แบบจำลองการเคลื่อนที่แบบ 1 มิติ สำหรับเฮกซะวาเลนท์โครเมียมในชั้นน้ำใต้ดิน

นาย จุฬาฤทธิ์ นาถประทาน

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2546

ISBN 947-17-3654-1

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ONE DIMENSIONAL TRANSPORT MODELING FOR HEXAVALENT CHROMIUM IN THE AQUIFER

Mr. Chularit Natpratan

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 2003

ISBN 947-17-3654-1

หัวข้อวิทยานิพนธ์	แบบจำลองการเคลื่อนที่แบบ 1 มิติสำหรับเฮกซะวาเลนท์โครเมียมในชั้นน้ำใต้ดิน
โดย	นาย จุฬาฤทธิ์ นาถประทาน
สาขาวิชา	วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุธา ขาวเธียร
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	อาจารย์ ดร.เขมรัฐ โอสถาพันธุ์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

.....คณบดี คณะวิศวกรรมศาสตร์

(ศาสตราจารย์ ดร.สมศักดิ์ ปัญญาแก้ว)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการสอบ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ บุญยง โล่ห์วงศ์วัฒน)

.....อาจารย์ที่ปรึกษา

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุธา ขาวเธียร)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

(อาจารย์ ดร.เขมรัฐ โอสถาพันธุ์)

.....กรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร. สุรพล สายพานิช)

.....กรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร. ธีระ เกรอต)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

จุฬาฤทธิ์ นาถประทาน : แบบจำลองการเคลื่อนที่แบบ 1 มิติ สำหรับเฮกซะวาเลนท์โครเมียมในชั้นน้ำใต้ดิน (ONE DIMENSIONAL TRANSPORT MODELING FOR HEXAVALENT CHROMIUM IN THE AQUIFER) อาจารย์ที่ปรึกษา : ผศ.ดร.สุธา ขาวเธียร, อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม : อ.ดร.เขมรัฐ โอสถาพันธุ์, 122 หน้า, ISBN 947-17-3654-1

การวิจัยนี้เป็นการศึกษาการเคลื่อนที่ รวมไปถึงการศึกษาการประยุกต์ใช้คอมพิวเตอร์ซอฟท์แวร์ในการประมาณการเคลื่อนที่ของเฮกซะวาเลนท์โครเมียมในน้ำใต้ดิน โดยทำการทดลองทั้งแบบแบตช์และคอลัมน์ การทดลองแบบแบตช์ได้ทำการศึกษาประสิทธิภาพและความสามารถในการดูดซับสารละลายโครเมตด้วยตัวอย่างดิน ซึ่งถือเป็นตัวแทนของดินในบริเวณนิคมอุตสาหกรรมมาบตาพุด จังหวัดระยอง ซึ่งทำการศึกษาที่พีเอชของชุดการทดลองเท่ากับ 4, 5, 6, 7 และ 8 ส่วนการทดลองแบบคอลัมน์ได้ศึกษาถึงการป้อนสารเทรซอร์เข้าสู่คอลัมน์เพื่อคำนวนหาค่าสัมประสิทธิ์การกระจายตัว และการทำการทดลองแบบคอลัมน์เพื่อเปรียบเทียบกับผลการประมาณการเคลื่อนที่ด้วยคอมพิวเตอร์ซอฟท์แวร์

ผลการทดลองแบบแบตช์พบว่า ความสามารถในการดูดซับโครเมียมด้วยตัวอย่างดินจะมีค่าสูงขึ้นเมื่อพีเอชลดลง ในช่วงพีเอชที่ทำการศึกษา และการเพิ่มขึ้นของปริมาณตัวอย่างดินทำให้ปริมาณโครเมียมที่ถูกดูดซับเพิ่มมากขึ้น แต่ความสามารถในการดูดซับโครเมียมต่อปริมาณตัวอย่างดินลดลง ส่วนผลการศึกษาไอโซเทอมของการดูดซับโครเมียมโดยใช้ตัวอย่างดินพบว่า ความสามารถในการดูดซับโครเมียมมีความสัมพันธ์กับไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงมัวร์

สำหรับผลการทดลองแบบคอลัมน์พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การกระจายตัวมีค่าเท่ากับ 10.26×10^{-3} ซม.^{2}/วินาที และหลังจากการเปรียบเทียบผลที่ได้จากการประมาณโดยโปรแกรม HYDRUS2D กับผลการทดลองแบบผลการทดลองแบบคอลัมน์พบว่าโปรแกรม HYDRUS2D สามารถประมาณได้ใกล้เคียงที่สุดที่พีเอช 6 รองลงมาคือที่พีเอช 8 ส่วนที่พีเอช 4 นั้นถือว่าไม่ประสบผลสำเร็จในการประมาณ เนื่องจากผลการทดลองมีความแตกต่างกันมาก ซึ่งอาจอธิบายได้ว่าในความเป็นจริงจะเกิดการดูดซับแบบไม่สมดุล (Non-equilibrium adsorption process) ซึ่งไม่เป็นไปตามสมมติฐานของแบบจำลองการเคลื่อนที่ที่นำมาใช้ และเมื่อพิจารณาผลการประมาณการเคลื่อนที่ด้วยโปรแกรมพบว่ายังไม่สามารถนำไปใช้งานในสภาพจริงได้ เนื่องจากผลจากการประมาณยังมีข้อจำกัดด้านความปลอดภัย เพราะจะประมาณความสามารถในการเคลื่อนที่ได้น้อยกว่าที่เกิดขึ้นจริง ทำให้เมื่อนำไปใช้ในสภาพจริงโดยไม่มีการตรวจสอบอาจจะทำให้เกิดความผิดพลาดได้

ภาควิชา	วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม	ลายมือชื่อนิสิต	จุฬาฤทธิ์ นาถประทาน
สาขาวิชา	วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม	ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา	
ปีการศึกษา	2546	ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	

4370257921 : MAJOR Environmental Engineering

KEY WORD : Chromium / Adsorption / Soil / Transport Modeling / Column Test

CHULARIT NATPRATAN : ONE DIMENSIONAL TRANSPORT MODELING FOR HEXAVALENT CHROMIUM IN THE AQUIFER.

THESIS ADVISOR : ASST. PROF. SUTHAR KHAODHIAR, Ph.D.,THESIS COADVISOR : KHEMARAT OSATAPAN, Ph.D., 122 pp. ISBN 947-17-3654-1.

The objectives of this study were to study the hexavalent chromium transport and the application of computer software for predicting the transport of hexavalent chromium in subsurface by soil samples in batch and column experiments. Aims of batch experiments were to study efficiencies and hexavalent chromium adsorption capacities of soil samples in the Maptaphut industrial estate zone, Rayong which were used as surrogate soil and to study effect of pH on hexavalent chromium range of 4, 5, 6, 7 and 8. Column experiments aimed to calculate dispersion coefficient by the tracer test and to compare the results of the column experiments to that of the HYDRUS2D computer software.

Batch experiments showed that hexavalent chromium adsorption capacities increased with decreasing solution pH in the range of the study. hexavalent chromium batch experiments also revealed that an increase in the amount of soil samples increased the total amount of hexavalent chromium adsorption but decreased the capacities of chromium adsorption per gram of soil samples. The adsorption isotherm for chromium adsorption was agreeable with the Langmuir isotherm.

Column experiment results showed that the value of dispersion coefficient was 10.26×10^{-3} cm^2/s. After comparing the results of the HYDRUS2D to that of the column experiments, it was found that the HYDRUS2D was able to predict most precisely at pH 6 and less precisely at pH 8. However, HYDRUS2D failed significantly to describe the behavior of hexavalent chromium transport at pH 4 as seen clearly from the difference between the results of the HYDRUS2D and that of the column experiments. That was, modeling the transport of metals using the local equilibrium assumption using non-equilibrium sorption parameters failed significantly to describe the behavior of hexavalent chromium transport. Prediction by HYDRUS2D was still unvalid for the application in real situation since the value resulted from the prediction was less than that from experiments. Using the results from the HYDRUS2D without checkup might not be appropriate.

Department	Environmental Engineering	Student's Signature	Chularit Natpratan.
Field of Study	Environmental Engineering	Advisor's Signature	
Academic Year	2003	Coadvisor's Signature	

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ต้องขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุธา ขาวเธียร อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และ อ.ดร.เขมรัฐ โอสถาพันธุ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ที่ได้ให้คำแนะนำ อันเป็นประโยชน์แก่งานวิจัยมาโดยตลอด ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณในความเมตตา กรุณามา ณ โอกาสนี้

ขอขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ บุญยง โล่ห์วงศ์วัฒน รองศาสตราจารย์ ดร.ธีระ เกรอต และ รองศาสตราจารย์ ดร.สุรพล สายพานิช ที่กรุณาสละเวลามาเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ในครั้งนี้ รวม ทั้งให้คำนำต่าง ๆ อันเป็นประโยชน์และช่วยแก้ไขวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จนเสร็จสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณ คณะอาจารย์ รวมถึงครูปฏิบัติการทุกท่าน ในภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้ความรู้ คำแนะนำ และความช่วยเหลือต่างๆแก่ผู้ วิจัย และขอขอบพระคุณ ทุนอุดหนุนการวิจัยต่างๆ ได้แก่ ทุนวิจัยบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์ มหาวิทยาลัย และทุนมูลนิธิ ชิน โสภณพนิช ประจำปี 2544 ที่ได้มอบเงินทุนอุดหนุนการวิจัยในครั้งนี้ และงานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนร่วมจากโครงการศูนย์วิจัยแห่งชาติด้านการจัดการสิ่งแวดล้อม และ ของเสียอัตราย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ผู้วิจัยขอขอบพระคุณมา ณ โอกาสนี้

ขอขอบพระคุณเพื่อนๆ พี่ๆ น้องๆนิสิตปริญญาโททุกท่าน ในภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม และ ห้องปฏิบัติการของโครงการศูนย์วิจัยแห่งชาติด้านการจัดการสิ่งแวดล้อมและของเสียอันตราย ที่ให้ กำลังใจอันแสนอบอุ่น และความช่วยเหลือต่าง ๆ มากมายเสมอมา และขอขอบคุณน้องยุ้ย ที่ต่อสู้ร่วม กันมาโดยตลอดไม่ว่าจะเกิดปัญหาใด ๆ

ขอขอบพระคุณครอบครัวเยาวพัฒน์ทุก ๆ ท่านทั้งพ่อบัง แม่หน่า น้องนพ ที่ให้กำลังใจและ ความช่วยเหลือด้วยดีตลอดเวลา และที่สำคัญขอขอบคุณน้องนัทสำหรับความรัก และทุกสิ่งดี ๆ ที่มีให้ กันโดยตลอด

และสุดท้ายนี้ วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้ต้องกราบขอบพระคุณ ป๊อป แม่ จอม คุณยาย และ ญาติพี่น้องทุกๆคน ที่ให้ความรัก ความเอาใจใส่ กำลังใจและกำลังทรัพย์มาโดยตลอดจนกระทั่งสำเร็จ การศึกษา

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....จ
กิตติกรรมประกาศ.....ฉ
สารบัญ.....ช
สารบัญตาราง.....ฎ
สารบัญภาพ.....ฎ
บทที่
1. บทนำ.....1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....3
2. เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....4
2.1 โครเมียม.....4
2.1.1 ไตรวาเลนท์โครเมียม.....4
2.1.2 เฮกซะวาเลนท์โครเมียม.....6
2.1.3 ความสัมพันธ์ระหว่างเฮกซะวาเลนท์โครเมียมและ ไตรวาเลนท์โครเมียม.....8
2.1.4 ความเป็นพิษของโครเมียม.....8
2.2 กลไกการเคลื่อนที่ของสารปนเปื้อนในน้ำใต้ดิน.....9
2.2.1 การพา.....10
2.2.2 การแพร่และการกระจายตัว.....10
2.3 การดูดติดผิว.....11
2.3.1 วิธีการดูดซับหรือดูดติดผิว.....11
2.3.2 กลไกการดูดซับ.....11
2.3.3 อัตราเร็วของการดูดซับ.....15

สารบัญ(ต่อ)

บทที่

หน้า

2.3.4 ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการดูดซับ.....16
2.3.5 สมดุลของการดูดซับ.....17
2.4 แบบจำลองการเคลื่อนที่ของสารปนเปื้อนแบบ 1 มิติ.....19
2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....20
3. ขั้นตอนและวิธีการดำเนินการวิจัย.....22
3.1 แผนการวิจัย.....22
3.2 ขั้นตอนการวิจัย.....22
3.3 ตัวแปรที่ใช้ในการวิจัย.....23
3.4 อุปกรณ์และสารเคมีที่ใช้ในการวิจัย.....27
3.4.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง.....27
3.4.2 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง.....27
3.5 วิธีดำเนินงานวิจัย.....30
3.5.1 การเตรียมสารละลายโครเมียม.....30
3.5.2 การศึกษาเวลาสัมผัสที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการดูดซับ
โครเมียมด้วยตัวอย่างดิน.....31
3.5.3 การศึกษาถึงสมการไอโซเทอมการดูดซับของการดูดซับ
โครเมียมด้วยตัวอย่างดิน โดยการทดลองแบบแบตช์.....31
3.5.4 การทดลองหาค่า Dispersion Coefficient ของตัวอย่างดิน
ด้วยการทดลองแบบคอลัมน์.....32
3.5.5 การวิเคราะห์การเคลื่อนที่ของโครเมียม ในน้ำใต้ดิน
ด้วยคอมพิวเตอร์ ซอฟท์แวร์.....32
3.5.6 การทำการทดลองแบบคอลัมน์ เพื่อตรวจสอบผลการ
วิเคราะห์ด้วยคอมพิวเตอร์ซอฟท์แวร์.....33

สารบัญ(ต่อ)

บทที่

หน้า

4. ผลการวิเคราะห์ข้อมูล.....34
4.1 ผลการศึกษาคุณสมบัติของตัวอย่างดิน.....34
4.2 ผลการศึกษาเวลาสัมผัสที่เหมาะสม ในการดูดซับโครเมียม ด้วยตัวอย่างดิน.....34
4.3 ผลการศึกษาถึงสมการไอโซเทอมการดูดซับ ของการดูดซับ โครเมียมด้วยตัวอย่างดิน โดยการทดลองแบบแบตช์.....36
4.4 การหาค่าพารามิเตอร์ของการดูดซับ.....49
4.5 การศึกษาผลของพีเอชที่มีต่อการดูดซับโครเมียมด้วยตัวอย่างดิน.....50
4.6 การทดลองหาค่า Dispersion Coefficient ของตัวอย่างดิน ด้วยการทดลองแบบคอลัมน์.....52
4.7 ผลการทดลองแบบคอลัมน์ เพื่อเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ด้วย คอมพิวเตอร์ซอฟท์แวร์.....56
4.8 ผลการวิเคราะห์การเคลื่อนที่ของโครเมียมในน้ำใต้ดินด้วยคอมพิวเตอร์ ซอฟท์แวร์.....59
5. สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....67
รายการอ้างอิง.....71
ภาคผนวก.....75
ภาคผนวก ก. ผลการศึกษาเวลาสัมผัสที่เหมาะสมที่สุดในการดูดซับ โครเมียมด้วยตัวอย่างดิน.....76
ภาคผนวก ข. การศึกษาถึงสมการไอโซเทอมการดูดซับของการดูดซับ โครเมียมด้วยตัวอย่างดิน โดยการทดลองแบบแบตช์.....79
ภาคผนวก ค. การหาค่าพารามิเตอร์ของการดูดซับ.....86
ภาคผนวก ง. การศึกษาผลของพีเอชที่มีต่อการดูดซับโครเมตด้วยตัวอย่างดิน.....88
ภาคผนวก จ. การทดลองหาค่า Dispersion Coefficient ของตัวอย่างดิน ด้วยการทดลองแบบคอลัมน์.....99

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

ภาคผนวก ฉ.ผลการทดลองแบบคอลัมน์ เพื่อเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์
กับผลจากคอมพิวเตอร์ซอฟท์แวร์.....108
ภาคผนวก. ข้อมูลที่ป้อน (Input) และข้อมูลที่ได้ (Output) จากโปรแกรม
HYDRUS2D.....115
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....122

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

ตารางที่ หน้า

1.1 ขอบเขตของพารามิเตอร์ในการวิจัย.....3
2.1 แสดงค่าคุณสมบัติของโครเมียม.....5
2.2 แสดงการใช้สารประกอบโครเมียมในอุตสาหกรรม.....5
3.1 ตัวแปรต่างๆที่ใช้ในการทดลองการศึกษาเวลาสัมผัสที่เหมาะสม
ในการดูดซับโครเมียมด้วยตัวอย่างดิน.....23
3.2 ตัวแปรต่างๆที่ใช้ในการทดลองการศึกษาถึงสมการไอโซเทอม
การดูดซับโครเมียมด้วยตัวอย่างดินโดยการทดลองแบบแบตช์.....24
3.3 ตัวแปรต่างๆที่ใช้ในการทดลองการหาค่าสัมประสิทธิ์การกระจายตัว
ของตัวอย่างดิน ด้วยการทดลองแบบคอลัมน์.....25
3.4 ตัวแปรต่างๆที่ใช้ในการทดลองแบบคอลัมน์ เพื่อตรวจสอบผล
การวิเคราะห์ด้วยคอมพิวเตอร์ซอฟท์แวร์.....26
4.1 คุณสมบัติของตัวอย่างดินที่ทำการศึกษา.....34
4.2 ผลการทดลองการดูดซับโครเมตที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 15 มิลลิกรัม
ต่อลิตร ที่สภาวะพี่เอชต่างๆกัน ด้วยตัวอย่างดินที่ปริมาณต่างๆ.....36
4.3 ค่า R-Square ของกราฟไอโซเทอมของการดูดซับโครเมต
ด้วยดินในแบบต่างๆ.....40
4.4 ค่าพารามิเตอร์ของการดูดซับที่หาได้จากสมการไอโซเทอมของการดูดซับ
ที่สภาวะพีเอชต่างๆ.....50
4.5 ค่าพารามิเตอร์ของการดูดซับที่ปรับแก้เพื่อให้ผลการทดลองการประมาณ
โดยโปรแกรมและการทดลองแบบคอลัมน์มีความใกล้เคียงกัน.....65

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญภาพ

รูปที่ หน้า

2.1 ความสามารถในการละลายของสารประกอบไฮดรอกไซด์ของไตรวาเลนท์โครเมียม.....7
2.2 Breakthrough Curve แสดงให้เห็นผลของการกระจายตัว (Dispersion) และการดูดซับ (Retardation).....12
2.3 แสดงปัจจัยที่มีผลต่อการกระจายตัวตามยาว (Longitudinal Dispersion) ของสารปนเปื้อนในตัวกลางพรุน.....13
2.4 แสดงรูปแบบของการเคลื่อนที่แบบการพาผสมกับการกระจายตัว (a) เปรียบเทียบกับการเคลื่อนที่แบบการพาอย่างเดียว (b).....14
3.1 ชุดการทดลองแบบคอลัมน์ทำด้วยเทฟลอน.....28
3.2 เครื่องอินดักทีฟคอปเปิลพลาสมา (Inductive Couple Plasma, ICP).....28
3.3 เครื่องเก็บตัวอย่างอัตโนมัติ (Fraction Collector).....29
3.4 เครื่องสูบชัก (Piston Pump).....29
3.5 หลอดทดลองขนาด 50 มิลลิลิตร.....30
4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพในการดูดซับโครเมตด้วยตัวอย่างดิน ที่เวลาต่างๆ.....35
4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นที่สภาวะสมดุล และความสามารถในการดูดซับของการทดลองที่พีเอช 4.....38
4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นที่สภาวะสมดุล และความสามารถในการดูดซับของการทดลองที่พีเอช 4.....38
4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นที่สภาวะสมดุล และความสามารถในการดูดซับของการทดลองที่พีเอช 4.....39
4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นที่สภาวะสมดุล และความสามารถในการดูดซับของการทดลองที่พีเอช 4.....39
4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นที่สภาวะสมดุล และความสามารถในการดูดซับของการทดลองที่พีเอช 4.....40
4.7 ไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงมัวร์ของโครเมตด้วยตัวอย่างดิน ที่พีเอช 4.....42
4.8 ไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงมัวร์ของโครเมตด้วยตัวอย่างดิน ที่พีเอช 5.....42
4.9 ไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงมัวร์ของโครเมตด้วยตัวอย่างดิน ที่พีเอช 6.....43
4.10 ไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงมัวร์ของโครเมตด้วยตัวอย่างดิน ที่พีเอช 7.....43

สารบัญภาพ(ต่อ)

รูปที่ หน้า

4.11 ไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงมัวร์ของโครเมตด้วยตัวอย่างดิน ที่พีเอช 8.....44
4.12 ไอโซเทอมการดูดซับแบบเชิงเส้นของโครเมตด้วยตัวอย่างดิน ที่พีเอช 4.....44
4.13 ไอโซเทอมการดูดซับแบบเชิงเส้นของโครเมตด้วยตัวอย่างดิน ที่พีเอช 5.....45
4.14 ไอโซเทอมการดูดซับแบบเชิงเส้นของโครเมตด้วยตัวอย่างดิน ที่พีเอช 6.....45
4.15 ไอโซเทอมการดูดซับแบบเชิงเส้นของโครเมตด้วยตัวอย่างดิน ที่พีเอช 7.....46
4.16 ไอโซเทอมการดูดซับแบบเชิงเส้นของโครเมตด้วยตัวอย่างดิน ที่พีเอช 8.....46
4.17 ไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรุนดลิชของโครเมตด้วยตัวอย่างดิน ที่พีเอช 4.....47
4.18 ไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรุนดลิชของโครเมตด้วยตัวอย่างดิน ที่พีเอช 5.....47
4.19 ไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรุนดลิชของโครเมตด้วยตัวอย่างดิน ที่พีเอช 6.....48
4.20 ไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรุนดลิชของโครเมตด้วยตัวอย่างดิน ที่พีเอช 7.....48
4.21 ไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรุนดลิชของโครเมตด้วยตัวอย่างดิน ที่พีเอช 8.....49
4.22 ความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถในการดูดซับโครเมตด้วยตัวอย่างดิน
และความเข้มข้นของโครเมตที่สภาวะสมดุลในสภาวะพีเอช 4, 5, 6, 7 และ 8
จากสมการและพารามิเตอร์ที่ได้จากผลการทดลอง.....51
4.23 ชุดอุปกรณ์การทดลองแบบคอลัมน์.....53
4.24 Breakthrough Curve ของสารละลายโบรไมด์ที่ไหลผ่านชุดคอลัมน์ที่หนึ่ง
ที่ความเข้มข้นของสารละลายโบรไมด์เริ่มต้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร.....54
4.25 Breakthrough Curve ของสารละลายโบรไมด์ที่ไหลผ่านชุดคอลัมน์ที่สอง
ที่ความเข้มข้นของสารละลายโบรไมด์เริ่มต้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร.....55
4.26 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรสารละลายที่ผ่านคอลัมน์กับอัตราความเข้มข้นของโครเมตในน้ำ
ออกต่อน้ำเข้าที่ความเข้มข้นของสารละลายเริ่มต้น 15 มก./ล. พีเอชเท่ากับ 4.....57
4.27 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรสารละลายที่ผ่านคอลัมน์กับอัตราความเข้มข้นของโครเมตในน้ำ
ออกต่อน้ำเข้าที่ความเข้มข้นของสารละลายเริ่มต้น 15 มก./ล. พีเอชเท่ากับ 6.....57
4.28 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรสารละลายที่ผ่านคอลัมน์กับอัตราความเข้มข้นของโครเมตในน้ำ
ออกต่อน้ำเข้าที่ความเข้มข้นของสารละลายเริ่มต้น 15 มก./ล. พีเอชเท่ากับ 8.....58
4.29 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรสารละลายที่ผ่านคอลัมน์กับอัตราความเข้มข้นของโครเมต
ออกต่อเข้าที่ความเข้มข้นสารละลายโครเมตเริ่มต้น 15 มก./ล. พีเอชเท่ากับ 4, 6 และ 8.....58
4.30 Breakthrough curve จากการประมาณโดยโปรแกรม HYDRUS2D .
และจากการทดลองแบบคอลัมน์ที่พีเอช 4.....60

สารบัญภาพ(ต่อ)

รูปที่ หน้า

4.31 Breakthrough curve จากการประมาณโดยโปรแกรม HYDRUS2D
และจากการทดลองแบบคอลัมน์ที่พีเอช 6.....60
4.32 Breakthrough curve จากการประมาณโดยโปรแกรม HYDRUS2D
และจากการทดลองแบบคอลัมน์ที่พีเอช 8 61
4.33 Breakthrough curve จากการทดลองแบบคอลัมน์และจากการประมาณโดยโปรแกรม
HYDRUS2D ที่ได้รับการปรับแก้ค่าพารามิเตอร์ของการดูดซับแล้วที่พีเอช 4 65
4.34 Breakthrough curve จากการทดลองแบบคอลัมน์และจากการประมาณโดยโปรแกรม
HYDRUS2D ที่ได้รับการปรับแก้ค่าพารามิเตอร์ของการดูดซับแล้วที่พีเอช 4 66
4.35 Breakthrough curve จากการทดลองแบบคอลัมน์และจากการประมาณโดยโปรแกรม
HYDRUS2D ที่ได้รับการปรับแก้ค่าพารามิเตอร์ของการดูดซับแล้วที่พีเอช 4 66

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย