

พฤติกรรมการณ์ดูตติตติวิและการเคลื่อนที่ของอาร์เซไนท์ในชั้นน้ำใต้ดิน



นายกิตติพงษ์ นิลบุตร

ศูนย์วิทยพัทยาการ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2547

ISBN 974-17-6125-2

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

SORPTION AND TRANSPORT BEHAVIOR OF ARSENITE IN THE AQUIFER



Mr. Kittipong Ninlaboat

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

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 974-17-6125-2

หัวข้อวิทยานิพนธ์ พุทธธรรมการดูตติตติวิและและการเคลื่อนที่ของอาร์เซไนท์ในชั้นน้ำใต้ดิน  
โดย นายกิตติพงษ์ นิลบุตร  
สาขาวิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม  
อาจารย์ที่ปรึกษา อาจารย์ ดร. เขมรัฐ ใสสถาพันธ์  
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุธา ขาวเขียว


---

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็น  
ส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

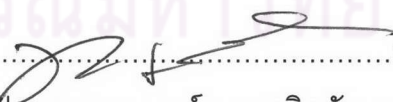
  
.....คณบดี คณะวิศวกรรมศาสตร์  
(ศาสตราจารย์ ดร. ดิเรก ลาวัญศิริ)

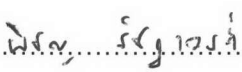
คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

  
.....ประธานกรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ฐเรศ ศรีสถิตย์)

  
.....อาจารย์ที่ปรึกษา  
(อาจารย์ ดร. เขมรัฐ ใสสถาพันธ์)

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

  
.....กรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชวลิต รัตนธรรมสกุล)

  
.....กรรมการ  
(อาจารย์ ดร. พิชญ รัชฎาวงศ์)

กิตติพงษ์ นิลบุตร : พฤติกรรมการดูดติดผิวและการเคลื่อนที่ของอาร์เซไนต์ในชั้นน้ำใต้ดิน

(SORPTION AND TRANSPORTATION BEHAVIOR OF ARSENITE IN THE AQUIFER)

อาจารย์ที่ปรึกษา : อ.ดร.เชมรัฐ โอสถาพันธุ์, อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม : ผศ.ดร.สุธา ขาว

เจียร, 189 หน้า, ISBN 974-17-6125-2

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาพฤติกรรมการดูดติดผิวและการเคลื่อนที่ของอาร์เซไนต์บนสภาวะน้ำใต้ดิน การทดลองทำกับดินตัวอย่าง 3 กลุ่มดิน คือ ดินร่วนเหนียวปนทราย, ดินร่วนเหนียว, และดินร่วนปนทราย ในงานวิจัยนี้ประกอบด้วยการศึกษาทดลองในสองส่วน ซึ่งมีทั้งการทดลองแบบแบตซ์และแบบคอลัมน์ การทดลองแบบแบตซ์ได้ทำการศึกษาประสิทธิภาพและความสามารถในการดูดติดผิวของอาร์เซไนต์ด้วยดิน ตัวอย่าง โดยทำการศึกษาที่พีเอชของชุดทดลองเท่ากับ 4 7 และ 10 นอกจากนั้นได้ทำการทดลองถึงผลของอิออนรบกวนของไบคาร์บอเนตและฟอสเฟต ส่วนการทดลองแบบคอลัมน์ได้ศึกษาโดยป้อนสารเทรเซอร์เข้าสู่คอลัมน์เพื่อคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การกระจายตัว และทำการทดลองแบบคอลัมน์เพื่อเปรียบเทียบกับผลการประมาณการเคลื่อนที่ด้วยคอมพิวเตอร์โปรแกรม HYDRUS2D จากผลการทดลองแบบแบตซ์พบว่า ลำดับของความสามารถในการดูดติดผิวของดินตัวอย่าง คือ ดินร่วนเหนียว > ดินร่วนเหนียวปนทราย > ดินทรายร่วน เมื่อพิจารณาไอโซเทอมการดูดติดผิวของอาร์เซไนต์พบว่า ความสามารถในการดูดติดผิวของอาร์เซไนต์มีความสัมพันธ์กับไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบแลงมัวร์ การทดลองแบบแบตซ์เมื่อมีอิออนรบกวนไบคาร์บอเนตมีความแตกต่างกับเมื่อไม่มีอิออนไบคาร์บอเนตรบกวนเล็กน้อย ส่วนอิออนรบกวนฟอสเฟตมีผลต่อความสามารถในการดูดติดผิวของอาร์เซไนต์อย่างมีนัยสำคัญ ผลการทดลองหาค่าสัมประสิทธิ์การกระจายตัวด้วยคอลัมน์ด้วยสารตามรอย พบว่า มีค่าเท่ากับ  $2.89 \times 10^{-3}$  cm<sup>2</sup>/s สำหรับคอลัมน์ดินร่วนเหนียวปนทราย  $2.71 \times 10^{-3}$  cm<sup>2</sup>/s สำหรับดินร่วนเหนียว และ  $1.05 \times 10^{-2}$  cm<sup>2</sup>/s สำหรับดินทรายร่วน สำหรับการทดลองแบบคอลัมน์เพื่อหาความสามารถในการดูดติดผิวของอาร์เซไนต์ พบว่าลำดับความสามารถในการดูดติดผิวสอดคล้องกับการทดลองแบบแบตซ์ คือ ดินร่วนเหนียว > ดินร่วนเหนียวปนทราย > ดินทรายร่วน ที่พีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 7 และเมื่อพิจารณาที่ชนิดดินร่วนเหนียว พบว่าการดูดติดผิวที่พีเอช 4 > พีเอช 7 > พีเอช 10 ส่วนเมื่อมีผลของอิออนรบกวนร่วมด้วย พบว่า อิออนไบคาร์บอเนตทำให้การดูดติดผิวของอาร์เซไนต์ต่ำลงเพียงเล็กน้อย แต่อิออนฟอสเฟตทำให้การดูดติดผิวของอาร์เซไนต์ต่ำลงมากอย่างมีนัยสำคัญ การประมาณด้วยโปรแกรม HYDRUS2D เปรียบเทียบกับผลการดูดติดผิวด้วยคอลัมน์พบว่า ผลการทดลองแบบคอลัมน์ของดินร่วนเหนียวที่พีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 10 มีค่าใกล้เคียงกับการประมาณด้วยโปรแกรม HYDRUS2D แต่ในการประมาณของดินร่วนเหนียวที่พีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 4 และที่พีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 7 ของดินร่วนเหนียวปนทราย ดินร่วนเหนียว และดินทรายร่วน ยังมีค่าความสามารถในการดูดติดผิวที่น้อยกว่าความเป็นจริง เนื่องมาจากโปรแกรมในการประมาณการเคลื่อนที่นี้ตั้งอยู่บนสมมติฐานของการดูดติดผิวแบบไม่สมดุลในสภาวะชั้นน้ำใต้ดิน

ภาควิชา	<u>วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม</u>	ลายมือชื่อนิสิต	<u>กิตติพงษ์ นิลบุตร</u>
สาขาวิชา	<u>วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม</u>	ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา	<u></u>
ปีการศึกษา	<u>2547</u>	ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	<u>อบอ โอสถาพันธุ์</u>



#4570220821 : MAJOR ENVIRONMENTAL ENGINEERING

KEY WORD : ARSENITE / ADSORPTION / SOIL / TRANSPORT / COLUMN TEST

KITTIPONG NINLABOAT : SORPTION AND TRANSPORT BEHAVIOR OF ARSENITE IN THE AQUIFER. THESIS ADVISOR : KHEMARATH OSATHAPHAN, Ph.D., THESIS COADVISOR : ASST. PROF. SUTHA KHAODHIAR, Ph.D., 189 pp. ISBN 974-17-6125-2

Sorption and transport behaviors of arsenite on aquifer materials was investigated. Three types of aquifer materials; sandy clay loam, clay loam, and loamy sand were used. This research consisted of two experimental sections batch and column experiments. Batch experiment was conducted to examine the effectiveness and ability of soil sample for arsenite sorption at varying pH of 4, 7, and 10. The competitive adsorption of typical ions ,i.e., bicarbonate and phosphate, was also investigated. Arsenite transport through soils were studied in the column. The experimental results were compared with the simulated results from the computer program 'HYDRUS2D'. The batch experiments results showed that the sorption ability of arsenite in clay loam is more than sandy clay loam and loamy sand. The adsorption isotherm for arsenite adsorption can be modeled by Langmuir sorption isotherm. Bicarbonate ion did not effect arsenite adsorption. However; phosphate ion suppressed the arsenite sorption significantly. The tracer column experimental results ascertained that dispersion coefficient was  $2.89 \times 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{s}$  for sandy clay loam,  $2.71 \times 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{s}$  for clay loam, and  $1.05 \times 10^{-2} \text{ cm}^2/\text{s}$  for sandy loam. Arsenite adsorption decreases with increasing pH in both batch and column studies. Adsorption of arsenite was highest with clay loam follow by sandy clay loam and loamy sand, respectively. Moreover, the results of the competitive ion were reducing the adsorption ability of arsenite on the soil sample, especially phosphate ion highly affected on reducing the adsorption ability of arsenite. While the ratio of the competitive ions were not effect on the adsorption ability of arsenite. The simulation by HYDRUS2D program compared with the results from the experiments elucidated the results from the column test in the clayey loam at initial pH 10 were most agreeable to the estimation by HYDRUS2D. Nevertheless, the simulation of sandy clay loam, clay loam, and loamy sand at the initial pH 4 and 7 failed to predict the transport behaviors because of the nature of non – equilibrium sorption in real aquifer materials.

Department Environmental Engineering

Field of study Environmental Engineering

Academic year 2004

Student's signature กิตติพงษ์ นินลาบอ

Advisor's signature เกษมราถ อสathaphan

Coadvisor's signature ศุภา ขหาดิอาร

## กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ อาจารย์ ดร. เขมรวิฐ ใสสถาพันธ์ และอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุธา ชาวเธียร เป็นอย่างสูงที่เมตตาและให้โอกาสแก่ผู้วิจัยในการดำเนินงานวิจัยครั้งนี้ ให้ความกรุณาอบรมสั่งสอนให้ความรู้ รวมถึงให้แง่คิดในการทำงานอย่างมีประสิทธิภาพและแนะนำให้คำปรึกษาในงานวิจัยจนสำเร็จ ลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์และคณาจารย์ทุกท่านที่ประสิทธิ์ประสาท ถ่ายทอดวิชาความรู้ทางวิชาการ

ขอขอบพระคุณบิดามารดาและทุกๆ คนในครอบครัวที่สนับสนุนและเป็นกำลังใจแก่ผู้วิจัย มาโดยตลอด

ขอขอบพระคุณภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการของเสียอันตราย ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้การช่วยเหลือควบคุมการดำเนินการวิจัย

ขอขอบคุณบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่มอบทุนสนับสนุนงานวิจัยนี้

ท้ายนี้ขอขอบคุณเพื่อนๆ พี่ๆ น้องๆ และเจ้าหน้าที่ฝ่ายธุรการทุกท่านในภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้ความรัก คำปรึกษา และความช่วยเหลือขณะที่ศึกษา และทำงานวิจัยเป็นอย่างดี

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฎ
สารบัญรูป.....	ฒ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
บทที่ 2 วัตถุประสงค์และขอบเขตการวิจัย.....	3
2.1 วัตถุประสงค์.....	3
2.2 ขอบเขตของการวิจัย.....	3
2.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
บทที่ 3 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
3.1 อาร์เซนิก.....	5
3.1.1 อาร์เซไนท์ (Arsenite) หรือไตรวาเลนอาร์เซนิก.....	7
3.1.2 ความเป็นพิษของอาร์เซนิก.....	11
3.1.3 มาตรฐานในการควบคุมอาร์เซนิก.....	12
3.2 กลไกการเคลื่อนที่ของสารปนเปื้อนในน้ำใต้ดิน.....	13
3.2.1 กระบวนการทางชลศาสตร์.....	14
3.2.1.1 การพา (Advection process).....	14
3.2.1.2 การแพร่และการกระจายตัว.....	15
(Diffusion and Dispersion Processes)	
3.2.2 กระบวนการทางเคมี.....	16
3.2.2.1 การดูดติดผิว (Sorption).....	18
3.2.2.2 กลไกการดูดติดผิว (Sorption Mechanism).....	18
3.2.2.3 การเคลื่อนที่ของการดูดติดผิว (Sorption Kinetic).....	19
3.2.2.4 ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดติดผิว.....	20
3.2.2.5 สมดุลของการดูดติดผิว (Sorption Equilibrium).....	21
3.2.2.6 ไอโซเทอมการดูดติดผิวเมื่อแปลงให้อยู่ในรูปเชิงเส้น.....	24



## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.3 แบบจำลองการเคลื่อนที่แบบ 1 มิติ (One dimension model).....	25
3.3.1 แบบจำลองการเคลื่อนที่ในสภาวะสมดุล.....	26
(Equilibrium Transport Model)	
3.3.2 ข้อมูลเข้าและผลที่ออกจากโปรแกรม HYDRUS2D.....	27
3.3.3 การค่าสัมประสิทธิ์การกระจายตัว (Dispersion coefficient) .....	28
ของตัวอย่างดิน ด้วยโปรแกรม STANDMOD/CFITIM	
3.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	30
บทที่ 4 แผนการทดลองและการดำเนินการวิจัย.....	37
4.1 แผนการวิจัย.....	38
4.2 ขั้นตอนการวิจัย.....	38
4.3 ตัวแปรที่ใช้ในการวิจัย.....	39
4.4 อุปกรณ์และสารเคมีที่ใช้ในการวิจัย.....	45
4.4.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง.....	45
4.4.2 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง.....	45
4.5 วิธีดำเนินการวิจัย.....	48
4.5.1 การเตรียมสารละลายอาร์เซไนท์.....	48
4.5.2 การศึกษาเวลาสัมผัสที่เหมาะสมในการดูดติดผิว.....	48
อาร์เซไนท์ด้วยดินตัวอย่าง	
4.5.3 การศึกษาสมการไอโซเทอมการดูดซับ (Adsorption Isotherm).....	49
ของการดูดซับอาร์เซไนท์ด้วยดินตัวอย่าง โดยทำการทดลอง	
แบบแบตช์	
4.5.4 การศึกษาสมการไอโซเทอมการดูดซับ (Adsorption Isotherm).....	49
ของการดูดซับอาร์เซไนท์ด้วยดินตัวอย่าง เมื่อมีผลของ	
สารละลายอิออนรบกวน โดยทำการทดลองแบบแบตช์	
4.5.5 การทดลองหาค่า Dispersion Coefficient ของดินตัวอย่าง.....	50
ด้วยการทดลองแบบคอลัมน์	
4.5.6 การศึกษาโดยทำการทดลองคอลัมน์ เพื่อตรวจสอบ.....	50
ผลการวิเคราะห์ของคอมพิวเตอร์โปรแกรม	



## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.5.7 การศึกษาโดยทำการทดลองคอลัมน์ เมื่อมีผลของ.....	50
สารละลายอ็อกซอเนรบกวน เพื่อตรวจสอบผลการวิเคราะห์	
ของคอมพิวเตอร์โปรแกรม	
บทที่ 5 ผลการวิเคราะห์ข้อมูล.....	51
5.1 ผลการศึกษาคุณสมบัติของดินตัวอย่าง.....	51
5.2 ผลการศึกษาเวลาสัมพัทธ์ที่เหมาะสมในการดูดซับอาร์เซไนท์.....	52
ในดินตัวอย่าง	
5.3 การศึกษาความสามารถในการดูดติดผิวของอาร์เซไนท์.....	54
ด้วยดินตัวอย่างที่พีเอชต่างๆ	
5.4 การศึกษาถึงสมการไอโซเทอมการดูดติดผิว (Adsorption Isotherm).....	59
จากการดูดติดผิวของอาร์เซไนท์ด้วยดินตัวอย่างในการทำการทดลอง	
แบบแบตช์	
5.5 การหาค่าพารามิเตอร์ของการดูดติดผิว (Adsorption Parameter).....	60
5.6 การศึกษาผลของอ็อกซอเนรบกวนที่มีต่อการดูดติดผิวของอาร์เซไนท์.....	64
ในดินตัวอย่าง	
5.7 การทดลองหาค่าสัมประสิทธิ์การกระจายตัว (Dispersion Coefficient) .....	68
ของดินตัวอย่าง ด้วยการทดลองแบบคอลัมน์	
5.8 การศึกษาผลการดูดติดผิวของอาร์เซไนท์ด้วยดินตัวอย่าง.....	71
โดยทำการทดลองแบบคอลัมน์	
5.9 การทดลองแบบคอลัมน์ เพื่อเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์.....	76
ด้วยคอมพิวเตอร์โปรแกรม	
บทที่ 6 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะเชิงวิศวกรรม.....	84
6.1 สรุปผลการวิจัย.....	84
6.2 ความสำคัญเชิงวิศวกรรมและการนำไปใช้ประโยชน์.....	86
6.3 ข้อเสนอแนะ.....	86
รายการอ้างอิง.....	87

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
ภาคผนวก.....	91
ภาคผนวก ก. ผลการวิเคราะห์สมบัติดินตัวอย่าง 3 กลุ่มดิน.....	92
ภาคผนวก ข. ผลการศึกษาเวลาสัมพัทธ์ที่เหมาะสมในการดูดติดผิว.....	95
ของอาร์เซไนท์ในดินตัวอย่าง 3 กลุ่มดิน	
ภาคผนวก ค. ผลการศึกษาสมการไอโซเทอมการดูดซับ (Adsorption Isotherm).....	101
ของการดูดติดผิวของอาร์เซไนท์ในดินตัวอย่าง 3 กลุ่มดิน	
โดยการทดลองแบบแบดซ์	
ภาคผนวก ง. การหาค่าพารามิเตอร์ของการดูดติดผิว (Adsorption Parameter).....	125
ของดินตัวอย่าง 3 กลุ่มดิน	
ภาคผนวก จ. การศึกษาการดูดติดผิวของอาร์เซไนท์เมื่อมีอิออนรบกวน.....	129
ในดินตัวอย่าง 3 กลุ่มดิน โดยการทดลองแบบแบดซ์	
ภาคผนวก ฉ. การทดลองหาค่าสัมประสิทธิ์การกระจายตัว.....	136
(Dispersion Coefficient) ของดินตัวอย่าง 3 กลุ่มดิน	
ด้วยการทดลองแบบคอลัมน์	
ภาคผนวก ช. ผลการทดลองแบบคอลัมน์ในการดูดติดผิวของอาร์เซไนท์.....	144
ภาคผนวก ซ. ชุดข้อมูลที่ป้อน (Input) และชุดข้อมูลที่ได้ (Output).....	183
จากโปรแกรม HYDRUS2D	
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	189

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1 แสดงลักษณะสมบัติทางกายภาพของสารหนู.....	9
3.2 สารหนูและสารประกอบของสารหนูที่สำคัญ.....	9
3.3 มาตรฐานน้ำดื่มในส่วนที่เกี่ยวข้องกับสารหนูที่กำหนดโดยหน่วยงานต่างๆ.....	12
3.4 มาตรฐานน้ำดื่มที่กำหนดโดยประเทศหรือองค์กรต่างๆ.....	13
3.5 ชุดข้อมูลที่ป้อน (input) เข้าสู่โปรแกรม HYDRUS2D เพื่อใช้ประมาณการเคลื่อนที่.....	28
3.6 ค่าสัมประสิทธิ์การกระจายตัวจากการทดลองแบบคอลัมน์ของดินชนิดต่างๆ.....	29
4.1 ตัวแปรต่างๆ ที่ใช้ในการทดลองหาเวลาสัมพัทธ์ที่เหมาะสมในการดูดติดผิว.....	39
4.2 ตัวแปรต่างๆ ที่ใช้ในการทดลองหาการดูดติดผิวของอาร์เซนไนท์ด้วยดินตัวอย่าง.....	40
โดยการทดลองแบบแบตช์ เพื่อหาสมการไอโซเทอมการดูดติดผิว	
4.3 ตัวแปรต่างๆ ที่ใช้ในการทดลองหาการดูดติดผิวของอาร์เซนไนท์ด้วยดินตัวอย่าง.....	41
เมื่อมีอิออนรบกวน โดยการทดลองแบบแบตช์ เพื่อหาสมการไอโซเทอมการดูดติดผิว	
4.4 ตัวแปรต่างๆ ที่ใช้ในการหาค่าสัมประสิทธิ์การกระจายตัว (Dispersion coefficient).....	42
ของดินตัวอย่าง ด้วยการทดลองแบบคอลัมน์	
4.5 ตัวแปรต่างๆ ที่ใช้ในการทดลองแบบคอลัมน์ เพื่อตรวจผลการวิเคราะห์ด้วยคอมพิวเตอร์...43	
4.6 ตัวแปรต่างๆ ที่ใช้ในการทดลองแบบคอลัมน์ เมื่อมีสารละลายอิออนรบกวน .....	44
เพื่อตรวจผลการวิเคราะห์ด้วยคอมพิวเตอร์	
5.1 สมบัติของตัวอย่างดิน.....	51
5.2 ค่า R-square ของไอโซเทอมของการดูดติดผิวของอาร์เซนไนท์ด้วยดินตัวอย่าง.....	63
5.3 ค่าพารามิเตอร์ของการดูดติดผิวที่หาได้จากสมการไอโซเทอมการดูดติดผิว.....	64
แบบแลงมัวร์ของตัวอย่างดิน ที่สภาวะพีเอชต่างๆ	
5.4 เปรียบเทียบค่าความสามารถในการดูดติดผิวของอาร์เซนไนท์จากการทดลอง.....	81
แบบแบตช์และการทดลองแบบคอลัมน์	
ก.1 ผลการวิเคราะห์สมบัติดินตัวอย่าง 3 กลุ่มดิน.....	93
ก.2 ผลการวิเคราะห์อาร์เซนไนท์ในดินตัวอย่างด้วยวิธี MICROWAVE.....	94
ข.1 ผลการศึกษาเวลาสัมพัทธ์ของดินร่วนเหนียวปนทราย ที่พีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 4.....	96
ข.2 ผลการศึกษาเวลาสัมพัทธ์ของดินร่วนเหนียว ที่พีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 4.....	96
ข.3 ผลการศึกษาเวลาสัมพัทธ์ของดินทรายร่วน ที่พีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 4.....	97
ข.4 ผลการศึกษาเวลาสัมพัทธ์ของดินร่วนเหนียวปนทราย ที่พีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 7.....	97



## สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
ข.5 ผลการศึกษาเวลาสัมพัทธ์ของดินร่วนเหนียว ที่พีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 7.....	98
ข.6 ผลการศึกษาเวลาสัมพัทธ์ของดินทรายร่วน ที่พีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 7.....	98
ข.7 ผลการศึกษาเวลาสัมพัทธ์ของดินร่วนเหนียวปนทราย ที่พีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 10.....	99
ข.8 ผลการศึกษาเวลาสัมพัทธ์ของดินร่วนเหนียว ที่พีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 10.....	99
ข.9 ผลการศึกษาเวลาสัมพัทธ์ของดินทรายร่วน ที่พีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 10.....	100
ค.1 ผลการศึกษาถึงสมการไอโซเทอมของดินร่วนเหนียวปนทราย ที่พีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 4.....	102
ค.2 ผลการศึกษาถึงสมการไอโซเทอมของดินร่วนเหนียว ที่พีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 4.....	103
ค.3 ผลการศึกษาถึงสมการไอโซเทอมของดินทรายร่วน ที่พีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 4.....	104
ค.4 ผลการศึกษาถึงสมการไอโซเทอมของดินร่วนเหนียวปนทราย ที่พีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 7.....	105
ค.5 ผลการศึกษาถึงสมการไอโซเทอมของดินร่วนเหนียว ที่พีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 7.....	106
ค.6 ผลการศึกษาถึงสมการไอโซเทอมของดินทรายร่วน ที่พีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 7.....	107
ค.7 ผลการศึกษาถึงสมการไอโซเทอมของดินร่วนเหนียวปนทราย ที่พีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 10.....	108
ค.8 ผลการศึกษาถึงสมการไอโซเทอมของดินร่วนเหนียว ที่พีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 10.....	109
ค.9 ผลการศึกษาถึงสมการไอโซเทอมของดินทรายร่วน ที่พีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 10.....	110
ค.10 ค่าของพีเอชที่สภาวะสมดุลของดินตัวอย่าง.....	111
ง.1 ค่าพารามิเตอร์ของการดูดติดผิวที่หาได้จากสมการไอโซเทอม.....	126
ของการดูดติดผิวด้วยดินตัวอย่างทั้ง 3 กลุ่มดิน ในสภาวะพีเอชต่างๆ	
ง.2 ผลการแทนค่าสมการไอโซเทอมของดินตัวอย่างด้วยค่า $C_e$ .....	127
โดยใช้ค่าพารามิเตอร์ $a$ และ $b$ ที่ได้จากสมการแลงมัวร์ ที่สภาวะพีเอชต่างๆ	
ง.3 ผลการแทนค่าสมการไอโซเทอมของดินตัวอย่างด้วยค่า $C_e$ .....	128
ของดินร่วนเหนียว ที่พีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 7	
จ.1 ผลการศึกษาถึงสมการไอโซเทอมของดินร่วนเหนียว.....	130
เมื่อใส่ไอออนรบกวน คือ ไบคาร์บอเนต ในอัตราส่วน 0.1 ; 1 และพีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 7	
จ.2 ผลการศึกษาถึงสมการไอโซเทอมของดินร่วนเหนียว.....	131
เมื่อใส่ไอออนรบกวน คือ ไบคาร์บอเนต ในอัตราส่วน 1 ; 1 และพีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 7	
จ.3 ผลการศึกษาถึงสมการไอโซเทอมของดินร่วนเหนียว.....	132
เมื่อใส่ไอออนรบกวน คือ ไบคาร์บอเนต ในอัตราส่วน 10 ; 1 และพีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 7	

## สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
จ.4 ผลการศึกษาถึงสมการไอโซเทอมของดินร่วนเหนียว.....	133
เมื่อใส่สื่ออนุบกรวน คือ ฟอสเฟต ในอัตราส่วน 0.1 ; 1 และพีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 7	
จ.5 ผลการศึกษาถึงสมการไอโซเทอมของดินร่วนเหนียว.....	134
เมื่อใส่สื่ออนุบกรวน คือ ฟอสเฟต ในอัตราส่วน 1 ; 1 และพีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 7	
จ.6 ผลการศึกษาถึงสมการไอโซเทอมของดินร่วนเหนียว.....	135
เมื่อใส่สื่ออนุบกรวน คือ ฟอสเฟต ในอัตราส่วน 10 ; 1 และพีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 7	
ฉ.1 ผลการศึกษาการทดลองแบบคอลัมน์ของดินร่วนเหนียวปนทราย.....	137
โดยใช้สารละลายโบรไมด์ที่มีความเข้มข้นเริ่มต้น 15 มิลลิกรัมต่อลิตร	
ฉ.2 ผลการศึกษาการทดลองแบบคอลัมน์ของดินร่วนเหนียว.....	139
โดยใช้สารละลายโบรไมด์ที่มีความเข้มข้นเริ่มต้น 15 มิลลิกรัมต่อลิตร	
ฉ.3 ผลการศึกษาการทดลองแบบคอลัมน์ของดินทรายร่วน.....	141
โดยใช้สารละลายโบรไมด์ที่มีความเข้มข้นเริ่มต้น 15 มิลลิกรัมต่อลิตร	
ช.1 ผลการศึกษาการทดลองแบบคอลัมน์ของดินร่วนเหนียวปนทราย.....	144
โดยใช้สารละลายอาร์เซไนท์ ที่พีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 7	
ช.2 ผลการศึกษาการทดลองแบบคอลัมน์ของดินร่วนเหนียว.....	148
โดยใช้สารละลายอาร์เซไนท์ ที่พีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 7	
ช.3 ผลการศึกษาการทดลองแบบคอลัมน์ของดินทรายร่วน.....	153
โดยใช้สารละลายอาร์เซไนท์ ที่พีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 7	
ช.4 ผลการศึกษาการทดลองแบบคอลัมน์ของดินร่วนเหนียว.....	157
โดยใช้สารละลายอาร์เซไนท์ ที่พีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 4	
ช.5 ผลการศึกษาการทดลองแบบคอลัมน์ของดินร่วนเหนียว.....	163
โดยใช้สารละลายอาร์เซไนท์ ที่พีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 10	
ช.6 ผลการศึกษาการทดลองแบบคอลัมน์ของดินร่วนเหนียว.....	167
โดยใช้สารละลายอาร์เซไนท์ และไบคาร์บอเนตรบกวน 1:1 ที่พีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 7	
ช.7 ผลการศึกษาการทดลองแบบคอลัมน์ของดินร่วนเหนียว.....	171
โดยใช้สารละลายอาร์เซไนท์ และไบคาร์บอเนตรบกวน 10:1 ที่พีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 7	
ช.8 ผลการศึกษาการทดลองแบบคอลัมน์ของดินร่วนเหนียว.....	175
โดยใช้สารละลายอาร์เซไนท์ และฟอสเฟตรบกวน 1:1 ที่พีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 7	

## สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
ข.9 ผลการศึกษาการทดลองแบบคอลัมน์ของดินร่วนเหนียว.....	179
โดยใช้สารละลายอาร์เซไนท์ และฟอสเฟตรบกวน 10:1 ที่พีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 7	
ข.1 ชุดข้อมูลที่ป้อน (Input) เข้าสู่โปรแกรม HYDRUS2D ในการประมาณการเคลื่อนที่.....	184
ของอาร์เซไนท์ในดินร่วนเหนียวปนทราย ที่พีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 7	
ข.2 ชุดข้อมูลที่ป้อน (Input) เข้าสู่โปรแกรม HYDRUS2D ในการประมาณการเคลื่อนที่.....	185
ของอาร์เซไนท์ในดินร่วนเหนียว ที่พีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 7	
ข.3 ชุดข้อมูลที่ป้อน (Input) เข้าสู่โปรแกรม HYDRUS2D ในการประมาณการเคลื่อนที่.....	186
ของอาร์เซไนท์ในดินทรายร่วน ที่พีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 7	
ข.4 ชุดข้อมูลที่ป้อน (Input) เข้าสู่โปรแกรม HYDRUS2D ในการประมาณการเคลื่อนที่.....	187
ของอาร์เซไนท์ในดินร่วนเหนียว ที่พีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 4	
ข.5 ชุดข้อมูลที่ป้อน (Input) เข้าสู่โปรแกรม HYDRUS2D ในการประมาณการเคลื่อนที่.....	188
ของอาร์เซไนท์ในดินร่วนเหนียว ที่พีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 10	

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1	สองแหล่งทางภาคใต้ของประเทศไทยที่มีการปนเปื้อนของสารหนูในปริมาณมาก..... 2
3.1	As(III) และ As(V) species ที่เป็นฟังก์ชันกับพีเอช..... 6
3.2	pe-pH diagram ของ As(V) และ As(III) species..... 6
3.3	กราฟการสังเคราะห์ pe-pH diagram..... 7
3.4	แผนผังแสดงขบวนการทำให้เกิดรีดักชัน..... 8
3.5	Breakthrough curve แสดงผลของการกระจายตัวและการดูดติดผิว..... 14
3.6	ลักษณะของการกระจายตัวตามการเคลื่อนที่ของทิศทางการไหลของน้ำใต้ดิน..... 17
3.7	การเคลื่อนที่ตามทิศทางของน้ำใต้ดิน..... 17
3.8	ปัจจัยที่มีผลต่อการกระจายตัวตามยาว (Longitudinal dispersion)..... 17
3.9	กราฟไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบเชิงเส้น..... 22
3.10	กราฟไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบแลงมัวร์..... 23
3.11	กราฟไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบฟรุนดลิช..... 23
3.12	ค่า Breakthrough curve ที่ได้จากโปรแกรม HYDRUS2D..... 27
4.1	ไดอะแกรมสามเหลี่ยมแรงประเภทเนื้อดิน (Soil textural) ตามสัดส่วน..... 37
4.2	ไดอะแกรมสามเหลี่ยมเมื่อพิจารณาแยกเนื้อดินออกเป็นสามกลุ่มใหญ่ๆ..... 37
4.3	การทดลองแบบคอลัมน์..... 42
4.4	คอลัมน์เทฟลอน..... 46
4.5	ชุดทดลองแบบคอลัมน์ทำด้วยเทฟลอน..... 46
4.6	เครื่องเก็บตัวอย่างอัตโนมัติ (Fraction collector)..... 47
4.7	เครื่องอะตอมมิคแอคตอสบชั้นสเปกโตรโฟโตมิเตอร์..... 47
5.1	ประสิทธิภาพในการดูดติดผิวของอาร์เซไนต์ด้วยดินร่วนเหนียวปนทราย ที่เวลาต่างๆ..... 52
5.2	ประสิทธิภาพในการดูดติดผิวของอาร์เซไนต์ด้วยดินร่วนเหนียว ที่เวลาต่างๆ..... 53
5.3	ประสิทธิภาพในการดูดติดผิวของอาร์เซไนต์ด้วยดินทรายร่วน ที่เวลาต่างๆ..... 53
5.4	ความสามารถในการดูดติดผิวของอาร์เซไนต์ด้วยดินร่วนเหนียวปนทราย..... 55
5.5	ความสามารถในการดูดติดผิวของอาร์เซไนต์ด้วยดินร่วนเหนียว..... 55
5.6	ความสามารถในการดูดติดผิวของอาร์เซไนต์ด้วยดินทรายร่วน..... 56
5.7	ความสามารถในการดูดติดผิว ที่พีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 4..... 56
5.8	ความสามารถในการดูดติดผิว ที่พีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 7..... 57

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.9 ความสามารถในการดูดติดผิว ที่พีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 10.....	57
5.10 ประสิทธิภาพในการดูดติดผิวของดินร่วนเหนียวปนทราย.....	59
5.11 ประสิทธิภาพในการดูดติดผิวของดินร่วนเหนียว.....	59
5.12 ประสิทธิภาพในการดูดติดผิวของดินทรายร่วน.....	60
5.13 ประสิทธิภาพในการดูดติดผิว ที่พีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 4.....	60
5.14 ประสิทธิภาพในการดูดติดผิว ที่พีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 7.....	61
5.15 ประสิทธิภาพในการดูดติดผิว ที่พีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 10.....	61
5.16 เส้นแนวโน้มความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถในการดูดติดผิวของ..... อาร์เซไนต์ด้วยดินร่วนเหนียวปนทราย และความเข้มข้นของอาร์เซไนต์ที่สภาวะสมดุล ที่พีเอชต่างๆ โดยแทนค่าสมการและพารามิเตอร์ที่ได้จากทดลอง	65
5.17 เส้นแนวโน้มความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถในการดูดติดผิวของ..... อาร์เซไนต์ด้วยดินร่วนเหนียว และความเข้มข้นของอาร์เซไนต์ที่สภาวะสมดุล ที่พีเอชต่างๆ โดยแทนค่าสมการและพารามิเตอร์ที่ได้จากทดลอง	65
5.18 เส้นแนวโน้มความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถในการดูดติดผิวของ..... อาร์เซไนต์ด้วยดินทรายร่วน และความเข้มข้นของอาร์เซไนต์ที่สภาวะสมดุล ที่พีเอชต่างๆ โดยแทนค่าสมการและพารามิเตอร์ที่ได้จากทดลอง	66
5.19 เส้นแนวโน้มความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถในการดูดติดผิวของอาร์เซไนต์..... ด้วยดินตัวอย่าง และความเข้มข้นของอาร์เซไนต์ที่สภาวะสมดุล ที่พีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 4 โดยแทนค่าสมการและพารามิเตอร์ที่ได้จากทดลอง	66
5.20 เส้นแนวโน้มความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถในการดูดติดผิวของอาร์เซไนต์..... ด้วยดินตัวอย่าง และความเข้มข้นของอาร์เซไนต์ที่สภาวะสมดุล ที่พีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 7 โดยแทนค่าสมการและพารามิเตอร์ที่ได้จากทดลอง	67
5.21 เส้นแนวโน้มความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถในการดูดติดผิวของอาร์เซไนต์..... ด้วยดินตัวอย่าง และความเข้มข้นของอาร์เซไนต์ที่สภาวะสมดุล ที่พีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 10 โดยแทนค่าสมการและพารามิเตอร์ที่ได้จากทดลอง	67
5.22 ความสามารถในการดูดติดผิวของอาร์เซไนต์เมื่อมีอิออนไปคาร์บอเนตรบกวน.....	68
5.23 ความสามารถในการดูดติดผิวของอาร์เซไนต์เมื่อมีอิออนฟอสเฟตรบกวน.....	69
5.24 ประสิทธิภาพในการดูดติดผิวของอาร์เซไนต์เมื่อมีอิออนไปคาร์บอเนตรบกวน.....	69

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.25 ประสิทธิภาพในการดูดติดผิวของอาร์เซนที่เมื่อมีอิออนฟอสเฟตรบกวน.....	70
5.26 Breakthrough curve ของสารละลายโบรไมด์ที่ไหลผ่านคอลัมน์.....	72
ดินร่วนเหนียวปนทราย ที่ความเข้มข้นของสารละลายโบรไมด์เริ่มต้นเท่ากับ 15 มิลลิกรัมต่อลิตร	
5.27 Breakthrough curve ของสารละลายโบรไมด์ที่ไหลผ่านคอลัมน์.....	73
ดินร่วนเหนียว ที่ความเข้มข้นของสารละลายโบรไมด์เริ่มต้นเท่ากับ 15 มิลลิกรัมต่อลิตร	
5.28 Breakthrough curve ของสารละลายโบรไมด์ที่ไหลผ่านคอลัมน์.....	73
ดินทรายร่วน ที่ความเข้มข้นของสารละลายโบรไมด์เริ่มต้นเท่ากับ 15 มิลลิกรัมต่อลิตร	
5.29 ผลการทดลองแบบคอลัมน์ที่พีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 7 ของดินร่วนเหนียวปนทราย.....	74
ดินร่วนเหนียว และดินทรายร่วน	
5.30 ผลการทดลองแบบคอลัมน์ของดินร่วนเหนียว ที่พีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 4 7 และ 10.....	76
5.31 ผลการทดลองแบบคอลัมน์ของดินร่วนเหนียว เมื่อมีอิออนไบคาร์บอเนตรบกวน.....	77
5.32 ผลการทดลองแบบคอลัมน์ของดินร่วนเหนียว เมื่อมีอิออนฟอสเฟตรบกวน.....	78
5.33 Breakthrough curve จากการประมาณโดยโปรแกรม HYDRUS2D เปรียบเทียบ.....	79
กับการทดลองแบบคอลัมน์ของดินร่วนเหนียวปนทราย ที่พีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 7	
5.34 Breakthrough curve จากการประมาณโดยโปรแกรม HYDRUS2D เปรียบเทียบ.....	80
กับการทดลองแบบคอลัมน์ของดินร่วนเหนียว ที่พีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 7	
5.35 Breakthrough curve จากการประมาณโดยโปรแกรม HYDRUS2D เปรียบเทียบ.....	81
กับการทดลองแบบคอลัมน์ของดินทรายร่วน ที่พีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 7	
5.36 Breakthrough curve จากการประมาณโดยโปรแกรม HYDRUS2D เปรียบเทียบ.....	82
กับการทดลองแบบคอลัมน์ของดินร่วนเหนียว ที่พีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 4	
5.37 Breakthrough curve จากการประมาณโดยโปรแกรม HYDRUS2D เปรียบเทียบ.....	83
กับการทดลองแบบคอลัมน์ของดินร่วนเหนียว ที่พีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 10	





## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
ข.1 Breakthrough curve ที่ได้จากโปรแกรม HYDRUS2D ในการประมาณการเคลื่อนที่.....184 ของอาร์เซไนต์ด้วยดินร่วนเหนียวปนทราย ที่พีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 7	184
ข.2 Breakthrough curve ที่ได้จากโปรแกรม HYDRUS2D ในการประมาณการเคลื่อนที่.....185 ของอาร์เซไนต์ด้วยดินร่วนเหนียว ที่พีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 7	185
ข.3 Breakthrough curve ที่ได้จากโปรแกรม HYDRUS2D ในการประมาณการเคลื่อนที่.....186 ของอาร์เซไนต์ด้วยดินทรายร่วน ที่พีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 7	186
ข.4 Breakthrough curve ที่ได้จากโปรแกรม HYDRUS2D ในการประมาณการเคลื่อนที่.....187 ของอาร์เซไนต์ด้วยดินร่วนเหนียว ที่พีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 4	187
ข.5 Breakthrough curve ที่ได้จากโปรแกรม HYDRUS2D ในการประมาณการเคลื่อนที่.....188 ของอาร์เซไนต์ด้วยดินร่วนเหนียว ที่พีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 10	188

  
 ศูนย์วิทยทรัพยากร  
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย