


EFFECT OF PORE WATER VELOCITY ON HEXAVALENT CHROMIUM TRANSPORT THROUGH SOIL



Mr. Kasit Saengmukdah

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

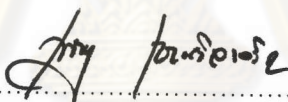
ISBN 974-17-7134-7

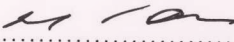
หัวข้อวิทยานิพนธ์ ผลของความเร็วน้ำผ่านรูพรุนต่อการเคลื่อนตัวของเฮกซะวาเลนท์
โครเมียมผ่านดิน
โดย นายกษิซ แสงมุกดา
สาขาวิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
อาจารย์ที่ปรึกษา อาจารย์ ดร. เขมรัฐ โอสถาปนัญ
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุชา ขาวเขียว


คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็น
ส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต



..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร. ดิเรก ลาวัณย์ศิริ)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์


..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. เพ็ชรพร เชาวกิจเจริญ)


..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(อาจารย์ ดร. เขมรัฐ โอสถาปนัญ)


..... อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุชา ขาวเขียว)


..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ วงศ์พันธ์ ลิ้มปเสนีย์)


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

กษิข แสงมุกดา : ผลของความเร็วน้ำผ่านรูพรุนต่อการเคลื่อนตัวของเฮกซะวาเลนทีโครเมียมผ่านดิน (EFFECT OF PORE WATER VELOCITY ON HEXAVALENT CHROMIUM TRANSPORT THROUGH SOIL) อ. ที่ปรึกษา : อ.ดร.เชมรัฐ โอสถาพันธ์, อ.ที่ปรึกษาร่วม : ผศ.ดร.สุธา ชาวเอียร , 172 หน้า. ISBN 974-17-7134-7

การวิจัยครั้งนี้เป็นการศึกษาความสามารถในการดูดติดผิวของเฮกซะวาเลนทีโครเมียมในดิน และความสามารถในการเคลื่อนตัวของเฮกซะวาเลนทีโครเมียมในชั้นน้ำใต้ดิน รวมทั้งและศึกษาผลของความเร็วน้ำผ่านรูพรุนที่มีต่อการเคลื่อนตัวของเฮกซะวาเลนทีโครเมียม โดยการนำตัวอย่างดินตะกอนทรายจากตัวอย่างจากนิคมอุตสาหกรรมมาบตาพุด จังหวัดระยอง ประเทศไทย ซึ่งพบว่าส่วนใหญ่เป็นดินตะกอนทราย ในการทดลองแบบกะเป็นการศึกษาความสามารถในการดูดติดผิวของดินแต่ละชนิดที่สภาวะพีเอชเริ่มต้นที่ 4 7 และ 10 และค่าความแรงไอออนที่ 0.01 และ 1.0 โมล ส่วนการทดลองแบบคอลัมน์เป็นการศึกษาถึงการป้อนสารตามรอยเข้าสู่คอลัมน์ เพื่อคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การกระจายตัวและศึกษาการเคลื่อนตัวของเฮกซะวาเลนทีโครเมียมในดินที่ความเร็วน้ำผ่านรูพรุน 2.5, 4.9, 9.9 และ 19.7 เซนติเมตรต่อชั่วโมงโดยเปรียบเทียบกับการประมาณที่ได้จากโปรแกรมคอมพิวเตอร์

จากการทดลองแบบกะ พบว่าพีเอชมีผลต่อการดูดซับของเฮกซะวาเลนทีโครเมียมในดินตัวอย่างโดยที่พีเอช 4 มีการดูดซับได้สูงกว่าที่พีเอช 7 และ 10 โดยไม่ขึ้นกับค่าความแรงไอออน และการเพิ่มความแรงไอออนนั้น มีผลต่อการดูดซับของเฮกซะวาเลนทีโครเมียมเฉพาะที่พีเอชที่ 7 โดยจะทำให้ดูดซับได้มากขึ้น และพบว่าไอโซเทอมการดูดซับของเฮกซะวาเลนทีโครเมียมสอดคล้องกับไอโซเทอมของแลงมัวร์ และไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรุนดลิช

จากผลการทดลองแบบคอลัมน์ พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การกระจายตัวของดินตัวอย่างมีค่าเท่ากับ 9.39 เซนติเมตร²/ชั่วโมง ส่วนผลการเคลื่อนตัวของเฮกซะวาเลนทีโครเมียมในคอลัมน์ดินที่ใช้ความเร็วน้ำผ่านรูพรุน 2.5 เซนติเมตรต่อชั่วโมง ให้ผลของการเคลื่อนตัวออกจากคอลัมน์ได้ช้าที่สุด และใช้เวลาเร็วมากขึ้นหากเพิ่มความเร็วน้ำผ่านรูพรุนที่มากขึ้นตามลำดับ เนื่องจากความเร็วน้ำผ่านรูพรุนที่ต่ำ ทำให้มีเวลาสัมผัสของเฮกซะวาเลนทีโครเมียมกับอนุภาคดินมากกว่า ซึ่งทำให้เพิ่มความสามารถในการดูดติดผิว และเมื่อทำการประมาณการเคลื่อนที่ด้วยโปรแกรม HYDRUS2D พบว่าโปรแกรมจะประมาณค่าการเคลื่อนตัวใกล้เคียงกับผลการทดลองเฉพาะชุดการทดลองที่ใช้ความเร็วน้ำผ่านรูพรุน 2.5 เซนติเมตรต่อชั่วโมงในทุกๆ พีเอช และช้ากว่าผลการทดลองแบบคอลัมน์ในความเร็วน้ำผ่านรูพรุนที่เพิ่มขึ้น ซึ่งอธิบายได้ว่าการเคลื่อนตัวแบบไม่เข้าสู่สมดุล ซึ่งไม่ตรงกับสมมติฐานที่ใช้ในการที่ใช้ในแบบจำลองคอมพิวเตอร์

ภาควิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
สาขาวิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
ปีการศึกษา 2547

ลายมือชื่อนิสิต..... *Nov 11, 2547*
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา..... *H. S.*
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม..... *Nov 11, 2547*

4470210421 MAJOR Environmental Engineering

KEY WORD: Chromium / Adsorption / Pore Water Velocity / Transport Modeling / Column Test

KASIT SAENGMUKDAH: EFFECT OF PORE WATER VELOCITY ON HEXAVALENT CHROMIUM TRANSPORT THROUGH SOIL.

THESIS ADVISOR: KHEMARATH OSATHAPHAN, Ph.D., THESIS COADVISOR: ASST.PROF. SUTHA KHAODHIAR, Ph.D., 172 pp. ISBN 974-17-7134-7

The objectives of this research were to study fate and transport of hexavalent chromium through soil. The effect of pore velocities on hexavalent chromium transport through soil was measured. Soil was used from Mabtapud industrial estate area, Rayong, Thailand, which is mainly silty sand. Batch experiments were to set up to study the efficiencies of hexavalent chromium adsorption at pH 4, 7, and 10 and ionic strength at 0.01 M and 1.0 M. Column experiments were aimed to calculate the dispersion coefficients by the tracer tests and to study the transportation at various pore water velocities of 2.5, 4.9, 9.9 and 19.7 cm/hr. Moreover, using HYDRUS2D computer software to simulate output data to compare the result from column experiments.

The results from batch experiments showed that the hexavalent chromium adsorption capacities increased with decreasing solution pH. The higher ionic strength resulted in an increase in hexavalent chromium adsorption capacities only at the pH 7. Finally, it was found that the adsorption Isotherm for this study was agreeable both Langmuir adsorption isotherm and Freundlich adsorption isotherm.

The results of tracer test experiments showed that the value of dispersion coefficient was $9.39 \text{ cm}^2/\text{hr}$. Then, the column experiments which were run with lowest pore water velocity at 2.5 cm/hr in any pH consumed the time more than the higher pore water velocities cause of the contact time was increased to promote the adsorption capacities of hexavalent chromium. After comparing the results and simulated data from HYDRUS2D founded that the column experiments which were run with the lowest pore water velocity at 2.5 cm/hr in any pH was similar to HYDRUS2D. In the contrast of the higher pore water velocity is different. Simulated data from HYDRUS2D were slower than the experiments. It could describe this by using the non-equilibrium transport assumption but the HYDRUS2D was not.

Department Environmental Engineering

Field of study Environmental Engineering

Academic year 2004

Student's Signature..... *mt 11/22/04*

Advisor's Signature..... *Y S*

Co-advisor's Signature..... *nan vor*

กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบพระคุณ อาจารย์ที่ปรึกษา อ.ดร. เขมรัฐ โอสถาปนธ์ และ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ผศ.ดร.สุธา ขาวเถียร ที่กรุณาให้ความรู้ คำปรึกษา คำอธิบาย และช่วยแก้ไขปัญหาให้กับผู้เขียนมาโดยตลอด การวิจัย

ขอขอบคุณคุณพ่อ คุณแม่ พี่แจ่ม พี่ภค พี่ปึก สำหรับการส่งเสริม สนับสนุนช่วยเหลือยามมีปัญหาและเป็นกำลังใจที่สำคัญที่สุด

ขอขอบคุณบัณฑิตวิทยาลัย ที่มอบทุนอุดหนุนการทำวิทยานิพนธ์ครั้งนี้ ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม และงานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากโครงการศูนย์วิจัยแห่งชาติด้านการจัดการสิ่งแวดล้อมและของเสียอันตราย ขอขอบคุณห้องปฏิบัติการของเสียอันตรายภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม โดยเฉพาะอย่างยิ่งเจ้าหน้าที่ประจำห้องปฏิบัติการที่ทุกท่าน พี่แหม่ม น้องปู และพี่ๆ น้องๆ ชั้น 11 ที่ให้ความเอื้อเฟื้อและให้ความรู้จนสามารถทำการทดลองสำเร็จลุล่วงด้วยดี ขอขอบคุณพี่พิท พี่เป่า พี่หนึ่ง พี่พนมที่ ห้องธุรการภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมทุกท่าน ที่ให้ความช่วยเหลือ และอำนวยความสะดวกให้เสมอมา และขอขอบคุณอาศัย พี่โบรท์สำหรับคอมพิวเตอร์ที่ใช้สอบวิทยานิพนธ์ ขอขอบคุณซัชชัยและคุณรังสรรค์ สนับสนุนด้านการพิมพ์รูปเล่มอย่างดีเรื่อยมา

ขอขอบคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ทุกท่าน ที่ได้ให้ความคิดเห็นเพิ่มเติมในการสอบและเขียนวิทยานิพนธ์เล่มนี้ให้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น และขอขอบคุณอาจารย์ทุกท่านของผู้เขียน ที่อบรมสั่งสอนและความรู้ ขอขอบคุณเพื่อนๆทุกคนที่คอยให้ความช่วยเหลือและ เอาใจช่วยให้วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี

ศูนย์ทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญภาพ.....	ฎ
บทที่	
1. บทนำ.....	1
1.1 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.2 ขอบเขตของการวิจัย.....	2
1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
2. เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	
2.1 โครเมียม.....	4
2.1.1 ลักษณะทั่วไป.....	4
2.1.2 เสกชะวาเลนที่โครเมียม.....	6
2.1.3 ความเป็นพิษต่อมนุษย์.....	7
2.2 กระบวนการเคลื่อนที่ของสารปนเปื้อนในน้ำใต้ดิน.....	8
2.2.1 การพา.....	9
2.2.2 การแพร่และการกระจายตัว.....	10
2.2.3 การดูดซับ.....	13
2.3 การดูดซับ.....	13
2.3.1 กลไกการดูดซับ.....	13
2.3.2 การเคลื่อนที่ของการดูดซับ.....	15
2.3.3 การดูดซับแบบสมดุล.....	16
2.3.4 การดูดซับแบบไม่สมดุล.....	24
2.3.5 ค่าคงที่ของการดูดซับ และค่าการหน่วงการเคลื่อนที่.....	20
2.3.6 ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการดูดซับ.....	22
2.4 แบบจำลองการเคลื่อนที่ของสารปนเปื้อนแบบ 1 มิติ.....	23

บทที่	หน้า
2.5 การบำบัดฟื้นฟูโดยระบบสูบแล้วบำบัด	25
2.6 ทบทวนเอกสารการวิจัยที่เกี่ยวข้อง	28
3. ขั้นตอนและวิธีดำเนินการวิจัย.....	31
3.1 แผนการวิจัย	31
3.2 ขั้นตอนการวิจัย.....	31
3.3 ตัวแปรที่ใช้ในการวิจัย.....	32
3.4 วัสดุอุปกรณ์ และ สารเคมีที่ใช้ในการวิจัย.....	35
3.4.1 วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย.....	35
3.4.2 สารเคมีใช้ในงานวิจัย.....	41
3.5 วิธีการวิเคราะห์	41
3.6 วิธีดำเนินการวิจัย.....	41
3.6.1 การเตรียมและศึกษาตัวอย่างดินในการทดลอง	41
3.6.2 การเตรียมสารละลายโครเมต.....	43
3.6.3 การศึกษาการหาเวลาสัมพัทธ์ที่เหมาะสมสำหรับการดูดซับโครเมต ด้วยตัวอย่างดิน.....	43
3.6.4 การทดลองการดูดซับของโครเมตในตัวอย่างดินด้วยการทดลอง แบบกะ (Batch Test Study)	44
3.6.5 การทดลองหาค่าสัมประสิทธิ์การกระจายตัวของตัวอย่างดิน (Dispersion Coefficient) ด้วยการทดลองแบบคอลัมน์.....	45
3.6.6 การทดลองผลของความเร็วน้ำผ่านรูพรุนต่อการเคลื่อนตัว ของโครเมตด้วยการทดลองแบบคอลัมน์.....	46
3.6.7 การจำลองการเคลื่อนตัวของโครเมตโดยใช้แบบจำลองคอมพิวเตอร์ เปรียบเทียบกับผลการทดลองจริง.....	48
4. ผลการวิเคราะห์ข้อมูล.....	49
4.1 ผลการศึกษาเวลาสัมพัทธ์ที่เหมาะสมในการดูดซับโครเมตด้วยตัวอย่างดิน.....	49
4.2 การศึกษาความสามารถในการดูดซับของโครเมตด้วยตัวอย่างดิน โดยการศึกษาทดลองแบบกะ (Batch Test Study).....	50
4.3 การหาค่าตัวแปรของการดูดซับ (Adsorption Parameters).....	54

บทที่	หน้า
4.4 การทดลองหาค่าคงที่ของการแพร่กระจาย (Dispersion Coefficient) ของตัวอย่างดินด้วยการทดลองแบบคอลัมน์.....	67
4.5 ผลการทดลองผลของความเร็วน้ำผ่านรูพรุนต่อการเคลื่อนตัวของโครเมต โดยใช้การทดลองแบบคอลัมน์ (Column Test Study).....	68
4.6 การวิเคราะห์การเคลื่อนตัวของโครเมตในน้ำใต้ดินด้วยแบบจำลองคอมพิวเตอร์.....	91
5. สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	101
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	101
5.2 ความสำคัญทางวิศวกรรมศาสตร์ การนำไปใช้ประโยชน์.....	103
5.3 ข้อเสนอแนะ.....	104
รายการอ้างอิง.....	105
ภาคผนวก.....	109
ภาคผนวก ก. ผลการทดลองการดูดซับของโครเมตบนดินตัวอย่าง.....	110
ภาคผนวก ข. การหาค่าพารามิเตอร์ของการดูดซับและความสามารถในการดูดซับ ...	119
ภาคผนวก ค. การทดลองหาค่าสัมประสิทธิ์การกระจายตัว ของตัวอย่างดิน ด้วยการทดลองแบบคอลัมน์.....	123
ภาคผนวก ง. ผลการทดลองแบบคอลัมน์การเคลื่อนตัวของโครเมต	130
ภาคผนวก จ. ชุดข้อมูลที่ป้อนสู่โปรแกรม HYDRUS2D	159
ประวัติผู้ทำวิทยานิพนธ์.....	172

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 คุณสมบัติของโครเมียม.....	5
2.2 การใช้สารประกอบโครเมียมในอุตสาหกรรม	5
3.1 ตัวแปรต่างๆ ที่ใช้ในการทดลองศึกษาเวลาสัมพัทธ์ที่เหมาะสมสำหรับการดูดซับด้วยโครเมต.....	32
3.2 ตัวแปรต่างๆ ที่ใช้ในการทดลองการศึกษาการดูดซับด้วยโครเมตในตัวอย่างดินด้วยการทดลองแบบกะ.....	33
3.3 ตัวแปรต่างๆ ที่ใช้ในการทดลองหาค่าสัมประสิทธิ์การกระจายตัว (Dispersion Coefficient) ของตัวอย่างดินด้วยการทดลองแบบคอลัมน์.....	34
3.4 ตัวแปรต่างๆ ที่ใช้ในการทดลองผลของความเร็วน้ำผ่านรูพรุนต่อการเคลื่อนตัวของโครเมตโดยการทดลองแบบคอลัมน์.....	34
3.5 วิธีการที่ใช้ในการวิเคราะห์สารในการวิจัย.....	41
3.6 คุณสมบัติของดินตัวอย่างในการวิจัย.....	42
3.7 คำอธิบายตัวแปรต่างๆ ที่ใช้ในการจำลองข้อมูลการเคลื่อนตัวของโครเมตด้วยแบบจำลอง HYDRUS2D.....	48
4.1 ค่า R-Square ของกราฟไอโซเทอมการดูดซับโครเมตด้วยดินตัวอย่างในแบบต่างๆ	64
4.2 สมการไอโซเทอมการดูดซับของโครเมตและพารามิเตอร์ของการดูดซับแบบแลงมัวร์ของโครเมตด้วยตัวอย่างดินที่สภาวะต่างๆ	65
4.3 เปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับ และการคายตัวของโครเมตรวมทั้งค่าประสิทธิภาพการคายตัวของโครเมตในชุดการทดลองที่ 4, 7 และ 10 ที่ความเร็วน้ำผ่านรูพรุน 2.5, 4.9, 9.9 และ 19.9 เซนติเมตรต่อชั่วโมง.....	90

สารบัญภาพ

รูปที่	หน้า
2.1 การกระจายตัวของ Cr (VI) เป็นฟังก์ชันกับพีเอช	6
2.2 สัดส่วนของไบโครเมต และ ไดโครเมต ที่พีเอช 4 เป็นฟังก์ชัน ของความเข้มข้น Cr(VI) ทั้งหมด	7
2.3 Break Through Curve แสดงให้เห็นผลของการกระจายตัวและผลของการดูดซับ.....	10
2.4 ปัจจัยที่ทำให้เกิดการกระจายตัวตามยาว ของสารปนเปื้อน ในตัวกลางรูพรุน	11
2.5 รูปแบบธรรมชาติของ Plume จากแหล่งกำเนิดอย่างต่อเนื่องที่มีการเคลื่อนที่แบบการพาพร้อมกับการกระจายตัว (a.) เปรียบเทียบกับการเคลื่อนที่ด้วยการพาเพียงอย่างเดียว (b.).....	12
2.6 Linear Adsorption Isotherm	17
2.7 Langmuir Adsorption Isotherm	18
2.8 Freundlich Adsorption Isotherm	19
2.9 ความเข้มข้น กับช่วงเวลาการสูบหรือปริมาตร แสดงการเกิดการคายตัวกลับ.....	20
2.10 ตัวอย่างผลที่ได้จากโปรแกรม HYDRUS ซึ่งแสดงเป็นค่าต่าง ๆ แปรผันตามเวลา	25
2.11 แสดงภาพโดยรวมของกระบวนการ Pump and Treat	27
2.12 ปรากฏการณ์ Tailing กับเวลาการบำบัดฟื้นฟู	28
3.1 เครื่อง AAS : Atomic Absorption Spectrophotometer	36
3.2 เครื่อง IC : Ion Chromatography	36
3.3 เครื่องเขย่า(Shaker).....	37
3.4 เครื่องชั่งแบบละเอียด (Analytical Balance).....	37
3.5 เครื่องหมุนเหวี่ยง (Centrifuge).....	38
3.6 ชุดคอลัมน์เทพลอน.....	38
3.7 เครื่องสูบน้ำแบบกระบอกชัก (Piston Pump).....	39
3.8 หลอดการทดลองขนาด 50 มิลลิลิตร.....	39
3.9 อุปกรณ์เก็บตัวอย่างอัตโนมัติ (Fraction Collector).....	40
3.10 ชุดอุปกรณ์การทดลองแบบคอลัมน์.....	40
3.11 ตัวอย่างดินที่ใช้ในการทดลอง.....	43

3.12 การทดลองการหาค่าสัมประสิทธิ์การกระจายตัวโดยใช้สารละลายโบรไมด์.....	46
3.13 การทดลองการเคลื่อนตัวของโครเมตที่ความเร็วน้ำผ่านรูพรุนต่างๆ.....	47
4.1 ความสัมพันธ์ของเวลาสัมพัทธ์กับประสิทธิภาพของการดูดซับโครเมต (%).....	49
4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นที่สภาวะสมดุล (Ce) และความสามารถ ในการดูดซับโครเมต (Q) ที่ความแรงไอออน 0.01 โมล ที่ค่าพีเอชต่างๆ.....	51
4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นที่สภาวะสมดุล (Ce) และความสามารถ ในการดูดซับโครเมต (Q) ที่ความแรงไอออน 1.0 โมล ที่ค่าพีเอชต่างๆ.....	51
4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างระหว่างความเข้มข้นที่สภาวะสมดุล (Ce) และ ความสามารถในการดูดซับโครเมต (Q) ที่ค่าพีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 4 ที่ความแรงไอออนต่างๆ.....	53
4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างระหว่างความเข้มข้นที่สภาวะสมดุล (Ce) และ ความสามารถในการดูดซับโครเมต (Q) ที่ค่าพีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 7 ที่ความแรงไอออนต่างๆ.....	53
4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างระหว่างความเข้มข้นที่สภาวะสมดุล (Ce) และความสามารถในการดูดซับโครเมต (Q) ที่ค่าพีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 10 ที่ความแรงไอออนต่างๆ.....	54
4.7 ไอโซเทอมการดูดซับแบบเชิงเส้นของโครเมตด้วยดินตัวอย่างที่พีเอช 4 ความแรงไอออน 0.01 โมล.....	55
4.8 ไอโซเทอมการดูดซับแบบเชิงเส้นของโครเมตด้วยดินตัวอย่างที่พีเอช 7 ความแรงไอออน 0.01 โมล.....	55
4.9 ไอโซเทอมการดูดซับแบบเชิงเส้นของโครเมตด้วยดินตัวอย่างที่พีเอช 10 ความแรงไอออน 0.01 โมล.....	56
4.10 ไอโซเทอมการดูดซับแบบเชิงเส้นของโครเมตด้วยดินตัวอย่างที่พีเอช 4 ความแรงไอออน 1.0 โมล.....	56
4.11 ไอโซเทอมการดูดซับแบบเชิงเส้นของโครเมตด้วยดินตัวอย่างที่พีเอช 7 ความแรงไอออน 1.0 โมล.....	57
4.12 ไอโซเทอมการดูดซับแบบเชิงเส้นของโครเมตด้วยดินตัวอย่างที่พีเอช 10 ความแรงไอออน 1.0 โมล.....	57

4.13 ไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงมัวร์ของโครเมตด้วยดินตัวอย่างที่พีเอช 4 ความแรงไอออน 0.01 โมล.....	58
4.14 ไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงมัวร์ของโครเมตด้วยดินตัวอย่างที่พีเอช 7 ความแรงไอออน 0.01 โมล.....	58
4.15 ไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงมัวร์ของโครเมตด้วยดินตัวอย่างที่พีเอช 10 ความแรงไอออน 0.01 โมล.....	59
4.16 ไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงมัวร์ของโครเมตด้วยดินตัวอย่างที่พีเอช 4 ความแรงไอออน 1.0 โมล.....	59
4.17 ไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงมัวร์ของโครเมตด้วยดินตัวอย่างที่พีเอช 7 ความแรงไอออน 1.0 โมล.....	60
4.18 ไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงมัวร์ของโครเมตด้วยดินตัวอย่างที่พีเอช 10 ความแรงไอออน 1.0 โมล.....	60
4.19 ไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรุนดลิชของโครเมตด้วยดินตัวอย่างที่พีเอช 4 ความแรงไอออน 0.01 โมล.....	61
4.20 ไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรุนดลิชของโครเมตด้วยดินตัวอย่างที่พีเอช 7 ความแรงไอออน 0.01 โมล.....	61
4.21 ไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรุนดลิชของโครเมตด้วยดินตัวอย่างที่พีเอช 10 ความแรงไอออน 0.01 โมล.....	62
4.22 ไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรุนดลิชของโครเมตด้วยดินตัวอย่างที่พีเอช 4 ความแรงไอออน 1.0 โมล.....	62
4.23 ไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรุนดลิชของโครเมตด้วยดินตัวอย่างที่พีเอช 7 ความแรงไอออน 1.0 โมล.....	63
4.24 ไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรุนดลิชของโครเมตด้วยดินตัวอย่างที่พีเอช 10 ความแรงไอออน 1.0 โมล.....	64
4.25 ผลของการดูดซับของโครเมตที่ค่าพีเอช 4, 7, 10 ที่ความแรงไอออน 0.01 โมล.....	66
4.26 ผลของการดูดซับของโครเมตที่ค่าพีเอช 4, 7, 10 ที่ความแรงไอออน 1.0 โมล.....	66
4.27 กราฟอัตราส่วนระหว่างความเข้มข้นของโบรไมด์ขาออกกับความเข้มข้นขาเข้า กับเวลาที่ใช้ในการทดลองที่ไหลผ่านคอลัมน์ชุดที่ 1.....	67

- 4.45 กราฟเปรียบเทียบอัตราส่วนระหว่างความเข้มข้นของโครเมตขาออกกับความเข้มข้นขาเข้ากับปริมาตรสารละลายโครเมตเป็นจำนวนเท่าของ Pore Volume ที่ใช้ในการทดลองที่ความเร็วน้ำผ่านรูพรุน 2.5, 4.9, 9.9 และ 19.7 เซนติเมตรต่อชั่วโมงที่พีเอชเริ่มต้น 7 และความแรงไอออน 0.01 โมล.....78
- 4.46 กราฟเปรียบเทียบอัตราส่วนระหว่างความเข้มข้นของโครเมตขาออกกับความเข้มข้นขาเข้ากับปริมาตรสารละลายโครเมตเป็นจำนวนเท่าของ Pore Volume ที่ใช้ในการทดลองที่ความเร็วน้ำผ่านรูพรุน 2.5, 4.9, 9.9 และ 19.7 เซนติเมตรต่อชั่วโมงที่พีเอชเริ่มต้น 10 และความแรงไอออน 0.01 โมล.....78
- 4.47 กราฟเปรียบเทียบอัตราส่วนระหว่างความเข้มข้นของโครเมตขาออกกับความเข้มข้นขาเข้ากับปริมาตรสารละลายโครเมตเป็นจำนวนเท่าของ Pore Volume และความสามารถในการดูดซับของโครเมต ที่ความเร็วน้ำผ่านรูพรุน 2.5, 4.9, 9.9 และ 19.7 เซนติเมตรต่อชั่วโมงที่พีเอชเริ่มต้น 4 และความแรงไอออน 0.01 โมล.....80
- 4.48 กราฟเปรียบเทียบอัตราส่วนระหว่างความเข้มข้นของโครเมตขาออกกับความเข้มข้นขาเข้ากับปริมาตรสารละลายโครเมตเป็นจำนวนเท่าของ Pore Volume และความสามารถในการดูดซับของโครเมต ที่ความเร็วน้ำผ่านรูพรุน 2.5, 4.9, 9.9 และ 19.7 เซนติเมตรต่อชั่วโมงที่พีเอชเริ่มต้น 7 และความแรงไอออน 0.01 โมล.....81
- 4.49 กราฟเปรียบเทียบอัตราส่วนระหว่างความเข้มข้นของโครเมตขาออกกับความเข้มข้นขาเข้ากับปริมาตรสารละลายโครเมตเป็นจำนวนเท่าของ Pore Volume และความสามารถในการดูดซับของโครเมต ที่ความเร็วน้ำผ่านรูพรุน 2.5, 4.9, 9.9 และ 19.7 เซนติเมตรต่อชั่วโมงที่พีเอชเริ่มต้น 10 และความแรงไอออน 0.01 โมล.....82

รูปที่

- 4.50 กราฟเปรียบเทียบอัตราส่วนระหว่างความเข้มข้นของโครเมตขาออกกับความเข้มข้นขาเข้ากับปริมาตรสารละลายโครเมตเป็นจำนวนเท่าของ Pore Volume และความสามารถในการดูดซับของโครเมต ที่ความเร็วน้ำผ่านรูพรุน 2.5 เซนติเมตรต่อชั่วโมง ที่พีเอช 4,7 และ 10 และความแรงไอออน 0.01 โมล.....83
- 4.51 กราฟเปรียบเทียบอัตราส่วนระหว่างความเข้มข้นของโครเมตขาออกกับความเข้มข้นขาเข้ากับปริมาตรสารละลายโครเมตเป็นจำนวนเท่าของ Pore Volume และความสามารถในการดูดซับของโครเมต ที่ความเร็วน้ำผ่านรูพรุน 4.9 เซนติเมตรต่อชั่วโมง ที่พีเอช 4,7 และ 10 และความแรงไอออน 0.01 โมล.....84
- 4.52 กราฟเปรียบเทียบอัตราส่วนระหว่างความเข้มข้นของโครเมตขาออกกับความเข้มข้นขาเข้ากับปริมาตรสารละลายโครเมตเป็นจำนวนเท่าของ Pore Volume และความสามารถในการดูดซับของโครเมต ที่ความเร็วน้ำผ่านรูพรุน 9.9 เซนติเมตรต่อชั่วโมง ที่พีเอช 4,7 และ 10 และความแรงไอออน 0.01 โมล.....85
- 4.53 กราฟเปรียบเทียบอัตราส่วนระหว่างความเข้มข้นของโครเมตขาออกกับความเข้มข้นขาเข้ากับปริมาตรสารละลายโครเมตเป็นจำนวนเท่าของ Pore Volume และความสามารถในการดูดซับของโครเมต ที่ความเร็วน้ำผ่านรูพรุน 19.7 เซนติเมตรต่อชั่วโมง ที่พีเอช 4,7 และ 10 และความแรงไอออน 0.01 โมล.....86
- 4.54 กราฟเปรียบเทียบอัตราส่วนระหว่างความเข้มข้นของโครเมตขาออกกับความเข้มข้นขาเข้ากับปริมาตรสารละลายโครเมตเป็นจำนวนเท่าของ Pore Volume และความสามารถในการคายตัวของโครเมต ที่ความเร็วน้ำผ่านรูพรุน 2.5, 4.9, 9.9 และ 19.7 เซนติเมตรต่อชั่วโมง หลังจากการทดสอบการดูดซับที่พีเอช 4 ด้วยน้ำปราศจากไอออน.....87

รูปที่

- 4.55 กราฟเปรียบเทียบอัตราส่วนระหว่างความเข้มข้นของโครเมตขาออกกับความเข้มข้นขาเข้ากับปริมาตรสารละลายโครเมตเป็นจำนวนเท่าของ Pore Volume และความสามารถในการคายตัวของโครเมต ที่ความเร็วน้ำผ่านรูพรุน 2.5, 4.9, 9.9 และ 19.7 เซนติเมตรต่อชั่วโมง หลังจากการทดสอบการดูดซับที่พีเอช 7 ด้วยน้ำปราศจากไอออน.....88
- 4.56 กราฟเปรียบเทียบอัตราส่วนระหว่างความเข้มข้นของโครเมตขาออกกับความเข้มข้นขาเข้ากับปริมาตรสารละลายโครเมตเป็นจำนวนเท่าของ Pore Volume และความสามารถในการคายตัวของโครเมต ที่ความเร็วน้ำผ่านรูพรุน 2.5, 4.9, 9.9 และ 19.7 เซนติเมตรต่อชั่วโมง หลังจากการทดสอบการดูดซับที่พีเอช 10 ด้วยน้ำปราศจากไอออน.....89
- 4.57 กราฟเปรียบเทียบอัตราส่วนระหว่างความเข้มข้นของโครเมตขาออกกับความเข้มข้นขาเข้ากับปริมาตรสารละลายโครเมตเป็นจำนวนเท่าของ Pore Volume กับการจำลองข้อมูลโดยโปรแกรม HYDRUS2D ที่ความเร็วน้ำผ่านรูพรุน 2.5 เซนติเมตรต่อชั่วโมง ที่พีเอช 4 ความแรงไอออน 0.01 โมล.....92
- 4.58 กราฟเปรียบเทียบอัตราส่วนระหว่างความเข้มข้นของโครเมตขาออกกับความเข้มข้นขาเข้ากับปริมาตรสารละลายโครเมตเป็นจำนวนเท่าของ Pore Volume กับการจำลองข้อมูลโดยโปรแกรม HYDRUS2D ที่ความเร็วน้ำผ่านรูพรุน 4.9 เซนติเมตรต่อชั่วโมง ที่พีเอช 4 ความแรงไอออน 0.01 โมล.....93
- 4.59 กราฟเปรียบเทียบอัตราส่วนระหว่างความเข้มข้นของโครเมตขาออกกับความเข้มข้นขาเข้ากับปริมาตรสารละลายโครเมตเป็นจำนวนเท่าของ Pore Volume กับการจำลองข้อมูลโดยโปรแกรม HYDRUS2D ที่ความเร็วน้ำผ่านรูพรุน 9.9 เซนติเมตรต่อชั่วโมง ที่พีเอช 4 ความแรงไอออน 0.01 โมล.....93

4.60	กราฟเปรียบเทียบอัตราส่วนระหว่างความเข้มข้นของโครเมตขาออกกับ ความเข้มข้นขาเข้ากับปริมาตรสารละลายโครเมตเป็นจำนวนเท่าของ Pore Volume กับการจำลองข้อมูลโดยโปรแกรม HYDRUS2D ที่ความเร็วน้ำผ่านรูพรุน 19.7 เซนติเมตรต่อชั่วโมง ที่พีเอช 4 ความแรงไอออน 0.01 โมล.....	94
4.61	กราฟเปรียบเทียบอัตราส่วนระหว่างความเข้มข้นของโครเมตขาออกกับ ความเข้มข้นขาเข้ากับปริมาตรสารละลายโครเมตเป็นจำนวนเท่าของ Pore Volume กับการจำลองข้อมูลโดยโปรแกรม HYDRUS2D ที่ความเร็วน้ำผ่านรูพรุน 2.5 เซนติเมตรต่อชั่วโมง ที่พีเอช 7 ความแรงไอออน 0.01 โมล.....	95
4.62	กราฟเปรียบเทียบอัตราส่วนระหว่างความเข้มข้นของโครเมตขาออกกับ ความเข้มข้นขาเข้ากับปริมาตรสารละลายโครเมตเป็นจำนวนเท่าของ Pore Volume กับการจำลองข้อมูลโดยโปรแกรม HYDRUS2D ที่ความเร็วน้ำผ่านรูพรุน 4.9 เซนติเมตรต่อชั่วโมง ที่พีเอช 7 ความแรงไอออน 0.01 โมล.....	95
4.63	กราฟเปรียบเทียบอัตราส่วนระหว่างความเข้มข้นของโครเมตขาออกกับ ความเข้มข้นขาเข้ากับปริมาตรสารละลายโครเมตเป็นจำนวนเท่าของ Pore Volume กับการจำลองข้อมูลโดยโปรแกรม HYDRUS2D ที่ความเร็วน้ำผ่านรูพรุน 9.9 เซนติเมตรต่อชั่วโมง ที่พีเอช 7 ความแรงไอออน 0.01 โมล.....	96
4.64	กราฟเปรียบเทียบอัตราส่วนระหว่างความเข้มข้นของโครเมตขาออกกับ ความเข้มข้นขาเข้ากับปริมาตรสารละลายโครเมตเป็นจำนวนเท่าของ Pore Volume กับการจำลองข้อมูลโดยโปรแกรม HYDRUS2D ที่ความเร็วน้ำผ่านรูพรุน 19.7 เซนติเมตรต่อชั่วโมง ที่พีเอช 7 ความแรงไอออน 0.01 โมล.....	96

- 4.65 กราฟเปรียบเทียบอัตราส่วนระหว่างความเข้มข้นของโครเมตชาออกกับ
ความเข้มข้นขาเข้ากับปริมาตรสารละลายโครเมตเป็นจำนวนเท่าของ
Pore Volume กับการจำลองข้อมูลโดยโปรแกรม HYDRUS2D
ที่ความเร็วน้ำผ่านรูพรุน 2.5 เซนติเมตรต่อชั่วโมง ที่พีเอช 10
ความแรงไอออน 0.01 โมล.....97
- 4.66 กราฟเปรียบเทียบอัตราส่วนระหว่างความเข้มข้นของโครเมตชาออกกับ
ความเข้มข้นขาเข้ากับปริมาตรสารละลายโครเมตเป็นจำนวนเท่าของ
Pore Volume กับการจำลองข้อมูลโดยโปรแกรม HYDRUS2D
ที่ความเร็วน้ำผ่านรูพรุน 4.9 เซนติเมตรต่อชั่วโมง ที่พีเอช 10
ความแรงไอออน 0.01 โมล.....98
- 4.67 กราฟเปรียบเทียบอัตราส่วนระหว่างความเข้มข้นของโครเมตชาออกกับ
ความเข้มข้นขาเข้ากับปริมาตรสารละลายโครเมตเป็นจำนวนเท่าของ
Pore Volume กับการจำลองข้อมูลโดยโปรแกรม HYDRUS2D
ที่ความเร็วน้ำผ่านรูพรุน 9.9 เซนติเมตรต่อชั่วโมง ที่พีเอช 10
ความแรงไอออน 0.01 โมล.....98
- 4.68 กราฟเปรียบเทียบอัตราส่วนระหว่างความเข้มข้นของโครเมตชาออกกับ
ความเข้มข้นขาเข้ากับปริมาตรสารละลายโครเมตเป็นจำนวนเท่าของ
Pore Volume กับการจำลองข้อมูลโดยโปรแกรม HYDRUS2D
ที่ความเร็วน้ำผ่านรูพรุน 19.7 เซนติเมตรต่อชั่วโมง ที่พีเอช 10
ความแรงไอออน 0.01 โมล.....99