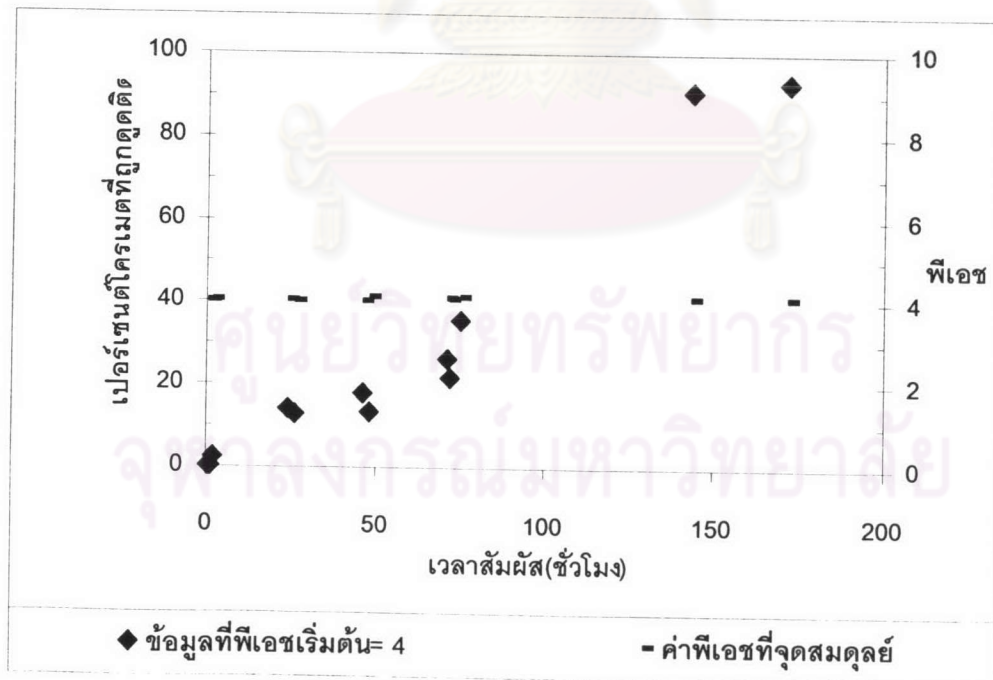


ผลการวิเคราะห์ข้อมูล

5.1 ผลการศึกษาเวลาสัมผัสนี้ที่เหมาะสมในการดูดติดผิวของโครเมตด้วยตัวอย่างดิน

การศึกษาผลของเวลาสัมผัสนี้ที่เหมาะสม ในการดูดติดผิวของโครเมตด้วยตัวอย่างดิน โดย ให้ความเข้มข้นของสารละลายโครเมตเริ่มต้น 5.2 มิลลิกรัมโครเมียมต่อลิตร (0.1 มิลลิโมลต่อลิตร) ปริมาตรสารละลาย 50 มิลลิลิตร ต่อปริมาณตัวอย่างดิน 1 กรัม โดยปรับให้สารละลายมีค่าพีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 4 นำหลอดทดลองทั้งหมดไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่า ที่ความเร็วรอบของการเขย่าเท่ากับ 200 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิห้อง

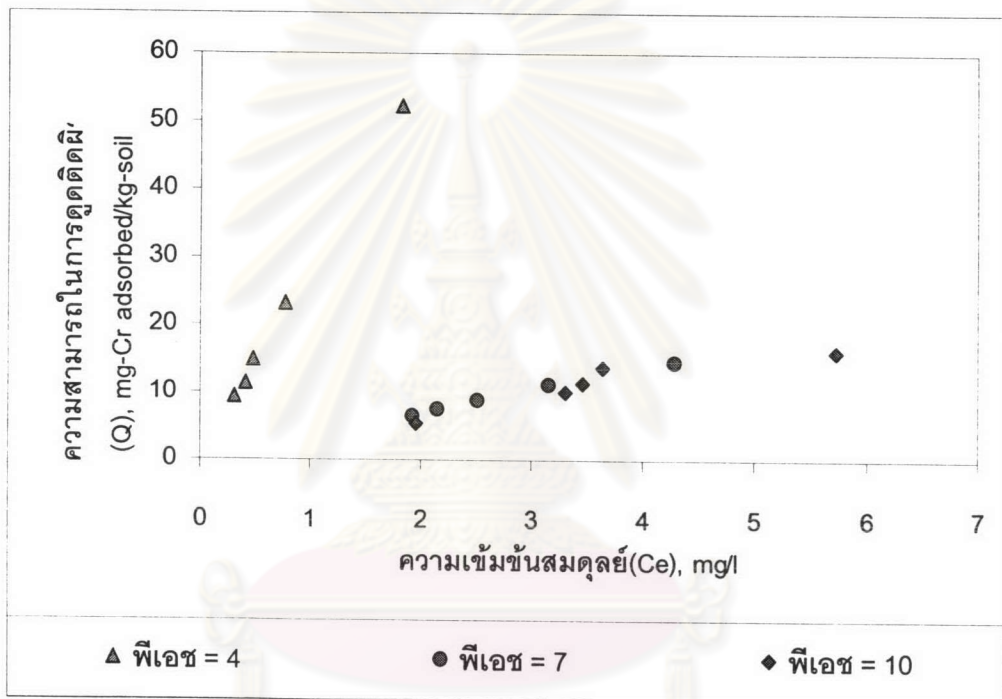
ผลการศึกษาเวลาสัมผัสนี้ที่เหมาะสมเมื่อทำการวิเคราะห์ ที่เวลาสัมผัส 0.5 1 2 24 26 46 48 71 72 75 144 และ 172 ชั่วโมง พบว่าที่พีเอช 4 ประสิทธิภาพการดูดติดผิวจะเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องตามระยะเวลาสัมผัสที่เพิ่มขึ้น โดยมีค่าสูงสุดจนกระทั่งเริ่มคงที่ (เข้าสู่สภาวะสมดุล) ที่ชั่วโมงที่ 144 ดังนั้นจึงเลือกเวลาสัมผัสที่ 144 ชั่วโมงเป็นเวลาสัมผัสที่เหมาะสม ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 5.1 และรายละเอียดผลการศึกษาแสดงในภาคผนวก ก.



รูปที่ 5.1 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการดูดติดผิวของโครเมตด้วยดินตัวอย่างในการศึกษาเวลาสัมผัสนี้ที่เหมาะสม

5.2 การศึกษาถึงความสามารถการดูดติดผิวของโครเมตด้วยตัวอย่างดินที่พีเอชต่าง ๆ

ทำการทดลองแบบแบตช์ โดยใช้สารละลายโครเมตสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้น 5.2 มิลลิกรัมของโครเมียมต่อลิตร (ประมาณ 0.1 มิลลิโมลต่อลิตร) ที่มีการปรับพีเอชเริ่มต้น 3 ค่าพีเอช คือ 4 7 และ 10 ซึ่งในการศึกษาความสามารถในการดูดติดผิวของโครเมตด้วยตัวอย่างดิน ใช้ปริมาณดิน 3 7 11 15 และ 20 กรัม เป็นเวลา 144 ชั่วโมง ผลการทดลองจำแนกตามสภาวะพีเอชเริ่มต้นแสดงดังรูปที่ 5.2 และรายละเอียดผลการศึกษาแสดงในภาคผนวก ข.



รูปที่ 5.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นที่สภาวะสมดุลและความสามารถในการดูดติดผิวของโครเมตที่สภาวะพีเอชต่างๆ

เมื่อพิจารณาจากความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มข้นที่สภาวะสมดุล (Ce) และค่าความสามารถในการดูดติดผิว (Q) ดังรูปที่ 5.2 จะเห็นได้ว่า ที่พีเอชเริ่มต้น 4 มีความสามารถในการดูดติดผิวได้สูงที่สุดอย่างชัดเจนเนื่องจากที่พีเอชต่ำปริมาณไฮโดรเจนไอออน ซึ่งมีประจุไฟฟ้าเป็นบวกในสารละลายมีปริมาณมาก ทำให้ศักย์ไฟฟ้ารอบๆอนุภาคเม็ดดินสูงขึ้น ทำให้ความสามารถในการดูดติดผิวของโครเมตบนดินสูง (Stollenwerk และ Grove, 1985) รองลงมาคือที่พีเอช 7 และ 10 ตามลำดับ โดยที่พีเอช 7 และ 10 มีความสามารถในการดูดติดผิวใกล้เคียงกัน

5.3 การศึกษาสมการไอโซเทอมของการดูดติดผิว (Adsorption Isotherm) ของโครเมต ด้วยตัวอย่างดินโดยการศึกษาทดลองแบบแบดซ์

เมื่อนำข้อมูลผลการทดลอง ความสามารถในการดูดติดผิวของโครเมต และ ความเข้มข้นที่สภาวะสมดุล มาทำการสร้างกราฟไอโซเทอมของการดูดติดผิวใน 3 แบบ เช่น ไอโซเทอมของการดูดติดผิวแบบเชิงเส้น (Linear Adsorption Isotherm) แบบแลงมัวร์ (Langmuir Adsorption Isotherm) และแบบฟรุนดลิช (Freundlich Adsorption Isotherm) เพื่อพิจารณาว่าการดูดติดผิวของโครเมต ด้วยดินตัวอย่างในการทดลองนี้ จะสอดคล้องกับไอโซเทอมของการดูดติดผิวแบบใด ซึ่งสมการไอโซเทอมแบบเชิงเส้น ดังแสดงในสมการที่ (3.11) คือ

$$Q = K_d C_e \quad (3.11)$$

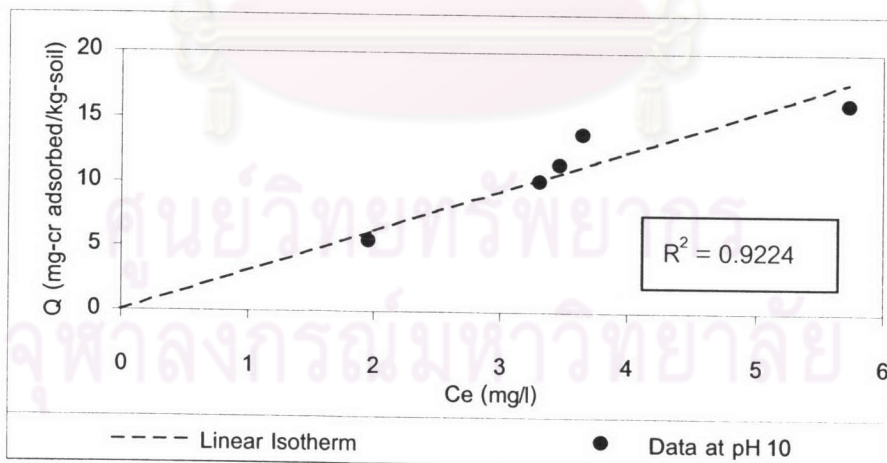
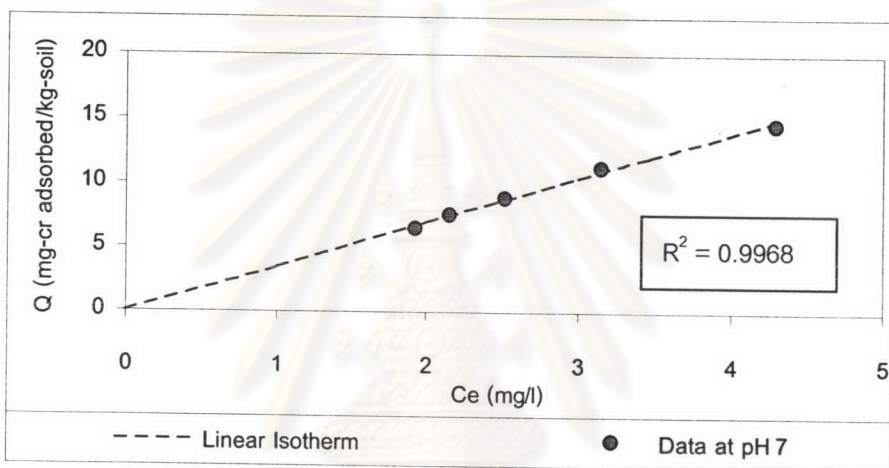
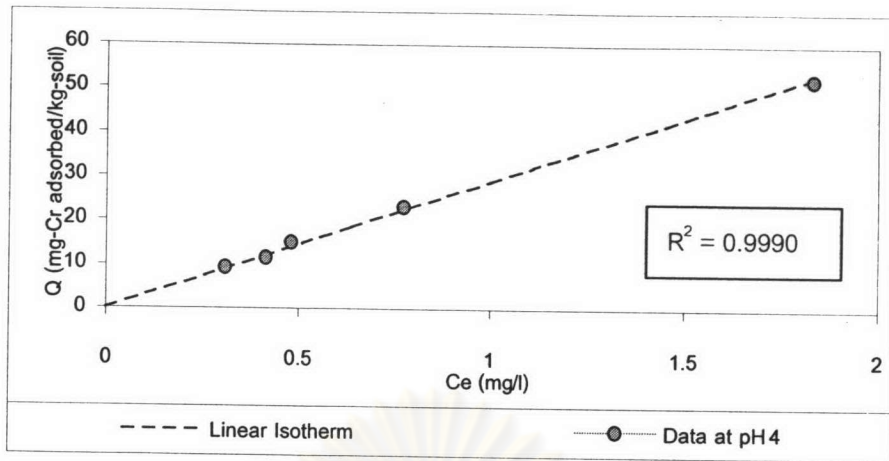
ส่วนสมการไอโซเทอมของแลงมัวร์ แสดงในสมการที่ (3.12) คือ

$$Q = \frac{abC_e}{(1 + bC_e)} \quad (3.12)$$

และสำหรับสมการไอโซเทอมแบบฟรุนดลิช จะแสดงในสมการที่ (3.13) คือ

$$Q = K_F C_e^{1/n} \quad (3.13)$$

ซึ่งจากสมการความสัมพันธ์ดังกล่าวสามารถใช้แบบจำลองในการสร้างเส้นแนวโน้มเพื่อหาค่าคงที่ในการดูดติดผิว โดยใช้โปรแกรมคำนวณสำเร็จรูป Curve Expert หาค่าคงที่ได้โดยตรงจากกราฟระหว่าง Q และ C_e ดังแสดงในรูปที่ 5.3 ถึง 5.5 และแสดงรายละเอียดในภาคผนวก ข.

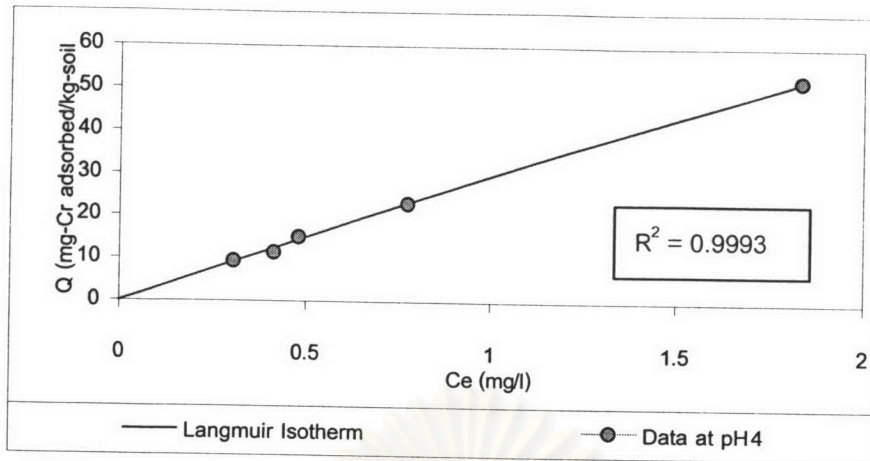


รูปที่ 5.3 ไอโซเทอมการดูดติดผิวของโครเมตด้วยดินตัวอย่างแบบ Linear

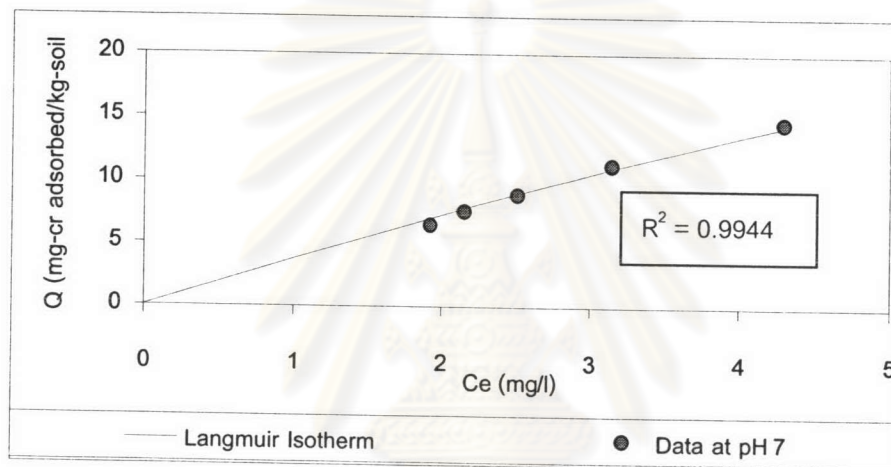
ก.) ที่พีเอช 4

ข.) ที่พีเอช 7

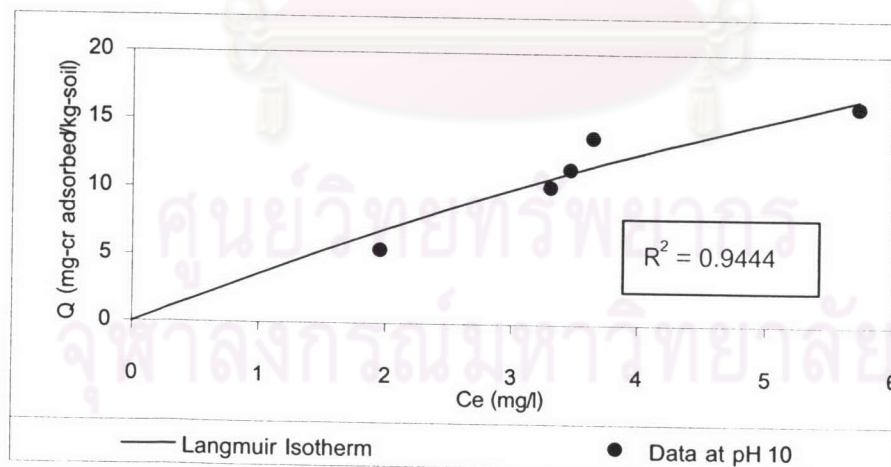
ค.) ที่พีเอช 10



ก.)

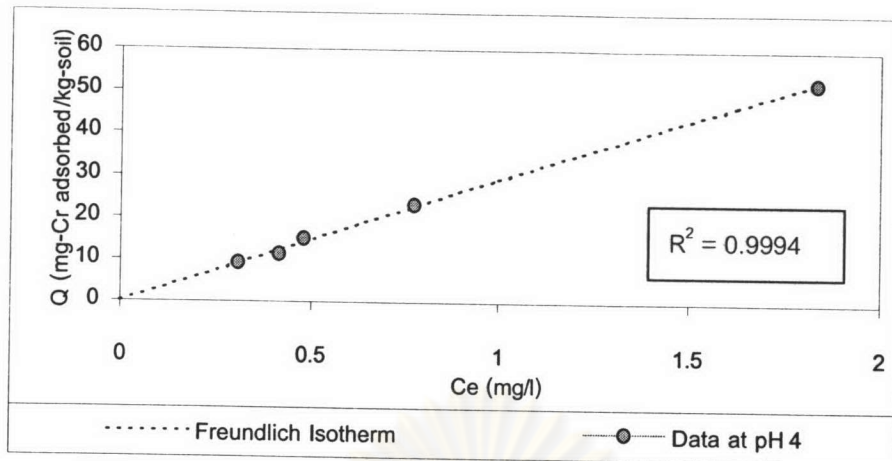


ข.)

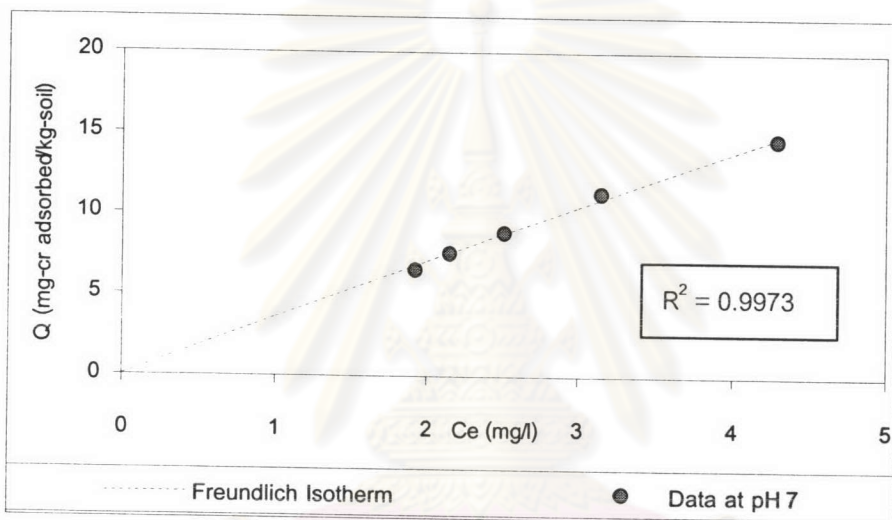


ค.)

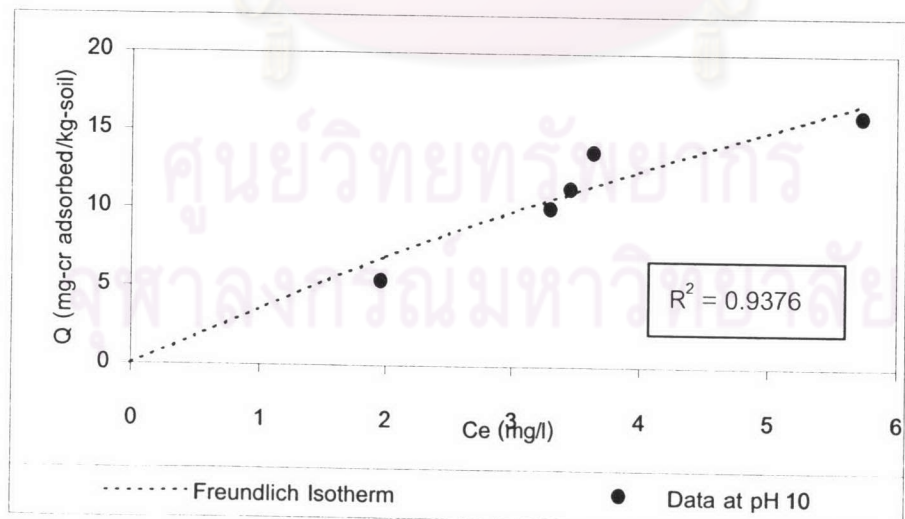
รูปที่ 5.4 ไอโซเทอมการดูดติดผิวของโครเมตด้วยดินตัวอย่างแบบ Langmuir
 ก.) ที่พีเอช 4 ข.) ที่พีเอช 7 ค.) ที่พีเอช 10



ก.)



ข.)



ค.)

รูปที่ 5.5 ไอโซเทอมการดูดติดผิวของโครเมตด้วยดินตัวอย่างแบบ Freundlich

ก.) ที่พีเอช 4

ข.) ที่พีเอช 7

ค.) ที่พีเอช 10

ค่า R-Square ของกราฟไอโซเทอมของการดูดติดผิวทั้ง 3 แบบ สามารถนำมาเปรียบเทียบความแตกต่างเพื่อพิจารณาว่าการทดลองเหมาะสมกับไอโซเทอมแบบใด แสดงดังตาราง 5.1

ตารางที่ 5.1 R-Square ของกราฟไอโซเทอมของการดูดติดผิวของโครเมตบนดินตัวอย่างที่ พีเอช ต่างๆ

พีเอช	Linear Isotherm	Langmuir Isotherm	Freundlich Isotherm
4	0.9990	0.9993	0.9994
7	0.9968	0.9944	0.9973
10	0.9224	0.9444	0.9376

จากตารางที่ 5.1 เมื่อพิจารณาค่า R-Square ของแต่ละชุดการทดลอง จะเห็นว่าในชุดการทดลองที่แต่ละพีเอช ค่า R-Square จากสมการแบบจำลองไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบเส้นตรง แลงมัวร์ และ ฟรุนดลิช มีค่าใกล้เคียงกันที่พีเอชเท่ากับ 10 และแทบไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ที่พีเอชเท่ากับ 4 และ 7

5.4 การหาค่าพารามิเตอร์การดูดติดผิว (Adsorption Parameter)

จากการทดลองในหัวข้อที่ 5.3 ทำให้ทราบถึงไอโซเทอมของการดูดติดผิวของโครเมตด้วยตัวอย่างดินในการวิจัยครั้งนี้ ว่าเป็นการดูดติดผิวแบบเชิงเส้น แลงมัวร์ และฟรุนดลิช มีสมการดังสมการที่ 3.11, 3.12, และ 3.13 ตามลำดับ คือ สมการไอโซเทอมแบบเชิงเส้น

$$Q = K_d C_e \quad (3.11)$$

สมการไอโซเทอมของแลงมัวร์

$$Q = \frac{abC_e}{(1 + bC_e)} \quad (3.12)$$

สมการไอโซเทอมแบบฟรุนดลิช

$$Q = K_F C_e^{1/n} \quad (3.13)$$

จากสมการดังกล่าว จากการคำนวณสมการไอโซเทอมของการดูดติดผิวจากโปรแกรมคำนวณสำเร็จรูป Curve Expert หาค่าคงที่ จากสมการไอโซเทอมการดูดติดผิว ทำให้ได้สมการการดูดติดผิวออกมาดังตารางที่ 5.2, 5.3, และ 5.4

ตารางที่ 5.2 ค่าพารามิเตอร์ของการดูดติดผิวที่หาได้จากสมการไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบ Linear ของดินที่แต่ละสภาวะพีเอช

พีเอช	สมการไอโซเทอมการดูดติดผิว แบบ Linear	พารามิเตอร์การดูดติดผิว	
		K_d	
4	$Q = 28.845 C_e$	28.845	
7	$Q = 3.476 C_e$	3.476	
10	$Q = 3.101 C_e$	3.101	

ตารางที่ 5.3 ค่าพารามิเตอร์ของการดูดติดผิวที่หาได้จากสมการไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบ Langmuir ของดินที่แต่ละสภาวะพีเอช

พีเอช	สมการไอโซเทอมการดูดติดผิว แบบ Langmuir	พารามิเตอร์การดูดติดผิว	
		a	b
4	$Q = \frac{31.183 C_e}{(1 + 0.052 C_e)}$	599.675	0.052
7	$Q = \frac{3.948 C_e}{(1 + 0.041 C_e)}$	96.295	0.041
10	$Q = \frac{3.879 C_e}{(1 + 0.058 C_e)}$	66.880	0.058

ตารางที่ 5.4 ค่าพารามิเตอร์ของการดูดติดผิว ที่หาได้มาจากสมการไอโซเทอมของการดูดติดผิวแบบ Freundlich ของดินที่แต่ละสภาวะพีเอช

พีเอช	สมการไอโซเทอมการดูดติดผิว แบบ Freundlich	พารามิเตอร์การดูดติดผิว	
		K_f	$1/n$
4	$Q = 29.144 C_e^{0.968}$	29.144	0.968
7	$Q = 3.599 C_e^{0.970}$	3.599	0.970
10	$Q = 3.892 C_e^{0.842}$	3.892	0.842

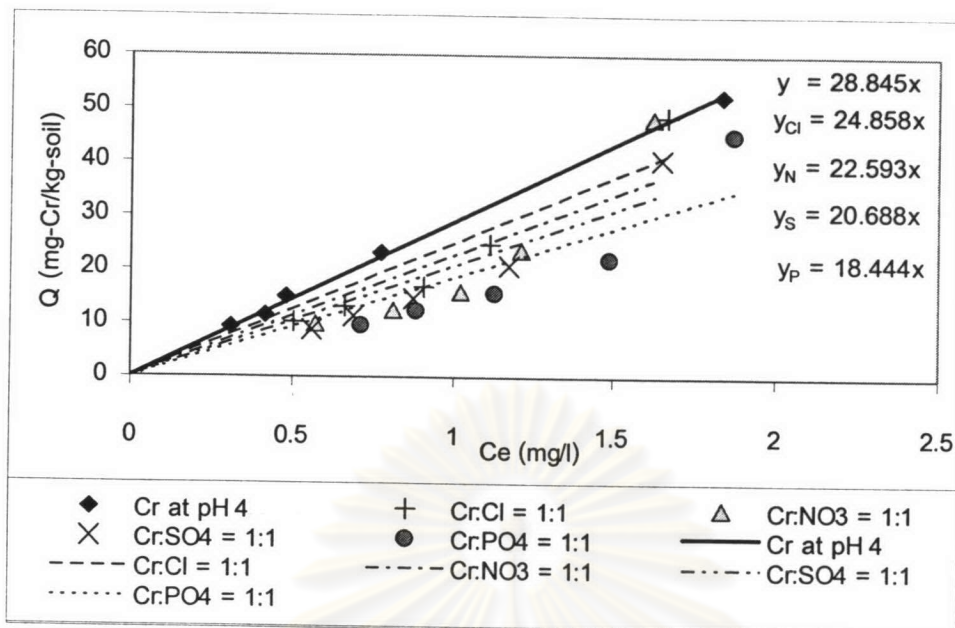
จากตารางที่ 5.3 เนื่องจากช่วงความเข้มข้นที่ทำการทดลองมีความเข้มข้นต่ำ ส่งผลให้ค่าความสามารถในการดูดติดผิวของดินตัวอย่าง (Q) มีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับความสามารถในการดูดติดผิวสูงสุด (ค่าคงที่ a) ทำให้ไอโซเทอมของการดูดติดผิวแบบแลงมัวร์ในช่วงความเข้มข้นต่ำๆ ทับกับไอโซเทอมของการดูดติดผิวแบบเส้นตรง

จากตารางที่ 5.4 ค่าคงที่ของการดูดติดผิวแบบฟรุนดลิช ($1/n$) ใกล้เคียง 1.0 ทำให้ไอโซเทอมของการดูดติดผิวแบบแลงมัวร์ในช่วงความเข้มข้นต่ำๆ ทับกับไอโซเทอมของการดูดติดผิวแบบเส้นตรง

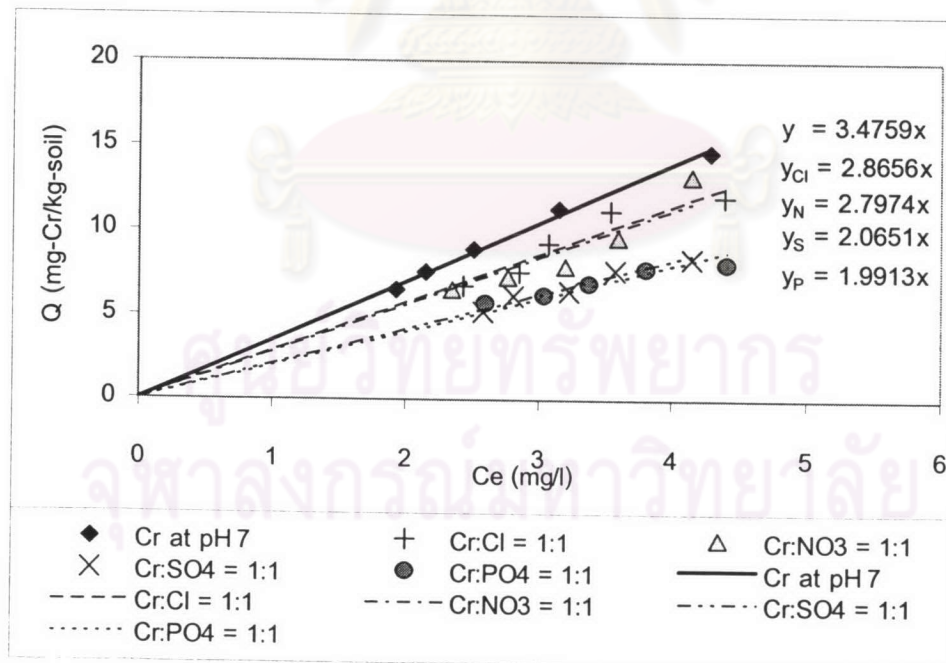
5.5 การศึกษาผลของไอออนประจุลบที่มีต่อการดูดติดผิวของโครเมตด้วยตัวอย่างดิน

ทำการทดลองแบบแบตช์ ที่สภาวะพีเอชเริ่มต้นคือ 4, 7 และ 10 ใช้สารละลายโครเมตที่มีความเข้มข้น 5.2 มิลลิกรัมต่อลิตร และเลือกใช้ไอออนลบ 4 ชนิด คือ ฟอสเฟต ซัลเฟต ไนเตรต และ คลอไรด์ แต่ละชุดการทดลองใช้ไอออนลบที่ละชนิด โดยใช้อัตราส่วนการผสมโดยโมลไอออนลบต่อโครเมตเท่ากับ 1:1

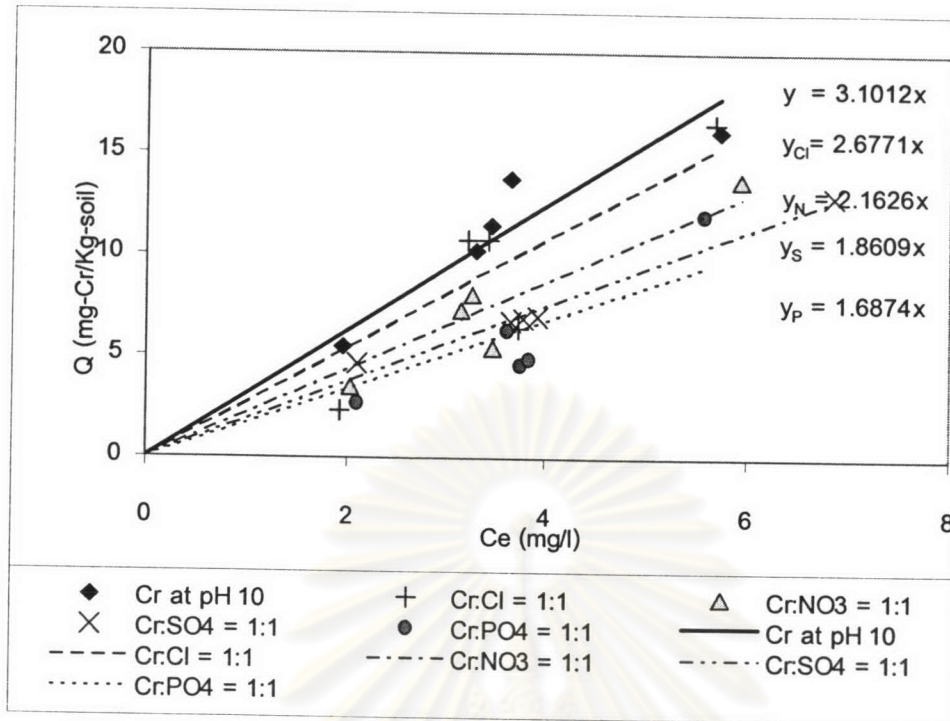
ผลการศึกษาเมื่อมีไอออนประจุลบ พบว่า เมื่อมีปริมาณไอออนประจุลบที่ใช้เป็นสารแข่งขันเพิ่มขึ้น ความสามารถในการดูดติดผิวของโครเมตจะต่ำลง นั่นคือ ไอออนประจุลบสามารถลดความสามารถในการดูดติดผิวของโครเมตในดินได้ ผลการศึกษาแสดงดังรูปที่ 5.6, 5.7 และ 5.8 แสดงรายละเอียดในภาคผนวก ค.



รูปที่ 5.6 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นที่สภาวะสมดุล และความสามารถในการดูดซับ ของดินที่พีเอช 4 เมื่อมีไอออนประจุลบต่อโครเมตเท่ากับ 1:1 ในเชิงโมลาร์ โดยไอออนประจุลบที่ใช้รบกวนคือ ฟอสเฟต ซัลเฟต ไนเตรต และ คลอไรด์



รูปที่ 5.7 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นที่สภาวะสมดุล และความสามารถในการดูดซับ ดินของดินที่พีเอช 7 เมื่อมีไอออนประจุลบต่อโครเมตเท่ากับ 1:1ในเชิงโมลาร์ โดยไอออนประจุลบที่ใช้รบกวนคือ ฟอสเฟต ซัลเฟต ไนเตรต และ คลอไรด์



รูปที่ 5.8 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นที่สภาวะสมดุล และความสามารถในการดูดติดผิวของดินที่พีเอช 10 เมื่อมีไอออนประจุลบต่อโครเมตเท่ากับ 1:1 ในเชิงโมลาร์โดยไอออนประจุลบที่ใช้คือ ฟอสเฟต ซัลเฟต ไนเตรต และคลอไรด์

จากการทดลองจะเห็นความแตกต่างของค่าความสามารถในการดูดติดผิวของโครเมตเมื่อมีไอออนประจุลบอื่นรบกวนการดูดติดผิวได้จากการเปรียบเทียบกับกรณีที่ไม่มีไอออนประจุลบอื่นรบกวน ดังแสดงในรูปที่ 5.6 ถึง 5.8 จะเห็นได้ว่า ฟอสเฟต มีผลในการลดความสามารถในการดูดติดผิวของโครเมตในดินตัวอย่างสูงที่สุดในทุกพีเอช ในขณะที่ไอออนประจุลบที่มีผลรองลงมาคือ ซัลเฟต ไนเตรต และ คลอไรด์ ตามลำดับ

การทดลองพบว่า ผลของคลอไรด์และไนเตรตไอออนต่อการดูดติดผิวของโครเมตบนดินมีค่าใกล้เคียงกัน และมีผลต่อการดูดติดผิวของโครเมตบนดินน้อยกว่าซัลเฟตและฟอสเฟตไอออนอย่างชัดเจน สาเหตุหนึ่งที่สามารถอธิบายความแตกต่างนี้ได้ คือ เนื่องจากดูดติดผิวของ โครเมตมีความสัมพันธ์กับการกระจายตัวของประจุรอบๆตัวไอออน เมื่อทำการเปรียบเทียบจากโครงสร้างโมเลกุลของไอออน จะพบว่าซัลเฟต และโครเมต เป็นโครงสร้างโมเลกุลแบบเตตราโกนอล (Tetragonal Shape) เหมือนกัน ทำให้สามารถดูดติดผิวบนดินได้ดีกว่าคลอไรด์ไอออน ซึ่งมีโครงสร้างโมเลกุลแบบกลม (Spherical Shape) และไนเตรตไอออน ซึ่งมีโครงสร้างโมเลกุลแบบ

แผ่น (Planar Shape) (Stollenwerk และ Grove, 1985; Eary และ Rai, 1991; Francoise และ Alain, 1991)

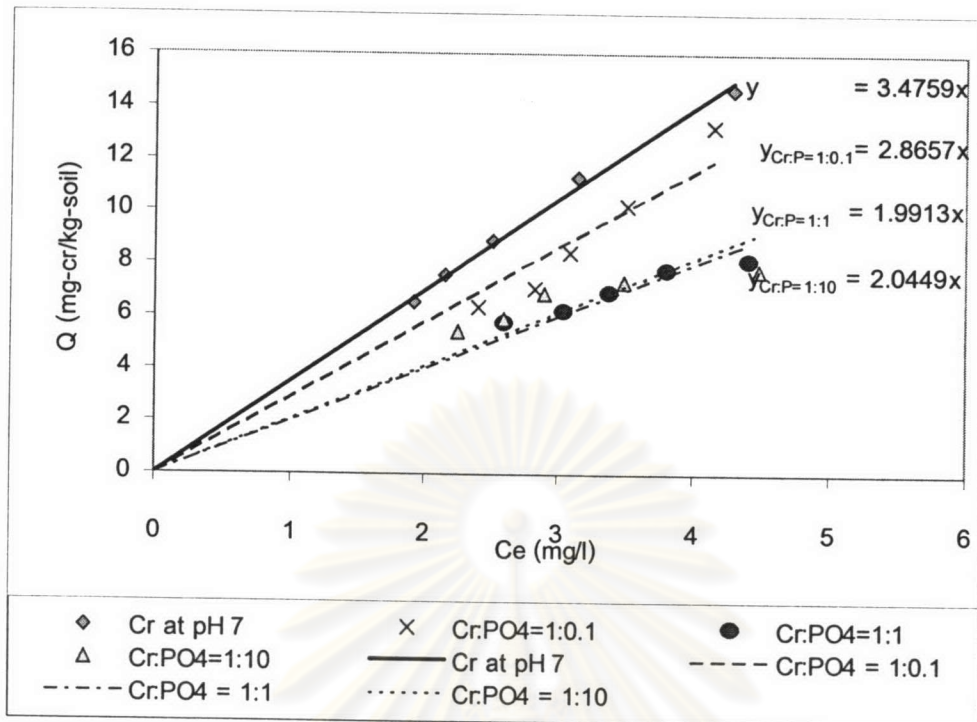
จากผลการเปรียบเทียบพบว่า ฟอสเฟสไอออน มีผลทำให้ความสามารถในการดูดติดผิวของโครเมตบนดินลดลงมากกว่าซัลเฟตไอออน เนื่องจากฟอสเฟตอยู่ในรูปที่มีไฮโดรเจนอยู่ในโมเลกุล คือในรูป $\text{H}_2\text{PO}_4^- + \text{HPO}_4^{2-}$ ที่พีเอช 2.1 ถึง 12.3 ในขณะที่ซัลเฟตอยู่ในรูป SO_4^{2-} ที่พีเอชมากกว่า 2 ทำให้ฟอสเฟตซึ่งมีไฮโดรเจนอยู่สามารถเกิดพันธะไฮโดรเจนกับอนุภาคดิน ทำให้มีความสามารถแข่งขันในการดูดติดผิวกับโครเมตบนดิน (Stollenwerk และ Grove, 1985)

5.6 การศึกษาผลของไอออนลบที่มีต่อการดูดติดผิวของโครเมตด้วยตัวอย่างดินเมื่อมีปริมาณไอออนลบความประจุลบแตกต่างกัน

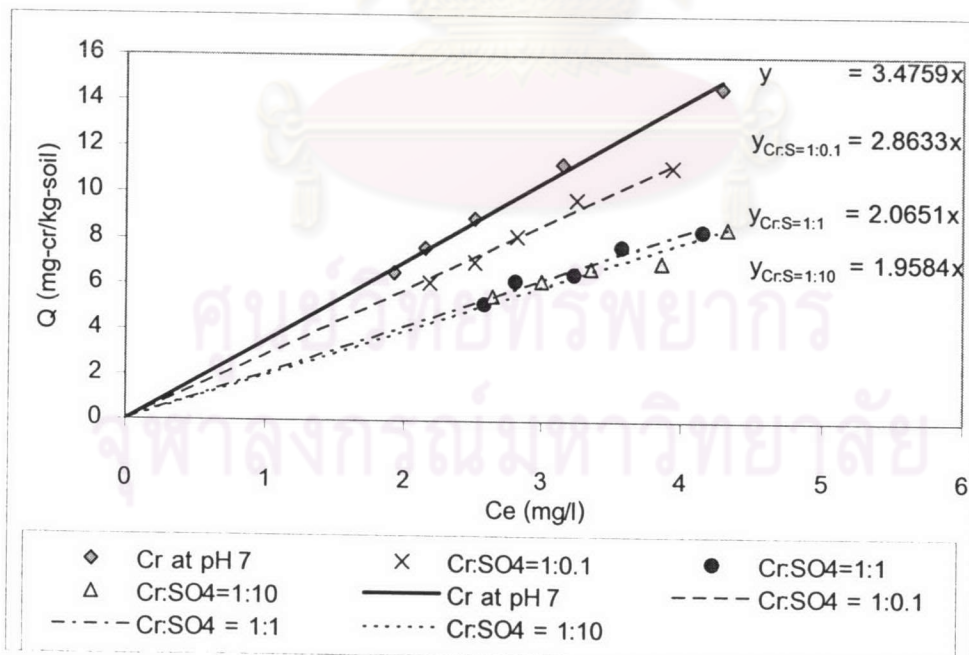
ทำการทดลองแบบแบตช์ ที่สภาวะพีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 7 ใช้สารละลายโครเมตที่มีความเข้มข้น 5.2 มิลลิกรัมต่อลิตร และเลือกใช้ไอออนประจุลบ 4 ชนิด คือ ฟอสเฟต ซัลเฟต ไนเตรต และ คลอไรด์ แต่ละชุดการทดลองใช้ไอออนประจุลบที่ละชนิด โดยใช้อัตราส่วนการผสมไอออนลบต่อโครเมตเท่ากับ 0.1:1, 1:1 และ 10:1 ในเชิงโมลาร์

จากผลการทดลองพบว่า สัดส่วนของไอออนประจุลบต่อโครเมตในเชิงโมลาร์มีผลต่อการดูดติดผิวของโครเมตในดินตัวอย่าง ที่พีเอชเท่ากับ 7 โดยที่สัดส่วนของไอออนลบต่อโครเมตในเชิงโมลาร์เท่ากับ 10:1 มีผลรบกวนการดูดติดผิวของโครเมตบนดินตัวอย่างมากที่สุด 1:1 มีผลรบกวนการดูดติดผิวของโครเมตบนดินตัวอย่างรองลงมา และ 0.1:1 มีผลรบกวนการดูดติดผิวของโครเมตบนดินตัวอย่างน้อยที่สุด ดังแสดงใน รูปที่ 5.9 ถึง 5.12 รายละเอียดได้แสดงไว้ในภาคผนวก ค.

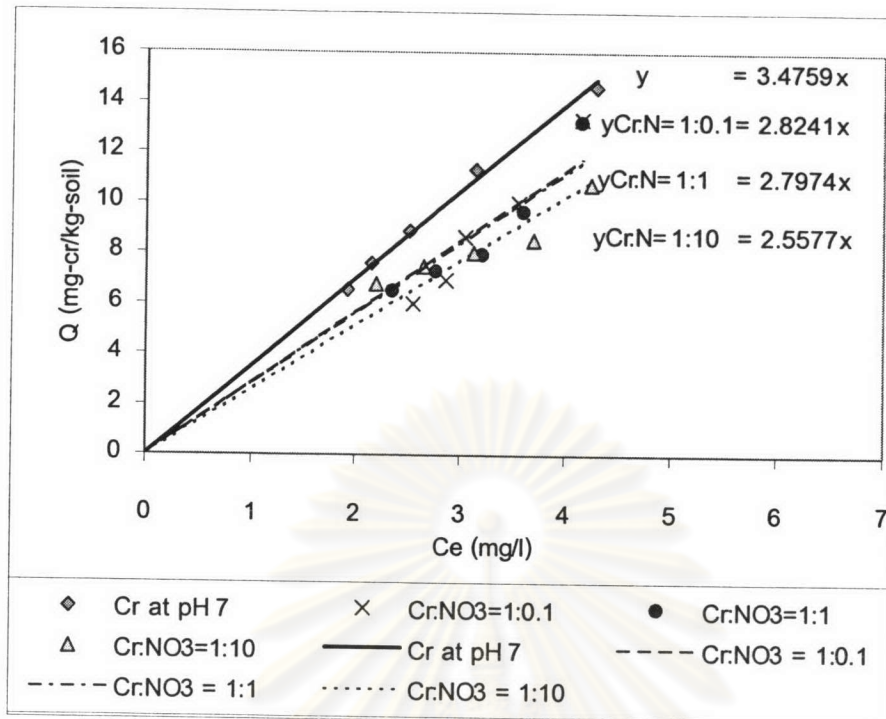
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



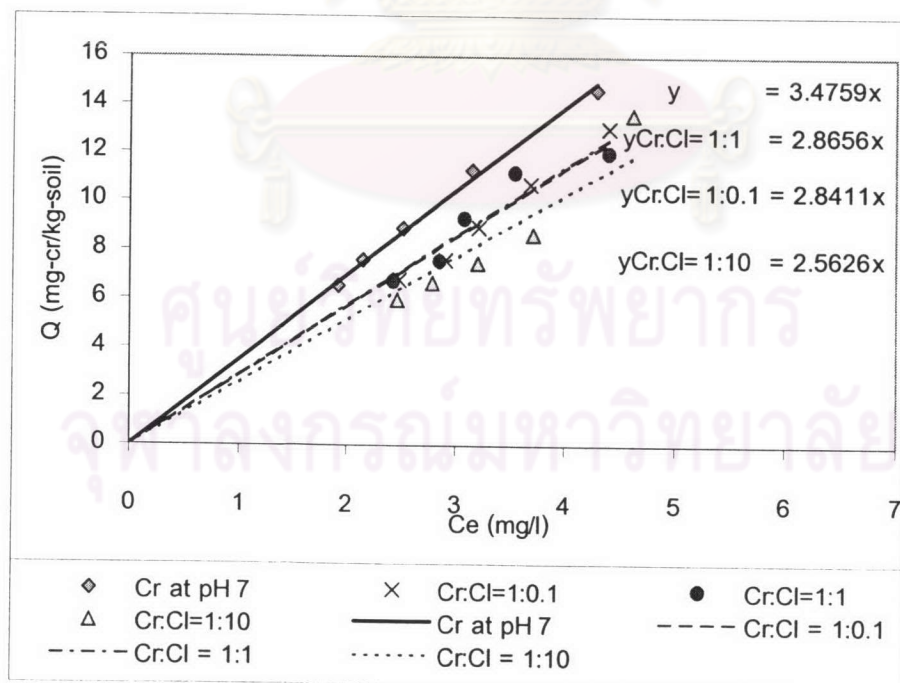
รูปที่ 5.9 ความสามารถในการดูดติดผิวของโครเมต เมื่อมีไอออนรบกวนประจุลบ คือ ฟอสเฟต ที่สัดส่วนเชิงโมลาร์โครเมตต่อฟอสเฟต คือ 1:0.1, 1:1 และ 1:10



รูปที่ 5.10 ความสามารถในการดูดติดผิวของโครเมต เมื่อมีไอออนรบกวนประจุลบ คือ ซัลเฟต ที่สัดส่วนเชิงโมลาร์โครเมตต่อซัลเฟต คือ 1:0.1, 1:1 และ 1:10



รูปที่ 5.11 ความสามารถในการดูดติดผิวของโครเมต เมื่อมีไอออนรบกวนประจุลบ คือ ไนเตรต ที่สัดส่วนเชิงโมลาร์โครเมตต่อไนเตรต คือ 1:0.1, 1:1 และ 1:10



รูปที่ 5.12 ความสามารถในการดูดติดผิวของโครเมต เมื่อมีไอออนรบกวนประจุลบ คือ คลอไรด์ ที่สัดส่วนเชิงโมลาร์โครเมตต่อคลอไรด์ คือ 1:0.1, 1:1 และ 1:10

จากผลการทดลองในส่วนของการศึกษาสัดส่วนเชิงโมลต่อลิตรของโครเมตต่อไอออน
ประจุลบในสารละลายเริ่มต้นที่พีเอช 7 พบว่า เมื่อไอออนประจุลบอื่นเท่ากับ 1 : 1 ส่งผลต่อการ
ลดการดูดติดผิวของโครเมตใกล้เคียงกับสัดส่วน 1 : 10 และลดความสามารถในการดูดติดผิวของ
โครเมตบนดินมากกว่าสัดส่วน 1 : 0.1 อย่างชัดเจน

เนื่องจากการลดความสามารถในการดูดติดผิวของโครเมตบนดินของฟอสเฟตและซัลเฟต
เกิดจากการแย่งพื้นที่ผิวในการดูดติดผิว (Stollenwerk และ Grove, 1985; Francoise และ Alain,
1991 ; Karel และ William, 1992) โครเมตที่ใช้ในการทดลองเป็นความเข้มข้นต่ำประมาณ 5
มิลลิกรัมโครเมียมต่อลิตร เมื่อปริมาณฟอสเฟตและซัลเฟตเพิ่มขึ้นถึงระดับหนึ่ง การดูดติดผิวของ
โครเมตบนดินจะลดลงตามการเพิ่มของฟอสเฟตและซัลเฟตน้อยมาก เนื่องจากเกิดการดูดติดผิว
ของฟอสเฟตและซัลเฟตกระจายทั่วพื้นที่ผิวในการดูดติดผิว การเพิ่มขึ้นของซัลเฟตและฟอสเฟต
จากช่วงความเข้มข้นที่ทำให้ฟอสเฟตและซัลเฟตกระจายทั่วพื้นที่ผิวในการดูดติดผิว จึงมีผลน้อย
มากในการแย่งพื้นที่การดูดติดผิวของโครเมต (Zachara และ คณะ, 1987) ซึ่งจากผลการ
ทดลองจะพบว่าที่สัดส่วนโครเมตต่อไอออนประจุลบอื่นของฟอสเฟตและซัลเฟตเท่ากับ 1:0.1
ฟอสเฟตและซัลเฟตมีการกระจายตัวยังไม่ทั่วพื้นที่ในการดูดติดผิว ส่วนที่สัดส่วน 1:1 และ 1:10
ฟอสเฟตและซัลเฟตมีการกระจายตัวทั่วพื้นที่ผิวในการดูดติดผิวของโครเมตที่ความเข้มข้น 5
มิลลิกรัมต่อลิตรและโครเมียม

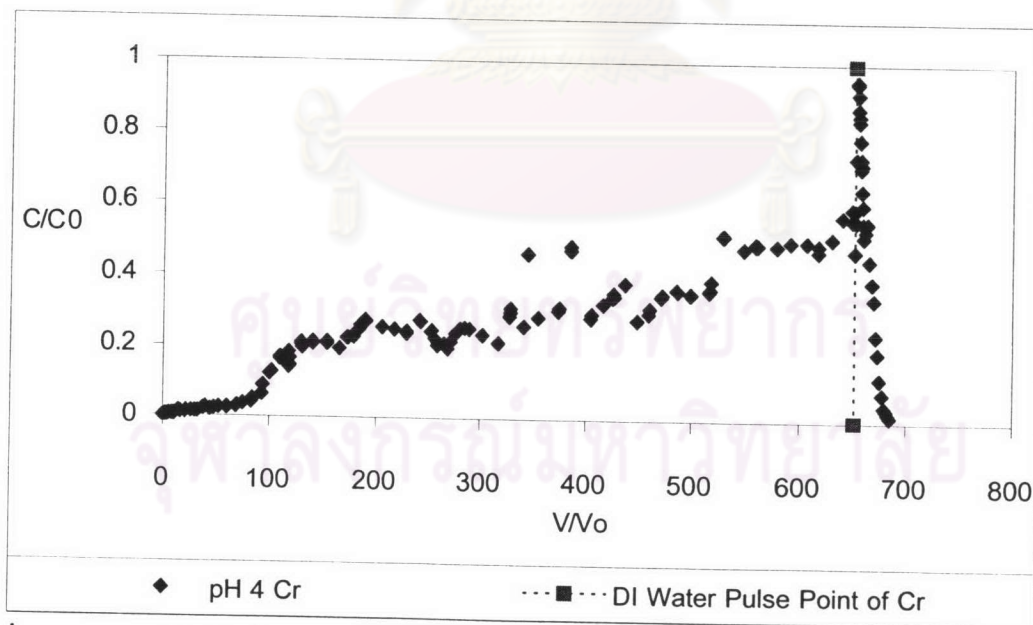
ส่วนการดูดติดผิวของโครเมตเมื่อมีไนเตรต และคลอไรด์เป็นไอออนประจุลบอื่นๆ สัดส่วน
เชิงโมลต่อลิตรของโครเมตต่อไอออนประจุลบอื่น คือ 1:0.1, 1:1 และ 1:10 มีผลทำให้
ความสามารถในการดูดติดผิวของโครเมตเมื่อมีไนเตรตและคลอไรด์ลดลง เนื่องจากไนเตรตและ
คลอไรด์ ทำให้ศักย์ไฟฟ้ารอบๆ ผิวเม็ดดินลดลง ทำให้โครเมตดูดติดผิวบนดินได้น้อยลง
(Stollenwerk และ Grove, 1985) ซึ่งมีผลน้อยกว่ากรณีของฟอสเฟตและซัลเฟต

5.7 การทดลองแบบคอลัมน์

ทำการทดลองโดยใช้ชุดการทดลองแบบคอลัมน์ ซึ่งคอลัมน์มีขนาดเส้นผ่าน
ศูนย์กลาง 2.54 เซนติเมตร สูง 20 เซนติเมตร ภายในบรรจุตัวอย่างดินปริมาณ 150 กรัม (ความสูง
ของชั้นดินเท่ากับ 20 เซนติเมตร) ทั้งหมด 3 ชุด ประกอบด้วย พีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 4 7 และ 10
พีเอชละ 1 คอลัมน์ ในทุกคอลัมน์ใช้สารละลายโครเมตที่มีความเข้มข้น 5.2 มิลลิกรัมโครเมียมต่อ
ลิตร และกำหนดให้มีอัตราการไหลของสารละลายโครเมตเท่ากับ 20 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง เท่ากัน
ทุกคอลัมน์ ซึ่งให้ค่าความเร็วในการไหลผ่านคอลัมน์ดินประมาณ 9.87 เซนติเมตรต่อชั่วโมง ทำ

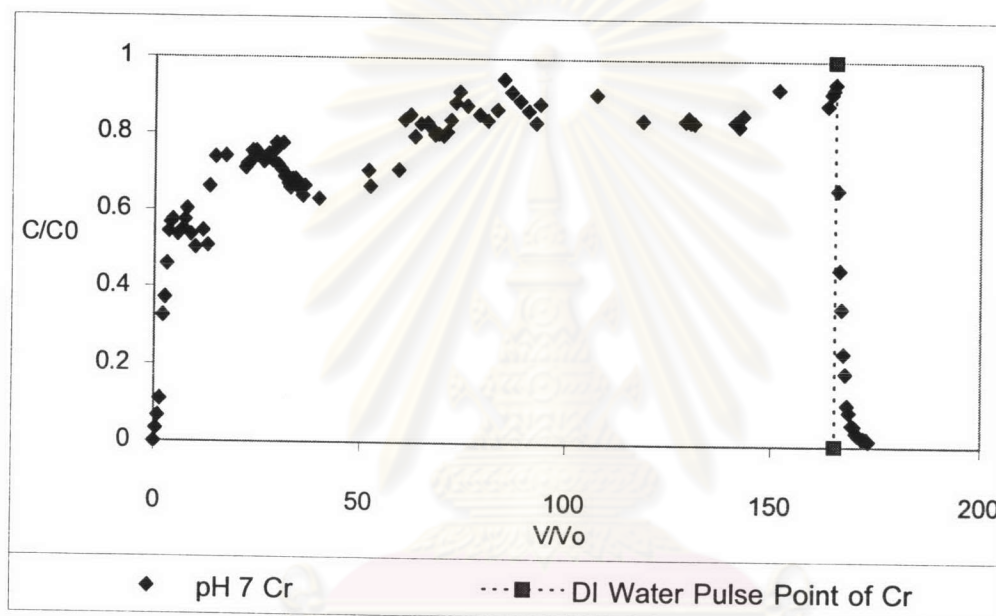
การเก็บตัวอย่างน้ำที่ไหลออกมาจากคอลัมน์ จนกระทั่งน้ำที่ผ่านออกมาจากคอลัมน์มีความเข้มข้นของโครเมียม เท่ากับความเข้มข้นของโครเมียมที่ป้อนเข้าสู่คอลัมน์ (อัตราความเข้มข้นของโครเมียมในน้ำออกต่อน้ำเข้ามีค่าประมาณ 1) หลังจากนั้นจะทำการป้อนน้ำกลั่นที่ปรับพีเอชแล้วเข้าสู่คอลัมน์แทนสารละลายโครเมียม และเก็บตัวอย่างต่อไปจนกระทั่งน้ำออกมีความเข้มข้นของโครเมียมต่ำมาก จึงทำการหยุดการทดลอง

ผลการทดลองแบบคอลัมน์ ที่พีเอชเริ่มต้น 4 พบว่าปริมาตรสารละลายโครเมียมทั้งหมดที่ไหลผ่านคอลัมน์ มีปริมาตรเท่ากับ 26.40 ลิตร หรือเท่ากับ 651.26 เท่าของ Pore volume โดยใช้เวลาประมาณ 1320 ชั่วโมง ทำให้อัตราส่วนความเข้มข้นของโครเมียมที่ออกจากคอลัมน์ต่อความเข้มข้นของโครเมียมที่ป้อนเข้าสู่คอลัมน์เท่ากับ 0.6 จึงทำการป้อนน้ำกลั่นที่ปรับพีเอช ซึ่งเมื่อคำนวณปริมาณโครเมียมที่ถูกดูดติดผิวจากการทดลองได้เท่ากับ 637.765 มิลลิกรัมโครเมียมต่อกิโลกรัมของดินแล้ว พบว่าสูงกว่าปริมาณโครเมียมที่ถูกดูดติดผิวได้มากที่สุดจากไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบแลงมัวร์ที่ได้จากการทดลองแบบแบตช์ ซึ่งจะสรุปในตอนท้าย และใช้ปริมาณสารละลายโครเมียมรวมน้ำกลั่นทั้งหมด 28.02 ลิตร หรือ 691.22 เท่าของ Pore volume และใช้เวลาไปทั้งหมด 1401 ชั่วโมง จนกระทั่งน้ำออกมีความเข้มข้นของโครเมียมน้อยมาก ๆ จนถือว่าเป็นศูนย์ ดังรูปที่ 5.13



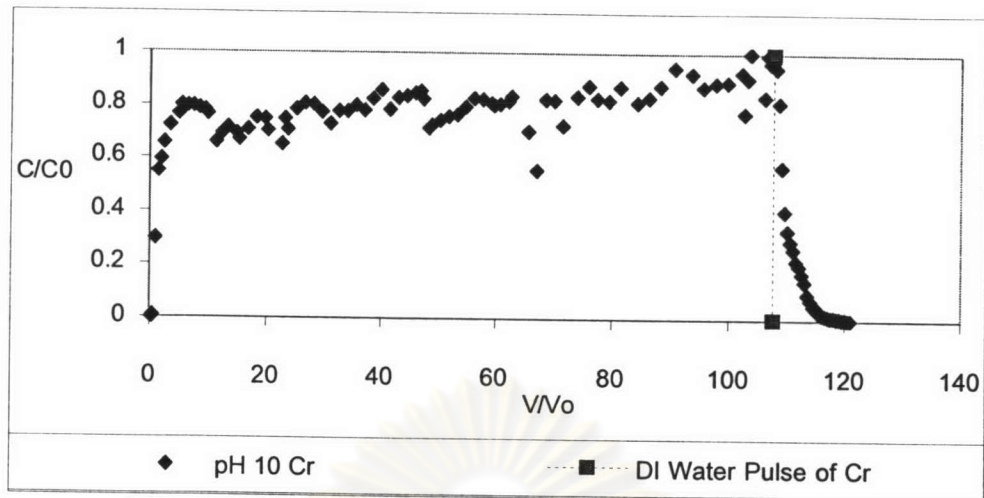
รูปที่ 5.13 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนเท่าของ Pore Volume ในคอลัมน์ดินกับอัตราความเข้มข้นของโครเมียมออกต่อความเข้มข้นเข้าที่ความเข้มข้นสารละลายโครเมียมเริ่มต้น 5.2 มิลลิกรัมโครเมียมต่อลิตร ที่พีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 4

ผลการทดลองแบบคอลัมน์ ที่พีเอชเริ่มต้น 7 พบว่าปริมาตรสารละลายโครเมตทั้งหมดที่ไหลผ่านคอลัมน์ จนกระทั่งความเข้มข้นของโครเมตขาออกเท่ากับความเข้มข้นของขาเข้า ($C/C_0 = 1$) มีปริมาตรเท่ากับ 6.68 ลิตร หรือเท่ากับ 164.79 เท่าของ Pore volume โดยใช้เวลาประมาณ 334 ชั่วโมง เมื่อคำนวณปริมาณโครเมียมที่ถูกดูดติดผิวในคอลัมน์ดินจะได้เท่ากับ 47.983 มิลลิกรัมโครเมียมต่อกิโลกรัมของดิน และใช้ปริมาณสารละลายโครเมตรวมน้ำกลั่นทั้งหมด 7.06 ลิตร หรือ 174.16 เท่าของ Pore volume และใช้เวลาไปทั้งหมด 353 ชั่วโมง จนกระทั่งน้ำออกมีความเข้มข้นของโครเมตน้อยมาก ๆ จนถือว่าเป็นศูนย์ ดังรูปที่ 5.14



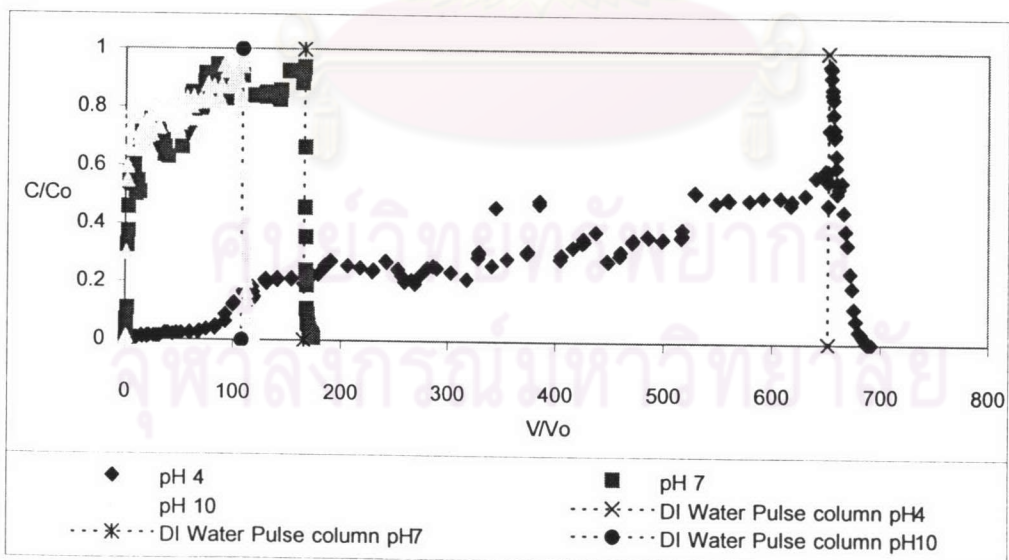
รูปที่ 5.14 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนเท่าของ Pore Volume ในคอลัมน์ดินกับอัตราความเข้มข้นของโครเมตออกต่อความเข้มข้นเข้าที่ความเข้มข้นสารละลายโครเมตเริ่มต้น 5.2 มิลลิกรัมโครเมียมต่อลิตร ที่พีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 7

ผลการทดลองแบบคอลัมน์ ที่พีเอชเริ่มต้น 10 พบว่าปริมาตรสารละลายโครเมตทั้งหมดที่ไหลผ่านคอลัมน์ จนกระทั่งความเข้มข้นของโครเมตขาออกเท่ากับความเข้มข้นของขาเข้า ($C/C_0 = 1$) มีปริมาตรเท่ากับ 4.34 ลิตร หรือเท่ากับ 107.06 เท่าของ Pore volume โดยใช้เวลาประมาณ 217 ชั่วโมง เมื่อคำนวณปริมาณโครเมียมที่ถูกดูดติดผิวในคอลัมน์ดินจะได้เท่ากับ 29.638 มิลลิกรัมโครเมียมต่อกิโลกรัมของดิน และใช้ปริมาณสารละลายโครเมตรวมน้ำกลั่นทั้งหมด 4.88 ลิตร หรือ 120.38 เท่าของ Pore volume และใช้เวลาไปทั้งหมด 244 ชั่วโมง จนกระทั่งน้ำออกมีความเข้มข้นของโครเมตน้อยมาก ๆ จนถือว่าเป็นศูนย์ ดังรูปที่ 5.15



รูปที่ 5.15 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนเท่าของ Pore Volume ในคอลัมน์ดินกับอัตราความเข้มข้นของโครเมตออกต่อความเข้มข้นเข้าที่ความเข้มข้นสารละลายโครเมตเริ่มต้น 5.2 มิลลิกรัมโครเมียมต่อลิตร ที่พีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 10

จากผลการทดลองสามารถเปรียบเทียบผลที่พีเอช 4 7 และ 10 สามารถคำนวณความสามารถในการดูดติดผิวที่พีเอช 4 7 และ 10 มีค่าเท่ากับ 637.765, 47.983, และ 29.638 มิลลิกรัมของโครเมียมต่อกิโลกรัมของดิน ตามลำดับ ได้แสดงดังรูปที่ 5.16



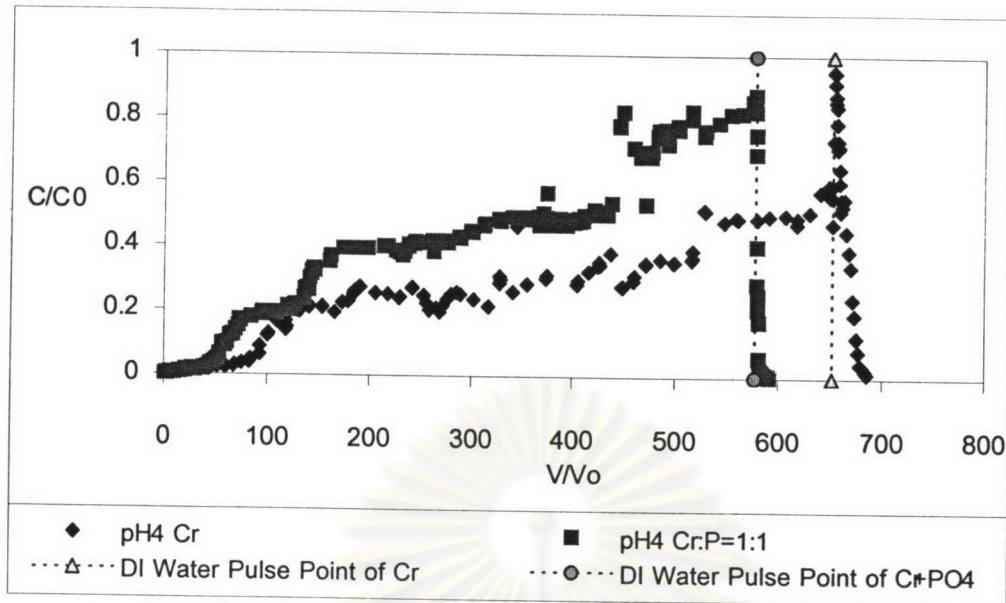
รูปที่ 5.16 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนเท่าของ Pore Volume ในคอลัมน์ดินกับอัตราความเข้มข้นของโครเมตออกต่อความเข้มข้นเข้า ที่ความเข้มข้นสารละลายโครเมตเริ่มต้น 5.2 มิลลิกรัมโครเมียมต่อลิตร พีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 4 7 และ 10

เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบผลการทดลองแบบคอลัมน์ในการดูดติดผิวของโครเมตบนดิน ตัวอย่าง ที่สภาวะพีเอชต่าง ๆ ดังรูปที่ 5.46 และค่าความสามารถในการดูดติดผิวของแต่ละพีเอช ที่คำนวณได้ข้างต้น พบว่า ความสามารถในการดูดติดผิวโดยดินร่วนเหนียวที่พีเอช 4 มีค่า 637.765 มิลลิกรัมโครเมียมต่อกิโลกรัมของดิน ซึ่งค่า C/Co ยังไม่สูงถึง 1 คือยังดูดติดผิวไม่สมบูรณ์ มีค่ามากกว่าที่ พีเอช 7 และ 10 (47.983 และ 29.638 มิลลิกรัมโครเมียมต่อกิโลกรัมของดิน ตามลำดับ) แสดงให้เห็นว่าที่ พีเอช 4 ดินตัวอย่างมีความสามารถในการดูดติดผิวสูงที่สุด และสูงกว่าที่พีเอชอื่นมาก รองลงมาคือที่ พีเอช 7 และ 10 ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองแบบแบตช์ แต่ในส่วนที่การทดลองแบบคอลัมน์ที่พีเอชเท่ากับ 4 มีความสามารถในการดูดติดผิวของโครเมตสูงกว่าความสามารถในการดูดติดผิวสูงสุดของไอโซเทอมแบบแลงมัวร์ ในการทดลองแบบแบตช์ เนื่องจากที่พีเอช 4 อนุภาคของเม็ดดินตัวอย่างจะมีศักย์ประจุที่บริเวณผิวเป็นบวก และตัวอย่างดินมีองค์ประกอบหลากหลาย (Heterogeneous Media) ซึ่งเป็นองค์ประกอบที่ทำให้การดูดติดผิวมีความสอดคล้องกับไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบฟรุนดลิชที่พีเอชเท่ากับ 4

5.8 การทดลองแบบคอลัมน์เพื่อศึกษาการเคลื่อนที่ของโครเมตเมื่อมีไอออนประจุลบอื่น

ทำการทดลองโดยใช้ชุดการทดลองแบบคอลัมน์ โดยใช้ความเข้มข้น และขั้นตอนการทดลองแบบเดียวกับในหัวข้อ 5.7 โดยการทดลองแบบคอลัมน์เมื่อมีไอออนประจุลบ ประกอบด้วย 3 คอลัมน์ทดลอง ที่พีเอชเริ่มต้น 4 7 และ 10 ศึกษาการดูดติดผิวเมื่อมีไอออนลบรบกวน คือ ฟอสเฟตโดยทำการทดลองที่อัตราส่วน คือ ไอออนประจุลบต่อโครเมต เท่ากับ 1:1

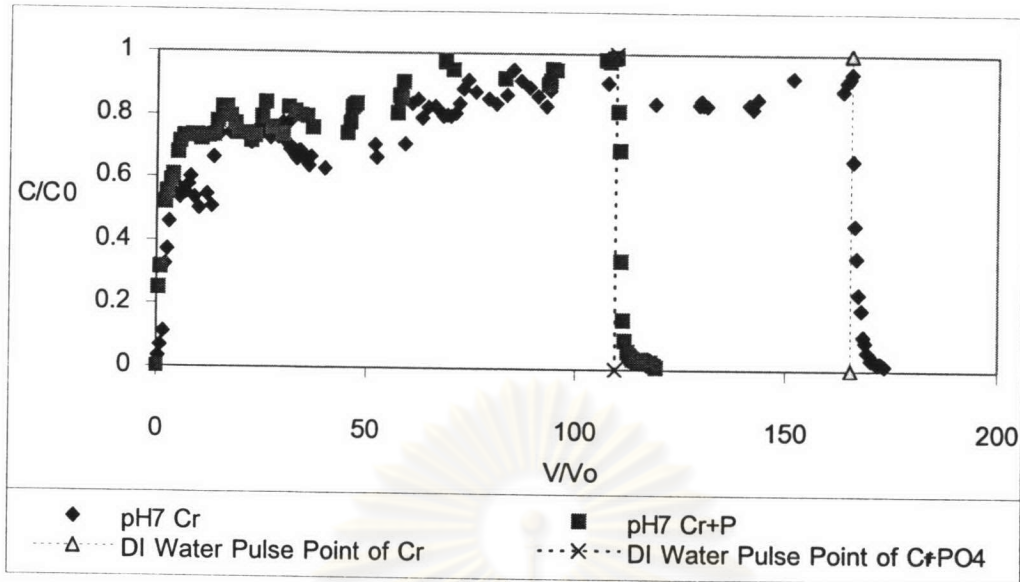
ผลการศึกษาเมื่อเปรียบเทียบการเคลื่อนที่ของโครเมตในดินที่พีเอช 4 เมื่อมีอัตราส่วน ฟอสเฟตต่อโครเมตเท่ากับ 1 : 1 พบว่า ปริมาตรสารละลายโครเมตทั้งหมดที่ไหลผ่านคอลัมน์ มีปริมาตรเท่ากับ 23.38 ลิตร หรือเท่ากับ 576.78 เท่าของ Pore volume โดยใช้เวลาประมาณ 1169 ชั่วโมง ทำให้อัตราส่วนความเข้มข้นของโครเมียมที่ออกจากคอลัมน์ต่อความเข้มข้นของโครเมียมที่ป้อนเข้าสู่คอลัมน์เท่ากับ 0.84 จึงทำการป้อนน้ำกลั่นที่ปรับพีเอช ซึ่งเมื่อคำนวณปริมาณโครเมียมที่ถูกดูดติดผิวจากการทดลองได้เท่ากับ 444.306 มิลลิกรัมโครเมียมต่อกิโลกรัมของดินแล้ว พบว่า ต่ำกว่าความสามารถในการดูดติดผิวของโครเมตในกรณีที่ไม่มีฟอสเฟต แม้ในกรณีที่มีฟอสเฟตจะเข้าใกล้จุด Breakthrough มากกว่าก็ตาม ดังจะสรุปในตอนท้าย และใช้ปริมาณสารละลายโครเมตรวมน้ำกลั่นทั้งหมด 24.00 ลิตร หรือ 592.05 เท่าของ Pore volume และใช้เวลาไปทั้งหมด 1200 ชั่วโมง จนกระทั่งน้ำออกมีความเข้มข้นของโครเมตน้อยมากจนถึงว่าเป็นศูนย์



รูปที่ 5.17 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนเท่าของ Pore Volume ในคอลัมน์ดินกับอัตราความเข้มข้นของโครเมตออกต่อความเข้มข้นเข้าที่อัตราส่วนโครเมตต่อฟอสเฟตเท่ากับ 1:1 ที่พีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 4

ผลการศึกษาเมื่อเปรียบเทียบการเคลื่อนที่ของโครเมตในดินที่พีเอช 7 เมื่อมีฟอสเฟตต่อโครเมต 1 : 1 พบว่า ปริมาณสารละลายโครเมตทั้งหมดที่ไหลผ่านคอลัมน์ จนกระทั่งความเข้มข้นของโครเมตขาออกเท่ากับความเข้มข้นของขาเข้า ($C/C_o = 1$) มีปริมาตรเท่ากับ 4.42 ลิตร หรือเท่ากับ 109.04 เท่าของ Pore volume โดยใช้เวลาประมาณ 221 ชั่วโมง เมื่อคำนวณปริมาณโครเมียมที่ถูกดูดติดผิวในคอลัมน์ดินจะได้เท่ากับ 24.306 มิลลิกรัมโครเมียมต่อกิโลกรัมของดิน และใช้ปริมาณสารละลายโครเมตรวมน้ำกลั่นทั้งหมด 4.88 ลิตร หรือ 120.38 เท่าของ Pore volume และใช้เวลาไปทั้งหมด 244 ชั่วโมง จนกระทั่งน้ำออกมีความเข้มข้นของโครเมตน้อยมากจนถึงว่าเป็นศูนย์

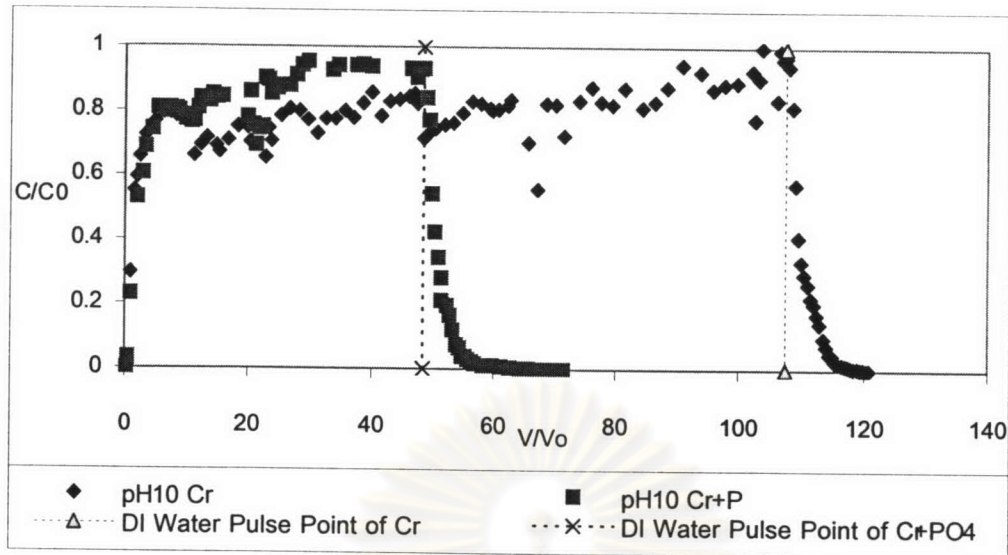
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 5.18 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนเท่าของ Pore Volume ในคอลัมน์ดินกับอัตราความเข้มข้นของโครเมตออกต่อความเข้มข้นเข้าที่อัตราส่วนโครเมตต่อฟอสเฟตเท่ากับ 1:1 ที่พีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 7

ผลการศึกษาเมื่อเปรียบเทียบการเคลื่อนที่ของโครเมตในดินที่พีเอช 10 เมื่อมีฟอสเฟตต่อโครเมต 1 : 1 พบว่า ปริมาณสารละลายโครเมตทั้งหมดที่ไหลผ่านคอลัมน์ จนกระทั่งความเข้มข้นของโครเมตขาออกเท่ากับความเข้มข้นของขาเข้า ($C/C_0 = 1$) มีปริมาตรเท่ากับ 1.94 ลิตร หรือเท่ากับ 47.86 เท่าของ Pore volume โดยใช้เวลาประมาณ 97 ชั่วโมง เมื่อคำนวณปริมาณโครเมียมที่ถูกดูดติดผิวในคอลัมน์ดินจะได้เท่ากับ 10.658 มิลลิกรัมโครเมียมต่อกิโลกรัมของดิน และใช้ปริมาณสารละลายโครเมตรวมน้ำกลั่นทั้งหมด 2.720 ลิตร หรือ 67.10 เท่าของ Pore volume และใช้เวลาไปทั้งหมด 136 ชั่วโมง จนกระทั่งน้ำออกมีความเข้มข้นของโครเมตน้อยมากจนถือว่าเป็นศูนย์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 5.19 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนเท่าของ Pore Volume ในคอลัมน์ดินกับอัตราความเข้มข้นของโครเมตออกต่อความเข้มข้นเข้าที่อัตราส่วนโครเมตต่อฟอสเฟตเท่ากับ 1:1 ที่พีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 10

จากการทดลองพบว่า เมื่อมีไอออนประจุลบ คือ ฟอสเฟต รบกวนการดูดติดผิวของโครเมตบนดิน จะส่งผลให้ความเข้มข้นขาออกเท่ากับความเข้มข้นขาเข้าเร็วกว่ากรณีที่ไม่มีฟอสเฟต ในทุกๆ ค่าพีเอช

5.9 เปรียบเทียบระหว่างผลการทดลองแบบแบตช์แบบคอลัมน์แบบคอลัมน์

ผลความสามารถในการดูดติดผิวมากที่สุดที่ได้จากไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบแลงมัวร์ ในการทดลองแบบแบตช์จะถูกเลือกนำมาใช้ในการวิเคราะห์เปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการทดลองแบบคอลัมน์ ดังแสดงในตารางที่ 5.5

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 5.5 ความสามารถในการดูดติดผิวสูงสุดที่ได้จากไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบ
แลงมัวร์ในการทดลองแบบแบดซ์เทียบกับผลจากการทดลองแบบคอลัมน์

พีเอช	ความสามารถในการดูดติดผิวสูงสุด (Qmax)	ค่าความสามารถในการดูดติดผิว (มิลลิกรัมโครเมียมต่อกิโลกรัมดิน)
4	ไอโซเทอมแบบแลงมัวร์ จากการทดลอง แบบแบดซ์ $Q = \frac{31.183 C_e}{(1 + 0.052 C_e)}$	599.675
	การทดลองแบบคอลัมน์เมื่อไม่มีฟอสเฟต	637.765
	การทดลองแบบคอลัมน์เมื่อมีฟอสเฟต	444.306
7	ไอโซเทอมแบบแลงมัวร์ จากการทดลอง แบบแบดซ์ $Q = \frac{3.948 C_e}{(1 + 0.041 C_e)}$	96.295
	การทดลองแบบคอลัมน์เมื่อไม่มีฟอสเฟต	47.983
	การทดลองแบบคอลัมน์เมื่อมีฟอสเฟต	24.306
10	ไอโซเทอมแบบแลงมัวร์ จากการทดลอง แบบแบดซ์ $Q = \frac{3.879 C_e}{(1 + 0.058 C_e)}$	66.880
	การทดลองแบบคอลัมน์เมื่อไม่มีฟอสเฟต	29.638
	การทดลองแบบคอลัมน์เมื่อมีฟอสเฟต	10.658

จากผลการทดลองสามารถเปรียบเทียบในแต่ละชุดพีเอช ดังตารางที่ 5.5 พบว่า การดูดติดผิวของโครเมียมบนดินตัวอย่างที่พีเอช 7 และ 10 ในการทดลองแบบคอลัมน์จะมีค่า ความสามารถในการดูดติดผิวต่ำกว่าผลจากการทดลองแบบแบดซ์ เนื่องจากการทดลองแบบ แบดซ์ จะทำการทดลองภายใต้สภาวะสมดุล ในขณะที่การทดลองแบบคอลัมน์ มีการไหลของ สารละลายผ่านชั้นดินด้วยความเร็วต่อเนื่อง 9.87 เซนติเมตรต่อชั่วโมง ทำให้เกิดการดูดติดผิวแบบ ไม่สมดุลขึ้น ซึ่งกระบวนการดูดติดผิวแบบไม่สมดุล (Non-equilibrium adsorption process) นั้นพบว่ามีสองแนวคิดที่สามารถอธิบายการดูดติดผิวแบบไม่สมดุลนี้ได้ คือ

1. การดูดติดผิวที่เกิดขึ้นเป็นกระบวนการ Chemical non-equilibrium sorption ซึ่งสามารถอธิบายได้โดยแบบจำลอง Two-site sorption คือ ในการดูดติดผิวจะมีพื้นที่ผิวอยู่ 2 แบบ แบบแรกจะเกิดการดูดติดผิวแบบสมดุลตาม Local Equilibrium Assumption คือ การดูดติดผิวเกิดขึ้นทันทีเมื่อดินพบกับโครเมตโดยไม่ขึ้นกับเวลาสัมผัส พื้นที่การดูดติดผิวแบบที่สอง จะไม่เป็นไปตาม Local Equilibrium Assumption คือไม่สามารถดูดติดผิวได้ทันที แต่ต้องอาศัยเวลาสัมผัสชั่วระยะเวลาหนึ่ง จึงจะสามารถเข้าสู่สมดุลของการดูดติดผิวได้ ดังนั้นหากการดูดติดผิวเป็นไปตามกระบวนการ Two-site sorption ความสามารถในการดูดติดผิวก็จะขึ้นกับเวลาสัมผัส

2. การดูดติดผิวที่เกิดขึ้นเป็นกระบวนการ Physical non-equilibrium sorption กล่าวคือ พิจารณาถึงขนาดของรูพรุน (Pore size) ของอนุภาคดิน ซึ่งมีขนาดไม่เท่ากันมีทั้งขนาดใหญ่พอที่โครเมตจะเดินทางเข้าสู่พื้นที่ดูดติดผิวได้อย่างรวดเร็ว หรืออาจมีขนาดเล็ก แคบ และเป็นทางยาวยากต่อการเคลื่อนที่เข้าสู่พื้นที่ดูดติดผิว จนบางครั้งการเคลื่อนที่แบบการกระจายตัว (Dispersion) ของโครเมตอาจกลายเป็นการเคลื่อนที่แบบการแพร่ (Diffusion) ซึ่งมีปัจจัยคือ ขนาดของรูพรุน และเวลาสัมผัส เพราะต้องใช้เวลาสัมผัสเพื่อที่โครเมตจะเดินทางเข้าสู่รูพรุน ดังนั้น ความสามารถในการดูดติดผิวก็จะขึ้นกับเวลาสัมผัส ซึ่งไม่เป็นไปตาม Local Equilibrium Assumption

ในกรณีที่มีพีเอชเท่ากับ 4 นั้นแตกต่างจากพีเอช 7 และ 10 โดยที่ผลจากการทดลองแบบคอลัมน์ซึ่งยังไม่ Breakthrough มีความสามารถในการดูดติดผิวสูงกว่า การทดลองแบบแบตช์ที่ได้จากไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบแลงมัวร์ เนื่องจากที่พีเอช 4 อนุภาคของเม็ดดินตัวอย่างจะมีศักย์ประจุที่บริเวณผิวเป็นบวก ทำให้โครเมตซึ่งเป็นไอออนประจุลบสามารถดูดติดผิวบนอนุภาคดินได้สูง และตัวอย่างดินมีองค์ประกอบพื้นที่ผิวหลากหลาย (Heterogeneous Surface) ซึ่งเป็นปัจจัยที่ทำให้การดูดติดผิวมีความสอดคล้องกับไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบฟรอนด์ลิชที่พีเอชเท่ากับ 4 ซึ่งให้ค่าความสามารถในการดูดติดผิวสูงสุด สูงกว่าค่าที่ได้จากแลงมัวร์มาก จึงสามารถสรุปได้ว่า ที่พีเอชเท่ากับ 4 การดูดติดผิวของโครเมตบนดินตัวอย่างจะสอดคล้องกับไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบฟรอนด์ลิช มากกว่าไอโซเทอมแบบอื่นๆ

ในกรณีที่มีไอออนของฟอสเฟตในสารละลายโครเมต ในปริมาณสัดส่วนเชิงโมลต่อลิตรของโครเมตต่อฟอสเฟตเท่ากับ 1:1 ในการทดลองแบบคอลัมน์พบว่า สามารถลดความสามารถในการดูดติดผิวของโครเมต ที่พีเอช 7 และ 10 ได้ถึง 50 และ 64 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ในขณะที่พีเอช 4 การดูดติดผิวยังไม่เข้าสู่จุด Breakthrough ก็ยังสามารถให้ความสามารถในการลดการดูดติดผิวของโครเมต ได้สูงกว่า 30 เปอร์เซ็นต์ ทำให้สามารถลดความสามารถในการดูดติดผิวและระยะเวลาในการเคลื่อนที่ของสารละลายโครเมตผ่านชั้นน้ำใต้ดิน เพื่อนำไปใช้เสริมในการบำบัดด้วยวิธีสูบบำบัด (Pump and Treat Remediation)