Organic arsenic) ส่วนใหญ่พบในรูปสารประกอบของแร่ต่าง ๆ คือ ในรูปอาร์เซไนด์ของโลหะ (Metal Arsenide) ซึ่งเป็นของแข็ง เช่น ทองแดง นิกเกิล เหล็ก และโคบอลต์ ( $\text{Cu}_3\text{As}(\text{s})$ ,  $\text{NiAs}_2(\text{s})$ ,  $\text{FeAs}_2(\text{s})$ ,  $\text{CoAs}_3(\text{s})$ ) พบในรูปอาร์เซนิกซัลไฟด์ (Arsenic sulfide) ได้แก่ เรียลการ์ (Realgar,  $\text{As}_4\text{S}_4$ ) และออร์พิเมนต์ (Orpiment,  $\text{As}_2\text{S}_3$ ) และพบในรูปอาร์เซนิกออกไซด์ เช่น  $\text{As}_2\text{O}_3$  และ  $\text{As}_2\text{O}_5$  (ดูษลักษณ์, 2543 ;รามนรี, 2543) ในดินและชั้นซึมน้ำอาร์เซนิกมีสภาวะออกซิเดชัน (Oxidation State)  $+3$  และ  $+5$  คือ ไตรวาเลนต์อาร์เซนิก หรือเรียกว่า อาร์เซไนด์ (Trivalent arsenic or Arsenite Hydroxylated ion) และ เพนตะวาเลนต์อาร์เซนิก หรือเรียกว่า อาร์เซเนต (Pentavalent arsenic or Arsenate Hydroxylated ion)

##### ตารางที่ 3.1 ลักษณะสมบัติทางกายภาพของอาร์เซนิก (ธรรม, 2541)

เลขอะตอม	33
น้ำหนักอะตอม	74.9216
โครงสร้างผลึก	Rhombohedral
สี	เทา
ความถ่วงจำเพาะ	5.7 (crystalline) 2.0 (yellow cubic) 3.7 (black amorphous)
จุดหลอมละลาย	817 °C (28 atm)
จุดเดือด	613 °C (V.P. 1 atm)

### ตารางที่ 3.1 (ต่อ)

ความร้อนแฝงของการหลอมละลาย	88.5 cal/g
ความร้อนแฝงของการเดือด	102 cal/g
ความร้อนจำเพาะ	0.082 cal/g/C (20 °C)
สัมประสิทธิ์การขยายตัว	$4.7 \times 10^{-6}$ in/C (20 °C)
ความต้านทานไฟฟ้า	33.3 microhm –cm
ความแข็งมาตรา Brinell	147

อาร์เซนิกถูกนำมาใช้ในงานต่าง ๆ ได้หลายรูปแบบและในหลายอุตสาหกรรม พบมากในพื้นที่อุตสาหกรรมเหมืองแร่และการถลุงแร่ โดยเป็นสิ่งไม่บริสุทธิ์ (Impurity) ที่ปนอยู่ในแร่ต่าง ๆ และจะเหลือค้างอยู่เมื่อแร่นั้นถูกถลุงเพื่อนำไปใช้งาน เช่น ตะกั่ว ทองแดง สังกะสี ดีบุก ทอง และเงิน เป็นต้น ตัวอย่างอาร์เซนิกที่ตกค้างอยู่ในอุตสาหกรรมแร่ เช่น Arsenopyrite ซึ่งเป็นสารประกอบไม่ละลายน้ำ เมื่ออยู่ในสภาวะรีดิวซ์จะไม่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม แต่เมื่อถูกออกซิไดซ์โดยออกซิเจน จะปล่อยอาร์เซนิกสู่สิ่งแวดล้อมและมีความเป็นพิษ (Charlet และคณะ, 2001)

### ตารางที่ 3.2 อาร์เซนิกและสารประกอบอาร์เซนิกที่สำคัญ

(กองมาตรฐานคุณภาพสิ่งแวดล้อม, 2530)

ชื่อสาร (name)	ชื่ออื่น (synonyms)	สูตรของสาร (formula)
1. Arsenic	Metallic arsenic	As <sub>4</sub>
2. Arsenic (+3) oxide	Arsenic trioxide Arsenous oxide White arsenic	As <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (or As <sub>4</sub> O <sub>6</sub> )
3. Arsenous acid	-	H <sub>3</sub> AsO <sub>3</sub>
4. Arsenenous acid, arsenites	Arsenious acid	AsO <sub>2</sub> <sup>-</sup>
5. Arsenic (+3) chloride	Arsenic trichloride Arsenous trichloride	AsCl <sub>3</sub>

ตารางที่ 3.2 (ต่อ)

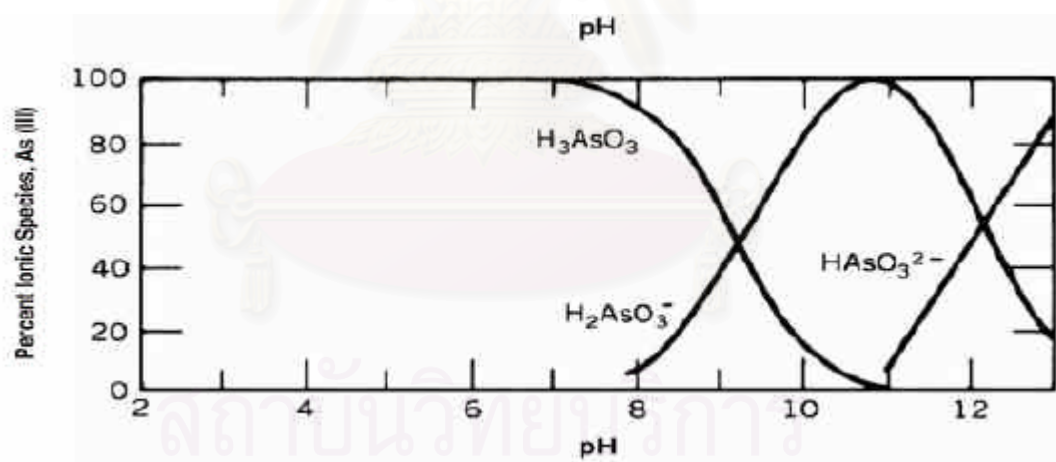
ชื่อสาร (Name)	ชื่ออื่น (Synonyms)	สูตรของสาร (Formula)
6. Arsenic (+3) sulfide	Arsenic trisulfide Orpiment Auripigment	$As_2S_3$
7. Arsenic (+5) oxide	Arsenic pentoxide	$As_2O_5$
8. Arsenic acid	Orthoarsenic acid	$H_3AsO_4$
9. Arsenenic acid, arsenates, salt of Arsenic acid (ortho)	Metaarsenic acid	$H_2AsO_4^-$ , $HAsO_4^{2-}$ or $AsO_4^{3-}$
10. Methylarsonic acid	Methanearsonic acid	$CH_3AsO(OH)_2$
11. Dimethylarsinic acid	Cacodylic acid	$(CH_3)_2AsO(OH)$
12. Trimethylarsine acide	-	$(CH_3)_3AsO$
13. Methylarsine	-	$CH_3AsH_2$
14. Dimethylarsine	-	$(CH_3)_2AsH$
15. Trimethylarsine	-	$(CH_3)_3AsH$

### 3.1.1 ไตรวาเลนต์อาร์เซนิกหรืออาร์เซไนต์ (Trivalent arsenic or Arsenite)

อาร์เซไนต์เป็นอาร์เซนิกอนินทรีย์ที่ถูกรีดิวซ์ จัดเป็นสารพิษในสิ่งแวดล้อม โดยมีความเป็นพิษมากกว่าอาร์เซเนตมาก รวมทั้งมีความสามารถในการละลายและการเคลื่อนที่มากกว่าอาร์เซเนต (Catherine และ Matthew, 2002) ในน้ำตามธรรมชาติ อาร์เซไนต์ปรากฏอยู่ในรูปออกซิแอนไอออนิก (Oxyanionic) มีหลายรูปขึ้นอยู่กับค่าพีเอช ค่าคงที่การแตกตัว ( $pK_a$ ) ของ  $H_3AsO_3$  คือ 9.23 และ 12.10 (Charlet และคณะ, 2001) ตารางที่ 3.3 และรูปที่ 3.1 แสดงรูปที่มีมากที่สุดของอาร์เซไนต์ที่พีเอชต่าง ๆ

ตารางที่ 3.3 รูปที่มีมากที่สุดของอาร์เซไนต์ ในสภาพแวดล้อมตามธรรมชาติ ที่พีเอชต่าง ๆ

pH	0 – 9	10 – 12	13	14
As(III)	$H_3AsO_3$	$H_2AsO_3^-$	$HAsO_3^{2-}$	$AsO_3^{3-}$



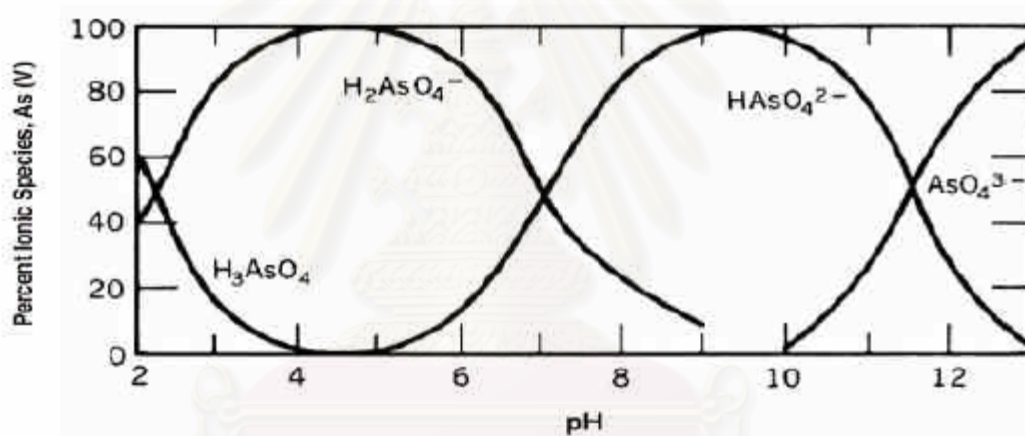
รูปที่ 3.1 A predominance diagram for (As(III)) as a function of pH (Todd และ Mark, 2002)

### 3.1.2 เพนตะวาเลนท์อาร์เซนิกหรืออาร์เซเนต (Pentavalent arsenic or Arsenate)

ในน้ำตามธรรมชาติอาร์เซเนตปรากฏอยู่ในรูปออกซิแอนไอออนิก (Oxyanionic) มีหลายรูปขึ้นอยู่กับค่าพีเอช ค่า  $pK_a$  ของ  $H_3AsO_4$  คือ 2.24, 6.94 และ 12.19 (Charlet และคณะ, 2001) ตารางที่ 3.4 และรูปที่ 3.2 แสดงรูปที่มีมากที่สุดของอาร์เซเนตที่พีเอชต่าง ๆ

ตารางที่ 3.4 รูปที่มีมากที่สุดของอาร์เซเนต ในสภาพแวดล้อมตามธรรมชาติ ที่พีเอชต่าง ๆ

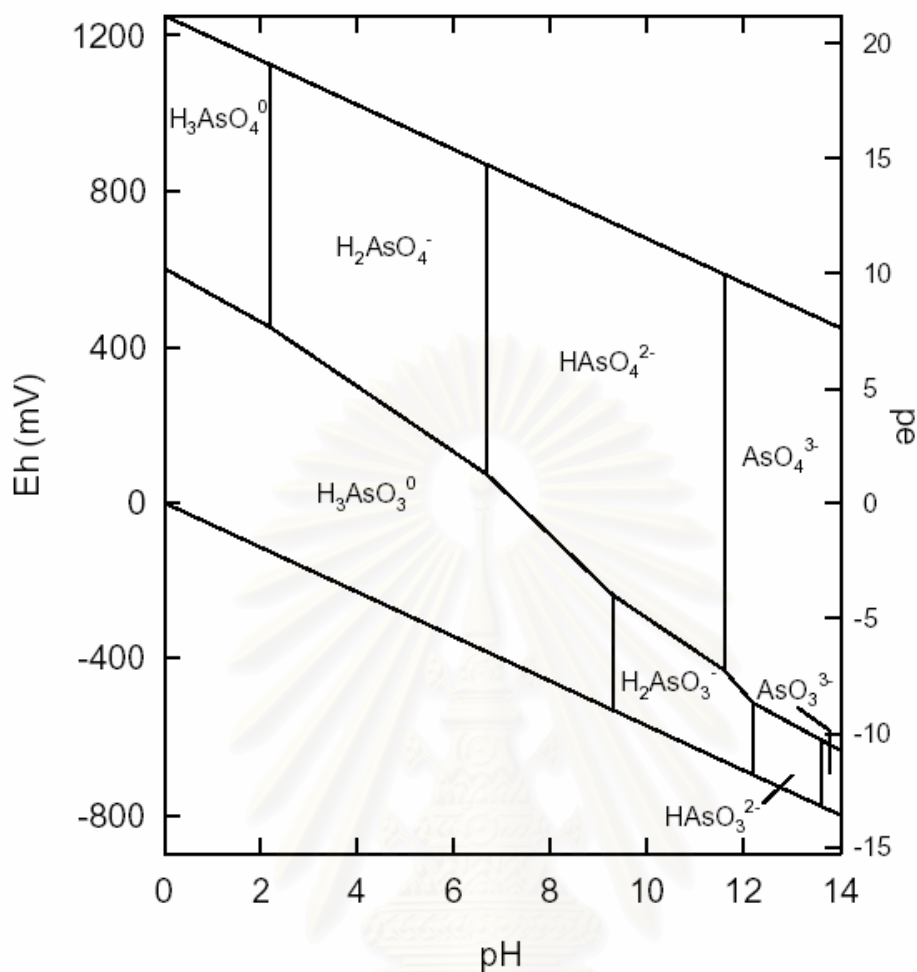
pH	0 – 2	3 – 6	7 – 11	12 - 14
As(V)	$H_3AsO_4$	$H_2AsO_4^-$	$HAsO_4^{2-}$	$AsO_4^{3-}$



รูปที่ 3.2 A predominant diagram for (As(V)) as a function of pH (Todd และ Mark, 2002)

### 3.1.3 ความสัมพันธ์ระหว่างไตรวาเลนท์อาร์เซนิกและเพนตะวาเลนท์อาร์เซนิก

ความสัมพันธ์ระหว่างทั้ง 2 ออกซิเดชันเสตทถูกกำหนดโดยค่า Redox Potential (Eh) และค่าพีเอช (pH) ดังแสดงดังรูปที่ 3.3 คือภายใต้สภาวะออกซิไดซิง (Oxidizing conditions) สามารถพบในรูปของอาร์เซเนตหรือเพนตะวาเลนท์อาร์เซนิก ซึ่ง  $H_2AsO_4^-$  เป็นรูปที่พบมากที่สุด โดยอยู่ในช่วงพีเอชต่ำกว่า 6.9 แต่ถ้าพีเอชสูงขึ้น  $HAsO_4^{2-}$  จะเป็นรูปที่พบมากที่สุด (โดยภายใต้สภาพกรดแก่จะเปลี่ยนอยู่ในรูป  $H_3AsO_4^0$  และภายใต้สภาพด่างแก่จะเป็นรูป  $AsO_4^{3-}$ ) ส่วนในสภาวะรีดิวซิง (Reducing conditions) สามารถพบในรูปของอาร์ซีนัดหรือไตรวาเลนท์อาร์เซนิกที่พีเอชประมาณ 9.2 รูปที่พบมากที่สุดคือ  $H_3AsO_3^0$



รูปที่ 3.3 Eh – pH ไดอะแกรมสำหรับอาร์เซนิกแต่ละสปีชีส์ที่อุณหภูมิ 25 C และความดันบรรยากาศ 1 บรรยากาศ (Pauline และ David, 2001)

### 3.1.4 ความเป็นพิษของอาร์เซนิก

ในสารประกอบอาร์เซนิกอนินทรีย์ รูปที่มีความเป็นพิษมากกว่าคือ ไตรวาเลนต์อาร์เซนิก สารประกอบอาร์เซนิกถูกจัดเป็นสารก่อมะเร็ง (Carcinogen) ประเภท 1 ดังนั้นจึงกำหนดค่าความเข้มข้นมากที่สุดที่มีได้ในน้ำดื่มไม่เกิน 10 ส่วนในล้านส่วน

อาร์เซนิกเป็นสารพิษที่มีฤทธิ์เฉียบพลันและเรื้อรัง พิษเฉียบพลันได้แก่ เมื่อสัมผัสจะเกิดอาการระคายเคืองที่ผิวหนัง ถ้าเข้าสู่ระบบการไหลเวียนโลหิตจะก่อให้เกิดการเบื่ออาหาร โลหิตจาง ส่วนอาการของพิษเรื้อรังมักเกี่ยวข้องกับไขกระดูก กระสาทส่วนปลาย เยื่อบุตาอักเสบ และเป็นต้นเหตุให้เกิดโรคมะเร็ง เช่น มะเร็งผิวหนังและมะเร็งตับ จึงถือว่าอาร์เซนิกเป็นสารที่ก่อให้เกิดปัญหาต่อสุขภาพมนุษย์ที่ต้องคำนึงถึง (Charlet และคณะ, 2001)



ปกติคนเราในแต่ละวันได้รับอาร์เซนิก ปริมาณ 0.04-1.4 mg ปริมาณอาร์เซนิกที่คนกินแล้วเป็นพิษ ถึงขั้นเสียชีวิตอยู่ในช่วง 1.5 mg/ น้ำหนักตัว 1 kg (Arsenic trioxide) ถึง 500 mg/ น้ำหนักตัว 1 kg (Diethyl arsenic acid) โดยจะเกิดอาการพิษเฉียบพลัน เช่น อาเจียน ท้องเสีย ปวดท้อง กล้ามเนื้อเกร็ง อาการแทรกซ้อนเกี่ยวกับการทำงานของหัวใจ และเสียชีวิตจากหัวใจล้มเหลว ถ้าได้รับอาร์เซนิกในระดับเกินค่ามาตรฐาน (0.01 มิลลิกรัมต่อลิตร) อาจเกิดอาการพิษอาร์เซนิกเรื้อรัง ได้แก่ ผิวหนังเปลี่ยนสีที่เป็นลักษณะเฉพาะโรค (จุดสีน้ำตาลกระจุกกระจ่าง จุดขาว ๆ กระจุกกระจ่าง ผิวดำเทาตามฝ่ามือฝ่าเท้า) ผื่นที่ตุ่มตามฝ่ามือฝ่าเท้า มีปัญหาทางระบบเส้นโลหิต ระบบประสาท ระบบเลือด รวมทั้งมะเร็งอวัยวะภายในในบางกรณี (สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์สาธารณสุข, 2542)

### ตารางที่ 3.5 แสดงอาการต่าง ๆ ที่เกิดในคนเมื่อได้รับอาร์เซนิกในปริมาณต่าง ๆ

ปริมาณอาร์เซนิกที่ร่างกายได้รับ	อาการ
มากกว่า 0.01 mg/L	อาการเป็นพิษอาร์เซนิกเรื้อรัง ผิวหนังเปลี่ยนสีที่เป็นลักษณะเฉพาะโรค ผื่นที่ตุ่มตามฝ่ามือฝ่าเท้า ปัญหาทางระบบเส้นโลหิต ระบบประสาท ระบบเลือด มะเร็ง
มากกว่า 1.5 mg(Arsenic trioxide) / น้ำหนักตัว 1 kg ถึง 500 mg (Diethyl arsenic acid) / น้ำหนักตัว 1 kg	อาจถึงขั้นเสียชีวิต

#### 3.1.5 การแพร่กระจายอาร์เซนิกในสิ่งแวดล้อม

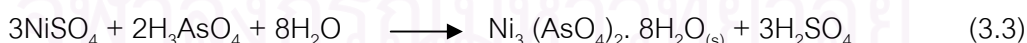
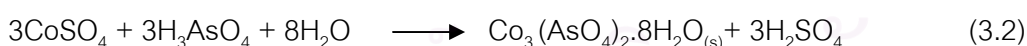
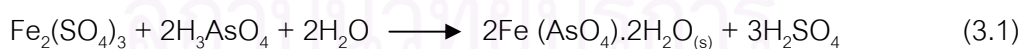
การแพร่กระจายอาร์เซนิกในสิ่งแวดล้อมเกิดทั้งจากตามธรรมชาติ และเกิดจากกิจกรรมของมนุษย์ดังต่อไปนี้ (รามนรี, 2543)

- (1) โดยธรรมชาติ เกิดจากการสีก่ร่อนของพื้นผิวโลกและก๊าซภูเขาไฟ ซึ่งอาร์เซนิกจะเข้าสู่สิ่งแวดล้อมในรูปของสารอาร์ซิเนียสออกไซด์ (Arsenious oxide)
- (2) ทางเกษตรกรรม นำมาใช้ในการกำจัดศัตรูพืช (Herbicide) ที่พบว่ามีการใช้อย่างแพร่หลายมี 2 ชนิด คือ โมโนโซเดียมมีเทนอาร์โซเนต (Monosodium methanearsonate, MSMA) และไดโซเดียมมีเทนอาร์โซเนต (Disodium methanearsonate, DSMA) สำหรับกำจัด

วัชพืชในแปลงเพาะปลูก ใช้เป็นสารป้องกันและกำจัดแมลง (Insecticides) เช่น ซิงค์อาร์เซเนต (Zinc arsenate) ใช้เพื่อกำจัดด้วง แคลเซียมอาร์เซเนต (Calcium arsenate) กำจัดแมลงไนไรด์ฝ้ายและสวนผลไม้ โซเดียมอาร์เซไนต์ (Sodium arsenite) ใช้กำจัดหมัด เห็บ ไรและเหาของปศุสัตว์ ส่วนคอปเปอร์อะซิโตอาร์เซไนต์ (Copper acetoarsenite) นำมากำจัดแมลงภายในบ้าน นอกจากนี้ยังใช้อาร์เซนิคผสมกับสารอื่นเพื่อป้องกันและรักษาเนื้อไม้ (Wood preservation) และใช้ผสมในอาหารสัตว์เพื่อเร่งการเติบโตของสัตว์ปีก เป็นต้น

(3) ทางอุตสาหกรรมใช้อาร์เซนิคในรูปของแข็ง (Metallic arsenic) ผสมกับโลหะอื่น เช่น ตะกั่ว ทองแดง เป็นโลหะอัลลอยด์เพื่อให้ทนต่อการกัดกร่อน ใช้เป็นวัสดุกึ่งตัวนำ (Semiconductor) ในเครื่องมือทางด้านอิเล็กทรอนิกส์ เช่น ทรานซิสเตอร์ (Transistors) ดีเทคเตอร์ (Detector) และโซลาร์แบตเตอรี่ (Solar batteries) ในอุตสาหกรรมแก้วและเซรามิก ใช้ในรูปอาร์เซนิคไตรออกไซด์ (Arsenic trioxide,  $As_2O_3$ ) เพื่อขจัดสีออกจากแก้ว ทำให้เนื้อแก้วใส ในอุตสาหกรรมฟอกหนัง ใช้เพื่อรักษาสภาพหนัง ในอุตสาหกรรมยารักษาโรคทั้งในคนและสัตว์ ได้แก่ ไตรเพนโนโซโมซิส (Tripanosomosis) และอะมีบิซิส (Amebiasis) ใช้รักษาโรคที่เกิดจากโปรโตซัว

ทั้งนี้เนื่องจากอาร์เซนิคเป็นส่วนประกอบของผิวโลกเพียง 1.5-2.0 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมเท่านั้น จึงถูกจัดเป็นธาตุอันดับที่ 20 ของธาตุที่เป็นส่วนประกอบของโลก อาร์เซนิคที่อยู่บนผิวโลกนั้นมาจากการผุพังของหินหรือแหล่งแร่ที่มีอาร์เซนิคสะสมอยู่ โดยที่แร่ประกอบอาร์เซนิคต่างๆ จะทำปฏิกิริยากับออกซิเจนในอากาศ เกิดเป็นสารประกอบอาร์เซเนต ซึ่งเคลื่อนที่ละลายกับผิวดิน และสามารถเคลื่อนที่ไปได้เร็วและไกลในสภาพแวดล้อมที่เป็นกรด แต่ถ้าอยู่ในสภาพที่เป็นกลางและด่างจะเคลื่อนที่ได้ช้ากว่า โดยสามารถตกตะกอนกับร่วมกับสารประกอบต่างๆ เช่น สารประกอบของเหล็ก ตะกั่ว สังกะสี โคบอลต์ นิกเกิล ที่มีอยู่ในน้ำ ทำให้เกิดเป็นแร่ประกอบอาร์เซนิคขึ้น ดังนี้



นอกจากอาร์เซนิคจะตกตะกอนกับสารประกอบโลหะต่าง ๆ ดังกล่าวแล้ว ยังถูกดูดซับโดยแร่ดินและสารอินทรีย์ต่างๆ ได้อีกด้วย ดังสมการ



จากกิจกรรมต่าง ๆ ทำให้อาร์เซนิกและสารประกอบของอาร์เซนิกแพร่กระจายในอากาศ ดิน ตะกอน แหล่งน้ำ อีกทั้งสะสมในพืชและสิ่งมีชีวิต

การปนเปื้อนของอาร์เซนิกในชั้นน้ำใต้ดิน เกิดขึ้นเนื่องจากความสามารถในการเคลื่อนตัวของอาร์เซนิกในดินมีค่าสูง แต่ก็อาจมีปริมาณการปนเปื้อนต่ำลงเนื่องจากการย่อยสลายทางชีวภาพและการสะสมของสิ่งมีชีวิตในพื้นที่นั้น (Bhumbla และ Keefe, 1994) ปัจจัยที่มีผลต่อปริมาณอาร์เซนิกในดินมีดังนี้ ปัจจัยหลักคือปริมาณธาตุอาร์เซนิกที่มีอยู่ในดิน มี 2 แหล่งกำเนิดคือจากธรรมชาติคือในหินที่มีแร่อาร์เซนิก และจากกิจกรรมต่าง ๆ ของมนุษย์ ส่วนปัจจัยรองได้แก่ สภาพอากาศ ส่วนประกอบอินทรีย์และอนินทรีย์ในดิน และสถานะรีดอกซ์ นอกจากนี้จากการทำแบบจำลองพบว่า ชนิดของหินแร่ที่เป็นแหล่งกำเนิดมีผลต่อปริมาณอาร์เซนิกในดินมากกว่าชนิดของดิน (Huang, 1994)

### 3.1.6 มาตรฐานการควบคุมของอาร์เซนิก

1. **มาตรฐานน้ำดื่ม** ตารางที่ 3.6 แสดงถึงค่ามาตรฐานปริมาณความเข้มข้นของอาร์เซนิก ที่ยอมให้มีได้ในน้ำดื่มที่กำหนดโดยประเทศหรือองค์กรต่าง ๆ และตารางที่ 3.7 แสดงถึงค่ามาตรฐานปริมาณความเข้มข้นของอาร์เซนิก ซึ่งอนุญาตให้มีได้ในน้ำดื่มที่กำหนดโดยหน่วยงานต่าง ๆ ในประเทศไทย

2. **มาตรฐานคุณภาพน้ำผิวดิน** ทางองค์การอนามัยโลกได้กำหนดมาตรฐานอาร์เซนิกในน้ำดิบเพื่อผลิตน้ำประปาไว้ไม่เกิน 0.05 มิลลิกรัมต่อลิตร ส่วนมาตรฐานน้ำดิบของแต่ละประเทศนั้นแตกต่างกันเช่น ประเทศสหรัฐอเมริกาได้กำหนดมาตรฐานอาร์เซนิกในน้ำดิบของน้ำประปาไว้ไม่เกิน 0.05 มิลลิกรัมต่อลิตร (ธรรม, 2541)

3. **มาตรฐานน้ำทิ้ง** ประเทศญี่ปุ่นและประเทศสิงคโปร์กำหนดค่ามาตรฐานของน้ำทิ้งที่มีอาร์เซนิกหรือสารประกอบอาร์เซนิก ไม่เกิน 0.5 มิลลิกรัมต่อลิตร ส่วนประเทศไทย กรมโรงงานอุตสาหกรรม และกระทรวงอุตสาหกรรมได้กำหนดให้น้ำทิ้งที่ระบายออกจากโรงงานอุตสาหกรรม มีความเข้มข้นของอาร์เซนิกไม่เกิน 1.0 มิลลิกรัมต่อลิตร และประเทศอังกฤษ ก็ได้กำหนดไว้เท่ากับประเทศไทย

ตารางที่ 3.6 มาตรฐานน้ำดื่มของต่างประเทศ (Charlet และคณะ, 2001)

ประเทศหรือองค์กรต่าง ๆ ที่กำหนด	ปริมาณความเข้มข้นของอาร์เซนิกที่ยอมรับให้มีได้ในน้ำดื่ม (มก./ล.)
สหรัฐอเมริกา	0.01
กลุ่มประชาคมยุโรป	0.01
องค์การอนามัยโลก	0.01

ตารางที่ 3.7 มาตรฐานน้ำดื่มที่กำหนดโดยหน่วยงานต่าง ๆ ของประเทศไทย (กองมาตรฐานคุณภาพสิ่งแวดล้อม, 2530)

หน่วยงานที่กำหนด	ปริมาณความเข้มข้นของอาร์เซนิกที่ยอมรับให้มีได้ในน้ำดื่ม (มก./ล.)
กระทรวงสาธารณสุข	0.05
กรมทรัพยากรธรณี	0.05
การประปานครหลวง	0.01 – 0.05
กรมโยธาธิการ	0.05
สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม	0.05

ตารางที่ 3.8 ปริมาณความเข้มข้นของอาร์เซนิกในน้ำทิ้งจากกิจกรรมประเภทต่าง ๆ (กองมาตรฐานคุณภาพสิ่งแวดล้อม, 2530)

ประเภทกิจกรรม	ปริมาณอาร์เซนิกในน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดแล้ว (มก./ล.)
โรงงานฟอกหนังสัตว์	0 – 3000
โรงงานปุ๋ยไนโตรเจน	0.1 – 0.8
โรงงานโลหะผสมตะกั่ว – สังกะสี	0.15 – 0.22
โรงงานโลหะผสมทั้งสแตน – โมลิบดีนัม	0.9
โรงงานนิเกิล	0.04 – 1.4
เหมืองทั้งสแตน	0.2 – 1.35
โรงงานถลุงตะกั่ว	0.02 – 0.06
โรงงานตีบุก	0.5

ตารางที่ 3.9 ปริมาณอาร์เซนิกที่ออกสู่บรรยากาศ (กองมาตรฐานคุณภาพสิ่งแวดล้อม ,2530)

แหล่งที่ปล่อยอาร์เซนิก	ปริมาณอาร์เซนิก
เหมืองแร่	0.45 ตันต่อแร่ทองแดง ตะกั่ว สังกะสี เงิน ทอง หรือยูเรเนียม 1 ล้านตัน
การถลุงโลหะ	955 ตันต่อทองแดงที่ผลิตได้ 1 ล้านตัน
	591 ตันต่อสังกะสีที่ผลิตได้ 1 ล้านตัน
	364 ตันต่อตะกั่วที่ผลิตได้ 1 ล้านตัน
ถ่านหิน	1.4 ตันต่อการเผาถ่านหิน 1 ล้านตัน
น้ำมัน	5.2 กิโลกรัมต่อน้ำมัน 1 ล้านบาร์เรล

### 3.2 อีออนประจุลบที่พบทั่วไปในน้ำ

ในน้ำตามธรรมชาติจะมีองค์ประกอบอยู่มากมาย และสามารถพบได้ในหลายรูป ไม่ว่าจะเป็นสารประกอบอินทรีย์ สารประกอบอนินทรีย์ สารประกอบโลหะ และสารประกอบอโลหะ สารประกอบมักจะมีละลายอยู่ในรูปของอีออน ในที่นี้จะกล่าวถึงอีออนประจุลบที่พบทั่วไปในแหล่งน้ำตามธรรมชาติ (David และ Paul, 1997) ดังนี้

**คลอไรด์ ( $Cl^-$ )** คลอไรด์อีออน ( $Cl^-$ ) เป็นอีออนอนินทรีย์ประจุลบที่พบทั่วไปในน้ำดีและน้ำเสียในธรรมชาติ โดยคลอไรด์จะทำให้เกิดรสเค็มในน้ำ ขึ้นอยู่กับชนิดและปริมาณของอีออนประจุบวกหลักในน้ำ เช่น เมื่อโซเดียมเป็นอีออนประจุบวกหลัก จะเกิดรสเค็มที่ความเข้มข้นของคลอไรด์ 250 มิลลิกรัมต่อลิตร

คลอไรด์พบในน้ำทั่วไปในน้ำเสียชุมชนมากกว่าน้ำเสียธรรมชาติ เนื่องจากโซเดียมคลอไรด์เป็นส่วนสำคัญในชีวิตประจำวันของมนุษย์ คลอไรด์อีออนในแหล่งน้ำใต้ดิน แหล่งน้ำผิวดินและในดิน พบได้มากในบริเวณที่มีพื้นที่ติดชายฝั่งทะเล

**ไนเตรต ( $NO_3^-$ )** เป็นสารประกอบอนินทรีย์ประจุลบที่พบทั่วไปในน้ำธรรมชาติ เนื่องจากมีแหล่งกำเนิดจากก๊าซไนโตรเจนในอากาศ และจากองค์ประกอบของสิ่งมีชีวิต โดยไนเตรตจะเกิดในสภาวะที่มีออกซิเจนอยู่มาก นอกจากนี้ยังพบไนโตรเจนออกซิเดชันสภาวะอื่น ๆ อีกเช่น ไนไตรต์ ( $NO_2^-$ ) แอมโมเนียม ( $NH_4^+$ ) แอมโมเนีย ( $NH_3$ ) เป็นต้น โดยไนเตรตเป็นออกซิเดชันที่

พบมากที่สุดในพื้นที่น้ำ มาตรฐานน้ำดื่มของ USEPA กำหนดให้มีปริมาณไม่เกิน 45 มิลลิกรัมต่อลิตร เนื่องจากส่งผลต่อการเกิดของทารก

**ฟอสเฟต ( $\text{PO}_4^{3-}$ )** ฟอสฟอรัสเป็นองค์ประกอบของฟอสเฟต ซึ่งเป็นสารประกอบประจุลบที่พบโดยทั่วไปในแหล่งน้ำ เนื่องมาจากการใช้สารซักล้างที่มีฟอสเฟตเป็นส่วนประกอบ การขับถ่ายของสิ่งมีชีวิต น้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมและจากการเกษตรกรรม ซึ่งมีทั้งที่เป็นสารประกอบอินทรีย์และอนินทรีย์ตามแต่แหล่งที่ปล่อยฟอสเฟต

**ซัลเฟต ( $\text{SO}_4^{2-}$ )** เป็นสารประกอบอนินทรีย์ประจุลบที่พบทั่วไปในน้ำธรรมชาติ สามารถพบตั้งแต่ปริมาณน้อยมากไปถึงหลายพันมิลลิกรัมต่อลิตร โดยเฉพาะในน้ำที่มาจากกิจกรรมหรืออุตสาหกรรมที่ใช้ซัลเฟต เช่น อุตสาหกรรมถลุงเหล็ก

**ไบคาร์บอเนต ( $\text{HCO}_3^-$ )** เป็นไอออนหลักที่ทำให้เกิดสภาพต่างในน้ำธรรมชาติ ที่มีค่าพีเอชประมาณ 6-8 จัดว่าเป็นสารอนินทรีย์คาร์บอเนตที่พบมากในน้ำตามธรรมชาติโดยทั่วไป และวัฏจักรคาร์บอเนตที่อยู่ในน้ำจัดเป็นวงจรความสัมพันธ์ของสารที่มีความสำคัญมาก

### 3.3 กลไกการเคลื่อนที่ของสารปนเปื้อนในชั้นน้ำใต้ดิน (Contaminant Transport Mechanisms)

กระบวนการหลักของการเคลื่อนที่ของสารปนเปื้อนในชั้นน้ำใต้ดิน ประกอบด้วย การพา การแพร่ การกระจายตัว การดูดติดผิว การย่อยสลายทางชีววิทยา และปฏิกิริยาทางเคมี

การพา (Advection) เป็นกระบวนการอธิบายการเคลื่อนที่ของสารปนเปื้อนไปตามการไหลของน้ำใต้ดินด้วยความเร็วการไหลน้ำใต้ดิน การแพร่ (Diffusion) คือกระบวนการถ่ายเทมวลในระดับโมเลกุล ที่เกิดจากความแตกต่างของความเข้มข้น กล่าวคือสารละลายจะเคลื่อนที่จากบริเวณที่มีความเข้มข้นสูงไปสู่บริเวณที่มีความเข้มข้นต่ำ การกระจายตัว (Dispersion) คือกระบวนการของการผสม ซึ่งเกิดจากความแปรปรวนของความเร็วการไหลในตัวกลางรูพรุน การดูดติดผิว (Adsorption) เป็นการแยกสารปนเปื้อนจากสารละลายไปติดอยู่บนผิวของแข็ง การย่อยสลายทางชีววิทยา (Biodegradation) เป็นการเปลี่ยนรูปจากสารอินทรีย์ไปเป็นน้ำและคาร์บอนไดออกไซด์โดยอาศัยจุลินทรีย์ใต้ดิน

กระบวนการทั้ง 5 กระบวนการ มีการวิเคราะห์รายละเอียดต่าง ๆ ทั้งในห้องปฏิบัติการและในภาคสนาม ได้มีการสร้างคอลัมน์ดินขึ้นในห้องปฏิบัติการ โดยบรรจุสารประกอบอินทรีย์คล้าย ๆ กับที่พบบริเวณที่มีการทิ้งของเสียอันตราย ค่าสัมประสิทธิ์การกระจายตัว (Dispersion Coefficient) อัตราของการดูดติดผิว (Rate of Adsorption) และการย่อยสลายทางชีววิทยา

(Biodegradation) จะสามารถประเมินได้จากคอลัมน์ดินนี้ที่เติมสารตามรอย (Tracer) ที่ด้านท้ายด้านหนึ่ง และทำการเก็บข้อมูลที่ทางน้ำออก ในรูปฟังก์ชันของเวลา

### 3.3.1 การพา (Advection Processes)

การพา คือ การเคลื่อนที่ของสารปนเปื้อนไปตามการไหลของน้ำใต้ดินด้วยความเร็วการไหลของน้ำใต้ดิน ซึ่งจะขึ้นอยู่กับค่าความชันของการไหล ( $\frac{dH}{dL}$ ) และค่าความพรุนประสิทธิผล (n) สามารถอธิบายได้ด้วยกฎของ Darcy ดังสมการที่ 3.6 และ 3.7

$$\text{Darcy' s velocity : } q = -K \frac{dH}{dL} \quad (3.6)$$

$$\text{Seepage velocity : } v_x = \frac{q}{n} = \frac{-K}{n} \left( \frac{dH}{dL} \right) \quad (3.7)$$

โดย  $n$  = ค่าความพรุนประสิทธิผล (Effective porosity)  
 $\frac{dH}{dL}$  = ค่าความชันการไหล  
 $K$  = ค่าคงที่

### 3.3.2 การแพร่และการกระจายตัว (Diffusion and Dispersion Processes)

การแพร่ (Diffusion) เป็นกระบวนการในระดับโมเลกุล เกิดขึ้นจากความแตกต่างของความเข้มข้น (Concentration Gradient) และการเคลื่อนที่แบบสุ่ม (Random Motion)

การแพร่เกิดจากการที่สารละลายในน้ำเดินทางจากบริเวณที่มีความเข้มข้นสูง ไปสู่บริเวณที่มีความเข้มข้นต่ำ การเคลื่อนที่ด้วยการแพร่สามารถเกิดขึ้นได้ในที่ที่ไม่มีความเร็วการไหลของน้ำใต้ดินก็ได้ การเคลื่อนที่ของมวล (Mass Transport) ของการแพร่ได้ผิวดินในรูป 1 มิติ (One Dimension) สามารถอธิบายได้ด้วยกฎของการแพร่ข้อแรกของ Fick (Fick's First Law of Diffusion) ดังสมการที่ 3.8

$$F = -D_d \left( \frac{dC}{dX} \right) \quad (3.8)$$

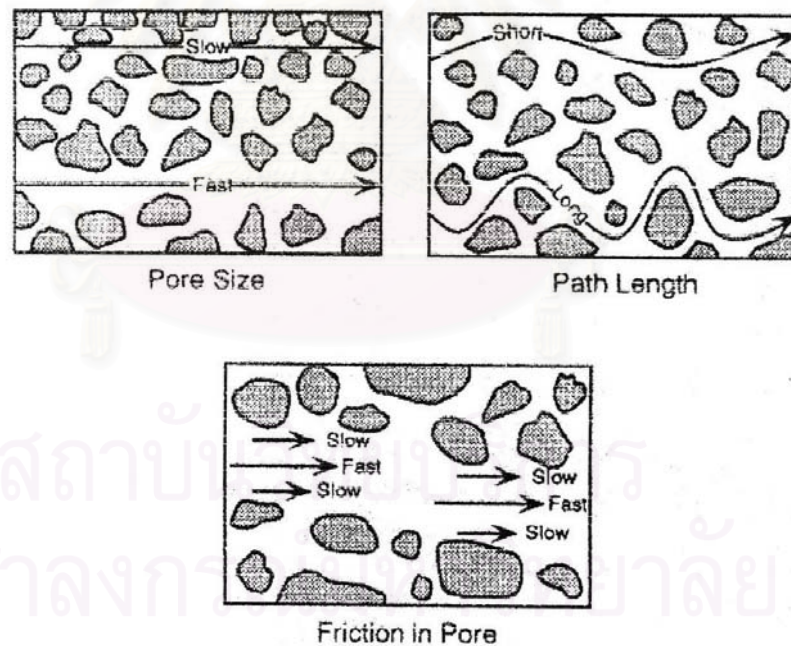
โดย  $F$  = ค่าฟลักซ์ (flux) ของสารละลายต่อหน่วยพื้นที่ ( $M/L^2T$ )  
 $D_d$  = ค่าคงที่การแพร่ (diffusion coefficient) ( $L^2/T$ )  
 $C$  = ความเข้มข้นของสารละลาย ( $M/L^3$ )

$$\left(\frac{dC}{dX}\right) = \text{ความแตกต่างความเข้มข้น (concentration gradient) (M/L}^3\text{/L)}$$

(-) แสดงทิศการเคลื่อนที่จากความเข้มข้นสูงไปยังความเข้มข้นต่ำ

การแพร่มักจะมีผลเฉพาะในกรณีที่มีความเร็วในการไหลต่ำ เช่น ในชั้นดินแน่น หรือ ชั้นดินเหนียว หรือ ในกรณีที่การเคลื่อนที่ของมวลใช้เวลายาวนาน ค่า  $D_d$  มีค่าค่อนข้างคงที่ โดยอยู่ในช่วง  $1 \times 10^{-9}$  ถึง  $2 \times 10^{-9}$  ตารางเมตรต่อวินาที ที่ 25 องศาเซลเซียส

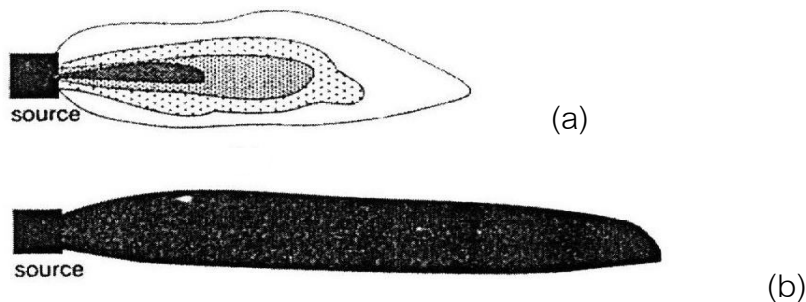
การกระจายตัว (Dispersion) เป็นการเคลื่อนที่ในลักษณะเดียวกับการแพร่ แต่ในระดับที่สูงกว่า การกระจายตัวเกิดขึ้นจากความแปรปรวนของความเร็วการไหลและเส้นทางของการไหล ซึ่งความแปรปรวนนี้สามารถเกิดได้จากแรงเสียดทานในช่องทางการไหล ความแตกต่างของความเร็วในการไหลระหว่างช่องทาง หรือความยาวของช่องทางในการไหล สาเหตุของความแปรปรวนแสดงในรูปที่ 3.4 จากการศึกษา Column Test ในห้องปฏิบัติการ ซึ่งให้เห็นว่าการกระจายตัวเป็นฟังก์ชันของความเร็วการไหล และค่าที่เรียกว่า Dispersivity ( $\alpha$ )



รูปที่ 3.4 ปัจจัยที่ทำให้เกิดการกระจายตัวตามยาว (Longitudinal Dispersion,  $D_x$ )

(Phillip และคณะ, 1999)





รูปที่ 3.5 รูปแบบธรรมชาติของพлум (Plume) เปรียบเทียบระหว่าง  
 (a) การพารวมกับการกระจายตัว  
 (b) การพาอย่างเดียว (Phillip และคณะ, 1999)

### 3.4 การดูดติดผิว (Adsorption)

#### 3.4.1 การดูดติดผิว (Adsorption)

การดูดติดผิว หรือการดูดซับ เป็นกระบวนการที่เกี่ยวข้องกับการสะสมความเข้มข้นของอนุภาคที่ผิวหน้า หรือระหว่างผิวของสารสองสถานะ ไม่ว่าจะเป็นสถานะของแข็งหรือของเหลว ก๊าซกับของเหลว หรือก๊าซกับของแข็ง หรือของเหลวกับของแข็ง โดยโมเลกุลหรือคอลลอยด์ที่ถูกดูดซับเรียกว่า สารถูกดูดซับ (Adsorbate) ส่วนของแข็งที่มีพื้นที่ผิวเป็นที่เกาะจับของสารถูกดูดซับ เรียกว่า สารดูดซับ (Adsorbent)

สารปนเปื้อนที่ละลายในน้ำใต้ดินหลายชนิดจะถูกแยกออกจากสารละลายได้โดยกระบวนการดูดติดผิว ระหว่างที่สารปนเปื้อนนี้เคลื่อนที่ผ่านช่องว่างรูพรุนของดินในชั้นอุ้มน้ำ (Aquifer) ซึ่งจากกระบวนการนี้ สารปนเปื้อนที่ละลายในชั้นน้ำใต้ดินบางส่วนจะถูกแยกออกจากสารละลาย ส่งผลให้การเคลื่อนที่ของสารปนเปื้อนถูกหน่วง (Retardation) ทำให้เคลื่อนที่ด้วยความเร็วลดลง

#### 3.4.2 กลไกการดูดติดผิว (Adsorption Mechanism)

การดูดติดผิวสามารถแบ่งได้สองประเภท คือ การดูดติดผิวทางกายภาพ และการดูดติดผิวทางเคมี โดยขึ้นกับธรรมชาติของแรงที่เข้ามาเกี่ยวข้อง

การดูดติดผิวทางกายภาพ (Physical Adsorption) บนของแข็ง เชื่อว่าเป็นคุณสมบัติของแรงระหว่างผิวหน้าของของแข็งกับโมเลกุลของสารถูกดูดติดผิว ซึ่งเรียกว่า แรงแวนเดอร์วาลส์ (Van der Waals Forces) แรงดังกล่าวซึ่งเกี่ยวข้องกับอิเล็กตรอนและนิวคลีไอของระบบ ได้แก่ แรงทางไฟฟ้าสถิตย์ (Electrostatic Force) และแรงกระจาย (Dispersion Force) แรงกระจายมี

อยู่ทั่วไปในวัตถุทุกชนิดและเป็นแรงดึงดูดระหว่างอะตอมหรือโมเลกุลที่อยู่ติดกัน การดูดติดผิวทางกายภาพจะเกิดขึ้นแบบหลายชั้น (Multilayers) โดยแต่ละชั้นของโมเลกุลจะติดอยู่กับชั้นของโมเลกุลก่อนหน้า โดยจำนวนชั้นเป็นสัดส่วนกับความเข้มข้นของโมเลกุลของสารที่ถูกดูดติดผิว หรือจำนวนชั้นของโมเลกุลจะเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของสารที่ถูกดูดติดผิวเพิ่มขึ้น

การดูดติดผิวทางเคมี (Chemical Adsorption) เกิดจากปฏิกิริยาระหว่างสารดูดติดผิวและสารที่ถูกดูดติดผิวเกิดเป็นสารประกอบทางเคมีขึ้น ซึ่งเป็นผลมาจากการถ่ายโอนอิเล็กตรอนและการเปลี่ยนรูปของพันธะเคมีระหว่างสารดูดซับกับผิวหน้าของของแข็ง เนื่องจากการดูดติดผิวทางเคมีเกี่ยวข้องกับพันธะเคมี จึงมักเกิดที่อุณหภูมิสูง และมีความสัมพันธ์กับพลังงานกระตุ้น (Activation Energy) ดังนั้นจึงทำให้โมเลกุลที่ถูกดูดซับติดอยู่ที่ใดที่หนึ่งเฉพาะที่ และไม่สามารถเคลื่อนที่ไปมาบนพื้นผิวดังกล่าวได้ อาจกล่าวได้ว่าการดูดติดผิวทางเคมีเป็นปฏิกิริยาแบบไม่ย้อนกลับ และเป็นการดูดซับแบบชั้นเดียว (Monolayer)

การดูดติดผิวทางกายภาพสามารถแบ่งแยกออกจากการดูดติดผิวทางเคมีได้ เมื่อเป็นไปตามข้อใดข้อหนึ่งหรือมากกว่า ตามที่กล่าวดังต่อไปนี้

1. การดูดซับทางกายภาพ เป็นแรงที่เกี่ยวกับสารชนิดเดียว ที่สามารถเกิดย้อนกลับได้ (Reversible) กล่าวคือสามารถเกิดการคายสารออก (Desorption) ที่อุณหภูมิเดียวกัน แม้กระบวนการที่เกิดจะเป็นไปอย่างช้า ๆ ทั้งนี้เนื่องจากผลของการแพร่ โดยไม่มีความเกี่ยวข้องกับการแบ่งหรือการถ่ายโอนอิเล็กตรอน ซึ่งการดูดซับทางเคมีจะเกี่ยวข้องกับพันธะเคมี และไม่สามารถเกิดการย้อนกลับได้ (Irreversible)

2. การดูดซับทางกายภาพไม่เจาะจงบริเวณที่จะเกิดการดูดซับ โมเลกุลที่ถูกดูดซับมีอิสระที่จะเคลื่อนย้ายตัวเองได้ตลอดทั้งพื้นผิว สามารถวัดพื้นที่ของของแข็งของสารดูดซับได้ ในทางตรงกันข้าม การดูดซับทางเคมีเป็นการดูดซับเฉพาะที่ โมเลกุลที่ถูกดูดซับทางเคมีจะติดอยู่กับบริเวณที่เจาะจงให้เกิดการดูดซับเท่านั้น

3. ความร้อนที่เกิดขึ้นของการดูดซับทางกายภาพ จะมีอุณหภูมิต่ำกว่าจากการดูดซับทางเคมี ซึ่งความร้อนสูงสุดที่เกิดจากการดูดซับทางกายภาพอาจสูงกว่า 20 kcal/mol ของสารดูดซับที่มีรูพรุนเล็กมาก ๆ ส่วนความร้อนจากการดูดซับทางเคมีอยู่ในช่วงค่าที่สูงกว่า 100 kcal/mol และต่ำกว่า 20 kcal/mol

จะเห็นได้ว่ากระบวนการดูดติดผิว เป็นปรากฏการณ์ที่ซับซ้อน มีสาเหตุจากหลายกลไก กล่าวโดยรวมคือ แรงวันเดอร์วาลส์ (Van der Waals Forces) แรงคูลอมบ์ (Coulombic Forces) แรงไฮโดรโฟบิก (Hydrophobic Forces) พันธะไฮโดรเจน (Hydrogen Bond) การแลกเปลี่ยนลิแกนด์ (Ligand Exchange) และการเกิดปฏิกิริยาทางเคมี (Chemical Reaction) เป็นต้น

นอกจากนี้ ในช่องว่างรูพรุนของดินในชั้นดินอุ้มน้ำ ส่วนประกอบสำคัญที่มีผลต่อการดูดติดผิว คือ สารอินทรีย์และคุณสมบัติของวัสดุดินเหนียว (Clay Material)

### 3.4.3 การเคลื่อนที่ของการดูดติดผิว (Adsorption Kinetic)

การเคลื่อนที่ของการดูดติดผิว เป็นกระบวนการที่เกี่ยวข้องกับอัตราการเคลื่อนย้ายโมเลกุล (Rate of Molecular Transfer) ซึ่งมีความสำคัญต่อการดูดติดผิวสารละลายบนสารดูดติดผิวที่มีรูพรุน สามารถอธิบายได้ดังนี้

1. **การดูดติดผิวขั้นแรก** เป็นการขนส่งสารถูกดูดติดผิวทั้งก้อน (Bulk Transfer) โดยวิธีการแพร่ของโมเลกุลจากสารละลายไปยังพื้นผิวภายนอกของชั้นของเหลวบาง ๆ ที่หุ้มอยู่ที่ผิวของสารดูดติดผิว เรียกว่า การแพร่ภายนอก (External or Film diffusion)

2. **การดูดติดผิวขั้นที่สอง** เป็นการแพร่ภายใน (Internal diffusion) เกี่ยวข้องกับการขนส่งชั้นฟิล์มของสารถูกดูดติดผิวจากผิวหน้าของอนุภาคเข้าสู่พื้นผิวภายใน (Film Transport) โดยวิธีการแพร่เข้าไปในรูพรุนที่เต็มไปด้วยของเหลวเข้าถึงช่องว่างของสารดูดติดผิว และเคลื่อนที่ไปตลอดพื้นผิวรูพรุนของของแข็งนั้น (Surface Diffusion)

3. **การดูดติดผิวขั้นที่สาม** เป็นการดูดติดผิวของสารถูกละลายที่อยู่ในพื้นผิวของรูพรุน ซึ่งมีการแพร่ของสารดูดติดผิว (Pore Diffusion) กล่าวว่าได้เป็น การขนส่งภายในอนุภาค (Intraparticle Transport) การดูดติดผิวในขั้นนี้เกิดขึ้นอย่างรวดเร็วมากจึงไม่มีอิทธิพลต่อการเคลื่อนที่โดยรวม

อัตราการดูดติดผิวทั้งหมดถูกควบคุมโดยขั้นตอนที่เกิดช้าที่สุด ซึ่งอาจเป็นได้ทั้งการแพร่ภายใน (Internal diffusion) และการแพร่ภายนอก (External diffusion) อย่างไรก็ตาม การควบคุมอัตราการเกิดปฏิกิริยาในบางระบบอาจเปลี่ยนแปลง โดยอาจเกิดระหว่างการขนส่งภายในอนุภาค (Intraparticle Transport) และการแพร่ภายนอก (External diffusion)

จากที่กล่าวมาข้างต้น มีความเป็นไปได้ในการคำนวณปริมาณความเข้มข้นของสารปนเปื้อนที่ถูกดูดติดผิวในช่องว่างรูพรุนของดินในชั้นดินอุ้มน้ำได้ โดยการแสดงปริมาณสารถูกดูดติดผิวหรือตัวถูกละลายที่ถูกดูดติดผิวต่อหน่วยของสารดูดติดผิว ในแง่ของความเข้มข้นของสารละลายที่สภาวะสมดุล ที่อุณหภูมิคงที่ เรียกว่า ไอโซเทอมของการดูดติดผิว (Adsorption Isotherm) โดยจะกล่าวแยกเป็นสองชนิดของกระบวนการดูดติดผิว และการคายตัว คือ

#### 1. การดูดติดผิวแบบสมดุล (Equilibrium or Instantaneous Adsorption / Desorption)

- ไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบเส้นตรง (Linear Adsorption Isotherm)
- ไอโซเทอมการดูดติดผิวของแลงมัวร์ (Langmuir Adsorption Isotherm)

- ไอโซเทอมการดูดติดผิวของฟรอนด์ลิช (Freundlich Adsorption Isotherm)

## 2. การดูดติดผิวแบบไม่สมดุล (Non-Equilibrium or Kinetic Adsorption / Desorption)

### 3.4.4 การดูดติดผิวแบบสมดุล (Equilibrium or Instantaneous adsorption)

การดูดติดผิวของสารละลายเกี่ยวข้องกับความสัมพันธ์ของตัวถูกละลาย ที่อยู่บนผิวหน้าของสารดูดติดผิว เมื่อกระบวนการดูดติดผิวเกิดขึ้น ตัวถูกละลายที่ถูกดูดติดผิวจะมีแนวโน้มที่จะหลุดออกมาสู่สารละลายอีกครั้งหนึ่ง ตัวถูกละลายจะเกิดการถูกดูดติดผิวและหลุดออกมาในจำนวนเท่า ๆ กันที่เวลาเดียวกัน จนกว่าจะเกิดสภาวะสมดุล ซึ่งเป็นสภาวะที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารที่ถูกดูดติดผิวหรือตัวถูกละลายในสารละลายอีกต่อไป

โดยทั่วไปกระบวนการดูดติดผิวในรูปของดินในชั้นดินอุ้มน้ำ มักสมมติในเงื่อนไขที่อยู่ในสภาวะสมดุล ซึ่งปฏิกิริยาการเกิดการดูดติดผิวจะเกิดขึ้นเร็วเพียงพอกับความเร็วในการไหลของน้ำใต้ดิน เพื่อที่สามารถออกแบบระบบบำบัดได้ในกรณีเช่นนี้ โดยการแสดงปริมาณสารที่ถูกดูดติดผิวหรือตัวถูกละลายที่ถูกดูดติดผิวต่อหน่วยของสารดูดติดผิว ในแง่ของความเข้มข้นของสารละลายที่สภาวะสมดุลที่อุณหภูมิคงที่เรียกว่า ไอโซเทอมของการดูดติดผิว (Adsorption Isotherm) ซึ่งจะกล่าวถึงแต่ละไอโซเทอมโดยสังเขป ดังนี้

#### 1. ไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบเส้นตรง (Linear Adsorption Isotherm)

ไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบเส้นตรง เป็นการอธิบายสมดุลของการดูดติดผิวที่ง่ายที่สุด โดยปริมาณของสารละลายที่ถูกดูดติดผิว เป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเข้มข้นของสารที่ละลาย โดยส่วนมากจะอธิบายการดูดติดผิวของสารอินทรีย์เป็นส่วนมาก โดยสามารถแสดงโดยสมการ 3.9 และรูปที่ 3.6 ได้ดังนี้

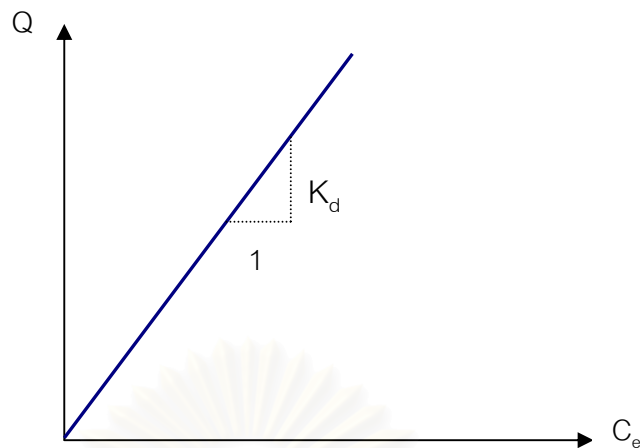
$$Q = K_d C_e \quad (3.9)$$

$$Q = S = \frac{x}{m} = \text{ปริมาณของตัวถูกละลายที่ถูกดูดติดผิวต่อหนึ่งหน่วยน้ำหนักของ}$$

สารดูดติดผิว, (mg/kg)

$$K_d = \text{ค่าคงที่ของการกระจาย, (L/kg)}$$

$$C_e = \text{ความเข้มข้นของสารละลาย, (mg/L)}$$



รูปที่ 3.6 Linear Adsorption Isotherm (David และ Paul, 1997)

## 2. ไอโซเทอมการดูดซับของแลงมัวร์ (Langmuir Adsorption Isotherm)

สมการของแลงมัวร์ เป็นสมการที่อธิบายการดูดซับแบบชั้นเดียว ที่มีสมมติฐานดังนี้

1. โมเลกุลจะถูกดูดซับบนพื้นที่ผิวที่จำกัดของการดูดซับ
2. แต่ละพื้นที่ที่ถูกดูดซับจะเกิดการดูดซับเพียงชั้นเดียว
3. พื้นที่ในแต่ละแห่งจะถูกจำกัดปริมาณของสารที่ถูกดูดซับด้วยสภาพทางเรขาคณิตของพื้นผิวนั้น ๆ
4. พลังงานในการดูดซับจะมีค่าเท่ากันในทุกบริเวณพื้นผิวของสารดูดซับ

นอกจากนี้โมเลกุลของสารถูกดูดซับจะไม่สามารถเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระตลอดพื้นผิวของสารดูดซับหรือข้ามไปยังโมเลกุลอื่นได้

สมการการดูดซับของแลงมัวร์ แสดงได้ ดังนี้

$$Q = \frac{abC_e}{(1 + bC_e)} \quad (3.10)$$

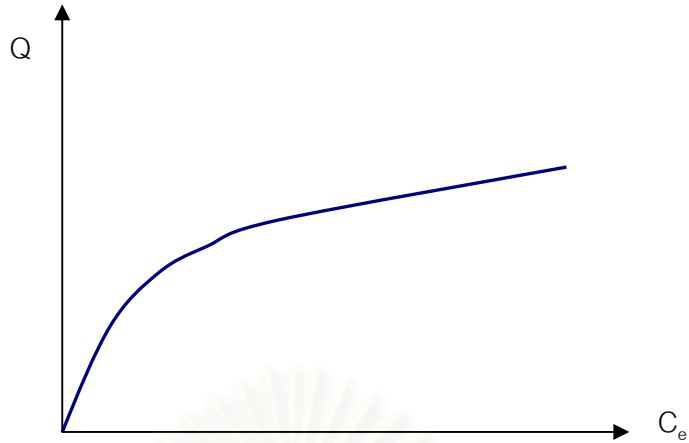
$Q$  =  $S = x/m$  ปริมาณของตัวถูกละลายที่ถูกดูดซับต่อหนึ่งหน่วยน้ำหนักของสารดูดซับ, (mg/kg)

$C_e$  = ความเข้มข้นของตัวถูกละลายที่สภาวะสมดุล (mg/L)

$a$  =  $Q^\circ$  = ปริมาณของตัวถูกละลายที่ถูกดูดซับต่อหนึ่งหน่วยน้ำหนักของสารดูดซับที่ต้องการสำหรับความสามารถในการเกิด Monolayer (mg/kg)

$b$  = ค่าคงที่ของระบบ

โดยสามารถแสดงการเขียนกราฟได้ดังรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 Langmuir Adsorption Isotherm (David และ Paul, 1997)

### 3. ไอโซเทอมการดูดติดผิวของฟรุนดลิช (Freundlich Adsorption Isotherm)

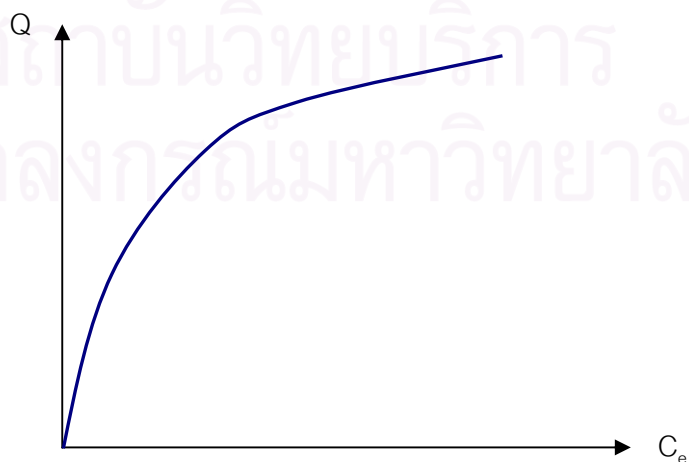
สมการของไอโซเทอมของการดูดติดผิวของฟรุนดลิช เป็นสมการการดูดติดผิวทางคณิตศาสตร์ที่ใช้กันอย่างกว้างขวางที่สุด มีสมมติฐานว่า การดูดติดผิวเกิดขึ้นไม่เท่ากันตลอดผิวหน้า และพลังงานการดูดติดผิวมีค่าไม่สม่ำเสมอ ซึ่งมีความสัมพันธ์แสดงได้ดังสมการ 3.11 และเขียนกราฟได้ดังรูปที่ 3.8

$$Q = K_F C_e^{1/n} \quad (3.11)$$

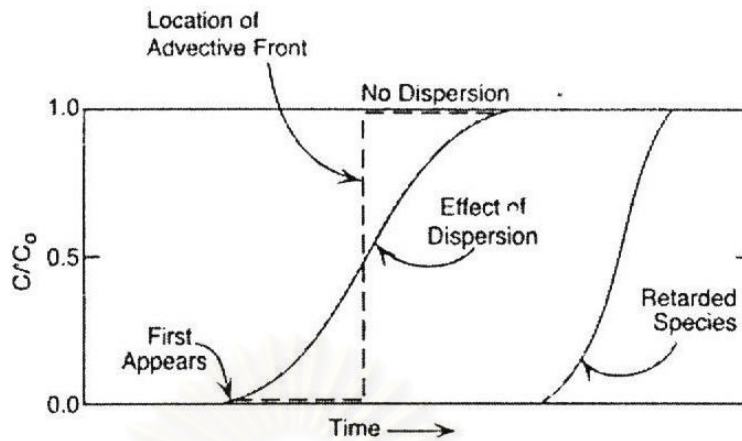
$Q$  = ปริมาณของตัวถูกละลายที่ถูกดูดติดผิวต่อหนึ่งหน่วยน้ำหนักของสารดูดติดผิว (mg/kg)

$C_e$  = ความเข้มข้นที่สภาวะสมดุลของตัวถูกละลาย (mg/L)

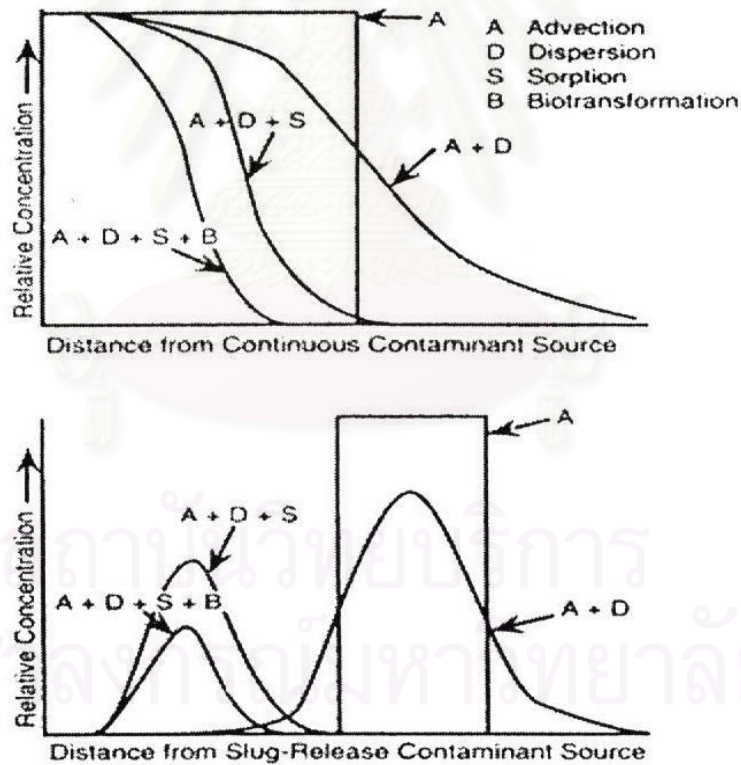
$K_F, 1/n$  = ค่าคงที่ของระบบ



รูปที่ 3.8 Freundlich Adsorption Isotherm (David และ Paul, 1997)



รูปที่ 3.9 Breakthrough Curve แสดงให้เห็นผลของการกระจายตัว (Dispersion) และการดูดซับแบบหน่วงต่อการเคลื่อนที่ 1 มิติของสารปนเปื้อน (Phillip และคณะ, 1999)



รูปที่ 3.10 ผลของการกระจาย การพา และการหน่วงต่อการเคลื่อนที่ของสารปนเปื้อนในชั้นน้ำใต้ดิน (Phillip และคณะ, 1999)

### 3.4.5 การดูดติดผิวแบบไม่สมดุล (Non-Equilibrium or Slow or Kinetic Adsorption)

ในหลาย ๆ กรณีที่เราไม่สามารถสมมติให้กระบวนการดูดติดผิวหรือการคายตัวเป็นกระบวนการแบบสมดุลได้ โดยเฉพาะในกรณีที่ชั้นดินอุ้มน้ำ ไม่เป็นเนื้อเดียวกัน (Heterogeneous Aquifer) เมื่อน้ำและสารปนเปื้อนละลายเคลื่อนที่เร็วมาก ๆ ในส่วนชั้นที่น้ำซึมผ่านได้ดีกว่า หรือช้ามาก ๆ เช่น ในลักษณะของชั้นดินอุ้มน้ำที่เป็นชั้นดินเหนียว อย่างไรก็ตามการแพร่ (Diffusion) เป็นกระบวนการที่ทำให้สารปนเปื้อนละลายเคลื่อนที่ในชั้นดินอุ้มน้ำที่ซึมผ่านได้ยาก ดังนั้นกระบวนการที่เกิดอย่างช้า ๆ นี้เป็นลักษณะที่ไม่เป็นสมดุล กล่าวคือ การดูดติดผิวหรือการคายตัวจะเป็นในลักษณะที่ขึ้นกับเวลา (Time-dependent) เช่น ในกรณีเมื่อพหุมวลสารปนเปื้อน เคลื่อนที่ผ่านชั้นดินอุ้มน้ำที่มีความสามารถซึมผ่านของน้ำที่มากกว่า สารปนเปื้อนจะถูกดูดติดผิวมาก ทำให้สารปนเปื้อนละลายเริ่มน้อยลง โดยในสภาวะนี้การคายตัวอย่างช้า ๆ (Slow Kinetic Desorption) เริ่มเกิดขึ้นโดยจะเคลื่อนสารปนเปื้อนจากชั้นดินอุ้มน้ำที่ซึมผ่านน้ำได้น้อยไปสู่ชั้นที่ซึมผ่านน้ำได้มากกว่า นี่เป็นตัวอย่างหนึ่งในการล้มเหลวของการฟื้นฟูบำบัด ด้วยระบบ Pump and Treat ซึ่งถึงแม้ว่าจะชะล้างด้วยน้ำหลาย ๆ ครั้ง การคายตัวของสารปนเปื้อนก็จะเกิดขึ้นอย่างช้า ๆ ทำให้การคำนวณระยะเวลาผิดพลาดได้ โดยสามารถแสดงการดูดติดผิวแบบไม่สมดุล (Non-Equilibrium or Slow or Kinetic Adsorption) ได้ดังสมการ ดังนี้ (Leij และคณะ, 1995)

$$\frac{\partial S_2}{\partial t} = k_d [(1-F)K_d C - S_2] \quad (3.12)$$

การดูดติดผิวทำให้การเคลื่อนที่ของสารปนเปื้อนละลายเคลื่อนที่ได้ช้าลงและเมื่อความเร็วเฉลี่ยของสารปนเปื้อนละลายน้อยกว่าความเร็วของน้ำในช่องว่างรูพรุน (Pore Water Velocity) ของน้ำใต้ดิน นั่นคือ สารปนเปื้อนละลายจะถูกหน่วงให้การเคลื่อนที่ช้าลง โดยพิจารณาจากค่าการหน่วงการเคลื่อนที่ (Retardation Factor; R) ซึ่งสามารถหาได้สมการการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้น โดยการรวมการพา การกระจายตัว การดูดติดผิว (Leij และคณะ, 1995) ดังนี้

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial X^2} - v \frac{\partial C}{\partial x} - \left( \frac{\rho_b}{n} \right) \left( \frac{\partial S}{\partial t} \right) \quad (3.13)$$

- S = ปริมาณสารปนเปื้อนที่ถูกดูดติดผิว (mg/Kg)
- C = ความเข้มข้นของสารปนเปื้อนละลาย (mg/L)
- $\rho_b$  = ความหนาแน่นแห้งของดิน (kg/m<sup>3</sup>)
- n = ความพรุนของดิน



### 3.4.6 แบบจำลองการเคลื่อนที่ของสารปนเปื้อนแบบ 1 มิติ (One Dimensional Transport Model)

แบบจำลองการเคลื่อนที่แบบ 1 มิตินี้เป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์หนึ่งที่สามารถนำมาใช้ในการหาความสัมพันธ์ของตัวแปรในการเคลื่อนที่ของสารปนเปื้อนในชั้นน้ำใต้ดินโดยมีสมมติฐานดังต่อไปนี้

1. สารตามรอย (Tracer) มีความหนาแน่น และความหนืดคงที่
2. ของไหลไม่มีการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติเมื่อมีการอัดตัว
3. ตัวกลางมีคุณสมบัติเหมือนกันและมีเนื้อเดียวกัน
4. แบบจำลองนี้จะใช้ได้ในการไหลผ่านตัวกลางอิมมิตัวเท่านั้น

ซึ่งแบบจำลองนี้จะแสดงได้ตามสมการคณิตศาสตร์ดังนี้

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial X^2} - v \frac{\partial C}{\partial x} - \left( \frac{\rho_b}{n} \right) \left( \frac{\partial S}{\partial t} \right) K_b t \quad (3.14)$$

S = ปริมาณสารปนเปื้อนที่ถูกดูดติดผิว (mg/kg)

C = ความเข้มข้นของสารปนเปื้อนละลาย (mg/L)

$\rho_b$  = ความหนาแน่นแห้งของดิน (Bulk dry density, kg/m<sup>3</sup>)

n = ความพรุนของดิน (Porosity)

v = ความเร็วเฉลี่ยในการไหล (Pore water velocity, cm/hr)

D = ค่าคงที่การกระจาย (Dispersion coefficient, cm<sup>2</sup>/hr)

$K_b$  = ค่าคงที่ของการย่อยสลายในระบบ (Decay coefficient, hr<sup>-1</sup>)

ในระบบที่ไม่มีการสร้างหรือย่อยสลายจะได้อิงสมการที่ 3.13

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial X^2} - v \frac{\partial C}{\partial x} - \left( \frac{\rho_b}{n} \right) \left( \frac{\partial S}{\partial t} \right) \quad (3.13)$$

ในระบบเมื่อมีการดูดติดผิวเกิดขึ้น จะสามารถนำแบบจำลองมาประยุกต์ใช้ได้ เช่น

Langmuir Adsorption Isotherm

$$Q = \frac{abC_e}{(1 + bC_e)} \quad (3.10)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} = \frac{ab}{(1+bC)^2} \frac{\partial C}{\partial t} \quad (3.15)$$

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial X^2} - v \frac{\partial C}{\partial x} - \left( \frac{\rho_b}{n} \right) \left( \frac{ab}{(1+bC)^2} \right) \left( \frac{\partial Q}{\partial t} \right) \quad (3.16)$$

จัดรูปใหม่ได้เป็น

$$R \frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial X^2} - v \frac{\partial C}{\partial x} \quad (3.17)$$

โดยที่

$$R = 1 + \frac{\rho_b}{n} \frac{ab}{(1+bC)^2} \quad (3.18)$$

ซึ่ง R คือ ค่าการหน่วงการเคลื่อนที่ (Retardation Factor)

ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ สามารถใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์สำเร็จรูปซึ่งพัฒนาโดย U.S. Salinity Laboratory, USDA, ARS, Riverside, California ในการทำนายการเคลื่อนที่ผ่านตัวกลางที่มีรูพรุนที่อิ่มตัวและไม่อิ่มตัว หรือ อิ่มตัวบางส่วนได้

โดยโปรแกรมสำเร็จรูปที่อาจเลือกมาใช้ทำนายการเคลื่อนที่ในคอลัมน์ทดลองเช่น CXTFIT, CFITM, CFITIM, และ HYDRUS โดยมีสมมติฐานการใช้งาน คือ “ ไม่ว่าจะด้วยเหตุผลทางกายภาพหรือทางเคมี การดูดติดผิวจะไม่สามารถเกิดขึ้นในอัตราที่เท่ากันในทุกส่วนของอนุภาคดิน ” และสมการการเคลื่อนที่ 1 มิติ (One – Dimensional Equation) ที่ใช้ในโปรแกรมเหล่านี้คือ สมการ 3.13 ดังกล่าวด้านบน (USDA-ARS, 1998)

CXTFIT เป็นโปรแกรมเพื่อประมาณค่าพารามิเตอร์การเคลื่อนที่ในสารละลาย โดยใช้วิธี nonlinear least-squares เช่นสามารถประมาณค่า dispersion coefficients (D), distribution coefficient ( $K_d$ ) หรือ pore water velocity (v) และสามารถใส่โปรแกรมหาค่าความเข้มข้นซึ่งเป็นฟังก์ชันของเวลาหรือระยะทาง มีสมมติฐานการใช้งานนี้ในโปรแกรม คือ

1. การไหลของน้ำเป็นภาวะคงตัว (steady state)
2. ปริมาณน้ำและดินคงที่
3. ไม่มีการทำปฏิกิริยาระหว่างสารเคมีและสถานะของแข็ง

CFITM เพื่อวิเคราะห์ข้อมูลของความเข้มข้นขาออกของคอลัมน์ โดยการใช้สมการ one - dimensional equilibrium convective-dispersive transport สามารถใช้เป็นโปรแกรมคำนวณแทนโปรแกรม CXTFIT เพราะใช้งานง่ายกว่า มีความซับซ้อนน้อยกว่า

CFITM ใช้คำนวณข้อมูลความเข้มข้นขาออกของคอลัมน์เช่นเดียวกับ CFITM แต่ต่างกันที่สามารถคำนวณได้ทั้งที่สมดุลและไม่สมดุล โดยใช้ one-dimensional equilibrium and nonequilibrium convective-dispersive transport การใช้สมการสำหรับทั้งโปรแกรม CFITM และ CFITM นี้ ต้องทราบค่าพารามิเตอร์ 2 ค่าก่อน คือ

1. dispersion coefficient (D)
2. distribution coefficient ( $K_d$ ) ซึ่งมีค่าแปรผันตามการดูดติดผิวหรือการแลกเปลี่ยนระหว่างสถานะของแข็งและของเหลว

โดยค่าที่ต้องป้อนเข้าโปรแกรม CFITM และ CFITM คือปริมาณน้ำที่ไหลผ่านคอลัมน์ (pore volume) และ ค่าความเข้มข้น แล้วโปรแกรมจะคำนวณเป็นค่าพารามิเตอร์ 2 ตัวดังกล่าว ดังเช่น ในตารางที่ 3.10 จะแสดงค่าสัมประสิทธิ์การกระจายตัวของดินชนิดต่าง ๆ ที่ได้จากทดลองแบบคอลัมน์ โดยใช้สารละลายทริเทียมเป็นสารตามรอย (Tracer)

ตารางที่ 3.10 ค่าสัมประสิทธิ์การกระจายตัวของดินชนิดต่าง ๆ ที่ได้จากทดลองแบบคอลัมน์ โดยใช้สารละลายทริเทียมเป็นสารตามรอย (Selim และ Kingery, 2003)

ชนิดดิน	ความยาวคอลัมน์ (ซม.)	ความเร็วการไหลผ่านรูพรุน (ซม./ซม.)	สัมประสิทธิ์การกระจายตัว (ซม. <sup>2</sup> /ซม.)
Sharkey Ap	15	4.00	4.96
Sharkey (4-6 mm)	10	1.75	9.02
Sharkey (4-6 mm)	15	1.85	7.66
Cecil (<2 mm)	15	1.07	2.39
Cecil (<2 mm)	15	2.23	8.32
Cecil (<2 mm)	15	5.21	20.8
Cecil (0.5-1.0 mm)	15	2.05	3.71
Mahan (<2 mm)	15	2.02	9.79
Mahan (<2 mm)	15	3.82	15.8
Mahan (<2 mm)	15	5.29	23.0
Dothan Ap (<2 mm)	15	2.74	11.0
Dothan Bt (<2 mm)	15	2.32	11.0
Olivier (Ap)	10	2.28	1.01

ตารางที่ 3.10 (ต่อ)

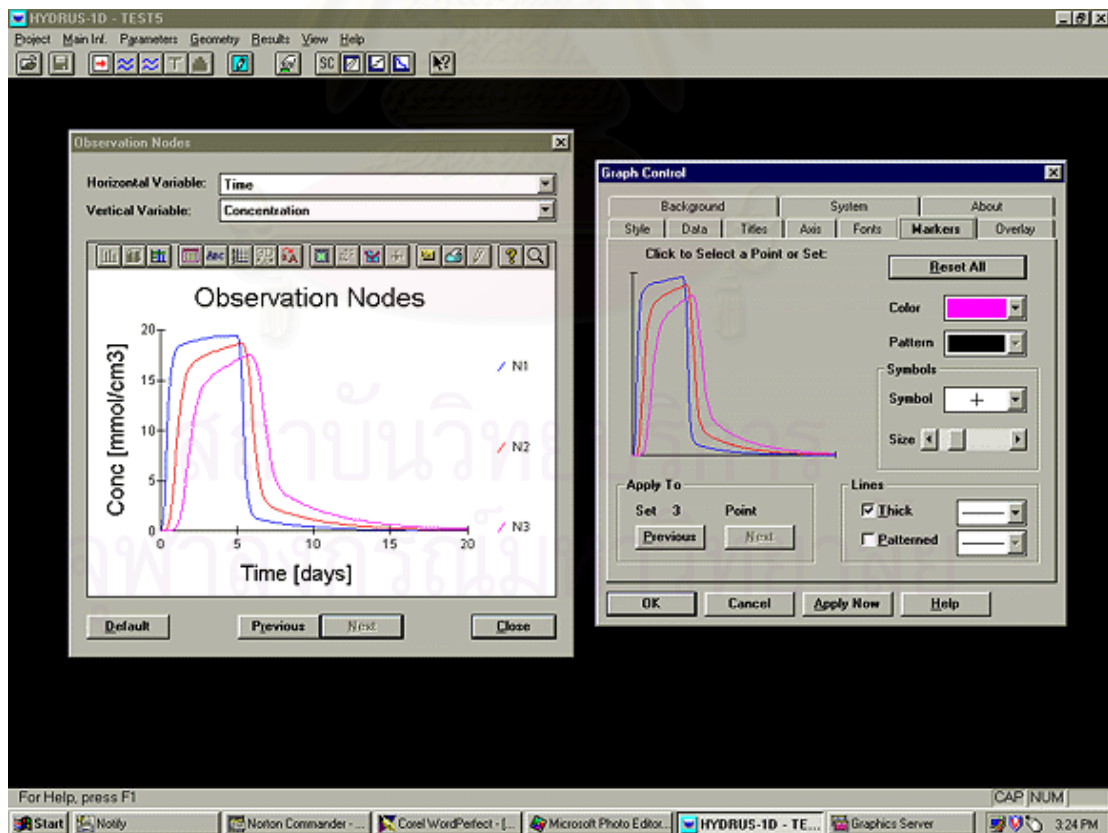
ชนิดดิน	ความยาว คอลัมน์ (ซม.)	ความเร็วการไหลผ่าน รูปพรุน (ซม./ซม.)	สัมประสิทธิ์การ กระจายตัว (ซม. <sup>2</sup> /ซม.)
Windsor (Ap)	10	1.13	0.27
Windsor (Ap)	10	3.29	3.77
Yolo (Ap)	10	1.16	0.17
Acid wash sand	15	2.92	1.10
Glass beads + sand (1:1 by weight)	15	3.08	0.73
Kaolinite + sand (1:1 by weight)	10	0.52	0.40
Bentonite + sand (1:1 by weight)	10	0.63	0.56

**HYDRUS** เขียนขึ้นด้วยโปรแกรมไฟไนต์อีลิเมนต์ (Finite element model) ในการจำลองการเคลื่อนที่ของน้ำ สารละลาย ความร้อน ในตัวกลางทั้งที่อิ่มตัวและไม่อิ่มตัว สามารถใช้ในการแสดง Breakthrough curve และใช้อธิบายการเคลื่อนที่โดยการพาและการกระจายตัว (Advective-Dispersive transport) ซึ่งสมมติฐานของการเคลื่อนที่ในรูปแบบจำลองสามารถเลือกได้เพื่อให้เหมาะสมกับสภาพจริง เช่น ปฏิกริยาระหว่างสถานะของแข็งและของเหลว แบบไม่เป็นเชิงเส้น และ/หรือ ไม่สมดุล (Nonlinear and/or nonequilibrium reactions) ปฏิกริยาระหว่างสถานะของเหลวและก๊าซ แบบเชิงเส้นสมดุล (Linear equilibrium reactions) และปฏิกริยาการย่อยสลาย เป็นต้น

ตัวอย่างข้อมูลที่ผู้ใช้โปรแกรมต้องป้อนเข้าในโปรแกรม แสดงดังตารางที่ 3.11 เพื่อโปรแกรมจะแปรค่าและแสดงผลออกมาเป็นรูปภาพ (graphic) ดังรูปที่ 3.11

ตารางที่ 3.11 ตัวอย่างค่าที่ต้องป้อนเข้าในโปรแกรม HYDRUS2D

ตัวแปร	ข้อมูล
Length Units	(cm)
Time Units, Time discretization	(Hours)
Qs	Porosity
Ks	Pore Velocity
Mass units	(g)
Pulse Duration	(hours)
Bulk. D.	Bulk density ( $\text{g/cm}^3$ )
Disp. L.	Longitudinal Dispersivity (cm)
CBnd1	Initial Concentration (mg/L)
Kd	parameter a x b
Nu	parameter b



รูปที่ 3.11 ตัวอย่างผลที่ได้จากโปรแกรม HYDRUS ซึ่งแสดงเป็นค่าต่าง ๆ ที่แปรผันตามเวลา

### 3.4.7 ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการดูดติดผิว

#### 1. ธรรมชาติของการดูดติดผิว (Nature of the adsorbent)

1.1 พื้นที่ผิวและโครงสร้างของรูพรุน เนื่องจากกระบวนการดูดติดผิวเป็นผลของความเข้มข้นของตัวถูกละลายบนพื้นผิว จึงเห็นได้ชัดว่าพื้นที่ผิวมีผลต่อความสามารถในการดูดติดผิวของสารดูดติดผิวโดยการดูดติดผิวสารละลายจะเพิ่มขึ้นเมื่อพื้นที่ผิวในการดูดติดผิวเพิ่มขึ้น

1.2 ขนาดของอนุภาค พื้นที่ผิวของสารดูดติดผิวไม่มีรูพรุนจะเพิ่มขึ้นเมื่ออนุภาคมีเล็กลง จึงทำให้ความสามารถในการดูดติดผิวเพิ่มขึ้นหารเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคลดลง อย่างไรก็ตามสำหรับสารดูดติดผิวที่มีรูพรุนสูง พื้นที่ผิวส่วนใหญ่ที่อยู่ในโครงสร้างของรูพรุนดังกล่าว ความสามารถในการดูดติดผิวจะไม่ขึ้นอยู่กับขนาดของอนุภาค

1.3 สภาพทางเคมีของพื้นผิว หมู่ฟังก์ชันที่ผิวของสารดูดติดผิวจัดเป็นปัจจัยที่มีผลต่อความสามารถในการดูดติดผิว โดยการเปลี่ยนแปลงของขั้วประจุบนผิวหน้าระหว่างการดูดติดผิวทางเคมีจะส่งผลต่อความสามารถในการดูดติดผิวสารละลายหลายชนิด

#### 2. ธรรมชาติของสารถูกดูดติดผิว

ความสามารถในการดูดติดผิวจะเพิ่มขึ้นหากคุณสมบัติของการถูกดูดติดผิวได้แก่ ความยาวของสายโซ่เพิ่มมากขึ้น ซึ่งจะทำให้โมเลกุลมีการไม่ชอบน้ำมากขึ้นและมีความสามารถละลายได้ลดลง นอกจากนี้มวลโมเลกุลที่มีค่าสูงจะทำให้ขนาดของสารถูกดูดติดผิวใหญ่ขึ้นซึ่งจะช่วยเพิ่มความสามารถในการดูดติดผิว

#### 3. ผลของไฮโดรเจน

กล่าวได้ว่าเป็นค่าพีเอช เนื่องจากพีเอชมีอิทธิพลต่อการแตกตัวของไอออนและการละลายน้ำของสารต่าง ๆ โดยความสามารถในการดูดติดผิวเพิ่มขึ้นเมื่อพีเอชของสารละลายลดลงและจะเพิ่มมากขึ้นถึงขีดสุดเมื่อพีเอชมีค่าเท่ากับ  $pK_a$

#### 4. ผลของไอออนตัวอื่น ๆ ในน้ำ

องค์ประกอบของสารอนินทรีย์ในน้ำ เช่น  $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$  สามารถส่งผลกระทบต่อ การดูดติดผิวสารอินทรีย์ในน้ำได้ เช่น การมีแคลเซียมคลอไรด์ในน้ำจะเพิ่มเนื้อที่ในการดูดติดผิวของกรดซัลฟูริก เป็นต้น

#### 5. ผลของอุณหภูมิ

เนื่องจากกระบวนการดูดติดผิวเป็นปฏิกิริยาคายความร้อน ดังนั้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ความสามารถในการดูดติดผิวจะลดลง ในทางตรงกันข้ามหากอุณหภูมิลดลงความสามารถในการดูดติดผิว จะเพิ่มขึ้น

### 3.5 การบำบัดฟื้นฟูโดยระบบสูบแล้วบำบัด (Remediation: Pump and Treat System)

การบำบัดฟื้นฟูพื้นที่ที่ปนเปื้อนด้วยสารพิษในชั้นน้ำใต้ดินในประเทศสหรัฐอเมริกาในช่วงตั้งแต่ปี ค.ศ.1982 เป็นต้นมา หน่วยงานของรัฐที่รับผิดชอบมีการใช้เทคโนโลยีการบำบัดสารปนเปื้อนต่าง ๆ ในการบำบัดฟื้นฟูพื้นที่ดังกล่าวมากมาย และวิธีนี้จัดเป็นเทคโนโลยีการบำบัดที่มีประสิทธิภาพเป็นที่ยอมรับในข้อกำหนดทางกฎหมายของสหรัฐอเมริกาที่เรียกว่า Superfund โดยมากกว่าร้อยละ 73 ของการบำบัดฟื้นฟูทั้งหมดใช้เทคโนโลยีการสูบแล้วทำการบำบัด (Pump and Treat) และจากสถานที่ปนเปื้อนดังกล่าว ได้มีการตั้งเป้าหมายการบำบัดให้นำชั้นดินอุ้มน้ำกลับมาใช้ได้ดั้งเดิมโดยที่น้ำที่สูบขึ้นมาที่มีความเหมาะสมในการใช้ดื่มได้ โดยไม่ต้องผ่านการบำบัดเพิ่มเติม แต่ในระยะเวลาที่ผ่านมาไม่นานนี้ การเลือกเทคโนโลยีต้องคำนึงถึงระยะเวลาในการบำบัดด้วย

การบำบัดฟื้นฟูโดยระบบสูบแล้วบำบัดนี้ ปฏิบัติโดยสูบน้ำจากใต้ดินมาบนพื้นดินเพื่อทำการบำบัดแยกสารปนเปื้อนออก หลังจากนั้นทำการสูบน้ำกลับเข้าสู่ใต้ดิน (Recharging) หรือทำการปล่อยลงแหล่งน้ำธรรมชาติ หรือปล่อยลงท่อระบายน้ำเสียสู่อ่างบำบัดน้ำเสียชุมชน แล้วแต่ข้อกำหนดในการบำบัดและชนิดสารปนเปื้อน อย่างไรก็ตาม การสูบน้ำใต้ดินที่ปนเปื้อนขึ้นมาขึ้นมานั้น ไม่สามารถรับประกันได้ว่าสารปนเปื้อนจะถูกแยกออกมาทั้งหมด เนื่องจากการแยกออกของสารปนเปื้อนนั้นถูกจำกัดด้วยปัจจัยหลาย ๆ อย่าง เช่น พฤติกรรมของสารปนเปื้อนชนิดในชั้นน้ำใต้ดิน สภาพธรณีวิทยาและสภาพอุทกธรณีวิทยา การออกแบบระบบการสูบ เป็นต้น

จุดประสงค์ของการทำการบำบัดฟื้นฟูโดยระบบสูบแล้วบำบัด มี 2 ข้อซึ่งแตกต่างกัน ดังนี้

1. เพื่อกักสารปนเปื้อน (Containment) ป้องกันการกระจายของสารปนเปื้อน เพื่อจุดประสงค์นี้ จึงทำการสูบที่อัตราการสูบต่ำกว่า
2. เพื่อบำบัดและนำคืน (Restoration) ต้องการแยกสารปนเปื้อนจากน้ำใต้ดินทั้งหมด จึงใช้อัตราการสูบที่มากกว่าอัตราการสูบในแบบกักบริเวณ เพื่อให้นำน้ำที่สะอาดนั้น ชะล้างสารปนเปื้อนออกมามากที่สุด แต่ต้องใช้เวลาและการลงทุนที่สูงขึ้นตามด้วย

ดังนั้นจะเห็นว่าการเลือกการปฏิบัติการบำบัดฟื้นฟูโดยระบบสูบแล้วบำบัด จำเป็นต้องทำการวิเคราะห์ปัจจัยต่าง ๆ ให้ดีเพื่อให้เหมาะสมกับชนิดสารปนเปื้อน เกณฑ์การบำบัด เวลา และงบประมาณที่ต้องใช้ทั้งหมดด้วย รวมทั้งต้องมีการจัดการกระบวนการทุกขั้นตอนโดยเฉพาะการตรวจประเมินติดตาม (Monitoring) ให้การโอนถ่ายสารปนเปื้อนถูกกำจัด (Disposal) อย่างถูกวิธีด้วย (Suthersan, 1999)

### 3.6 ข้อมูลดินในประเทศไทย

#### 3.6.1 อุณหภูมิดิน

ทุกภาคของประเทศไทย วัดที่ระดับ 50 เซนติเมตรจากผิวดินบน พบว่ามีค่าเฉลี่ยสูงกว่า 22 องศาเซลเซียส และมีค่าแตกต่างของอุณหภูมิเฉลี่ยช่วงฤดูร้อน และฤดูหนาวต่างกันน้อยกว่า 5 องศาเซลเซียส

#### 3.6.2 การจำแนกดิน

จากการสำรวจดินเพื่อจำแนกดินในประเทศไทย พบว่ามีดินมากกว่า 300 ชนิด และสามารถจำแนกดินตาม USDA soil Taxonomy ของสหรัฐอเมริกา ได้ 9 ระดับอันดับ (9 order) โดยเรียงลำดับร้อยละที่พบจากมากไปน้อย ดังนี้ (Parida และ Rungsarit, 2000)

Ultisols 42.13%, Entisols 33.75%, Inceptisols 9.4%, Alfisols 9.16%, Mollisols 1.17%, Vertisols 0.81%, Histosols 0.14%, Spodosols 0.12%, Oxisols 0.03%

โดยลักษณะของดิน 4 ระดับอันดับแรก ซึ่งเป็นดินส่วนใหญ่ของประเทศไทยเป็นดังนี้

**Ultisols** ดินชั้นล่างจะมีการสะสมอนุภาคดินเหนียว มีแร่ธาตุต่าง ๆ ที่เป็นต่างอยู่น้อย อาจเกิดจากตะกอนของแม่น้ำส่วนใหญ่ หรืออาจพบในสภาพพื้นที่เป็นแบบลูกคลื่น มีการระบายน้ำดี ใช้ปลูกพืชไร่

**Entisols** ดินเป็นทราย เกิดจากการทับถมของตะกอนน้ำจืดบนลานพักน้ำเก่าหรือตะกอนจากทะเลหรือหาดทราย (marine sediments) มีความอุดมสมบูรณ์ตามธรรมชาติต่ำ

**Inceptisols** ดินส่วนใหญ่เป็นดินร่วนปนทราย พบในบริเวณพื้นที่ราบเรียบ ใช้ในการทำนา ลักษณะของเนื้อดินในชั้นต่าง ๆ จะคล้ายคลึงกัน เกิดจากตะกอนน้ำจืดและน้ำกร่อย มีการระบายน้ำเร็ว

**Alfisols** ดินค่อนข้างเป็นดินเหนียว ส่วนใหญ่พบในพื้นที่ราบเรียบ ใช้ในการทำนา เกิดจากการพัดพามาทับถมกันของตะกอนลำน้ำค่อนข้างใหม่ และมีลักษณะที่สำคัญคือ มีการพัฒนาชั้นดิน โดยมีการเคลื่อนย้ายอนุภาคดินเหนียวจากดินชั้นบนลงมาสะสมในชั้นดินล่าง

สำหรับชนิดดินที่พบมากที่สุดที่อำเภอรัตนพิบูลย์ จังหวัดนครศรีธรรมราช ได้แก่

1. ชนิดดินพัทลุง เป็นดินร่วนเหนียวปนทรายแป้ง
2. ชนิดดินระแงะ เป็นดินร่วนเหนียวปนทรายแป้ง
3. ชนิดดินคลองเต็ง เป็นดินร่วนปนดินเหนียว
4. ชนิดดินไชยา เป็นดินร่วนปนทราย



### 3.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

**ณัฐวุฒิ นิภานันท์ (2537)** ศึกษาการกำจัดสารประกอบของอาร์เซนิก บนตัวดูดซับ โดยทำการทดลองในเครื่องปฏิกรณ์แบบแบตช์ พบว่าการกำจัดสารประกอบอาร์เซนิก ไม่ขึ้นกับความดันแต่ขึ้นกับอุณหภูมิ

**Huang (1994)** กล่าวถึงการดูดติดผิวของอาร์เซนิกโดยดินเกี่ยวข้องกับค่าพีเอช ปริมาณอาร์เซนิกที่อยู่ในดิน คุณสมบัติทางเคมีและกายภาพของดิน และค่าความสามารถการแลกเปลี่ยนประจุบวก (Cation exchange capacity, CEC) ส่วนปัจจัยที่มีผลต่อการดูดติดผิวของอาร์เซนิกโดยดิน ได้แก่ปริมาณดินเหนียว (clay และ clay mineral), ออกไซด์ต่าง ๆ และแคลเซียมและแมกนีเซียมไอออนที่สามารถแลกเปลี่ยนได้

เมื่อมีการทดลองในดินชนิดต่าง ๆ พบว่าเมื่อเพิ่มพีเอชของสารละลาย ปริมาณอาร์เซนิกที่ถูกดูดซับจะมีค่าลดลง โดยค่าพีเอชที่เพิ่มจาก 5.2 จนถึง 9.4 เป็นผลให้ปริมาณอาร์เซนิกที่ถูกดูดซับลดลง  $46.5 \mu\text{g/g}$  ของดิน และเมื่อมีการทดลองการดูดติดผิวของอาร์เซนิกในดินเมื่อมีฟอสเฟต พบว่าอาร์เซนิกสามารถถูกอามอร์ฟัสเหล็กออกไซด์ดูดติดผิวได้มากเช่นเดียวกับฟอสเฟต แต่ปริมาณและค่าความแข็งแรงของพันธะการดูดติดผิวน้อยของอาร์เซนิกกว่าฟอสเฟต และการทดลองพบอย่างชัดเจนว่าฟอสเฟตสามารถยับยั้งการดูดติดผิวของอาร์เซนิกในดิน

**Jeffrey และ Willamp (1997)** ศึกษาผลของความเร็วการไหลของน้ำผ่านรูพรุนที่มีต่อการเคลื่อนที่ของอาร์เซนิก โดยในการศึกษานี้มีจุดประสงค์เพื่อใช้แบบจำลองการเคลื่อนที่ที่คิดมาจากสมการการพาและการแพร่ (Advective - dispersion equation, ADE) ทำนายการเคลื่อนที่ของอาร์เซนิก ในสมดุลและสภาวะจลศาสตร์ที่หลากหลาย โดยทำการทดลองในคอลัมน์ทรายเต็มไอออน  $\text{AsO}_4$  ที่แต่ละความเร็วการไหลของน้ำผ่านรูพรุน (pore water velocity, PWV) ได้แก่ 0.2, 1.0, 10 และ 90 ซม./ชม. พบว่าค่าคงที่สมดุลการกระจายมีค่าลดลง หรือกล่าวคือ ปริมาณการดูดซับของไอออน  $\text{AsO}_4$  บนผิวทรายลดลงเมื่อความเร็วการไหลของน้ำผ่านรูพรุนเพิ่มขึ้น

**Manning และ Goldberg (1997)** ศึกษาการดูดติดผิวของอาร์เซนิก และ อาร์เซนิกโดยดิน 3 ชนิดที่แคลิฟอร์เนีย สหรัฐอเมริกา คือดิน Wasco, ดิน Fallbrook และดิน Wyo ทดลองโดยแปรผันความเข้มข้นของอาร์เซนิก พีเอช และ Ionic strength ผลการทดลองที่ได้จากวิธี Chromatography พบว่าอาร์เซนิกที่เติมลงไปจะไม่ถูกออกซิไดซ์เป็นอาร์เซนิกที่พีเอชสูงกว่า 8 (ระยะเวลาการดูดติดผิวนาน 16 ชั่วโมง) จึงสามารถตรวจพบอาร์เซนิกได้ที่พีเอชสูงกว่า 8 เป็นต้น

ไป ในดิน Wyo ซึ่งเป็นที่มีส่วนประกอบของ clay และเหล็ก (Fe) มากที่สุดจะมีการดูดติดผิวที่แข็งแรงที่สุด และมีพฤติกรรมคล้ายกับเหล็กออกไซด์บริสุทธิ์ พีเอชจะส่งผลต่อปริมาณการดูดติดผิวในดินที่มีการดูดติดผิวต่ำเท่านั้น นอกจากนี้การทำสมดุลการดูดติดผิวชี้ให้เห็นว่า อาร์เซนิตเกิดถูกดูดติดผิวอย่างแข็งแรงกว่าอาร์เซไนต์ในทุกสภาวะ

Stephen และ Daniel (2000) ศึกษาการกระจายตัวของอาร์เซนิกในชั้นน้ำใต้ดิน ทำการศึกษาที่ Willamette Basin พบว่าส่วนมากเกี่ยวข้องกับธรณีวิทยาของชั้นอุ้มน้ำ (Aquifer) โดยในการทดลองนี้พบว่าค่าเข้มข้นอาร์เซนิกที่สูงเกินค่าความเข้มข้นสูงสุดของอาร์เซนิก ที่กำหนดโดย U.S.EPA หรือ Maximum Current Level (MCL) คือ 50 มก/ล พบอย่างกว้างขวางในหินชั้นล่าง และพบว่าการเปลี่ยนแปลงค่าพีเอชเป็นปัจจัยที่ส่งผลน้อยที่สุด เมื่อเทียบกับเมื่อมีอิออนลบชนิดแข่งขัน และภาวะรีดิวซิง โดยเมื่อภายใต้ภาวะในชั้นน้ำใต้ดินอาร์เซนิต พบในรูป  $\text{H}_2\text{AsO}_4^-$  และ  $\text{HAsO}_4^{2-}$  หรือรูปออกซีแอนไอออน ในขณะที่อาร์เซไนต์ พบในรูปที่ไม่มีประจุ  $\text{H}_3\text{AsO}_3^0$  ความแตกต่างของประจุส่งผลต่อปฏิกิริยาไฟฟ้าสถิตยระหว่างสารประกอบอาร์เซนิก และผิวหน้าของวัตถุ

ผู้ทดลองสรุปว่ากระบวนการหลัก 2 กระบวนการที่ควบคุมความสามารถในการเคลื่อนที่ของอาร์เซนิกในชั้นอุ้มน้ำคือ

1) Adsorption and desorption reactions ที่ได้รับอิทธิพลจากการเปลี่ยนแปลงพีเอช การเกิดปฏิกิริยารีดอกซ์ การมีอิออนลบในระบบ และการเปลี่ยนแปลงทางโครงสร้างอะตอมสาเหตุที่ปฏิกิริยาการดูดติดผิวและการคายตัว ระหว่างอาร์เซนิตและผิวหน้าของเหล็กออกไซด์ เป็นปัจจัยควบคุม เพราะเหล็กออกไซด์พบมากในตามธรรมชาติ และอาร์เซนิตจะถูกดูดซับมากที่สุดช่วงพีเอช ประมาณที่เป็นกรดและกลาง ซึ่งใกล้กับพีเอชในชั้นน้ำใต้ดิน

2) Solid-phase precipitation and dissolution reactions ถูกควบคุมโดยปัจจัยทางเคมีของสารละลาย ได้แก่ ค่าพีเอช สถานะรีดอกซ์ และส่วนประกอบเคมี โดยการคายตัวระหว่างอาร์เซนิตและผิวหน้าของเหล็กออกไซด์จะเกิดมากเมื่อพีเอชค่อนข้างสูง

O'Reilly และคณะ (2001) ทำการทดลองเพื่อศึกษาผลของระยะเวลาทดลอง (Resident time) ที่มีต่อจลศาสตร์ของการดูดติดผิวและการคายตัว (Desorption) ของอาร์เซนิตบน Goethite และเพื่อใช้วิธีวัดแบบ Spectroscopic X-Ray Absorption Fine Structure (XAFS) หากกลไกการดูดติดผิวและการคายตัวของอาร์เซนิตที่เวลาต่าง ๆ ที่พีเอช 4 และ 6 ผลการศึกษาพบว่า เมื่อช่วงเวลาการดูดติดผิวเพิ่มขึ้นตั้งแต่ 4 นาที จนถึง 12 เดือน การดูดติดผิวของอาร์เซนิตบน goethite จะเพิ่มมากขึ้นด้วย ที่ทั้ง 2 พีเอชที่ศึกษาให้ผลคล้ายกัน คือการดูดติดผิวจะเป็นไปอย่าง

รวดเร็วใน 24 ชั่วโมงแรก ส่วนในการศึกษาโดย XAFS พบว่ามีอะตอมของสาร 2 ชนิดเกาะอยู่รอบ ๆ โครงสร้างของ อาร์เซเนตที่ถูกดูดซับ คือ ออกซิเจนอะตอม (O atom) และ อะตอมเหล็ก (Fe atom) และมีสภาพไม่เปลี่ยนแปลงตามระยะเวลาระยะเวลาช่วงพันธะของอาร์เซนิคและเหล็ก มีค่า  $3.30 \text{ \AA}$  ส่วนการศึกษาการคายตัวของอาร์เซเนตโดยฟอสเฟตและซิลเฟต พบว่า ในช่วงคายตัว โดยฟอสเฟต 24 ชั่วโมงแรก การคายตัวจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว มีการคายตัวมากกว่าร้อยละ 35 แต่หลังจากนั้นจะค่อย ๆ เกิดการคายตัวที่เล็กน้อย ซึ่งต้องอาศัยระยะเวลาานาน ๆ แม้ว่า จะมีปริมาณอิออนลบ(ฟอสเฟตและซิลเฟต) มากกว่าอาร์เซเนตถึง 3 เท่า และยังพบว่า ซิลเฟตมีประสิทธิภาพการเร่งการคายตัวของอาร์เซเนตบน Goethite ต่ำกว่าฟอสเฟตมาก โดยในระยะเวลา 5 เดือน การคายตัวเกิดขึ้นเพียงร้อยละ 2.5

**Tsair และ Jun (2001)** ทำการทดลองหาสมมูลและจลศาสตร์การดูดซับของ อาร์เซไนต์ และอาร์เซเนตบนแอคทีเวตอะลูมินา (activated alumina) โดยการทดลองขั้นแรก ตรวจสอบคุณสมบัติต่าง ๆ ของแอคทีเวตอะลูมินา ได้แก่ ความพรุน พื้นที่ผิวจำเพาะ และความหนาแน่น ต่อมาทดลองในเครื่องปฏิกรณ์แบบแบตช์ที่ควบคุมอุณหภูมิ สามารถใช้ไอโซเทอมการดูดซับของ ฟรอนดิลิก และ ไอโซเทอมการดูดซับของแลงมัวร์ อธิบายพฤติกรรมการดูดซับที่เกิดที่พีเอชต่าง ๆ ได้ว่า พีเอชเป็นปัจจัยที่มีผลอย่างมากต่อการดูดซับของอาร์เซนิค นอกจากนั้นปัจจัยอื่น ๆ ซึ่งได้แก่ ประจุที่ผิวหน้าของแอคทีเวตอะลูมินา และ รูปของอาร์เซนิคในน้ำ ในการทดลองที่แต่ละพีเอช อาร์เซไนต์จะถูกดูดซับน้อยกว่าอาร์เซเนตมาก เพราะที่เกือบทุกค่าพีเอช อาร์เซเนตจะมีประจุลบ ส่วนอาร์เซไนต์ไม่มีประจุ

**Zhao และ Robert (2001)** ทำการทดลองแบบแบตช์ เพื่อศึกษาการดูดติดผิวแบบแข่งขัน ระหว่างฟอสเฟตและอาร์เซเนต บน goethite โดยเน้นศึกษาไปที่การหากลไกการเกิดพันธะ ทำการทดลองทั้งเมื่อเติมพร้อมกัน (simultaneously) และ เมื่อเติมทีละอิออน (sequentially) โดยได้ผลว่า เมื่อเติมพร้อมกัน ปริมาณรวมของทั้งสองอิออนที่ถูกดูดซับจะมีค่ามากกว่าเมื่อมีอิออนเพียงชนิดเดียว และเมื่อเติมทีละอิออนอิออน ปริมาณการถูกดูดซับจะขึ้นกับระยะเวลาถึงจุดสมดุล (equilibrium time) ยิ่งมีระยะเวลาถึงจุดสมดุลนานเท่าไร ก็ยิ่งมีปริมาณถูกดูดซับมาก นอกจากนี้ การทดลองสรุปได้ว่า จะมีพื้นที่จำเพาะหรือสัดส่วนที่เปลี่ยนแปลง (Nonexchangeable fraction) ไม่ได้สำหรับดูดซับเฉพาะแต่ละอิออน โดยมีค่าโดยประมาณเท่ากับปริมาณการดูดซับเริ่มต้นของ แต่ละอิออน และผลการทดลองจะพบว่า เกิดปฏิกิริยาแบบสองขั้น (two-phase reaction) คือ เกิดสารประกอบเชิงซ้อนที่ผิวหน้า (surface complex) ของ goethite แบบเร็ว และตามด้วย ปฏิกิริยาที่ช้ากว่า คือเกิดการสร้างตะกอนผลึก ที่ผิวหน้า (surface precipitation) เมื่อนำมา

เปรียบเทียบกับการทำนายโดยใช้แบบจำลอง (Surface Complexation Model, SCM) จึงสรุปว่าปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจริงซับซ้อนกว่าปฏิกิริยาที่ทำนายโดยใช้แบบจำลองมาก

Sabine (2002) ทำการทดลองในเครื่องปฏิกรณ์แบบแบตช์ หาปริมาณอาร์เซนไนต์ และอาร์เซนเนตที่ถูกดูดซับบนออกไซด์และแร่ในดิน เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าพีเอช ผลการทดลองที่เกี่ยวข้องกับอาร์เซนเนตพบว่าการดูดซับของอาร์เซนเนตบนออกไซด์และแร่ในดิน มีค่าสูงสุดที่พีเอชต่ำประมาณ 5 และการดูดซับจะลดลงจนมีค่าต่ำสุดเมื่อ พีเอชสูงขึ้น สำหรับตัวดูดซับเป็นอะลูมิเนียมออกไซด์จะมีการดูดซับต่ำสุดที่ พีเอชมากกว่า 9 ตัวดูดซับเป็นเหล็กออกไซด์จะมีการดูดซับต่ำสุดที่ พีเอชมากกว่า 7 ตัวดูดซับเป็นแร่ในดินจะมีการดูดซับต่ำสุดที่ พีเอชมากกว่า 9 ปริมาณการดูดซับของอาร์เซนไนต์และอาร์เซนเนตมีค่าไม่ต่างกัน นอกจากนี้แบบจำลองที่สามารถใช้หาขอบเขตการดูดซับอาร์เซนไนต์ และอาร์เซนเนตคือ The Constant Capacitance Model

เมื่อเกิดการเปลี่ยนรูปรีดอกซ์ มีค่าจลนศาสตร์ต่ำ ดังนั้นสถานะออกซิเดชันทั้ง 2 อันจะพบในดินโดยไม่เกี่ยวกับสถานะการรีดอกซ์ และสรุปได้ว่าความสามารถในการเคลื่อนที่ของอาร์เซนิกเป็นฟังก์ชันของสถานะการออกซิเดชันของอาร์เซนิก คืออาร์เซนไนต์มีความสามารถในการเคลื่อนที่ผ่านคอลัมน์ทรายได้ดีกว่าอาร์เซนเนตมาก อย่างไรก็ตาม ที่ พีเอชสูง อาร์เซนไนต์จะเกิดพันธะกับดินที่แข็งแรงกว่าพันธะของอาร์เซนเนตมาก

Smith และคณะ (2002) ทำการศึกษาผลกระทบที่เกิดจากฟอสฟอรัส โซเดียม และแคลเซียมต่อการดูดซับอาร์เซนไนต์ และอาร์เซนเนต ของดิน 3 ชนิดในประเทศออสเตรเลีย ได้แก่ Oxisol, Vertisol และ Alfisol โดยทำการทดลองในเครื่องปฏิกรณ์แบบแบตช์ พบว่าเมื่อมีฟอสเฟต (0.16 mmol/L) จะทำให้การดูดซับอาร์เซนเนตในดินที่มีปริมาณเหล็กออกไซด์ต่ำ (Fe oxide < 100 mmol/kg) ลดลงอย่างมาก ในทางตรงกันข้ามในดินที่มีปริมาณเหล็กออกไซด์สูง (Fe oxide > 800 mmol/kg) ฟอสเฟตจำนวนเท่า ๆ กันมีผลเพียงเล็กน้อยต่อการดูดซับของอาร์เซนเนต และนอกจากนี้ปริมาณอาร์เซนเนตที่ถูกดูดซับลดลงอย่างเห็นได้ชัด คือลดลงจาก 0.63 เหลือ 0.37 mmol/kg เมื่อปริมาณฟอสเฟตในดินเพิ่มขึ้นตั้งแต่ 0.16 จนถึง 3.2 mmol/L จากผลการทดลองนี้สามารถสรุปได้ว่าการแข่งขันกันอย่างมากระหว่างอาร์เซนิกและฟอสเฟต ทั้งในด้านความสามารถในการดูดติดผิว (Affinity) และในแง่ของผลที่เกิดกับมวลเมื่อความเข้มข้นของฟอสเฟตเพิ่มมากขึ้น สำหรับการทดลองของอาร์เซนไนต์เมื่อมีฟอสเฟตในดินจะให้ผลที่คล้ายคลึงกับของ อาร์เซนเนต สำหรับในดินบางชนิด ได้แก่ดิน Alfisol ที่มีพื้นที่การดูดซับต่ำ และดิน Oxisol ที่มีความสามารถการดูดติดผิวสูง อย่างไรก็ตาม ปริมาณอาร์เซนไนต์ที่ถูกดูดซับโดยดิน Oxisol จะมีค่ามากกว่าที่ถูกดูดซับโดยดิน Alfisol อย่างมากในทุกกรณี ในส่วนของผลการทดลองเกี่ยวกับ

ไซเดียมไอออนและแคลเซียมไอออน พบว่าแคลเซียมไอออนจะส่งผลมากกว่าไซเดียมไอออน นั่นคือ ทำให้ปริมาณอาร์เซนที่ถูกลดซับเพิ่มขึ้นได้มากกว่า นอกจากนี้ไซเดียมไอออน และแคลเซียมไอออนส่งผลเช่นเดียวกันต่ออาร์เซนไนต์ แต่ไม่ชัดเจนเท่ากับผลต่ออาร์เซนเนต และสุดท้ายสามารถสรุปได้ว่าแคลเซียมไอออนสามารถส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติประจุที่ผิวหน้าดินด้วย

**Xiaoguang และคณะ (2002)** ศึกษาหาผลที่เกิดจากไอออนลบหลายชนิด ต่อการกำจัดอาร์เซนิกโดยไฮดรอกไซด์ของเหล็ก การทดลองนี้ทำในเครื่องปฏิกรณ์แบบแบตช์ ใช้น้ำตัวอย่าง 2 ชนิด คือน้ำปนเปื้อนอาร์เซนิกจากประเทศบังคลาเทศ และน้ำเสียดัดแปลงให้มีคุณสมบัติคล้ายน้ำปนเปื้อนจากประเทศบังคลาเทศ ไอออนลบที่ใช้ทดลอง ได้แก่ ฟอสเฟต (0 – 0.08 mM) ซิลิเกต (0 – 0.8 mM) และไบคาร์บอเนต (0 – 14 mM) ผลการทดลองที่เกี่ยวข้องกับอาร์เซนเนต คือ เมื่อมีฟอสเฟตเพียงชนิดเดียว จะลดประสิทธิภาพการกำจัดอาร์เซนเนตเพียงเล็กน้อย กล่าวคือ ทำให้การดูดซับเกิดน้อยลง หรือมีร้อยละตกค้างอยู่ในสารละลายเพิ่มขึ้น เมื่อมี ซิลิเกต หรือไบคาร์บอเนต เป็นไอออนลบเพียงชนิดเดียวที่อยู่ในระบบ จะแทบจะไม่ส่งผลต่อการกำจัดอาร์เซนเนตเลย แต่ถ้ามีไอออนลบสองชนิด ผลที่ได้จะเปลี่ยนแปลงอย่างชัดเจน กล่าวคือ เมื่อมีทั้งฟอสเฟตและไบคาร์บอเนต ประสิทธิภาพการกำจัดอาร์เซนเนต จะลดลงโดยขึ้นกับปริมาณความเข้มข้นของฟอสเฟตที่เปลี่ยนแปลง เมื่อมีทั้งฟอสเฟตและซิลิเกต ประสิทธิภาพการกำจัดอาร์เซนเนต จะลดลงปานกลาง หรือทำให้อาร์เซนเนตตกค้างในสารละลายเพิ่มขึ้นร้อยละ 20 และเมื่อมีทั้งไบคาร์บอเนตและซิลิเกต ประสิทธิภาพการกำจัดอาร์เซนเนต จะสูงกว่าเมื่อมีซิลิเกตเป็นไอออนลบเพียงชนิดเดียว และสุดท้ายเมื่อมีไอออนลบครบทั้ง 3 ชนิดจะส่งผลยับยั้งการกำจัดอาร์เซนเนตโดยเหล็กไฮดรอกไซด์อย่างเด่นชัด

นอกจากนี้เมื่อศึกษาถึงความสามารถการดูดติดผิว (Binding affinity) ของแต่ละไอออน จากค่าคงที่สมดุลของปฏิกิริยาของไอออนลบแต่ละชนิด จะพบว่า ค่าความสามารถการดูดติดผิวของอาร์เซนเนตมีค่าสูงสุด รองลงไปคือ ฟอสเฟต อาร์เซนไนต์ ซิลิเกต และไบคาร์บอเนต ตามลำดับ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บทที่ 4

### วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีการวิจัย

#### 4.1 วัสดุ อุปกรณ์ และสารเคมี

##### 4.1.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย

1. เครื่องอะตอมมิกแอบซอร์ปชัน สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Atomic Absorption Spectrophotometer, AAS)
2. เครื่องไอซีพี (Inductively Coupled Plasma Atomic Emission Spectrometer, ICP-AES)
3. เครื่องเขย่า (Shaker)
4. เครื่องวัดพีเอช (pH meter)
5. เครื่องชั่งน้ำหนักไฟฟ้าแบบละเอียด (Analytical Balance)
6. หลอดทดลอง (Conical Tube) ขนาด 50 มิลลิลิตร
7. เครื่องกรองสุญญากาศ (Vacuum Filter)
8. กระดาษกรอง GF/C
9. เครื่องเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง (Centrifuge)
10. อุปกรณ์เครื่องแก้วโดยทั่วไป
11. คอลัมน์เทฟลอนจำลองการเคลื่อนที่ของสารปนเปื้อนในชั้นน้ำใต้ดิน
12. เครื่องสูบล้างสุบต่ำ

##### 4.1.2 สารเคมีที่ใช้

สารเคมีที่ใช้ในงานวิจัยนี้จะเป็นรีเอเจนท์เกรด

1. ดินที่ใช้ในการทดลอง 3 ชนิดดิน ได้แก่ ดินร่วนเหนียวปนทราย (Sandy Clay Loam) ดินร่วนเหนียว (Clay Loam) และดินทรายปนร่วน (Loamy Sand)
2. โซเดียมอาร์เซเนต ( $\text{Na}_2\text{HAsO}_4$ )
3. โซเดียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{NaOH}$ )
4. กรดไฮโดรคลอริก ( $\text{HCl}$ )
5. สารละลายโบรไมด์
6. โซเดียมฟอสเฟต ( $\text{NaH}_2\text{PO}_4$ )
7. โซเดียมไบคาร์บอเนต ( $\text{NaHCO}_3$ )
8. โซเดียมอะซิเตต ( $\text{CH}_3\text{COONa}$ )

9. PIPE ( $C_8H_{17}N_2O_6S_2Na$ )

10. CAPS ( $C_9H_{19}NO_3S$ )

## 4.2 วิธีการทดลอง

### 4.2.1 การทดลองหาเวลาสัมพัทธ์ที่เหมาะสมในการดูดติดผิวของอาร์เซนเนต

ทุกตัวอย่างดินทำการทดลองที่พีเอชเริ่มต้น 4, 7 และ 10 ดังนี้

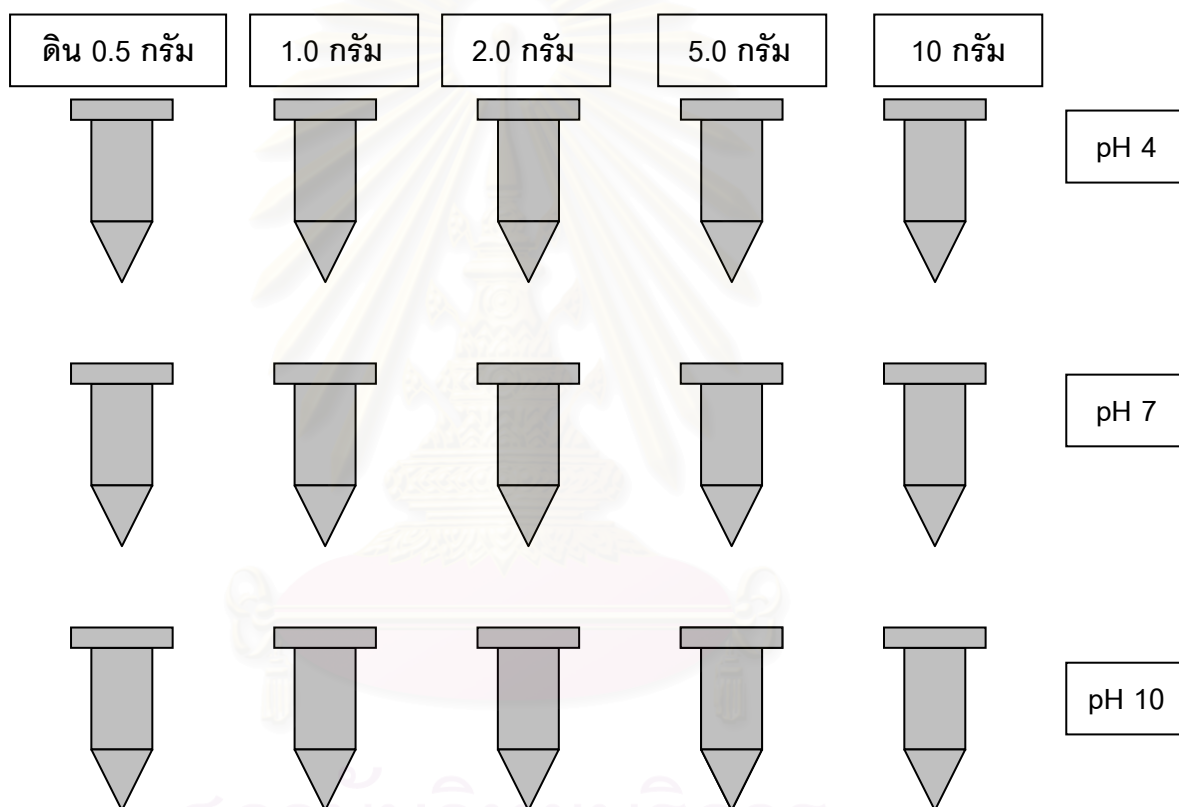
1. เตรียมสารละลายอาร์เซนเนตที่ความเข้มข้นประมาณ 15 มิลลิกรัมของอาร์เซนเนตต่อลิตร ปริมาณ 50 มิลลิลิตร ใส่ลงในหลอดทดลองขนาด 50 มิลลิลิตร จำนวน 3 ชุด ชุดละ 15 หลอดทดลอง (ทำการทดลอง 3 ซ้ำ (TriPLICATE))
2. ปรับพีเอชของสารละลายในแต่ละชุดทดลอง ให้คงที่และมีค่าประมาณ 4 7 และ 10 ด้วยตัวคุมพีเอช (Buffer solution)
3. เติมตัวอย่างดินน้ำหนัก 1 กรัม ในทุกหลอดทดลอง
4. นำหลอดทดลองทั้งหมดไปเขย่าบนเครื่องเขย่า แล้วทำการเก็บตัวอย่างตามเวลาคือ 1 2 4 8 24 48 72 96 ชั่วโมง ที่ความเร็ว 200 รอบต่อนาที จากการทำการทดลอง เบื้องต้น (Pretest) ที่อุณหภูมิห้อง
5. ตัวอย่างที่เก็บตามเวลา ข้อ 4 นำมากรองแยกเอาน้ำใสด้วยเครื่องกรองสุญญากาศ เพื่อนำไปวิเคราะห์หาปริมาณอาร์เซนเนตที่เหลืออยู่ด้วยเครื่องอะตอมมิกแอบซอภชันสเปกโตรโฟโตมิเตอร์
6. นำผลการทดลองไปพลอตกราฟระหว่างประสิทธิภาพการดูดติดผิวของอาร์เซนเนต และเวลาที่เก็บตัวอย่าง

### 4.2.2 การทดลองแบบแบดซ์หาไอโซเทอมการดูดติดผิว

ทุกตัวอย่างดินทำการทดลองที่พีเอชเริ่มต้น 4, 7 และ 10 ดังนี้

1. เตรียมสารละลายอาร์เซนเนตที่ความเข้มข้นประมาณ 15 มิลลิกรัมของอาร์เซนเนตต่อลิตร ปริมาณ 50 มิลลิลิตร ใส่ลงในหลอดทดลองขนาด 50 มิลลิลิตร จำนวน 3 ชุด ชุดละ 15 หลอดทดลอง (ทำการทดลอง 3 ซ้ำ (TriPLICATE))
2. ปรับพีเอชของสารละลายในแต่ละชุดทดลอง ให้คงที่และมีค่าประมาณ 4, 7 และ 10 ด้วยตัวคุมพีเอช
3. เติมตัวอย่างดินชุด 1 โดยให้หลอดแรกของแต่ละชุดมีปริมาณต่ำที่สุดและเพิ่มปริมาณไปเรื่อยๆ จนถึงหลอดสุดท้าย คือ 0.5, 1, 2, 5 และ 10 กรัม

4. นำหลอดทดลองทั้งหมดไปเขย่าบนเครื่องเขย่า ตามระยะเวลา และจำนวนรอบต่อนาทีที่เหมาะสมจากการทำการทดลองข้อ 4.2.1 ที่อุณหภูมิห้อง
5. กรองแยกเอาน้ำใสด้วยเครื่องกรองสุญญากาศ เพื่อนำไปวิเคราะห์หาปริมาณอาร์เซนที่เหลืออยู่ด้วยเครื่องอะตอมมิกแอบซอร์บชันสเปกโตรโฟโตมิเตอร์
6. นำผลการทดลองไปพลอตกราฟของการดูดซับของอาร์เซน (Q) กับค่าความเข้มข้นที่สมดุล ( $C_e$ ) เพื่อหาค่า Adsorption Parameter จากกราฟดังกล่าว



รูปที่ 4.1 การทดลองแบบแบตช์สำหรับดินตัวอย่าง (การทดลอง 1 ชุด)

หมายเหตุ: การทดลองแต่ละชุด ทำซ้ำอีก 2 ครั้ง



#### 4.2.3 การทดลองหาผลของอิออนลบที่มีต่อการดูดติดผิวของอาร์เซเนต

โดยใช้ตัวอย่างดินเป็นดินร่วนเหนียว ทำการทดลองที่พีเอช 7

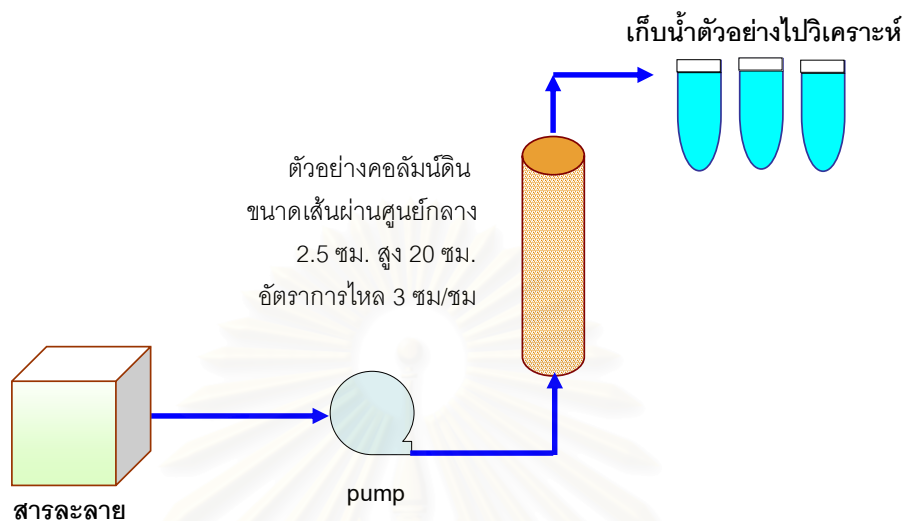
1. เตรียมสารละลายเช่นเดิม จำนวน 1 ชุด ชุดละ 15 หลอดทดลอง (ทำการทดลอง 3 ซ้ำ (TriPLICATE)) โดยแต่ละหลอดใช้สารละลายประมาณ 50 มิลลิลิตร
2. ผสมสารละลายอาร์เซเนต และสารละลายที่มีอิออนลบชนิดแรกคือฟอสเฟต โดยใช้ อัตราส่วนการผสมฟอสเฟตต่ออาร์เซเนต 3 อัตรา คือ 0.1 :1 1:1 และ 10:1 ในเชิงโมลาร์ ปรับพีเอชให้มีค่าคงที่เป็น 7 ด้วย ตัวคุมพีเอช
3. เติมตัวอย่างดินโดยให้หลอดแรกของแต่ละชุดมีปริมาณต่ำที่สุดและเพิ่มปริมาณไปเรื่อย ๆ จนถึงหลอดสุดท้าย คือ 0.5, 1, 2, 5 และ 10 กรัม
4. นำหลอดทดลองทั้งหมดไปเขย่าบนเครื่องเขย่า ตามระยะเวลา และจำนวนรอบต่อนาทีที่เหมาะสมจากการทำ Pretest ที่อุณหภูมิต่ำ
5. กรองแยกเอาน้ำใสด้วยเครื่องกรองสุญญากาศ เพื่อนำไปวิเคราะห์หาปริมาณอาร์เซเนตที่เหลืออยู่ด้วยเครื่องอะตอมมิกแอบซอร์บชันสเปกโตรโฟโตมิเตอร์
6. นำผลการทดลองไปพลอตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นที่สภาวะสมดุล (Ce) และความสามารถในการดูดติดผิว (Q)
7. ทำการทดลองเช่นเดิมตั้งแต่ข้อ 1 – 6 โดยเปลี่ยนสารละลายอิออนลบเป็น ไบคาร์บอเนต โดยใช้อัตราส่วนการผสมไบคาร์บอเนตต่ออาร์เซเนต 3 อัตราคือ 0.1:1 1:1 และ 10:1 ในเชิงโมลาร์ ปรับพีเอชให้มีค่าคงที่เป็น 7 ด้วย ตัวคุมพีเอช

#### 4.2.4 การทดลองหาค่าสัมประสิทธิ์การกระจายตัว (Dispersion Coefficient) ของดิน

การทดลองนี้จะเป็นการทดลองแบบคอลัมน์ โดยจะใช้คอลัมน์เทฟลอน บรรจุด้วยตัวอย่างดินดังแสดงในรูปที่ 4.2 จากนั้นจึงทำการทดลองตามขั้นตอนดังนี้

1. น้ำจะถูกปั๊มผ่านคอลัมน์ดิน (ใช้คอลัมน์ดิน 3 คอลัมน์ โดยบรรจุตัวอย่างดินทั้ง 3 ชุด) แบบไหลขึ้น (Up Flow) โดยควบคุมอัตราการไหลผ่านเท่ากับ 3 เซนติเมตร/ชั่วโมง
2. ปรับพีเอชของน้ำที่ไหลผ่านให้มีค่าประมาณ 7 ในแต่ละครั้งของการทดลอง
3. ป้อนสารละลายโบรไมด์เข้าสู่คอลัมน์ดิน ตามการไหลของน้ำ ด้วยอัตราการไหลเท่ากับ 3 เซนติเมตร/ชั่วโมง
4. เก็บน้ำที่ทางน้ำออกตามช่วงเวลาที่เหมาะสมไปวิเคราะห์หาปริมาณสารละลายโบรไมด์ที่ผ่านคอลัมน์ออกมาที่เวลาต่าง ๆ
5. เปลี่ยนจากละลายโบรไมด์เป็นน้ำ DI เมื่อความเข้มข้นที่ออกจากคอลัมน์เข้าใกล้ความเข้มข้นเริ่มต้น ( $C/C_0$  ประมาณ 1) เพื่อศึกษาการคายตัว (Desorption)

6. นำข้อมูลมาพลอต Breakthrough Curve และคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การกระจายตัว (Dispersion Coefficient)



รูปที่ 4.2 คอลัมน์ดินที่ใช้ในการทดลองแบบคอลัมน์

#### 4.2.5 การทำการทดลองแบบคอลัมน์เพื่อตรวจสอบผลการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์

ในการทดลองนี้จะใช้คอลัมน์ดินเช่นเดียวกับหัวข้อ 4.2.4 โดยชุดดินร่วนเหนียว ทำการทดลองที่พีเอช 4 7 และ 10 และดินร่วนเหนียวปนทราย และดินทรายปนร่วน ทำการทดลองที่พีเอช 7 ดังนี้

1. ป้อนน้ำผ่านคอลัมน์ดินโดยใช้อัตราการไหล 3 เซนติเมตร/ชั่วโมง
2. สำหรับดินร่วนเหนียว ปรับพีเอชของน้ำให้มีค่าพีเอช 4 7 และ 10 ด้วย ตัวคุมพีเอช และสำหรับดินร่วนเหนียวปนทราย และดินทรายปนร่วน ปรับพีเอชของน้ำให้มีค่า 7 ด้วย ตัวคุมพีเอช
3. ในแต่ละการทดลองป้อนสารละลายอาร์เซนิต (ไม่มีอิออนลบตัวอื่น) ความเข้มข้น 15 มิลลิกรัมต่อลิตร ผ่านคอลัมน์ด้วยอัตราการไหล 3 เซนติเมตร/ชั่วโมง
4. เก็บน้ำที่ทางน้ำออกไปวิเคราะห์หาปริมาณอาร์เซนิตที่เหลืออยู่ในน้ำออกจากคอลัมน์ที่เวลาต่าง ๆ
5. นำข้อมูลมาพลอต Breakthrough Curve
6. เปรียบเทียบผลการทดลองที่ได้กับผลการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์

#### 4.2.6 การทดลองแบบคอลัมน์เพื่อศึกษาการเคลื่อนที่ของอาร์เซนเนตเมื่อมีอิออนลบ

ทำการทดลองที่พีเอช 7 โดยใช้ดินร่วนเหนียว

1. บีมน้ำผ่านคอลัมน์ดินโดยใช้อัตราการไหล 3 เซนติเมตร/ชั่วโมง
2. ปรับพีเอชของน้ำให้มีค่าพีเอช 7 ด้วย ตัวคุมพีเอช
3. ศึกษาผลจากอิออนลบโดยเลือกใช้อัตราส่วนการผสมอาร์เซนเนตและฟอสเฟตที่เหมาะสมที่สุด (ที่ได้จากการทดลอง 4.2.2) บีมน้ำผ่านคอลัมน์ด้วยอัตราการไหล 3 เซนติเมตร/ชั่วโมง
4. เก็บน้ำที่ทางน้ำออกไปวิเคราะห์หาปริมาณอาร์เซนเนตที่เหลืออยู่ในน้ำออกจากคอลัมน์ที่เวลาต่าง ๆ
5. นำข้อมูลมาพลอต Breakthrough Curve
6. ทำเช่นเดียวกับข้อ 1 – 5 แต่เปลี่ยนสารละลายอิออนลบ เป็นโบคาร์บอนเนต บีมน้ำผ่านคอลัมน์ด้วยอัตราการไหล 3 เซนติเมตร/ชั่วโมง

#### 4.2.7 นำผลการทดลองที่ได้ สร้างเป็นแบบจำลอง

การศึกษาประยุกต์ใช้แบบจำลองคอมพิวเตอร์ HYDRUS และ STANMOD/CXTFIT ซึ่งพัฒนาโดย U.S. Salinity Laboratory, USDA, ARS, Riverside, California นำไปใช้ในการทำนายพารามิเตอร์ในการเคลื่อนที่และการเคลื่อนที่ของอาร์เซนเนตผ่านตัวกลางที่มีรูพรุนและศึกษาการใช้อิออนลบในการเร่งการคายตัวของอาร์เซนเนตในดินตัวอย่าง

## บทที่ 5

### ผลการวิเคราะห์ข้อมูล

#### 5.1 ผลการศึกษาคุณสมบัติของตัวอย่างดิน

ดินตัวอย่างที่ใช้ นำมาจากจังหวัดนนทบุรี เตรียมดินโดยการร่อนผ่านตะแกรงขนาด 2 มิลลิเมตร เพื่อที่จะทำการจำแนกประเภทดิน และวิเคราะห์หาคุณสมบัติต่าง ๆ ของดิน โดยดินตัวอย่าง 3 ชนิดที่นำมาทำการวิจัยครั้งนี้ เป็นเนื้อดินประเภทดินร่วนเหนียวปนทราย ดินร่วนปนทราย และดินทรายปนร่วน สำหรับคุณสมบัติอื่น ๆ ของตัวอย่างดินที่ได้ทำการวิเคราะห์ คือค่าพีเอช (pH) ซึ่งทำการวิเคราะห์ที่อัตราส่วนดินต่อน้ำ 1 : 1 ความหนาแน่นรวม (Bulk Density) ความพรุน (Porosity) ปริมาณเหล็ก (Fe) ในดิน ซึ่งวิเคราะห์โดยใช้สารละลาย DTPA ที่ pH 7.3 (DTPA - Diethylene Triamine Pentaacetic Acid) (กรมวิชาการเกษตร, 2544) ปริมาณอาร์เซนิกในดิน (Background Arsenic) วิเคราะห์โดยวิธี Microwave Digestion ด้วยกรดไนตริกเข้มข้น แล้ววัดความเข้มข้นอาร์เซนิกด้วยเครื่อง Atomic Absorption Spectrophotometer (AAS) และวิเคราะห์แร่ธาตุหลักในดินทั้ง 3 ชนิด ด้วยเครื่อง X – Ray Diffraction (XRD) ผลการวิเคราะห์แสดงดังตารางที่ 5.1 และในภาคผนวก ก.

#### ตารางที่ 5.1 คุณสมบัติของดินตัวอย่างที่ทำการศึกษา

คุณสมบัติของดิน	ดินชนิดที่ 1	ดินชนิดที่ 2	ดินชนิดที่ 3
1. Texture	ดินร่วนเหนียวปนทราย (Sandy Clay Loam)	ดินร่วนเหนียว (Clay Loam)	ดินทรายปนร่วน (Loamy Sand)
2. Sand, Silt, Clay (%)	S56 SL24 C20	S42 SL28 C30	S86 SL6 C8
3. pH (วิธีวิเคราะห์ : ดินต่อน้ำ (1:1))	7.2	7.2	7.8
4. Bulk Density (g/cm <sup>3</sup> )	1.43	1.32	1.80
5. Porosity	0.46	0.50	0.32
6. Fe (mg/kg) (วิธีวิเคราะห์ : DTPA extraction)	6.0	11.9	2.9

### ตารางที่ 5.1 (ต่อ)

คุณสมบัติของดิน	ดินชนิดที่ 1	ดินชนิดที่ 2	ดินชนิดที่ 3
7. Background As (mg/L) (วิธีวิเคราะห์ : Microwave Digestion)	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ
8. แร่ธาตุหลักในดิน (วิธีวิเคราะห์ : X – Ray Diffraction)	1. Quartz 50 % 2. Microcline 16.67 % 3. Muscovite 8.33 %	1. Quartz 50 % 2. Microcline 20.83 % 3. Oligoclase 6.52 %	1. Quartz 50 % 2. Potassium- Feldspar 12.50 % 3. Faujasite 8.33 %

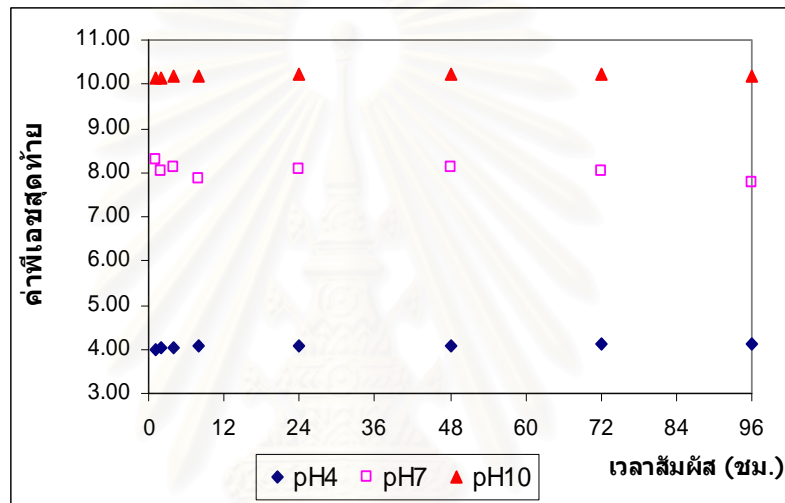
### 5.2 ผลการศึกษาเวลาสัมผัสที่เหมาะสมในการดูดติดผิวของอาร์เซนิตด้วยตัวอย่างดิน

การศึกษาค่าผลของเวลาสัมผัสที่เหมาะสม ในการดูดติดผิวของอาร์เซนิตด้วยตัวอย่างดิน ทั้ง 3 ชนิด โดยใช้ความเข้มข้นของสารละลายอาร์เซนิตเริ่มต้น 15 มิลลิกรัมต่อลิตรของอาร์เซนิต ต่อปริมาณตัวอย่างดิน 1 กรัม ปริมาตรสารละลาย 50 มิลลิลิตร และปรับให้สารละลายมีค่าพีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 4 7 และ 10 นำหลอดทดลองทั้งหมดไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่า ที่ความเร็วรอบของการเขย่าเท่ากับ 200 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิห้อง

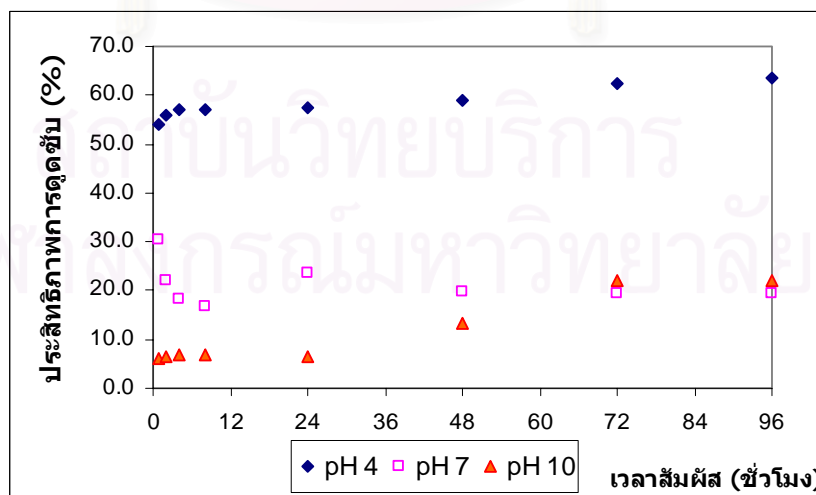
ผลการศึกษาเวลาสัมผัสที่เหมาะสม พบว่าเกิดการเปลี่ยนแปลงของพีเอชเริ่มต้นและพีเอชสุดท้ายในทุกสภาวะการทดลอง ในทุกชุดการทดลองจะมีค่าพีเอชสุดท้ายเพิ่มขึ้น โดยมีค่าพีเอชสุดท้ายเฉลี่ยประมาณ 4.17 7.95 และ 10.22 ตามลำดับ ดังแสดงผลการเปลี่ยนแปลงพีเอชจำแนกตามชนิดดินดังรูปที่ 5.1 5.3 และ 5.5 (แสดงรายละเอียดในภาคผนวก ข.)

ผลการศึกษาเวลาสัมผัสที่เหมาะสมเมื่อจำแนกตามชนิดดิน ดินชนิดแรกคือดินร่วนเหนียวปนทราย ที่เวลาสัมผัส 1 2 4 8 24 48 72 และ 96 ชั่วโมง พบว่า ที่พีเอชเริ่มต้น 4 ประสิทธิภาพการดูดติดผิวของอาร์เซนิตคิดเป็นร้อยละ 54.09 55.81 56.96 57.22 57.51 58.87 62.27 และ 63.36 ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าที่พีเอช 4 ประสิทธิภาพการดูดติดผิวจะเพิ่มขึ้นเร็วมาก อีกทั้งยังมีประสิทธิภาพสูงมาก และสูงขึ้นตามระยะเวลาสัมผัสที่เพิ่มขึ้น โดยมีค่าสูงสุดจนกระทั่งคงที่ (เข้าสู่สภาวะสมดุล) ที่ชั่วโมงที่ 96 ในขณะที่ที่พีเอชเริ่มต้น 7 ให้ผลการทดลองต่างจากที่พีเอช 4 คือในช่วง 1 ชั่วโมงแรก ประสิทธิภาพการดูดติดผิวของอาร์เซนิตเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว คือมีประสิทธิภาพการดูดติดผิวถึงร้อยละ 30.26 แล้วค่อย ๆ ลดลงจนมีประสิทธิภาพในการดูดติดผิวร้อยละ 16.87 ในชั่วโมงที่ 8 ส่วนในช่วงเวลา 24 – 96 ชั่วโมง

ประสิทธิภาพการดูดติดผิวของอาร์เซนเตจะมีค่าสูงขึ้นและค่อนข้างคงที่ประมาณร้อยละ 19.22 สำหรับการทดลองที่พีเอชเริ่มต้น 10 ประสิทธิภาพการดูดติดผิวของอาร์เซนเตจะต่ำกว่าที่พีเอชอื่น ๆ แต่เป็นไปในทิศทางเดียวกับพีเอช 4 กล่าวคือ ใน 24 ชั่วโมงแรก มีประสิทธิภาพการดูดติดผิวประมาณร้อยละ 6.9 และจะค่อย ๆ เพิ่มขึ้นจนมีประสิทธิภาพการดูดติดผิวร้อยละ 13.22 ในชั่วโมงที่ 48 ส่วนในช่วงเวลา 72 – 96 ชั่วโมง ประสิทธิภาพการดูดติดผิวของอาร์เซนเตจะมีค่าสูงที่สุดและค่อนข้างคงที่ประมาณ ร้อยละ 22.23 โดยรายละเอียดประสิทธิภาพการดูดติดผิวของอาร์เซนเตด้วยดินร่วนเหนียวปนทราย แสดงในรูปที่ 5.2



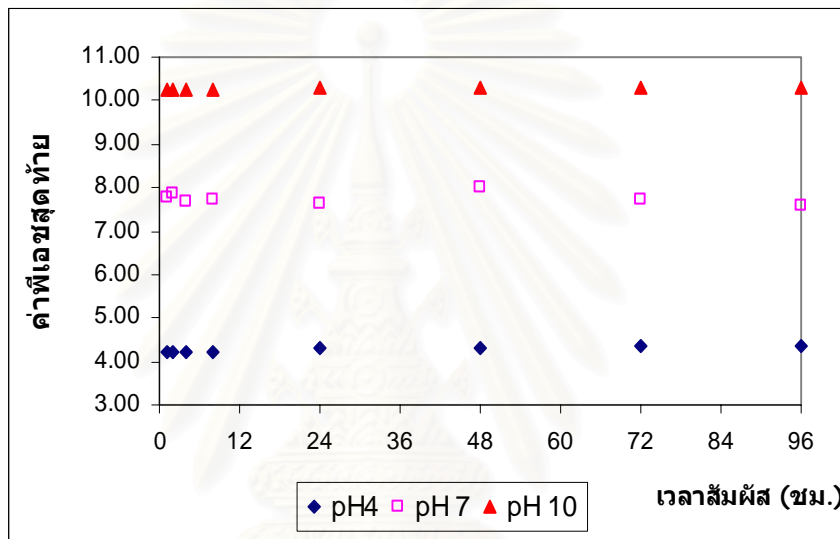
รูปที่ 5.1 ค่าพีเอชสุดท้ายของดินร่วนเหนียวปนทรายในการศึกษาเวลาสัมพัทธ์ที่เหมาะสม



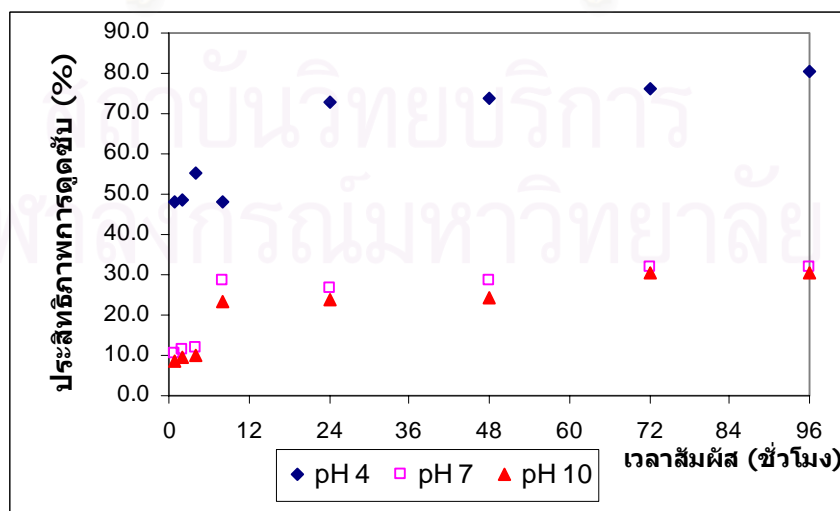
รูปที่ 5.2 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการดูดติดผิวของอาร์เซนเต

ด้วยดินร่วนเหนียวปนทราย ในการศึกษาเวลาสัมผัสที่เหมาะสม

สำหรับดินชนิดที่ 2 คือดินร่วนเหนียว พบว่าที่พีเอชเริ่มต้นทุกค่า ประสิทธิภาพการดูดติดผิวสูงขึ้นตามระยะเวลาสัมผัสที่เพิ่มขึ้น และมีค่าสูงสุดจนกระทั่งคงที่ (เข้าสู่สภาวะสมดุล) ภายในชั่วโมงที่ 96 และพบว่าที่พีเอชเริ่มต้น 4 ประสิทธิภาพการดูดติดผิวของอาร์เซนเนตจะสูงกว่าที่พีเอช 7 และ 10 อย่างเห็นได้ชัด โดยประสิทธิภาพการดูดติดผิวสูงสุดสำหรับพีเอช 4 7 และ 10 มีค่าร้อยละ 80.50 31.91 และ 30.39 ตามลำดับ รายละเอียดประสิทธิภาพการดูดติดผิวของอาร์เซนเนตด้วยดินร่วนเหนียว แสดงในรูปที่ 5.4



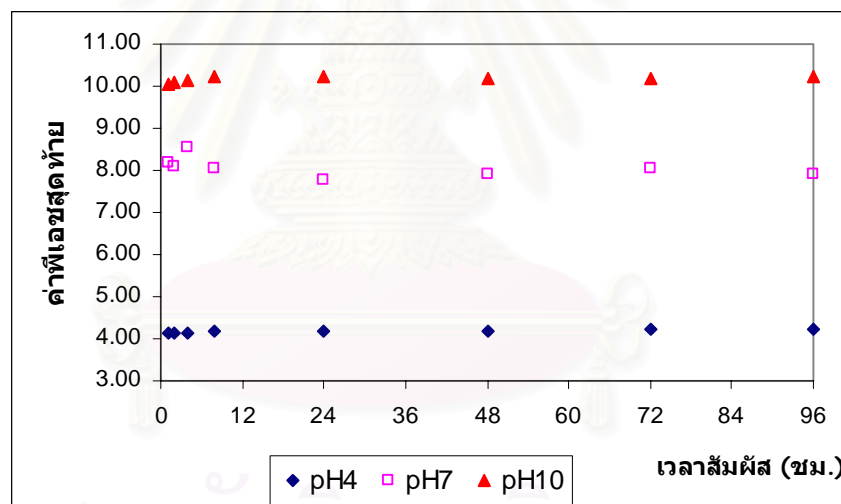
รูปที่ 5.3 ค่าพีเอชสุดท้ายของดินร่วนเหนียวในการศึกษาเวลาสัมผัสที่เหมาะสม



รูปที่ 5.4 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการดูดติดผิวของอาร์เซนเนต

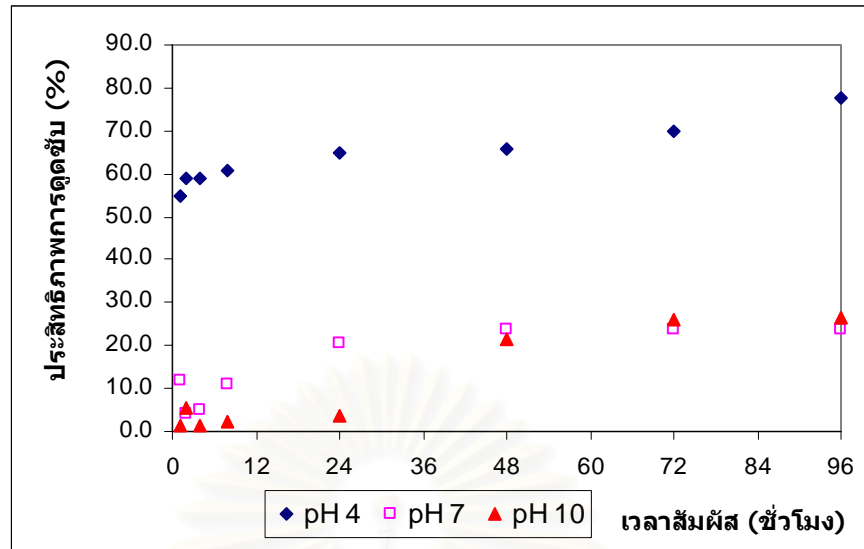
### ด้วยดินร่วนเหนียวในการศึกษาเวลาสัมผัสน้ำที่เหมาะสม

ผลการศึกษาเวลาสัมผัสน้ำที่เหมาะสมของดินชนิดสุดท้ายคือดินทรายปนร่วน พบว่าที่พีเอชเริ่มต้น 4 ประสิทธิภาพการดูดติดผิวสูงขึ้นตามระยะเวลาสัมผัสน้ำที่เพิ่มขึ้น และมีค่าสูงสุดจนกระทั่งคงที่ (เข้าสู่สภาวะสมดุล) ภายในชั่วโมงที่ 96 นอกจากนี้พบว่า ประสิทธิภาพการดูดติดผิวจะเพิ่มขึ้นเร็วมาก โดยในชั่วโมงแรก มีประสิทธิภาพสูงถึงร้อยละ 54.78 แต่ที่พีเอชเริ่มต้น 7 มีผลการทดลองแตกต่างจากที่พีเอช 4 กล่าวคือใน 1 ชั่วโมงแรก มีประสิทธิภาพการดูดติดผิวร้อยละ 11.66 แล้วค่อย ๆ ลดลงจนมีประสิทธิภาพในการดูดติดผิวร้อยละ 5.22 ในชั่วโมงที่ 4 ส่วนในช่วงเวลา 8 - 96 ชั่วโมง ประสิทธิภาพการดูดติดผิวของอาร์เซนเตตจะมีค่าสูงขึ้นและค่อนข้างคงที่ประมาณร้อยละ 23.63 สำหรับพีเอช 10 ประสิทธิภาพการดูดติดผิวเปลี่ยนแปลงขึ้น ๆ ลง ๆ ใน 24 ชั่วโมงแรก จากนั้นมีค่าสูงขึ้นจนคงที่ใน 96 ชั่วโมง โดยประสิทธิภาพการดูดติดผิวของอาร์เซนเตตสูงสุดคือร้อยละ 26.63 รายละเอียดประสิทธิภาพการดูดติดผิวของอาร์เซนเตตด้วยดินทรายปนร่วน แสดงในรูปที่ 5.6



รูปที่ 5.5 ค่าพีเอชสุดท้ายของดินทรายปนร่วนในการศึกษาเวลาสัมผัสน้ำที่เหมาะสม





รูปที่ 5.6 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการดูดติดผิวของอาร์เซนิตด้วยดินทรายปนร่วนในการศึกษาเวลาสัมผัสดูดซับที่เหมาะสม

เมื่อพิจารณาผลการทดลองดังกล่าว จะเห็นว่าในบางชุดการทดลอง ความสามารถในการดูดติดผิวสูงขึ้นในช่วงแรก ๆ แล้วจะลดลง หลังจากนั้นจะเพิ่มขึ้น อาจเป็นเพราะส่วนประกอบในดินมีความแตกต่างกัน ทำให้เวลาเข้าสู่สมดุลในการดูดติดผิวไม่เท่ากัน อีกทั้งตัวอย่างดินที่ใช้ทดลองในการศึกษาเวลาสัมผัสดูดซับที่เหมาะสมนี้มีน้ำหนักเพียง 1 กรัม จึงอาจมีความแตกต่างกันในแต่ละหลอดทดลอง และไม่ได้เป็นตัวแทนที่แท้จริงของดินทั้งหมด ทั้งนี้การหาเวลาเข้าสู่สมดุลจะพิจารณาจากประสิทธิภาพการดูดติดผิวที่มีค่าค่อนข้างคงที่

### 5.3 การศึกษาถึงความสามารถการดูดติดผิวของอาร์เซนิตด้วยตัวอย่างดินที่พีเอชต่าง ๆ

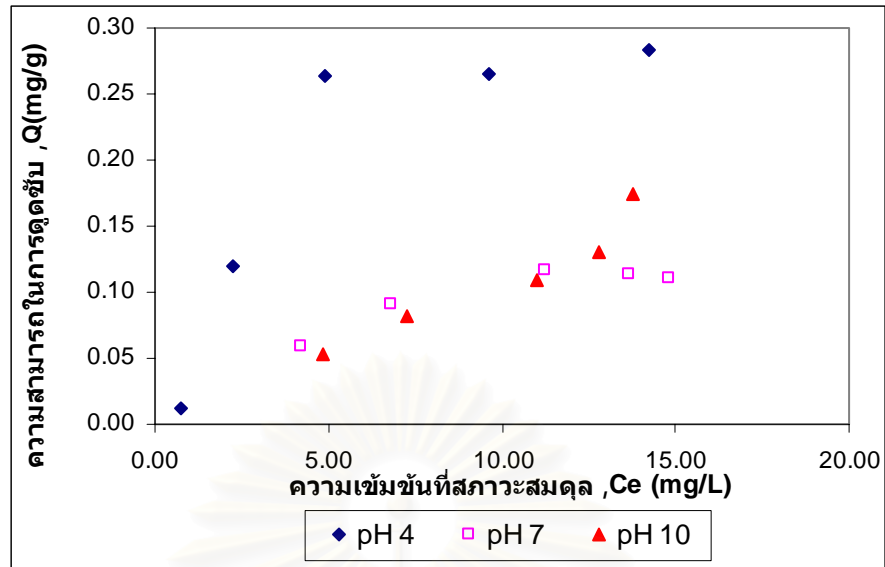
ทำการทดลองแบบแบตช์เช่นเดียวกันในดินทั้ง 3 ชนิด โดยใช้สารละลายอาร์เซนิตสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้น 15 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่มีการปรับพีเอชเริ่มต้น 3 ค่าพีเอช คือ 4 7 และ 10 ในการศึกษาความสามารถในการดูดติดผิวของอาร์เซนิตด้วยตัวอย่างดิน ใช้ปริมาณดิน 0.5 1 2.5 และ 10 กรัม เป็นเวลา 96 ชั่วโมง ผลการทดลองจำแนกตามชนิดดินได้แสดงไว้ดังรูปที่ 5.7 ถึง 5.9 และผลการทดลองจำแนกตามสภาวะพีเอชเริ่มต้นแสดงดังรูปที่ 5.10 ถึง 5.12 และรายละเอียดผลการศึกษาแสดงในภาคผนวก ค.

ผลการทดลองในชุดการทดลองแบบแบตช์ส่วนใหญ่ พบว่า เมื่อตัวอย่างดินที่ใช้ในการดูดติดผิวมีปริมาณสูงขึ้น จะทำให้ปริมาณอาร์เซนิตที่ถูกดูดติดผิวมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณดินที่ใช้ในการทดลอง แต่ความสามารถในการดูดติดผิวของอาร์เซนิต (เทียบกับน้ำหนักดิน) มีค่าลดลงเมื่อปริมาณดินเพิ่มขึ้น

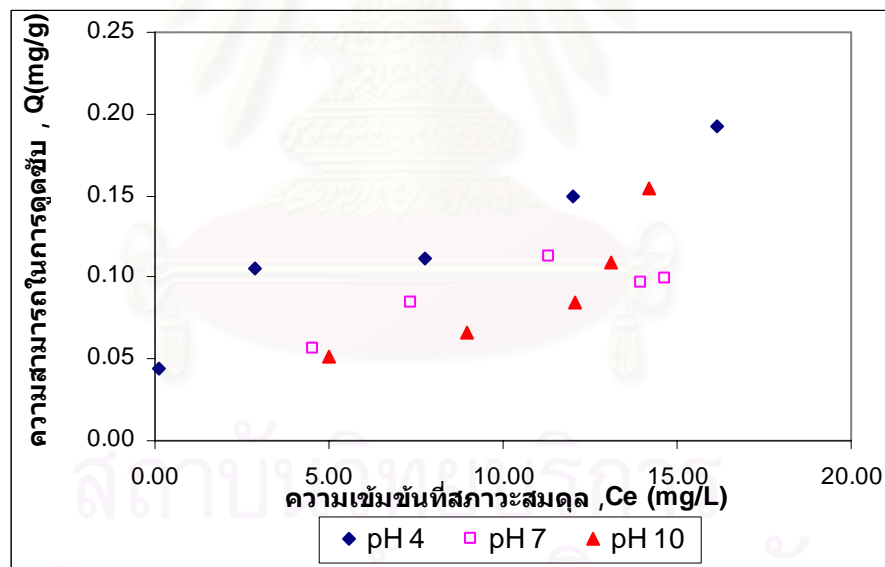
ผลการศึกษาเมื่อจำแนกตามประเภทดิน ในดินร่วนเหนียวปนทราย ซึ่งมีค่าพีเอชที่สมดุลของพีเอชเริ่มต้น 4 7 และ 10 เท่ากับ  $4.23 \pm 0.11$   $7.69 \pm 0.12$  และ  $9.72 \pm 0.47$  ตามลำดับ พิจารณาจากความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มข้นที่สภาวะสมดุล (Ce) และความสามารถในการดูดติดผิว (Q) ดังรูปที่ 5.7 จะเห็นได้ว่า ที่พีเอชเริ่มต้น 4 มีความสามารถในการดูดติดผิวได้สูงที่สุด รองลงมาคือที่พีเอช 7 และ 10 ตามลำดับ โดยที่พีเอช 7 และ 10 มีความสามารถในการดูดติดผิวใกล้เคียงกัน

สำหรับความสามารถในการดูดติดผิวของอาร์เซนิตของดินร่วนเหนียว ดังรูปที่ 5.8 และมีค่าพีเอชที่สมดุลของพีเอชเริ่มต้น 4 7 และ 10 เท่ากับ  $4.36 \pm 0.12$   $7.53 \pm 0.18$  และ  $9.32 \pm 0.60$  ตามลำดับ พบว่า ที่พีเอชเริ่มต้น 4 มีความสามารถในการดูดติดผิวได้สูงที่สุด รองลงมาคือที่พีเอช 7 และ 10 ตามลำดับ โดยที่พีเอช 7 และ 10 มีความสามารถในการดูดติดผิวใกล้เคียงกันเช่นเดียวกับการดูดติดผิวบนดินร่วนเหนียวปนทราย

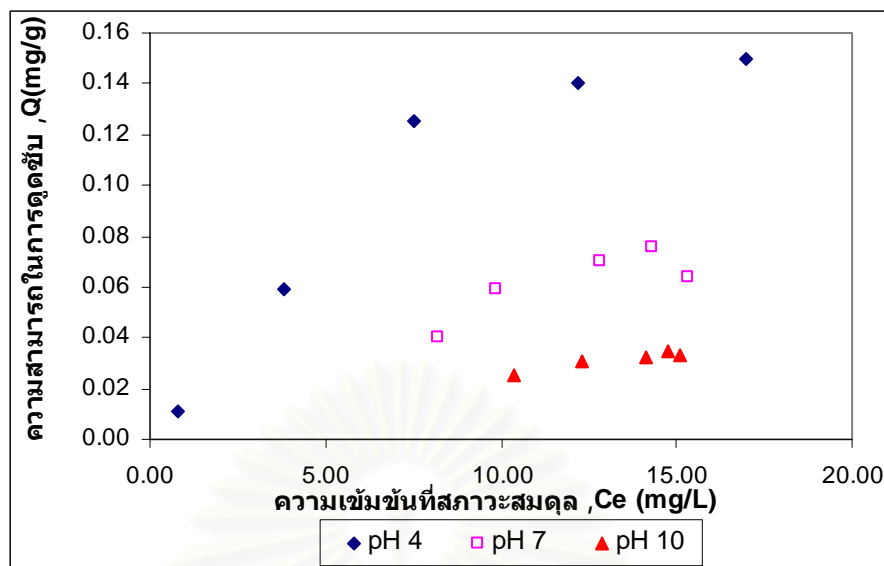
ในขณะที่ผลการศึกษาในดินทรายปนร่วน ซึ่งมีค่าพีเอชที่สมดุลของพีเอชเริ่มต้น 4 7 และ 10 เท่ากับ  $4.14 \pm 0.12$   $7.77 \pm 0.18$  และ  $10.38 \pm 0.14$  ตามลำดับ ความสามารถในการดูดติดผิว (Q) ของดินที่พีเอช 4 มีค่าสูงที่สุด ดังรูปที่ 5.9 รองลงมาคือที่พีเอช 7 และ 10 ตามลำดับ โดยที่แต่ละพีเอช มีความสามารถในการดูดติดผิวที่แตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัด



รูปที่ 5.7 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นที่สภาวะสมดุลและความสามารถในการดูดซับของสารทดลองชุดดินร่วนเหนียวปนทราย ที่สภาวะพีเอชต่างๆ



รูปที่ 5.8 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นที่สภาวะสมดุลและความสามารถในการดูดซับของสารทดลองชุดดินร่วนเหนียว ที่สภาวะพีเอชต่างๆ



รูปที่ 5.9 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นที่สภาวะสมดุลและความสามารถในการดูดติดผิวของการทดลองชุดดินทรายปนร่วน ที่สภาวะพีเอชต่างๆ

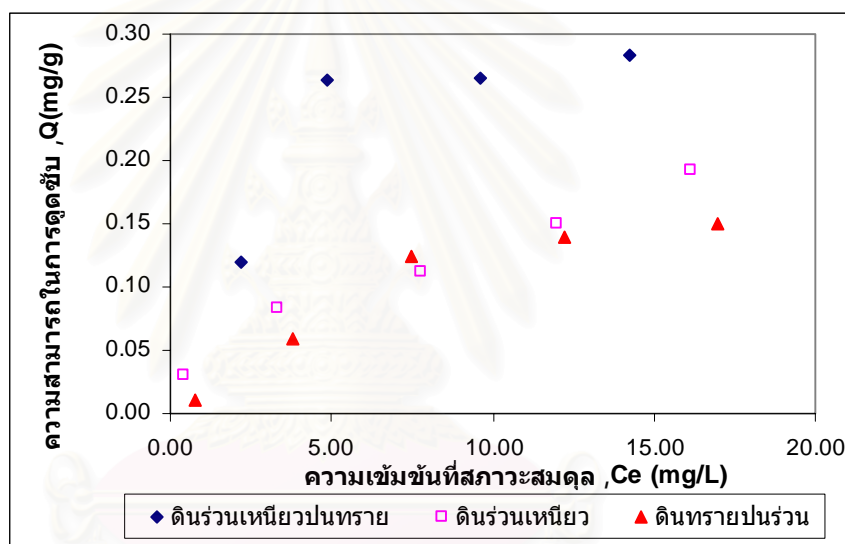
จากผลการทดลอง พบว่า ในดินตัวอย่างทั้ง 3 ชนิด ความสามารถในการดูดติดผิวของอาร์เซนเตลลดลง เมื่อสภาวะพีเอชเริ่มต้นเพิ่มขึ้น และจากผลดังกล่าวสอดคล้องกับผลการทดลองของทั้ง Huang (1994) Sabine (2002) และ Goh และ Lim (2004) ซึ่งทำการทดสอบการดูดติดผิวอาร์เซนเตลโดยดิน และพบว่าเมื่อเพิ่มพีเอชของสารละลาย ปริมาณอาร์เซนิกที่ถูกดูดติดผิวจะมีค่าลดลง โดย Goh และ Lim อธิบายเหตุผลที่พีเอช 4 การดูดติดผิวเกิดขึ้นได้ดีกว่าที่พีเอชอื่น เนื่องจากดินที่ใช้ในการศึกษานั้นเป็นดินตามธรรมชาติ ซึ่งมีค่าพีเอชที่ประจุ่มบนผิวหน้าเป็นศูนย์ ( $pH_{PZC}$ , Point of Zero Charge) อยู่ที่พีเอชประมาณ 4 ถึง 5 ดังนั้นที่พีเอช 4 ประจุ่มบนผิวหน้าจะเป็นประจุ่มบวก และการดูดติดผิวของอาร์เซนเตลจะเกิดขึ้นได้ดี ในขณะที่ที่พีเอช 7 และ 10 ประจุ่มที่ผิวหน้าเป็นลบ ทำให้การดูดติดผิวของอาร์เซนเตลเกิดได้น้อยลง

เมื่อพิจารณาผลการศึกษาจำแนกตามสภาวะพีเอชเริ่มต้นที่ทดลอง พบว่า ที่สภาวะพีเอช 4 ค่าพีเอชที่สภาวะสมดุลเท่ากับ  $4.23 \pm 0.11$  สำหรับดินร่วนเหนียวปนทราย เท่ากับ  $4.36 \pm 0.12$  สำหรับดินร่วนเหนียว และเท่ากับ  $4.14 \pm 0.12$  สำหรับดินทรายปนร่วน การทดลองพบว่าความสามารถในการดูดติดผิวของอาร์เซนเตลบนดินร่วนเหนียวปนทรายสูงที่สุด รองลงมาคือดินร่วนเหนียว และดินร่วนปนทรายตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 5.10

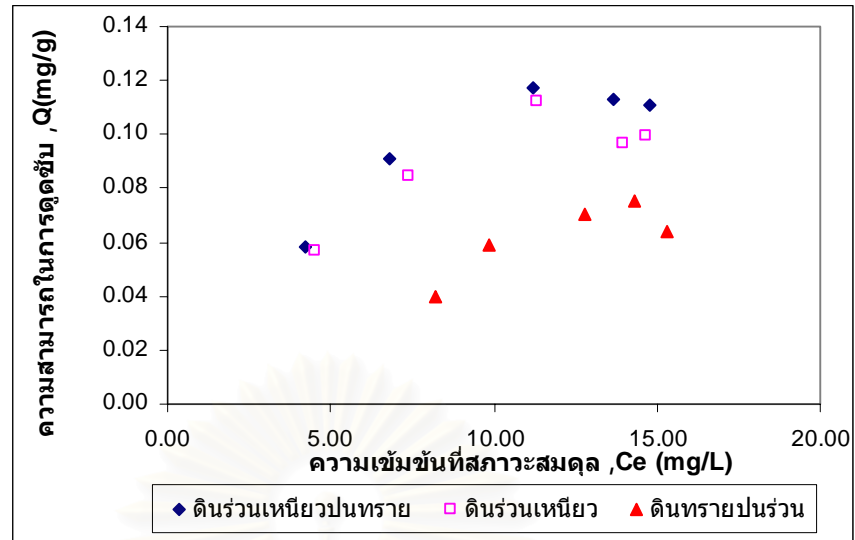
ในชุดการทดลองสภาวะพีเอชเริ่มต้น 7 พีเอชที่สภาวะสมดุลเปลี่ยนแปลงดังนี้ พีเอชที่สภาวะสมดุลมีค่าเท่ากับ  $7.69 \pm 0.12$  สำหรับดินร่วนเหนียวปนทราย เท่ากับ  $7.53 \pm 0.18$

สำหรับดินร่วนเหนียว และเท่ากับ  $7.77 \pm 0.18$  สำหรับดินทรายปนร่วน พบว่า ดินร่วนเหนียวปนทรายมีความสามารถในการดูดติดผิวของอาร์เซนตสูงที่สุด รองลงมาคือดินร่วนเหนียว และดินทรายปนร่วนตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 5.11

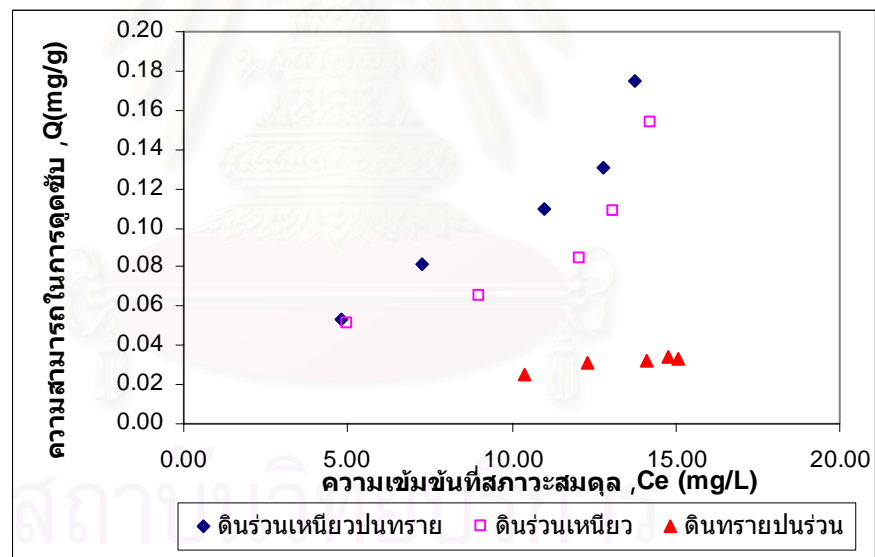
ผลการศึกษา ในชุดการทดลองสภาวะพีเอชเริ่มต้น 10 พีเอชที่สภาวะสมดุลเปลี่ยนแปลงดังนี้ พีเอชที่สภาวะสมดุลมีค่าเท่ากับ  $9.72 \pm 0.47$  สำหรับดินร่วนเหนียวปนทราย เท่ากับ  $9.32 \pm 0.60$  สำหรับดินร่วนเหนียว และเท่ากับ  $10.379 \pm 0.14$  สำหรับดินทรายปนร่วน ความสามารถในการดูดติดผิวของอาร์เซนตของสภาวะพีเอชชุดนี้ เป็นเช่นเดียวกับพีเอช 4 และ 7 คือ ดินร่วนเหนียวปนทรายมีความสามารถในการดูดติดผิวของอาร์เซนตสูงที่สุด รองลงมาคือดินร่วนเหนียว และดินทรายปนร่วนตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 5.12



รูปที่ 5.10 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นที่สภาวะสมดุลและความสามารถในการดูดติดผิวของการทดลองชุดดินต่างๆ ที่สภาวะพีเอช 4



รูปที่ 5.11 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นที่สภาวะสมดุลและความสามารถในการดูดติดผิวของการทดลองชุดดินต่างๆ ที่สภาวะพีเอช 7



รูปที่ 5.12 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นที่สภาวะสมดุลและความสามารถในการดูดติดผิวของการทดลองชุดดินต่างๆ ที่สภาวะพีเอช 10

เมื่อเปรียบเทียบความสามารถในการดูดติดผิวของอาร์เซนิตโดยดินทั้ง 3 ชนิดที่ศึกษากับดินในการศึกษาอื่น (Ladeira และ Ciminelli, 2004) คือ ดิน oxisols (ดินแดง) ทำการพิจารณาที่สภาวะพีเอช และที่ความเข้มข้นสารละลายอาร์เซนิตเริ่มต้นใกล้เคียงกัน พบว่าที่พีเอชประมาณ 4 ถึง 5 ดินแดงจะมีความสามารถในการดูดติดผิวสูงสุด โดยมีความสามารถในการ

ดูดติดผิวสูงสุดเท่ากับ 0.5 มิลลิกรัมต่อกรัม ในขณะที่ดินร่วนเหนียวปนทราย มีความสามารถในการดูดติดผิว 0.28 มิลลิกรัมต่อกรัม ดินร่วนเหนียว 0.19 มิลลิกรัมต่อกรัม และดินทรายปนร่วน 0.15 มิลลิกรัมต่อกรัม พบว่าดินทั้ง 3 ชนิดมีความสามารถในการดูดติดผิวต่ำกว่าดินแดง ซึ่งน่าจะมีสาเหตุจากคุณสมบัติต่าง ๆ ในดินที่เป็นปัจจัยส่งเสริมการดูดติดผิว เช่น ปริมาณเหล็กในดิน พื้นที่ผิวจำเพาะ เป็นต้น

และเมื่อเปรียบเทียบความสามารถในการดูดติดผิวของดินในงานวิจัยนี้ทั้ง 3 ชนิด โดยพิจารณาจากคุณสมบัติต่าง ๆ ดังตาราง 5.1 พบว่า สาเหตุที่ดินทรายปนร่วนความสามารถในการดูดติดผิวต่ำกว่าดินอีก 2 ชนิด เนื่องมาจากร้อยละของดินเหนียวในดิน (Percent Clay) และ ปริมาณเหล็ก (Fe) ในดิน ซึ่งเป็นคุณสมบัติที่ทำให้เกิดการดูดติดผิว มีปริมาณน้อยกว่าดินอีก 2 ชนิด

สำหรับความสามารถในการดูดติดผิวของอาร์เซนเดบนดินร่วนเหนียวปนทรายและดินร่วนเหนียว จากผลการทดลองข้างต้นพบว่า ดินร่วนเหนียวปนทรายมีความสามารถในการดูดติดผิวสูงกว่าดินร่วนเหนียว แม้จะมีร้อยละของดินเหนียว และ ปริมาณเหล็กต่ำกว่า แต่เมื่อพิจารณาจากชนิดแร่ธาตุ (ซึ่งวิเคราะห์ด้วยเครื่อง XRD) ดินทั้ง 2 ชนิดมีแร่ธาตุหลักในลำดับที่ 3 ต่างกันคือ ดินร่วนเหนียวปนทราย แร่ธาตุหลักในลำดับที่ 3 คือ Muscovite ซึ่งมีค่าพีเอชที่ประจวบมบนผิวหน้าเป็นศูนย์ ( $\text{pH}_{\text{PZC}}$ ) เท่ากับ 8-9 (Lower, 2001) แต่ดินร่วนเหนียว มีแร่ธาตุหลักในลำดับที่ 3 คือ Oligoclase ซึ่งจัดอยู่ในกลุ่มย่อยเดียวกับ Feldspar (Cope, 1983) ซึ่ง Feldspar มีค่าพีเอชที่ประจวบมบนผิวหน้าเป็นศูนย์ ( $\text{pH}_{\text{PZC}}$ ) เท่ากับ 2-2.4 (Sparks, 1995) ซึ่งต่ำกว่าของ Muscovite ในดินร่วนเหนียวปนทรายมาก ดังนั้น ดินร่วนเหนียวปนทรายน่าจะมีค่าพีเอชที่ประจวบมบนผิวหน้าเป็นศูนย์ ( $\text{pH}_{\text{PZC}}$ ) สูงกว่าของดินร่วนเหนียว คือมีช่วงของพีเอชที่ประจวบมบนผิวหน้าเป็นบวกกว้างกว่า จึงทำให้เกิดการดูดติดผิวของอาร์เซนเดมมากกว่า ดังผลการทดลองข้างต้น

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

#### 5.4 การศึกษาถึงสมการไอโซเทอมการดูดติดผิว (Adsorption Isotherm) ของการดูดติดผิวของอาร์เซนิตด้วยตัวอย่างดิน โดยการทดลองแบบแบดซ์

เมื่อนำข้อมูลผลการทดลอง ความสามารถในการดูดติดผิวของอาร์เซนิต และ ความเข้มข้นที่สภาวะสมดุล ในหัวข้อที่ 5.3 ที่ได้ มาทำการสร้างกราฟไอโซเทอมของการดูดติดผิวใน 3 แบบ เช่น ไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบเชิงเส้น (Linear Adsorption Isotherm) แบบแลงมัวร์ (Langmuir Adsorption Isotherm) และแบบฟรุนดลิช (Freundlich Adsorption Isotherm) เพื่อพิจารณาว่าการดูดติดผิวของอาร์เซนิต ด้วยตัวอย่างแต่ละชนิดในการทดลองนี้ จะสอดคล้องกับไอโซเทอมของการดูดติดผิวแบบใด ด้วยการพิจารณาค่า R-Square ของกราฟไอโซเทอม ซึ่งค่า R-Square ของกราฟไอโซเทอมของการดูดติดผิวทุกแบบของแต่ละชนิดดิน แสดงดังตาราง 5.2

ตารางที่ 5.2 ค่า R-Square ของกราฟไอโซเทอมของการดูดติดผิวของอาร์เซนิตด้วยดินชนิดต่าง ๆ

พีเอช	ดินร่วนเหนียวปนทราย			ดินร่วนเหนียว			ดินทรายปนร่วน		
	Linear Isotherm	Langmuir Isotherm	Freundlich Isotherm	Linear Isotherm	Langmuir Isotherm	Freundlich Isotherm	Linear Isotherm	Langmuir Isotherm	Freundlich Isotherm
4	0.5878	0.9114	0.7640	0.9781	0.9117	0.9913	0.8409	0.9441	0.9622
7	0.7915	0.9446	0.8806	0.6631	0.9075	0.8054	0.6649	0.7890	0.7336
10	0.9157	0.9829	0.9573	0.7604	0.8357	0.7987	0.9077	0.9330	0.9208

จากตารางที่ 5.2 เมื่อพิจารณาค่า R-Square ของแต่ละชุดการทดลอง จะเห็นว่าในชุดการทดลองส่วนใหญ่ ค่า R-Square ของไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบแลงมัวร์ (Langmuir Adsorption Isotherm) มีค่าสูงที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับไอโซเทอมแบบเชิงเส้น และแบบฟรุนดลิช ซึ่งจากสมการของแลงมัวร์แสดงในสมการที่ (3.10) คือ

$$Q = \frac{abC_e}{(1 + bC_e)} \quad (3.10)$$

จากสมการดังกล่าวสามารถแปลงให้อยู่ในรูปสมการใหม่ได้ดังนี้

$$\frac{1}{Q} = \frac{1}{ab} \frac{1}{C_e} + \frac{1}{a} \quad (5.1)$$



ทำการสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $1/C_e$  และ  $1/Q$  เพื่อที่จะหาสมการการดูดติดผิวแบบแลงมัวร์ ซึ่งจะได้สมการไอโซเทอมแบบแลงมัวร์ ของทุก ๆ ชุดตัวอย่างดินและทุก ๆ สภาวะพีเอช ดังแสดงในรูปที่ 5.13 ถึง 5.15 และแสดงรายละเอียดในภาคผนวก ค.

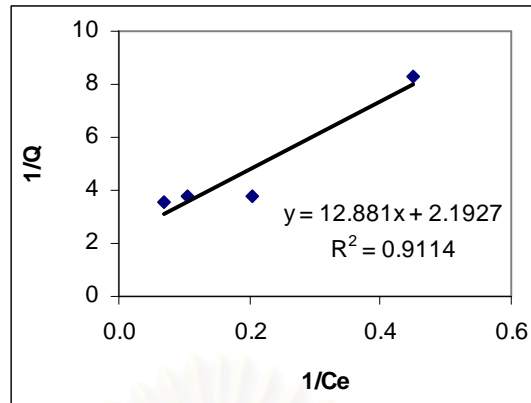
สำหรับกราฟไอโซเทอมแบบฟรุนดลิช จะสามารถสร้างได้จากการแปลงสมการของ ฟรุนดลิช ซึ่งแสดงในสมการที่ (3.11) คือ

$$Q = K_F C_e^{1/n} \quad (3.11)$$

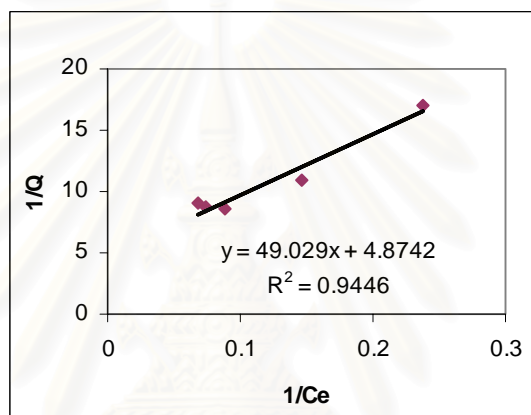
ซึ่งจากสมการดังกล่าวสามารถแปลงให้อยู่ในรูปสมการใหม่ได้ดังนี้

$$\text{Log}Q = \text{Log}K + \frac{1}{n} \text{Log}C_e \quad (5.2)$$

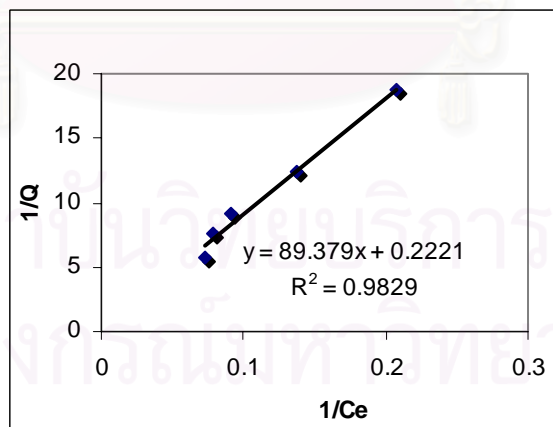
ทำการสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $\text{Log} C_e$  และ  $\text{Log} Q$  เพื่อที่จะหาสมการการดูดติดผิวแบบฟรุนดลิช ดังแสดงในรูปที่ 5.16 ถึง 5.18 ส่วนไอโซเทอมแบบเชิงเส้นก็สามารถหาสมการของการดูดติดผิวได้จากความสัมพันธ์ระหว่าง  $C_e$  และ  $Q$  เลย แสดงดังรูปที่ 5.19 ถึง 5.21 และแสดงรายละเอียดในภาคผนวก ค.



(ก.)



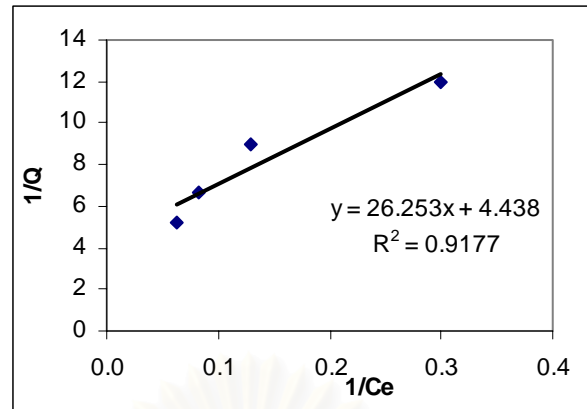
(ข.)



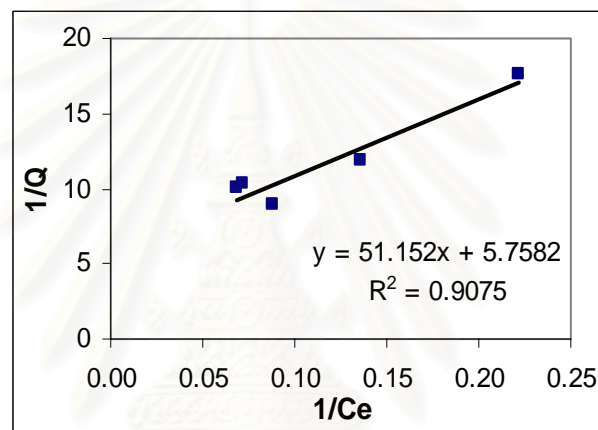
(ค.)

รูปที่ 5.13 ไอโซเทอมการดูดติดผิวของอาร์เซนิตแบบแลงมัวร์ด้วยตัวอย่างดินร่วนเหนียวปนทราย

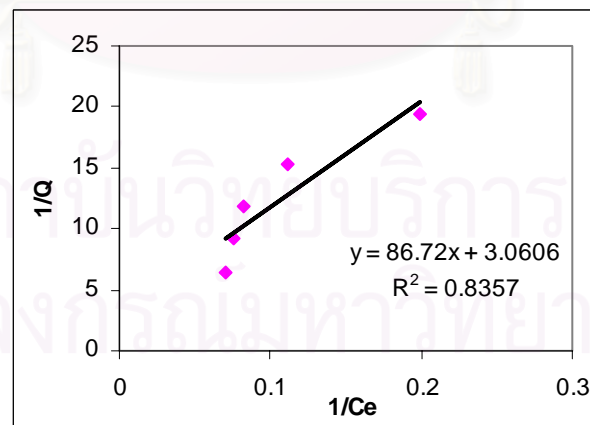
(ก.) ที่พีเอช 4 (ข.) ที่พีเอช 7 (ค.) ที่พีเอช 10



(ก.)

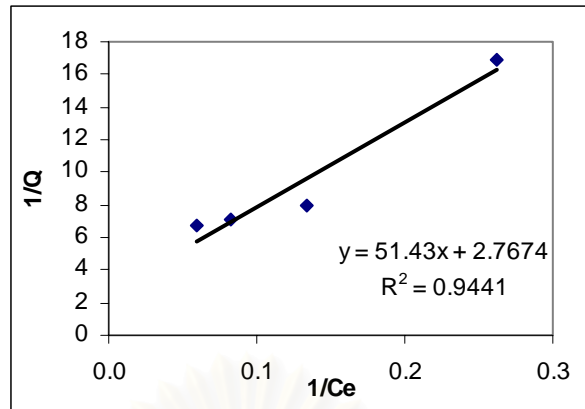


(ข.)

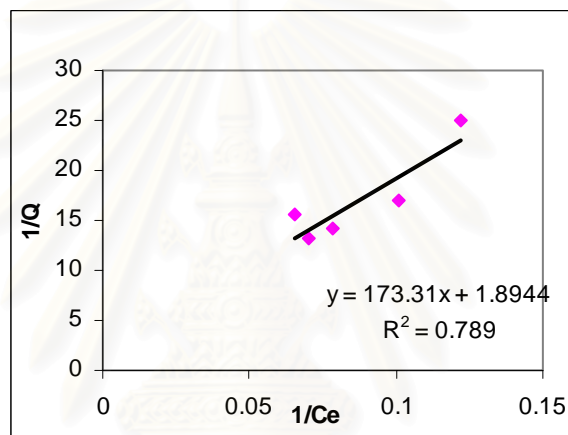


(ค.)

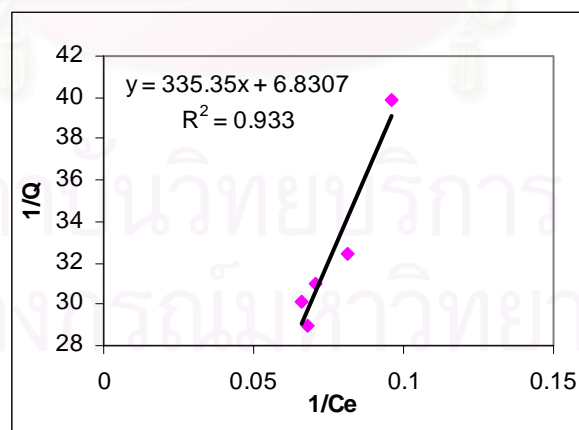
รูปที่ 5.14 ไอโซเทอมการดูดติดผิวของอาร์เซนตแบบแลงมัวร์ด้วยตัวอย่างดินร่วนเหนียว  
(ก.) ที่พีเอช 4 (ข.) ที่พีเอช 7 (ค.) ที่พีเอช 10



(ก.)

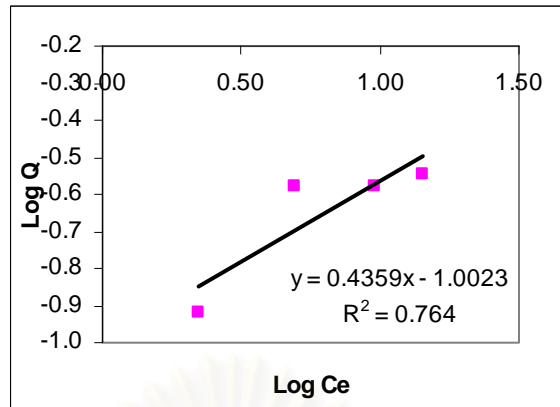


(ข.)

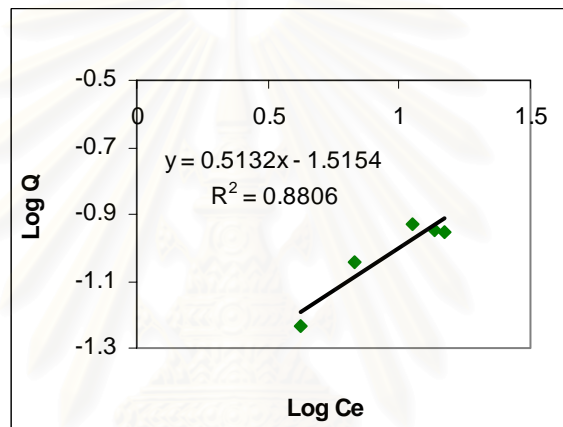


(ค.)

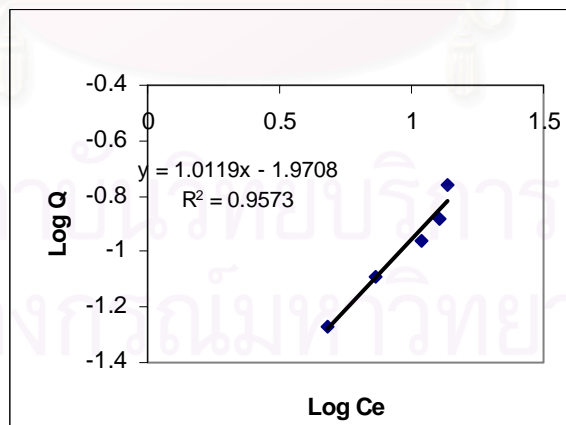
รูปที่ 5.15 ไอโซเทอมการดูดติดผิวของอาร์เซนตแบบแลงมัวร์ด้วยตัวอย่างดินทรายปนร่วน  
(ก.) ที่พีเอช 4 (ข.) ที่พีเอช 7 (ค.) ที่พีเอช 10



(ก.)

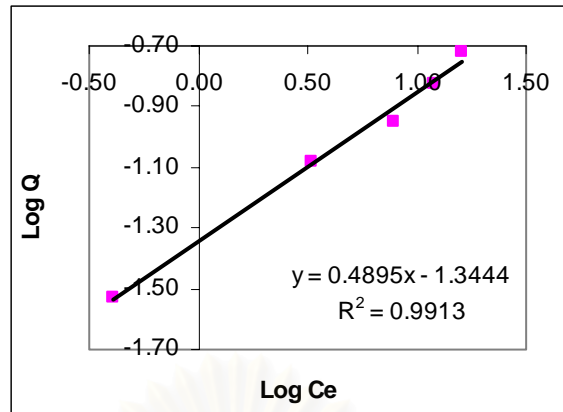


(ข.)

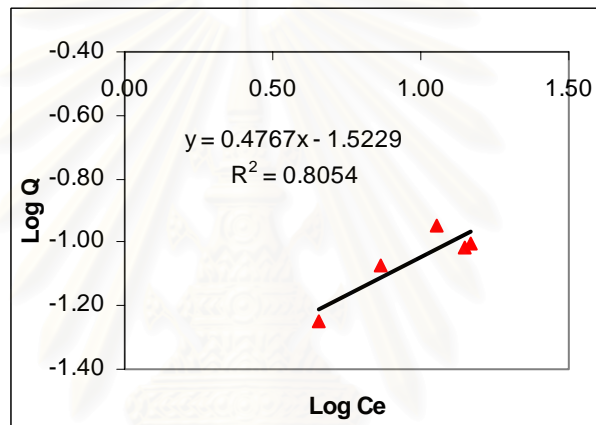


(ค.)

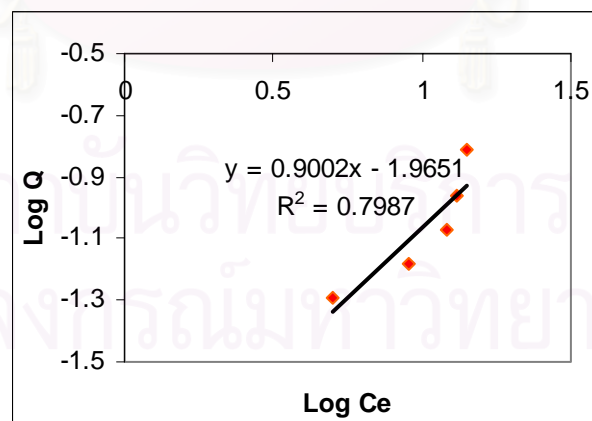
รูปที่ 5.16 ไอโซเทอมการดูดติดผิวของอาร์เซนิตแบบฟรอนด์ลิชด้วยตัวอย่างดินร่วนเหนียวปนทราย (ก.) ที่พีเอช 4 (ข.) ที่พีเอช 7 (ค.) ที่พีเอช 10



(ก.)

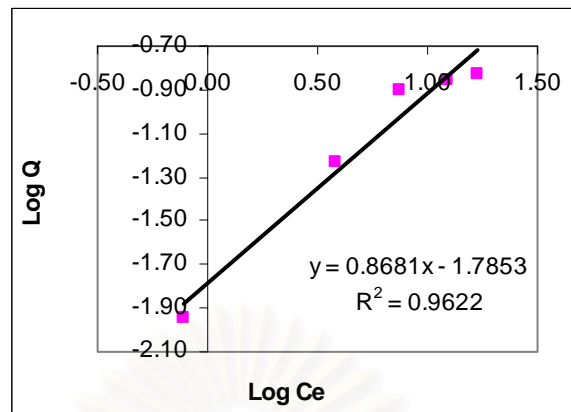


(ข.)

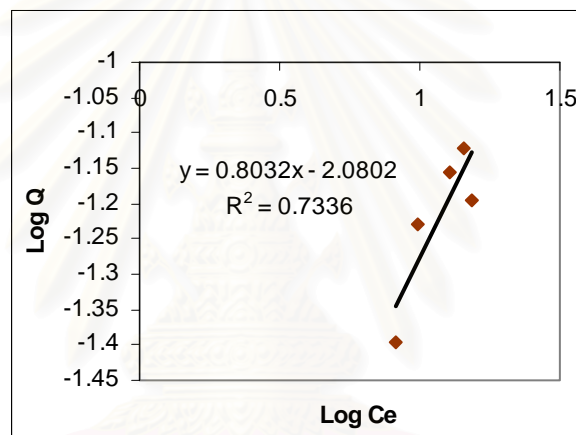


(ค.)

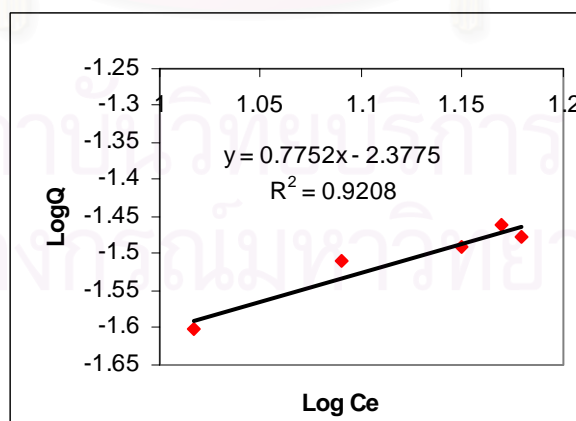
รูปที่ 5.17 ไอโซเทอมการดูดติดผิวของอาร์เซนเนตแบบฟรอนด์ลิจด้วยตัวอย่างดินร่วนเหนียวที่  
(ก.) ที่พีเอช 4 (ข.) ที่พีเอช 7 (ค.) ที่พีเอช 10



(ก.)

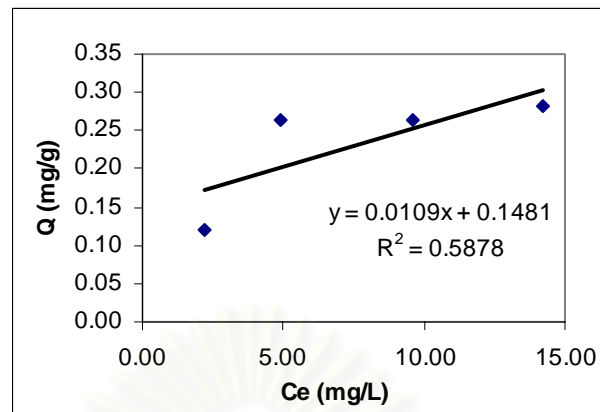


(ข.)

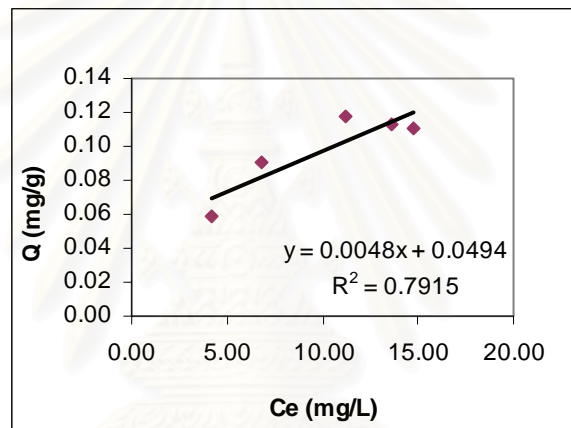


(ค.)

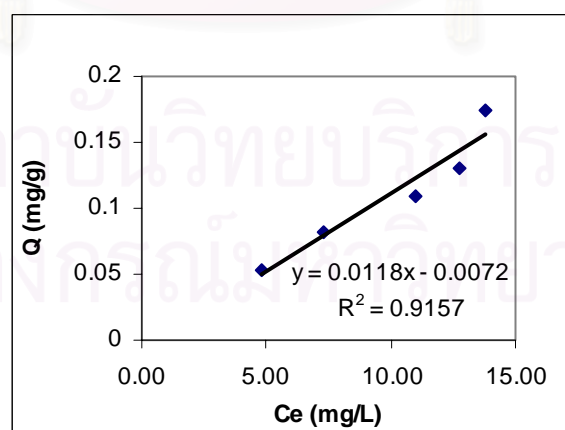
รูปที่ 5.18 ไอโซเทอมการดูดติดผิวของอาร์เซนเนตแบบฟรอนด์ลิชด้วยตัวอย่างดินทรายปนร่วน  
(ก.) ที่พีเอช 4 (ข.) ที่พีเอช 7 (ค.) ที่พีเอช 10



(ก.)



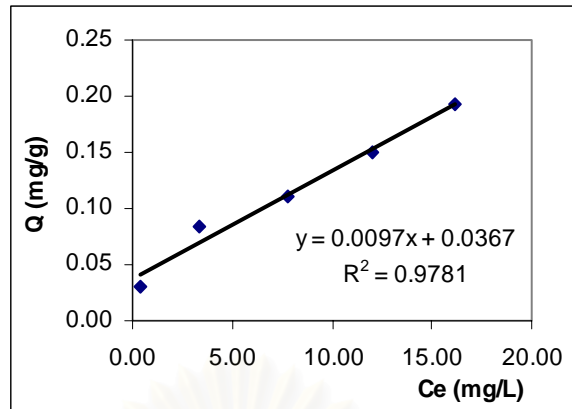
(ข.)



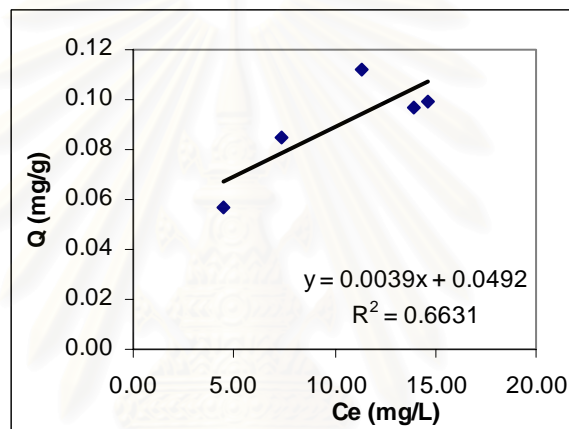
(ค.)

รูปที่ 5.19 ไอโซเทอมการดูดติดผิวของอาร์เซนเนตแบบเชิงเส้นด้วยตัวอย่างดินร่วนเหนียวปนทราย (ก.) ที่พีเอช 4 (ข.) ที่พีเอช 7 (ค.) ที่พีเอช 10

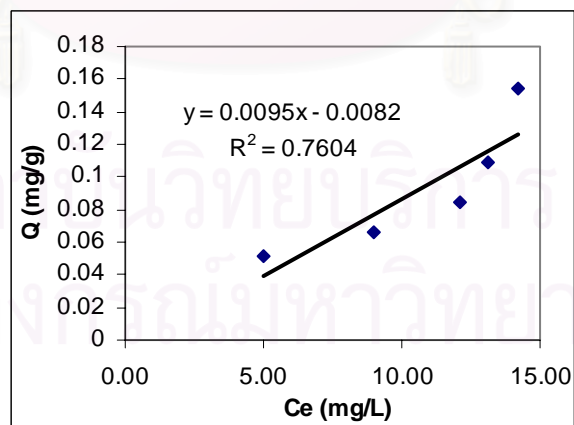




(ก.)

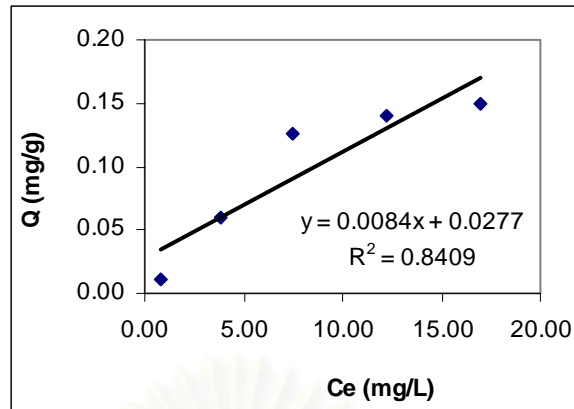


(ข.)

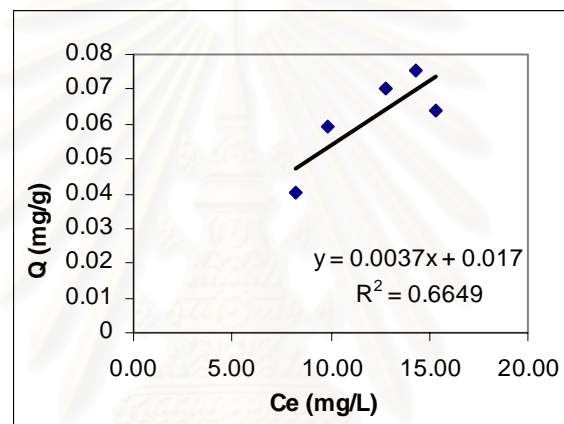


(ค.)

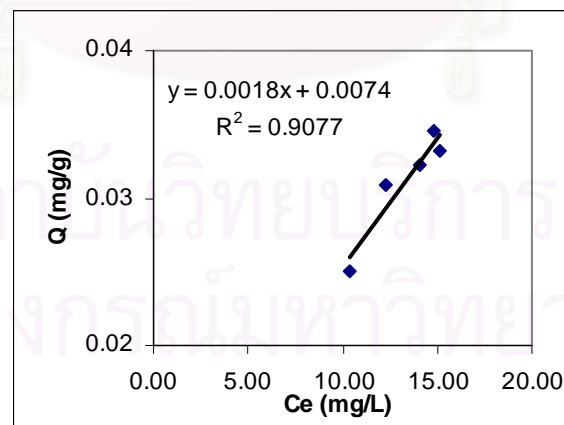
รูปที่ 5.20 ไอโซเทอมการดูดติดผิวของอาร์เซนเนตแบบเชิงเส้นด้วยตัวอย่างดินร่วนเหนียว  
(ก.) ที่พีเอช 4 (ข.) ที่พีเอช 7 (ค.) ที่พีเอช 10



(ก.)



(ข.)



(ค.)

รูปที่ 5.21 ไอโซเทอมการดูดติดผิวของอาร์เซนิตแบบเชิงเส้นด้วยตัวอย่างดินทรายปนร่วน  
(ก.) ที่พีเอช 4 (ข.) ที่พีเอช 7 (ค.) ที่พีเอช 10

## 5.5 การหาค่าพารามิเตอร์การดูดติดผิว (Adsorption Parameter)

จากการทดลองในหัวข้อที่ 5.4 ทำให้ทราบถึงไอโซเทอมของการดูดติดผิวของอาร์เซนิตด้วยตัวอย่างดินในการวิจัยครั้งนี้ ว่าเป็นการดูดติดผิวแบบแลงมัวร์ มีสมการดังสมการที่ 3.10 คือ

$$Q = \frac{abC_e}{(1+bC_e)} \quad (3.10)$$

แปลงสมการที่ 3.10 ให้อยู่ในรูปสมการเชิงเส้น คือ

$$\frac{1}{Q} = \frac{1}{ab} \frac{1}{C_e} + \frac{1}{a} \quad (5.3)$$

จากสมการดังกล่าว จะเห็นได้ว่ามีพารามิเตอร์ของการดูดติดผิว 2 ค่า คือ a และ b ซึ่งสามารถทำการหาค่าพารามิเตอร์ทั้งสองค่านี้ ได้จากสมการไอโซเทอมของการดูดติดผิวจากผลการทดลองในหัวข้อ 5.4 ยกตัวอย่างเช่น การหาพารามิเตอร์ a และ b จากสมการไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบแลงมัวร์ ของดินร่วนเหนียวปนทรายที่สภาวะพีเอช 4 มีสมการคือ

$$\frac{1}{Q} = 12.881 \frac{1}{C_e} + 2.1927$$

โดยที่ Q มีหน่วยเป็น มิลลิกรัมอาร์เซนิตต่อกรัมของดิน

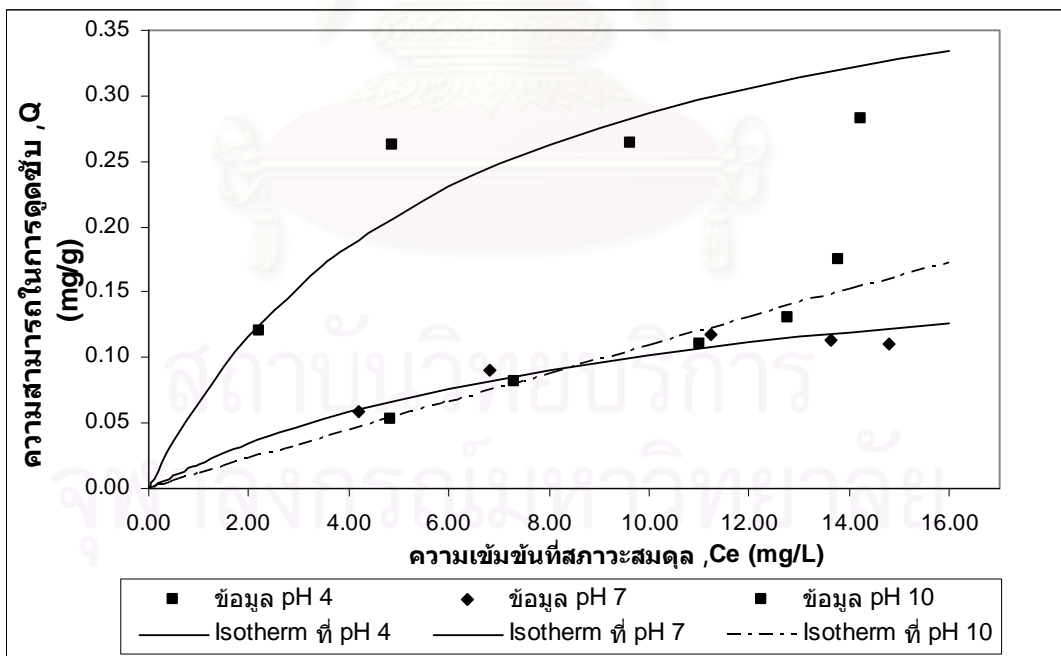
และ  $C_e$  มีหน่วยเป็น มิลลิกรัมต่อลิตร

พารามิเตอร์ a และ b มีค่าเท่ากับ 0.4561 และ 0.1702 ตามลำดับ ซึ่งค่าพารามิเตอร์ a และ b ที่หาได้จากสมการไอโซเทอมทุกชุดการทดลอง แสดงไว้ดังตาราง 5.3

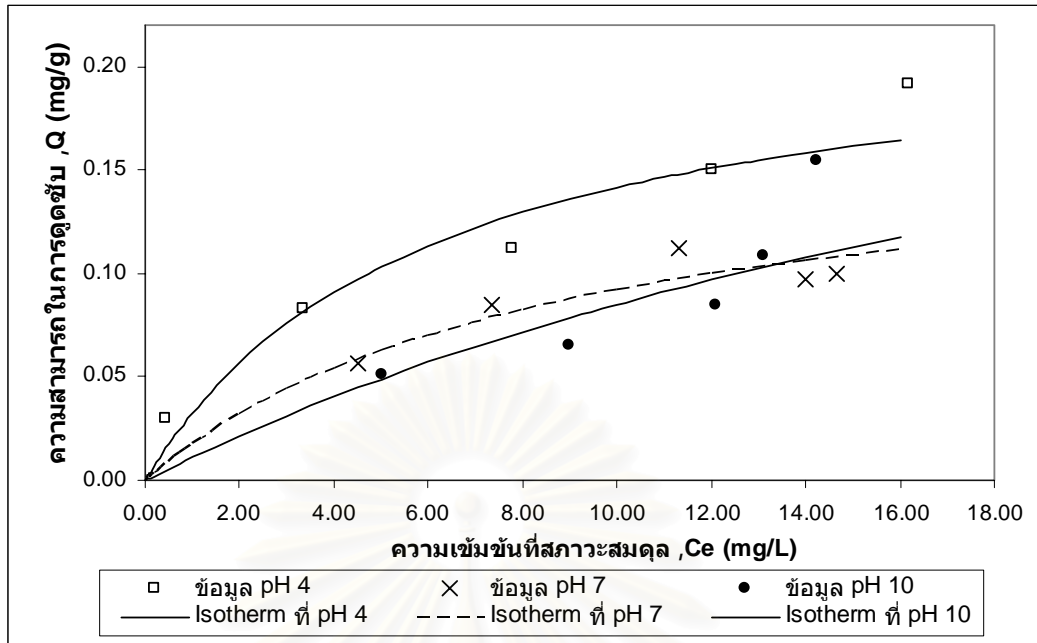
จากการศึกษาสมการไอโซเทอมของการดูดติดผิวของอาร์เซนิตด้วยตัวอย่างดินในหัวข้อที่ 5.3 และ 5.4 ทำให้ได้สมการการดูดติดผิวออกมาดังตารางที่ 5.3 และเมื่อแทนค่า Q และ  $C_e$  ลงไปในแต่ละสมการไอโซเทอม ก็จะได้กราฟการดูดติดผิวของอาร์เซนิตของแต่ละสภาวะพีเอช ซึ่งสามารถเปรียบเทียบกับข้อมูลผลการทดลองที่เกิดขึ้นได้ ดังรูปที่ 5.22 สำหรับดินร่วนเหนียวปนทราย รูปที่ 5.23 สำหรับดินร่วนเหนียว และ รูปที่ 5.24 สำหรับดินทรายปนร่วน และมีรายละเอียดอยู่ในภาคผนวก ง. ซึ่งจากแต่ละรูปจะเห็นได้ว่าสมการไอโซเทอมสามารถแสดงผลไปในทิศทางเดียวกับผลการทดลองจริง

ตารางที่ 5.3 ค่าพารามิเตอร์ของการดูดติดผิวที่หาได้จากสมการไอโซเทอมการดูดติดผิว ของดินชนิดต่างๆ ที่แต่ละสภาวะพีเอช

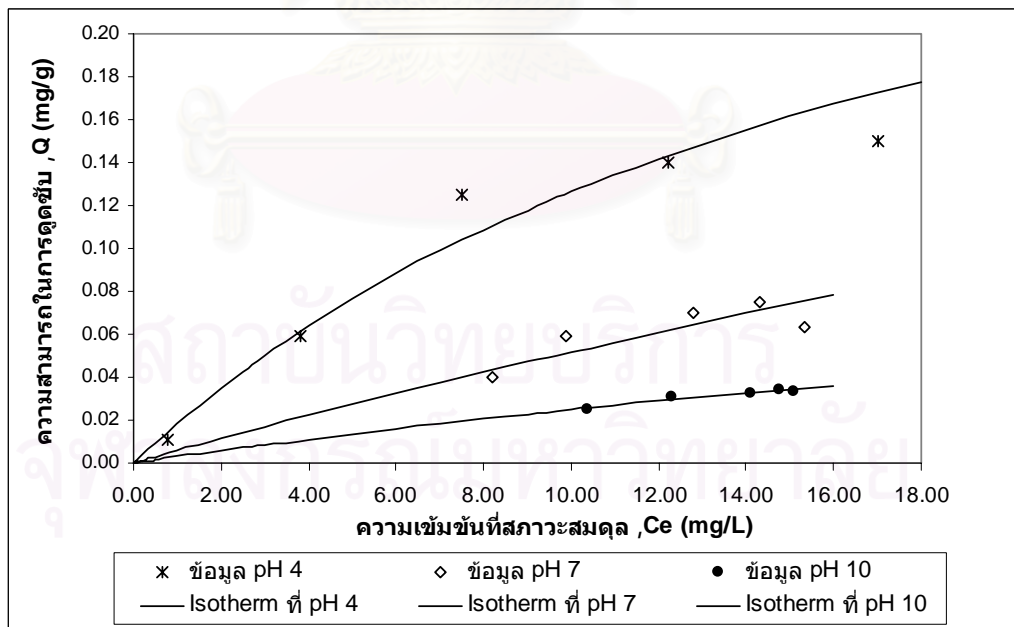
ดิน	pH	สมการไอโซเทอมการดูดติดผิว	พารามิเตอร์การดูดติดผิว	
			a	b
ดินร่วนเหนียวปนทราย	4	$1/Q = 12.881 (1/Ce) + 0.1242$	0.4561	0.1702
	7	$1/Q = 49.029 (1/Ce) + 4.8742$	0.2052	0.0994
	10	$1/Q = 89.379 (1/Ce) + 0.2221$	4.5025	0.0027
ดินร่วนเหนียว	4	$1/Q = 26.253(1/Ce) + 4.438$	0.2253	0.1690
	7	$1/Q = 51.152 (1/Ce) + 5.7582$	0.1737	0.1126
	10	$1/Q = 86.72 (1/Ce) + 3.0606$	0.3267	0.0353
ดินทรายปนร่วน	4	$1/Q = 51.43 (1/Ce) + 2.7674$	0.3614	0.0538
	7	$1/Q = 173.31 (1/Ce) + 1.8944$	0.5279	0.0109
	10	$1/Q = 335.35 (1/Ce) + 6.8307$	0.1464	0.0204



รูปที่ 5.22 ความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถในการดูดติดผิวของอาร์เซนิตด้วยตัวอย่างดินร่วนเหนียวปนทราย และความเข้มข้นของอาร์เซนิตที่สภาวะสมดุล ในสภาวะพีเอช 4 7 และ 10 โดยแสดงข้อมูลและเส้นแนวโน้มจากสมการแลงมัวร์



รูปที่ 5.23 ความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถในการดูดติดผิวของอาร์เซนิตด้วยตัวอย่างดินร่วนเหนียว และความเข้มข้นของอาร์เซนิตที่สภาวะสมดุล ในสภาวะพีเอช 4 7 และ 10 โดยแสดงข้อมูลและเส้นแนวโน้มจากสมการแลงมัวร์

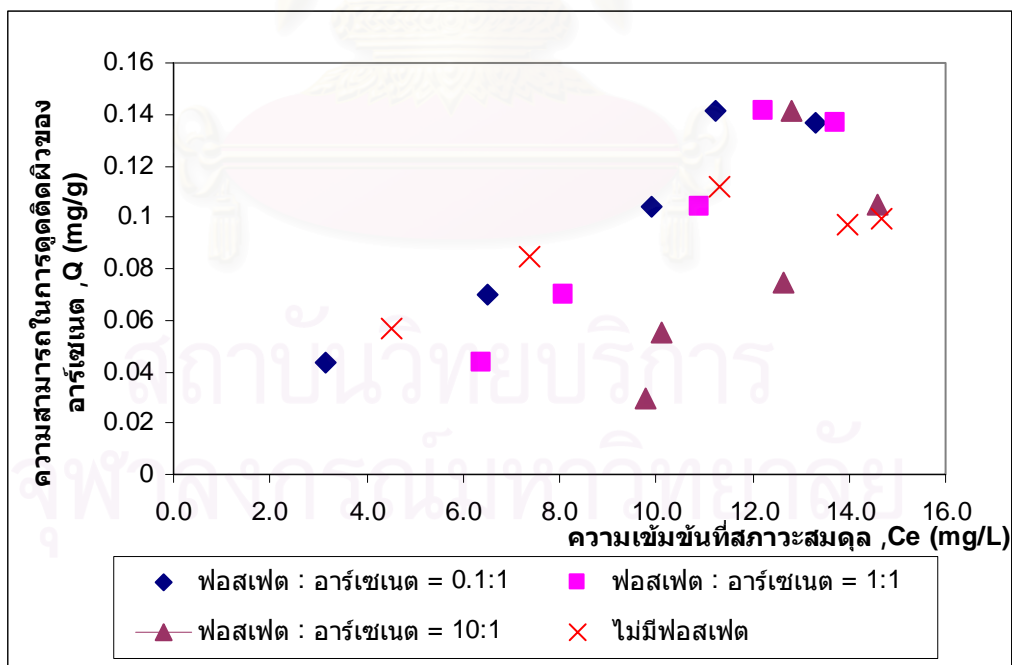


รูปที่ 5.24 ความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถในการดูดติดผิวของอาร์เซนิตด้วยตัวอย่างดินทรายปนร่วน และความเข้มข้นของอาร์เซนิตที่สภาวะสมดุล ในสภาวะพีเอช 4 7 และ 10 โดยแสดงข้อมูลและเส้นแนวโน้มจากสมการแลงมัวร์

## 5.6 การศึกษาผลของอิออนลบที่มีต่อการดูดติดผิวของอาร์เซนิตด้วยตัวอย่างดิน

ทำการทดลองแบบแบตช์โดยใช้ตัวอย่างดินร่วนเหนียว ที่สภาวะพีเอชเริ่มต้น 7 ใช้สารละลายอาร์เซนิตที่มีความเข้มข้น 15 มิลลิกรัมต่อลิตร และเลือกใช้อิออนลบ 2 ชนิด คือ ฟอสเฟต และไบคาร์บอเนต แต่ละชุดการทดลองใช้อิออนลบที่ละชนิด โดยใช้อัตราส่วนการผสมอิออนลบต่ออาร์เซนิต 3 อัตรา คือ 0.1 : 1 1:1 และ 10:1 ในเชิงโมลาร์

ผลการศึกษาเมื่อมีฟอสเฟต พบว่า เมื่อมีปริมาณฟอสเฟตเพิ่มขึ้น ความสามารถในการดูดติดผิวของอาร์เซนิตจะต่ำลง นั่นคือ ฟอสเฟตสามารถยับยั้งการดูดติดผิวของอาร์เซนิตในดินได้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งที่อัตราส่วนฟอสเฟตต่ออาร์เซนิต เท่ากับ 10:1 และ 1: 1 ความสามารถในการดูดติดผิวและประสิทธิภาพการดูดติดผิว (Percent Adsorption) จะลดลงชัดเจน โดยประสิทธิภาพการดูดติดผิวในสภาวะที่มีฟอสเฟต (น้ำหนักดิน 10 กรัม) ลดลงถึงร้อยละ 34.09 ส่วนที่อัตราส่วนฟอสเฟตต่ออาร์เซนิต 1:1 ประสิทธิภาพการดูดติดผิว (น้ำหนักดิน 10 กรัม) ลดลงร้อยละ 13.98 แต่สำหรับสภาวะที่มีฟอสเฟตน้อยกว่าอาร์เซนิต (อัตราส่วน 0.1:1) ฟอสเฟตจะไม่ส่งผลต่อการดูดติดผิวของอาร์เซนิต ผลการศึกษาแสดงดังรูปที่ 5.25 และแสดงรายละเอียดในภาคผนวก จ.



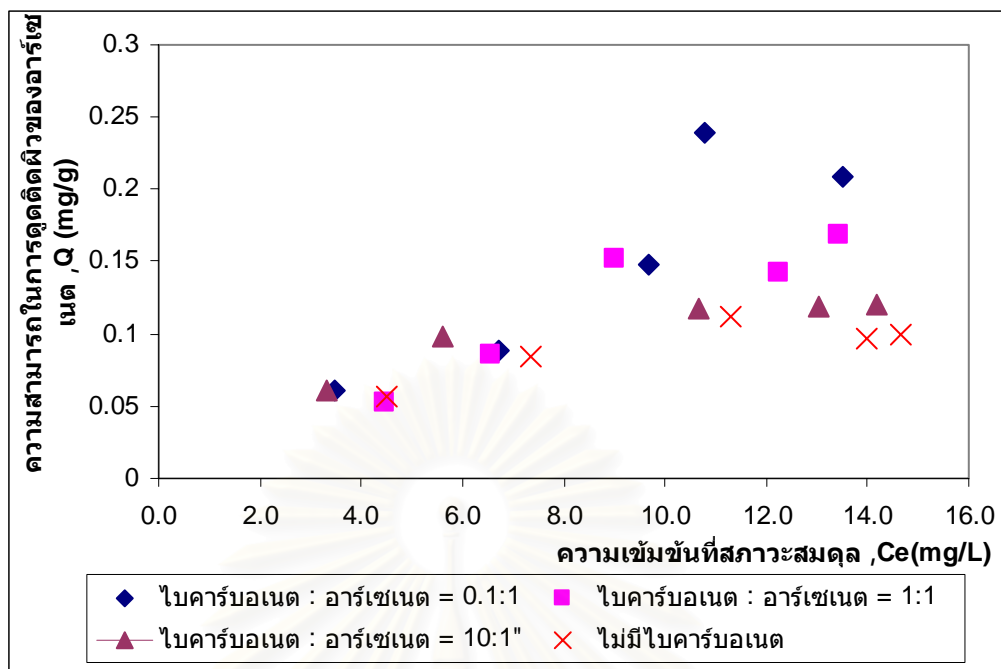
รูปที่ 5.25 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นที่สภาวะสมดุล และความสามารถในการดูดติดผิวของดินร่วนเหนียวที่พีเอช 7 เมื่อมีฟอสเฟต

ผลการทดลองที่ได้นั้น กล่าวได้ว่าฟอสเฟตสามารถแย่งการดูดติดผิวของอาร์เซนิต โดยทำให้พื้นที่ที่อาร์เซนิตจะสามารถดูดติดผิวได้ลดลง เนื่องจากฟอสเฟตมีขนาดโมเลกุลเล็กกว่า แต่เกิดปฏิกิริยาการดูดติดผิวแบบ Inner-sphere complexation เช่นเดียวกับอาร์เซนิต จึงมีพื้นที่ผิวจำเพาะหรือพื้นที่ผิวในการทำปฏิกิริยาสูงกว่า และส่งผลให้มีพันธะที่แข็งแกร่งกว่า (มี Binding Affinity สูงกว่าอาร์เซนิต) จึงสามารถแย่งพื้นที่การดูดติดผิวของอาร์เซนิตได้ (Huang, 1994) หรือเนื่องจากเมื่อฟอสเฟตไปสะสม (Accumulate) หรือเกิดผลึก (Precipitate) บนผิวหน้าดิน ทำให้ประจุบนผิวหน้าดินเป็นลบ การดูดติดผิวของอาร์เซนิตจึงเกิดขึ้นได้ไม่ดี (Goh และ Lim, 2004)

และพบว่าผลการทดลองที่ได้มีความสอดคล้องกับการทดลองของ Huang (1994) Smith และคณะ (2002) และ Goh และ Lim (2004) ดังนี้ Huang พบว่าฟอสเฟตมีความสามารถยับยั้งการดูดติดผิวของอาร์เซนิตบนเหล็กออกไซด์ได้ และเกิดพันธะที่แข็งแกร่งกว่าอาร์เซนิต ส่วน Smith และคณะ พบว่าในดินที่มีเหล็กออกไซด์ต่ำ ฟอสเฟตจะทำให้การดูดติดผิวของอาร์เซนิตลดลงอย่างมาก รวมถึงเมื่อปริมาณฟอสเฟตในดินเพิ่มขึ้นตั้งแต่ 0.16 จนถึง 3.2 mmol/L ปริมาณอาร์เซนิตที่ถูกดูดติดผิวจะลดลงอย่างเห็นได้ชัด จาก 0.63 เหลือ 0.37 mmol/kg สำหรับ Goh และ Lim พบว่าฟอสเฟตสามารถยับยั้งการดูดติดผิวของอาร์เซนิตบนเหล็กไฮดรอกไซด์ในดินได้เช่นเดียวกัน

ผลการศึกษาเมื่อมีไบคาร์บอเนต พบว่า ในอัตราส่วนที่ไบคาร์บอเนตมากกว่า และเท่ากับอาร์เซนิต (อัตราส่วน 10 : 1 และ 1 : 1) ไบคาร์บอเนตจะช่วยเพิ่มความสามารถในการดูดติดผิวของอาร์เซนิต สำหรับที่อัตราส่วน 0.1 : 1 ไบคาร์บอเนตไม่ส่งผลต่อการดูดติดผิวของอาร์เซนิต ดังแสดงในรูปที่ 5.26 และแสดงรายละเอียดในภาคผนวก จ.

จากผลการทดลองเมื่อมีไบคาร์บอเนตในสารละลายอาร์เซนิต พบว่า ไบคาร์บอเนตไม่สามารถยับยั้งการดูดติดผิวของอาร์เซนิตได้เช่นเดียวกับฟอสเฟตนั้น เนื่องจากชนิดของปฏิกิริยาการดูดติดผิวของไบคาร์บอเนตเป็นแบบ Outer-sphere complexation (Xiaoguang และคณะ, 2002) ซึ่งต่างจากปฏิกิริยาการดูดติดผิวของอาร์เซนิต และฟอสเฟต ซึ่งมีการดูดติดผิวแบบ Inner-sphere complexation ดังที่ได้กล่าวข้างต้น ดังนั้นไบคาร์บอเนตกับดินจึงเกิดการดูดติดผิวแบบที่มีความแข็งแรงของพันธะน้อยกว่าของอาร์เซนิตกับดิน และไม่สามารถรบกวนการดูดติดผิวของอาร์เซนิตได้



รูปที่ 5.26 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นที่สภาวะสมดุล และความสามารถในการดูดติดผิวของดินร่วนเหนียวที่พีเอช 7 เมื่อมีไบคาร์บอเนต

และพบว่าผลการทดลองสอดคล้องกับ ผลการทดลองของ Xiaoguang และคณะ (2002) ซึ่งทำการทดลองเมื่อมีอิออนลบหลาย ๆ ชนิด โดย Xiaoguang พบว่า เมื่อมีไบคาร์บอเนตเป็นอิออนลบเพียงชนิดเดียว โดยใช้อัตราส่วนไบคาร์บอเนต : อาร์เซเนต ตั้งแต่ 0 : 1 ถึง 12 : 1 พบว่า ไบคาร์บอเนตแทบจะไม่ส่งผลกระทบต่อการทำงานของอาร์เซเนตเลย และนอกจากนี้เมื่อศึกษาถึงความสามารถการดูดติดผิว (Binding affinity) ของแต่ละอิออนจากค่าคงที่สมดุลของปฏิกิริยาของอิออนลบแต่ละชนิด พบว่า ค่าความสามารถการดูดติดผิวของไบคาร์บอเนตมีค่าต่ำสุด เมื่อเทียบกับ อาร์เซเนต และ ฟอสเฟต



## 5.7 การทดลองหาค่าสัมประสิทธิ์การกระจายตัว (Dispersion Coefficient) ของตัวอย่างดินด้วยการทดลองแบบคอลัมน์

ทำการทดลองโดยใช้ชุดการทดลองแบบคอลัมน์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.50 เซนติเมตร ภายในบรรจุตัวอย่างดินคอลัมน์ละ 1 ชนิดดิน จำนวน 3 คอลัมน์ โดยปริมาณดินจะไม่เท่ากันในแต่ละชนิดดิน ดินร่วนเหนียวปนทรายบรรจุปริมาณ 144.92 กรัม ดินร่วนเหนียวบรรจุปริมาณ 133.77 กรัม ดินทรายปนร่วนบรรจุปริมาณ 182.41 กรัม (ความสูงของชั้นดินเท่ากับ 20 เซนติเมตร) ใช้สารตามรอย (Tracer) เป็นสารละลายโบรไมด์มีความเข้มข้น 15 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยกำหนดให้ความเร็วของสารละลายโบรไมด์ที่ไหลผ่านคอลัมน์เท่ากับ 3 มิลลิเมตรต่อชั่วโมง ซึ่งทำให้ได้อัตราการไหลของสารละลายโบรไมด์เท่ากับ 15 มิลลิเมตรต่อชั่วโมง และทำการเก็บตัวอย่างน้ำที่ไหลออกจากทางน้ำออกของคอลัมน์ จนกระทั่งน้ำที่ผ่านคอลัมน์ออกจากทางน้ำออกมีความเข้มข้นของสารละลายโบรไมด์ เท่ากับความเข้มข้นของสารละลายโบรไมด์ที่ป้อนเข้าสู่คอลัมน์ (อัตราความเข้มข้นน้ำขาออกต่อน้ำขาเข้ามีค่าเท่ากับ 1) หลังจากนั้นก็จะทำการป้อนน้ำกลั่นเข้าสู่คอลัมน์แทนสารละลายโบรไมด์ และเก็บตัวอย่างต่อไป จนกระทั่งน้ำออกมีความเข้มข้นของสารละลายโบรไมด์ประมาณเท่ากับ 0

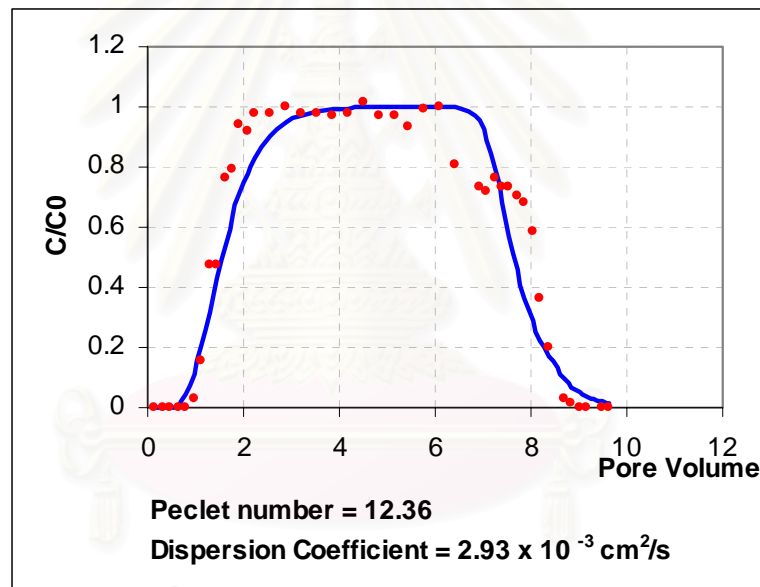
จากการทดลองในดินร่วนเหนียวปนทราย พบว่าปริมาตรสารละลายโบรไมด์ทั้งหมดที่ไหลผ่านคอลัมน์ จนกระทั่งความเข้มข้นของสารละลายขาออกเท่ากับความเข้มข้นที่ป้อนเข้าสู่คอลัมน์ ( $C/C_0 = 1$ ) มีปริมาตรเท่ากับ 0.29 ลิตร หรือเท่ากับ 6.11 เท่าของ Pore volume โดยใช้เวลา 19 ชั่วโมง และเมื่อรวมถึงการป้อนน้ำกลั่น 0.45 ลิตร หรือ 9.64 เท่าของ Pore volume ใช้เวลาไปทั้งหมด 30 ชั่วโมง จนกระทั่งน้ำออกมีความเข้มข้นของสารละลายโบรไมด์น้อยมาก ๆ จนถือว่าเป็น 0 (ไม่หลงเหลือสารละลายโบรไมด์)

จากการทดลองในดินร่วนเหนียว พบว่าปริมาตรสารละลายโบรไมด์ทั้งหมดที่ไหลผ่านคอลัมน์ จนกระทั่งความเข้มข้นของสารละลายขาออกเท่ากับความเข้มข้นที่ป้อนเข้าสู่คอลัมน์ ( $C/C_0 = 1$ ) มีปริมาตรเท่ากับ 0.29 ลิตร หรือเท่ากับ 5.61 เท่าของ Pore volume โดยใช้เวลา 19 ชั่วโมง และเมื่อรวมถึงการป้อนน้ำกลั่น 0.45 ลิตร หรือ 8.85 เท่าของ Pore volume ใช้เวลาไปทั้งหมด 30 ชั่วโมง จนกระทั่งน้ำออกมีความเข้มข้นของสารละลายโบรไมด์น้อยมาก ๆ จนถือว่าเป็น 0 (ไม่หลงเหลือสารละลายโบรไมด์)

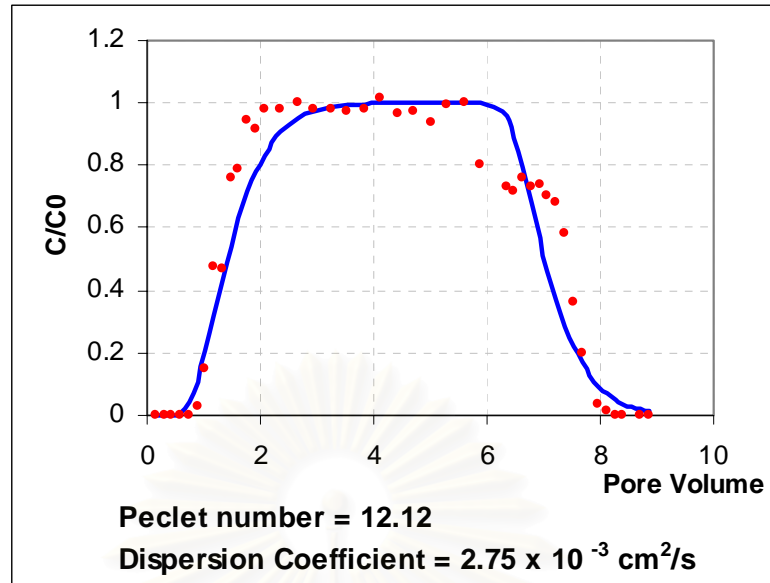
จากการทดลองในดินทรายปนร่วน พบว่าปริมาตรสารละลายโบรไมด์ทั้งหมดที่ไหลผ่านคอลัมน์ จนกระทั่งความเข้มข้นของสารละลายขาออกเท่ากับความเข้มข้นที่ป้อนเข้าสู่คอลัมน์ ( $C/C_0 = 1$ ) มีปริมาตรเท่ากับ 0.26 ลิตร หรือเท่ากับ 7.84 เท่าของ Pore volume โดยใช้เวลา 17 ชั่วโมง และเมื่อรวมถึงการป้อนน้ำกลั่น 0.35 ลิตร หรือ 10.61 เท่าของ Pore volume ใช้เวลา

ไปทั้งหมด 23 ชั่วโมง จนกระทั่งน้ำออกมีความเข้มข้นของสารละลายโบรไมด์น้อยมาก ๆ จนถือว่าเป็น 0

เมื่อได้ผลการทดลองแล้ว (แสดงในภาคผนวก ฉ.) นำข้อมูลผลการทดลองเหล่านี้ไปทำการพลอต Breakthrough Curve เพื่อนำไปใช้หาค่า สัมประสิทธิ์การกระจายตัว (Dispersion Coefficient) โดยนำข้อมูลของ Breakthrough Curve ไปป้อนค่าลงในโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ชื่อ STANMOD ซึ่งในการหาค่าสัมประสิทธิ์การกระจายตัว ต้องใช้โปรแกรมย่อย ชื่อ CFITIM หลังจากทำการกำหนดค่าต่าง ๆ ของโปรแกรมแล้ว โปรแกรมก็จะทำการ fitted curve เพื่อหาค่า Peclet number ออกมา หลังจากนั้นจึงนำค่าที่ได้ไปคำนวณหาค่า สัมประสิทธิ์การกระจายตัว (D) ต่อไป ซึ่ง Breakthrough Curve และการประมาณค่าโดยโปรแกรมจะแสดงดังรูปที่ 5.27 ถึง 5.29

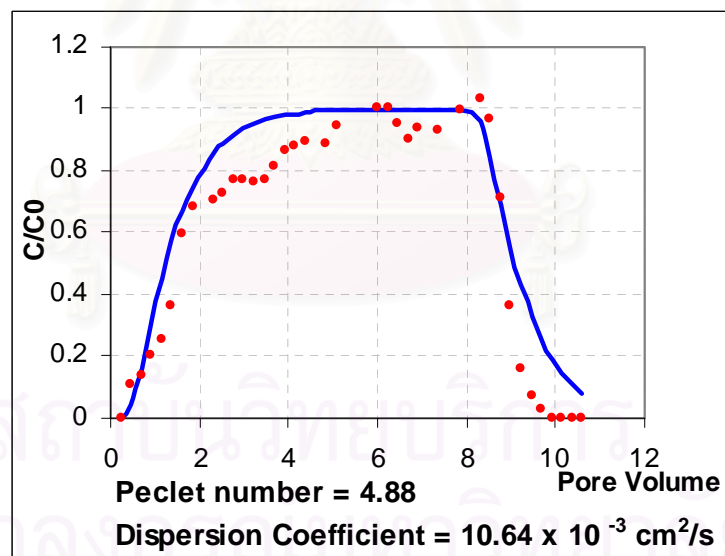


รูปที่ 5.27 Breakthrough Curve และการประมาณค่าจากโปรแกรม CFITIM ของสารละลายโบรไมด์ที่ไหลผ่าน คอลัมน์ดินร่วนเหนียวปนทราย ที่ความเข้มข้นของสารละลายโบรไมด์เริ่มต้น 15 มิลลิกรัมต่อลิตร



รูปที่ 5.28

Breakthrough Curve และการประมาณค่าจากโปรแกรม CFITIM ของสารละลายโบรไมด์ที่ไหลผ่านคอลัมน์ดินร่วนเหนียว ที่ความเข้มข้นของสารละลายโบรไมด์เริ่มต้น 15 มิลลิกรัมต่อลิตร



รูปที่ 5.29

Breakthrough Curve และการประมาณค่าจากโปรแกรม CFITIM ของสารละลายโบรไมด์ที่ไหลผ่านคอลัมน์ดินทรายปนร่วน ที่ความเข้มข้นของสารละลายโบรไมด์เริ่มต้น 15 มิลลิกรัมต่อลิตร

จากการ fitted curve โดยโปรแกรม STANMOD/CFITIM ของดินทั้ง 3 ชนิด พบว่า ดินร่วนเหนียวปนทราย ดินร่วนเหนียว และดินทรายปนร่วนมีค่า Peclet Number เท่ากับ 12.36 12.12 และ 4.88 ตามลำดับ เมื่อนำไปคำนวณ จะสามารถหาค่าสัมประสิทธิ์การกระจายตัวได้เท่ากับ  $2.93 \times 10^{-3}$   $2.75 \times 10^{-3}$  และ  $10.64 \times 10^{-3}$  เซนติเมตร<sup>2</sup>/วินาที ตามลำดับ หรือมีค่าเท่ากับ 10.55 9.90 และ 38.29 เซนติเมตร<sup>2</sup>/ชั่วโมง ตามลำดับ เมื่อนำค่าสัมประสิทธิ์การกระจายตัวที่ได้นี้ไปเปรียบเทียบกับ ผลการทดลองการหาค่าสัมประสิทธิ์การกระจายตัวได้ของดินชนิดอื่น ๆ ในตารางที่ 3.10 (Selim และ Kingery, 2003) พบว่า ดินร่วนเหนียวปนทรายมีสัมประสิทธิ์การกระจายตัวใกล้เคียงกับดิน Dothan Ap และ ดิน Dothan Bt คือประมาณ 11 เซนติเมตร<sup>2</sup>/ชั่วโมง ดินร่วนเหนียวมีสัมประสิทธิ์การกระจายตัวใกล้เคียงกับดิน Mahan ที่มีความเร็วการไหลผ่านรูพรุน 2.02 เซนติเมตร/ชั่วโมง ประมาณ 9.80 เซนติเมตร<sup>2</sup>/ชั่วโมง และสำหรับดินทรายปนร่วน เนื่องจากมีส่วนประกอบของทรายมาก จึงมีสัมประสิทธิ์การกระจายตัวสูง และเมื่อเปรียบเทียบกับตาราง 3.10 จึงไม่พบดินที่มีค่าสัมประสิทธิ์การกระจายตัวใกล้เคียง

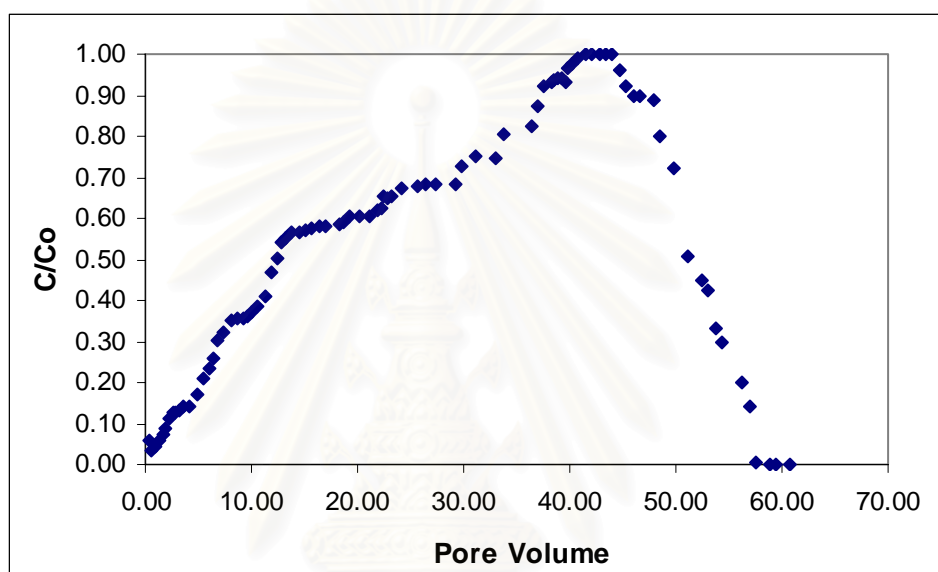
## 5.8 การทดลองแบบคอลัมน์

ทำการทดลองโดยใช้ชุดการทดลองแบบคอลัมน์แบบเดียวกับในขั้นตอนการทดลองหาค่าสัมประสิทธิ์การกระจายตัว ทั้งหมด 5 ชุด ประกอบด้วย คอลัมน์ดินร่วนเหนียวปนทราย ดินร่วนเหนียว และดินทรายปนร่วน พีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 7 (3 คอลัมน์) และ คอลัมน์ดินร่วนเหนียวปรับพีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 4 และ 10 (2 คอลัมน์) ในทุกคอลัมน์ใช้สารละลายอาร์เซเนตที่มีความเข้มข้น 15 มิลลิกรัมต่อลิตร และกำหนดให้มีอัตราการไหลของสารละลายอาร์เซเนตเท่ากับ 15 มิลลิตรต่อชั่วโมงเท่ากันทุกคอลัมน์ ทำการเก็บตัวอย่างน้ำที่ไหลออกมาจากคอลัมน์ จนกระทั่งน้ำที่ผ่านออกมาจากคอลัมน์มีความเข้มข้นของอาร์เซเนต เท่ากับความเข้มข้นของอาร์เซเนตที่ป้อนเข้าสู่คอลัมน์ (อัตราความเข้มข้นของอาร์เซเนตในน้ำออกต่อน้ำเข้ามีค่าประมาณ 1) หลังจากนั้นจะทำการป้อนน้ำกลั่นเข้าสู่คอลัมน์แทนสารละลายอาร์เซเนต และเก็บตัวอย่างต่อไปจนกระทั่งน้ำออกมีความเข้มข้นของอาร์เซเนตต่ำ จึงทำการหยุดการทดลอง

ผลการทดลองแบบคอลัมน์ดิน 3 ชนิด ที่พีเอชเริ่มต้น 7 เป็นดังนี้ คอลัมน์ดินร่วนเหนียวปนทราย พบว่าปริมาตรสารละลายอาร์เซเนตทั้งหมดที่ไหลผ่านคอลัมน์ จนกระทั่งความเข้มข้นของอาร์เซเนตขาออกเท่ากับความเข้มข้นของขาเข้า ( $C/C_0 = 1$ ) มีปริมาตรเท่ากับ 2.05 ลิตร หรือเท่ากับ 44.04 เท่าของ Pore volume โดยใช้เวลาประมาณ 137 ชั่วโมง และใช้ปริมาณสารละลายอาร์เซเนตรวมน้ำกลั่นทั้งหมด 2.84 ลิตร หรือ 60.77 เท่าของ Pore volume และใช้

เวลาไปทั้งหมด 189 ชั่วโมง จนกระทั่งน้ำออกมีความเข้มข้นของอาร์เซนเตนน้อยมาก ๆ จนถือว่าเป็นศูนย์ ดังแสดงในรูปที่ 5.30 (และแสดงในภาคผนวก ข.)

โดยเมื่อคำนวณความสามารถในการดูดติดผิวของคอลัมน์ดินร่วนเหนียวปนทราย จากปริมาตรสารละลายอาร์เซนเตนที่ไหลผ่านคอลัมน์ จนกระทั่งความเข้มข้นของอาร์เซนเตนขาออกเท่ากับความเข้มข้นของขาเข้า และน้ำหนักดินในคอลัมน์ พบว่าความสามารถในการดูดติดผิวของคอลัมน์ดินร่วนเหนียวปนทรายมีค่าเท่ากับ 0.088 มิลลิกรัมต่อกรัม

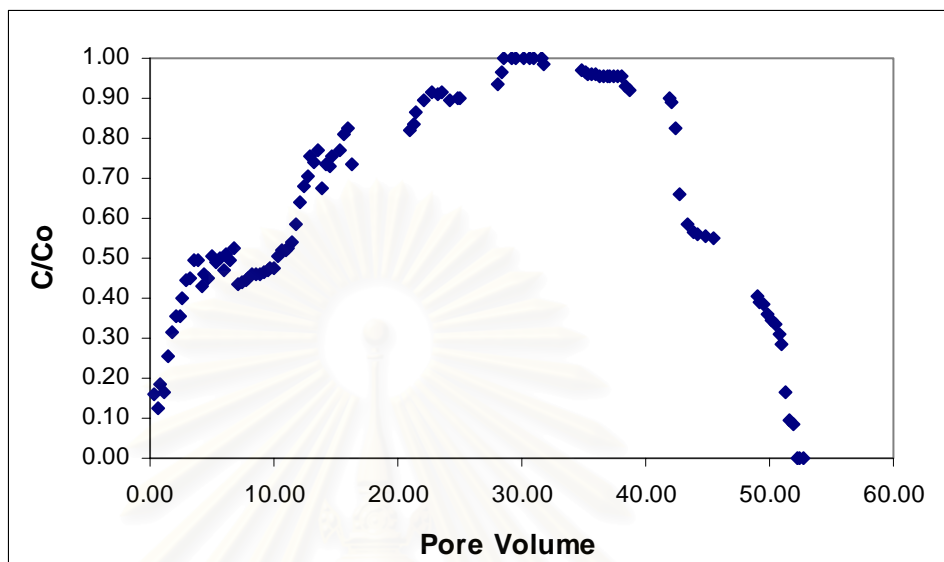


ความสามารถในการดูดติดผิว,  $Q = 0.088 \text{ mg/g}$

รูปที่ 5.30 ความสัมพันธ์ระหว่าง Pore Volume ในคอลัมน์ดินร่วนเหนียวปนทราย กับอัตราความเข้มข้นของอาร์เซนเตนออกต่อความเข้มข้นเข้าที่ความเข้มข้นสารละลายอาร์เซนเตนเริ่มต้น 15 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่พีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 7

สำหรับคอลัมน์ดินร่วนเหนียว ที่พีเอชเริ่มต้น 7 ดังรูปที่ 5.31 พบว่าปริมาตรสารละลายอาร์เซนเตนทั้งหมดที่ไหลผ่านคอลัมน์ จนกระทั่งความเข้มข้นของอาร์เซนเตนขาออกเท่ากับความเข้มข้นของขาเข้า ( $C/C_0 = 1$ ) มีปริมาตรเท่ากับ 1.94 ลิตร หรือเท่ากับ 38.05 เท่าของ Pore volume โดยใช้เวลาประมาณ 129 ชั่วโมง และใช้ปริมาณสารละลายอาร์เซนเตนรวมน้ำกลั่นทั้งหมด 2.66 ลิตร หรือ 52.79 เท่าของ Pore volume และใช้เวลาไปทั้งหมด 179 ชั่วโมง จนกระทั่งน้ำออกมีความเข้มข้นของอาร์เซนเตนน้อยมากจนถือว่าเป็นศูนย์

เมื่อคำนวณความสามารถในการดูดติดผิวของคอลัมน์ดินร่วนเหนียวเช่นเดียวกับคอลัมน์ดินร่วนเหนียวปนทราย พบว่า มีค่าเท่ากับ 0.058 มิลลิกรัมต่อกรัม



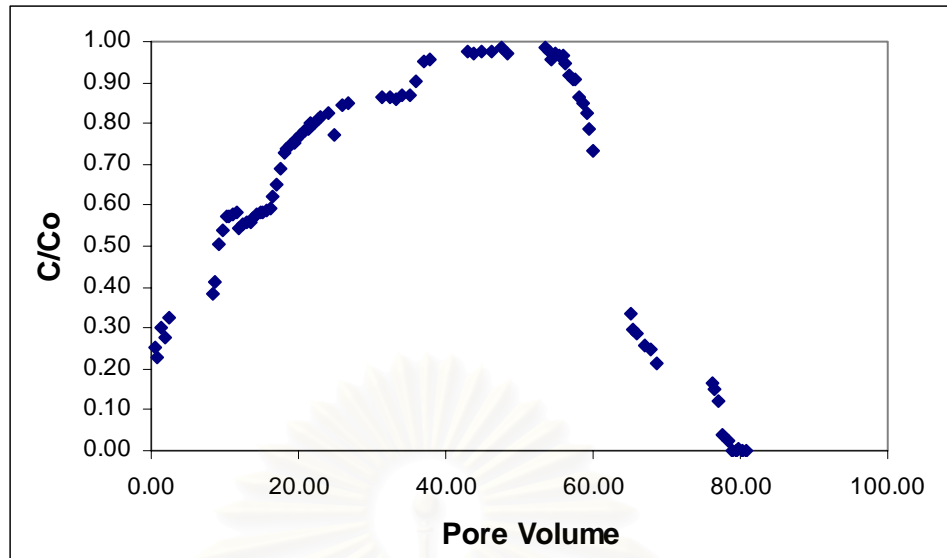
ความสามารถในการดูดติดผิว,  $Q = 0.058 \text{ mg/g}$

รูปที่ 5.31 ความสัมพันธ์ระหว่าง Pore Volume ในคอลัมน์ดินร่วนเหนียว กับอัตราความเข้มข้นของอาร์เซนเตออกต่อความเข้มข้นเข้าที่ความเข้มข้นสารละลายอาร์เซนเตเริ่มต้น 15 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่พีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 7

ชุดการทดลองของคอลัมน์ดินทรายปนร่วน พบว่า ปริมาตรสารละลายอาร์เซนเตทั้งหมดที่ไหลผ่านคอลัมน์ จนกระทั่งความเข้มข้นของอาร์เซนเตขาออกเท่ากับความเข้มข้นของขาเข้า ( $C/C_0 = 1$ ) มีปริมาตรเท่ากับ 1.76 ลิตร หรือเท่ากับ 53.98 เท่าของ Pore volume โดยใช้เวลาประมาณ 117 ชั่วโมง และใช้ปริมาณสารละลายอาร์เซนเตรวมน้ำกลั่นทั้งหมด 2.62 ลิตร หรือ 80.74 เท่าของ Pore volume และใช้เวลาไปทั้งหมด 175 ชั่วโมง จนกระทั่งน้ำออกมีความเข้มข้นของอาร์เซนเตน้อยมาก ๆ จนถือว่าเป็นศูนย์ ดังรูปที่ 5.32

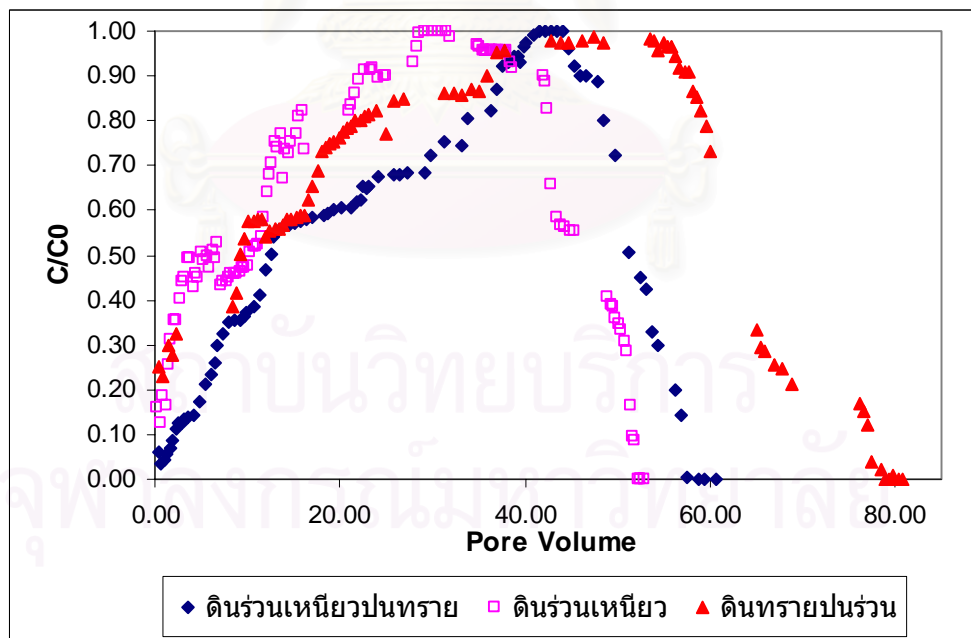
และความสามารถในการดูดติดผิวของคอลัมน์ดินทรายปนร่วน มีค่าเท่ากับ 0.034 มิลลิกรัมต่อกรัม

จากความสามารถในการดูดติดผิวของอาร์เซนเต ในทั้ง 3 คอลัมน์ และจากรูปที่ 5.33 พบว่า ผลการทดลองในคอลัมน์เป็นไปในทิศทางเดียวกับการทดลองแบบแบตช์ กล่าวคือ คอลัมน์ดินร่วนเหนียวปนทรายมีความสามารถในการดูดติดผิวสูงที่สุด รองลงมาคือ ดินร่วนเหนียว และดินทรายปนร่วน ตามลำดับ



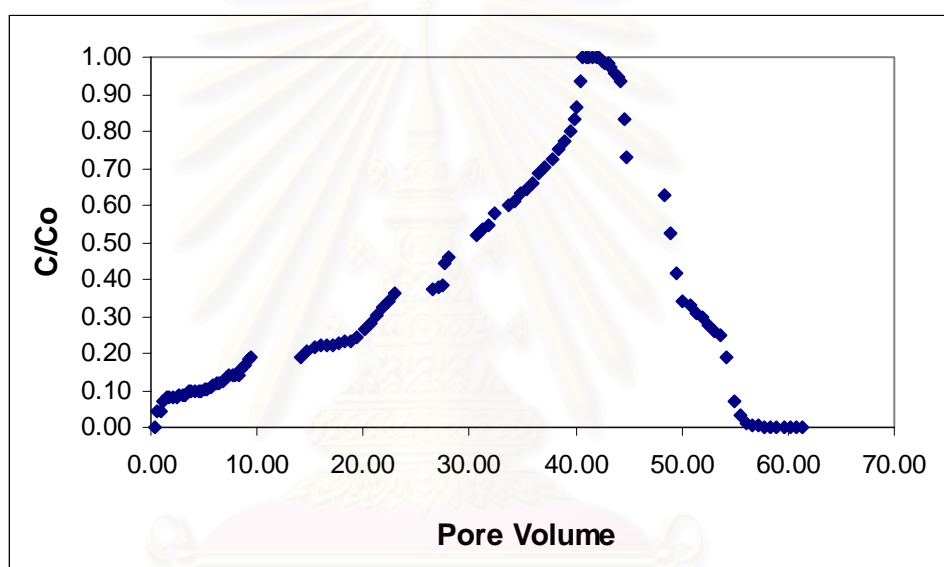
ความสามารถในการดูดซับ ,  $Q = 0.034 \text{ mg/g}$

รูปที่ 5.32 ความสัมพันธ์ระหว่าง Pore Volume ในคอลัมน์ดินทรายปนร่วน กับอัตราความเข้มข้นของอาร์เซนตอกต่อความเข้มข้นเข้าที่ความเข้มข้นสารละลายอาร์เซนตเริ่มต้น 15 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่พีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 7



รูปที่ 5.33 ความสัมพันธ์ระหว่าง Pore Volume ในคอลัมน์ดินทั้ง 3 ชนิด กับอัตราความเข้มข้นของอาร์เซนตอกต่อความเข้มข้นเข้าที่ความเข้มข้นสารละลายอาร์เซนตเริ่มต้น 15 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่พีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 7

ผลการทดลองแบบคอลัมน์เมื่อปรับค่าพีเอชเริ่มต้นเป็น 4 และ 10 เป็นดังนี้ ในคอลัมน์สภาวะพีเอช 4 พบว่า ปริมาตรสารละลายอาร์เซนิตทั้งหมดที่ไหลผ่านคอลัมน์ จนกระทั่งความเข้มข้นของอาร์เซนิตขาออกเท่ากับความเข้มข้นของขาเข้า ( $C/C_0 = 1$ ) มีปริมาตรเท่ากับ 2.15 ลิตร หรือเท่ากับ 42.17 เท่าของ Pore volume โดยใช้เวลาประมาณ 143 ชั่วโมง และใช้ปริมาณสารละลายอาร์เซนิตรวมน้ำกลั่นทั้งหมด 3.12 ลิตร หรือ 61.35 เท่าของ Pore volume และใช้เวลาไปทั้งหมด 206 ชั่วโมง จนกระทั่งน้ำออกมีความเข้มข้นของอาร์เซนิตน้อยมาก ๆ จนถือว่าเป็นศูนย์ ดังรูปที่ 5.34 และคำนวณความสามารถในการดูดติดผิวของคอลัมน์ดินร่วนเหนียวที่พีเอช 4 ได้เท่ากับ 0.159 มิลลิกรัมต่อกรัม



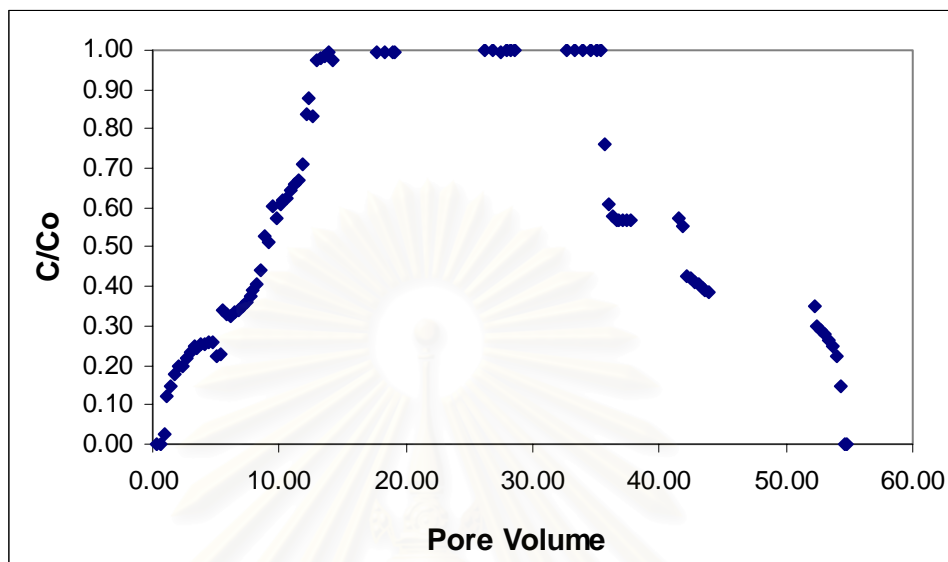
ความสามารถในการดูดติดผิว,  $Q = 0.159 \text{ mg/g}$

รูปที่ 5.34 ความสัมพันธ์ระหว่าง Pore Volume ในคอลัมน์ดินร่วนเหนียว กับอัตราความเข้มข้นของอาร์เซนิตออกต่อความเข้มข้นเข้าที่ความเข้มข้นสารละลายอาร์เซนิตเริ่มต้น 15 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่พีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 4

ขณะที่การทดลองคอลัมน์สภาวะพีเอช 10 พบว่า ปริมาตรสารละลายอาร์เซนิตทั้งหมดที่ไหลผ่านคอลัมน์ จนกระทั่งความเข้มข้นของอาร์เซนิตขาออกเท่ากับความเข้มข้นของขาเข้า ( $C/C_0 = 1$ ) มีปริมาตรเท่ากับ 1.82 ลิตร หรือเท่ากับ 35.69 เท่าของ Pore volume โดยใช้เวลาประมาณ 121 ชั่วโมง และใช้ปริมาณสารละลายอาร์เซนิตรวมน้ำกลั่นทั้งหมด 2.79 ลิตร หรือ 54.86 เท่าของ Pore volume และใช้เวลาไปทั้งหมด 186 ชั่วโมง จนกระทั่งน้ำออกมีความ



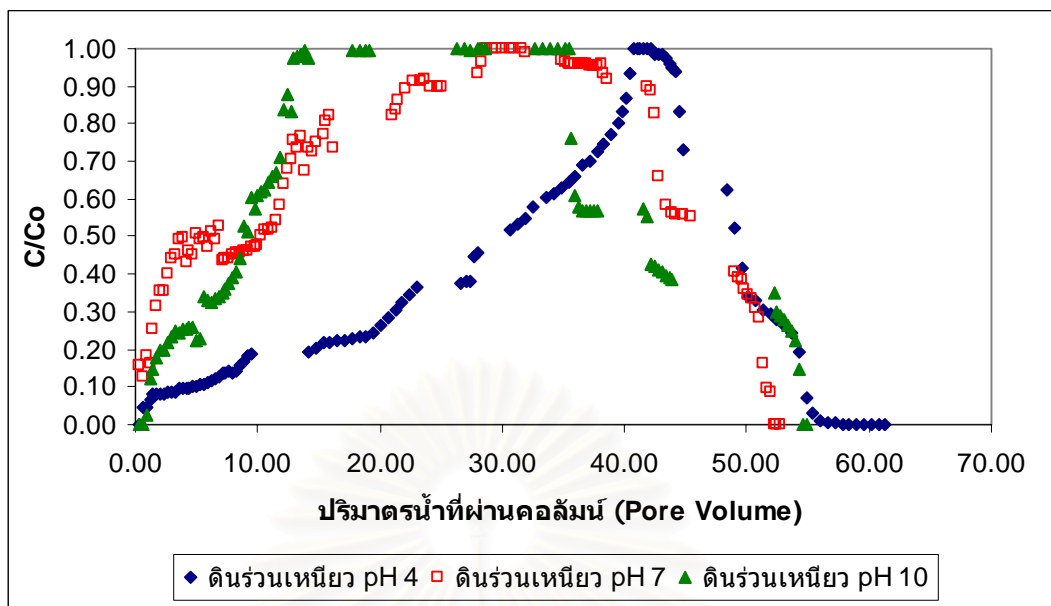
เข้มข้นของอาร์เซนน้อยมาก ๆ จนถือว่าเป็นศูนย์ ดังรูปที่ 5.35 และมีความสามารถในการดูดติดผิวของคอลัมน์ดินทรายปนร่วน เท่ากับ 0.042 มิลลิกรัมต่อกรัม



ความสามารถในการดูดติดผิว ,  $Q = 0.042 \text{ mg/g}$

รูปที่ 5.35 ความสัมพันธ์ระหว่าง Pore Volume ในคอลัมน์ดินร่วนเหนียว กับอัตราความเข้มข้นของอาร์เซนต่อความเข้มข้นเข้าที่ความเข้มข้นสารละลายอาร์เซนเริ่มต้น 15 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่พีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 10

เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบผลการทดลองแบบคอลัมน์ของดินร่วนเหนียว ที่สภาวะพีเอชต่าง ๆ ดังรูปที่ 5.36 และค่าความสามารถในการดูดติดผิวของแต่ละพีเอช ที่คำนวณได้ข้างต้นพบว่า ความสามารถในการดูดติดผิวโดยดินร่วนเหนียวที่พีเอช 4 มีค่าสูงถึง 0.159 มิลลิกรัมต่อกรัม ซึ่งมีค่ามากกว่าที่ พีเอช 7 และ 10 (0.058 และ 0.042 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ) มาก แสดงให้เห็นว่าที่ พีเอช 4 ดินร่วนเหนียวมีความสามารถในการดูดติดผิวสูงสุด และสูงกว่าที่พีเอชอื่นมาก รองลงมาคือที่ พีเอช 7 และ 10 ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองแบบแบตช์



รูปที่ 5.36 ความสัมพันธ์ระหว่าง Pore Volume ในคอลัมน์ดินร่วนเหนียว กับอัตราความเข้มข้นของอาร์เซนตอกต่อความเข้มข้นเข้าที่ความเข้มข้นสารละลายอาร์เซนตเริ่มต้น 15 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่พีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 4 7 และ 10

## 5.9 การทดลองแบบคอลัมน์เพื่อศึกษาการเคลื่อนที่ของอาร์เซนตเมื่อมีอิออนลบ

ทำการทดลองโดยใช้ชุดการทดลองแบบคอลัมน์ โดยใช้ความเข้มข้น และขั้นตอนการทดลองแบบเดียวกับในหัวข้อ 5.8 การทดลองแบบคอลัมน์เมื่อมีอิออนลบ ประกอบด้วย 4 คอลัมน์ทดลอง โดยใช้ตัวอย่างดินเพียงชนิดเดียว คือดินร่วนเหนียว ที่พีเอชเริ่มต้น 7 ศึกษาการดูดติดผิวเมื่อมีอิออนลบทั้ง 2 ชนิด คือฟอสเฟตและ ไบคาร์บอเนต โดยทำการทดลองที่ 2 อัตราส่วน คือ อิออนลบต่ออาร์เซนต เท่ากับ 10: 1 และ 1:1

ผลการศึกษาเมื่อเปรียบเทียบการเคลื่อนที่ของอาร์เซนตในดินร่วนเหนียว เมื่อมีฟอสเฟตต่ออาร์เซนต 10 : 1 พบว่า ปริมาตรสารละลายอาร์เซนตทั้งหมดที่ไหลผ่านคอลัมน์ จนกระทั่งความเข้มข้นของอาร์เซนตขาออกเท่ากับความเข้มข้นของขาเข้า ( $C/C_0 = 1$ ) มีปริมาตรเท่ากับ 1.08 ลิตร หรือเท่ากับ 21.23 เท่าของ Pore volume โดยใช้เวลาประมาณ 72 ชั่วโมง และใช้ปริมาณสารละลายอาร์เซนตรวมน้ำกลั่นทั้งหมด 2.62 ลิตร หรือ 51.61 เท่าของ Pore volume และใช้เวลาไปทั้งหมด 175 ชั่วโมง จนกระทั่งน้ำออกมีความเข้มข้นของอาร์เซนตน้อยมากจนถึงว่าเป็นศูนย์ และสามารถคำนวณความสามารถในการดูดติดผิวของอาร์เซนตเทียบต่อน้ำหนักดินได้เท่ากับ 0.037 มิลลิกรัมต่อกรัม

สำหรับอัตราส่วนฟอสเฟตต่ออาร์เซนเนต 1 : 1 พบว่า ปริมาตรสารละลายอาร์เซนเนตทั้งหมดที่ไหลผ่านคอลัมน์ จนกระทั่งความเข้มข้นของอาร์เซนเนตขาออกเท่ากับความเข้มข้นขาเข้า ( $C/C_0 = 1$ ) มีปริมาตรเท่ากับ 1.77 ลิตร หรือเท่ากับ 34.80 เท่าของ Pore volume โดยใช้เวลาประมาณ 118 ชั่วโมง และใช้ปริมาณสารละลายอาร์เซนเนตรวมน้ำกลั่นทั้งหมด 2.66 ลิตร หรือ 52.20 เท่าของ Pore volume และใช้เวลาไปทั้งหมด 177 ชั่วโมง จนกระทั่งน้ำออกมีความเข้มข้นของอาร์เซนเนตน้อยมากจนถือว่าเป็นศูนย์ และเมื่อคำนวณความสามารถในการดูดติดผิวของอาร์เซนเนตเทียบกับน้ำหนักดิน จะได้เท่ากับ 0.046 มิลลิกรัมต่อกรัม

เมื่อพิจารณาจาก ความสามารถในการดูดติดผิวของคอลัมน์ดินร่วนเหนียวที่มีฟอสเฟต (อัตราส่วนฟอสเฟตต่ออาร์เซนเนต 10 : 1 และ 1 : 1) และไม่มีฟอสเฟต (ความสามารถในการดูดติดผิวเท่ากับ 0.058 มิลลิกรัมต่อกรัม) และผลการทดลองในรูปแบบที่ 5.37 พบว่า ฟอสเฟตในทั้ง 2 อัตราส่วนทำให้ความสามารถในการดูดติดผิวของอาร์เซนเนตลดลง ซึ่งสอดคล้องและอธิบายเหตุผลได้เช่นเดียวกับการทดลองแบบแบดซ์ (หัวข้อ 5.6)

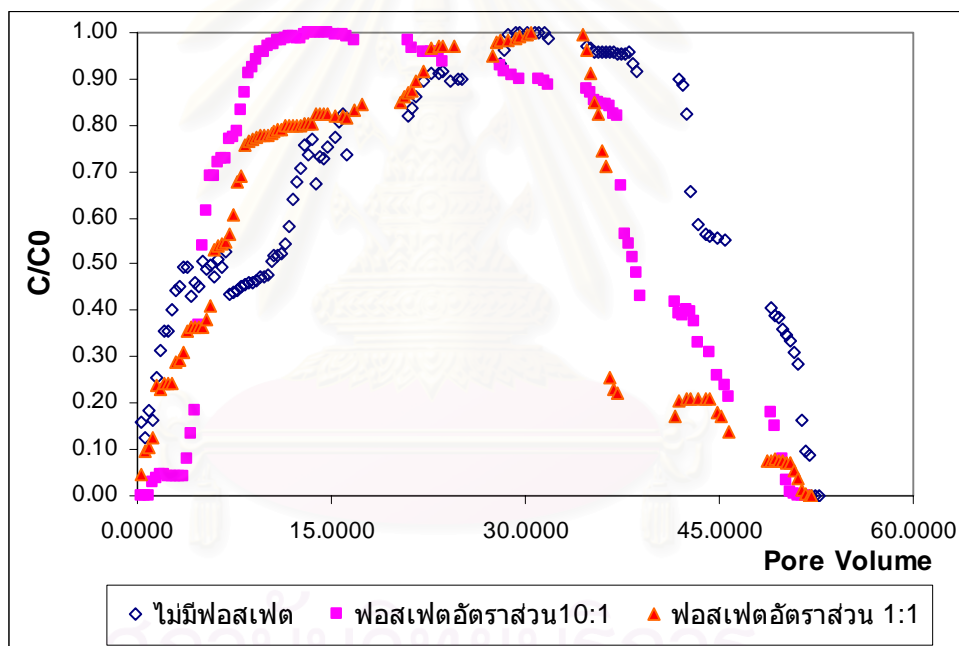
และนอกจากนี้ เมื่อพิจารณาการคายตัวที่เกิดขึ้น (หลังจากเปลี่ยนสารละลายอาร์เซนเนตเป็นน้ำ DI) จะพบว่า ฟอสเฟตทำให้การคายตัวในช่วงแรก เกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว เปรียบเทียบกับเมื่อไม่มีฟอสเฟต (ความชันของกราฟน้อยกว่า) ซึ่งผลการทดลองนี้สอดคล้องกับ O'Reilly และคณะ (2001) ที่ทำการทดลองเพื่อศึกษาผลของระยะเวลาทดลอง (Resident time) ที่มีต่อการดูดติดผิวและการคายตัวของอาร์เซนเนตบน Goethite O'Reilly พบว่าฟอสเฟตทำให้เกิดการคายตัวของอาร์เซนเนตมากกว่าร้อยละ 35 ภายใน 24 ชั่วโมงแรก หลังจากนั้นจะค่อย ๆ เกิดการคายตัวที่ละเล็กละน้อย

ผลการศึกษา เมื่อมีไบคาร์บอเนตในคอลัมน์ดินร่วนเหนียว เป็นดังนี้ ที่อัตราส่วนไบคาร์บอเนตต่ออาร์เซนเนต 10 : 1 พบว่า ปริมาตรสารละลายอาร์เซนเนตทั้งหมดที่ไหลผ่านคอลัมน์ จนกระทั่งความเข้มข้นของอาร์เซนเนตขาออกเท่ากับความเข้มข้นขาเข้า ( $C/C_0 = 1$ ) มีปริมาตรเท่ากับ 1.78 ลิตร หรือเท่ากับ 35.10 เท่าของ Pore volume โดยใช้เวลาประมาณ 119 ชั่วโมง และใช้ปริมาณสารละลายอาร์เซนเนตรวมน้ำกลั่นทั้งหมด 2.64 ลิตร หรือ 51.91 เท่าของ Pore volume และใช้เวลาไปทั้งหมด 176 ชั่วโมง จนกระทั่งน้ำออกมีความเข้มข้นของอาร์เซนเนตน้อยมากจนถือว่าเป็นศูนย์ และเมื่อคำนวณความสามารถในการดูดติดผิวของอาร์เซนเนตเทียบกับน้ำหนักดิน จะได้เท่ากับ 0.061 มิลลิกรัมต่อกรัม

สำหรับ ไบคาร์บอเนตต่ออาร์เซนเนต อัตราส่วน 1 : 1 พบว่า ปริมาตรสารละลายอาร์เซนเนตทั้งหมดที่ไหลผ่านคอลัมน์ จนกระทั่งความเข้มข้นของอาร์เซนเนตขาออกเท่ากับความเข้มข้นของขาเข้า ( $C/C_0 = 1$ ) มีปริมาตรเท่ากับ 1.88 ลิตร หรือเท่ากับ 36.87 เท่าของ Pore volume โดยใช้เวลาประมาณ 125 ชั่วโมง และใช้ปริมาณสารละลายอาร์เซนเนตรวมน้ำกลั่นทั้งหมด 2.66 ลิตร หรือ

52.20 เท่าของ Pore volume และใช้เวลาไปทั้งหมด 177 ชั่วโมง จนกระทั่งน้ำออกมีความเข้มข้นของอาร์เซนเตนน้อยมากจนถือว่าเป็นศูนย์ ความสามารถในการดูดติดผิวของอาร์เซนเตนเทียบกับน้ำหนักดินในคอลัมน์นี้ เท่ากับ 0.088 มิลลิกรัมต่อกรัม

เมื่อพิจารณาจากความสามารถในการดูดติดผิวของคอลัมน์ข้างต้น และจากผลการทดลองรูปที่ 5.38 ซึ่งเปรียบเทียบระหว่างเมื่อมีไบคาร์บอเนต และไม่มีไบคาร์บอเนตในสารละลายอาร์เซนเตน พบว่าที่อัตราส่วนไบคาร์บอเนตต่ออาร์เซนเตน 10 : 1 ไบคาร์บอเนตส่งผลเล็กน้อยต่อการดูดติดผิวของอาร์เซนเตน เปรียบเทียบกับคอลัมน์ที่ไม่มีไบคาร์บอเนต (0.058 และ 0.061 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ) แต่คอลัมน์ที่มีไบคาร์บอเนตอัตราส่วน 1 : 1 มีความสามารถในการดูดติดผิวของอาร์เซนเตนเพิ่มขึ้น (จาก 0.058 มิลลิกรัมต่อกรัมเป็น 0.088 มิลลิกรัมต่อกรัม) โดยผลการทดลองนี้สอดคล้องและอธิบายเหตุผลเช่นเดียวกับผลการทดลองแบบแบดซ์

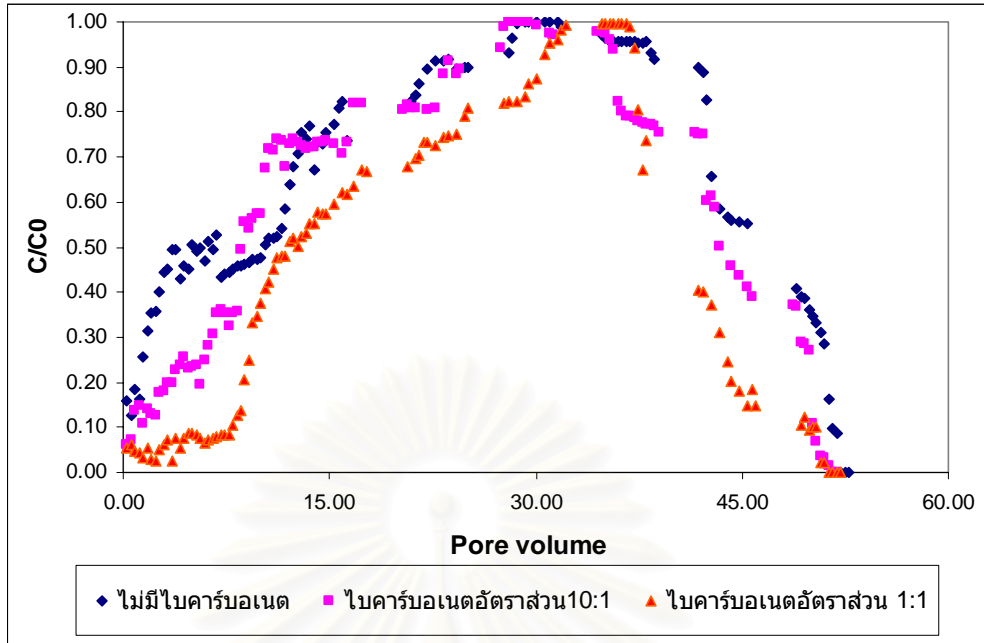


ไม่มีฟอสเฟต - ความสามารถในการดูดติดผิว,  $Q = 0.058 \text{ mg/g}$

ฟอสเฟต อัตราส่วน 10 : 1 - ความสามารถในการดูดติดผิว,  $Q = 0.037 \text{ mg/g}$

ฟอสเฟต อัตราส่วน 1 : 1 - ความสามารถในการดูดติดผิว,  $Q = 0.046 \text{ mg/g}$

รูปที่ 5.37 ความสัมพันธ์ระหว่าง Pore Volume ในผ่านคอลัมน์ดินร่วนเหนียว กับอัตราความเข้มข้นของอาร์เซนเตนออกต่อความเข้มข้นเข้า ที่ความเข้มข้นสารละลายอาร์เซนเตนเริ่มต้น 15 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่พีเอชเท่ากับ 7 เปรียบเทียบกับเมื่อมีฟอสเฟตต่ออาร์เซนเตนอัตราส่วน 10:1 1:1 และไม่มีฟอสเฟต



ไม่มีไบคาร์บอเนต - ความสามารถในการดูดติดผิว , $Q = 0.058$  mg/g

ไบคาร์บอเนต อัตราส่วน 10 : 1 - ความสามารถในการดูดติดผิว , $Q = 0.061$  mg/g

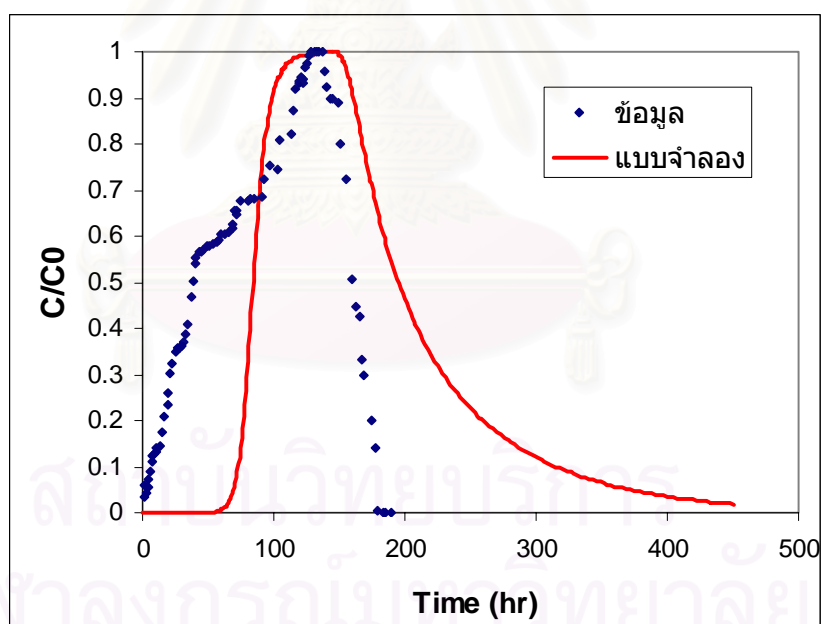
ไบคาร์บอเนต อัตราส่วน 1 : 1 - ความสามารถในการดูดติดผิว , $Q = 0.088$  mg/g

รูปที่ 5.38 ความสัมพันธ์ระหว่าง Pore Volume ในผ่านคอลัมน์ดินร่วนเหนียว กับอัตราความเข้มข้นของอาร์เซนออกต่อความเข้มข้นเข้า ที่ความเข้มข้นสารละลายอาร์เซนตเริ่มต้น 15 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่พีเอชเท่ากับ 7 เปรียบเทียบกับเมื่อมีไบคาร์บอเนตต่ออาร์เซนอัตราส่วน 10:1 1:1 และไม่มีไบคาร์บอเนต

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## 5.10 การจำลองการเคลื่อนที่ของอาร์เซนเนตแบบคอลัมน์ด้วยโปรแกรม HYDRUS2D

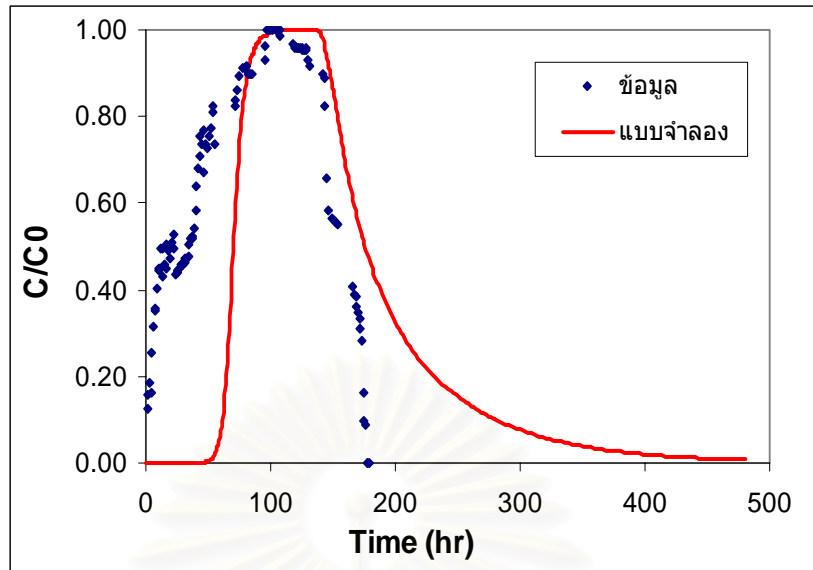
ทำการวิเคราะห์การเคลื่อนที่ของอาร์เซนเนต โดยการนำค่าพารามิเตอร์ของการดูดติดผิว (Adsorption Parameter) ที่หาได้จากการทดลองแบบแบตช์ ในหัวข้อที่ 5.5 และค่าสัมประสิทธิ์การกระจายตัว (Dispersion Coefficient) ที่ได้จากการทดลองแบบคอลัมน์ในหัวข้อที่ 5.7 ป้อนเข้าไปในโปรแกรม HYDRUS2D เพื่อที่จะให้โปรแกรมคำนวณค่าเพื่อสร้าง Breakthrough curve จากข้อมูลที่ป้อนเข้าไป ในการป้อนข้อมูลเข้าสู่โปรแกรมจะทำการป้อนข้อมูลที่ได้จากการทดลองทั้งแบบแบตช์และแบบคอลัมน์ และจะได้ Breakthrough curve ที่สร้างโดยโปรแกรมดังรูปที่ 5.39 ถึง 5.43 และข้อมูลที่ป้อนเข้าสู่โปรแกรม HYDRUS2D จะแสดงไว้ในภาคผนวก ซ. จะเห็นว่า Breakthrough curve ที่แสดงอยู่ในรูปของจุด จะแสดงถึงข้อมูลที่ได้จากการทำการทดลองแบบคอลัมน์ และ Breakthrough curve (BTC) ที่แสดงไว้ในรูปแบบของเส้น ได้มาจากการสร้างโดยโปรแกรม HYDRUS2D เพื่อเปรียบเทียบระหว่างผลการทดลองที่ได้จากการวิเคราะห์โดยโปรแกรม กับผลการทดลองที่ได้จากการจำลองการเคลื่อนที่ของอาร์เซนเนตในดินที่พีเอชต่าง ๆ



ข้อมูล - ความสามารถในการดูดติดผิว,  $Q = 0.088 \text{ mg/g}$

แบบจำลอง - ความสามารถในการดูดติดผิว,  $Q = 0.137 \text{ mg/g}$

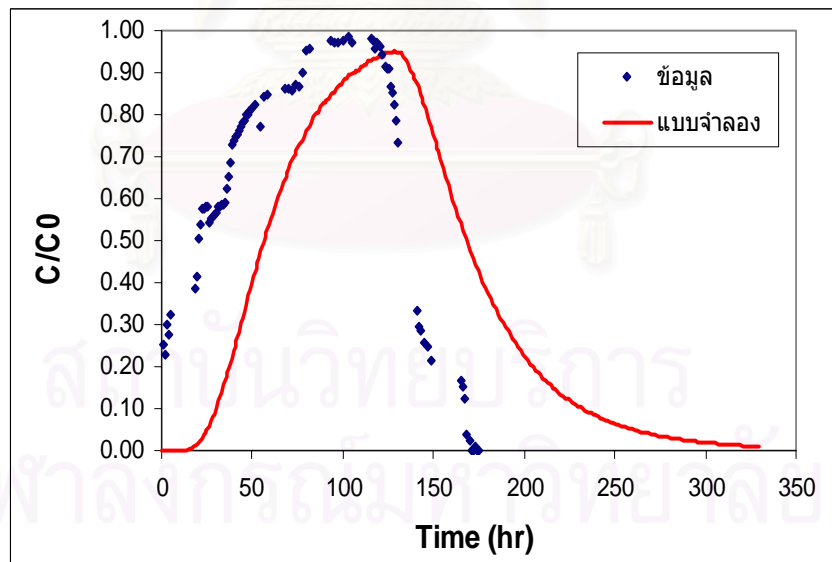
รูปที่ 5.39 Breakthrough curve จากการประมาณโดยโปรแกรม HYDRUS2D และจากการทดลองแบบคอลัมน์ ของดินร่วนเหนียวปนทราย ที่พีเอช 7



ข้อมูล - ความสามารถในการดูดซับ ,  $Q = 0.058 \text{ mg/g}$

แบบจำลอง - ความสามารถในการดูดซับ ,  $Q = 0.097 \text{ mg/g}$

รูปที่ 5.40 Breakthrough curve จากการประมาณโดยโปรแกรม HYDRUS2D และจากการทดลองแบบคอลัมน์ ของดินร่วนเหนียว ที่พีเอช 7



ข้อมูล - ความสามารถในการดูดซับ ,  $Q = 0.034 \text{ mg/g}$

แบบจำลอง - ความสามารถในการดูดซับ ,  $Q = 0.073 \text{ mg/g}$

รูปที่ 5.41 Breakthrough curve จากการประมาณโดยโปรแกรม HYDRUS2D และจากการทดลองแบบคอลัมน์ ของดินทรายปนร่วน ที่พีเอช 7

จากรูปที่ 5.39 ถึง 5.41 ผลการทดลองของดินทั้ง 3 ชนิด ที่สภาวะพีเอชเริ่มต้น 7 มีผลการทดลองที่คล้ายกัน เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบ Breakthrough curve ที่ได้จากการทดลองแบบคอลัมน์กับการประมาณโดยโปรแกรม HYDRUS2D จะเห็นว่าการประมาณที่ได้จากโปรแกรมมีความแตกต่างกับข้อมูลผลการทดลอง กล่าวคือ ความสามารถในการดูดติดผิวของดินในการทดลองแบบคอลัมน์มีค่าต่ำกว่าการประมาณโดยโปรแกรม ทั้งนี้เนื่องจาก ข้อมูลที่ป้อนเข้าโปรแกรมเป็นค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการทดลองแบบแบตช์ ซึ่งในการทดลองแบบแบตช์นั้น นอกจากดินจะมีเวลาสัมผัสกับสารละลายอาร์เซนเดนาจนถึง 96 ชั่วโมงแล้ว ยังมีการเขย่าอย่างต่อเนื่องตลอดเวลาด้วย ปริมาณอาร์เซนเดนาที่ถูกดูดติดผิวบนดินจึงมีมาก แต่ในการทดลองแบบคอลัมน์ สารละลายจะถูกบีบให้ไหลผ่านคอลัมน์ และมีเวลาสัมผัสกับดินประมาณ 3 ชั่วโมงเท่านั้น ทำให้ทุก ๆ อนุภาคดินสามารถดูดติดผิวอาร์เซนเดนาได้ในปริมาณน้อยกว่าการทดลองแบบแบตช์

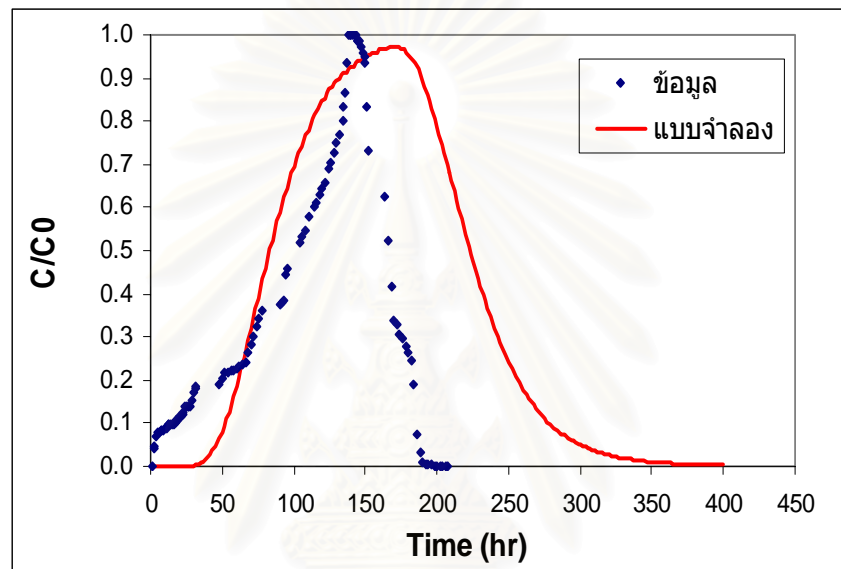
ยกตัวอย่าง การทดลองดินร่วนเหนียวปนทราย Breakthrough curve ของการประมาณด้วยโปรแกรม ในช่วง 50 ชั่วโมงแรก มีค่า  $C/C_0 = 0$  หรือดินสามารถดูดติดผิวอาร์เซนเดนาได้ทั้งหมด แต่เมื่อพิจารณา Breakthrough curve ของการทดลองแบบคอลัมน์พบว่า ค่า  $C/C_0$  กลับเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ ซึ่งก็คือโปรแกรมได้ประมาณค่าความสามารถในการดูดติดผิวของดินไว้สูงกว่าความเป็นจริง โดยความแตกต่างระหว่างการทดลองแบบคอลัมน์ และการประมาณจากโปรแกรม มีค่า ดังนี้ สำหรับดินร่วนเหนียวปนทราย ความสามารถในการดูดติดผิว จากข้อมูล 0.088 มิลลิกรัมต่อกรัม ขณะที่จากแบบจำลองมีค่าสูงถึง 0.137 มิลลิกรัมต่อกรัม ดินร่วนเหนียว ความสามารถในการดูดติดผิว จากข้อมูลการทดลองแบบคอลัมน์ เท่ากับ 0.058 มิลลิกรัมต่อกรัม ขณะที่จากแบบจำลองประมาณไว้เท่ากับ 0.097 มิลลิกรัมต่อกรัม และดินทรายปนร่วน ความสามารถในการดูดติดผิว จากข้อมูลเท่ากับ 0.034 มิลลิกรัมต่อกรัม ขณะที่จากแบบจำลองมีค่า 0.073 มิลลิกรัมต่อกรัม

เมื่อพิจารณา ในส่วนของการคายสารออก (Desorption) จะพบว่า ในทั้ง 3 คอลัมน์ Breakthrough curve จากการประมาณด้วยโปรแกรม ดินจะมีอัตราการคายสารออกที่ช้ากว่าในการทดลองแบบคอลัมน์ เนื่องจากในคอลัมน์ เกิดการดูดติดผิวแบบไม่สมดุล (Non-equilibrium adsorption) ดังนั้นเมื่อถูกป้อนด้วยน้ำที่ปราศจากอิออน จึงมีความเป็นไปได้ว่าจะถูกชะออกไปได้อย่างรวดเร็ว

และถ้าพิจารณาในแง่ของความแตกต่างของชนิดและคุณสมบัติดิน พบว่า ดินร่วนเหนียวปนทรายและดินร่วนเหนียว มีแนวโน้มของ Breakthrough curve ของการประมาณด้วยโปรแกรมที่ใกล้เคียงกัน และต่างไปจาก Breakthrough curve ของการประมาณด้วยโปรแกรมของดินทรายปนร่วน ทั้งนี้เมื่อพิจารณา ผลการทดลองแบบแบตช์ที่พีเอช 7 (รูปที่ 5.11) ร่วมด้วย



จะอธิบายได้ว่า ดินร่วนเหนียวปนทรายและดินร่วนเหนียวมีความสามารถในการดูดติดผิวของอาร์เซนตใกล้เคียงกัน จึงมีค่าพารามิเตอร์การดูดติดผิว (แสดงในตารางที่ 5.3) ซึ่งเป็นข้อมูลที่ป้อนเข้าโปรแกรมใกล้เคียงด้วย ดังนั้น Breakthrough curve ของการประมาณด้วยโปรแกรมจึงคล้ายกัน ในขณะที่ ดินทรายปนร่วนมีความสามารถในการดูดติดผิวต่ำกว่า รวมถึงค่าพารามิเตอร์การดูดติดผิวต่างจากดิน 2 ชนิดแรก จึงทำให้การประมาณด้วยโปรแกรมทั้งในช่วงการดูดติดผิวและการคายตัวต่างไปจากดินอีก 2 ชนิดดังกล่าว

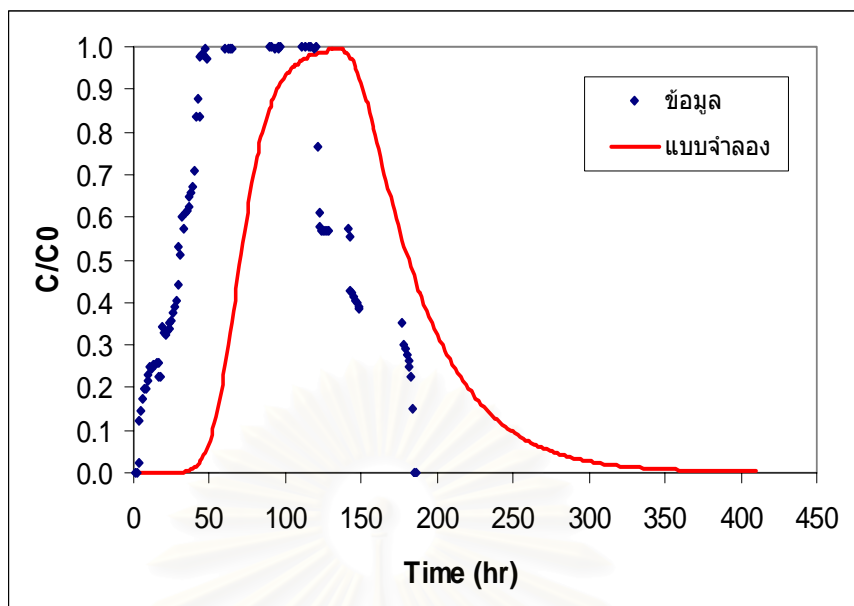


ข้อมูล - ความสามารถในการดูดติดผิว , $Q = 0.159 \text{ mg/g}$

แบบจำลอง - ความสามารถในการดูดติดผิว , $Q = 0.161 \text{ mg/g}$

รูปที่ 5.42 Breakthrough curve จากการประมาณโดยโปรแกรม HYDRUS2D และจากการทดลองแบบคอลัมน์ ของดินร่วนเหนียว ที่พีเอช 4

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ข้อมูล - ความสามารถในการดูดติดผิว , $Q = 0.042$  mg/g

แบบจำลอง - ความสามารถในการดูดติดผิว , $Q = 0.099$  mg/g

รูปที่ 5.43 Breakthrough curve จากการประมาณโดยโปรแกรม HYDRUS2D และจากการทดลองแบบคอลัมน์ ของดินร่วนเหนียว ที่พีเอช 10

สำหรับรูปที่ 5.40 5.42 และ 5.43 สามารถพิจารณาเปรียบเทียบในสภาวะพีเอชที่ต่างกัน พบว่า คอลัมน์การทดลองและการประมาณด้วยโปรแกรม ของดินร่วนเหนียว พีเอช 7 และ 10 เป็นไปในทิศทางเดียวกัน และได้อธิบายไว้ในข้างต้นแล้ว แต่ที่พีเอช 4 การประมาณด้วยโปรแกรมเปรียบเทียบกับ การทดลองคอลัมน์ ต่างจากที่สภาวะอื่น ๆ โดยในตั้งแต่ชั่วโมงที่ 67 ถึง 138 ความสามารถในการดูดติดผิวจากการประมาณด้วยโปรแกรม มีค่าต่ำกว่าการดูดติดผิวในคอลัมน์ทดลอง อาจเนื่องจากพีเอชของสารละลายอาร์เซนิตที่เตรียมไว้เท่ากับ 4 เมื่อถูกปั๊มเข้าในคอลัมน์และสัมผัสกับดิน ซึ่งมีพีเอชประมาณ 7 จึงทำให้ค่าพีเอชภายในคอลัมน์มีการเปลี่ยนแปลง ในขณะที่การทดลองแบบแบตช์ พีเอชเริ่มต้นและสุดท้ายยังคงมีค่าใกล้เคียง 4 จึงอาจกล่าวได้ว่าเกิดเงื่อนไขที่ต่างกันเพิ่มขึ้น ระหว่างการประมาณค่าด้วยโปรแกรมที่นำข้อมูลมาจากแบตช์ และการทดลองคอลัมน์

โดยความแตกต่างระหว่างการทดลองแบบคอลัมน์ และการประมาณจากโปรแกรม มีค่าดังนี้ สำหรับที่พีเอช 4 ดินร่วนเหนียวมีความสามารถในการดูดติดผิว จากข้อมูล 0.159 มิลลิกรัมต่อกรัม ขณะที่จากแบบจำลองมีค่า 0.161 มิลลิกรัมต่อกรัม และสำหรับที่พีเอช 10 ดินร่วนเหนียวมีความสามารถในการดูดติดผิว จากข้อมูลการทดลองแบบคอลัมน์ เท่ากับ 0.042 มิลลิกรัมต่อกรัม ขณะที่จากแบบจำลองประมาณไว้สูงถึง 0.099 มิลลิกรัมต่อ

จากการเปรียบเทียบความแตกต่างของผลการทดลองแบบคอลัมน์ และผลจากการประมาณค่าโดยโปรแกรม HYDRUS2D ดังที่ได้กล่าวมาแล้ว ทำให้ทราบว่าในความเป็นจริงการดูดติดผิวของอาร์เซนเดบนดินที่เกิดขึ้นในคอลัมน์นั้น เป็นกระบวนการดูดติดผิวแบบไม่เข้าสู่สมดุล (Non-equilibrium adsorption process) ซึ่งเมื่อนำเอาสมการแบบจำลองการเคลื่อนที่ที่ตั้งอยู่บนสมมติฐานว่าการดูดติดผิวจะต้องอยู่ในสภาวะสมดุล (Local Equilibrium Assumption) มาทำการประมาณการเคลื่อนที่ จึงทำให้เกิดความแตกต่างขึ้น

โดยสมมติฐานว่าการดูดติดผิวจะต้องอยู่ในสภาวะสมดุลนี้ เป็นไปตามแนวคิดที่ว่า เมื่ออนุภาคดินสัมผัสกับสารละลายอาร์เซนเดบ อนุภาคดินจะสามารถดูดติดผิวอาร์เซนเดบได้ทันที โดยไม่จำเป็นต้องอาศัยเวลาสัมผัส หรือความสามารถในการดูดติดผิวไม่ได้ขึ้นอยู่กับเวลาสัมผัส ในขณะที่ กระบวนการดูดติดผิวแบบไม่สมดุล (Non-equilibrium adsorption process) นั้นพบว่า มีสองแนวคิดที่สามารถอธิบายการดูดติดผิวแบบไม่สมดุลนี้ได้ คือ

แนวคิดแรก การดูดติดผิวที่เกิดขึ้นเป็นกระบวนการ Chemical non-equilibrium sorption ซึ่งสามารถอธิบายได้โดยแบบจำลอง Two-site sorption คือ ในการดูดติดผิวจะมีพื้นที่ของการดูดติดผิวอยู่ 2 แบบ แบบแรกจะเกิดการดูดติดผิวแบบสมดุลตาม Local Equilibrium Assumption คือดูดติดผิวเกิดขึ้นทันทีเมื่อดินพบกับอาร์เซนเดบโดยไม่ขึ้นกับเวลาสัมผัส พื้นที่การดูดติดผิวแบบที่สอง จะไม่เป็นไปตาม Local Equilibrium Assumption คือไม่สามารถดูดติดผิวได้ทันที แต่ต้องอาศัยเวลาสัมผัสชั่วระยะเวลาหนึ่ง จึงจะสามารถเข้าสู่สมดุลของการดูดติดผิวได้ ดังนั้นหากการดูดติดผิวเป็นไปตามกระบวนการ Two-site sorption ความสามารถในการดูดติดผิวก็จะขึ้นกับเวลาสัมผัส

แนวคิดที่สอง การดูดติดผิวที่เกิดขึ้นเป็นกระบวนการ Physical non-equilibrium sorption กล่าวคือ พิจารณาถึงขนาดของรูพรุน (Pore size) ของอนุภาคดิน ซึ่งมีขนาดไม่เท่ากัน มีทั้งขนาดใหญ่พอที่อาร์เซนเดบจะเดินทางเข้าไปสู่พื้นที่ดูดติดผิวได้อย่างรวดเร็ว หรืออาจจะมีขนาดเล็ก แคบ และเป็นทางยาว ยากต่อการเคลื่อนที่เข้าไปสู่พื้นที่ดูดติดผิว จนบางครั้งการเคลื่อนที่แบบการกระจายตัว (Dispersion) ของอาร์เซนเดบอาจกลายเป็นการเคลื่อนที่แบบการแพร่ (Diffusion) ซึ่งการเคลื่อนที่แบบการแพร่นี้ มีปัจจัยคือขนาดของรูพรุน และเวลาสัมผัส เพราะต้องใช้เวลาสัมผัสช่วงหนึ่งในการที่อาร์เซนเดบจะเดินทางเข้าสู่รูพรุน ดังนั้นหากการเคลื่อนที่ของอาร์เซนเดบเข้าสู่ดินส่วนใหญ่เป็นแบบการแพร่แล้ว ความสามารถในการดูดติดผิวก็จะขึ้นกับเวลาสัมผัส ซึ่งไม่เป็นไปตาม Local Equilibrium Assumption

จากที่ได้เปรียบเทียบ Breakthrough curve ของการทดลองแบบคอลัมน์กับการประมาณโดยโปรแกรม HYDRUS2D ในทุกการทดลองข้างต้น พบว่าที่เกือบทุกการทดลองให้ผลการประมาณที่ใกล้เคียงกับผลการทดลองจากคอลัมน์จริง แต่ไม่ว่าในการปฏิบัติงานจริงเพื่อทำการ

บำบัดการรั่วไหลของอาร์เซนิต หรือเพื่อนำข้อมูลไปใช้ออกแบบระบบ Pump and Treat ก็ตาม ยังถือได้ว่าข้อมูลนี้เป็นค่าที่ไม่ปลอดภัย เนื่องจากโปรแกรมจะประมาณเวลาการเคลื่อนที่ของ อาร์เซนิตได้ช้ากว่าเวลาที่เกิดขึ้นจริง ซึ่งก่อให้เกิดความเสียหายต่อระบบนิเวศน์ และความปลอดภัยของมนุษย์และสัตว์ ดังนั้นจำเป็นต้องมีการตรวจสอบการประมาณด้วยการทดลอง แบบคอลัมน์ที่มีสภาพใกล้เคียงกับพื้นที่จริงเสมอ



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บทที่ 6

### สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

#### 6.1 สรุปผลการวิจัย

การวิจัยนี้เป็นการศึกษาการศึกษาถึงความสามารถในการดูดติดผิวของอาร์เซนเตของดินธรรมชาติในประเทศไทย และความสามารถในการเคลื่อนที่ของอาร์เซนเตในชั้นน้ำใต้ดิน โดยทำการทดลองทั้งแบบแบตช์และคอลัมน์ และสามารถสรุปผลการทดลองได้ดังนี้

6.1.1 การศึกษาคุณสมบัติของตัวอย่างดินที่ใช้เป็นตัวแทนดินของประเทศไทย โดยพิจารณาจากเนื้อดิน (Texture) และส่วนประกอบของปริมาณ Sand Silt และ Clay ในดิน ดินที่เลือกศึกษาครั้งนี้ได้แก่ ดินร่วนเหนียวปนทราย (Sandy Clay Loam) ดินร่วนเหนียว (Clay Loam) และดินทรายปนร่วน (Loamy Sand) ซึ่งดิน 3 ชนิด มีคุณสมบัติที่แตกต่างกัน ทั้งปริมาณหลักในดิน หรือความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวก

6.1.2 ผลการทดลองจำแนกตามชนิดดิน พบว่า ความสามารถในการดูดติดผิวเรียงลำดับจากมากไปน้อย คือ ดินร่วนเหนียวปนทราย ดินร่วนเหนียว และดินทรายปนร่วน ตามลำดับ โดยแม้ว่าดินร่วนเหนียวปนทราย จะมีร้อยละของดินเหนียว และ เหล็ก (จากตารางที่ 5.1) ต่ำกว่าดินร่วนเหนียว แต่กลับมีความสามารถในการดูดซับอาร์เซนเตได้สูงกว่า ที่เป็นเช่นนั้นเป็นเพราะว่าดินร่วนเหนียวปนทรายอาจจะมีค่าพีเอชที่ประจุมบนผิวหน้าเป็นศูนย์ ( $\text{pH}_{\text{PZC}}$ , Point of Zero Charge) สูงกว่าของดินร่วนเหนียว ซึ่งเป็นผลมาจากค่าพีเอชที่ประจุมบนผิวหน้าเป็นศูนย์ขององค์ประกอบแร่ธาตุหลักในดินร่วนเหนียวปนทรายสูงกว่าในดินร่วนเหนียว ดังนั้นช่วงของพีเอชที่ประจุมบนผิวหน้าเป็นบวก จึงเป็นช่วงกว้างกว่า และเกิดการดูดติดผิวได้มากกว่า

6.1.3 สำหรับการทดลองเพื่อศึกษาเวลาสัมผัสที่เหมาะสม ในการดูดติดผิวของอาร์เซนเต ด้วยตัวอย่างดิน โดยเลือกใช้ปริมาณตัวอย่างดิน 1 กรัม ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายอาร์เซนเต 15 มิลลิกรัมต่อลิตร ความเร็วรอบในการเขย่า 200 รอบต่อนาที ที่พีเอช 4 7 และ 10 พบว่า ที่เวลาประมาณ 96 ชั่วโมง การดูดติดผิวของอาร์เซนเต ด้วยตัวอย่างดินทั้ง 3 ชนิดจะเข้าสู่สมดุล

6.1.4 จากการศึกษาไอโซเทอมการดูดติดผิว (Adsorption Isotherm) โดยการทดลองแบบแบบแบตซ์ และเปลี่ยนแปลงปริมาณดินตั้งแต่ 0.5 ถึง 10 กรัม พบว่า การดูดติดผิวของอาร์เซนเตดด้วยตัวอย่างดินสอดคล้องกับไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบแลงมัวร์ (Langmuir Adsorption Isotherm) ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกันที่ปริมาณดินต่าง ๆ กันจะพบว่า ปริมาณดินที่เพิ่มขึ้นจะทำให้ปริมาณอาร์เซนเตดที่ถูกดูดติดผิวเพิ่มขึ้นตามไปด้วย เนื่องจากมีปริมาณของสารดูดซับเพิ่มมากขึ้น แต่ความสามารถในการดูดติดผิวของอาร์เซนเตด ต่อน้ำหนักดินมีแนวโน้มลดลง ซึ่งอาจเป็นผลมาจากการที่มีปริมาณดินจำนวนมากขึ้นเมื่อเทียบกับปริมาณอาร์เซนเตดที่มีอยู่ในสารละลาย

6.1.5 ค่าพีเอชในช่วงพีเอชที่ทำการศึกษาคือ เป็นปัจจัยที่มีผลต่อการดูดติดผิวของอาร์เซนเตด โดยที่ทุกพีเอช ดินร่วนเหนียวปนทรายมีความสามารถในการดูดติดผิวของอาร์เซนเตดสูงที่สุด รองลงมาคือดินร่วนเหนียว และดินทรายปนร่วนมีความสามารถในการดูดติดผิวต่ำสุด และเมื่อพิจารณาในดินชนิดเดียวกันจะพบว่าความสามารถในการดูดติดผิวลดลงเมื่อ พีเอชเริ่มต้นของสารละลายเพิ่มขึ้น หรือความสามารถในการดูดติดผิวของอาร์เซนเตดบนดินทุกชนิดมีค่าสูงสุดที่ พีเอช 4 รองลงมาคือ พีเอช 7 และ 10 เนื่องจาก ค่าพีเอชที่ประจวบกับผิวหน้าเป็นศูนย์ ( $pH_{PZC}$ , Point of Zero Charge) ของดินตามธรรมชาติจะอยู่ที่พีเอชประมาณ 4 ถึง 5 (Goh และ Lim, 2004) ดังนั้นที่พีเอช 4 ประจวบกับผิวหน้าจะเป็นประจุบวก และการดูดติดผิวจะเกิดขึ้นได้ดี

6.1.6 การทดลองแบบคอลัมน์เพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์การกระจายตัว (Dispersion Coefficient) ของดินทั้ง 3 ชนิด โดยใช้โบรไมด์เป็นสารตามรอย แล้วนำไปคำนวณโดยโปรแกรม STANMOD/CFITIM ได้ค่า Peclet Number เท่ากับ 12.36 12.12 และ 4.88 สำหรับดินร่วนเหนียวปนทราย ดินร่วนเหนียว และดินทรายปนร่วน ตามลำดับ และนำไปคำนวณสามารถหาค่าสัมประสิทธิ์การกระจายตัวได้ เท่ากับ  $2.93 \times 10^{-3}$   $2.75 \times 10^{-3}$  และ  $10.64 \times 10^{-3}$  เซนติเมตร<sup>2</sup>/วินาที สำหรับ ดินร่วนเหนียวปนทราย ดินร่วนเหนียว และดินทรายปนร่วนตามลำดับ

6.1.7 การศึกษาในสภาวะที่มีอิออนลบ พบว่า เมื่อมีปริมาณฟอสเฟตเพิ่มขึ้น ความสามารถในการดูดติดผิวของอาร์เซนเตดจะต่ำลง นั่นคือ ฟอสเฟตสามารถยับยั้งหรือรบกวนการดูดติดผิวของอาร์เซนเตดในดินได้ โดยที่อัตราส่วนฟอสเฟตต่ออาร์เซนเตดเท่ากับ 10:1 และ 1 : 1 ความสามารถในการดูดติดผิวของอาร์เซนเตดจะลดลง ส่วนที่อัตราส่วนฟอสเฟตต่ออาร์เซนเตด เท่ากับ 0.1:1 ความสามารถในการดูดติดผิวของอาร์เซนเตดจะไม่ถูกยับยั้งโดยฟอสเฟตไม่มากนัก สาเหตุที่ฟอสเฟตสามารถยับยั้งการดูดติดผิวของอาร์เซนเตดได้ เนื่องจาก ฟอสเฟตสามารถแย่งหรือทำให้

พื้นที่ที่อาร์เซนเนตจะสามารถดูดติดผิวได้ลดลง เนื่องจากฟอสเฟตมีขนาดโมเลกุลเล็กกว่า จึงมีพื้นที่ผิวสัมผัสสูงกว่า จึงเข้าไปดูดติดผิวในโมเลกุลของดินได้ดีกว่า (Smith และคณะ, 2002) ในขณะที่เมื่อมีไบคาร์บอเนตในระบบ พบว่า ที่อัตราส่วนไบคาร์บอเนตต่ออาร์เซนเนต 1 : 1 และ 0.1 : 1 ไบคาร์บอเนตจะ ช่วยเพิ่มความสามารถในการดูดติดผิวของอาร์เซนเนต ขณะที่อัตราส่วน 10 : 1 ไบคาร์บอเนตไม่มีผลต่อความสามารถในการดูดติดผิวของอาร์เซนเนต

6.1.8 จากการทดลองแบบคอลัมน์ เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบ Breakthrough Curve ของการทดลองแบบคอลัมน์ของดินทั้ง 3 ชุด จะเห็นว่าผลการทดลองเป็นไปในทิศทางเดียวกับการทดลองแบบแบตซ์ กล่าวคือ คอลัมน์ดินร่วนเหนียวปนทรายมีความสามารถในการดูดติดผิวของอาร์เซนเนตสูงที่สุด รองลงมาเป็นดินร่วนเหนียว และดินทรายปนร่วน ตามลำดับ และเมื่อพิจารณาผลของพีเอช ในการทดลองแบบคอลัมน์ของดินร่วนเหนียวที่สภาวะพีเอช 4 7 และ 10 พบว่าผลการทดลองเป็นไปในทิศทางเดียวกับการทดลองแบบแบตซ์ คือ ที่พีเอช 4 อาร์เซนเนตจะถูกดูดติดผิวสูงที่สุด รองลงมาคือที่พีเอช 7 และ 10

6.1.9 การศึกษาคอลัมน์ที่มีอิออนลบ พบว่า ฟอสเฟตทำให้ความสามารถในการดูดติดผิวของอาร์เซนเนตลดลง แต่ไบคาร์บอเนตช่วยเพิ่มความสามารถในการดูดติดผิวของอาร์เซนเนต และผลการทดลองสอดคล้องกับการทดลองแบบแบตซ์เมื่อมีอิออนประจุลบ

6.1.10 จากการทดลองแบบคอลัมน์ เพื่อเปรียบเทียบผลการจำลองการเคลื่อนที่ของอาร์เซนเนตแบบคอลัมน์ด้วยโปรแกรม HYDRUS2D พบว่าในทุกชุดการทดลอง ความสามารถในการดูดติดผิวของดินในการทดลองแบบคอลัมน์มีค่าต่ำกว่าการประมาณโดยโปรแกรม HYDRUS2D สำหรับในส่วนของ การคายสารออก (Desorption) พบว่า ในทุกคอลัมน์ Breakthrough curve จากการประมาณด้วยโปรแกรมจะมีอัตราการคายสารออกที่ช้ากว่าในการทดลองแบบคอลัมน์

6.1.11 จากการเปรียบเทียบผลที่ได้จากการประมาณด้วยโปรแกรม HYDRUS2D กับผลที่ได้จากการทดลองแบบคอลัมน์ ทำให้ทราบว่าภายในคอลัมน์น่าจะเกิดกระบวนการดูดติดผิวแบบไม่สมดุล (Non-equilibrium adsorption process) แต่การวิจัยในครั้งนี้นำใช้สมการแบบจำลองการเคลื่อนที่ ที่มีสมมติฐานที่ว่า การดูดซับจะอยู่ในสภาวะสมดุล (Local Equilibrium Assumption) จึงทำให้เกิดการประมาณค่าที่คลาดเคลื่อนจากผลการทดลอง

6.1.12 แม้ว่าโปรแกรม HYDRUS2D จะสามารถประมาณการเคลื่อนที่ได้ใกล้เคียงกับสภาพจริง แต่ไม่ควรนำข้อมูลที่ได้จากโปรแกรมไปใช้จริงโดยที่ไม่ได้ทำการตรวจสอบการเคลื่อนที่โดยคอลัมน์ และปรับแก้การเคลื่อนที่ให้ตรงกับการประมาณจากโปรแกรมเสียก่อน เพราะจะเป็นการประมาณค่าที่ไม่ปลอดภัย เนื่องจากโปรแกรมจะประมาณเวลาการเคลื่อนที่ของอาร์เซนเนตไว้ช้ากว่าเวลาที่เกิดขึ้นจริง ซึ่งก่อให้เกิดความเสียหายต่อระบบนิเวศน์ และความปลอดภัยของมนุษย์และสัตว์

## 6.2 ความสำคัญทางด้านวิศวกรรมศาสตร์ และการนำไปใช้ประโยชน์

จากการศึกษาการพฤติกรรมกรดติดผิว การเคลื่อนที่ รวมไปถึงการศึกษาการนำคอมพิวเตอรืซอฟต์แวร์มาใช้ในการประมาณการเคลื่อนที่ของอาร์เซนเนตในน้ำใต้ดิน สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ดังนี้

6.2.1 สามารถประมาณการเคลื่อนที่ของอาร์เซนเนตในชั้นน้ำใต้ดินได้ซึ่งเป็นข้อมูลที่เป็นประโยชน์อย่างมากสำหรับการวางแผนการบำบัดและฟื้นฟูสภาพแวดล้อม ซึ่งสามารถทำได้ตามขั้นตอนดังนี้

- (1) ทำการหาค่าคุณสมบัติต่าง ๆ ของตัวอย่างดิน เช่น ความหนาแน่น (Bulk Density), ค่าความพรุน (Porosity)
- (2) ทำการทดลองแบบแบตช์ เพื่อหาไอโซเทอมของการดูดซับว่าสอดคล้องกับไอโซเทอมแบบใด และทำการหาพารามิเตอร์ของการดูดซับ (Adsorption Parameter)
- (3) ทำการปรับแก้ค่าพารามิเตอร์ของการดูดติดผิวที่ได้จากขั้นตอนที่ (2) เพื่อที่เมื่อนำไปป้อนเข้าสู่โปรแกรม HYDRUS2D แล้วจะได้ความใกล้เคียงกับสภาพจริงมากขึ้น
- (4) ทำการทดลองแบบคอลัมน์โดยป้อนสารตามรอย เช่น สารละลายโบรไมด์ เพื่อหาสัมประสิทธิ์ของการกระจายตัว (Dispersion Coefficient, D)
- (5) นำค่าความหนาแน่น (Bulk Density), ค่าความพรุน (Porosity) ค่าพารามิเตอร์ของการดูดติดผิว และค่าสัมประสิทธิ์ของการกระจายตัว (Dispersion Coefficient, D) ป้อนเข้าสู่โปรแกรม HYDRUS2D เพื่อที่จะให้โปรแกรมทำการประมาณการเคลื่อนที่ของอาร์เซนเนต ซึ่งทำให้ทราบความเข้มข้น ที่ระยะทางหรือเวลาใด ๆ ที่พิจารณา

6.2.2 จากการทดลองเมื่อมีอิออนลบ เช่น ฟอสเฟต สามารถนำผลการทดลองไปใช้บำบัดสภาพปนเปื้อนอย่างมีประสิทธิภาพได้ คือ เมื่อเกิดการปนเปื้อนของอาร์เซนเนตขึ้นในชั้นน้ำใต้ดิน (Aquifer) ทำการผ่านสารละลายที่มีฟอสเฟตเข้าไปในบริเวณปนเปื้อนนั้น จะสามารถเร่งการชะ



อาร์เซนเตอออกจากชั้นน้ำใต้ดินได้เมื่อเทียบกับการชะด้วยน้ำธรรมดา อาร์เซนเตอจะหลุดออกจากหน้าดินไปอยู่ในน้ำใต้ดินแทน และจึงสูบน้ำใต้ดินขึ้นมาบำบัดต่อไป

6.2.3 การศึกษาทำให้ทราบความสามารถในการดูดติดผิวและการเคลื่อนที่ของดินที่มีคุณสมบัติเหมือน หรือใกล้เคียงกับตัวอย่างดินที่นำมาศึกษา จึงอาจมีประโยชน์ในการประเมินเหตุการณ์คร่าว ๆ หากเกิดปัญหาการปนเปื้อนอาร์เซนเตอในน้ำใต้ดินในประเทศไทยได้

### 6.3 ข้อเสนอแนะ

6.3.1 ศึกษาและเปรียบเทียบผลการดูดติดผิว และการเคลื่อนที่ของอาร์เซนเตอในน้ำใต้ดินที่ความเร็วการไหลอื่น ๆ ในการทดลองแบบคอลัมน์ เพื่อให้การประยุกต์ในการใช้งานในพื้นที่จริงมีประสิทธิภาพมากขึ้น

6.3.2 ศึกษาผลกระทบของโลหะหนัก หรือสารรบกวนตัวอื่น ๆ ที่มีต่อการดูดติดผิว และการเคลื่อนที่ของอาร์เซนเตอในชั้นน้ำใต้ดิน เช่น อะลูมิเนียม หรือแคลเซียม

6.3.3 ศึกษาการประยุกต์คอมพิวเตอร์ซอฟต์แวร์ตัวอื่นในการประมาณการเคลื่อนที่ของสารมลพิษในชั้นน้ำใต้ดินต่อไป รวมทั้งศึกษาการใช้คอมพิวเตอร์ซอฟต์แวร์เมื่อมีอิออนรบกวน หรือโลหะหนักตัวอื่น ๆ อยู่ในระบบ

6.3.4 ศึกษาผลของตัวแปรอื่น ๆ เช่น อุณหภูมิ ผลของ Ionic Strength ที่มีต่อการดูดติดผิว และการเคลื่อนที่ของอาร์เซนเตอในน้ำใต้ดิน

## รายการอ้างอิง

### ภาษาไทย

- กรมวิชาการเกษตร. 2544. คู่มือการวิเคราะห์ดินและพืช. ชุมชนสหกรณ์การเกษตรแห่งประเทศไทย.  
ไทย.
- กองมาตรฐานคุณภาพสิ่งแวดล้อม. 2530. สารหนู: กองมาตรฐานคุณภาพสิ่งแวดล้อม  
สำนักงานคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ. พิมพ์ครั้งที่ 1. (ม.ป.ท.).
- ณัฐฤติ นิพานันท์. 2537. การกำจัดสารประกอบอาร์เซนิกโดยใช้การดูดซับบนตัวดูดซับนิกเกิล  
โพลีบีนีนัม. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ดุษฎีลักษณ์ จิตติวร. 2543. ประสิทธิภาพของแฝกหอม *Vertiveria ziznioides* (Linn.) Nash และ  
แฝกดอน *Vertiveria nemoralis* (Balansa) A. Camus ในการกำจัดสารหนูที่ปนเปื้อนใน  
ดิน. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ธรรม รัฐประกอบกิจ. 2541. การกำจัดสารหนูในน้ำสังเคราะห์ด้วยตัวกลางทรายเคลือบเหล็ก  
ออกไซด์และตัวกลางทรายเคลือบแมงกานีสออกไซด์. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต  
ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- รามนรี เนตรวิเชียร. 2543. การกำจัดสารหนูในรูปอาร์ซิเนตในน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้โคโคแซน  
แบบเม็ด. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม บัณฑิต  
วิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์สาธารณสุข . 1997. ศูนย์ข้อมูลพิษวิทยา[Online]. กลุ่มงานพิษวิทยา  
และสิ่งแวดล้อม สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์. แหล่งที่มา:  
[http://webdb.dmsc.moph.go.th/ifc\\_toxic/a\\_tx\\_1\\_001c.asp?info\\_id=119](http://webdb.dmsc.moph.go.th/ifc_toxic/a_tx_1_001c.asp?info_id=119)[2003,  
July, 22]

## ภาษาอังกฤษ

- Bhumbla, D. K.; and Keefer, R. F. 1994. Arsenic Mobilization and bioavailability in Soils. In Jerome, O. N. (ed.), Arsenic in The Environment, pp. 51-82. New York: John Willey & Sons.
- Catherine, A. W.; and Matthew, J. E. 2002. Kinetics of Arsenic Adsorption on Goethite in the Presence of Sorbed Silicic Acid. Soil. Sci. Soc. Am. J. 66: 818-825.
- Charlet, L. ; Ansari, A. A.; Lespagnol, G.; and Musso, M. 2001. Risk of arsenic transfer to a semi-Confined Aquifer And the Effect of Water Level Fluctuation in North Mortagne, France at A Former Industrial Site. The Science of the Total Environment. 277: 133-147.
- Cope, C. B.; Fuller, W. H.; Willetts, S. L. 1983. The Scientific Management of Hazardous Wastes. Cambridge University Press.
- David, H. F.; and Paul, A. B. 1997. Environmental Engineering's Handbook. Second Edition. New York: Lewis-CRC Press LLC.
- Goh, K. H.; and Lim, T. T. 2004. Geochemistry of Inorganic Arsenic and Selenium in A Tropical soil: Effect of reaction Time, pH, and Competitive Anions on Arsenic and Selenium Adsorption. Chemosphere. 55: 849-859.
- Goldberg, S. 2002. Competitive Adsorption of Arsenate and Arsenite on Oxides and Clay Minerals. Soil. Sci. Soc. Am. J. 66: 413-421.
- Huang, Y. 1994. Arsenic Distribution in Soils. In Jerome, O. N. (ed.), Arsenic in The Environment, pp. 17-49. New York: John Willey & Sons.
- Jeffrey, D.; and William, I. 1997. Effects of Pore Water Velocity on The Transport of Arsenate. Environ. Sci. Technol. 31: 704-709.
- Ladeira A. C. Q.,; and Ciminelli V. S. T. 2004. Adsorption and Desorption of Arsenic on An Oxisol and Its Constituents. Water Research. 38: 2087-2094.
- Leij F. J., Toride N.; and M. Th. van Genuchten. 1995. The CXTFIT Code for Estimateing Transport Parameters from Laboratory or Field Tracer Experiments Version 2.1, Research Report No. 137, U.S. Salinity Laboratory, Agricultural, Research Service, U.S. Department of Agriculture, Riverside, California.

- Lower, S. K. 2001. Mineral-Microbe Interactions Probed in Force, Energy, and Distance Nanospace[Online]. Faculty of The Virginia Polytechnic Institute and State University. Available from: <http://scholar.lib.vt.edu/theses/available/etd-02272001-145544/unrestricted/dissertation.pdf>. [2004, Sep 27]
- Manning, B. A.; and Goldberg, S. 1997. Arsenic (III) and Arsenic (V) Adsorption on Three California Soils. Soil Science. 162: 886-895.
- O'Reilly, S. E.; Strawn, D. G.; and Sparks, D. L. 2001. Resident Time Effects on Arsenate Adsorption/Desorption Mechanisms on Goethite. Soil. Sci. Soc. Am. J. 65: 67-77.
- Parida, K.; and Rungsarit, B. 2000. Thailand Land Resources Mapping[Online]. Land Development Department. Available from: <http://www.iscgm/html4/pdf/forum2000/MsparidaKuneepong.pdf> [2003, Sep 22]
- Pauline, L. S.; and David, G. K. 2001. Chapter 1. Source and behaviour of arsenic in natural waters[Online]. Available from: [http://www.who.int/entity/water\\_sanitation\\_health/dwq/en/arsenicun1.pdf](http://www.who.int/entity/water_sanitation_health/dwq/en/arsenicun1.pdf) [2003, July 3]
- Phillip, B. B.; Hanadi, S. R.; and Charles, J. N. 1999. Ground Water Contamination: Transport and Remediation. Prentice Hall PTR.
- Selim, H. M. ; and Kingery, W. L. 2003. Geochemical and Hydrological Reactivity of Heavy Metals in Soils. Lewis Publishers.
- Smith, E.; Naidu, R.; and Alston, A. M. 2002. Chemistry of Inorganic Arsenic In Soils: II. Effect of Phosphorus, Sodium, and Calcium on Arsenic Sorption. J. Environ. Qual. 31: 557-563.
- Sparks, D. L. 1995. Environmental Soil Chemistry. Academic Press, Inc.
- Stephen, R. H.; and Daniel, J. P. 2000. Arsenic in Ground Water of The Willamette Basin, Oregon[Online]. US Department of the Interior US Geological Survey. Available from: [http://www.oregon.usgs.gov/pubs\\_dir/Pdf/98-4205.pdf](http://www.oregon.usgs.gov/pubs_dir/Pdf/98-4205.pdf) [2003, June 17]
- Suthersan, S. S. 1999. Pump and Treat Systems in Remediation Engineering: Design Concepts. Boca Raton: CRC Press LLC.

- Todd, L. S.; and Mark, A. R. 2002. Arsenic Speciation & Removal Technology Evaluation for A Florida Groundwater[Online]. Available from:  
[www.consulthai.com/2002/news/papers/arsenicEval\\_vol02.PDF](http://www.consulthai.com/2002/news/papers/arsenicEval_vol02.PDF) [2003, July 3]
- Tsair, F. L.; and Jun, K. W. 2001. Adsorption of Arsenite and Arsenate within Activated Alumina Grains: Equilibrium and Kinetics. Wat. Res. 35: 2049-2057.
- USDA-ARS. 1998. Standmod Program[Online]. , U.S. Department of Agriculture: U.S. Salinity Laboratory. Available from:  
<http://www.usssl.ars.usda.gov/models/stanmod/stanmod.HTM>[2003, Sep22]
- Xiaoguang, M.; Korfiatis, G. P.; Bang, S.; and Bang, K. W. 2002. Combine Effects of Anions on Arsenic Removal by Iron Hydroxides. Toxicology Letters. 133: 103-111.
- Zhao, H.; and Robert, S. 2001. Competitive Adsorption of Phosphate and Arsenate on Goethite. Environ. Sci. Technol. 35: 4753-4757.

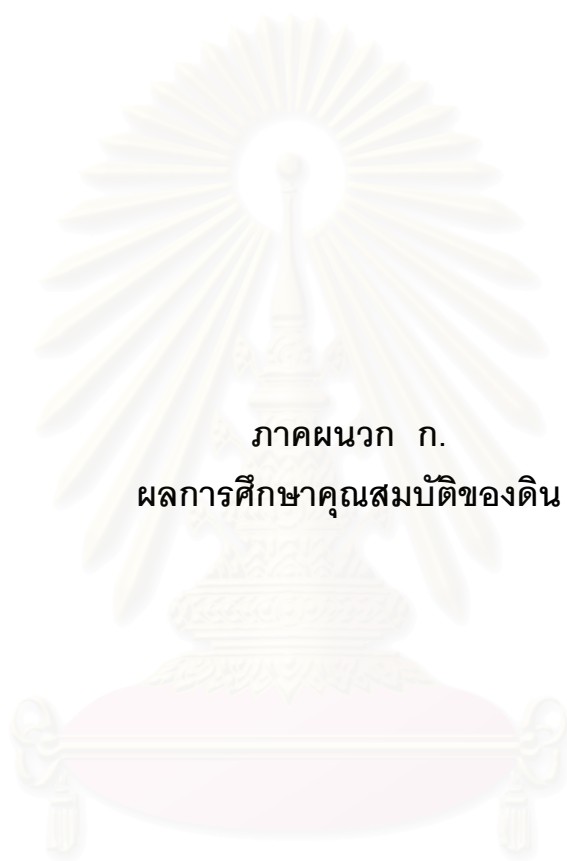


สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก ก.  
ผลการศึกษาคุณสมบัติของดิน

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก.1 ผลการวัดปริมาณความเข้มข้นเริ่มต้นของอาร์เซนิกในดินทั้ง 3 ชนิด  
ด้วยเครื่อง Atomic Absorption Spectrophotometer (AAS)

Sample Label	Arsenic Conc (ppm.)	Mean Absorbance	Replicates Absorbance		
			Sandy Clay Loam (I)	ND	-0.0109
Sandy Clay Loam (II)	ND	-0.0137	-0.0135	-0.0129	-0.0149
Sandy Clay Loam (III)	ND	-0.0203	-0.0205	-0.0216	-0.0188
Clay Loam (I)	ND	-0.0114	-0.0124	-0.0081	-0.0137
Clay Loam (II)	ND	-0.0111	-0.0142	-0.0104	-0.0088
Clay Loam (III)	ND	-0.0149	-0.0174	-0.0099	-0.0173
Loamy Sand (I)	ND	-0.0198	-0.0191	-0.0212	-0.0191
Loamy Sand (II)	ND	-0.0237	-0.0230	-0.0225	-0.0257
Loamy Sand (III)	ND	-0.0231	-0.0254	-0.0207	-0.0231

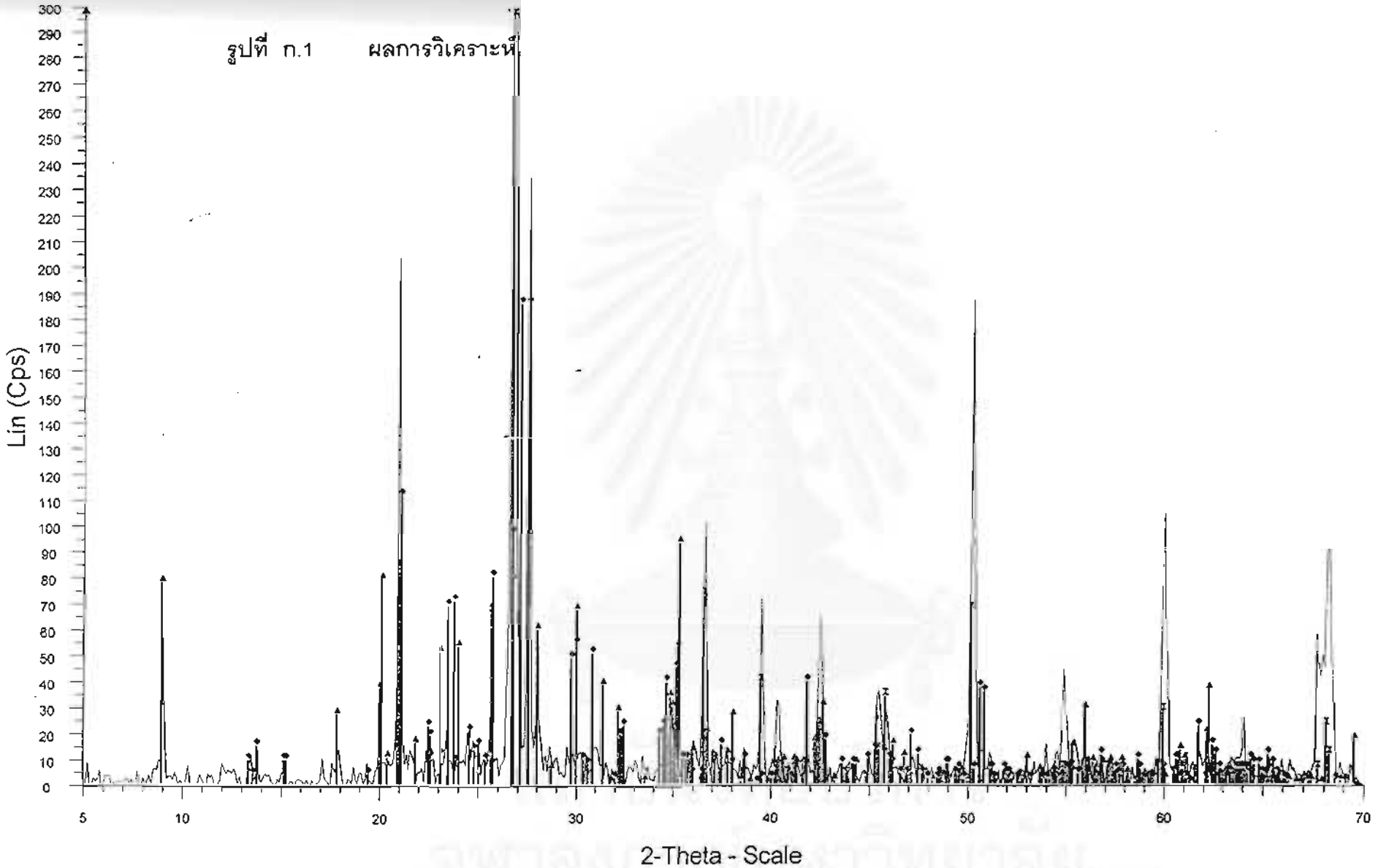
หมายเหตุ : ND หมายถึง ตรวจไม่พบความเข้มข้นอาร์เซนิกในตัวอย่างดิน

Sandy Clay Loam คือ ดินร่วนเหนียวปนทราย

Clay Loam คือ ดินร่วนเหนียว

Loamy Sand คือ ดินทรายปนร่วน





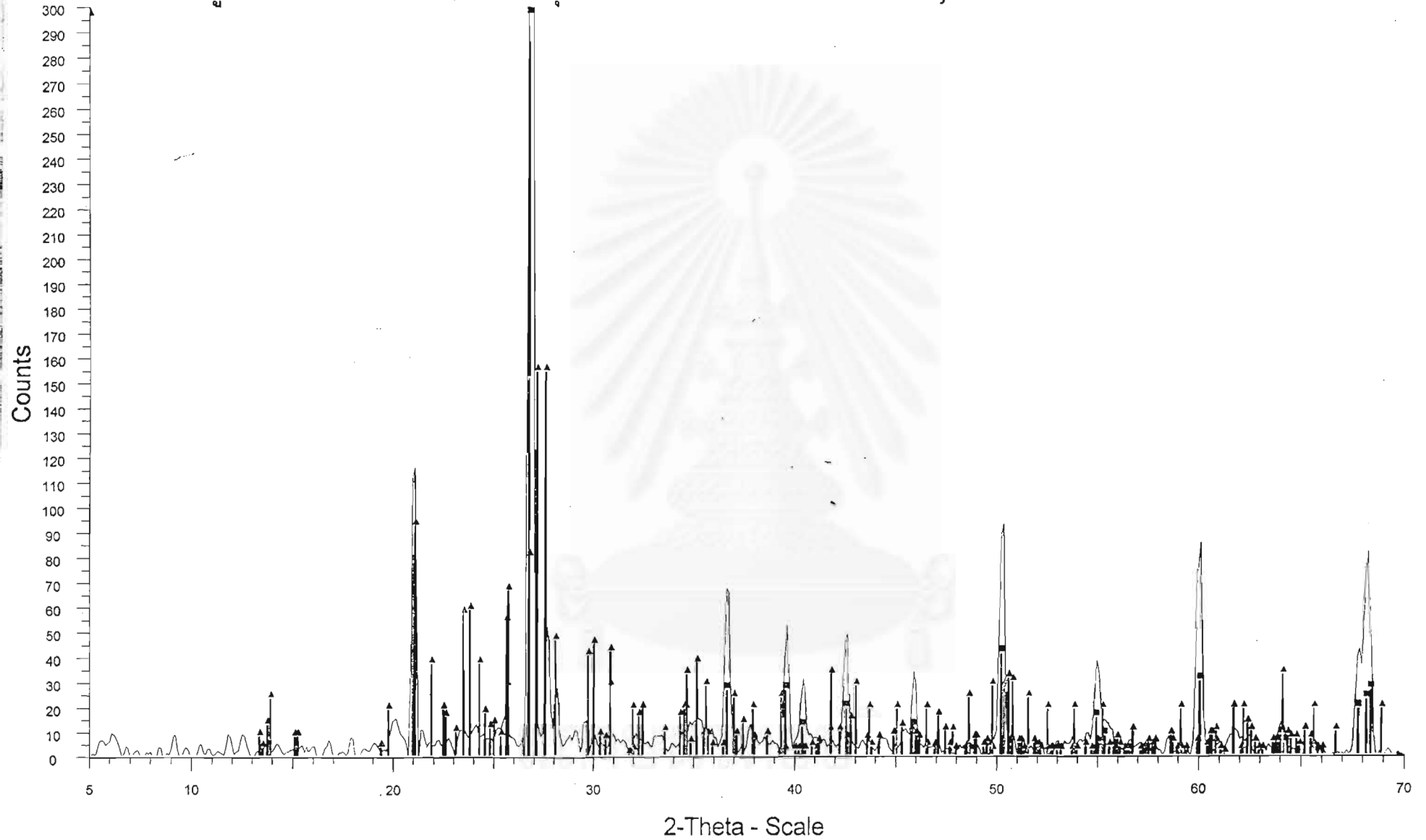
File: soil A.raw - Type: 2Th/Th locked - Start: 5.000 ° - End: 70.000 ° - Step: 0.100 ° - Step time: 1.2 s - Temp.: 25 °C (Room) - Time Started: 0 s - 2-Theta: 5.000 ° - Theta: 2.500 ° - Display plane: 1 -

79-1908 (C) - Quartz - SiO<sub>2</sub> - Y: 50.00 % - d x by: 1. - WL: 1.5406 - Hexagonal - a 4.91340 - b 4.91340 - c 5.40520 - alpha 90.000 - beta 90.000 - gamma 120.000 - Primitive - P3121 (152) - 3 - 113.(

77-0135 (C) - Microcline - K(Si<sub>0.75</sub>Al<sub>0.25</sub>)<sub>4</sub>O<sub>8</sub> - Y: 16.67 % - d x by: 1. - WL: 1.5406 - Triclinic - a 8.57840 - b 12.96000 - c 7.21120 - alpha 89.700 - beta 115.967 - gamma 90.875 - Base-centred - C

84-1304 (C) - Muscovite - KAl<sub>3</sub>Si<sub>3</sub>O<sub>10</sub>(OH)<sub>2</sub> - Y: 8.33 % - d x by: 1. - WL: 1.5406 - Monoclinic - a 5.15790 - b 8.95050 - c 20.07100 - alpha 90.000 - beta 95.750 - gamma 90.000 - Base-centred - C2

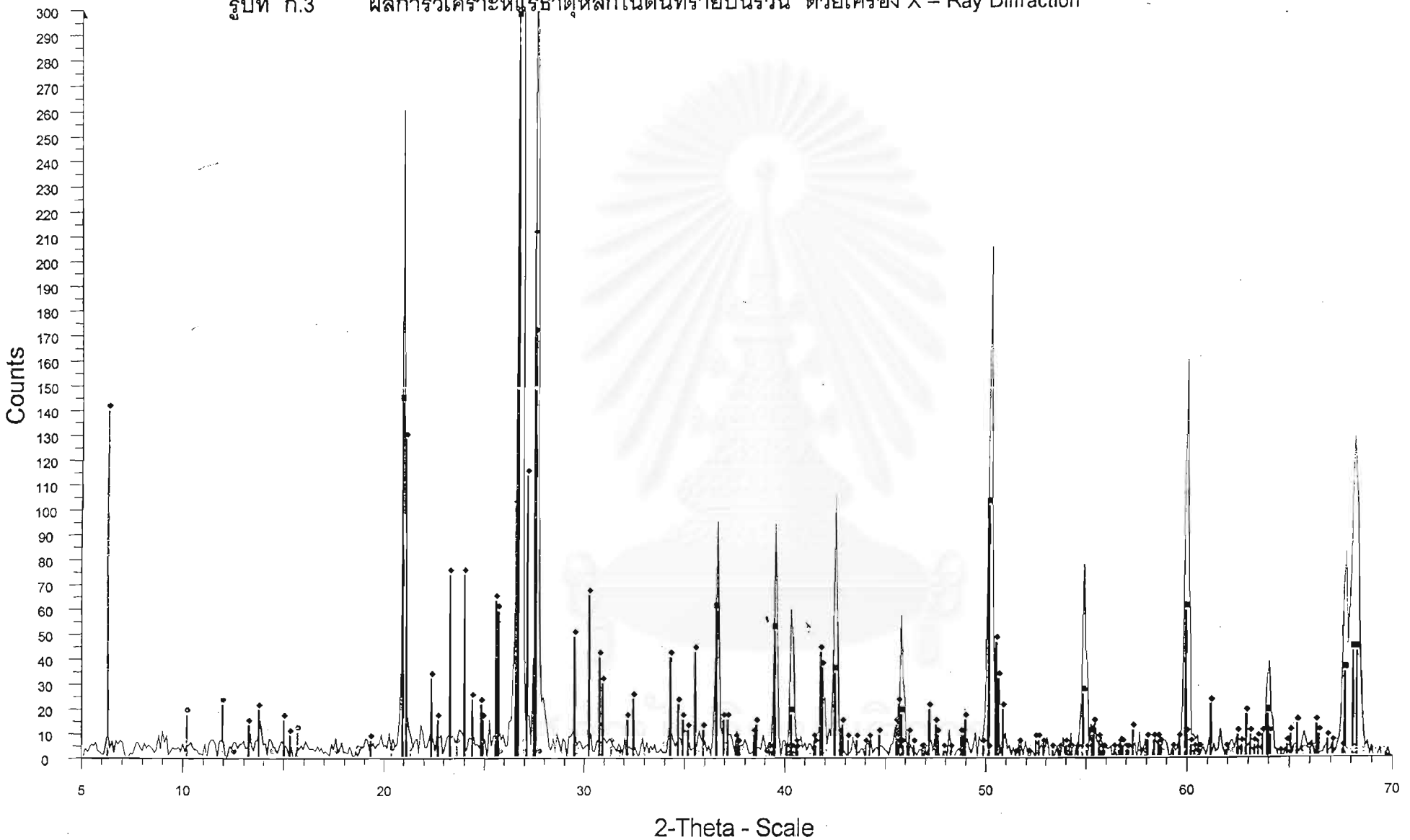
รูปที่ ก.2 ผลการวิเคราะห์แร่ธาตุหลักในดินร่วนเหนียว ด้วยเครื่อง X - Ray Diffraction



File: soil B.raw - Type: 2Th/Th locked - Start: 5.000 ° - End: 70.000 ° - Step: 0.100 ° - Step time: 1.2 s - Temp.: 25 °C (Room) - Time Started: 0 s - 2-Theta: 5.000 ° - Theta: 2.500 ° - Display plane: 1 - Anode:  
 86-1628 (C) - Quartz low - SiO<sub>2</sub> - Y: 50.00 % - d x by: 1. - WL: 1.5406 - Hexagonal - a 4.90210 - b 4.90210 - c 5.39970 - alpha 90.000 - beta 90.000 - gamma 120.000 - Primitive - P3121 (152) - 3 - 112.374  
 77-0135 (C) - Microcline - K(Si<sub>0.75</sub>Al<sub>0.25</sub>)<sub>4</sub>O<sub>8</sub> - Y: 20.83 % - d x by: 1. - WL: 1.5406 - Triclinic - a 8.57840 - b 12.96000 - c 7.21120 - alpha 89.700 - beta 115.967 - gamma 90.875 - Base-centred - C-1 (0) -  
 02-0532 (D) - Chlorite - (Na,Ca)Al(Si<sub>2</sub>O<sub>8</sub>)<sub>2</sub> · nH<sub>2</sub>O - Y: 8.95 % - d x by: 1. - WL: 1.5406 - Triclinic - a 8.18110 - b 12.96000 - c 7.12110 - alpha 93.070 - beta 118.970 - gamma 90.070 - 671 208 - [4] PDF 1 - S.O 10.9 % - F5

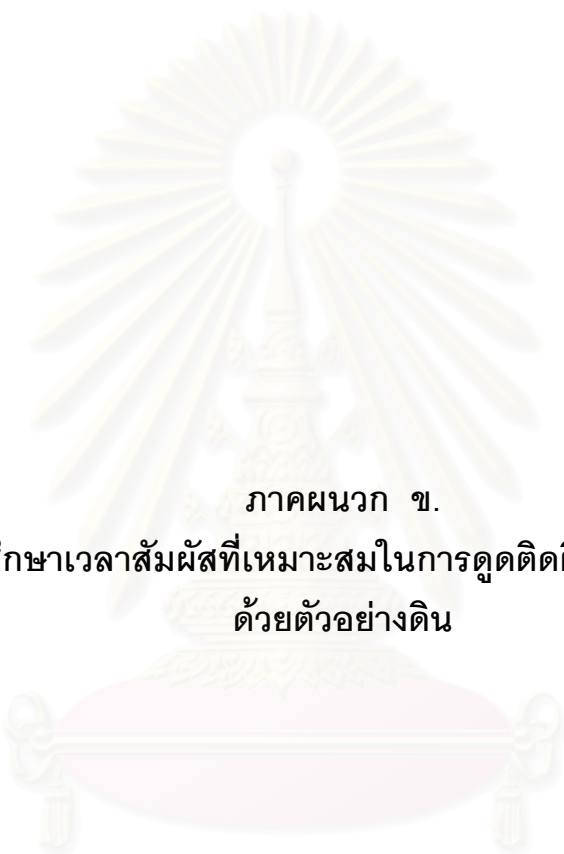
รูปที่ ก.3

ผลการวิเคราะห์แร่ธาตุหลักในดินทรายปนร่วน ด้วยเครื่อง X - Ray Diffraction



109

File: soil C.raw - Type: 2Th/Th locked - Start: 5.000 ° - End: 70.000 ° - Step: 0.100 ° - Step time: 1.2 s - Temp.: 25 °C (Room) - Time Started: 0 s - 2-Theta: 5.000 ° - Theta: 2.500 ° - Display plane: 1 - Anode:  
85-0796 (C) - Quartz - SiO<sub>2</sub> - Y: 50.00 % - d x by: 1. - VL: 1.5406 - Hexagonal - a 4.91180 - b 4.91180 - c 5.40340 - alpha 90.000 - beta 90.000 - gamma 120.000 - Primitive - P3221 (154) - 3 - 112.896 - *V*/*c*  
76-0831 (C) - Potassium-Feldspar CA1E - K<sub>0.94</sub>Na<sub>0.06</sub>Al<sub>1.01</sub>Si<sub>2.99</sub>O<sub>8</sub> - Y: 12.50 % - d x by: 1. - VL: 1.5406 - Triclinic - a 8.56100 - b 12.97200 - c 7.22300 - alpha 90.560 - beta 115.930 - gamma 87.920 -  
71-0809 (C) - Faujasite - Ca<sub>28</sub>Al<sub>57</sub>Si<sub>133</sub>O<sub>384</sub> - Y: 8.33 % - d x by: 1. - VL: 1.5406 - Cubic - a 24.71000 - b 24.71000 - c 24.71000 - alpha 90.000 - beta 90.000 - gamma 90.000 - Face-centred - Fd3m (227)



ภาคผนวก ข.  
ผลการศึกษาเวลาสัมพัทธ์ที่เหมาะสมในการดูตติยวิงของอาร์เซนเตด  
ด้วยตัวอย่างดิน

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ข.1 ผลการศึกษาเวลาสัมผัสที่เหมาะสมในการดูดติดผิวของอาร์เซนเนตด้วยตัวอย่างดิน เมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายอาร์เซนเนตเท่ากับ 15 มิลลิกรัมต่อลิตร พีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 4 ความเร็วรอบในการเขย่าที่ 200 รอบต่อนาที

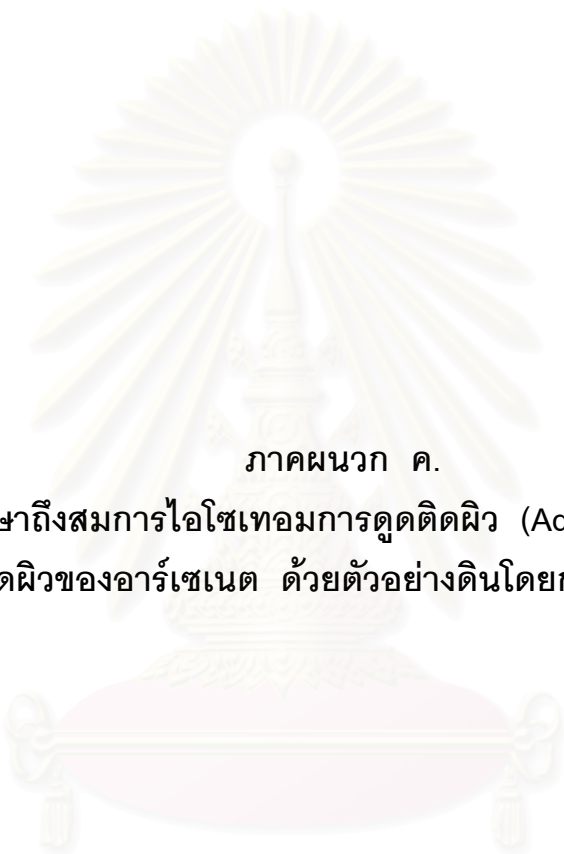
เวลา (ชม.)	C <sub>0</sub> (มก./ล.)	ดินร่วนเหนียวปนทราย					ดินร่วนเหนียว					ดินทรายปนร่วน				
		น้ำหนัก ดิน (ก.)	final pH	C (มก./ล.)	x	% Ads	น้ำหนัก ดิน (ก.)	final pH	C (มก./ล.)	x	% Ads	น้ำหนักดิน ดิน (ก.)	final pH	C (มก./ล.)	x	% Ads
1	16.063	1.0003	4.01	7.375	8.688	54.085	1.0002	4.20	8.331	7.732	48.133	1.0008	4.14	7.264	8.799	54.776
2	16.063	1.0002	4.03	7.098	8.965	55.812	1.0007	4.22	8.225	7.838	48.798	1.0004	4.14	6.581	9.482	59.028
4	16.063	1.0004	4.02	6.914	9.149	56.955	1.0006	4.23	7.158	8.905	55.440	1.0009	4.15	6.573	9.490	59.081
8	16.063	1.0001	4.06	6.872	9.191	57.221	1.0009	4.21	8.331	7.732	48.133	1.0010	4.16	6.330	9.733	60.595
24	16.063	1.0005	4.08	6.825	9.238	57.513	1.0004	4.30	4.341	11.722	72.977	1.0012	4.18	5.613	10.450	65.059
48	16.063	1.0004	4.07	6.607	9.456	58.868	1.0004	4.31	4.217	11.846	73.748	1.0014	4.20	5.523	10.540	65.617
72	16.063	1.0008	4.10	6.061	10.002	62.269	1.0011	4.35	3.807	12.256	76.299	1.0008	4.21	4.870	11.193	69.682
96	16.063	1.0003	4.11	5.886	10.177	63.359	1.0006	4.34	3.133	12.930	80.497	1.0007	4.25	3.560	12.503	77.840

ตารางที่ ข.2 ผลการศึกษาเวลาสัมผัสที่เหมาะสมในการดูดติดผิวของอาร์เซนิตด้วยตัวอย่างดิน เมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายอาร์เซนิตเท่ากับ 15 มิลลิกรัมต่อลิตร พีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 7 ความเร็วรอบในการเขย่าที่ 200 รอบต่อนาที

เวลา (ชม.)	C <sub>0</sub> (มก./ล.)	ดินร่วนเหนียวปนทราย					ดินร่วนเหนียว					ดินทรายปนร่วน				
		น้ำหนัก ดิน (ก.)	final pH	C (มก./ล.)	x	% Ads	น้ำหนัก ดิน (ก.)	final pH	C (มก./ล.)	x	% Ads	น้ำหนักดิน ดิน (ก.)	final pH	C (มก./ล.)	x	% Ads
1	16.024	1.001	8.30	11.176	4.848	30.255	1.001	7.76	14.341	1.683	10.503	1.001	8.16	14.155	1.869	11.664
2	16.024	1.001	8.02	12.510	3.514	21.930	1.000	7.85	14.203	1.821	11.364	1.000	8.07	15.396	0.628	3.919
4	16.024	1.001	8.13	13.089	2.935	18.316	1.001	7.68	14.126	1.898	11.845	1.001	8.56	15.187	0.837	5.223
8	16.024	1.002	7.85	13.320	2.704	16.875	1.001	7.72	11.448	4.576	28.554	1.001	8.06	14.287	1.737	10.840
24	16.024	1.001	8.09	12.244	3.780	23.588	1.001	7.65	11.737	4.287	26.754	1.001	7.78	12.744	3.280	20.469
48	16.024	1.001	8.11	12.875	3.149	19.651	1.001	8.00	11.469	4.555	28.427	1.001	7.92	12.252	3.772	23.540
72	16.024	1.001	8.05	12.927	3.097	19.329	1.001	7.74	10.915	5.109	31.883	1.001	8.05	12.234	3.790	23.652
96	16.024	1.001	7.79	12.944	3.080	19.224	1.001	7.57	10.911	5.113	31.908	1.001	7.91	12.237	3.787	23.634

ตารางที่ ข.3 ผลการศึกษาเวลาสัมผัสที่เหมาะสมในการดูดติดผิวของอาร์เซนิตด้วยตัวอย่างดิน เมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายอาร์เซนิตเท่ากับ 15 มิลลิกรัมต่อลิตร พีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 10 ความเร็วรอบในการเขย่าที่ 200 รอบต่อนาที

เวลา (ชม.)	C <sub>0</sub> (มก./ล.)	ดินร่วนเหนียวปนทราย					ดินร่วนเหนียว					ดินทรายปนร่วน				
		น้ำหนัก ดิน (ก.)	final pH	C (มก./ล.)	x	% Ads	น้ำหนัก ดิน (ก.)	final pH	C (มก./ล.)	x	% Ads	น้ำหนักดิน ดิน (ก.)	final pH	C (มก./ล.)	x	% Ads
1	15.784	1.001	10.16	14.833	0.951	6.025	1.001	10.23	14.402	1.382	8.756	1.001	10.06	15.597	0.187	1.185
2	15.784	1.000	10.15	14.780	1.004	6.361	1.001	10.26	14.318	1.466	9.288	1.000	10.11	14.899	0.885	5.607
4	15.784	1.000	10.18	14.684	1.100	6.969	1.000	10.25	14.225	1.559	9.877	1.001	10.15	15.537	0.247	1.565
8	15.784	1.001	10.20	14.692	1.092	6.918	1.001	10.26	12.065	3.719	23.562	1.001	10.22	15.452	0.332	2.103
24	15.784	1.002	10.23	14.735	1.049	6.646	1.001	10.30	12.009	3.775	23.917	1.002	10.25	15.208	0.576	3.649
48	15.784	1.001	10.22	13.698	2.086	13.216	1.000	10.31	11.984	3.800	24.075	1.001	10.16	12.359	3.425	21.699
72	15.784	1.001	10.24	12.289	3.495	22.143	1.001	10.30	10.999	4.785	30.316	1.001	10.18	11.688	4.096	25.950
96	15.784	1.001	10.20	12.275	3.509	22.231	1.001	10.32	10.987	4.797	30.392	1.000	10.24	11.581	4.203	26.628



ภาคผนวก ค.

ผลการศึกษาถึงสมการไอโซเทอมการดูดติดผิว (Adsorption Isotherm)  
ของการดูดติดผิวของอาร์เซเนต ด้วยตัวอย่างดินโดยการทดลองแบบแบตช์

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ตารางที่ ค. 1 ผลการศึกษาถึงสมการไอโซเทอมของการดูดติดผิวของตัวอย่างดินร่วนเหนียวปนทราย ที่พีเอช 4 เวลาสัมผัส 96 ชั่วโมง ในการดูดติดผิว อาร์เซนิตในสารละลายอาร์เซนิตสังเคราะห์ โดยใช้ตัวอย่างดิน 0.5, 1, 2, 5 และ 10 กรัม ที่ความเข้มข้นของสารละลายอาร์เซนิต 15 มิลลิกรัมต่อลิตร

m (g)	initial pH	eq. pH	C <sub>0</sub> (mg/L)	Ce (mg/L)	Ce <sub>(Avg)</sub> (mg/L)	X (mg)	Q=X/m (mg/g)	Q <sub>(Avg)</sub> (mg/g)	1/ Ce	1/Q	Log Ce	Log Q	% Ads
1.0013	4.00	4.25	1.002	0.743	0.752	0.013	0.013	0.013	1.331	79.365	-0.124	-1.900	25.000
1.0016	4.00	4.18	1.002	0.762		0.012	0.012						
1.0024	4.00	4.24	1.002	0.750		0.013	0.013						
1.0028	4.00	4.33	5.004	2.398	2.224	0.130	0.130	0.120	0.450	8.326	0.347	-0.920	55.556
1.0004	4.00	4.37	5.004	2.601		0.120	0.120						
1.0003	4.00	4.35	5.004	1.673		0.167	0.167						
1.0033	4.00	4.38	10.011	4.736	4.883	0.264	0.263	0.263	0.205	3.804	0.689	-0.580	51.221
1.0025	4.00	4.39	10.011	4.441		0.279	0.278						
1.0030	4.00	4.38	10.011	5.473		0.227	0.226						
1.0009	4.00	4.11	15.007	9.714	9.613	0.265	0.264	0.264	0.104	3.782	0.983	-0.578	35.945
1.0025	4.00	4.13	15.007	9.599		0.270	0.270						
1.0012	4.00	4.11	15.007	9.525		0.274	0.274						
1.0009	4.00	4.15	20.003	14.336	14.243	0.283	0.283	0.283	0.070	3.532	1.154	-0.548	28.795
1.0012	4.00	4.14	20.003	14.258		0.287	0.287						
1.0021	4.00	4.16	20.003	14.136		0.293	0.293						
Blank	400	4.01 / 4.03											



ตารางที่ ค. 3 ผลการศึกษาถึงสมการไอโซเทอมของการดูดติดผิวของตัวอย่างดินร่วนเหนียวปนทราย ที่พีเอช 10 เวลาสัมผัส 96 ชั่วโมง ในการดูดติดผิว อาร์เซนิตในสารละลายอาร์เซนิตสังเคราะห์ โดยใช้ตัวอย่างดิน 0.5, 1, 2, 5 และ 10 กรัม ที่ความเข้มข้นของสารละลายอาร์เซนิต 15 มิลลิกรัมต่อลิตร

m (g)	initial pH	eq. pH	C <sub>0</sub> (mg/L)	C <sub>e</sub> (mg/L)	C <sub>e (Avg)</sub> (mg/L)	X (mg)	Q=X/m (mg/g)	Q <sub>(Avg)</sub> (mg/g)	1/ C <sub>e</sub>	1/Q	Log C <sub>e</sub>	Log Q	% Ads
0.5002	10.00	10.32	15.399	13.517	13.778	0.094	0.18809	0.17499	0.07258	5.714547	1.13919	-0.756982	10.5247
0.5001	10.00	10.33	15.399	13.541		0.093	0.18573						
0.5007	10.00	10.36	15.399	13.885		0.076	0.15116						
1.0001	10.00	10.51	15.399	12.894	12.782	0.125	0.12522	0.13073	0.07823	7.649089	1.10661	-0.88361	16.9906
1.0013	10.00	10.47	15.399	12.885		0.126	0.12552						
1.0005	10.00	10.24	15.399	12.568		0.142	0.14146						
2.0007	10.00	10.31	15.399	9.782	11.002	0.281	0.14037	0.10985	0.09089	9.103487	1.04148	-0.959208	28.5501
2.0017	10.00	10.34	15.399	10.403		0.250	0.12479						
2.0008	10.00	10.42	15.399	12.822		0.129	0.06439						
5.0002	10.00	9.89	15.399	7.968	7.290	0.372	0.0743	0.08107	0.13717	12.33467	0.86275	-1.091127	52.6561
5.0011	10.00	9.73	15.399	7.359		0.402	0.08038						
5.0007	10.00	9.70	15.399	6.544		0.443	0.08853						
10.0003	10.00	9.47	15.399	5.008	4.816	0.520	0.05195	0.05339	0.20764	18.73034	0.68269	-1.272546	68.7246
10.0007	10.00	9.25	15.399	4.987		0.521	0.05205						
10.0008	10.00	8.99	15.399	4.453		0.547	0.05472						
Blank	10.00	10.11 / 10.20 / 10.12											

ตารางที่ ค. 4 ผลการศึกษาถึงสมการไอโซเทอมของการดูดติดผิวของตัวอย่างดินร่วนเหนียว ที่พีเอช 4 เวลาสัมพัทธ์ 96 ชั่วโมง ในการดูดติดผิว อาร์เซนิตในสารละลายอาร์เซนิตสังเคราะห์ โดยใช้ตัวอย่างดิน 0.5, 1, 2, 5 และ 10 กรัม ที่ความเข้มข้นของสารละลายอาร์เซนิต 15 มิลลิกรัมต่อลิตร

m (g)	initial pH	eq. pH	C <sub>0</sub> (mg/L)	C <sub>e</sub> (mg/L)	C <sub>e (Avg)</sub> (mg/L)	X (mg)	Q=X/m (mg/g)	Q <sub>(Avg)</sub> (mg/g)	1/ C <sub>e</sub>	1/Q	Log C <sub>e</sub>	Log Q	% Ads
1.0000	4.00	4.34	1.002	0.107	0.410	0.045	0.045	0.030	2.439	33.789	-0.387	-1.529	59.082
1.0003	4.00	4.37	1.002	0.128		0.044	0.044						
1.0018	4.00	4.33	1.002	0.995		0.000	0.000						
1.0014	4.00	4.46	5.004	4.012	3.333	0.050	0.050	0.083	0.300	11.990	0.523	-1.079	33.393
1.0028	4.00	4.60	5.004	3.956		0.052	0.052						
1.0015	4.00	4.46	5.004	2.031		0.149	0.148						
1.0005	4.00	4.49	10.011	8.115	7.779	0.095	0.095	0.112	0.129	8.964	0.891	-0.952	22.295
1.0006	4.00	4.52	10.011	8.321		0.085	0.084						
1.0001	4.00	4.56	10.011	6.901		0.156	0.155						
1.0008	4.00	4.25	15.007	12.015	11.999	0.150	0.149	0.150	0.083	6.657	1.079	-0.823	20.046
1.0006	4.00	4.27	15.007	11.876		0.157	0.156						
1.0025	4.00	4.31	15.007	12.105		0.145	0.145						
1.0009	4.00	4.26	20.003	16.224	16.154	0.189	0.189	0.192	0.062	5.207	1.208	-0.717	19.241
1.0010	4.00	4.23	20.003	16.153		0.193	0.192						
1.0039	4.00	4.23	20.003	16.086		0.196	0.195						
Blank	7.00	4.01 / 4.03											



ตารางที่ ค. 6 ผลการศึกษาถึงสมการไอโซเทอมของการดูดติดผิวของตัวอย่างดินร่วนเหนียว ที่พีเอช 10 เวลาสัมผัส 96 ชั่วโมง ในการดูดติดผิว อาร์เซนิตในสารละลายอาร์เซนิตสังเคราะห์ โดยใช้ตัวอย่างดิน 0.5, 1, 2, 5 และ 10 กรัม ที่ความเข้มข้นของสารละลายอาร์เซนิต 15 มิลลิกรัมต่อลิตร

m (g)	initial pH	eq. pH	C <sub>0</sub> (mg/L)	C <sub>e</sub> (mg/L)	C <sub>e (Avg)</sub> (mg/L)	X (mg)	Q=X/m (mg/g)	Q <sub>(Avg)</sub> (mg/g)	1/ Ce	1/Q	Log Ce	Log Q	% Ads
0.5004	10.00	10.46	15.399	14.917	14.210	0.024	0.048128	0.154194	0.070373	6.485336	1.152594	-0.81193	7.719283
0.5002	10.00	10.37	15.399	14.368		0.052	0.103025						
0.5000	10.00	10.25	15.399	13.345		0.103	0.205363						
1.0008	10.00	10.04	15.399	12.881	13.109	0.126	0.125783	0.108662	0.076283	9.202874	1.11757	-0.96392	14.86925
1.0015	10.00	10.07	15.399	13.117		0.114	0.113912						
1.0007	10.00	10.26	15.399	13.329		0.103	0.103411						
2.0009	10.00	9.96	15.399	12.001	12.095	0.170	0.084903	0.084772	0.082679	11.7963	1.082606	-1.07175	21.45424
2.0006	10.00	9.98	15.399	12.012		0.169	0.084641						
2.0013	10.00	10.18	15.399	12.272		0.156	0.078116						
5.0011	10.00	9.25	15.399	8.982	8.986	0.321	0.064153	0.065717	0.111284	15.21665	0.953566	-1.18232	41.6443
5.0007	10.00	9.21	15.399	9.308		0.305	0.060898						
5.0018	10.00	8.99	15.399	8.668		0.337	0.067282						
10.0009	10.00	8.79	15.399	4.787	5.008	0.531	0.053054	0.051396	0.199681	19.45687	0.699664	-1.28907	67.4777
10.0007	10.00	8.81	15.399	4.900		0.525	0.05249						
10.0013	10.00	8.93	15.399	5.337		0.503	0.050302						
Blank	10.00	10.11 / 10.20 / 10.12											

ตารางที่ ค. 7 ผลการศึกษาถึงสมการไอโซเทอมของการดูดติดผิวของตัวอย่างดินทรายปนร่วน ที่พีเอช 4 เวลาสัมผัส 96 ชั่วโมง  
ในการดูดติดผิว อาร์เซนิตในสารละลายอาร์เซนิตสังเคราะห์ โดยใช้ตัวอย่างดิน 0.5, 1, 2, 5 และ 10 กรัม  
ที่ความเข้มข้นของสารละลายอาร์เซนิต 15 มิลลิกรัมต่อลิตร

m (g)	initial pH	eq. pH	C <sub>0</sub> (mg/L)	C <sub>e</sub> (mg/L)	C <sub>e (Avg)</sub> (mg/L)	X (mg)	Q=X/m (mg/g)	Q <sub>(Avg)</sub> (mg/g)	1/ C <sub>e</sub>	1/Q	Log C <sub>e</sub>	Log Q	% Ads
1.0012	4.00	4.07	1.002	0.743	0.772	0.013	0.013	0.011	1.295	87.176	-0.112	-1.940	22.917
1.0013	4.00	4.04	1.002	0.789		0.011	0.011						
1.0001	4.00	4.05	1.002	0.785		0.011	0.011						
1.0008	4.00	4.26	5.004	3.778	3.814	0.061	0.061	0.059	0.262	16.837	0.581	-1.226	23.785
1.0036	4.00	4.27	5.004	3.869		0.057	0.057						
1.0016	4.00	4.26	5.004	3.794		0.060	0.060						
1.0009	4.00	4.34	10.011	6.314	7.500	0.185	0.185	0.125	0.133	7.976	0.875	-0.902	25.079
1.0016	4.00	4.31	10.011	6.228		0.189	0.189						
1.0018	4.00	4.33	10.011	9.959		0.003	0.003						
1.0006	4.00	4.09	15.007	12.015	12.206	0.150	0.150	0.140	0.082	7.152	1.087	-0.854	18.664
1.0023	4.00	4.04	15.007	12.306		0.135	0.135						
1.0020	4.00	4.03	15.007	12.297		0.135	0.135						
1.0036	4.00	4.07	20.003	19.833	17.000	0.009	0.008	0.150	0.059	6.685	1.230	-0.825	15.014
1.0032	4.00	4.06	20.003	19.996		0.000	0.000						
1.0039	4.00	4.07	20.003	11.170		0.442	0.440						
Blank	7.00	4.01 / 4.03											

ตารางที่ ค. 8 ผลการศึกษาถึงสมการไอโซเทอมของการดูดติดผิวของตัวอย่างดินทรายปนร่วน ที่พีเอช 7 เวลาสัมผัส 96 ชั่วโมง ในการดูดติดผิว อาร์เซนิตในสารละลายอาร์เซนิตสังเคราะห์ โดยใช้ตัวอย่างดิน 0.5, 1, 2, 5 และ 10 กรัม ที่ความเข้มข้นของสารละลายอาร์เซนิต 15 มิลลิกรัมต่อลิตร

m (g)	initial pH	eq. pH	C <sub>0</sub> (mg/L)	C <sub>e</sub> (mg/L)	C <sub>e (Avg)</sub> (mg/L)	X (mg)	Q=X/m (mg/g)	Q <sub>(Avg)</sub> (mg/g)	1/ C <sub>e</sub>	1/Q	Log C <sub>e</sub>	Log Q	% Ads
0.5004	7.00	7.66	15.907	15.302	15.329	0.030	0.060452	0.063706	0.065236	15.69717	1.185514	-1.19582	3.63362
0.5004	7.00	7.78	15.907	15.448		0.023	0.045863						
0.5003	7.00	7.70	15.907	15.237		0.033	0.06696						
1.0004	7.00	7.69	15.907	14.088	14.295	0.091	0.090914	0.075373	0.069955	13.26735	1.155184	-1.12278	10.1339
1.0010	7.00	7.69	15.907	14.225		0.084	0.084016						
1.0003	7.00	7.91	15.907	14.572		0.067	0.06673						
2.0007	7.00	8.07	15.907	13.134	12.809	0.139	0.069301	0.070084	0.07807	14.26851	1.107515	-1.15438	19.4757
2.0014	7.00	7.98	15.907	12.222		0.184	0.092061						
2.0009	7.00	8.01	15.907	13.071		0.142	0.070868						
5.0007	7.00	7.99	15.907	9.995	9.882	0.296	0.059112	0.059094	0.101194	16.92217	0.994845	-1.22846	37.87641
5.0014	7.00	7.90	15.907	9.652		0.313	0.062532						
5.0003	7.00	7.96	15.907	9.999		0.295	0.059076						
10.0016	7.00	7.78	15.907	8.866	8.210	0.352	0.035199	0.040121	0.121803	24.92474	0.914343	-1.39663	48.3875
10.0009	7.00	7.65	15.907	7.962		0.397	0.039721						
10.0012	7.00	7.36	15.907	7.802		0.405	0.04052						
Blank	7.00	7.14 / 7.11 / 7.12											



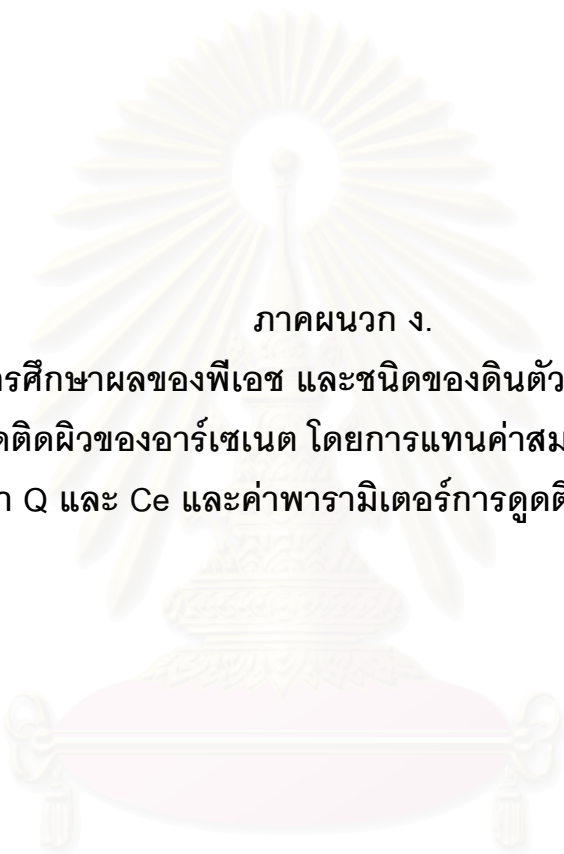
ตารางที่ ค. 9 ผลการศึกษาถึงสมการไอโซเทอมของการดูดติดผิวของตัวอย่างดินทรายปนร่วน ที่พีเอช 10 เวลาสัมผัส 96 ชั่วโมง  
ในการดูดติดผิว อาร์เซนิตในสารละลายอาร์เซนิตสังเคราะห์ โดยใช้ตัวอย่างดิน 0.5, 1, 2, 5 และ 10 กรัม  
ที่ความเข้มข้นของสารละลายอาร์เซนิต 15 มิลลิกรัมต่อลิตร

m (g)	initial pH	eq. pH	C <sub>0</sub> (mg/L)	C <sub>e</sub> (mg/L)	C <sub>e (Avg)</sub> (mg/L)	X (mg)	Q=X/m (mg/g)	Q <sub>(Avg)</sub> (mg/g)	1/ C <sub>e</sub>	1/Q	Log C <sub>e</sub>	Log Q	% Ads
0.5002	10.00	10.57	15.399	15.171	15.101	0.011	0.022758	0.033237	0.066221	30.08691	1.179006	-1.47838	1.933068
0.5001	10.00	10.41	15.399	15.062		0.017	0.03366						
0.5008	10.00	10.42	15.399	15.070		0.016	0.032814						
1.0012	10.00	10.55	15.399	14.774	14.766	0.031	0.031196	0.034565	0.067723	28.93103	1.169263	-1.46136	4.108581
1.0013	10.00	10.43	15.399	14.639		0.038	0.037934						
1.0009	10.00	10.60	15.399	14.885		0.026	0.02566						
2.0007	10.00	10.39	15.399	13.811	14.109	0.079	0.039678	0.032226	0.070877	31.03105	1.149496	-1.4918	8.375184
2.0010	10.00	10.41	15.399	13.820		0.079	0.039447						
2.0016	10.00	10.54	15.399	14.696		0.035	0.017553						
5.0004	10.00	10.27	15.399	12.069	12.312	0.166	0.033294	0.030862	0.081222	32.40219	1.090329	-1.51057	20.04503
5.0011	10.00	10.28	15.399	12.011		0.169	0.033869						
5.0007	10.00	10.49	15.399	12.856		0.127	0.025423						
10.0009	10.00	10.10	15.399	10.114	10.387	0.264	0.026421	0.025056	0.096274	39.91113	1.01649	-1.60109	32.54611
10.0012	10.00	10.16	15.399	10.084		0.266	0.02657						
10.0011	10.00	10.44	15.399	10.963		0.222	0.022176						
Blank	10.00	10.11 / 10.20 / 10.12											

ตารางที่ ค.10 ค่าพีเอชที่สภาวะสมดุลโดยเฉลี่ยของตัวอย่างดินทั้ง 3 ชนิด ในการทดลองแบบแบตช์เพื่อการศึกษาถึงสมการไอโซเทอมการดูดติดผิว

ตัวอย่างดิน	พี	ค่าพีเอชที่สภาวะสมดุลโดยเฉลี่ย
	๔	
	๗	
	๑๐	
ดินร่วน	๔	4.232 ± 0.107
เหนียว	๗	7.690 ± 0.120
ปน	๑๐	9.724 ± 0.469
ทราย		
ดินร่วน	๔	4.362 ± 0.122
เหนียว	๗	7.530 ± 0.177
	๑๐	9.319 ± 0.602
ดินทราย	๔	4.137 ± 0.119
ปน	๗	7.767 ± 0.183
ร่วน	๑๐	10.379 ± 0.142

หมายเหตุ ค่าพีเอชที่สภาวะสมดุลโดยเฉลี่ย รายงานผลในรูปของ ค่าพีเอชเฉลี่ย ± ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation)



ภาคผนวก ง.

การศึกษาผลของพีเอช และชนิดของดินตัวอย่างที่มีต่อ  
การดูดติดผิวของอาร์เซเนต โดยการแทนค่าสมการไอโซเทอม  
ด้วยค่า  $Q$  และ  $C_e$  และค่าพารามิเตอร์การดูดติดผิว  $a$  และ  $b$

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ง. 1 ผลการทดลองการศึกษาผลของพีเอช และชนิดของดินตัวอย่างที่มีต่อการดูดติดผิวของอาร์เซนิต โดยการแทนค่าสมการไอโซเทอมด้วยค่า  $Q$  และ  $C_e$  และค่าพารามิเตอร์การดูดติดผิว  $a$  และ  $b$  สำหรับการทดลองดินร่วนเหนียวปนทราย พีเอช 4

Ce	Q	1/Ce	1/Q
0.0100	0.0008	100.0000	1290.2927
0.0200	0.0015	50.0000	646.2427
0.0300	0.0023	33.3333	431.5594
0.0400	0.0031	25.0000	324.2177
0.0500	0.0038	20.0000	259.8127
0.1000	0.0076	10.0000	131.0027
0.5000	0.0358	2.0000	27.9547
1.0000	0.0663	1.0000	15.0737
1.5000	0.0928	0.6667	10.7800
2.0000	0.1158	0.5000	8.6332
2.5000	0.1361	0.4000	7.3451
3.0000	0.1542	0.3333	6.4864
3.5000	0.1703	0.2857	5.8730
4.0000	0.1847	0.2500	5.4130
6.0000	0.2304	0.1667	4.3395
8.0000	0.2630	0.1250	3.8028
10.0000	0.2873	0.1000	3.4808
12.0000	0.3062	0.0833	3.2661
14.0000	0.3213	0.0714	3.1128
16.0000	0.3336	0.0625	2.9978

ตารางที่ ง. 2 ผลการทดลองการศึกษาผลของพีเอช และชนิดของดินตัวอย่างที่มีต่อการดูดติดผิวของอาร์เซนิต โดยการแทนค่าสมการไอโซเทอมด้วยค่า  $Q$  และ  $C_e$  และค่าพารามิเตอร์การดูดติดผิว  $a$  และ  $b$  สำหรับการทดลองดินร่วนเหนียวปนทราย พีเอช 7

Ce	Q	1/Ce	1/Q
0.1000	0.0020	10.0000	495.1642
0.2000	0.0040	5.0000	250.0192
0.3000	0.0059	3.3333	168.3042
0.4000	0.0078	2.5000	127.4467
0.5000	0.0097	2.0000	102.9322
0.6000	0.0115	1.6667	86.5892
0.7000	0.0133	1.4286	74.9156
0.8000	0.0151	1.2500	66.1605
0.9000	0.0168	1.1111	59.3509
1.0000	0.0186	1.0000	53.9032
1.5000	0.0266	0.6667	37.5602
2.0000	0.0340	0.5000	29.3887
4.0000	0.0584	0.2500	17.1315
6.0000	0.0767	0.1667	13.0457
8.0000	0.0909	0.1250	11.0028
10.0000	0.1023	0.1000	9.7771
12.0000	0.1116	0.0833	8.9600
14.0000	0.1194	0.0714	8.3763
16.0000	0.1260	0.0625	7.9385

ตารางที่ ง. 3 ผลการทดลองการศึกษาผลของพีเอช และชนิดของดินตัวอย่างที่มีต่อการดูดติดผิวของอาร์เซเนต โดยการแทนค่าสมการไอโซเทอมด้วยค่า Q และ Ce และค่าพารามิเตอร์การดูดติดผิว a และ b สำหรับการทดลองดินร่วนเหนียวปนทราย พีเอช 10

Ce	Q	1/Ce	1/Q
0.0100	0.0001	100.0000	8938.1221
0.0500	0.0006	20.0000	1787.8021
0.1000	0.0011	10.0000	894.0121
0.2000	0.0022	5.0000	447.1171
0.3000	0.0034	3.3333	298.1521
0.4000	0.0045	2.5000	223.6696
0.5000	0.0056	2.0000	178.9801
1.0000	0.0112	1.0000	89.6011
1.5000	0.0167	0.6667	59.8081
2.0000	0.0223	0.5000	44.9116
3.0000	0.0333	0.3333	30.0151
4.0000	0.0443	0.2500	22.5669
5.0000	0.0553	0.2000	18.0979
6.0000	0.0661	0.1667	15.1186
8.0000	0.0878	0.1250	11.3945
10.0000	0.1092	0.1000	9.1600
12.0000	0.1304	0.0833	7.6704
14.0000	0.1514	0.0714	6.6063
16.0000	0.1722	0.0625	5.8083

ตารางที่ ง. 4 ผลการทดลองการศึกษาผลของพีเอช และชนิดของดินตัวอย่างที่มีต่อการดูดติดผิวของอาร์เซนิต โดยการแทนค่าสมการไอโซเทอมด้วยค่า Q และ Ce และค่าพารามิเตอร์การดูดติดผิว a และ b สำหรับการทดลองดินร่วนเหนียว พีเอช 4

Ce	Q	1/Ce	1/Q
0.0100	0.0004	100.0000	2629.7380
0.0500	0.0019	20.0000	529.4980
0.1000	0.0037	10.0000	266.9680
0.2000	0.0074	5.0000	135.7030
0.3000	0.0109	3.3333	91.9480
0.4000	0.0143	2.5000	70.0705
0.5000	0.0176	2.0000	56.9440
0.6000	0.0207	1.6667	48.1930
0.7000	0.0238	1.4286	41.9423
0.8000	0.0268	1.2500	37.2543
0.9000	0.0298	1.1111	33.6080
1.0000	0.0326	1.0000	30.6910
2.0000	0.0569	0.5000	17.5645
3.0000	0.0758	0.3333	13.1890
4.0000	0.0909	0.2500	11.0013
5.0000	0.1032	0.2000	9.6886
6.0000	0.1135	0.1667	8.8135
8.0000	0.1295	0.1250	7.7196
10.0000	0.1416	0.1000	7.0633
12.0000	0.1509	0.0833	6.6258
14.0000	0.1584	0.0714	6.3132
15.0000	0.1616	0.0667	6.1882
16.0000	0.1645	0.0625	6.0788

ตารางที่ ง. 5 ผลการทดลองการศึกษาผลของพีเอช และชนิดของดินตัวอย่างที่มีต่อการดูดติดผิวของอาร์เซนิต โดยการแทนค่าสมการไอโซเทอมด้วยค่า Q และ Ce และค่าพารามิเตอร์การดูดติดผิว a และ b สำหรับการทดลองดินร่วนเหนียว พีเอช 7

Ce	Q	1/Ce	1/Q
0.0100	0.0002	100.0000	5120.9582
0.0200	0.0004	50.0000	2563.3582
0.0500	0.0010	20.0000	1028.7982
0.0750	0.0015	13.3333	687.7849
0.1000	0.0019	10.0000	517.2782
0.2000	0.0038	5.0000	261.5182
0.5000	0.0093	2.0000	108.0622
0.7500	0.0135	1.3333	73.9609
1.0000	0.0176	1.0000	56.9102
2.0000	0.0319	0.5000	31.3342
3.0000	0.0438	0.3333	22.8089
4.0000	0.0539	0.2500	18.5462
5.0000	0.0625	0.2000	15.9886
6.0000	0.0700	0.1667	14.2835
8.0000	0.0823	0.1250	12.1522
10.0000	0.0920	0.1000	10.8734
12.0000	0.0998	0.0833	10.0209
14.0000	0.1062	0.0714	9.4119
16.0000	0.1117	0.0625	8.9552



ตารางที่ ง. 6 ผลการทดลองการศึกษาผลของพีเอช และชนิดของดินตัวอย่างที่มีต่อการดูดติดผิวของอาร์เซนิต โดยการแทนค่าสมการไอโซเทอมด้วยค่า Q และ Ce และค่าพารามิเตอร์การดูดติดผิว a และ b สำหรับการทดลองดินร่วนเหนียว พีเอช 10

Ce	Q	1/Ce	1/Q
0.0100	0.0001	100.0000	8675.0606
0.0500	0.0006	20.0000	1737.4606
0.1000	0.0011	10.0000	870.2606
0.5000	0.0057	2.0000	176.5006
1.0000	0.0111	1.0000	89.7806
2.0000	0.0215	0.5000	46.4206
3.0000	0.0313	0.3333	31.9673
4.0000	0.0404	0.2500	24.7406
5.0000	0.0490	0.2000	20.4046
6.0000	0.0571	0.1667	17.5139
7.0000	0.0647	0.1429	15.4492
8.0000	0.0719	0.1250	13.9006
9.0000	0.0788	0.1111	12.6962
10.0000	0.0852	0.1000	11.7326
12.0000	0.0972	0.0833	10.2873
14.0000	0.1081	0.0714	9.2549
16.0000	0.1179	0.0625	8.4806

ตารางที่ ง. 7 ผลการทดลองการศึกษาผลของพีเอช และชนิดของดินตัวอย่างที่มีต่อการดูดติดผิวของอาร์เซนิต โดยการแทนค่าสมการไอโซเทอมด้วยค่า Q และ Ce และค่าพารามิเตอร์การดูดติดผิว a และ b สำหรับการทดลองดินทรายปนร่วน พีเอช 4

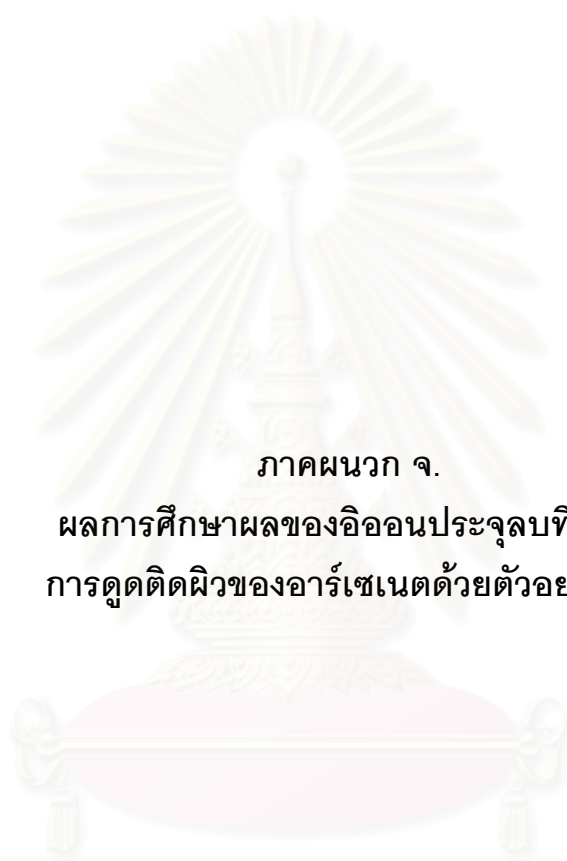
Ce	Q	1/Ce	1/Q
0.0100	0.0002	100.0000	5145.7674
0.0500	0.0010	20.0000	1031.3674
0.1000	0.0019	10.0000	517.0674
0.2000	0.0038	5.0000	259.9174
0.5000	0.0095	2.0000	105.6274
1.0000	0.0185	1.0000	54.1974
1.5000	0.0270	0.6667	37.0541
2.0000	0.0351	0.5000	28.4824
2.5000	0.0428	0.4000	23.3394
3.0000	0.0502	0.3333	19.9107
4.0000	0.0640	0.2500	15.6249
5.0000	0.0766	0.2000	13.0534
6.0000	0.0882	0.1667	11.3391
7.0000	0.0989	0.1429	10.1145
8.0000	0.1087	0.1250	9.1962
9.0000	0.1179	0.1111	8.4818
10.0000	0.1264	0.1000	7.9104
12.0000	0.1418	0.0833	7.0532
14.0000	0.1553	0.0714	6.4410
16.0000	0.1672	0.0625	5.9818

ตารางที่ ง. 8 ผลการทดลองการศึกษาผลของพีเอช และชนิดของดินตัวอย่างที่มีต่อการดูดติดผิวของอาร์เซนิต โดยการแทนค่าสมการไอโซเทอมด้วยค่า Q และ Ce และค่าพารามิเตอร์การดูดติดผิว a และ b สำหรับการทดลองดินทรายปนร่วน พีเอช 7

Ce	Q	1/Ce	1/Q
0.0100	0.0001	100.0000	17332.8944
0.0500	0.0003	20.0000	3468.0944
0.1000	0.0006	10.0000	1734.9944
0.2000	0.0012	5.0000	868.4444
0.3000	0.0017	3.3333	579.5944
0.4000	0.0023	2.5000	435.1694
0.5000	0.0029	2.0000	348.5144
1.0000	0.0057	1.0000	175.2044
2.0000	0.0113	0.5000	88.5494
3.0000	0.0168	0.3333	59.6644
4.0000	0.0221	0.2500	45.2219
5.0000	0.0274	0.2000	36.5564
6.0000	0.0325	0.1667	30.7794
7.0000	0.0375	0.1429	26.6530
8.0000	0.0424	0.1250	23.5582
9.0000	0.0473	0.1111	21.1511
10.0000	0.0520	0.1000	19.2254
12.0000	0.0612	0.0833	16.3369
14.0000	0.0701	0.0714	14.2737
16.0000	0.0786	0.0625	12.7263

ตารางที่ ง. 9 ผลการทดลองการศึกษาผลของพีเอช และชนิดของดินตัวอย่างที่มีต่อ การดูดติดผิวของอาร์เซเนต โดยการแทนค่าสมการไอโซเทอม ด้วยค่า Q และ Ce และค่าพารามิเตอร์การดูดติดผิว a และ b สำหรับการทดลองดินทรายปนร่วน พีเอช 10

Ce	Q	1/Ce	1/Q
0.0100	0.0000	100.0000	33541.8307
0.0500	0.0001	20.0000	6713.8307
0.1000	0.0003	10.0000	3360.3307
0.3000	0.0009	3.3333	1124.6640
0.4000	0.0012	2.5000	845.2057
0.5000	0.0015	2.0000	677.5307
1.0000	0.0029	1.0000	342.1807
1.5000	0.0043	0.6667	230.3974
2.0000	0.0057	0.5000	174.5057
2.5000	0.0071	0.4000	140.9707
3.0000	0.0084	0.3333	118.6140
4.0000	0.0110	0.2500	90.6682
5.0000	0.0135	0.2000	73.9007
6.0000	0.0159	0.1667	62.7224
7.0000	0.0183	0.1429	54.7378
8.0000	0.0205	0.1250	48.7495
9.0000	0.0227	0.1111	44.0918
10.0000	0.0248	0.1000	40.3657
12.0000	0.0288	0.0833	34.7765
14.0000	0.0325	0.0714	30.7843
16.0000	0.0360	0.0625	27.7901



ภาคผนวก จ.

ผลการศึกษาผลของอิออนประจุลบที่มีต่อ  
การดูดติดผิวของอาร์เซเนตด้วยตัวอย่างดิน

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ๑. 1 ผลการศึกษาถึงสมการไอโซเทอมของการดูดติดผิวของตัวอย่างดินร่วนเหนียว ที่พีเอช 7  
 เมื่อมีฟอสเฟต อัตราส่วน 0.1 : 1 เวลาสัมผัส 96 ชั่วโมง โดยใช้ตัวอย่างดิน 0.5, 1, 2, 5 และ 10 กรัม  
 ที่ความเข้มข้นของสารละลายอาร์เซนิต 15 มิลลิกรัมต่อลิตร

m (g)	initial pH	eq. pH	C <sub>0</sub> (mg/L)	C <sub>e</sub> (mg/L)	C <sub>e</sub> (Avg) (mg/L)	X (mg)	Q=X/m (mg/g)	Q <sub>(Avg)</sub> (mg/g)	1/ C <sub>e</sub>	1/Q	Log C <sub>e</sub>	Log Q	% Ads
0.5002	7.00	7.73	15.104	12.407	13.314	0.135	0.26959	0.17898	0.07511	5.58711	1.12429	-0.74719	11.854
0.5001	7.00	7.66	15.104	11.603		0.175	0.35003						
0.5000	7.00	7.78	15.104	15.931		-0.041	-0.08267						
1.0011	7.00	7.78	15.104	11.433	11.225	0.184	0.18335	0.19373	0.08909	5.16182	1.05019	-0.7128	25.6819
1.0016	7.00	7.75	15.104	11.105		0.200	0.19963						
1.0007	7.00	7.77	15.104	11.137		0.198	0.19821						
2.0009	7.00	7.67	15.104	9.748	9.926	0.268	0.13384	0.12943	0.10075	7.72629	0.99676	-0.88797	34.2844
2.0002	7.00	7.55	15.104	8.984		0.306	0.15299						
2.0003	7.00	7.81	15.104	11.045		0.203	0.10146						
5.0014	7.00	7.66	15.104	6.315	6.524	0.439	0.08787	0.08578	0.15328	11.6577	0.81451	-1.06661	56.8061
5.0008	7.00	7.70	15.104	6.687		0.421	0.08416						
5.0013	7.00	7.69	15.104	6.570		0.427	0.08532						
10.0014	7.00	7.68	15.104	3.228	3.131	0.594	0.05937	0.05986	0.31939	16.7058	0.49568	-1.22287	79.2704
10.0007	7.00	7.58	15.104	3.059		0.602	0.06022						
10.0006	7.00	7.62	15.104	3.106		0.600	0.05999						
Blank	7.00	7.01 / 7.00											



ตารางที่ ๑. 3 ผลการศึกษาถึงสมการไอโซเทอมของการดูดติดผิวของตัวอย่างดินร่วนเหนียว ที่พีเอช 7

เมื่อมีฟอสเฟต อัตราส่วน 10 : 1 เวลาสัมผัส 96 ชั่วโมง โดยใช้ตัวอย่างดิน 0.5, 1, 2, 5 และ 10 กรัม

ที่ความเข้มข้นของสารละลายอาร์เซนิต 15 มิลลิกรัมต่อลิตร

m (g)	initial pH	eq. pH	C <sub>0</sub> (mg/L)	C <sub>e</sub> (mg/L)	C <sub>e (Avg)</sub> (mg/L)	X (mg)	Q=X/m (mg/g)	Q <sub>(Avg)</sub> (mg/g)	1/ C <sub>e</sub>	1/Q	Log C <sub>e</sub>	Log Q	% Ads
0.5009	7.00	7.11	15.636	14.522	14.585	0.056	0.1112	0.10503	0.06856	9.52141	1.16391	-0.9787	6.72167
0.5001	7.00	7.14	15.636	14.614		0.051	0.10218						
0.5000	7.00	7.18	15.636	14.619		0.051	0.1017						
1.0013	7.00	7.06	15.636	12.915	12.810	0.136	0.13587	0.14119	0.07806	7.08272	1.10755	-0.8502	18.0737
1.0004	7.00	7.06	15.636	12.714		0.146	0.14604						
1.0007	7.00	7.09	15.636	12.801		0.142	0.14165						
2.0007	7.00	7.65	15.636	12.624	12.660	0.151	0.07527	0.07438	0.07899	13.4437	1.10243	-1.12852	19.033
2.0002	7.00	7.69	15.636	12.556		0.154	0.07699						
2.0004	7.00	7.01	15.636	12.800		0.142	0.07089						
5.0011	7.00	7.70	15.636	10.024	10.129	0.281	0.05611	0.05506	0.09873	18.1626	1.00556	-1.25918	35.2207
5.0008	7.00	7.00	15.636	10.119		0.276	0.05516						
5.0016	7.00	7.01	15.636	10.244		0.270	0.05391						
10.0012	7.00	7.13	15.636	9.636	9.770	0.300	0.03	0.02933	0.10235	34.0979	0.98989	-1.53273	37.516
10.0008	7.00	7.13	15.636	9.501		0.307	0.03067						
10.0007	7.00	7.18	15.636	10.173		0.273	0.02731						
Blank	7.00	6.99 / 6.99											



ตารางที่ ๑. 4 ผลการศึกษาถึงสมการไอโซเทอมของการดูดติดผิวของตัวอย่างดินร่วนเหนียว ที่พีเอช 7  
 เมื่อมีไบคาร์บอเนต อัตราส่วน 0.1 : 1 เวลาสัมผัส 96 ชั่วโมง โดยใช้ตัวอย่างดิน 0.5, 1, 2, 5 และ 10 กรัม  
 ที่ความเข้มข้นของสารละลายอาร์เซนิต 15 มิลลิกรัมต่อลิตร

m (g)	initial pH	eq. pH	C <sub>0</sub> (mg/L)	C <sub>e</sub> (mg/L)	C <sub>e (Avg)</sub> (mg/L)	X (mg)	Q=X/m (mg/g)	Q <sub>(Avg)</sub> (mg/g)	1/ Ce	1/Q	Log Ce	Log Q	% Ads
0.5002	7.00	8.23	15.587	13.447	13.501	0.107	0.21391	0.20852	0.07407	4.7957	1.13037	-0.68085	13.3829
0.5004	7.00	8.24	15.587	13.668		0.096	0.19175						
0.5000	7.00	7.91	15.587	13.388		0.110	0.2199						
1.0003	7.00	8.02	15.587	10.925	10.801	0.233	0.23303	0.23919	0.09259	4.18086	1.03346	-0.62127	30.7063
1.0009	7.00	8.08	15.587	11.214		0.219	0.21845						
1.0004	7.00	7.92	15.587	10.263		0.266	0.26607						
2.0007	7.00	7.85	15.587	9.987	9.685	0.280	0.13995	0.1475	0.10325	6.77976	0.98611	-0.83121	37.8632
2.0002	7.00	7.83	15.587	9.352		0.312	0.15586						
2.0010	7.00	7.83	15.587	9.717		0.294	0.14668						
5.0015	7.00	7.44	15.587	6.738	6.696	0.442	0.08846	0.08889	0.14933	11.2499	0.82584	-1.05115	57.0382
5.0008	7.00	7.48	15.587	7.014		0.429	0.08572						
5.0004	7.00	7.50	15.587	6.337		0.462	0.09249						
10.0003	7.00	7.33	15.587	3.425	3.458	0.608	0.06081	0.06064	0.28918	16.4907	0.53882	-1.21724	77.8148
10.0007	7.00	7.37	15.587	3.215		0.619	0.06186						
10.0014	7.00	7.40	15.587	3.734		0.593	0.05926						
Blank	7.00	7.01/6.93											







ภาคผนวก จ.

การทดลองหาค่าสัมประสิทธิ์การกระจายตัว (Dispersion Coefficient)

ด้วยการทดลองแบบคอลัมน์

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ จ. 1 ผลการศึกษาการทดลองแบบคอลัมน์โดยใช้สารละลายโบรไมด์ที่  
ความเข้มข้นเริ่มต้นเริ่มต้น 15 มิลลิกรัมต่อลิตร  
ในคอลัมน์ดินร่วนเหนียวปนทราย

เวลาที่เก็บตัวอย่าง (ชั่วโมง)	ปริมาตรน้ำที่ผ่านคอลัมน์		ความเข้มข้นขาออก (มิลลิกรัมต่อลิตร)	C/Co
	มิลลิลิตร	Pore Volume		
0.5	7.50	0.1607	0.0000	0.0000
1.0	15.00	0.3215	0.0000	0.0000
1.5	22.50	0.4822	0.0039	0.0003
2.0	30.00	0.6429	0.0040	0.0003
2.5	37.50	0.8037	0.0042	0.0003
3.0	45.00	0.9644	0.3972	0.0265
3.5	52.50	1.1252	2.2838	0.1523
4.0	60.00	1.2859	7.1034	0.4736
4.5	67.50	1.4466	7.0735	0.4716
5.0	75.00	1.6074	11.4332	0.7622
5.5	82.50	1.7681	11.8721	0.7915
6.0	90.00	1.9288	14.1338	0.9423
6.5	97.50	2.0896	13.7616	0.9174
7.0	105.00	2.2503	14.6524	0.9768
8.0	120.00	2.5718	14.6863	0.9791
9.0	135.00	2.8933	14.9736	0.9982
10.0	150.00	3.2147	14.6824	0.9788
11.0	165.00	3.5362	14.6720	0.9781
12.0	180.00	3.8577	14.5625	0.9708
13.0	195.00	4.1792	14.6959	0.9797
14.0	210.00	4.5006	15.2735	1.0182
15.0	225.00	4.8221	14.5184	0.9679
16.0	240.00	5.1436	14.5583	0.9706
17.0	255.00	5.4651	14.0584	0.9372
18.0	270.00	5.7865	14.9201	0.9947
19.0	285.00	6.1080	15.0043	1.0003
20.0	300.00	6.4295	12.0707	0.8047
21.5	322.50	6.9117	11.0054	0.7337
22.0	330.00	7.0724	10.7510	0.7167

22.5	337.50	7.2332	11.4339	0.7623
23.0	345.00	7.3939	11.0120	0.7341
23.5	352.50	7.5547	11.0498	0.7367
24.0	360.00	7.7154	10.5159	0.7011
24.5	367.50	7.8761	10.2772	0.6851
25.0	375.00	8.0369	8.7408	0.5827
25.5	382.50	8.1976	5.4830	0.3655
26.0	390.00	8.3583	2.9807	0.1987
27.0	405.00	8.6798	0.4922	0.0328
27.5	412.50	8.8405	0.1785	0.0119
28.0	420.00	9.0013	0.0000	0.0000
28.5	427.50	9.1620	0.0000	0.0000
29.5	442.50	9.4835	0.0000	0.0000
30.0	450.00	9.6442	0.0000	0.0000



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ จ. 2 ผลการศึกษาการทดลองแบบคอลัมน์โดยใช้สารละลายโบรไมด์ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นเริ่มต้น 15 มิลลิกรัมต่อลิตร ในคอลัมน์ดินร่วนเหนียว

เวลาที่เก็บตัวอย่าง (ชั่วโมง)	ปริมาตรน้ำที่ผ่านคอลัมน์		ความเข้มข้นขาออก (มิลลิกรัมต่อลิตร)	C/Co
	มิลลิลิตร	Pore Volume		
0.5	7.50	0.1475	0.0000	0.0000
1.0	15.00	0.2949	0.0000	0.0000
1.5	22.50	0.4424	0.0039	0.0003
2.0	30.00	0.5899	0.0040	0.0003
2.5	37.50	0.7373	0.0042	0.0003
3.0	45.00	0.8848	0.3972	0.0265
3.5	52.50	1.0322	2.2838	0.1523
4.0	60.00	1.1797	7.1034	0.4736
4.5	67.50	1.3272	7.0735	0.4716
5.0	75.00	1.4746	11.4332	0.7622
5.5	82.50	1.6221	11.8721	0.7915
6.0	90.00	1.7696	14.1338	0.9423
6.5	97.50	1.9170	13.7616	0.9174
7.0	105.00	2.0645	14.6524	0.9768
8.0	120.00	2.3594	14.6863	0.9791
9.0	135.00	2.6543	14.9736	0.9982
10.0	150.00	2.9493	14.6824	0.9788
11.0	165.00	3.2442	14.6720	0.9781
12.0	180.00	3.5391	14.5625	0.9708
13.0	195.00	3.8341	14.6959	0.9797
14.0	210.00	4.1290	15.2735	1.0182
15.0	225.00	4.4239	14.5184	0.9679
16.0	240.00	4.7188	14.5583	0.9706
17.0	255.00	5.0138	14.0584	0.9372
18.0	270.00	5.3087	14.9201	0.9947
19.0	285.00	5.6036	15.0043	1.0003
20.0	300.00	5.8985	12.0707	0.8047
21.5	322.50	6.3409	11.0054	0.7337
22.0	330.00	6.4884	10.7510	0.7167

22.5	337.50	6.6359	11.4339	0.7623
23.0	345.00	6.7833	11.0120	0.7341
23.5	352.50	6.9308	11.0498	0.7367
24.0	360.00	7.0783	10.5159	0.7011
24.5	367.50	7.2257	10.2772	0.6851
25.0	375.00	7.3732	8.7408	0.5827
25.5	382.50	7.5206	5.4830	0.3655
26.0	390.00	7.6681	2.9807	0.1987
27.0	405.00	7.9630	0.4922	0.0328
27.5	412.50	8.1105	0.1785	0.0119
28.0	420.00	8.2580	0.0000	0.0000
28.5	427.50	8.4054	0.0000	0.0000
29.5	442.50	8.7004	0.0000	0.0000
30.0	450.00	8.8478	0.0000	0.0000



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ตารางที่ จ. 3 ผลการศึกษาการทดลองแบบคอลัมน์โดยใช้สารละลายโบรไมด์ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นเริ่มต้น 15 มิลลิกรัมต่อลิตร ในคอลัมน์ดินทรายปนร่วน

เวลาที่เก็บตัวอย่าง (ชั่วโมง)	ปริมาตรน้ำที่ผ่านคอลัมน์		ความเข้มข้นขาออก (มิลลิกรัมต่อลิตร)	C/Co
	มิลลิลิตร	Pore Volume		
0.5	7.50	0.2307	0.0400	0.0026
1.0	15.00	0.4614	1.7100	0.1103
1.5	22.50	0.6921	2.1656	0.1397
2.0	30.00	0.9228	3.1476	0.2031
2.5	37.50	1.1535	3.9263	0.2533
3.0	45.00	1.3842	5.6740	0.3661
3.5	52.50	1.6149	9.1940	0.5932
4.0	60.00	1.8456	10.6380	0.6863
5.0	75.00	2.3070	10.9060	0.7036
5.5	82.50	2.5377	11.2680	0.7270
6.0	90.00	2.7684	11.9240	0.7693
6.5	97.50	2.9991	11.9000	0.7677
7.0	105.00	3.2298	11.8900	0.7671
7.5	112.50	3.4605	11.9180	0.7689
8.0	120.00	3.6912	12.6220	0.8143
8.5	127.50	3.9219	13.3940	0.8641
9.0	135.00	4.1526	13.5900	0.8768
9.5	142.50	4.3833	13.9200	0.8981
10.5	157.50	4.8447	13.7140	0.8848
11.0	165.00	5.0754	14.6040	0.9422
13.0	195.00	5.9982	15.5140	1.0009
13.5	202.50	6.2289	15.5320	1.0021
14.0	210.00	6.4596	14.7180	0.9495
14.5	217.50	6.6902	14.0180	0.9044
15.0	225.00	6.9209	14.5500	0.9387
16.0	240.00	7.3823	14.4320	0.9311
17.0	255.00	7.8437	15.3900	0.9929
18.0	270.00	8.3051	15.9900	1.0316
18.5	277.50	8.5358	15.0100	0.9684

19.5	292.50	8.9972	5.6640	0.3654
20.0	300.00	9.2279	2.4580	0.1586
20.5	307.50	9.4586	1.0820	0.0698
21.0	315.00	9.6893	0.4560	0.0294
21.5	322.50	9.9200	0.0000	0.0000
22.0	330.00	10.1507	0.0000	0.0000
22.5	337.50	10.3814	0.0000	0.0000
23.0	345.00	10.6121	0.0000	0.0000



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก ช.  
ผลการทดลองแบบคอล์มน์

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ช. 1 ข้อมูลการดูดติดผิวของอาร์เซเนตด้วยตัวอย่างดินร่วนเหนียวปนทราย  
โดยการทดลองแบบคอลัมน์ เมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นของอาร์เซเนตเท่ากับ  
15 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่พีเอช 7

เวลาที่เก็บตัวอย่าง (ชั่วโมง)	ปริมาตรน้ำที่ผ่านคอลัมน์		ความเข้มข้นขาออก (มิลลิกรัมต่อลิตร)	C/Co
	มิลลิเมตร	Pore volume		
1	15.00	0.3215	0.8923	0.0585
2	30.00	0.6429	0.5198	0.0341
3	45.00	0.9644	0.6738	0.0442
4	60.00	1.2859	0.8659	0.0568
5	75.00	1.6074	1.0884	0.0714
6	90.00	1.9288	1.3445	0.0882
7	105.00	2.2503	1.6890	0.1108
8	120.00	2.5718	1.8979	0.1245
9	135.00	2.8933	1.9406	0.1273
10	150.00	3.2147	2.0366	0.1336
11	165.00	3.5362	2.1265	0.1395
13	195.00	4.1792	2.1928	0.1438
15	225.00	4.8221	2.6311	0.1726
17	255.00	5.4651	3.2028	0.2101
19	285.00	6.1080	3.5701	0.2342
20	300.00	6.4295	3.9573	0.2596
21	315.00	6.7510	4.5856	0.3008
23	345.00	7.3939	4.9223	0.3229
25	375.00	8.0369	5.3186	0.3489
27	405.00	8.6798	5.4207	0.3556
29	435.00	9.3228	5.4315	0.3563
30	450.00	9.6442	5.5214	0.3622
31	465.00	9.9657	5.6677	0.3718
33	495.00	10.6087	5.9033	0.3873
35	525.00	11.2516	6.2577	0.4105
37	555.00	11.8946	7.1250	0.4674
39	585.00	12.5375	7.6311	0.5006
40	600.00	12.8590	8.2421	0.5407
41	615.00	13.1805	8.4360	0.5534
43	645.00	13.8234	8.6083	0.5647

ตารางที่ ข.1 (ต่อ)

เวลาที่เก็บตัวอย่าง (ชั่วโมง)	ปริมาตรน้ำที่ผ่านคอลัมน์		ความเข้มข้นขาออก (มิลลิกรัมต่อลิตร)	C/Co
	มิลลิลิตร	Pore volume		
45	675.00	14.4664	8.6524	0.5676
47	705.00	15.1093	8.6906	0.5701
49	735.00	15.7523	8.7897	0.5766
51	765.00	16.3952	8.8446	0.5802
53	795.00	17.0381	8.8812	0.5826
57	855.00	18.3240	8.9537	0.5874
58	870.00	18.6455	9.0153	0.5914
60	900.00	19.2885	9.2027	0.6037
63	945.00	20.2529	9.2092	0.6041
66	990.00	21.2173	9.2471	0.6066
68	1020.00	21.8603	9.4345	0.6189
69	1035.00	22.1817	9.5107	0.6239
70	1050.00	22.5032	9.9970	0.6558
71	1065.00	22.8247	9.8918	0.6489
72	1080.00	23.1462	9.9757	0.6544
75	1125.00	24.1106	10.2849	0.6747
80	1200.00	25.7180	10.3375	0.6781
82	1230.00	26.3609	10.3735	0.6805
85	1275.00	27.3253	10.3995	0.6822
91	1365.00	29.2542	10.4366	0.6846
93	1395.00	29.8971	11.0504	0.7249
103	1545.00	33.1119	11.3426	0.7441
105	1575.00	33.7548	12.3032	0.8071
113	1695.00	36.3266	12.5367	0.8224
115	1725.00	36.9696	13.2912	0.8719
117	1755.00	37.6125	14.0312	0.9204
119	1785.00	38.2555	14.1754	0.9299
120	1800.00	38.5769	14.2486	0.9347
121	1815.00	38.8984	14.3886	0.9439
122	1830.00	39.2199	14.3614	0.9421
123	1845.00	39.5414	14.1820	0.9303
124	1860.00	39.8628	14.7227	0.9658

ตารางที่ ข.1 (ต่อ)

เวลาที่เก็บตัวอย่าง (ชั่วโมง)	ปริมาณน้ำที่ผ่านคอลัมน์		ความเข้มข้นขาออก (มิลลิกรัมต่อลิตร)	C/Co
	มิลลิลิตร	Pore volume		
125	1875.00	40.1843	14.8808	0.9762
127	1905.00	40.8273	15.0885	0.9898
129	1935.00	41.4702	15.2306	0.9991
131	1965.00	42.1132	15.2321	0.9992
133	1995.00	42.7561	15.2370	0.9995
135	2025.00	43.3991	15.2399	0.9997
137	2055.00	44.0420	15.2219	0.9986
139	2085.00	44.6850	14.6266	0.9595
141	2115.00	45.3279	14.0595	0.9223
143	2145.00	45.9709	13.7156	0.8997
145	2175.00	46.6138	13.7044	0.8990
149	2235.00	47.8997	13.5251	0.8872
151	2265.00	48.5426	12.1861	0.7994
155	2325.00	49.8285	11.0275	0.7234
159	2385.00	51.1144	7.7377	0.5076
163	2445.00	52.4003	6.8415	0.4488
165	2475.00	53.0433	6.4848	0.4254
167	2505.00	53.6862	5.0473	0.3311
169	2535.00	54.3292	4.5500	0.2985
175	2625.00	56.2580	3.0397	0.1994
177	2655.00	56.9010	2.1700	0.1424
179	2685.00	57.5439	0.0762	0.0050
183	2745.00	58.8298	0.0000	0.0000
185	2775.00	59.4728	0.0000	0.0000
189	2835.00	60.7587	0.0000	0.0000

ตารางที่ ช. 2 ข้อมูลการดูดติดผิวของอาร์เซเนตด้วยตัวอย่างดินร่วนเหนียว โดยการทดลองแบบคอลัมน์ เมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นของอาร์เซเนตเท่ากับ 15 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่พีเอช 7

เวลาที่เก็บตัวอย่าง (ชั่วโมง)	ปริมาณน้ำที่ผ่านคอลัมน์		ความเข้มข้นขาออก (มิลลิกรัมต่อลิตร)	C/Co
	มิลลิลิตร	Pore volume		
1	15.00	0.2949	2.400	0.1586
2	30.00	0.5899	1.919	0.1269
3	45.00	0.8848	2.795	0.1847
4	60.00	1.1797	2.473	0.1635
5	75.00	1.4746	3.877	0.2563
6	90.00	1.7696	4.732	0.3128
7	105.00	2.0645	5.352	0.3538
8	120.00	2.3594	5.380	0.3556
9	135.00	2.6543	6.060	0.4006
10	150.00	2.9493	6.701	0.4429
11	165.00	3.2442	6.813	0.4503
12	180.00	3.5391	7.480	0.4944
13	195.00	3.8341	7.496	0.4954
14	210.00	4.1290	6.497	0.4295
15	225.00	4.4239	6.959	0.4600
16	240.00	4.7188	6.807	0.4499
17	255.00	5.0138	7.652	0.5058
18	270.00	5.3087	7.413	0.4900
19	285.00	5.6036	7.546	0.4988
20	300.00	5.8985	7.123	0.4708
21	315.00	6.1935	7.733	0.5111
22	330.00	6.4884	7.482	0.4946
23	345.00	6.7833	7.959	0.5261
24	360.00	7.0783	6.578	0.4348
25	375.00	7.3732	6.660	0.4402
26	390.00	7.6681	6.704	0.4431
27	405.00	7.9630	6.805	0.4498
28	420.00	8.2580	6.924	0.4577
29	435.00	8.5529	6.940	0.4587
30	450.00	8.8478	6.965	0.4604

ตารางที่ ข.2 (ต่อ)

เวลาที่เก็บตัวอย่าง (ชั่วโมง)	ปริมาณน้ำที่ผ่านคอลัมน์		ความเข้มข้นขาออก (มิลลิกรัมต่อลิตร)	C/Co
	มิลลิลิตร	Pore volume		
31	465.00	9.1427	7.026	0.4644
32	480.00	9.4377	7.129	0.4712
40	600.00	11.7971	8.830	0.5837
41	615.00	12.0920	9.675	0.6395
42	630.00	12.3869	10.273	0.6790
43	645.00	12.6819	10.698	0.7071
44	660.00	12.9768	11.427	0.7553
45	675.00	13.2717	11.171	0.7384
46	690.00	13.5667	11.626	0.7685
52	780.00	15.3362	11.683	0.7722
53	795.00	15.6311	12.233	0.8086
54	810.00	15.9261	12.465	0.8239
55	825.00	16.2210	11.152	0.7371
71	1065.00	20.9398	12.435	0.8219
72	1080.00	21.2348	12.648	0.8360
73	1095.00	21.5297	13.053	0.8628
75	1125.00	22.1195	13.518	0.8935
77	1155.00	22.7094	13.811	0.9129
79	1185.00	23.2993	13.804	0.9124
80	1200.00	23.5942	13.863	0.9163
82	1230.00	24.1840	13.570	0.8970
84	1260.00	24.7739	13.620	0.9002
99	1485.00	29.1978	15.106	0.9985
100	1500.00	29.4927	15.116	0.9992
102	1530.00	30.0826	15.128	1.0000
104	1560.00	30.6724	15.128	0.9999
105	1575.00	30.9674	15.128	0.9999
107	1605.00	31.5572	15.102	0.9982
108	1620.00	31.8521	14.938	0.9874
118	1770.00	34.8014	14.673	0.9699
119	1785.00	35.0963	14.597	0.9648
120	1800.00	35.3913	14.495	0.9581
121	1815.00	35.6862	14.491	0.9578



ตารางที่ ข.2 (ต่อ)

เวลาที่เก็บตัวอย่าง (ชั่วโมง)	ปริมาณน้ำที่ผ่านคอลัมน์		ความเข้มข้นขาออก (มิลลิกรัมต่อลิตร)	C/Co
	มิลลิลิตร	Pore volume		
122	1830.00	35.9811	14.488	0.9576
123	1845.00	36.2761	14.480	0.9571
124	1860.00	36.5710	14.479	0.9570
125	1875.00	36.8659	14.477	0.9569
126	1890.00	37.1608	14.448	0.9550
127	1905.00	37.4558	14.431	0.9539
128	1920.00	37.7507	14.414	0.9527
129	1935.00	38.0456	14.483	0.9573
130	1950.00	38.3405	14.100	0.9320
131	1965.00	38.6355	13.894	0.9184
142	2130.00	41.8797	13.621	0.9003
143	2145.00	42.1746	13.440	0.8884
144	2160.00	42.4695	12.485	0.8252
145	2175.00	42.7645	9.961	0.6584
147	2205.00	43.3543	8.840	0.5843
167	2505.00	49.2529	5.888	0.3892
168	2520.00	49.5478	5.821	0.3847
169	2535.00	49.8427	5.458	0.3608
170	2550.00	50.1376	5.237	0.3462
171	2565.00	50.4326	5.050	0.3338
172	2580.00	50.7275	4.681	0.3094
173	2595.00	51.0224	4.306	0.2846
174	2610.00	51.3173	2.467	0.1631
175	2625.00	51.6123	1.455	0.0962
176	2640.00	51.9072	1.315	0.0869
177	2655.00	52.2021	0.000	0.0000
178	2670.00	52.4971	0.000	0.0000
179	2685.00	52.7920	0.000	0.0000

ตารางที่ ช. 3 ข้อมูลการดูดติดผิวของอาร์เซเนตด้วยตัวอย่างดินทรายปนร่วน โดยการทดลองแบบคอลัมน์ เมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นของอาร์เซเนตเท่ากับ 15 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่พีเอช 7

เวลาที่เก็บตัวอย่าง (ชั่วโมง)	ปริมาณน้ำที่ผ่านคอลัมน์		ความเข้มข้นขาออก (มิลลิกรัมต่อลิตร)	C/Co
	มิลลิลิตร	Pore volume		
1	15.00	0.4614	3.864	0.2531
2	30.00	0.9228	3.495	0.2289
3	45.00	1.3842	4.585	0.3003
4	60.00	1.8456	4.221	0.2765
5	75.00	2.3070	4.960	0.3249
18	270.00	8.3051	5.887	0.3856
19	285.00	8.7665	6.320	0.4139
20	300.00	9.2279	7.695	0.5040
21	315.00	9.6893	8.221	0.5384
22	330.00	10.1507	8.771	0.5745
23	345.00	10.6121	8.772	0.5745
24	360.00	11.0735	8.839	0.5789
25	375.00	11.5349	8.871	0.5810
26	390.00	11.9963	8.280	0.5423
27	405.00	12.4577	8.445	0.5531
28	420.00	12.9191	8.501	0.5568
29	435.00	13.3805	8.552	0.5601
40	600.00	18.4559	11.295	0.7398
41	615.00	18.9173	11.408	0.7472
42	630.00	19.3787	11.523	0.7547
43	645.00	19.8400	11.663	0.7639
44	660.00	20.3014	11.814	0.7738
45	675.00	20.7628	11.957	0.7831
46	690.00	21.2242	11.998	0.7858
47	705.00	21.6856	12.214	0.8000
48	720.00	22.1470	12.195	0.7987
49	735.00	22.6084	12.384	0.8111
50	750.00	23.0698	12.424	0.8137
52	780.00	23.9926	12.581	0.8240
54	810.00	24.9154	11.786	0.7719

ตารางที่ ข.3 (ต่อ)

เวลาที่เก็บตัวอย่าง (ชั่วโมง)	ปริมาณน้ำที่ผ่านคอลัมน์		ความเข้มข้นขาออก (มิลลิกรัมต่อลิตร)	C/Co
	มิลลิลิตร	Pore volume		
56	840.00	25.8382	12.860	0.8423
58	870.00	26.7610	12.977	0.8499
68	1020.00	31.3750	13.178	0.8631
70	1050.00	32.2978	13.162	0.8621
72	1080.00	33.2205	13.108	0.8585
74	1110.00	34.1433	13.275	0.8695
76	1140.00	35.0661	13.245	0.8675
78	1170.00	35.9889	13.777	0.9023
80	1200.00	36.9117	14.522	0.9511
82	1230.00	37.8345	14.635	0.9585
93	1395.00	42.9099	14.931	0.9779
95	1425.00	43.8327	14.852	0.9728
97	1455.00	44.7555	14.861	0.9733
100	1500.00	46.1396	14.913	0.9767
103	1545.00	47.5238	15.082	0.9878
105	1575.00	48.4466	14.845	0.9723
116	1740.00	53.5220	15.010	0.9831
117	1755.00	53.9834	14.928	0.9777
118	1770.00	54.4448	14.604	0.9565
119	1785.00	54.9062	14.846	0.9724
120	1800.00	55.3676	14.731	0.9648
121	1815.00	55.8290	14.723	0.9643
122	1830.00	56.2904	14.424	0.9447
123	1845.00	56.7518	13.986	0.9160
124	1860.00	57.2132	13.891	0.9098
125	1875.00	57.6746	13.878	0.9090
126	1890.00	58.1360	13.228	0.8664
127	1905.00	58.5974	13.002	0.8516
128	1920.00	59.0588	12.587	0.8244
129	1935.00	59.5201	12.011	0.7867
130	1950.00	59.9815	11.164	0.7312
141	2115.00	65.0569	5.088	0.3332
142	2130.00	65.5183	4.499	0.2947

ตารางที่ ข.3 (ต่อ)

เวลาที่เก็บตัวอย่าง (ชั่วโมง)	ปริมาณน้ำที่ผ่านคอลัมน์		ความเข้มข้นซาออก (มิลลิกรัมต่อลิตร)	C/Co
	มิลลิลิตร	Pore volume		
143	2145.00	65.9797	4.340	0.2843
145	2175.00	66.9025	3.932	0.2575
147	2205.00	67.8253	3.791	0.2483
149	2235.00	68.7481	3.246	0.2126
165	2475.00	76.1304	2.556	0.1674
166	2490.00	76.5918	2.334	0.1529
167	2505.00	77.0532	1.883	0.1233
168	2520.00	77.5146	0.566	0.0371
170	2550.00	78.4374	0.342	0.0224
171	2565.00	78.8988	0.000	0.0000
172	2580.00	79.3602	0.000	0.0000
173	2595.00	79.8216	0.110	0.0072
174	2610.00	80.2830	0.000	0.0000
175	2625.00	80.7444	0.000	0.0000

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ช. 4 ข้อมูลการดูดติดผิวของอาร์เซเนตด้วยตัวอย่างดินร่วนเหนียว โดยการทดลองแบบคอลัมน์ เมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นของอาร์เซเนตเท่ากับ 15 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่พีเอช 4

เวลาที่เก็บตัวอย่าง (ชั่วโมง)	ปริมาณน้ำที่ผ่านคอลัมน์		ความเข้มข้นขาออก (มิลลิกรัมต่อลิตร)	C/Co
	มิลลิลิตร	Pore volume		
1	15.00	0.2949	0.000	0.000
2	30.00	0.5899	0.663	0.044
3	45.00	0.8848	0.671	0.044
4	60.00	1.1797	1.042	0.068
5	75.00	1.4746	1.205	0.079
6	90.00	1.7696	1.226	0.081
7	105.00	2.0645	1.247	0.082
8	120.00	2.3594	1.268	0.083
9	135.00	2.6543	1.289	0.085
10	150.00	2.9493	1.310	0.086
11	165.00	3.2442	1.318	0.087
12	180.00	3.5391	1.446	0.095
13	195.00	3.8341	1.450	0.095
14	210.00	4.1290	1.454	0.095
15	225.00	4.4239	1.468	0.096
16	240.00	4.7188	1.512	0.099
17	255.00	5.0138	1.556	0.102
18	270.00	5.3087	1.599	0.105
19	285.00	5.6036	1.643	0.108
20	300.00	5.8985	1.730	0.114
21	315.00	6.1935	1.774	0.116
22	330.00	6.4884	1.817	0.119
23	345.00	6.7833	1.923	0.126
24	360.00	7.0783	2.085	0.137
25	375.00	7.3732	2.106	0.138
26	390.00	7.6681	2.127	0.140
27	405.00	7.9630	2.117	0.139
28	420.00	8.2580	2.138	0.140
29	435.00	8.5529	2.359	0.155
30	450.00	8.8478	2.580	0.169

ตารางที่ ๕.4 (ต่อ)

เวลาที่เก็บตัวอย่าง (ชั่วโมง)	ปริมาณน้ำที่ผ่านคอลัมน์		ความเข้มข้นขาออก (มิลลิกรัมต่อลิตร)	C/Co
	มิลลิลิตร	Pore volume		
50	750.00	14.7464	3.116	0.205
52	780.00	15.3362	3.332	0.219
70	1050.00	20.6449	4.303	0.283
72	1080.00	21.2348	4.610	0.303
74	1110.00	21.8246	4.917	0.323
76	1140.00	22.4145	5.224	0.343
78	1170.00	23.0043	5.531	0.363
90	1350.00	26.5435	5.705	0.375
92	1380.00	27.1333	5.766	0.379
93	1395.00	27.4282	5.827	0.383
94	1410.00	27.7232	6.775	0.445
95	1425.00	28.0181	6.990	0.459
110	1650.00	32.4420	8.847	0.581
114	1710.00	33.6217	9.175	0.602
116	1740.00	34.2116	9.336	0.613
118	1770.00	34.8014	9.615	0.631
120	1800.00	35.3913	9.815	0.645
122	1830.00	35.9811	10.036	0.659
124	1860.00	36.5710	10.489	0.689
126	1890.00	37.1608	10.698	0.703
128	1920.00	37.7507	11.070	0.727
136	2040.00	40.1101	13.204	0.867
137	2055.00	40.4050	14.219	0.934
138	2070.00	40.7000	15.228	1.000
139	2085.00	40.9949	15.227	1.000
140	2100.00	41.2898	15.227	1.000
141	2115.00	41.5847	15.228	1.000
142	2130.00	41.8797	15.228	1.000
143	2145.00	42.1746	15.228	1.000
144	2160.00	42.4695	15.026	0.987
145	2175.00	42.7645	15.009	0.986
148	2220.00	43.6492	14.598	0.959
149	2235.00	43.9442	14.443	0.948

ตารางที่ ข.4 (ต่อ)

เวลาที่เก็บตัวอย่าง (ชั่วโมง)	ปริมาณน้ำที่ผ่านคอลัมน์		ความเข้มข้นขาออก (มิลลิกรัมต่อลิตร)	C/Co
	มิลลิลิตร	Pore volume		
150	2250.00	44.2391	14.271	0.937
151	2265.00	44.5340	12.689	0.833
152	2280.00	44.8289	11.108	0.729
164	2460.00	48.3681	9.526	0.626
166	2490.00	48.9579	7.945	0.522
168	2520.00	49.5478	6.363	0.418
170	2550.00	50.1376	5.147	0.338
172	2580.00	50.7275	4.989	0.328
174	2610.00	51.3173	4.663	0.306
184	2760.00	54.2666	2.912	0.191
186	2790.00	54.8565	1.100	0.072
188	2820.00	55.4463	0.479	0.031
190	2850.00	56.0362	0.168	0.011
192	2880.00	56.6260	0.058	0.004
194	2910.00	57.2159	0.047	0.003
196	2940.00	57.8057	0.037	0.002
198	2970.00	58.3956	0.026	0.002
200	3000.00	58.9855	0.015	0.001
202	3030.00	59.5753	0.002	0.000
204	3060.00	60.1652	0.000	0.000
206	3090.00	60.7550	0.000	0.000
208	3120.00	61.3449	0.000	0.000

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ช. 5 ข้อมูลการดูดติดผิวของอาร์เซเนตด้วยตัวอย่างร่วนเหนียว โดยการทดลองแบบคอลัมน์ เมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นของอาร์เซเนตเท่ากับ 15 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่พีเอช 10

เวลาที่เก็บตัวอย่าง (ชั่วโมง)	ปริมาณน้ำที่ผ่านคอลัมน์		ความเข้มข้นขาออก (มิลลิกรัมต่อลิตร)	C/Co
	มิลลิลิตร	Pore volume		
1	15.00	0.2949	0	0.0000
2	30.00	0.5899	0	0.0000
3	45.00	0.8848	0.342	0.0232
4	60.00	1.1797	1.828	0.1238
5	75.00	1.4746	2.184	0.1479
6	90.00	1.7696	2.592	0.1755
7	105.00	2.0645	2.903	0.1965
8	120.00	2.3594	2.923	0.1979
9	135.00	2.6543	3.221	0.2181
10	150.00	2.9493	3.416	0.2313
11	165.00	3.2442	3.656	0.2475
12	180.00	3.5391	3.636	0.2462
13	195.00	3.8341	3.712	0.2513
14	210.00	4.1290	3.722	0.2520
15	225.00	4.4239	3.789	0.2565
16	240.00	4.7188	3.841	0.2600
17	255.00	5.0138	3.304	0.2237
18	270.00	5.3087	3.338	0.2260
19	285.00	5.6036	5.035	0.3409
20	300.00	5.8985	4.837	0.3275
21	315.00	6.1935	4.810	0.3256
22	330.00	6.4884	4.922	0.3332
23	345.00	6.7833	4.996	0.3382
24	360.00	7.0783	5.173	0.3502
25	375.00	7.3732	5.304	0.3591
26	390.00	7.6681	5.565	0.3768
27	405.00	7.9630	5.771	0.3907
28	420.00	8.2580	5.991	0.4056
29	435.00	8.5529	6.498	0.4399
30	450.00	8.8478	7.826	0.5298



ตารางที่ ข.5 (ต่อ)

เวลาที่เก็บตัวอย่าง (ชั่วโมง)	ปริมาณน้ำที่ผ่านคอลัมน์		ความเข้มข้นขาออก (มิลลิกรัมต่อลิตร)	C/Co
	มิลลิลิตร	Pore volume		
31	465.00	9.1427	7.551	0.5112
32	480.00	9.4377	8.899	0.6025
33	495.00	9.7326	8.448	0.5719
34	510.00	10.0275	9.021	0.6107
35	525.00	10.3225	9.116	0.6172
36	540.00	10.6174	9.231	0.6249
37	555.00	10.9123	9.544	0.6461
38	570.00	11.2072	9.742	0.6595
39	585.00	11.5022	9.895	0.6699
40	600.00	11.7971	10.466	0.7086
41	615.00	12.0920	12.358	0.8366
42	630.00	12.3869	12.96	0.8774
43	645.00	12.6819	12.33	0.8347
44	660.00	12.9768	14.424	0.9765
45	675.00	13.2717	14.489	0.9809
46	690.00	13.5667	14.512	0.9825
47	705.00	13.8616	14.669	0.9931
48	720.00	14.1565	14.379	0.9735
60	900.00	17.6956	14.699	0.9951
62	930.00	18.2855	14.687	0.9943
64	960.00	18.8753	14.69	0.9945
65	975.00	19.1703	14.702	0.9953
89	1335.00	26.2485	14.751	0.9986
91	1365.00	26.8384	14.75	0.9986
93	1395.00	27.4282	14.689	0.9944
95	1425.00	28.0181	14.735	0.9976
96	1440.00	28.3130	14.756	0.9990
97	1455.00	28.6079	14.747	0.9984
111	1665.00	32.7369	14.749	0.9985
113	1695.00	33.3268	14.740	0.9979
115	1725.00	33.9166	14.748	0.9984
117	1755.00	34.5065	14.745	0.9982
119	1785.00	35.0963	14.736	0.9976

ตารางที่ ๕.5 (ต่อ)

เวลาที่เก็บตัวอย่าง (ชั่วโมง)	ปริมาณน้ำที่ผ่านคอลัมน์		ความเข้มข้นขาออก (มิลลิกรัมต่อลิตร)	C/Co
	มิลลิลิตร	Pore volume		
120	1800.00	35.3913	14.759	0.9992
121	1815.00	35.6862	11.279	0.7636
122	1830.00	35.9811	8.983	0.6082
123	1845.00	36.2761	8.555	0.5792
124	1860.00	36.5710	8.395	0.5683
125	1875.00	36.8659	8.361	0.5660
126	1890.00	37.1608	8.405	0.5690
127	1905.00	37.4558	8.411	0.5694
128	1920.00	37.7507	8.372	0.5668
141	2115.00	41.5847	8.477	0.5739
142	2130.00	41.8797	8.180	0.5538
143	2145.00	42.1746	6.333	0.4287
144	2160.00	42.4695	6.224	0.4214
145	2175.00	42.7645	6.109	0.4136
146	2190.00	43.0594	5.994	0.4058
147	2205.00	43.3543	5.872	0.3975
148	2220.00	43.6492	5.77	0.3906
149	2235.00	43.9442	5.710	0.3866
177	2655.00	52.2021	5.203	0.3522
178	2670.00	52.4971	4.449	0.3012
179	2685.00	52.7920	4.287	0.2902
180	2700.00	53.0869	4.103	0.2778
181	2715.00	53.3818	3.884	0.2629
182	2730.00	53.6768	3.695	0.2502
183	2745.00	53.9717	3.302	0.2236
184	2760.00	54.2666	2.201	0.1490
185	2775.00	54.5615	0.000	0.0000
186	2790.00	54.8565	0.000	0.0000

ตารางที่ ช. 6 ข้อมูลการดูดติดผิวของอาร์เซเนตด้วยตัวอย่างดินร่วนเหนียว โดยการทดลองแบบคอลัมน์ เมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นของอาร์เซเนตเท่ากับ 15 มิลลิกรัมต่อลิตร และมีฟอสเฟตต่ออาร์เซเนตอัตราส่วน 10 : 1 ที่พีเอช 7

เวลาที่เก็บตัวอย่าง (ชั่วโมง)	ปริมาณน้ำที่ผ่านคอลัมน์		ความเข้มข้นขาออก (มิลลิกรัมต่อลิตร)	C/Co
	มิลลิลิตร	Pore volume		
1	15.00	0.2949	0.000	0.0000
2	30.00	0.5899	0.000	0.0000
3	45.00	0.8848	0.005	0.0003
4	60.00	1.1797	0.470	0.0311
5	75.00	1.4746	0.576	0.0382
6	90.00	1.7696	0.690	0.0457
7	105.00	2.0645	0.685	0.0454
8	120.00	2.3594	0.657	0.0436
9	135.00	2.6543	0.635	0.0421
10	150.00	2.9493	0.637	0.0422
11	165.00	3.2442	0.636	0.0422
12	180.00	3.5391	0.648	0.0430
13	195.00	3.8341	1.219	0.0808
14	210.00	4.1290	2.008	0.1331
15	225.00	4.4239	2.761	0.1830
16	240.00	4.7188	5.561	0.3686
17	255.00	5.0138	8.160	0.5408
18	270.00	5.3087	9.310	0.6171
19	285.00	5.6036	10.428	0.6912
20	300.00	5.8985	10.403	0.6895
21	315.00	6.1935	10.835	0.7182
22	330.00	6.4884	10.976	0.7275
23	345.00	6.7833	11.010	0.7298
24	360.00	7.0783	11.592	0.7683
25	375.00	7.3732	11.672	0.7736
26	390.00	7.6681	11.847	0.7853
27	405.00	7.9630	12.555	0.8321
28	420.00	8.2580	13.140	0.8710
29	435.00	8.5529	13.769	0.9126
30	450.00	8.8478	13.936	0.9237

ตารางที่ ข.6 (ต่อ)

เวลาที่เก็บตัวอย่าง (ชั่วโมง)	ปริมาณน้ำที่ผ่านคอลัมน์		ความเข้มข้นขาออก (มิลลิกรัมต่อลิตร)	C/Co
	มิลลิลิตร	Pore volume		
31	465.00	9.1427	14.197	0.9410
32	480.00	9.4377	14.464	0.9587
33	495.00	9.7326	14.483	0.9600
34	510.00	10.0275	14.614	0.9686
35	525.00	10.3225	14.691	0.9738
42	630.00	12.3869	14.897	0.9874
43	645.00	12.6819	14.895	0.9873
44	660.00	12.9768	15.000	0.9943
45	675.00	13.2717	15.067	0.9986
46	690.00	13.5667	15.069	0.9988
47	705.00	13.8616	15.073	0.9990
48	720.00	14.1565	15.087	1.0000
49	735.00	14.4514	15.082	0.9997
50	750.00	14.7464	15.087	1.0000
52	780.00	15.3362	14.998	0.9941
54	810.00	15.9261	14.997	0.9940
55	825.00	16.2210	14.986	0.9933
57	855.00	16.8109	14.857	0.9847
71	1065.00	20.9398	14.823	0.9825
72	1080.00	21.2348	14.609	0.9683
75	1125.00	22.1195	14.463	0.9586
77	1155.00	22.7094	14.456	0.9582
79	1185.00	23.2993	14.441	0.9572
80	1200.00	23.5942	14.153	0.9381
95	1425.00	28.0181	13.996	0.9277
96	1440.00	28.3130	13.856	0.9184
98	1470.00	28.9029	13.693	0.9076
100	1500.00	29.4927	13.582	0.9003
103	1545.00	30.3775	15.182	1.0063
105	1575.00	30.9674	13.548	0.8980
107	1605.00	31.5572	13.503	0.8950
108	1620.00	31.8521	13.388	0.8874
118	1770.00	34.8014	13.238	0.8774

ตารางที่ ๕.6 (ต่อ)

เวลาที่เก็บตัวอย่าง (ชั่วโมง)	ปริมาณน้ำที่ผ่านคอลัมน์		ความเข้มข้นขาออก (มิลลิกรัมต่อลิตร)	C/Co
	มิลลิลิตร	Pore volume		
119	1785.00	35.0963	13.102	0.8684
120	1800.00	35.3913	12.853	0.8520
121	1815.00	35.6862	12.833	0.8506
122	1830.00	35.9811	12.764	0.8460
123	1845.00	36.2761	12.746	0.8448
124	1860.00	36.5710	12.706	0.8422
125	1875.00	36.8659	12.447	0.8250
126	1890.00	37.1608	12.353	0.8188
127	1905.00	37.4558	10.069	0.6674
128	1920.00	37.7507	8.528	0.5653
129	1935.00	38.0456	8.231	0.5455
130	1950.00	38.3405	7.749	0.5136
131	1965.00	38.6355	7.247	0.4803
132	1980.00	38.9304	6.494	0.4304
141	2115.00	41.5847	6.301	0.4176
142	2130.00	41.8797	5.916	0.3922
143	2145.00	42.1746	5.880	0.3898
144	2160.00	42.4695	6.030	0.3997
145	2175.00	42.7645	6.016	0.3987
146	2190.00	43.0594	5.674	0.3761
147	2205.00	43.3543	4.967	0.3292
150	2250.00	44.2391	4.655	0.3086
166	2490.00	48.9579	2.722	0.1804
167	2505.00	49.2529	2.246	0.1488
169	2535.00	49.8427	1.213	0.0804
170	2550.00	50.1376	0.514	0.0341
171	2565.00	50.4326	0.140	0.0093
172	2580.00	50.7275	0.041	0.0027
173	2595.00	51.0224	0.000	0.0000
174	2610.00	51.3173	0.000	0.0000
175	2625.00	51.6123	0.000	0.0000

ตารางที่ ช. 7 ข้อมูลการดูดติดผิวของอาร์เซเนตด้วยตัวอย่างดินร่วนเหนียว โดยการทดลองแบบคอลัมน์ เมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นของอาร์เซเนตเท่ากับ 15 มิลลิกรัมต่อลิตร และมีฟอสเฟตต่ออาร์เซเนตอัตราส่วน 1 : 1 ที่พีเอช 7

เวลาที่เก็บตัวอย่าง (ชั่วโมง)	ปริมาณน้ำที่ผ่านคอลัมน์		ความเข้มข้นขาออก (มิลลิกรัมต่อลิตร)	C/Co
	มิลลิลิตร	Pore volume		
1	15.00	0.2949	0.675	0.0448
2	30.00	0.5899	1.435	0.0953
3	45.00	0.8848	1.595	0.1059
4	60.00	1.1797	1.868	0.1241
5	75.00	1.4746	3.561	0.2365
6	90.00	1.7696	3.495	0.2321
7	105.00	2.0645	3.662	0.2432
8	120.00	2.3594	3.656	0.2429
9	135.00	2.6543	3.654	0.2427
10	150.00	2.9493	4.356	0.2893
11	165.00	3.2442	4.389	0.2915
12	180.00	3.5391	4.691	0.3116
13	195.00	3.8341	5.382	0.3575
14	210.00	4.1290	5.477	0.3638
15	225.00	4.4239	5.477	0.3638
16	240.00	4.7188	5.478	0.3638
17	255.00	5.0138	5.480	0.3640
18	270.00	5.3087	5.718	0.3798
19	285.00	5.6036	6.190	0.4112
20	300.00	5.8985	7.997	0.5312
21	315.00	6.1935	8.128	0.5399
22	330.00	6.4884	8.207	0.5451
23	345.00	6.7833	8.231	0.5467
24	360.00	7.0783	8.501	0.5647
25	375.00	7.3732	9.157	0.6082
26	390.00	7.6681	10.188	0.6767
27	405.00	7.9630	10.381	0.6895
28	420.00	8.2580	11.412	0.7580
29	435.00	8.5529	11.521	0.7653
30	450.00	8.8478	11.575	0.7689

ตารางที่ ข.7 (ต่อ)

เวลาที่เก็บตัวอย่าง (ชั่วโมง)	ปริมาณน้ำที่ผ่านคอลัมน์		ความเข้มข้นขาออก (มิลลิกรัมต่อลิตร)	C/Co
	มิลลิลิตร	Pore volume		
31	465.00	9.1427	11.666	0.7749
32	480.00	9.4377	11.697	0.7770
33	495.00	9.7326	11.707	0.7776
34	510.00	10.0275	11.728	0.7790
35	525.00	10.3225	11.778	0.7824
36	540.00	10.6174	11.815	0.7848
37	555.00	10.9123	11.887	0.7896
38	570.00	11.2072	11.927	0.7922
39	585.00	11.5022	12.005	0.7974
40	600.00	11.7971	12.011	0.7978
41	615.00	12.0920	12.015	0.7981
42	630.00	12.3869	12.027	0.7989
43	645.00	12.6819	12.044	0.8000
44	660.00	12.9768	12.069	0.8016
45	675.00	13.2717	12.085	0.8027
46	690.00	13.5667	12.116	0.8048
47	705.00	13.8616	12.427	0.8254
48	720.00	14.1565	12.426	0.8254
49	735.00	14.4514	12.431	0.8257
50	750.00	14.7464	12.390	0.8230
52	780.00	15.3362	12.376	0.8221
54	810.00	15.9261	12.340	0.8197
55	825.00	16.2210	12.303	0.8172
57	855.00	16.8109	12.537	0.8327
59	885.00	17.4007	12.698	0.8435
69	1035.00	20.3500	12.772	0.8483
70	1050.00	20.6449	12.999	0.8634
71	1065.00	20.9398	13.133	0.8723
72	1080.00	21.2348	13.150	0.8735
73	1095.00	21.5297	13.497	0.8965
75	1125.00	22.1195	13.778	0.9152
77	1155.00	22.7094	14.565	0.9675
79	1185.00	23.2993	14.584	0.9687

ตารางที่ ๗.7 (ต่อ)

เวลาที่เก็บตัวอย่าง (ชั่วโมง)	ปริมาณน้ำที่ผ่านคอลัมน์		ความเข้มข้นขาออก (มิลลิกรัมต่อลิตร)	C/Co
	มิลลิลิตร	Pore volume		
97	1455.00	28.6079	14.815	0.9841
99	1485.00	29.1978	14.838	0.9856
100	1500.00	29.4927	14.906	0.9901
102	1530.00	30.0826	14.992	0.9958
103	1545.00	30.3775	15.034	0.9986
117	1755.00	34.5065	14.975	0.9947
118	1770.00	34.8014	14.494	0.9627
119	1785.00	35.0963	13.759	0.9139
120	1800.00	35.3913	12.772	0.8484
121	1815.00	35.6862	12.383	0.8225
122	1830.00	35.9811	11.215	0.7449
123	1845.00	36.2761	10.709	0.7113
124	1860.00	36.5710	3.838	0.2549
125	1875.00	36.8659	3.444	0.2288
126	1890.00	37.1608	3.344	0.2221
141	2115.00	41.5847	2.556	0.1698
142	2130.00	41.8797	3.111	0.2066
144	2160.00	42.4695	3.181	0.2113
145	2175.00	42.7645	3.170	0.2106
147	2205.00	43.3543	3.166	0.2103
155	2325.00	45.7137	2.110	0.1402
165	2475.00	48.6630	1.112	0.0739
166	2490.00	48.9579	1.111	0.0738
167	2505.00	49.2529	1.201	0.0798
168	2520.00	49.5478	1.133	0.0753
169	2535.00	49.8427	1.115	0.0741
170	2550.00	50.1376	1.077	0.0715
171	2565.00	50.4326	1.075	0.0714
172	2580.00	50.7275	0.842	0.0559
173	2595.00	51.0224	0.565	0.0375
174	2610.00	51.3173	0.158	0.0105
176	2640.00	51.9072	0.000	0.0000
177	2655.00	52.2021	0.000	0.0000



ตารางที่ ช. 8 ข้อมูลการดูดติดผิวของอาร์เซเนตด้วยตัวอย่างดินร่วนเหนียว โดยการทดลองแบบคอลัมน์ เมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นของอาร์เซเนตเท่ากับ 15 มิลลิกรัมต่อลิตร และมีไบคาร์บอเนตต่ออาร์เซเนตอัตราส่วน 10 : 1 ที่พีเอช 7

เวลาที่เก็บตัวอย่าง (ชั่วโมง)	ปริมาตรน้ำที่ผ่านคอลัมน์		ความเข้มข้นขาออก (มิลลิกรัมต่อลิตร)	C/Co
	มิลลิลิตร	Pore volume		
1	15.00	0.2949	0.931	0.0621
2	30.00	0.5899	1.105	0.0736
3	45.00	0.8848	2.042	0.1361
4	60.00	1.1797	2.197	0.1464
5	75.00	1.4746	1.616	0.1077
6	90.00	1.7696	2.095	0.1396
7	105.00	2.0645	1.944	0.1295
8	120.00	2.3594	1.899	0.1266
9	135.00	2.6543	2.672	0.1780
10	150.00	2.9493	2.716	0.1810
11	165.00	3.2442	2.983	0.1988
12	180.00	3.5391	2.995	0.1996
13	195.00	3.8341	3.394	0.2262
14	210.00	4.1290	3.593	0.2394
15	225.00	4.4239	3.831	0.2552
16	240.00	4.7188	3.467	0.2310
17	255.00	5.0138	3.499	0.2331
18	270.00	5.3087	3.557	0.2371
19	285.00	5.6036	2.901	0.1933
20	300.00	5.8985	3.765	0.2509
21	315.00	6.1935	4.215	0.2809
22	330.00	6.4884	4.610	0.3072
23	345.00	6.7833	5.295	0.3528
24	360.00	7.0783	5.411	0.3606
25	375.00	7.3732	5.291	0.3526
26	390.00	7.6681	4.892	0.3260
27	405.00	7.9630	5.325	0.3548
28	420.00	8.2580	5.348	0.3564
29	435.00	8.5529	7.423	0.4946
30	450.00	8.8478	8.321	0.5545

ตารางที่ ๗.8 (ต่อ)

เวลาที่เก็บตัวอย่าง (ชั่วโมง)	ปริมาณน้ำที่ผ่านคอลัมน์		ความเข้มข้นขาออก (มิลลิกรัมต่อลิตร)	C/Co
	มิลลิลิตร	Pore volume		
34	510.00	10.0275	8.620	0.5744
35	525.00	10.3225	10.157	0.6768
36	540.00	10.6174	10.784	0.7186
37	555.00	10.9123	10.743	0.7159
38	570.00	11.2072	11.096	0.7394
39	585.00	11.5022	11.075	0.7380
40	600.00	11.7971	10.167	0.6775
41	615.00	12.0920	10.949	0.7296
42	630.00	12.3869	11.085	0.7387
43	645.00	12.6819	11.009	0.7336
44	660.00	12.9768	10.900	0.7263
45	675.00	13.2717	10.791	0.7191
46	690.00	13.5667	10.829	0.7216
47	705.00	13.8616	10.842	0.7225
48	720.00	14.1565	11.014	0.7340
49	735.00	14.4514	11.008	0.7335
50	750.00	14.7464	11.053	0.7365
52	780.00	15.3362	10.949	0.7296
54	810.00	15.9261	10.640	0.7090
55	825.00	16.2210	10.982	0.7318
57	855.00	16.8109	12.321	0.8210
59	885.00	17.4007	12.308	0.8202
69	1035.00	20.3500	12.102	0.8064
70	1050.00	20.6449	12.240	0.8156
71	1065.00	20.9398	12.141	0.8090
72	1080.00	21.2348	12.143	0.8092
75	1125.00	22.1195	12.056	0.8034
77	1155.00	22.7094	12.115	0.8073
79	1185.00	23.2993	13.285	0.8853
80	1200.00	23.5942	13.692	0.9123
82	1230.00	24.1840	13.267	0.8841
83	1245.00	24.4790	13.415	0.8939
93	1395.00	27.4282	14.138	0.9421

ตารางที่ ๗.8 (ต่อ)

เวลาที่เก็บตัวอย่าง (ชั่วโมง)	ปริมาณน้ำที่ผ่านคอลัมน์		ความเข้มข้นขาออก (มิลลิกรัมต่อลิตร)	C/Co
	มิลลิลิตร	Pore volume		
99	1485.00	29.1978	14.985	0.9985
100	1500.00	29.4927	14.983	0.9984
102	1530.00	30.0826	14.887	0.9920
105	1575.00	30.9674	14.619	0.9741
106	1590.00	31.2623	14.591	0.9722
117	1755.00	34.5065	14.687	0.9787
118	1770.00	34.8014	14.670	0.9776
119	1785.00	35.0963	14.629	0.9748
120	1800.00	35.3913	14.430	0.9615
121	1815.00	35.6862	14.094	0.9392
122	1830.00	35.9811	12.329	0.8215
123	1845.00	36.2761	12.014	0.8005
124	1860.00	36.5710	11.844	0.7893
125	1875.00	36.8659	11.849	0.7896
126	1890.00	37.1608	11.834	0.7885
127	1905.00	37.4558	11.717	0.7807
128	1920.00	37.7507	11.634	0.7753
129	1935.00	38.0456	11.585	0.7720
130	1950.00	38.3405	11.569	0.7709
131	1965.00	38.6355	11.513	0.7672
132	1980.00	38.9304	11.330	0.7549
141	2115.00	41.5847	11.312	0.7537
142	2130.00	41.8797	11.281	0.7517
143	2145.00	42.1746	11.257	0.7501
167	2505.00	49.2529	4.335	0.2888
168	2520.00	49.5478	4.298	0.2864
169	2535.00	49.8427	4.070	0.2712
170	2550.00	50.1376	1.615	0.1076
171	2565.00	50.4326	1.035	0.0690
172	2580.00	50.7275	0.545	0.0363
173	2595.00	51.0224	0.495	0.0330
175	2625.00	51.6123	0.000	0.0000
176	2640.00	51.9072	0.000	0.0000

ตารางที่ ช. 9 ข้อมูลการดูดติดผิวของอาร์เซเนตด้วยตัวอย่างดินร่วนเหนียว โดยการทดลองแบบคอลัมน์ เมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นของอาร์เซเนตเท่ากับ 15 มิลลิกรัมต่อลิตร และมีไบคาร์บอเนตต่ออาร์เซเนตอัตราส่วน 1 : 1 ที่พีเอช 7

เวลาที่เก็บตัวอย่าง (ชั่วโมง)	ปริมาตรน้ำที่ผ่านคอลัมน์		ความเข้มข้นขาออก (มิลลิกรัมต่อลิตร)	C/Co
	มิลลิลิตร	Pore volume		
1	15.00	0.2949	0.804	0.0533
2	30.00	0.5899	0.902	0.0598
3	45.00	0.8848	0.709	0.0470
4	60.00	1.1797	0.666	0.0442
5	75.00	1.4746	0.486	0.0322
6	90.00	1.7696	0.790	0.0524
7	105.00	2.0645	0.443	0.0294
8	120.00	2.3594	0.380	0.0252
9	135.00	2.6543	0.780	0.0517
10	150.00	2.9493	0.899	0.0596
11	165.00	3.2442	1.113	0.0738
12	180.00	3.5391	0.397	0.0263
13	195.00	3.8341	1.164	0.0772
14	210.00	4.1290	0.840	0.0557
15	225.00	4.4239	1.166	0.0773
16	240.00	4.7188	1.322	0.0877
17	255.00	5.0138	1.279	0.0848
18	270.00	5.3087	1.238	0.0821
19	285.00	5.6036	1.125	0.0746
20	300.00	5.8985	0.993	0.0659
21	315.00	6.1935	1.107	0.0734
22	330.00	6.4884	1.165	0.0773
23	345.00	6.7833	1.208	0.0801
24	360.00	7.0783	1.225	0.0813
25	375.00	7.3732	1.238	0.0821
26	390.00	7.6681	1.246	0.0827
27	405.00	7.9630	1.557	0.1033
28	420.00	8.2580	1.885	0.1250
29	435.00	8.5529	2.082	0.1382
30	450.00	8.8478	3.126	0.2074

ตารางที่ ข.9 (ต่อ)

เวลาที่เก็บตัวอย่าง (ชั่วโมง)	ปริมาณน้ำที่ผ่านคอลัมน์		ความเข้มข้นขาออก (มิลลิกรัมต่อลิตร)	C/Co
	มิลลิลิตร	Pore volume		
36	540.00	10.6174	6.360	0.4220
37	555.00	10.9123	6.828	0.4530
38	570.00	11.2072	7.185	0.4767
39	585.00	11.5022	7.230	0.4798
40	600.00	11.7971	7.259	0.4816
41	615.00	12.0920	7.735	0.5133
42	630.00	12.3869	7.829	0.5195
43	645.00	12.6819	7.559	0.5016
44	660.00	12.9768	7.865	0.5219
45	675.00	13.2717	7.982	0.5296
46	690.00	13.5667	8.314	0.5517
47	705.00	13.8616	8.313	0.5516
48	720.00	14.1565	8.687	0.5764
49	735.00	14.4514	8.661	0.5747
50	750.00	14.7464	8.643	0.5735
52	780.00	15.3362	8.958	0.5944
54	810.00	15.9261	9.332	0.6192
55	825.00	16.2210	9.322	0.6185
57	855.00	16.8109	9.578	0.6355
59	885.00	17.4007	10.107	0.6706
60	900.00	17.6956	10.082	0.6689
70	1050.00	20.6449	10.216	0.6779
75	1125.00	22.1195	11.062	0.7340
77	1155.00	22.7094	10.943	0.7261
79	1185.00	23.2993	11.211	0.7439
80	1200.00	23.5942	11.253	0.7467
82	1230.00	24.1840	11.318	0.7510
84	1260.00	24.7739	11.928	0.7915
85	1275.00	25.0688	12.203	0.8097
94	1410.00	27.7232	12.334	0.8184
95	1425.00	28.0181	12.430	0.8248
97	1455.00	28.6079	12.421	0.8242
99	1485.00	29.1978	12.586	0.8351

## ตารางที่ ข.9 (ต่อ)

เวลาที่เก็บตัวอย่าง (ชั่วโมง)	ปริมาณน้ำที่ผ่านคอลัมน์		ความเข้มข้นขาออก (มิลลิกรัมต่อลิตร)	C/Co
	มิลลิลิตร	Pore volume		
100	1500.00	29.4927	13.007	0.8630
102	1530.00	30.0826	13.156	0.8729
104	1560.00	30.6724	13.997	0.9287
105	1575.00	30.9674	14.376	0.9539
107	1605.00	31.5572	14.500	0.9621
108	1620.00	31.8521	14.815	0.9830
109	1635.00	32.1471	14.955	0.9923
118	1770.00	34.8014	15.000	0.9953
119	1785.00	35.0963	15.000	0.9953
120	1800.00	35.3913	15.004	0.9956
121	1815.00	35.6862	14.999	0.9952
122	1830.00	35.9811	15.000	0.9953
123	1845.00	36.2761	15.000	0.9953
124	1860.00	36.5710	14.990	0.9946
125	1875.00	36.8659	14.911	0.9894
126	1890.00	37.1608	14.222	0.9437
127	1905.00	37.4558	12.114	0.8038
128	1920.00	37.7507	10.118	0.6714
129	1935.00	38.0456	11.090	0.7359
142	2130.00	41.8797	6.096	0.4045
143	2145.00	42.1746	6.043	0.4010
145	2175.00	42.7645	5.620	0.3729
147	2205.00	43.3543	4.695	0.3116
149	2235.00	43.9442	3.702	0.2456
150	2250.00	44.2391	3.065	0.2034
152	2280.00	44.8289	2.701	0.1792
171	2565.00	50.4326	1.527	0.1014
172	2580.00	50.7275	0.336	0.0223
173	2595.00	51.0224	0.333	0.0221
174	2610.00	51.3173	0.024	0.0016
175	2625.00	51.6123	0.006	0.0004
176	2640.00	51.9072	0.000	0.0000
177	2655.00	52.2021	0.000	0.0000



ภาคผนวก ซ.

ข้อมูลที่ป้อนในโปรแกรม HYDRUS2D

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ๗.1 ชุดข้อมูลที่ป้อนเข้าสู่โปรแกรม HYDRUS2D ในการประมาณการเคลื่อนที่ของอาร์เซนิต ในคอลัมน์ดินร่วนเหนียวปนทราย ที่พีเอช 7

ตัวแปร	ค่าที่ป้อน (Input)
Length Units	cm
Time Units	Hours
Time discretization	450 hours
Qs	0.46 (Porosity)
Ks	71.01 (Pore Velocity)
Mass units	G
Pulse Duration	137 hours
Bulk. D.	1.43 g/cm <sup>3</sup>
Disp. L.	1.6175cm
CBnd1	15 x 10 <sup>-6</sup> g/cm <sup>3</sup>
Kd	20.3969 (parameter a x b)
Nu	99400 (parameter b)



ตารางที่ ๗.2 ชุดข้อมูลที่ป้อนเข้าสู่โปรแกรม HYDRUS2D ในการประมาณการเคลื่อนที่ของอาร์เซเนต ในคอลัมน์ดินร่วนเหนียว ที่พีเอช 7

ตัวแปร	ค่าที่ป้อน (Input)
Length Units	cm
Time Units	Hours
Time discretization	480 hours
Qs	0.5 (Porosity)
Ks	71.01 (Pore Velocity)
Mass units	g
Pulse Duration	129 hours
Bulk. D.	1.32 g/cm <sup>3</sup>
Disp. L.	1.64968 cm
CBnd1	15 x 10 <sup>-6</sup> g/cm <sup>3</sup>
Kd	19.55862 (parameter a x b)
Nu	112600 (parameter b)

ตารางที่ ๓. 3 ชุดข้อมูลที่ป้อนเข้าสู่โปรแกรม HYDRUS2D ในการประมาณการเคลื่อนที่ของอาร์เซนิต ในคอลัมน์ดินทรายปนร่วน ที่พีเอช 7

ตัวแปร	ค่าที่ป้อน (Input)
Length Units	cm
Time Units	Hours
Time discretization	330 hours
Qs	0.321 (Porosity)
Ks	71.01 (Pore Velocity)
Mass units	g
Pulse Duration	117 hours
Bulk. D.	1.8 g/cm <sup>3</sup>
Disp. L.	4.09698 cm
CBnd1	15 x 10 <sup>-6</sup> g/cm <sup>3</sup>
Kd	5.75411 (parameter a x b)
Nu	10900 (parameter b)

ตารางที่ ซ. 4 ชุดข้อมูลที่ป้อนเข้าสู่โปรแกรม HYDRUS2D ในการประมาณการเคลื่อนที่ของอาร์เซเนต ในคอลัมน์ดินร่วนเหนียว ที่พีเอช 4

ตัวแปร	ค่าที่ป้อน (Input)
Length Units	cm
Time Units	Hours
Time discretization	450 hours
Qs	0.5 (Porosity)
Ks	71.01 (Pore Velocity)
Mass units	g
Pulse Duration	143 hours
Bulk. D.	1.32 g/cm <sup>3</sup>
Disp. L.	1.64968 cm
CBnd1	15 x 10 <sup>-6</sup> g/cm <sup>3</sup>
Kd	9.91795 (parameter a x b)
Nu	3500 (parameter b)

ตารางที่ ๕. ๕ ชุดข้อมูลที่ป้อนเข้าสู่โปรแกรม HYDRUS2D ในการประมาณการเคลื่อนที่ของอาร์เซนิต ในคอลัมน์ดินร่วนเหนียว ที่พีเอช 10

ตัวแปร	ค่าที่ป้อน (Input)
Length Units	cm
Time Units	Hours
Time discretization	400 hours
Qs	0.5 (Porosity)
Ks	71.01 (Pore Velocity)
Mass units	g
Pulse Duration	121 hours
Bulk. D.	1.32 g/cm <sup>3</sup>
Disp. L.	1.64968 cm
CBnd1	15 x 10 <sup>-6</sup> g/cm <sup>3</sup>
Kd	11.53251 (parameter a x b)
Nu	35300 (parameter b)

## ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวธนัชพร อยู่ยังยืน เกิดเมื่อวันที่ 17 มีนาคม พ.ศ. 2524 สำเร็จ  
การศึกษาระดับปริญญาตรี ทางด้านวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม จากมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ เมื่อ  
ปี พ.ศ. 2545 และได้เข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ที่ภาควิชาวิศวกรรม  
สิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย