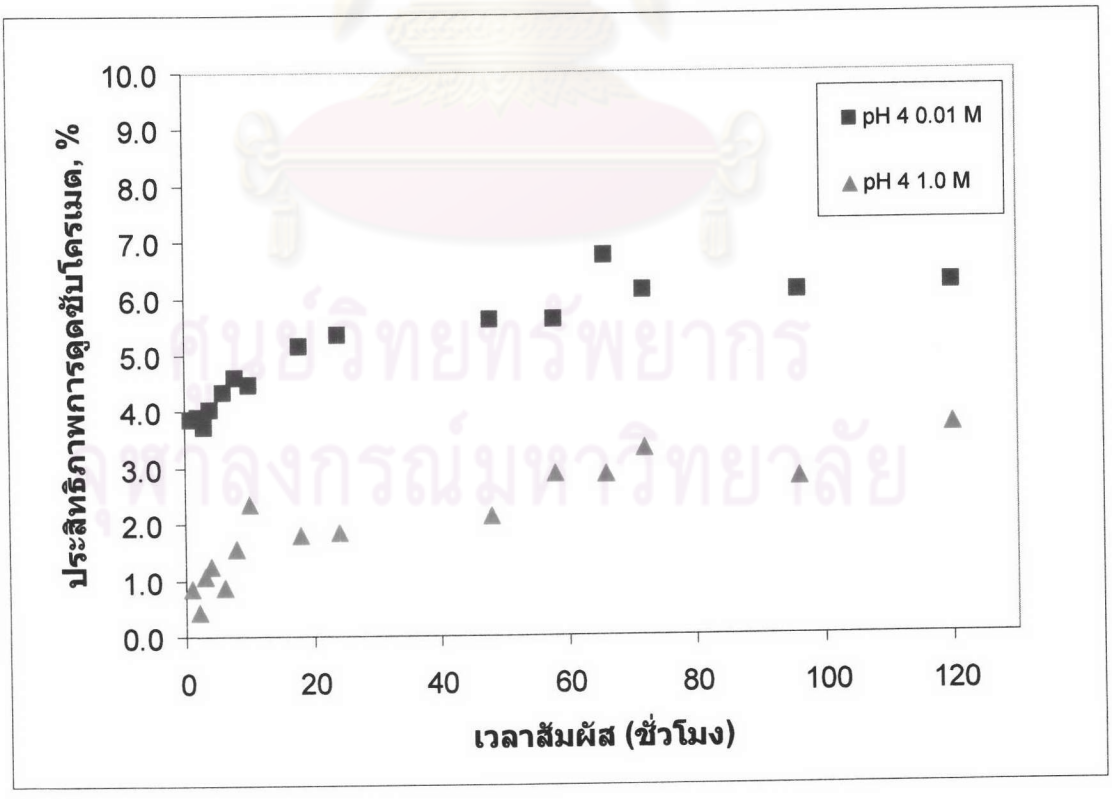
บทที่ 4

ผลการวิเคราะห์ข้อมูล

4.1 ผลการศึกษาเวลาสัมผัสที่เหมาะสมในการดูดซับโครเมตด้วยดินตัวอย่าง

การศึกษาผลของเวลาสัมผัสที่เหมาะสมในการดูดซับโครเมตด้วยดินตัวอย่าง ใช้ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมโครเมต 15 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 40 มิลลิลิตรต่อปริมาณของดิน ตัวอย่าง 4 กรัม และปรับให้สารละลายโครเมตที่พีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 4 ความแรงไอออน (Ionic Strength) เท่ากับ 0.01 โมล และ 1.0 โมล และนำหลอดทดลองทั้งหมดไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าที่ความเร็ว 200 รอบต่อนาทีที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 1, 2, 3, 4, 6, 8, 10, 14, 18, 24, 48, 58, 66, 72, 96 และ 120 ชั่วโมง ได้ผลการทดลองซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

เมื่อพิจารณาร้อยละการดูดซับด้วยโครเมตของดินตัวอย่างที่พีเอชเริ่มต้น เท่ากับ 4 ที่เวลาสัมผัสต่างๆ ดังตารางที่ ก1 และ ก2 ในภาคผนวก ก.นำมาเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ของประสิทธิภาพของการดูดซับโครเมตด้วยดินตัวอย่างกับเวลาสัมผัสได้ดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ของเวลาสัมผัสกับประสิทธิภาพของการดูดซับโครเมต (%)

จากการทดลองข้างต้นสามารถสรุปการทดลองได้ดังนี้

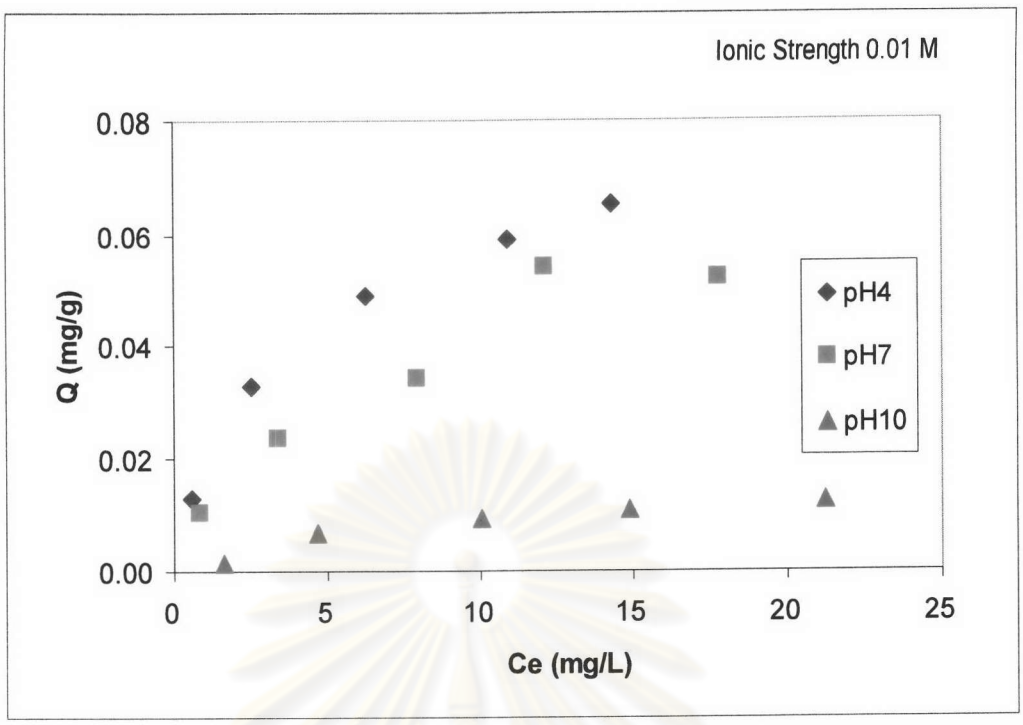
1. การดูดซับของโครเมตด้วยดินตัวอย่างของการทดลองที่มีความแรงไอออนที่น้อยกว่าคือ 0.01 โมล มีประสิทธิภาพการดูดซับที่สูงกว่าการทดลองที่มีความแรงไอออนที่มากกว่า คือ 1.0 โมลในทุกช่วงเวลาสัมผัสของการทดลอง

2. การดูดซับของโครเมตด้วยดินตัวอย่างในช่วงเวลา 14 ชั่วโมงแรกของการทดลอง โครเมตสามารถดูดซับด้วยดินตัวอย่างได้รวดเร็ว และค่อยๆ สูงขึ้นตามเวลาสัมผัสที่เพิ่มขึ้น และเริ่มคงที่ (เข้าสู่สมดุล) ในชั่วโมงที่ 120 ทั้งสองชุดการทดลอง ซึ่งนำไปใช้ในการทดลองแบบกะต่อไป

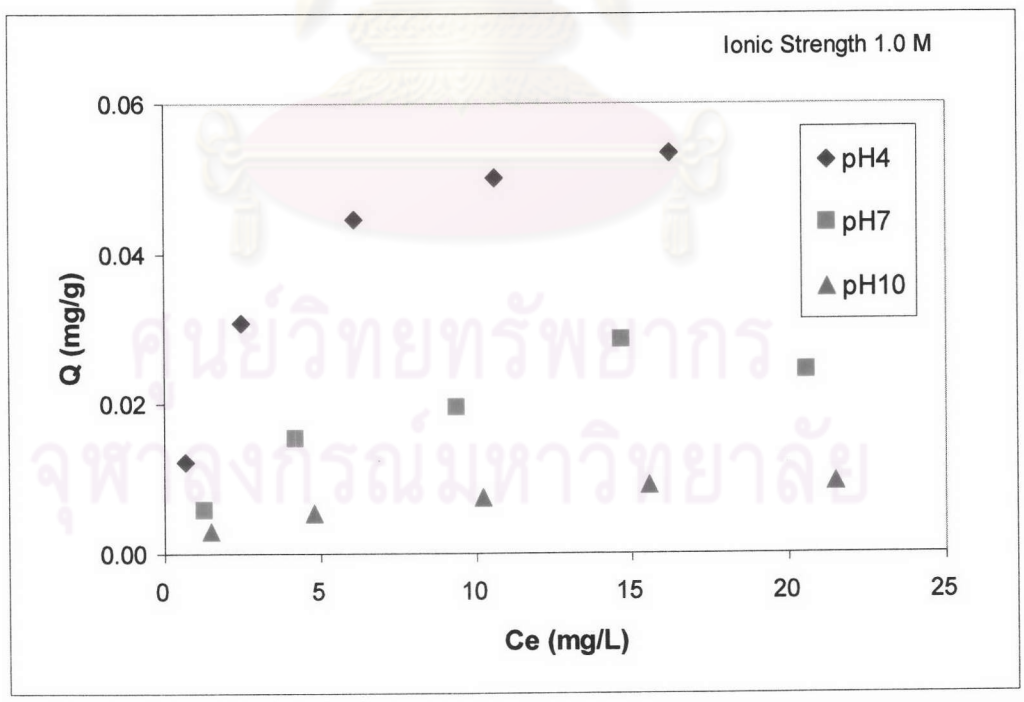
4.2 การศึกษาความสามารถในการดูดซับของโครเมตด้วยดินตัวอย่างโดยการศึกษาทดลองแบบกะ (Batch Test Study)

ผลการทดลองจำแนกตามความแรงไอออนที่สภาวะความแรงไอออน 0.01 โมล ชุดการทดลองที่พีเอชเริ่มต้น 4 7 และ10 มีค่าพีเอชเปลี่ยนแปลงเท่ากับ 4.20 ± 0.20 7.02 ±0.24 และ 9.61±0.34 นำผลการทดลองการเขียนกราฟเพื่อพิจารณาเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นที่สภาวะสมดุล (Ce) และความสามารถในการดูดซับโครเมต (Q) ดังรูปที่ 4.2 พบว่าที่พีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 4 ดินตัวอย่างมีความสามารถในการดูดซับโครเมตได้ดีที่สุดและรองลงมาคือที่พีเอชเริ่มต้น 7 และ 10 ตามลำดับ

ส่วนผลการทดลองที่สภาวะความแรงไอออน 1.0 โมล ชุดการทดลองที่พีเอชเริ่มต้น 4 7 และ 10 มีค่าพีเอชเปลี่ยนแปลงเท่ากับ 4.20±0.20 7.02±0.24 และ 9.61±0.34 นำผลการทดลองการเขียนกราฟเพื่อพิจารณาเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นที่สภาวะสมดุล (Ce) และความสามารถในการดูดซับโครเมต (Q) ดังรูปที่ 4.3 ได้ผลเช่นเดียวกับการทดลองที่สภาวะความแรงไอออน 0.01 โมล คือที่พีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 4 ดินตัวอย่างมีความสามารถในการดูดซับโครเมตได้ดีที่สุดและรองลงมาคือที่พีเอชเริ่มต้น 7 และ 10 ตามลำดับ



รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นที่สภาวะสมดุล (Ce) และความสามารถในการดูดซับโครเมต (Q) ที่ความแรงไอออน 0.01 โมล ที่ค่าพีเอชต่างๆ



รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นที่สภาวะสมดุล (Ce) และความสามารถในการดูดซับโครเมต (Q) ที่ความแรงไอออน 1.0 โมล ที่ค่าพีเอชต่างๆ

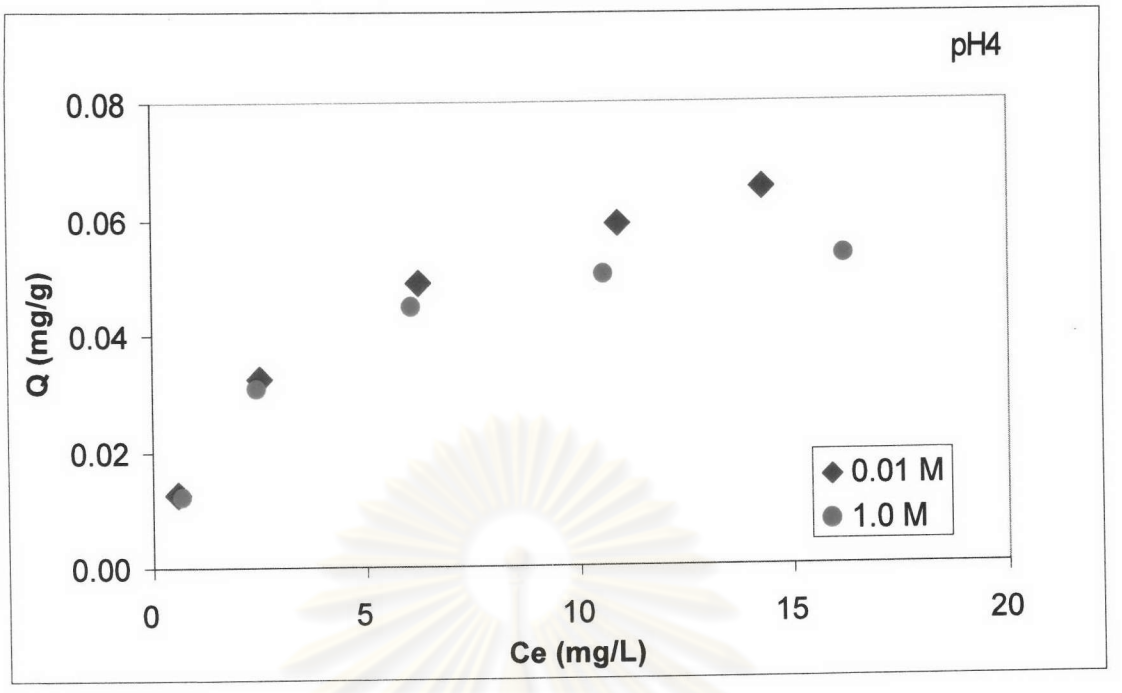
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ซึ่งแสดงให้เห็นว่า การดูดซับของโครเมตมีความสัมพันธ์กับค่าพีเอช ที่เป็นเช่นนี้เพราะการดูดซับของโครเมต จะเพิ่มมากขึ้นเมื่อค่าพีเอชมากขึ้น (จุฬาฤทธิ์, 2546 อ้างถึง Aoki และ Munemori, 1982 ; Zaachara และคณะ, 1987; Zachara และคณะ, 1989) เนื่องจากสมบัติของดินตัวอย่างนั้นส่วนมากเป็นดินตะกอนทรายซึ่งโดยธรรมชาติจะประกอบด้วยซิลิกาที่มีประจุลบเป็นส่วนมาก เมื่ออยู่ในสภาวะที่พีเอชต่ำจะทำให้ซิลิกาเปลี่ยนไปอยู่ในรูปของไอออนประจุลบน้อยลง ทำให้สามารถดูซับโครเมตในรูปประจุลบได้ดีขึ้น โดยในส่วนของโครเมตโดยปกติอยู่ในรูป Oxyanion คือ H_2CrO_4, $HCrO_4^{4-}$ และ CrO_4^{2-} ซึ่งเมื่อพิจารณาค่า pKa พบว่าค่า $pKa_1 = 0.92$ และค่า $pKa_2 = 6.437$ ซึ่งกล่าวได้คือ เมื่อพีเอชน้อยกว่ากว่าค่า pKa_2 โครเมตจะปรากฏในรูปของ $HCrO_4^{4-}$ ซึ่งมีประจุลบน้อยลงทำให้ดินซึ่งมีประจุลบดูดซับโครเมตได้มากขึ้น

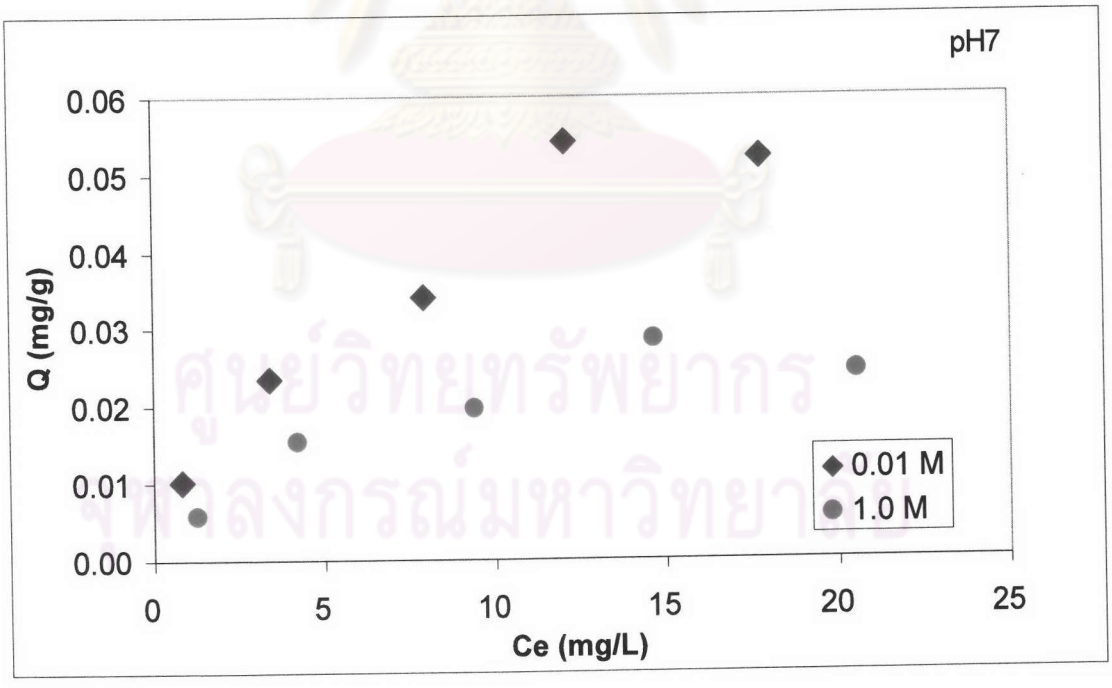
และเมื่อนำผลการทดลองมาจำแนกตามค่าพีเอชเริ่มต้น เพื่อเปรียบเทียบผลของความแรงไอออนต่อการดูดซับของโครเมตด้วยดินตัวอย่าง โดยพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นที่สภาวะสมดุล (Ce) และความสามารถในการดูดซับโครเมต (Q) ดังรูปที่ 4.4, 4.5 และ 4.6

พบว่าเมื่อสภาวะที่มีค่าความแรงไอออนเพิ่มขึ้นจาก 0.01 โมล เป็น 1.0 โมล ส่งผลให้ความสามารถในการดูดซับโครเมตลดลง โดยที่พีเอชเริ่มเท่ากับ 4 และ 10 ยังคงมีความสามารถในการดูดซับใกล้เคียงกัน ซึ่งแสดงให้เห็นว่าความแรงไอออนมีผลน้อยมากต่อการดูดซับของโครเมตด้วยดินตัวอย่าง แต่ในขณะที่พีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 7 ความแรงไอออนมีผลทำให้การดูดซับของโครเมต โดยการเพิ่มค่าความแรงไอออน ทำให้การดูดซับของโครเมตมีค่าลดลง

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

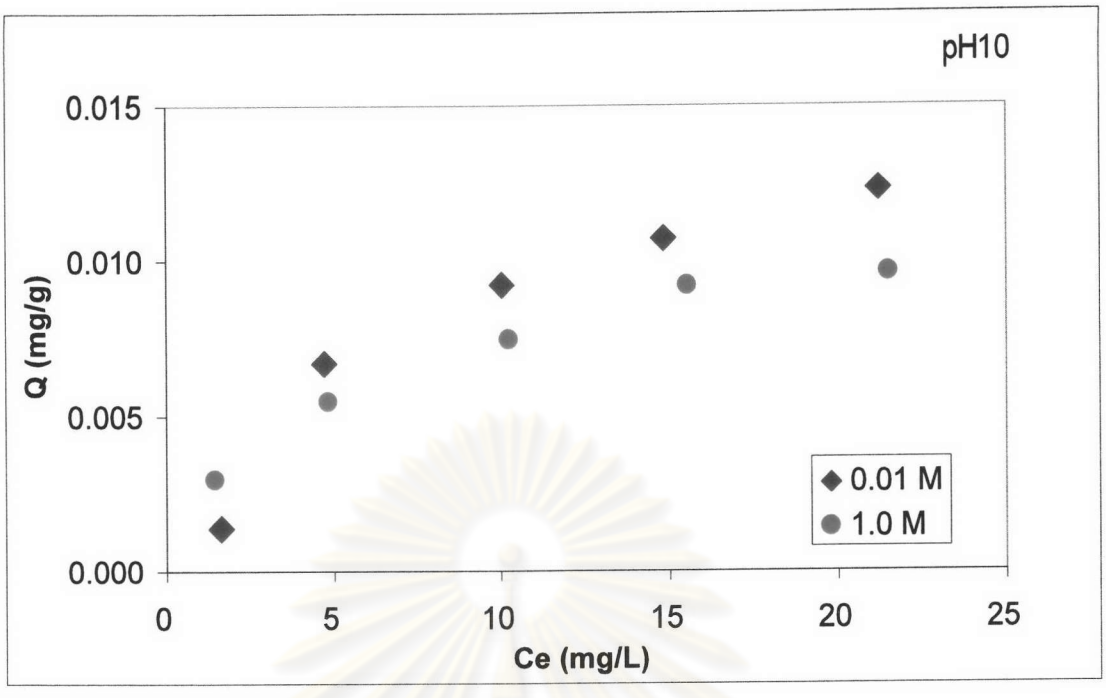


รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นที่สภาวะสมดุล (Ce) และความสามารถในการดูดซับโครเมต (Q) ที่ค่าพีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 4 ที่ความแรงไอออนต่างๆ



รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นที่สภาวะสมดุล (Ce) และความสามารถในการดูดซับโครเมต (Q) ที่ค่าพีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 7 ที่ความแรงไอออนต่างๆ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นที่สภาวะสมดุล (Ce) และความสามารถในการดูดซับโครเมต (Q) ที่ค่าพีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 10 ที่ความแรงไอออนต่างๆ

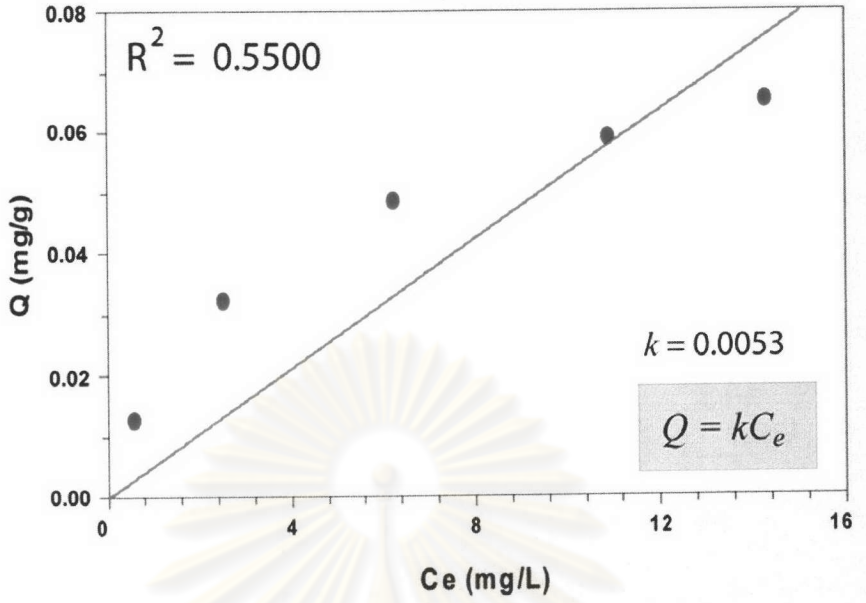
4.3 การหาค่าตัวแปรของการดูดซับ (Adsorption Parameters)

เมื่อนำข้อมูลจากผลการทดลอง มาวิเคราะห์ดูความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของโครเมตที่สภาวะสมดุล (Ce) และความสามารถในการดูดซับโครเมต (Q) แล้วใช้โปรแกรม Curve Expert 1.3 ซึ่งเป็นโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ใช้วิเคราะห์ข้อมูลเพื่อสร้างสมการในรูปแบบต่างๆ ทำการสร้างเส้นกราฟไอโซเทอมการดูดซับแบบเชิงเส้น (Linear Adsorption Isotherm) ไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงมัวร์ (Langmuir Adsorption Isotherm) และไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรุนดลิช (Freundlich Adsorption Isotherm) จากข้อมูลจากการทดลอง ซึ่งโปรแกรม Curve Expert 1.3 จะทำการสร้างกราฟพร้อมทั้งคำนวณค่าคงที่ต่างๆ ในสมการไอโซเทอมการดูดซับทั้ง 3 แบบดังกล่าว พร้อมทั้งคำนวณหาค่า R-Square

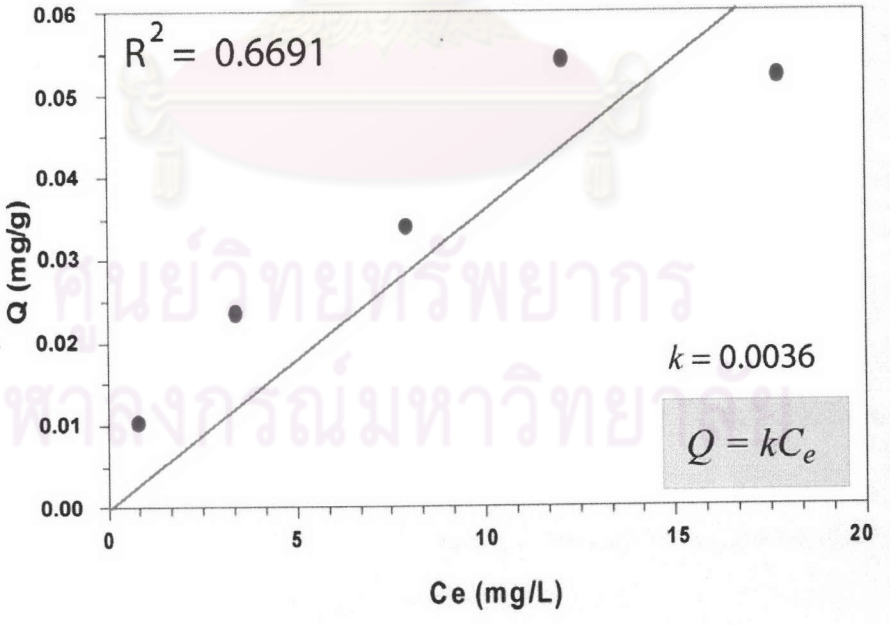
สำหรับไอโซเทอมการดูดซับแบบเชิงเส้น (Linear Adsorption Isotherm) และค่าคงที่ของการดูดซับ รวมทั้ง ค่า R-Square แสดงในรูปที่ 4.7 ถึง 4.12

สำหรับไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงมัวร์ (Langmuir Adsorption Isotherm) และค่าคงที่ของการดูดซับ รวมทั้ง ค่า R-Square ของ แสดงในรูปที่ 4.13 ถึง 4.18

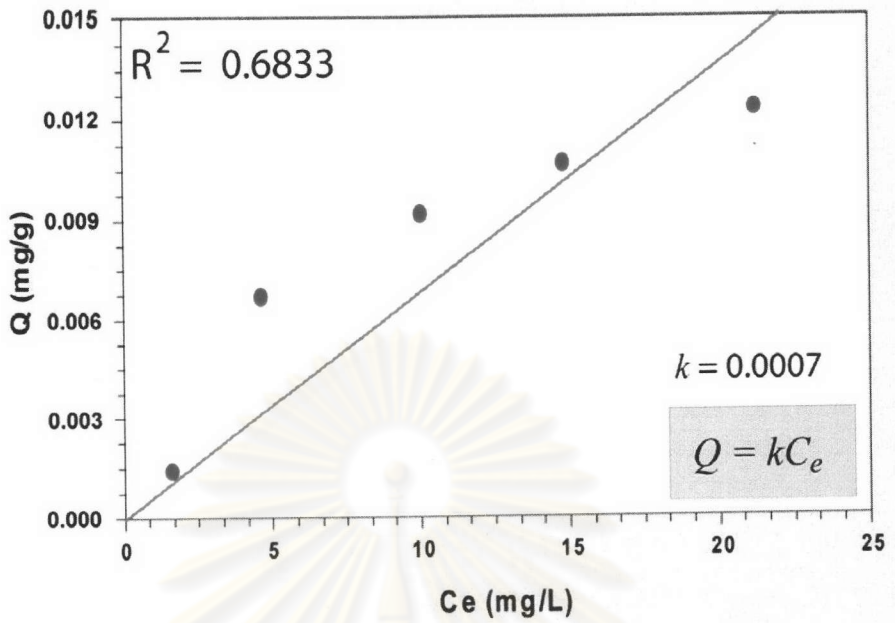
สำหรับไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรุนดลิช (Freundlich Adsorption Isotherm และค่าคงที่ของการดูดซับ รวมทั้ง ค่า R-Square ของ แสดงในรูปที่ 4.19 ถึง 4.24



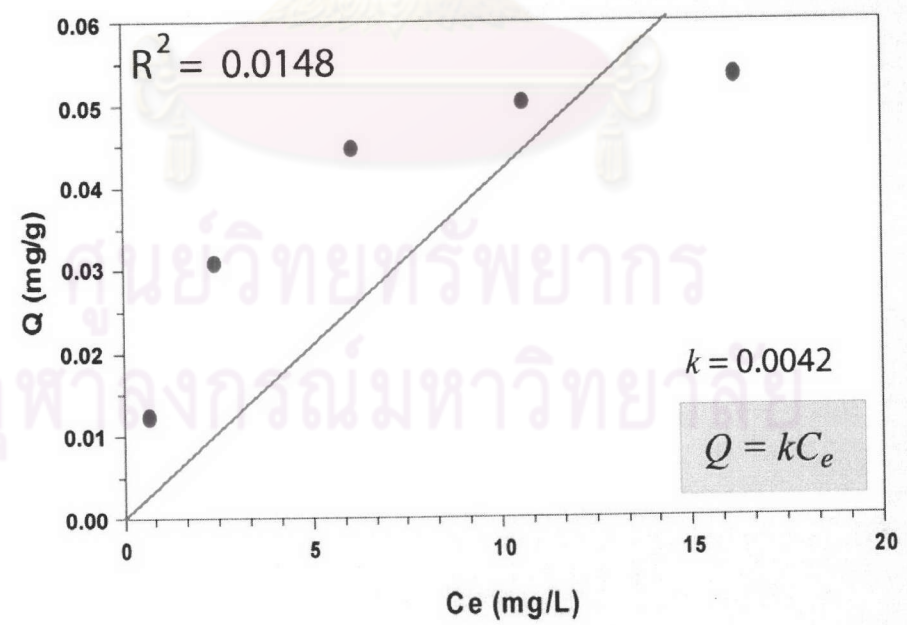
รูปที่ 4.7 ไอโซเทอมการดูดซับแบบเชิงเส้นของโครเมตด้วยดินตัวอย่างที่พีเอช 4 ความแรงไอออน 0.01 โมล



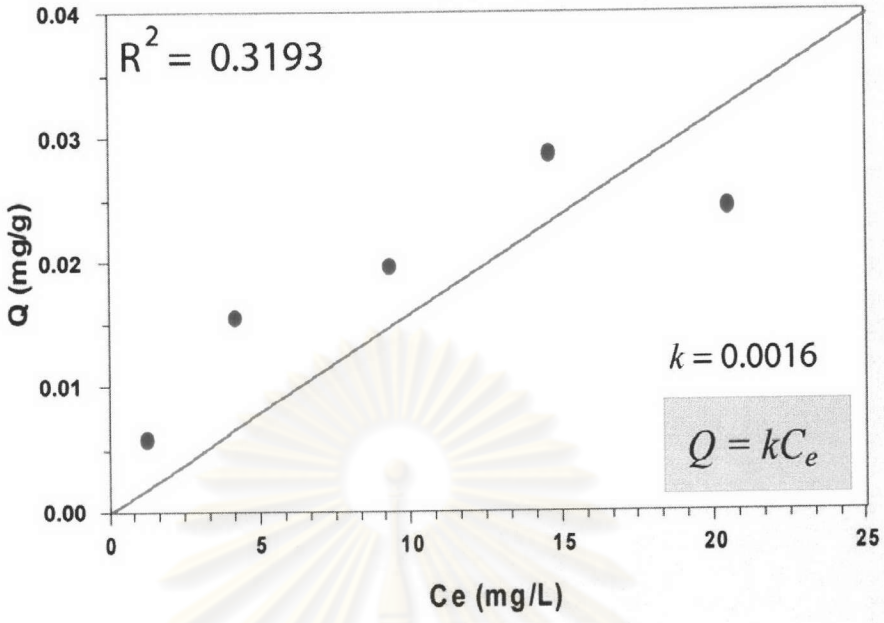
รูปที่ 4.8 ไอโซเทอมการดูดซับแบบเชิงเส้นของโครเมตด้วยดินตัวอย่างที่พีเอช 7 ความแรงไอออน 0.01 โมล



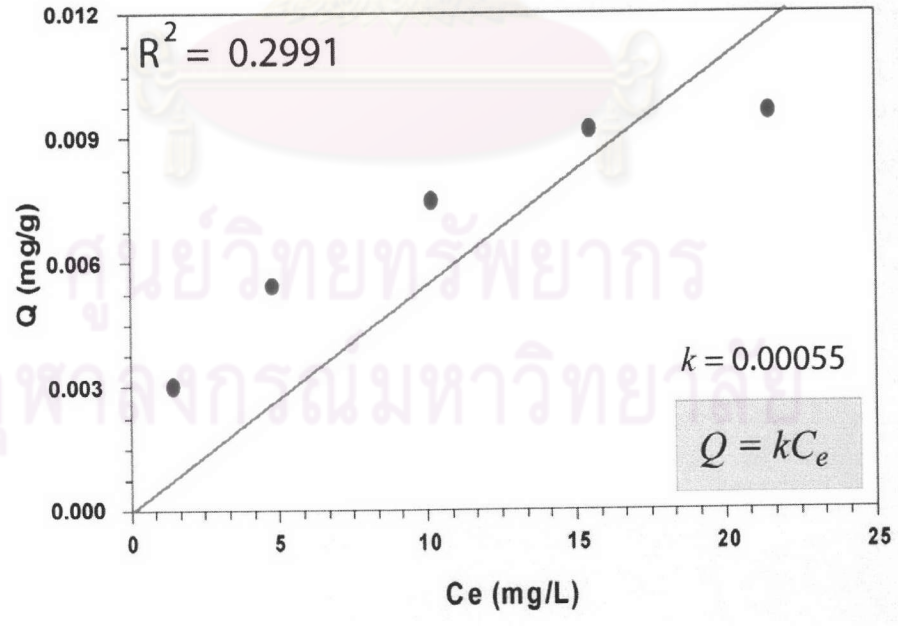
รูปที่ 4.9 ไอโซเทอมการดูดซับแบบเชิงเส้นของโครเมตด้วยดินตัวอย่างที่พีเอช 10 ความแรงไอออน 0.01 โมล



รูปที่ 4.10 ไอโซเทอมการดูดซับแบบเชิงเส้นของโครเมตด้วยดินตัวอย่างที่พีเอช 4 ความแรงไอออน 1.0 โมล

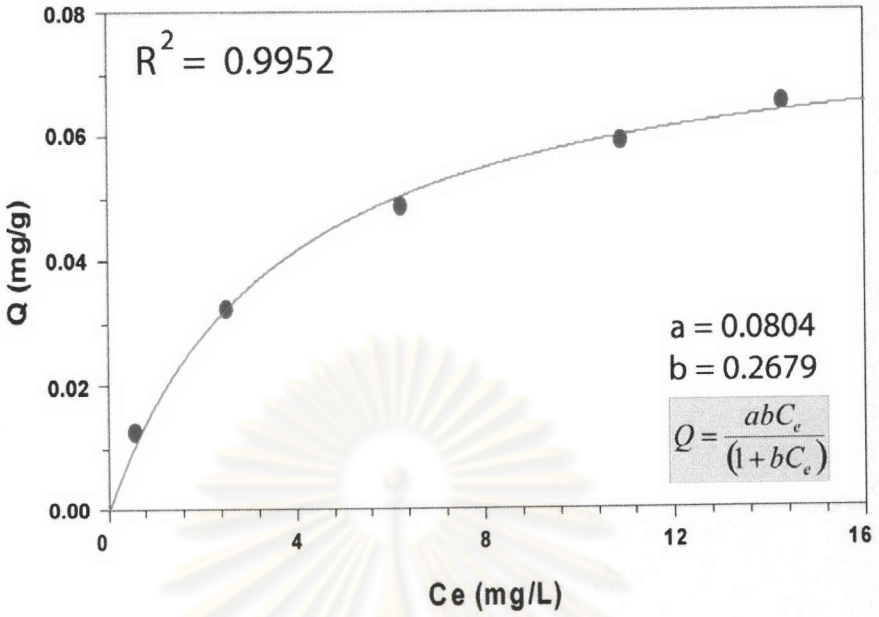


รูปที่ 4.11 ไอโซเทอมการดูดซับแบบเชิงเส้นของโครเมตด้วยดินตัวอย่างที่พีเอช 7 ความแรงไอออน 1.0 โมล

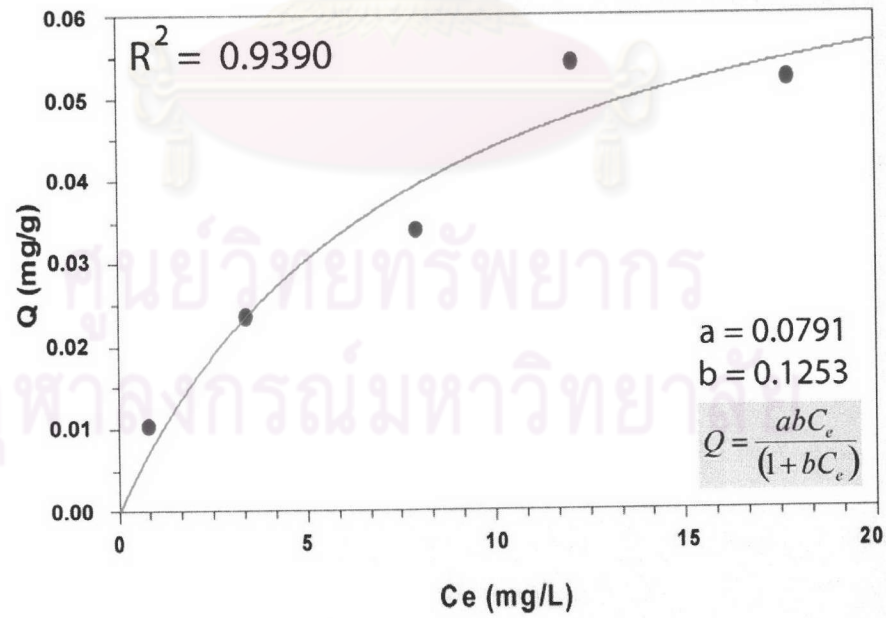


รูปที่ 4.12 ไอโซเทอมการดูดซับแบบเชิงเส้นของโครเมตด้วยดินตัวอย่างที่พีเอช 10 ความแรงไอออน 1.0 โมล

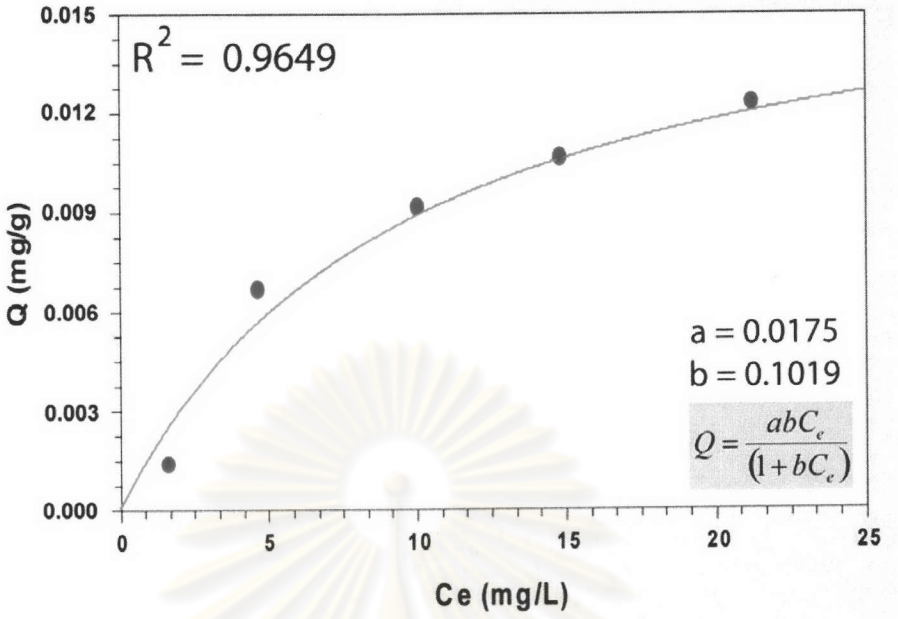
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



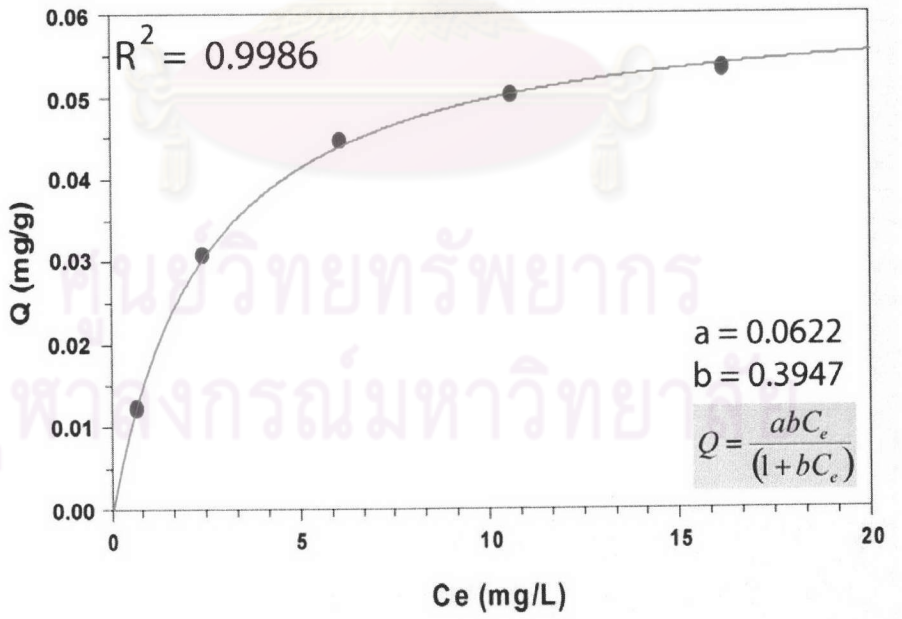
รูปที่ 4.13 ไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงมัวร์ของโครเมตด้วยดินตัวอย่างที่พีเอช 4 ความแรงไอออน 0.01 โมล



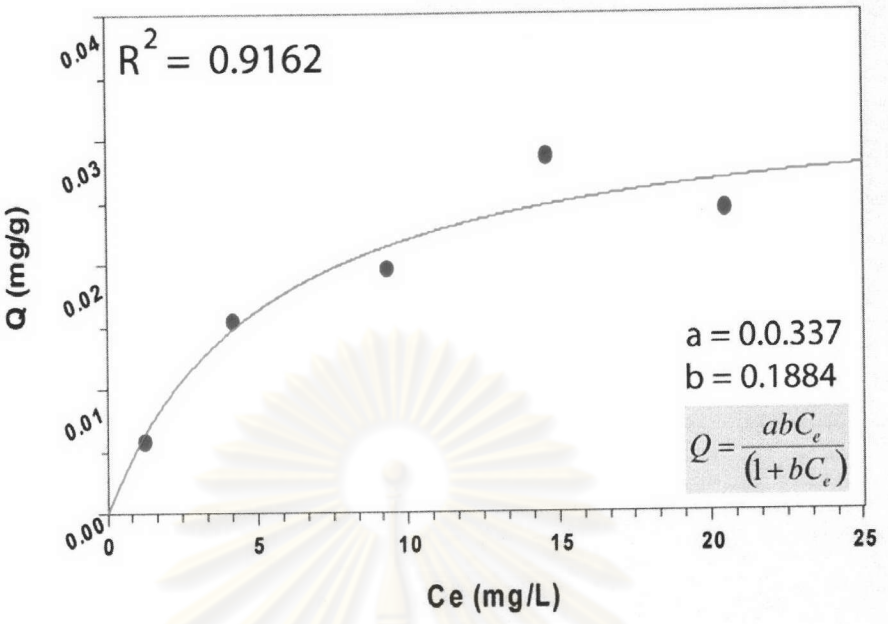
รูปที่ 4.14 ไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงมัวร์ของโครเมตด้วยดินตัวอย่างที่พีเอช 7 ความแรงไอออน 0.01 โมล



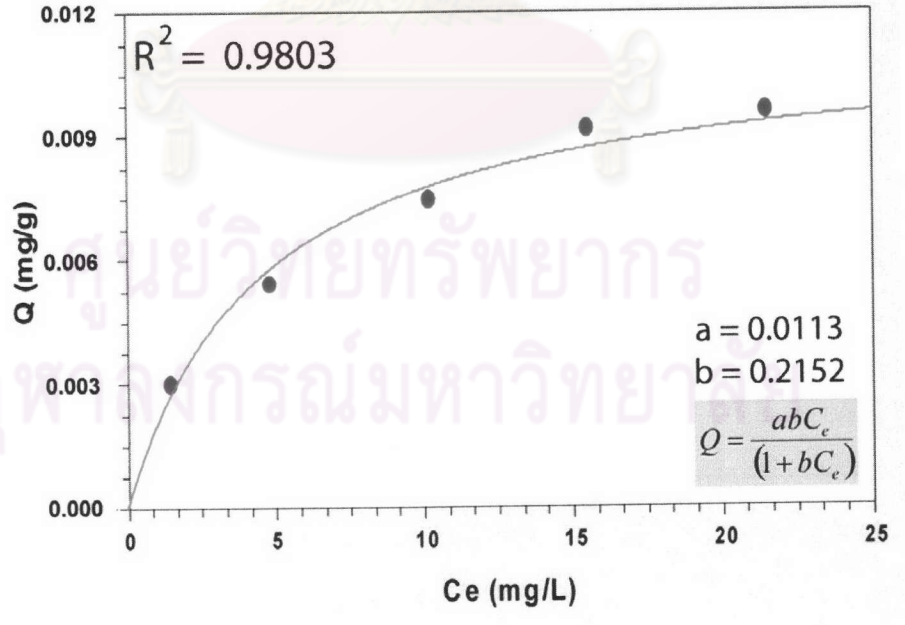
รูปที่ 4.15 ไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงมัวร์ของโครเมตด้วยดินตัวอย่างที่พีเอช 10 ความแรงไอออน 0.01 โมล



รูปที่ 4.16 ไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงมัวร์ของโครเมตด้วยดินตัวอย่างที่พีเอช 4 ความแรงไอออน 1.0 โมล

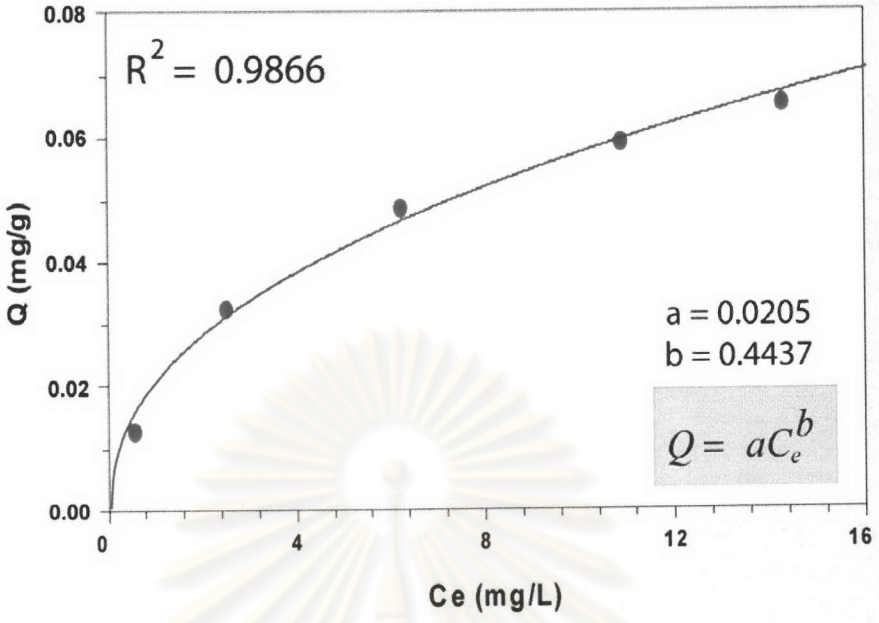


รูปที่ 4.17 ไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงมัวร์ของโครเมตด้วยดินตัวอย่างที่พีเอช 7 ความแรงไอออน 1.0 โมล

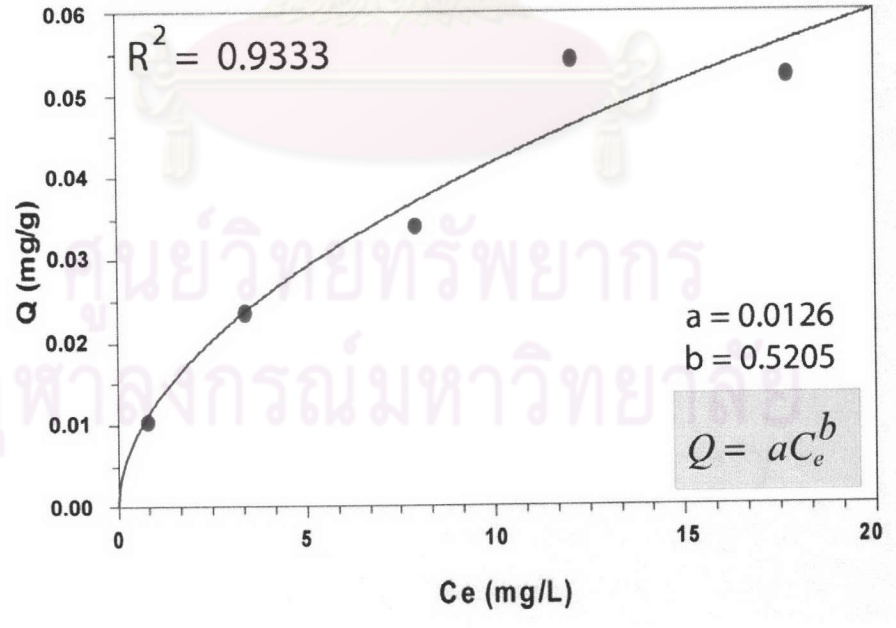


รูปที่ 4.18 ไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงมัวร์ของโครเมตด้วยดินตัวอย่างที่พีเอช 10 ความแรงไอออน 1.0 โมล

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

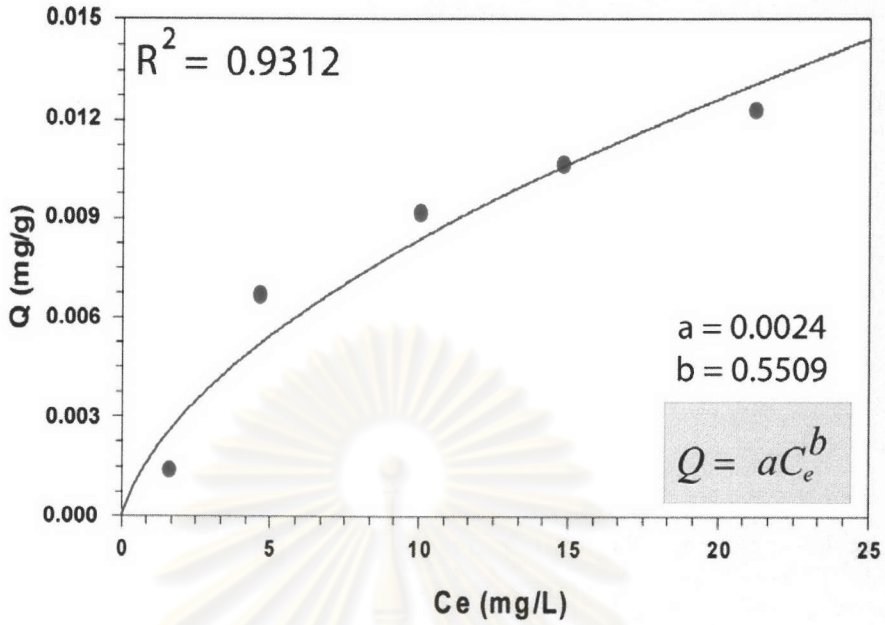


รูปที่ 4.19 ไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรุนดลิชของโครเมตด้วยดินตัวอย่างที่พีเอช 4 ความแรงไอออน 0.01 โมล

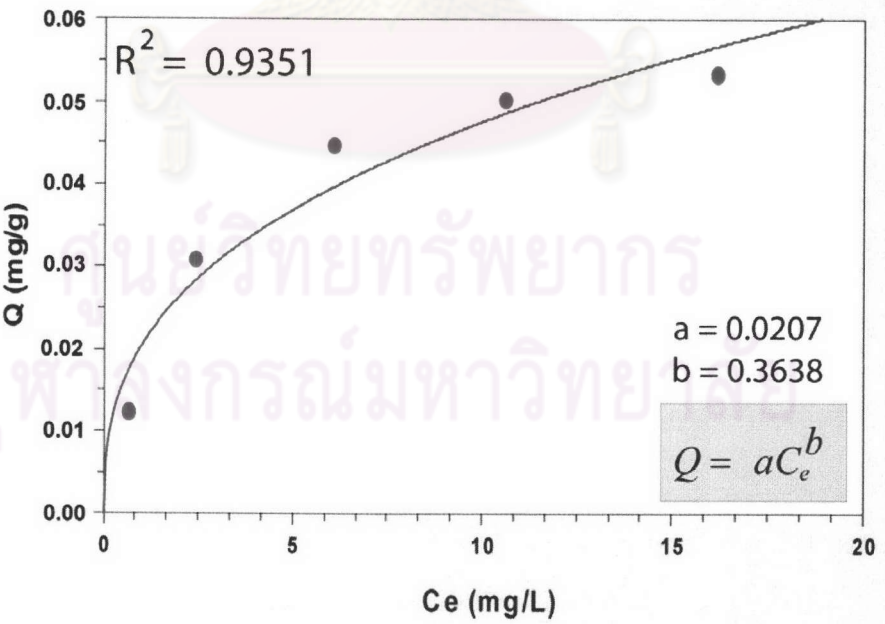


รูปที่ 4.20 ไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรุนดลิชของโครเมตด้วยดินตัวอย่างที่พีเอช 7 ความแรงไอออน 0.01 โมล

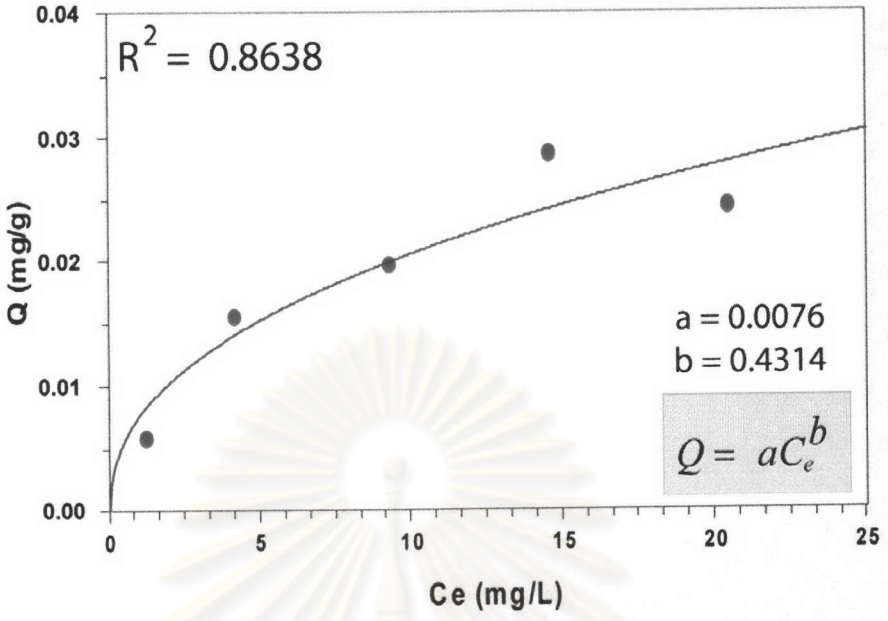
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



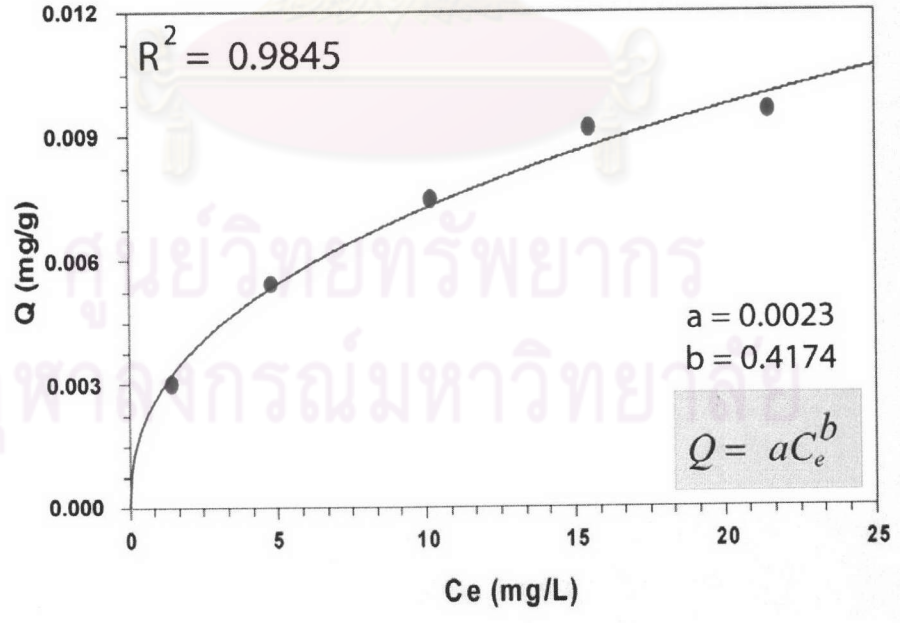
รูปที่ 4.21 ไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรุนดลิชของโครเมตด้วยดินตัวอย่างที่พีเอช 10 ความแรงไอออน 0.01 โมล



รูปที่ 4.22 ไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรุนดลิชของโครเมตด้วยดินตัวอย่างที่พีเอช 4 ความแรงไอออน 1.0 โมล



รูปที่ 4.23 ไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรุนดลิชของโครเมตด้วยดินตัวอย่างที่พีเอช 7 ความแรงไอออน 1.0 โมล



รูปที่ 4.24 ไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรุนดลิชของโครเมตด้วยดินตัวอย่างที่พีเอช 10 ความแรงไอออน 1.0 โมล

จากกราฟในรูปที่ 4.7 ถึง 4.24 พิจารณาจากค่า R-Square ของกราฟไอโซเทอมของการดูดซับในแบบต่างๆ ได้ค่า R-Square ดังแสดงในตารางที่ 4.1 ดังต่อไปนี้

ตารางที่ 4.1 ค่า R-Square ของกราฟไอโซเทอมการดูดซับโครเมตด้วยดินตัวอย่างในแบบต่างๆ

pH	Ionic Strength	Linear R-square	Langmuir R-square	Freundlich R-square
4	0.01 M	0.5500	0.9952	0.9866
7	0.01 M	0.6691	0.9390	0.9333
10	0.01 M	0.6833	0.9649	0.9312
4	1.0 M	0.0148	0.9986	0.9351
7	1.0 M	0.3193	0.9162	0.8638
10	1.0 M	0.2991	0.9803	0.9845

จากตารางที่ 4.1 พิจารณาค่า R-Square ของไอโซเทอมการดูดซับแบบเชิงเส้น ไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงมัวร์ และไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรุนดลิช พบว่าการทดลองสอดคล้องกับทั้งไอโซเทอมแบบแลงมัวร์และไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรุนดลิช เนื่องจากมีค่า R-Square ใกล้เคียงกันมาก เมื่อพิจารณากลไกการดูดซับอาจจะเกิดขึ้นเพียงชั้นเดียว (Mono layer) หรือ เกิดขึ้นหลายชั้นก็ได้ (Multi layer) จึงเป็นไปได้ว่าการทดลองนี้สอดคล้องกับสมการไอโซเทอมทั้งแบบแลงมัวร์และแบบฟรุนดลิช

เมื่อพิจารณาจากกราฟไอโซเทอมทั้งสองแบบพบว่า การทดลองน่าจะมีความสอดคล้องกับไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงมัวร์มากกว่า เพราะค่า R-Square มีค่ามากกว่า และที่ความเข้มข้นสูงสุดที่สมดุลของโครเมต เส้นกราฟเริ่มจะคงที่ ซึ่งน่าจะมีการดูดซับแบบชั้นเดียวมากกว่า จึงขอเลือกไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงมัวร์ ดังสมการที่ 2.15 มาคำนวณค่าพารามิเตอร์ในการดูดซับเพื่อใช้ในแบบจำลองคอมพิวเตอร์ในขั้นตอนต่อไป

$$Q = \frac{abC_e}{(1+bC_e)} \qquad (2.15)$$

ตัวอย่างจากรูปที่ 4.13 ไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงมัวร์ของโครเมตด้วยดินตัวอย่างที่พีเอช 4 ความแรงไอออน 0.01 โมล มีค่า a = 0.0804 และ b = 0.2679 และนำค่า a มาคูณกับค่า b ได้ค่า a x b = 0.02154 แล้วนำไปแทนค่าในสมการไอโซเทอมได้สมการที่ 2.16 ดังนี้

$$Q = \frac{0.02154C_e}{(1+0.2679C_e)} \qquad (2.16)$$

โดยที่ Q มีหน่วยเป็นมิลลิกรัมโครเมตต่อกรัมของดิน

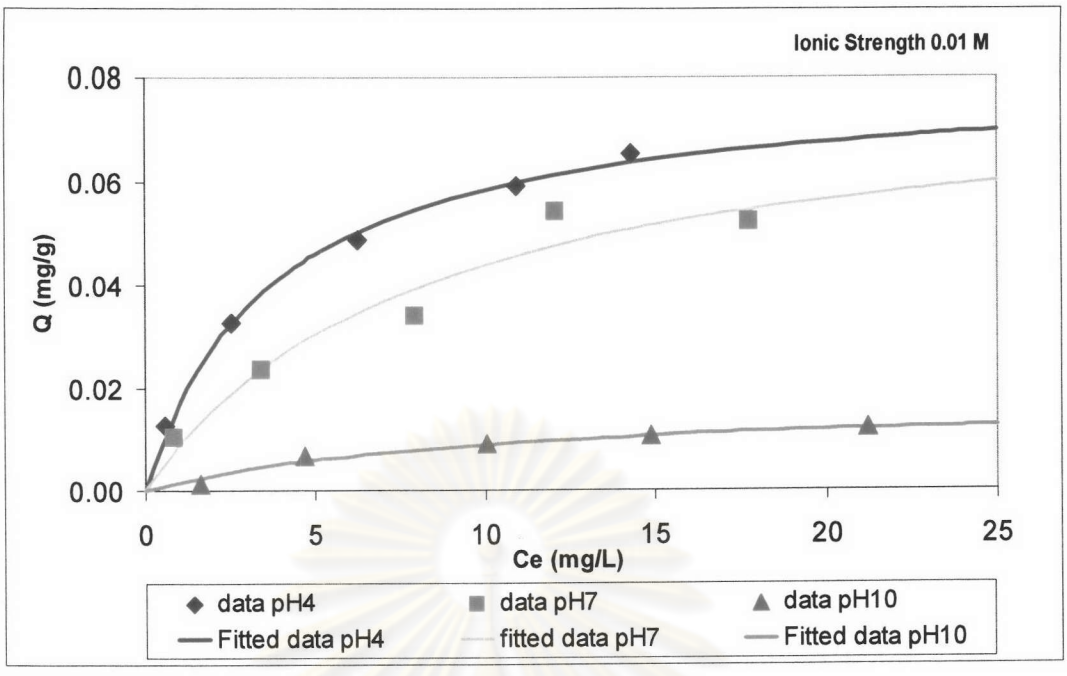
C_e มีหน่วยเป็นมิลลิกรัมโครเมตต่อลิตร

ซึ่งที่สภาวะอื่นๆ แสดงไว้ในตารางที่ 4.3 และทำการแทนค่าความเข้มข้นของโครเมตที่สมดุล (Ce) สามารถคำนวณค่าความสามารถในการดูดซับ (Q) ได้ดังตารางในภาคผนวก ข.2 ซึ่งนำมาเขียนกราฟเทียบกับข้อมูลจากการทดลองได้ดังในรูปที่ 4.25 และ 4.26

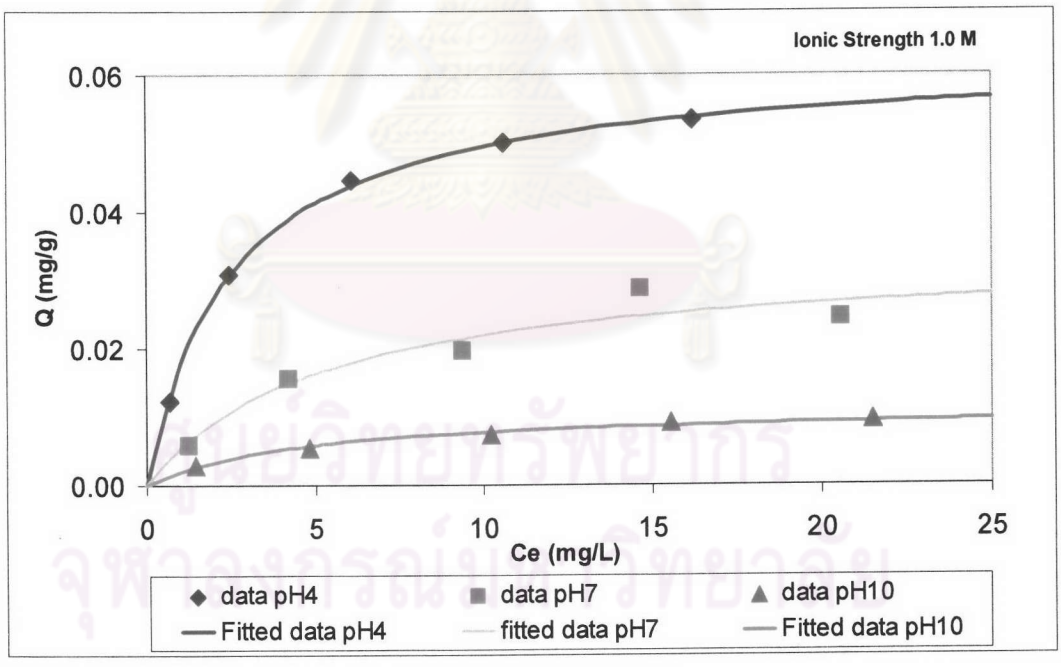
ตารางที่ 4.2 สมการไอโซเทอมการดูดซับของโครเมตและพารามิเตอร์ของการดูดซับแบบแลงมัวร์ของโครเมตด้วยตัวอย่างดินที่สภาวะต่างๆ

พีเอช	ความแรงไอออน	สมการไอโซเทอมของการดูดซับแบบแลงมัวร์	a	b
4	0.01 โมล	$Q = \frac{0.02154C_e}{(1+0.2679C_e)}$	0.0804	0.2679
7	0.01 โมล	$Q = \frac{0.00991C_e}{(1+0.1253C_e)}$	0.0791	0.1253
10	0.01 โมล	$Q = \frac{0.00178C_e}{(1+0.1019C_e)}$	0.0175	0.1019
4	1.0 โมล	$Q = \frac{0.02455C_e}{(1+0.3947C_e)}$	0.0622	0.3947
7	1.0 โมล	$Q = \frac{0.00635C_e}{(1+0.1884C_e)}$	0.0337	0.1884
10	1.0 โมล	$Q = \frac{0.00242C_e}{(1+0.2142C_e)}$	0.0113	0.2142

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.25 ผลของการดูดซับของโครเมตที่ค่าพีเอช 4, 7, 10 ที่ความแรงไอออน 0.01 โมล

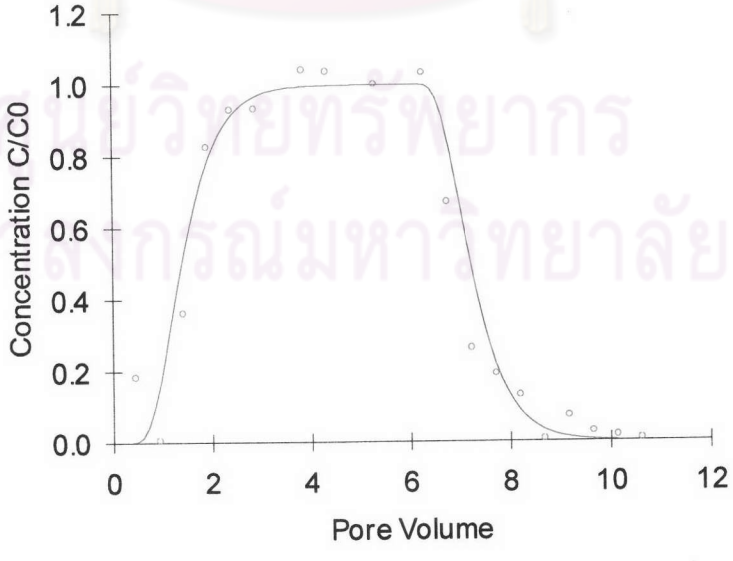


รูปที่ 4.26 ผลของการดูดซับของโครเมตที่ค่าพีเอช 4, 7, 10 ที่ความแรงไอออน 1.0 โมล

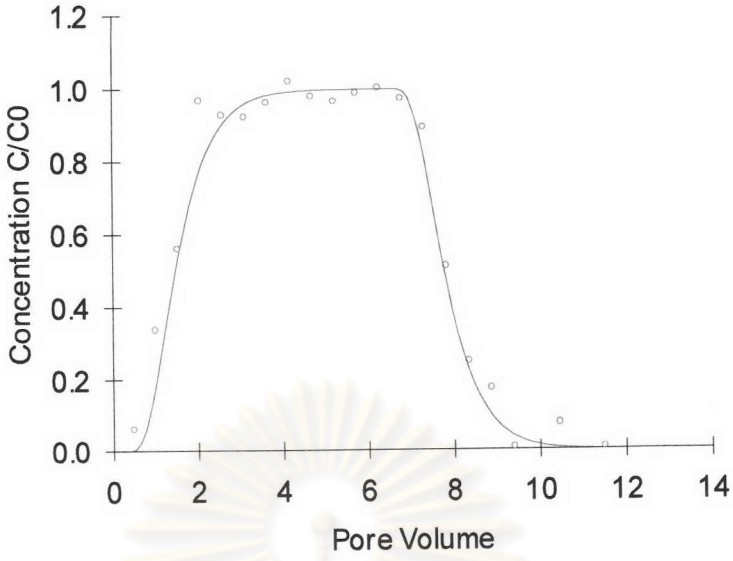
4.4 การทดลองหาค่าคงที่ของการแพร่กระจาย (Dispersion Coefficient) ของตัวอย่างดินด้วยการทดลองแบบคอลัมน์

เมื่อเก็บตัวอย่างไปวิเคราะห์ความเข้มข้นของสารละลายโบรไมด์ แล้วนำมาเขียน กราฟอัตราส่วนระหว่างความเข้มข้นของโบรไมด์ขาออกกับความเข้มข้นขาเข้า กับเวลาในการทดลอง เพื่อนำมาทำการหาค่าคงที่ของการแพร่กระจาย (Dispersion Coefficient) โดยในขั้นนี้ใช้โปรแกรมชื่อ STANMOD version 2.0 ซึ่งในการคำนวณในการทดลองนี้ใช้โปรแกรมย่อยที่ชื่อ CFITIM โดยพัฒนาซอฟท์แวร์โดย U.S. Salinity Laboratory Agricultural Research Service โดยนำข้อมูลจากการทดลอง ค่าสมบัติต่างๆ ของดินตัวอย่าง จากนั้นโปรแกรมจะทำการ Fitted Curve เพื่อหาค่า Pecklet Number โดยแสดงข้อมูลจากการทดลอง (แสดงด้วยสัญลักษณ์ (O)) และเส้นที่ได้จากการ Fitted Curve (แสดงด้วยเส้นลากผ่าน) จากนั้นนำค่าที่ได้ไป คำนวณค่าคงที่ของการแพร่กระจาย (Dispersion Coefficient) ดังแสดงในรูปที่ 4.27 และ 4.28

จากการคำนวณจากโปรแกรมคอมพิวเตอร์ CFITIM ได้ค่า Pecklet Number เท่ากับ 11.64และ9.69 สำหรับคอลัมน์ที่ 1 และ คอลัมน์ที่ 2 เมื่อนำไปหาค่าคงที่ของการแพร่กระจาย (Dispersion Coefficient) จะได้เท่ากับ 9.69 และ 11.64 เซนติเมตร^{2}ต่อชั่วโมงตามลำดับ เมื่อคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การกระจายได้เท่ากับ 9.87 และ 8.90 เซนติเมตร^{2}ต่อชั่วโมง ซึ่งคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การกระจายเฉลี่ยได้เท่ากับ 9.39 เซนติเมตร^{2}ต่อชั่วโมงเพื่อนำไปใช้ในขั้นตอนทดลองการเคลื่อนที่ของโครเมต ในขั้นตอนต่อไป



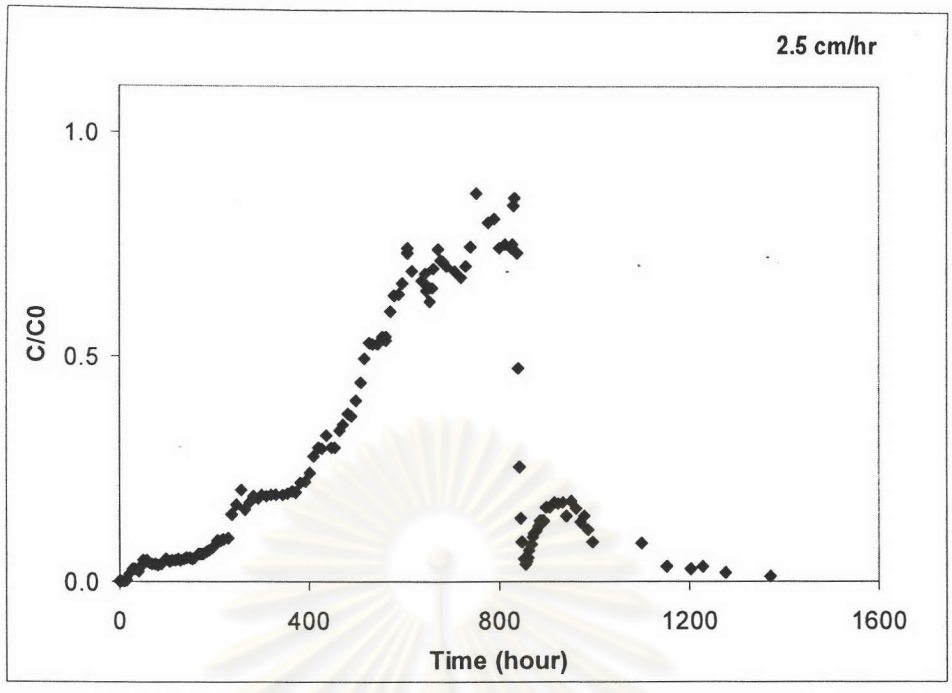
รูปที่ 4.27 กราฟอัตราส่วนระหว่างความเข้มข้นของโบรไมด์ขาออกกับความเข้มข้นขาเข้ากับเวลาที่ใช้ในการทดลองที่ไหลผ่านคอลัมน์ชุดที่ 1



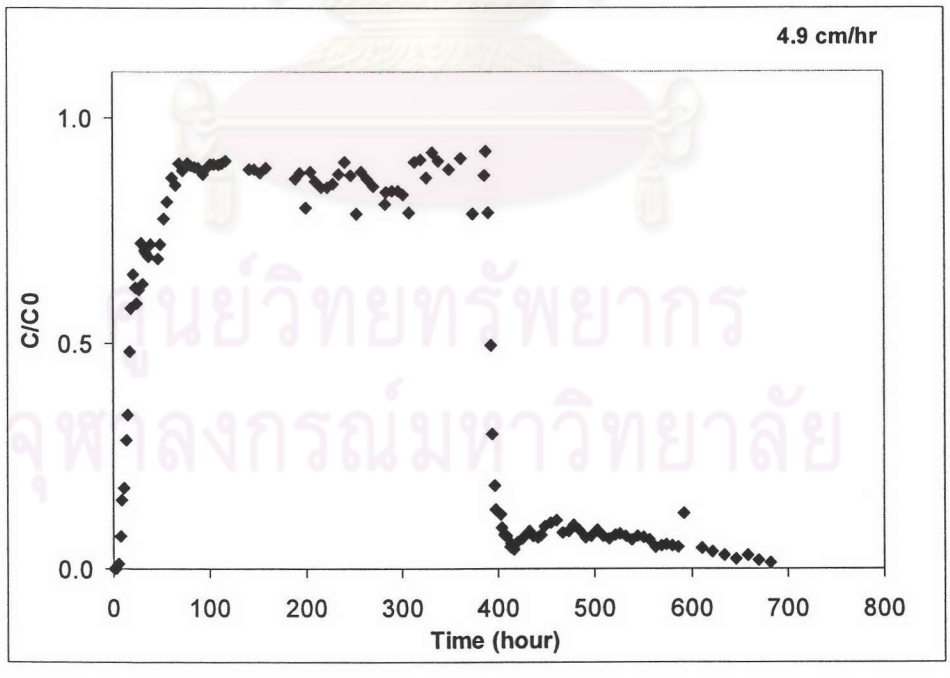
รูปที่ 4.28 กราฟอัตราส่วนระหว่างความเข้มข้นของโบรไมด์ขาออกกับความเข้มข้นขาเข้ากับเวลาที่ใช้ในการทดลองที่ไหลผ่านคอลัมน์ชุดที่ 2

4.5 ผลการทดลองผลของความเร็วน้ำผ่านรูพรุนต่อการเคลื่อนตัวของโครเมตโดยใช้การทดลองแบบคอลัมน์ (Column Test Study)

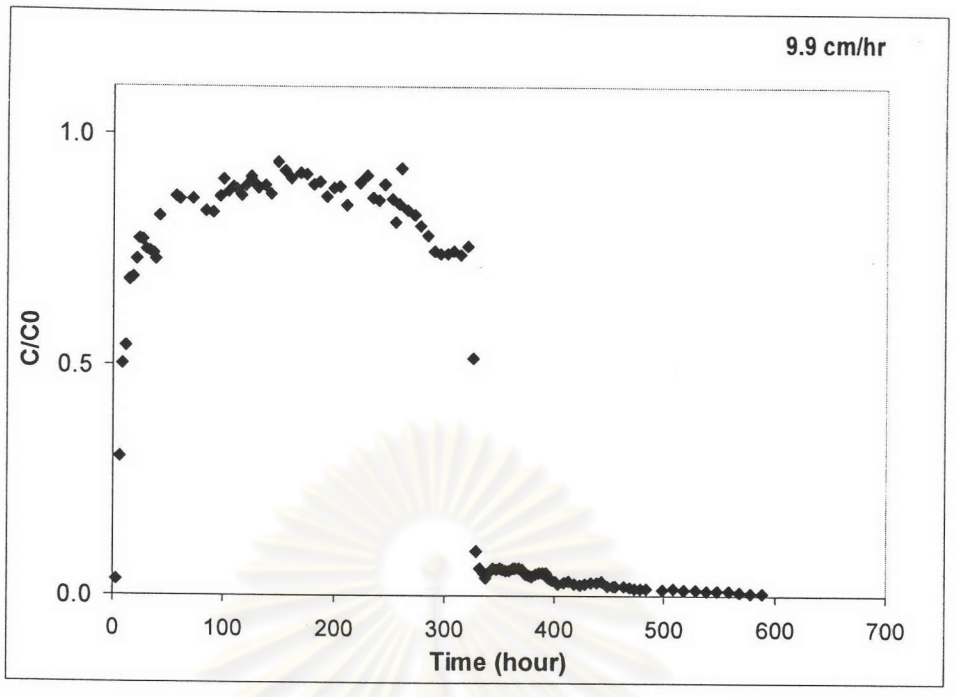
การทดลองนี้เป็นการทดลองโดยใช้คอลัมน์ทำด้วยวัสดุเทฟลอน เส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 2.54 เซนติเมตร ความยาว 20 เซนติเมตร ภายในบรรจุดินตัวอย่างปริมาณ 165 +/- 2 กรัม เต็มและสม่ำเสมอในคอลัมน์ โดยความสูงของชั้นดินเท่ากับ 20 เซนติเมตร ใช้โครเมตความเข้มข้น 15 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่พีเอช 4, 7, 10 โดยแต่ละค่าพีเอช ที่ความแรงไอออน 0.01 โมล กำหนดความเร็วน้ำผ่านรูพรุนโดยเติมแบบไหลขึ้นที่ 2.5 ,4.9 ,9.9 และ 19.7 เซนติเมตรต่อชั่วโมง (ประมาณ 5, 10, 20, 40 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง) ทุกชุดทดลองแบบต่อเนื่อง ทำการเก็บตัวอย่างน้ำออกตามเวลาไปวิเคราะห์หาปริมาณโครเมตที่ผ่านคอลัมน์ที่เวลาต่างๆ จนความเข้มข้นของสารละลายออกส่วนความเข้มข้นของสารละลายเข้า ($C/C_0 = 1$) จากนั้นเปลี่ยนเป็นใช้น้ำกลั่นเติมเข้าไปแบบไหลขึ้นด้วยความเร็วน้ำผ่านรูพรุนเดียวกัน และเก็บตัวอย่างน้ำออกตามเวลาที่ไปวิเคราะห์หาปริมาณโครเมต ที่ผ่านคอลัมน์ที่เวลาต่างๆ จนความเข้มข้นของสารละลายในน้ำออกมีความเข้มข้นน้อยกว่า 2 % ของน้ำเข้า ($C/C_0 < 2\%$) แล้วจึงนำข้อมูลทั้งหมดที่ได้มาเขียนกราฟอัตราส่วนความเข้มข้นของโครเมตกับเวลาที่ใช้ในการทดลองที่ภาวะที่กำหนดตอนต้น ผลการทดลองทั้ง 12 ชุดการทดลอง แสดงดังรูปที่ 4.29 ถึง 4.40



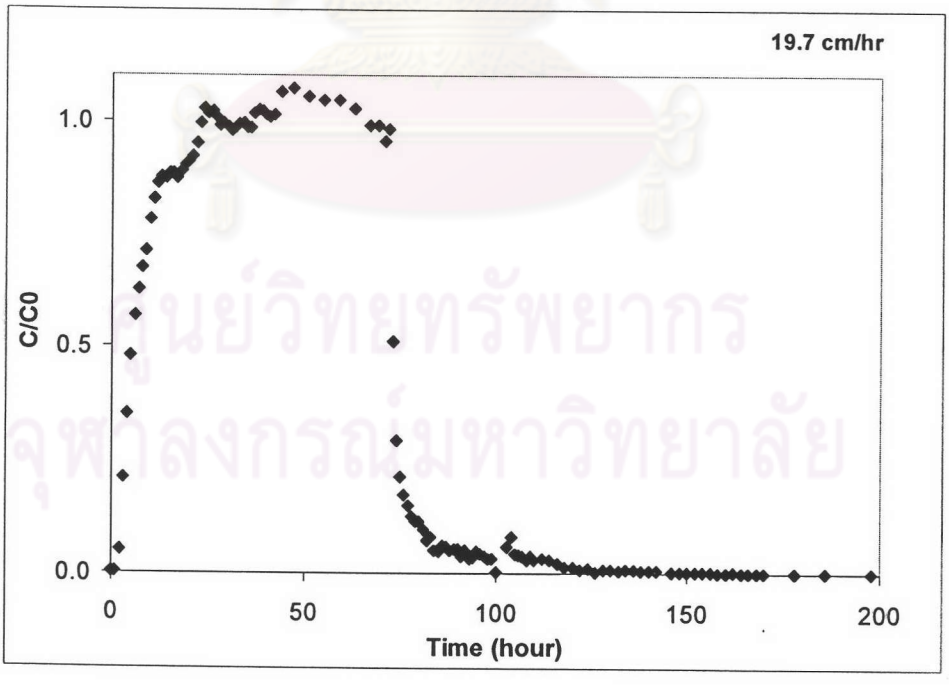
รูปที่ 4.29 กราฟอัตราส่วนระหว่างความเข้มข้นของโครเมตขาออกกับความเข้มข้นขาเข้ากับเวลาที่ใช้ในการทดลองที่ความเร็วน้ำผ่านรูพรุน 2.5 เซนติเมตรต่อชั่วโมง ที่พีเอชเริ่มต้น 4 และความแรงไอออน 0.01 โมล



รูปที่ 4.30 กราฟอัตราส่วนระหว่างความเข้มข้นของโครเมตขาออกกับความเข้มข้นขาเข้ากับเวลาที่ใช้ในการทดลองที่ความเร็วน้ำผ่านรูพรุน 4.9 เซนติเมตรต่อชั่วโมง ที่พีเอชเริ่มต้น 4 และความแรงไอออน 0.01 โมล

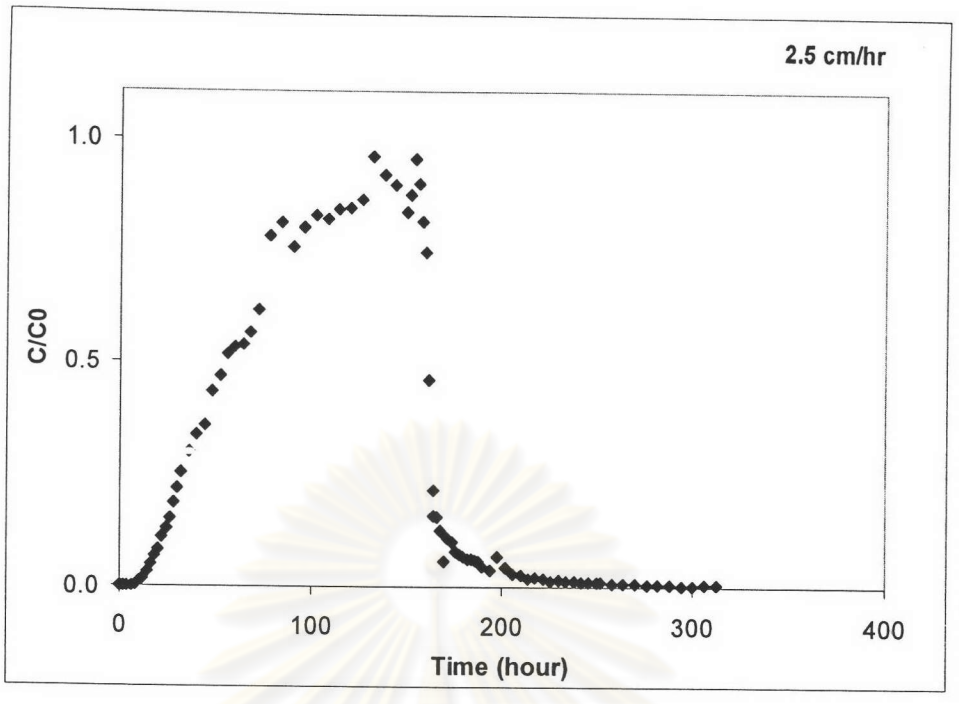


รูปที่ 4.31 กราฟอัตราส่วนระหว่างความเข้มข้นของโครเมตขาออกกับความเข้มข้นขาเข้ากับเวลาที่ใช้ในการทดลองที่ความเร็วน้ำผ่านรูพรุน 9.9 เซนติเมตรต่อชั่วโมง ที่พีเอชเริ่มต้น 4 และความแรงไอออน 0.01 โมล

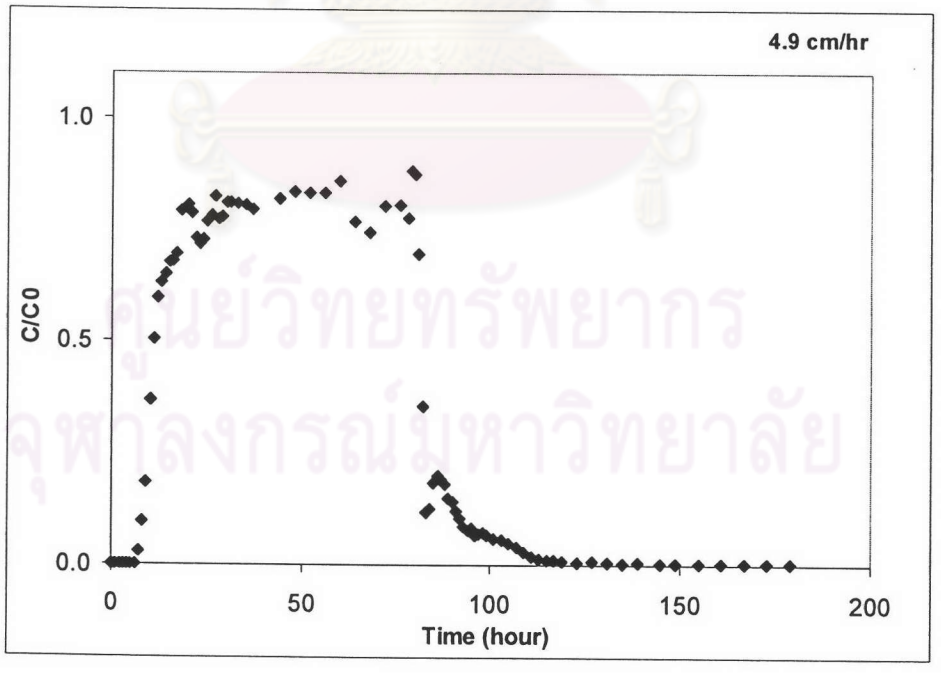


รูปที่ 4.32 กราฟอัตราส่วนระหว่างความเข้มข้นของโครเมตขาออกกับความเข้มข้นขาเข้ากับเวลาที่ใช้ในการทดลองที่ความเร็วน้ำผ่านรูพรุน 19.7 เซนติเมตรต่อชั่วโมง ที่พีเอชเริ่มต้น 4 และความแรงไอออน 0.01 โมล

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

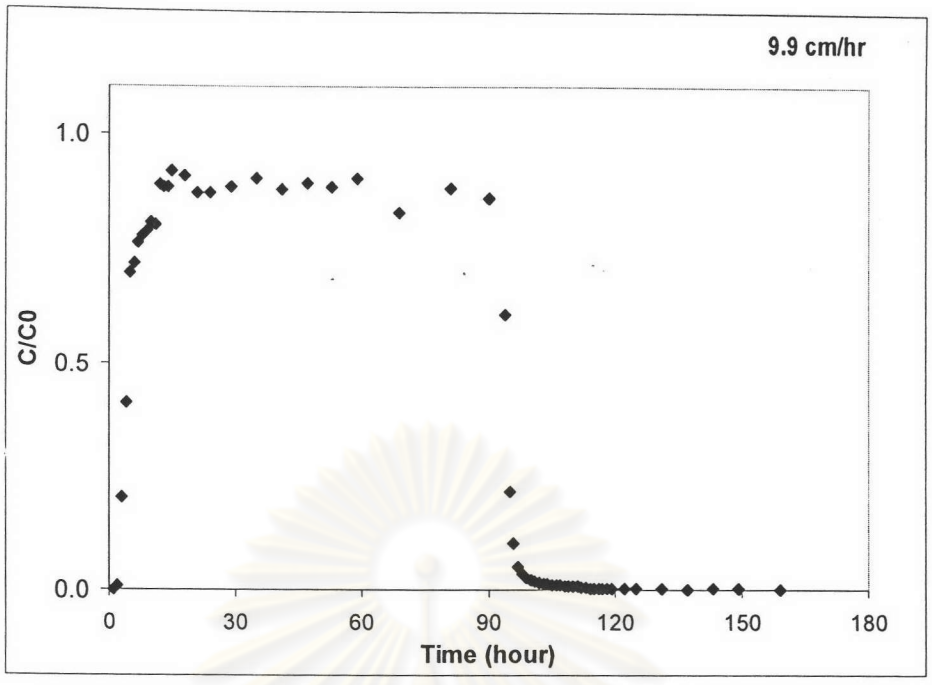


รูปที่ 4.33 กราฟอัตราส่วนระหว่างความเข้มข้นของโครเมตขาออกกับความเข้มข้นขาเข้ากับเวลาที่ใช้ในการทดลองที่ความเร็วน้ำผ่านรูพรุน 2.5 เซนติเมตรต่อชั่วโมง ที่พีเอชเริ่มต้น 7 และความแรงไอออน 0.01 โมล

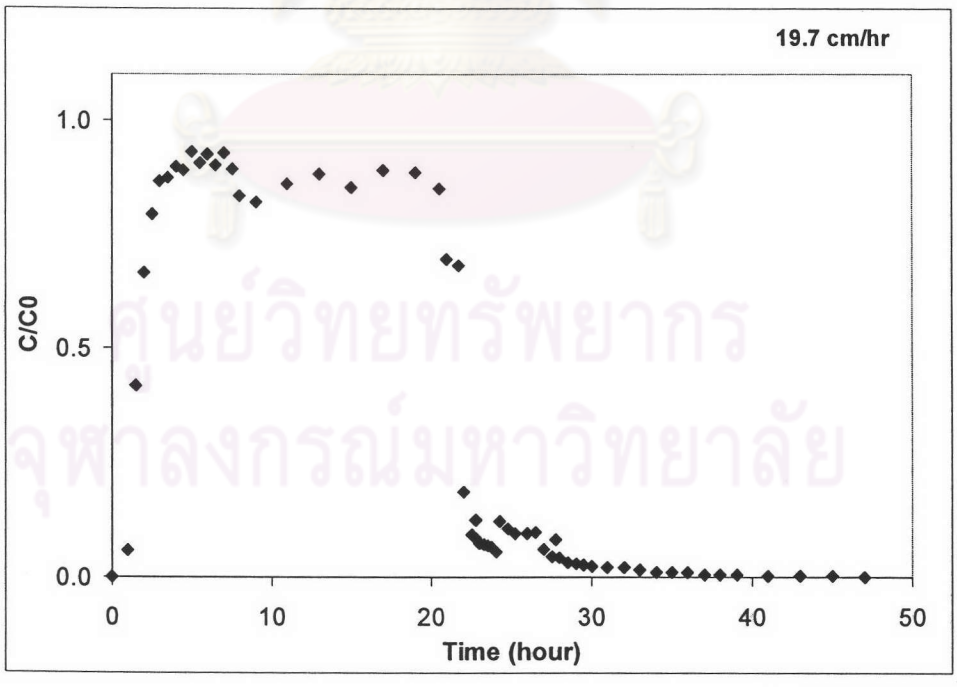


รูปที่ 4.34 กราฟอัตราส่วนระหว่างความเข้มข้นของโครเมตขาออกกับความเข้มข้นขาเข้ากับเวลาที่ใช้ในการทดลองที่ความเร็วน้ำผ่านรูพรุน 4.9 เซนติเมตรต่อชั่วโมง ที่พีเอชเริ่มต้น 7 และความแรงไอออน 0.01 โมล

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

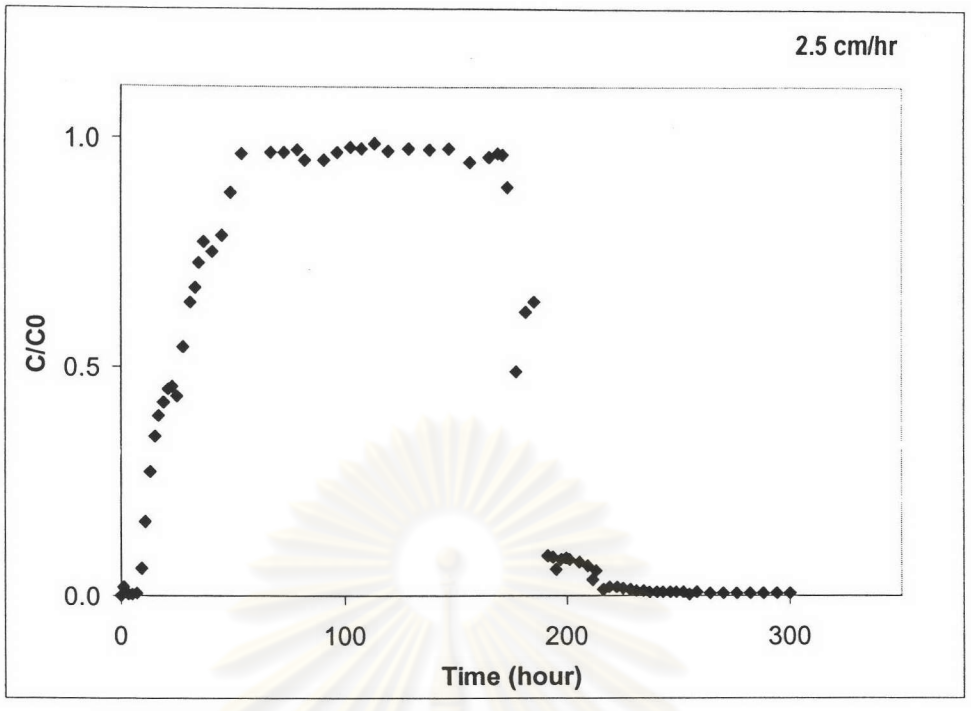


รูปที่ 4.35 กราฟอัตราส่วนระหว่างความเข้มข้นของโครเมตขาออกกับความเข้มข้นขาเข้ากับเวลาที่ใช้ในการทดลองที่ความเร็วน้ำผ่านรูพรุน 9.9 เซนติเมตรต่อชั่วโมง ที่พีเอชเริ่มต้น 7 และความแรงไอออน 0.01 โมล

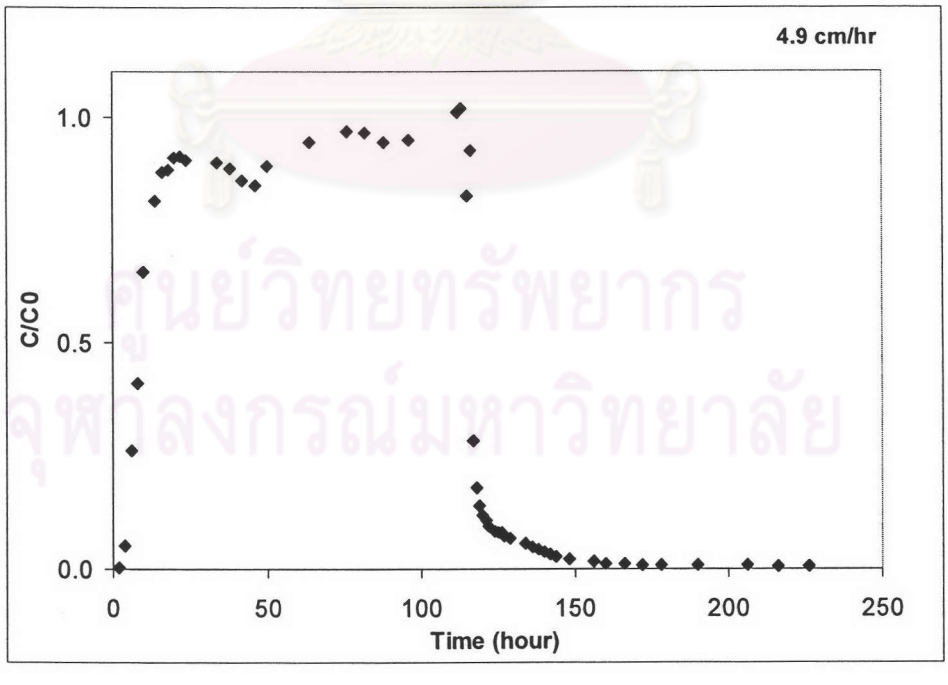


รูปที่ 4.36 กราฟอัตราส่วนระหว่างความเข้มข้นของโครเมตขาออกกับความเข้มข้นขาเข้ากับเวลาที่ใช้ในการทดลองที่ความเร็วน้ำผ่านรูพรุน 19.7 เซนติเมตรต่อชั่วโมง ที่พีเอชเริ่มต้น 7 และความแรงไอออน 0.01 โมล

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

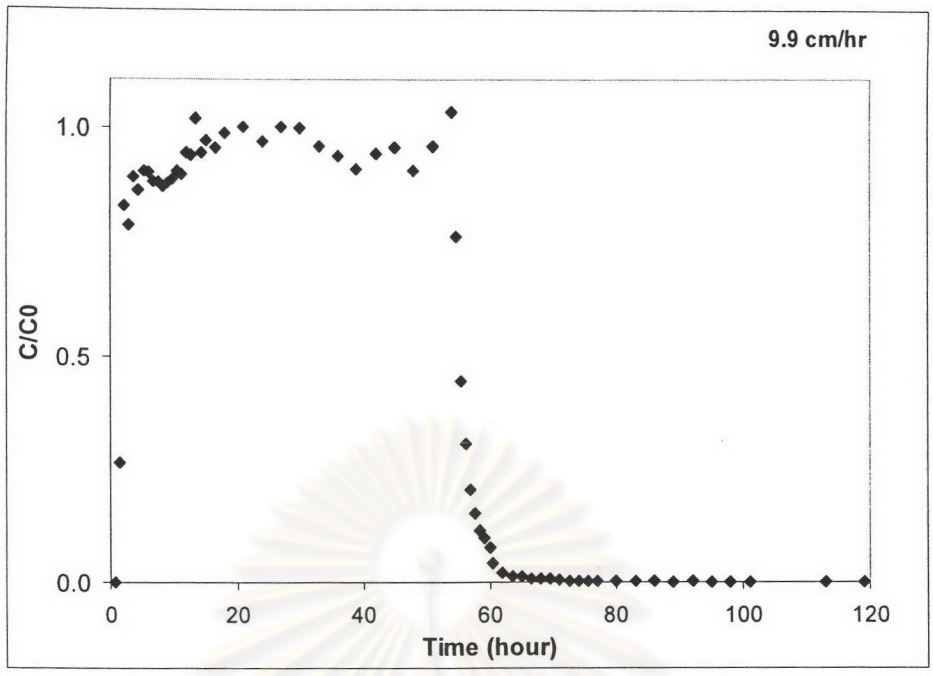


รูปที่ 4.37 กราฟอัตราส่วนระหว่างความเข้มข้นของโครเมตขาออกกับความเข้มข้นขาเข้ากับเวลาที่ใช้ในการทดลองที่ความเร็วน้ำผ่านรูพรุน 2.5 เซนติเมตรต่อชั่วโมง ที่พีเอชเริ่มต้น 10 และความแรงไอออน 0.01 โมล

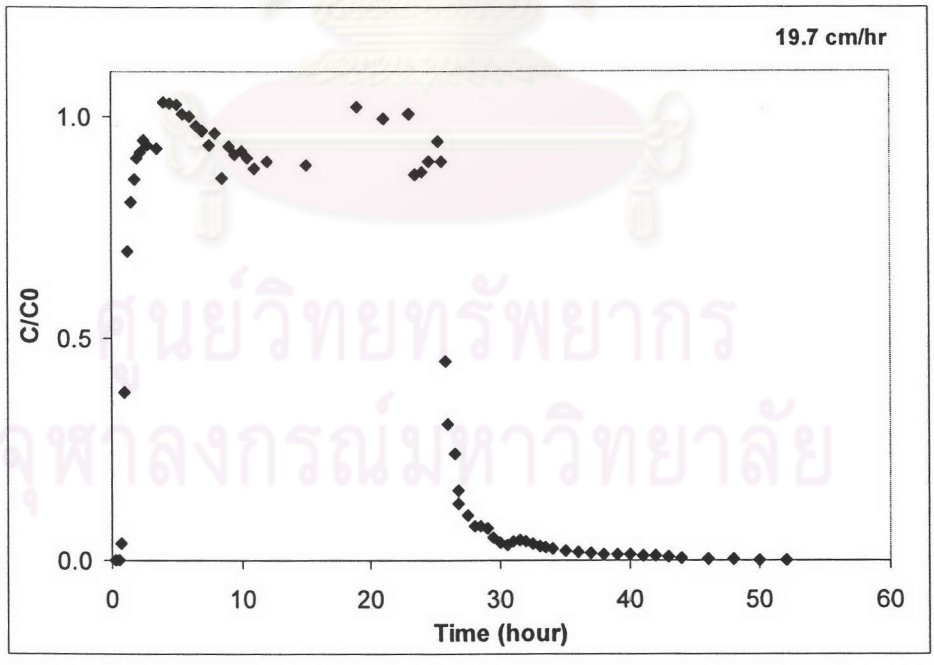


รูปที่ 4.38 กราฟอัตราส่วนระหว่างความเข้มข้นของโครเมตขาออกกับความเข้มข้นขาเข้ากับเวลาที่ใช้ในการทดลองที่ความเร็วน้ำผ่านรูพรุน 4.9 เซนติเมตรต่อชั่วโมง ที่พีเอชเริ่มต้น 10 และความแรงไอออน 0.01 โมล

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.39 กราฟอัตราส่วนระหว่างความเข้มข้นของโครเมตขาออกกับความเข้มข้นขาเข้ากับเวลาที่ใช้ในการทดลองที่ความเร็วน้ำผ่านรูพรุน 9.9 เซนติเมตรต่อชั่วโมง ที่พีเอชเริ่มต้น 10 และความแรงไอออน 0.01 โมล



รูปที่ 4.40 กราฟอัตราส่วนระหว่างความเข้มข้นของโครเมตขาออกกับความเข้มข้นขาเข้ากับเวลาที่ใช้ในการทดลองที่ความเร็วน้ำผ่านรูพรุน 19.7 เซนติเมตรต่อชั่วโมง ที่พีเอชเริ่มต้น 10 และความแรงไอออน 0.01 โมล

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

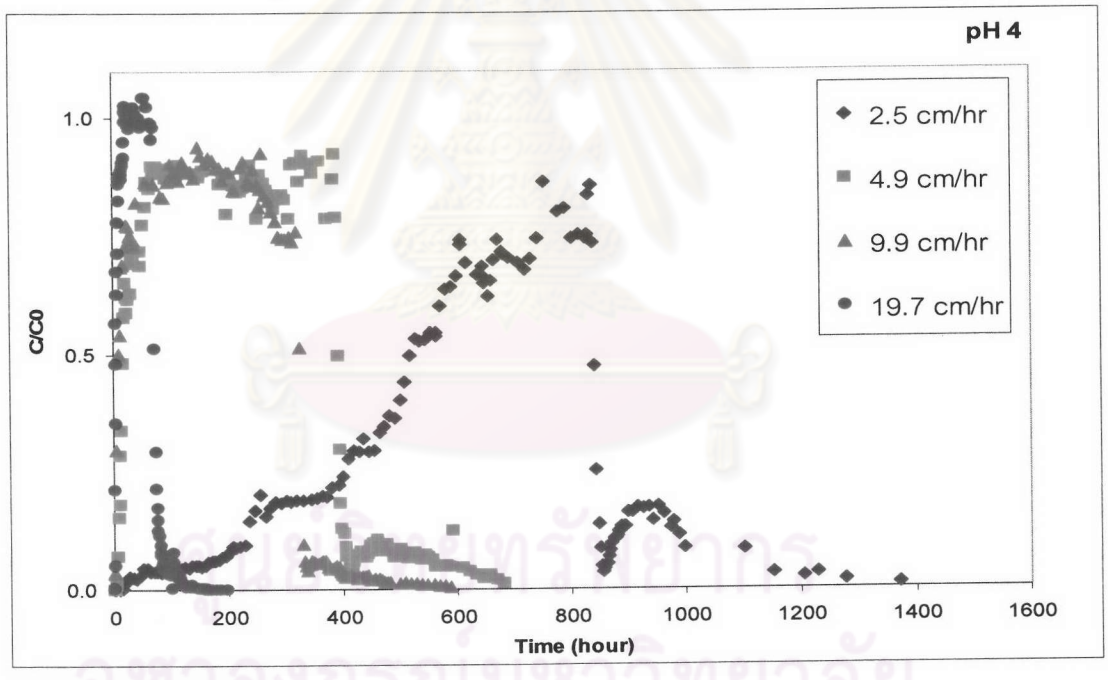
พิจารณาเปรียบเทียบเวลาในการ Break Through ในแต่ละคอลัมน์นำมาสรุปในตารางที่ 4.4 เห็นได้ว่าคอลัมน์ การทดลองที่พีเอช 4 Break Through ได้ช้าที่สุดในทุกความเร็วน้ำผ่านรูพรุน 2.5, 4.9 ,9.9 และ 19.7 เซนติเมตรต่อชั่วโมง และช้ากว่าชุดการทดลองที่พีเอช 7 และ 10 ตามลำดับ

และเมื่อเปรียบเทียบความเร็วน้ำผ่านรูพรุนที่ต่างกันในแต่ละค่าพีเอช 4, 7 และ10 พบว่าคอลัมน์การทดลองการเคลื่อนตัวของโครเมตที่ความเร็วน้ำผ่านรูพรุน 2.5 เซนติเมตรต่อชั่วโมงในทุกค่าพีเอช มีการ Break Through ได้ช้าที่สุด และช้ากว่าการทดลองที่มีความเร็วน้ำผ่านรูพรุนที่สูงกว่าคือ 4.9 ,9.9 และ 19.7 เซนติเมตรต่อชั่วโมงตามลำดับ

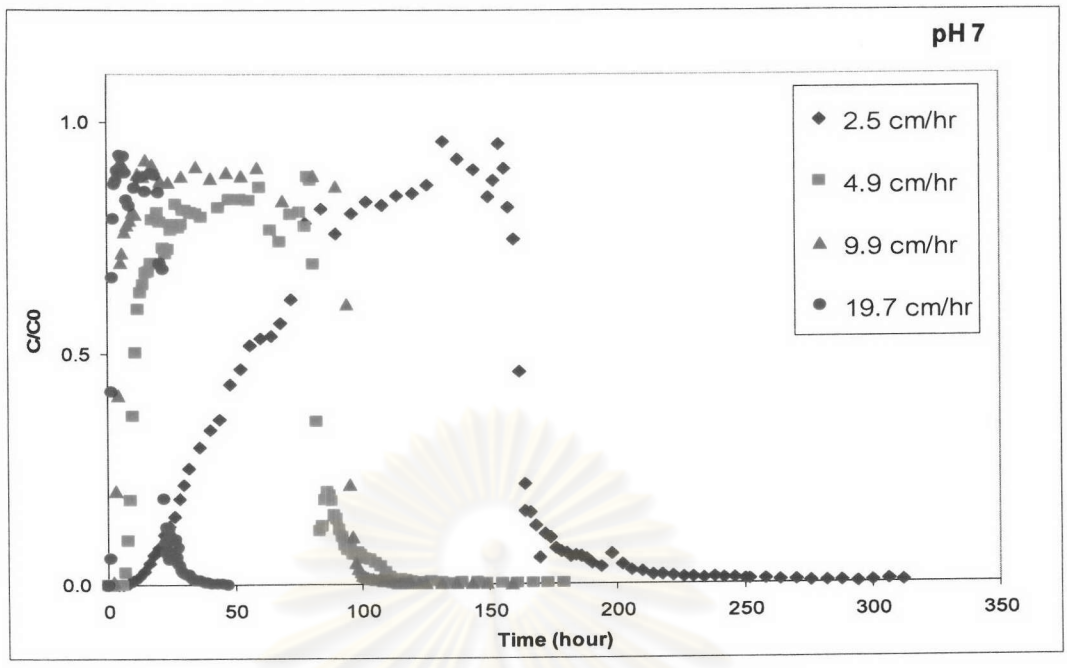
สำหรับกราฟเปรียบเทียบการเคลื่อนตัวของโครเมตที่พีเอช 4 แสดงดังรูปที่ 4.41

สำหรับกราฟเปรียบเทียบการเคลื่อนตัวของโครเมตที่พีเอช 4 แสดงดังรูปที่ 4.42

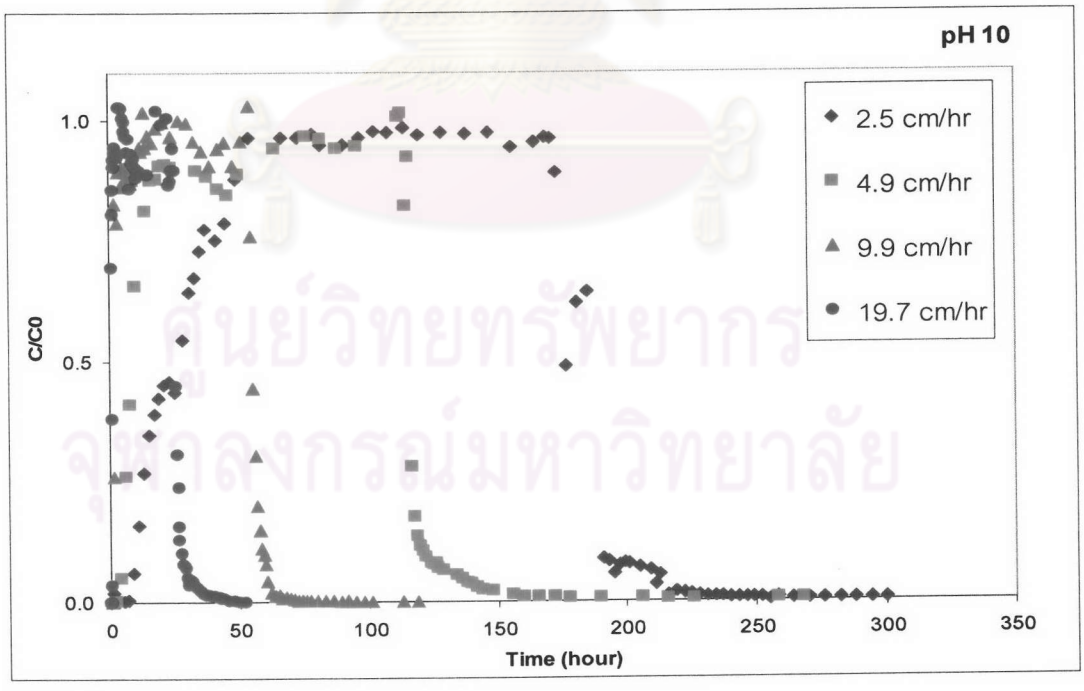
สำหรับกราฟเปรียบเทียบการเคลื่อนตัวของโครเมตที่พีเอช 4 แสดงดังรูปที่ 4.43



รูปที่ 4.41 กราฟเปรียบเทียบอัตราส่วนระหว่างความเข้มข้นของโครเมตขาออกกับความเข้มข้นขาเข้ากับเวลาที่ใช้ในการทดลองที่ความเร็วน้ำผ่านรูพรุน 2.5, 4.9, 9.9 และ 19.7 เซนติเมตรต่อชั่วโมง ที่พีเอชเริ่มต้น 4 และความแรงไอออน 0.01 โมล

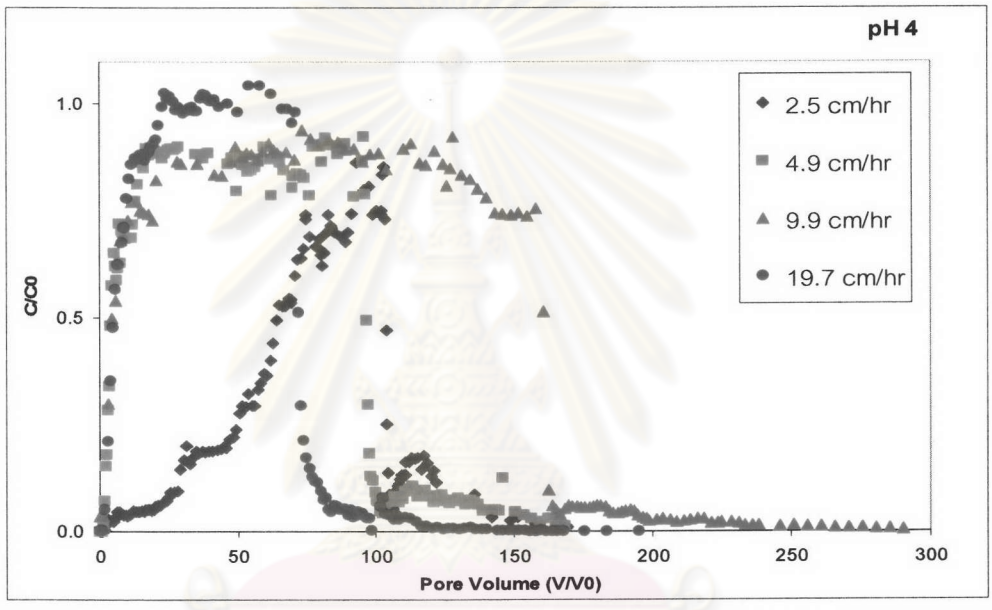


รูปที่ 4.42 กราฟเปรียบเทียบอัตราส่วนระหว่างความเข้มข้นของโครเมตขาออกกับความเข้มข้นขาเข้ากับเวลาที่ใช้ในการทดลองที่ความเร็วน้ำผ่านรูพรุน 2.5, 4.9, 9.9 และ 19.7 เซนติเมตรต่อชั่วโมง ที่พีเอชเริ่มต้น 7 และความแรงไอออน 0.01 โมล



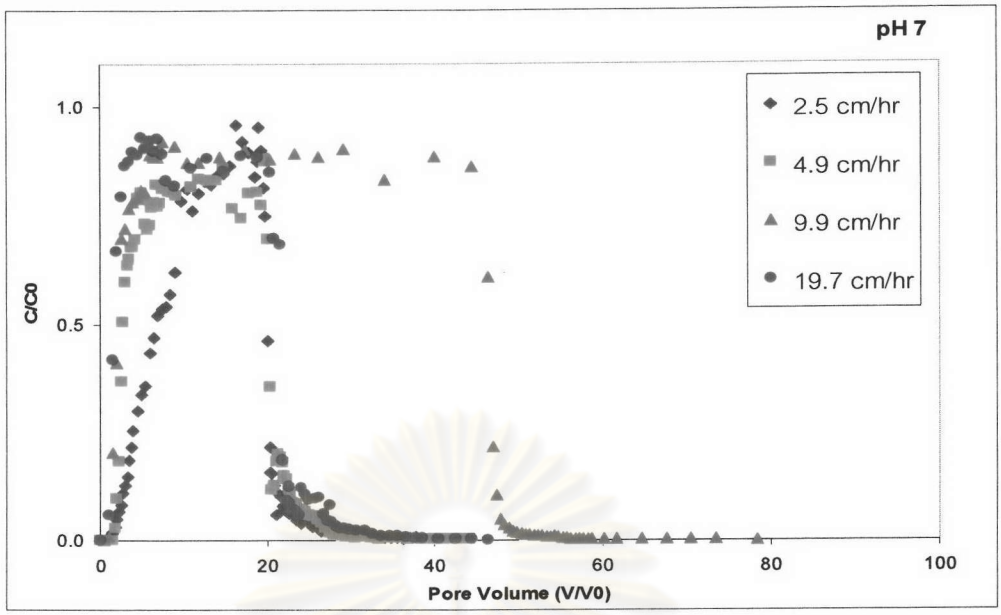
รูปที่ 4.43 กราฟเปรียบเทียบอัตราส่วนระหว่างความเข้มข้นของโครเมตขาออกกับความเข้มข้นขาเข้ากับเวลาที่ใช้ในการทดลองที่ความเร็วน้ำผ่านรูพรุน 2.5, 4.9, 9.9 และ 19.7 เซนติเมตรต่อชั่วโมง ที่พีเอชเริ่มต้น 10 และความแรงไอออน 0.01 โมล

โดยทั้งนี้ เมื่อพิจารณาการเปรียบเทียบผลของความเร็วน้ำผ่านรูพรุนที่ความเร็วต่างๆ ต่อการเคลื่อนตัวของโครเมตนั้นจำเป็นต้องเปลี่ยนหน่วยเวลาที่ใช้ในการทดลอง ให้เป็นหน่วยของปริมาตรของสารละลายโครเมตที่ใช้เป็นจำนวนเท่าของ Pore Volume (V/V_0) ซึ่งสามารถพิจารณาการเคลื่อนตัวของโครเมตได้ชัดเจนขึ้น โดยทั้งนี้ได้ทำการสร้างกราฟอัตราส่วนความเข้มข้นของโครเมตกับปริมาตรเป็นจำนวนเท่าของ Pore Volume ที่โครเมตไหลผ่านคอลัมน์ในการทดลอง ที่ความเร็วน้ำผ่านรูพรุน 2.5, 4.9, 9.9 และ 19.7 เซนติเมตรต่อชั่วโมง ที่พีเอชเริ่มต้น 4, 7 และ 10 ดังแสดงในรูปที่ 4.44 ถึง 4.46

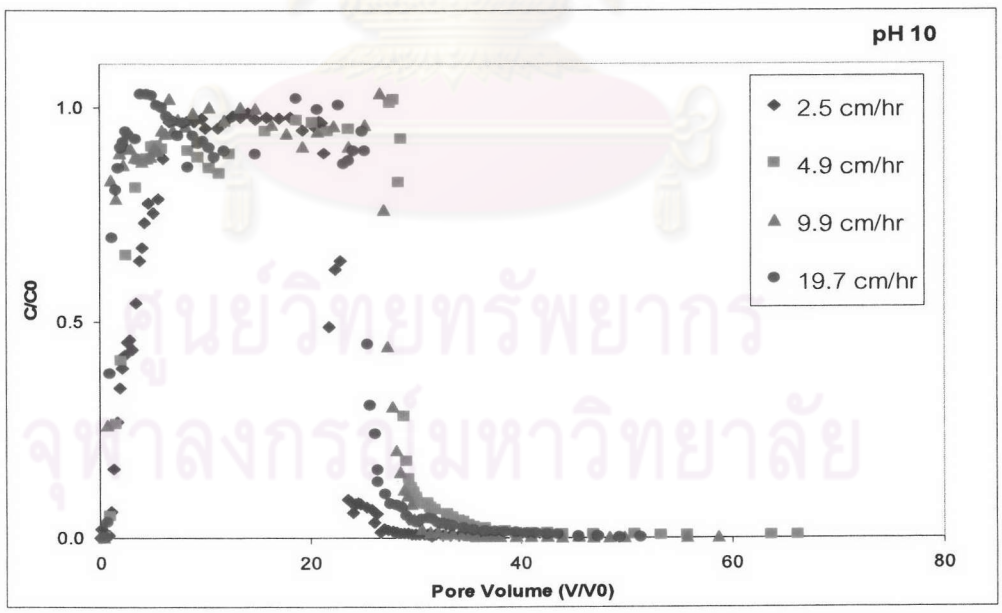


รูปที่ 4.44 กราฟเปรียบเทียบอัตราส่วนระหว่างความเข้มข้นของโครเมตขาออกกับความเข้มข้นขาเข้ากับปริมาตรสารละลายโครเมตเป็นจำนวนเท่าของ Pore Volume ที่ใช้ในการทดลองที่ความเร็วน้ำผ่านรูพรุน 2.5, 4.9, 9.9และ 19.7 เซนติเมตรต่อชั่วโมงที่พีเอชเริ่มต้น 4 และความแรงไอออน 0.01 โมล

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.45 กราฟเปรียบเทียบอัตราส่วนระหว่างความเข้มข้นของโครเมตขาออกกับความเข้มข้นขาเข้ากับปริมาตรสารละลายโครเมตเป็นจำนวนเท่าของ Pore Volume ที่ใช้ในการทดลองที่ความเร็วน้ำผ่านรูพรุน 2.5, 4.9, 9.9และ 19.7 เซนติเมตรต่อชั่วโมงที่พีเอชเริ่มต้น 7 และความแรงไอออน 0.01 โมล



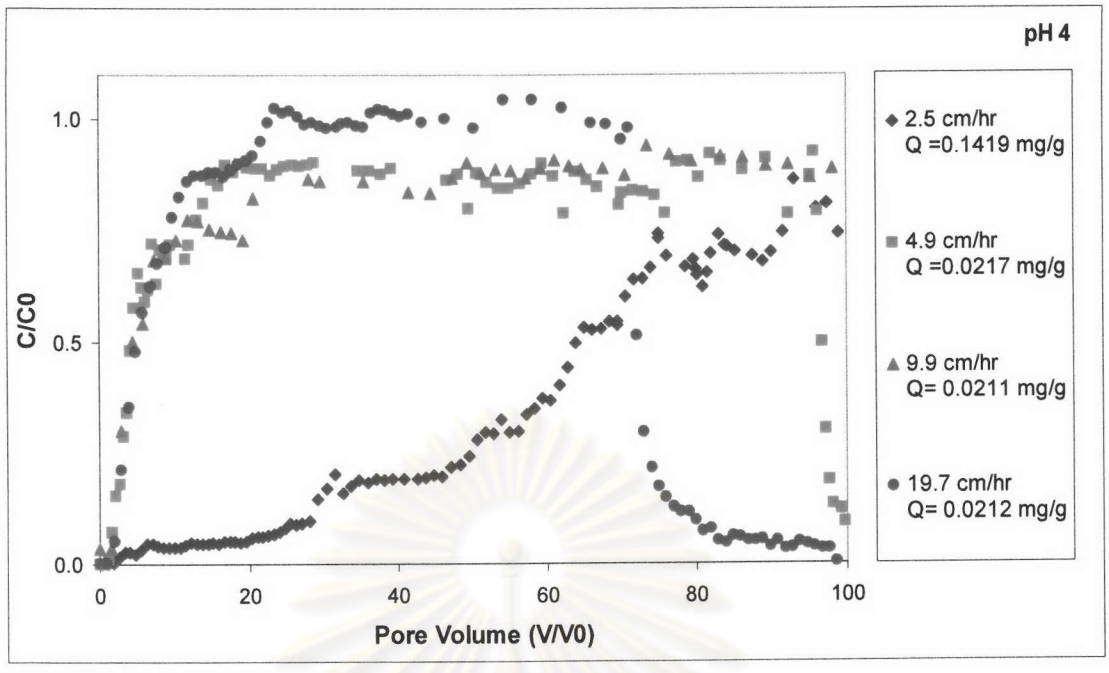
รูปที่ 4.46 กราฟเปรียบเทียบอัตราส่วนระหว่างความเข้มข้นของโครเมตขาออกกับความเข้มข้นขาเข้ากับปริมาตรสารละลายโครเมตเป็นจำนวนเท่าของ Pore Volume ที่ใช้ในการทดลองที่ความเร็วน้ำผ่านรูพรุน 2.5, 4.9, 9.9และ19.7เซนติเมตรต่อชั่วโมงที่พีเอชเริ่มต้น 10 และความแรงไอออน 0.01 โมล

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ในช่วงแรกของการเคลื่อนตัวของโครเมตผ่านคอลัมน์ดินตัวอย่าง กลไกการดูดซับซึ่งเป็นกลไกหนึ่งที่ส่งผลต่อการเคลื่อนตัวของโครเมต โดยสามารถคำนวณความสามารถในการดูดซับของโครเมต (Q) ในแต่ละความเร็วน้ำผ่านรูพรุนจากพื้นที่เหนือกราฟของกราฟอัตราส่วนความเข้มข้นของโครเมต กับปริมาตรเป็นจำนวนเท่าของ Pore Volume ที่ใช้ในการถึงจุด Break Through ซึ่งความสามารถในการดูดซับของโครเมตในแต่ละความเร็วน้ำผ่านรูพรุน 2.5, 4.9, 9.9 และ 19.7 เซนติเมตรต่อชั่วโมง ที่พีเอชเริ่มต้น 4,7 และ 10 และความแรงไอออน 0.01 โมล เพื่อให้การเปรียบเทียบชัดเจนยิ่งขึ้น นำข้อมูลจากการทดลองมาเขียนกราฟเปรียบเทียบอัตราส่วนความเข้มข้นของโครเมต กับปริมาตรเป็นจำนวนเท่าของ Pore Volume ที่ใช้ในการทดลองเฉพาะช่วงแรกที่มีการดูดซับของโครเมตเกิดขึ้น สามารถสรุปผลของความเร็วน้ำผ่านรูพรุนที่มีผลต่อการเคลื่อนตัวของโครเมตในการทดลองแต่ละพีเอชได้ดังต่อไปนี้

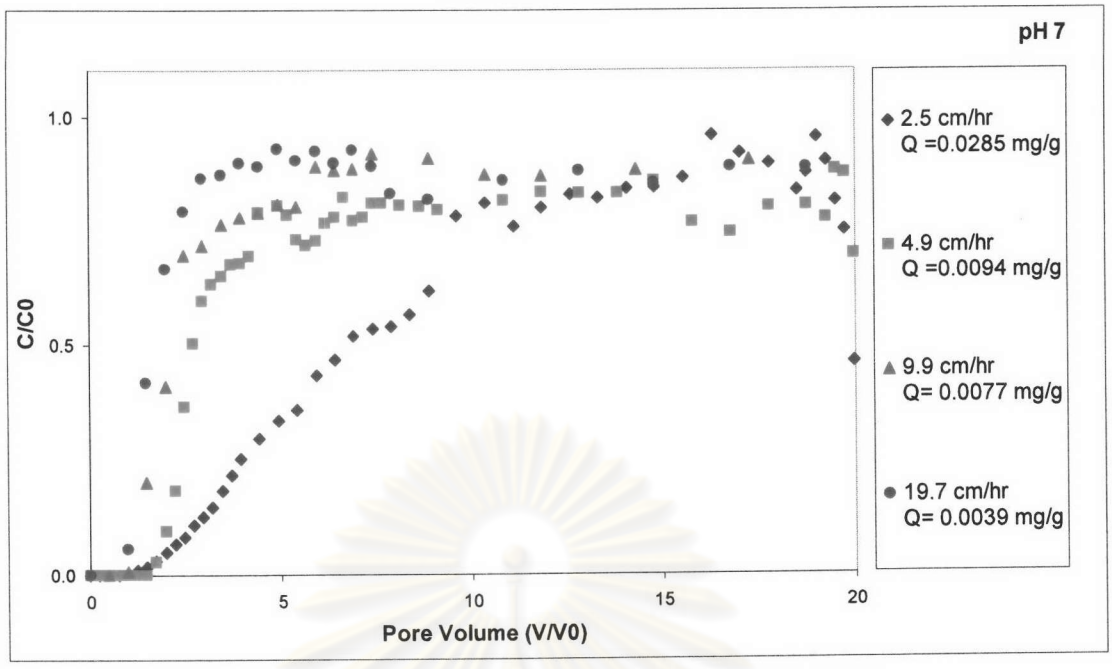
ชุดการทดลองที่พีเอช 4 พบว่าการทดลองที่ใช้ความเร็วน้ำผ่านรูพรุนที่แตกต่างกันทำให้โครเมตเคลื่อนตัวได้ต่างกันดังนี้คือ การทดลองที่ใช้ความเร็วน้ำผ่านรูพรุน 2.5 เซนติเมตรต่อชั่วโมง ต้องใช้ปริมาตรสารละลายโครเมตเป็นจำนวน 90 เท่าของ Pore Volume จึงสามารถถึงจุด Break Through ได้และดินในคอลัมน์มีความสามารถในการดูดซับ 0.1419 มิลลิกรัมต่อกรัม ซึ่งเป็นค่าที่สูงมากทำให้โครเมตเคลื่อนตัวได้ช้าที่สุด ในขณะที่การทดลองที่ใช้ความเร็วน้ำผ่านรูพรุน 4.9, 9.9 และ 19.7 เซนติเมตรต่อชั่วโมง มีต้องใช้สารละลายโครเมตเป็นปริมาตร 23, 21 และ 22 เท่าของ Pore Volume ตามลำดับ และมีความสามารถดูดซับของโครเมตเท่ากับ 0.0217, 0.0211 และ 0.0212 มิลลิกรัมต่อกรัม ซึ่งเป็นค่าที่ใกล้เคียงกันมาก ส่งผลให้โครเมตเคลื่อนตัวได้ใกล้เคียงกัน ดังรูปที่ 4.47

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



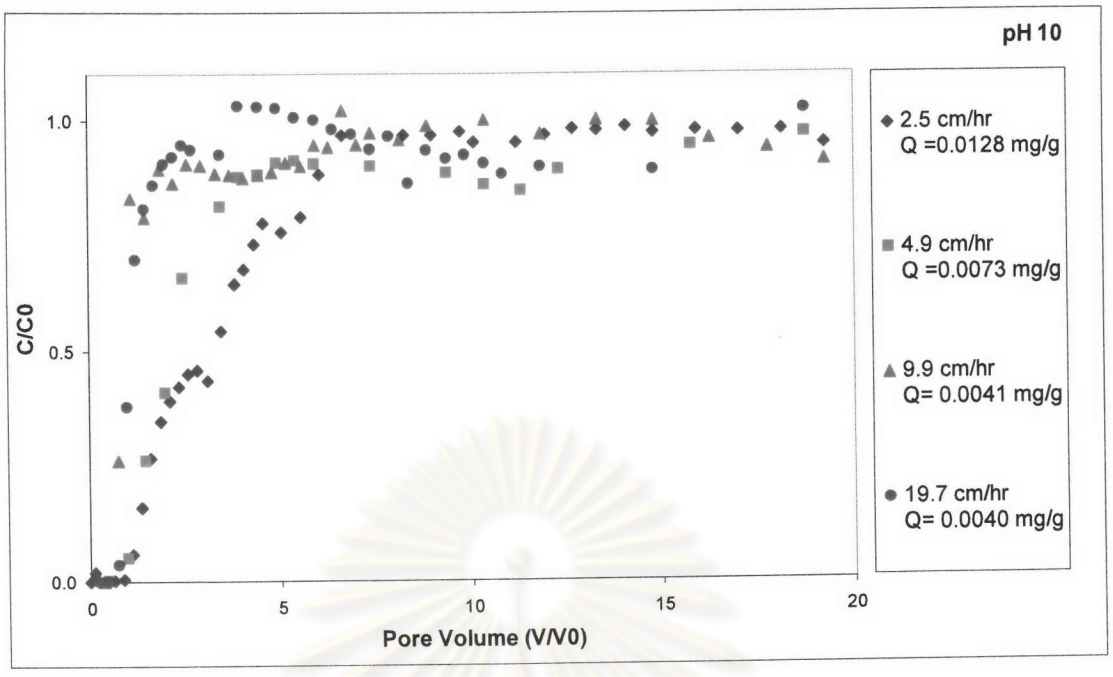
รูปที่ 4.47 กราฟเปรียบเทียบอัตราส่วนระหว่างความเข้มข้นของโครเมตขาออกกับความเข้มข้นขาเข้ากับปริมาตรสารละลายโครเมตเป็นจำนวนเท่าของ Pore Volume และความสามารถในการดูดซับของโครเมตที่ความเร็วน้ำผ่านรูพรุน 2.5, 4.9, 9.9 และ 19.7 เซนติเมตรต่อชั่วโมง ที่พีเอชเริ่มต้น 4 และความแรงไอออน 0.01 โมล

ชุดการทดลองที่พีเอช 7 พบว่าการทดลองที่ใช้ความเร็วน้ำผ่านรูพรุนที่แตกต่างกันทำให้โครเมตเคลื่อนตัวได้ต่างกันดังนี้คือ ความเร็วน้ำผ่านรูพรุน 2.5 เซนติเมตรต่อชั่วโมง ต้องใช้ปริมาตรสารละลายโครเมตเป็นจำนวน 17 เท่าของ Pore Volume จึงสามารถถึงจุด Break Through ได้ และมีสามารถในการดูดซับ 0.0285 มิลลิกรัมต่อกรัม ทำให้โครเมตเคลื่อนตัวได้ช้าที่สุด ในขณะที่การทดลองที่ใช้ความเร็วน้ำผ่านรูพรุน 4.9, 9.9 และ 19.7 เซนติเมตรต่อชั่วโมง ต้องใช้สารละลายโครเมตเป็นปริมาตร 14, 7 และ 5 เท่าของ Pore Volume และมีความสามารถดูดซับของโครเมตเท่ากับ 0.0094, 0.0077 และ 0.0039 มิลลิกรัมต่อกรัม ลดลงตามลำดับตามลำดับ ทำให้โครเมตเคลื่อนตัวได้เร็วขึ้นตามลำดับ ดังรูปที่ 4.48



รูปที่ 4.48 กราฟเปรียบเทียบอัตราส่วนระหว่างความเข้มข้นของโครเมตขาออกกับความเข้มข้นขาเข้ากับปริมาตรสารละลายโครเมตเป็นจำนวนเท่าของ Pore Volume และความสามารถในการดูดซับของโครเมตที่ความเร็วน้ำผ่านรูพรุน 2.5, 4.9, 9.9 และ 19.7 เซนติเมตรต่อชั่วโมง ที่พีเอชเริ่มต้น 7 และความแรงไอออน 0.01 โมล

ชุดการทดลองที่พีเอช 10 พบว่าการทดลองที่ใช้ความเร็วน้ำผ่านรูพรุนที่แตกต่างกันทำให้โครเมตเคลื่อนตัวได้ต่างกันดังนี้คือ ความเร็วน้ำผ่านรูพรุน 2.5 เซนติเมตรต่อชั่วโมง ต้องใช้ปริมาตรสารละลายโครเมตเป็นจำนวน 8 เท่าของ Pore Volume จึงสามารถถึงจุด Break Through ได้ และมีสามารถในการดูดซับ 0.0285 มิลลิกรัมต่อกรัม ส่วนในการทดลองที่ใช้ความเร็วน้ำผ่านรูพรุน 4.9 เซนติเมตรต่อชั่วโมง ต้องใช้ปริมาตรสารละลายโครเมตเป็นจำนวน 7 เท่าของ Pore Volume จึงสามารถถึงจุด Break Through ได้ และมีสามารถในการดูดซับ 0.0073 มิลลิกรัมต่อกรัม ทำให้โครเมตเคลื่อนตัวได้เร็วขึ้น ในขณะที่การทดลองที่ใช้ความเร็วน้ำผ่านรูพรุน 9.9 และ 19.7 เซนติเมตรต่อชั่วโมง ต้องใช้สารละลายโครเมตเป็นปริมาตร 5 และ 4 เท่าของ Pore Volume และมีความสามารถดูดซับของโครเมตในคอลัมน์ดินตัวอย่างเท่ากับ 0.0041 และ 0.0042 มิลลิกรัมต่อกรัม ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกัน ทำให้โครเมตเคลื่อนตัวได้ใกล้เคียงกัน ดังรูปที่ 4.49



รูปที่ 4.49 กราฟเปรียบเทียบอัตราส่วนระหว่างความเข้มข้นของโครเมตขาออกกับความเข้มข้นขาเข้ากับปริมาตรสารละลายโครเมตเป็นจำนวนเท่าของ Pore Volume และความสามารถในการดูดซับของโครเมตที่ความเร็วน้ำผ่านรูพรุน 2.5, 4.9, 9.9 และ 19.7 เซนติเมตรต่อชั่วโมง ที่พีเอชเริ่มต้น 10 และความแรงไอออน 0.01 โมล

จากผลการทดลองข้างต้น สามารถสรุปได้ดังนี้คือ

1.ที่พีเอช 4 โครเมตเคลื่อนตัวได้ช้าที่สุดที่ความเร็วน้ำผ่านรูพรุน 5 เซนติเมตรต่อชั่วโมง เพราะโครเมตถูกดูดซับไว้มาก และเมื่อเพิ่มความเร็วน้ำผ่านรูพรุนมากกว่า 4.9 เซนติเมตรต่อชั่วโมง โครเมตเคลื่อนตัวได้ใกล้เคียงกัน เพราะโครเมตถูกดูดซับได้ใกล้เคียงกัน

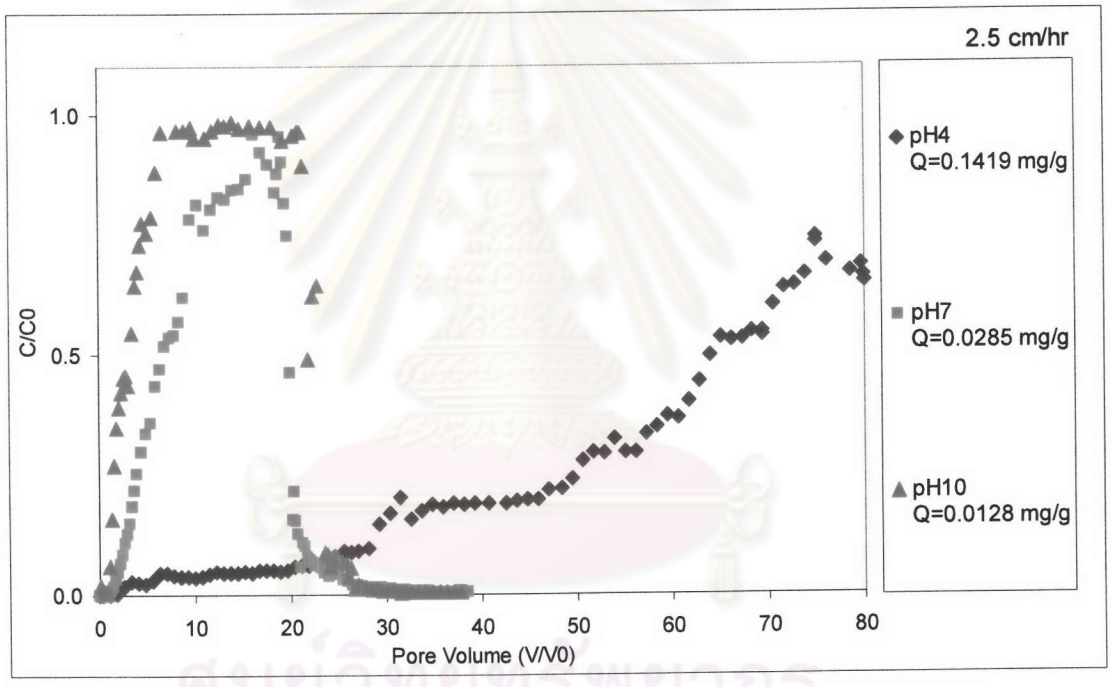
2.ที่พีเอช 7 เมื่อเพิ่มความเร็วของน้ำผ่านรูพรุนที่มากขึ้นจาก 2.5 เซนติเมตรต่อชั่วโมงเป็น 4.9, 9.9 และ 19.7 เซนติเมตรต่อชั่วโมง ทำให้โครเมตเคลื่อนตัวได้เร็วขึ้น เนื่องจากโครเมตถูกดูดซับได้น้อยลงตามลำดับ

3.ที่พีเอช 10 เมื่อเพิ่มความเร็วของน้ำผ่านรูพรุนที่มากขึ้นจาก 2.5 เซนติเมตรต่อชั่วโมงเป็น 4.9 เซนติเมตรต่อชั่วโมง ทำให้โครเมตเคลื่อนตัวได้เร็วขึ้น เนื่องจากถูกดูดซับได้น้อยลง แต่เมื่อเพิ่มความเร็วน้ำผ่านรูพรุนมากกว่า 9.9 เซนติเมตรต่อชั่วโมง โครเมตเคลื่อนตัวได้ใกล้เคียงกัน เพราะโครเมตถูกดูดซับได้ใกล้เคียงกัน

และเมื่อพิจารณาผลของพีเอชที่แตกต่างกันคือ 4, 7และ 10 ที่ความแรงไอออน 0.01 โมล ต่อการเคลื่อนตัวของโครเมต ในแต่ละความเร็วน้ำผ่านรูพรุนที่ 2.5, 4.9, 9.9 และ 19.7 เซนติเมตร

ต่อชั่วโมง โดยพิจารณาปริมาตรสารละลายโครเมตที่ใช้ในการถึงจุด Break Through และคำนวณความสามารถในการดูดซับของโครเมต เพื่อเปรียบเทียบการเคลื่อนตัวของโครเมตได้ชัดเจนขึ้น

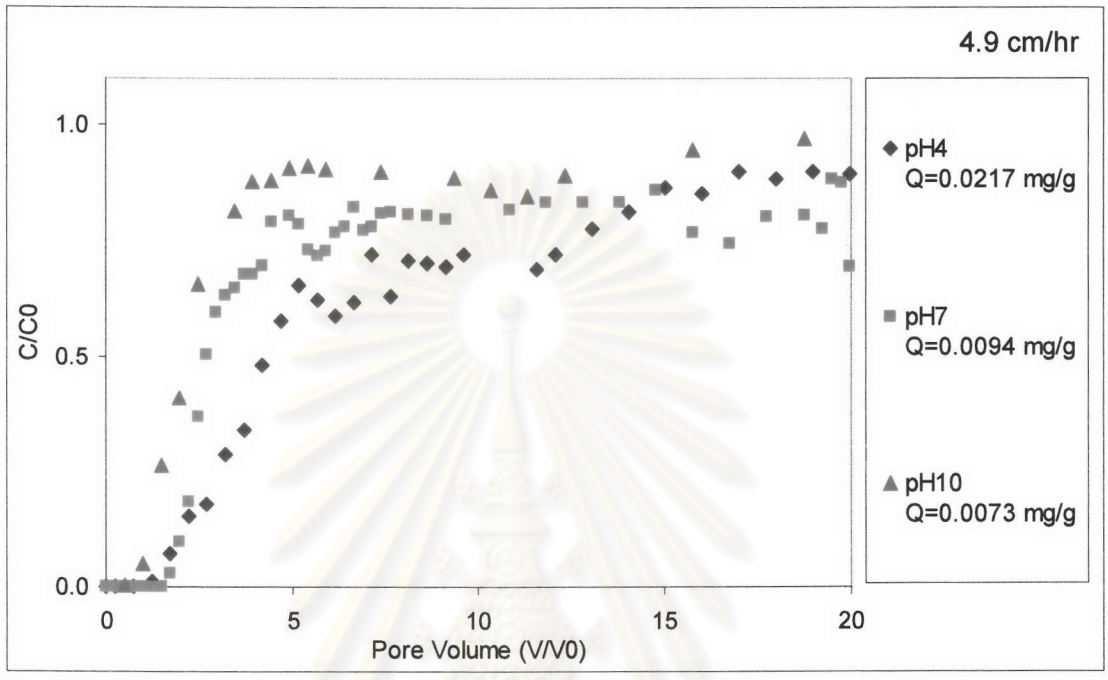
ชุดการทดลองที่ความเร็วน้ำผ่านรูพรุน 2.5 เซนติเมตรต่อชั่วโมง พบว่าการทดลองที่พีเอชที่แตกต่างกันทำให้โครเมตเคลื่อนตัวได้ต่างกันดังนี้คือ การทดลองที่พีเอช 4 ต้องใช้ปริมาตรสารละลายโครเมตเป็นจำนวน 90 เท่าของ Pore Volume ของโครเมต จึงสามารถถึงจุด Break Through ได้ และมีสามารถในการดูดซับ 0.1419 มิลลิกรัมต่อกรัม ทำให้โครเมตเคลื่อนตัวได้ช้าที่สุด ในขณะที่การทดลองที่พีเอช 7 และ 10 ต้องใช้สารละลายโครเมตเป็นปริมาตร 17 และ 8 เท่าของ Pore Volume และมีความสามารถดูดซับของโครเมตเท่ากับ 0.0285 และ 0.0128 มิลลิกรัมต่อกรัม ลดลงตามลำดับ ทำให้โครเมตเคลื่อนตัวได้เร็วขึ้นตามลำดับ ดังในรูปที่ 4.50



รูปที่ 4.50 กราฟเปรียบเทียบอัตราส่วนระหว่างความเข้มข้นของโครเมตขาออกกับความเข้มข้นขาเข้ากับปริมาตรสารละลายโครเมตเป็นจำนวนเท่าของ Pore Volume และความสามารถในการดูดซับของโครเมตที่ความเร็วน้ำผ่านรูพรุน 2.5 เซนติเมตรต่อชั่วโมง ที่พีเอช 4,7 และ 10 และความแรงไอออน 0.01 โมล

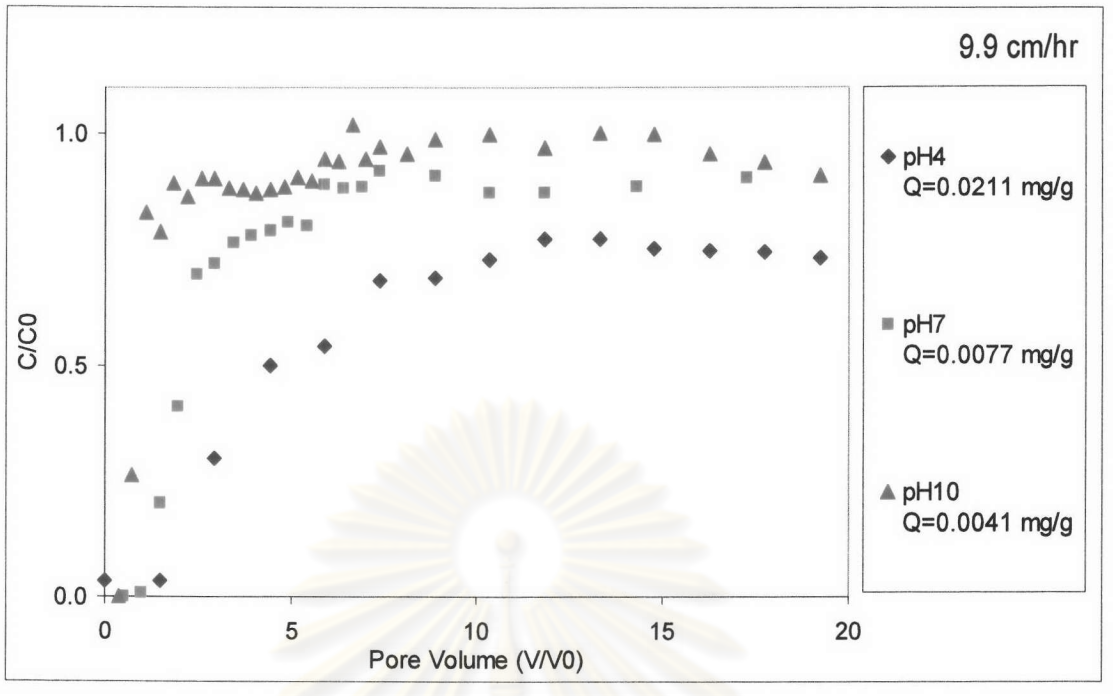
ชุดการทดลองที่ความเร็วน้ำผ่านรูพรุน 4.9 เซนติเมตรต่อชั่วโมง พบว่าการทดลองที่พีเอชที่แตกต่างกันทำให้โครเมตเคลื่อนตัวได้ต่างกันดังนี้คือ การทดลองที่พีเอช 4 ต้องใช้ปริมาตรสารละลายโครเมตเป็นจำนวน 23 เท่าของ Pore Volume จึงสามารถถึงจุด Break Through ได้ และมีสามารถในการดูดซับ 0.0217 มิลลิกรัมต่อกรัม ทำให้โครเมตเคลื่อนตัวได้ช้าที่สุด ในขณะที่

การทดลองที่พีเอช 7 และ 10 ต้องใช้สารละลายโครเมตเป็นปริมาตร 17 และ 8 เท่าของ Pore Volume และมีความสามารถดูดซับของโครเมตเท่ากับ 0.0094 และ 0.0073 มิลลิกรัมต่อกรัม ลดลงตามลำดับ ทำให้โครเมตเคลื่อนตัวได้เร็วขึ้นตามลำดับ ดังในรูปที่ 4.51



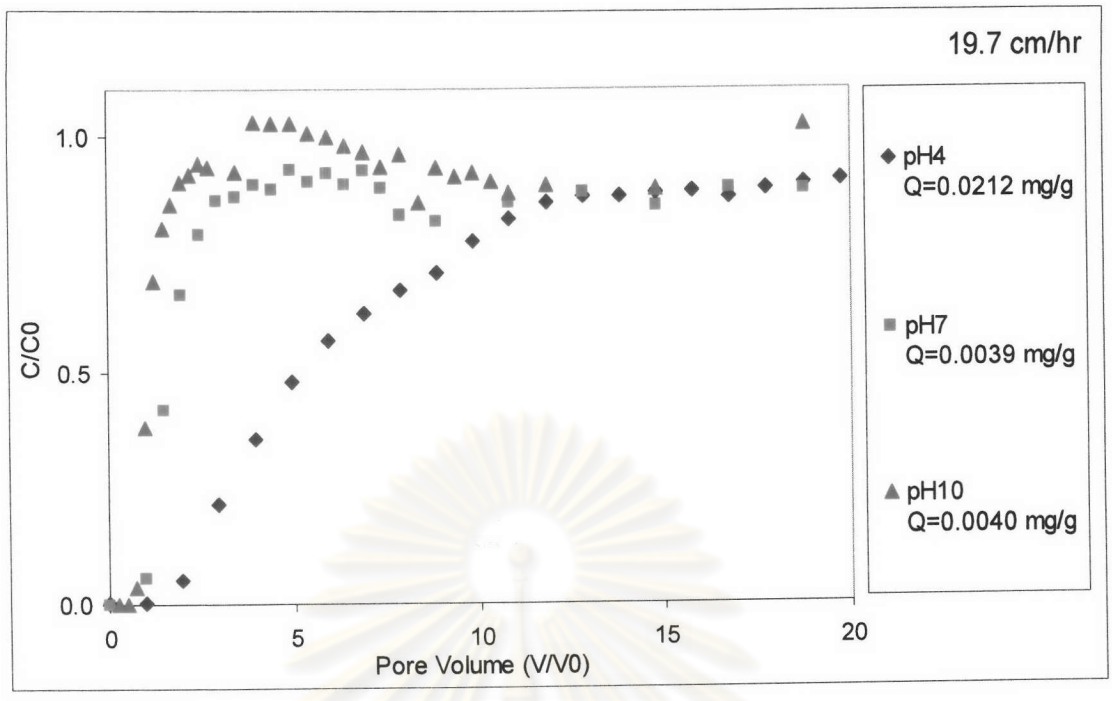
รูปที่ 4.51 กราฟเปรียบเทียบอัตราส่วนระหว่างความเข้มข้นของโครเมตขาออกกับความเข้มข้นขาเข้ากับปริมาตรสารละลายโครเมตเป็นจำนวนเท่าของ Pore Volume และความสามารถในการดูดซับของโครเมตที่ความเร็วน้ำผ่านรูพรุน 4.9 เซนติเมตรต่อชั่วโมง ที่พีเอช 4,7 และ 10 และความแรงไอออน 0.01 โมล

ชุดการทดลองที่ความเร็วน้ำผ่านรูพรุน 9.9 เซนติเมตรต่อชั่วโมง พบว่าการทดลองที่พีเอชที่แตกต่างกันทำให้โครเมตเคลื่อนตัวได้ต่างกันดังนี้คือ การทดลองที่พีเอช 4 ต้องใช้ปริมาตรสารละลายโครเมตเป็นจำนวน 21 เท่าของ Pore Volume จึงสามารถถึงจุด Break Through ได้ และมีสามารถในการดูดซับ 0.0211 มิลลิกรัมต่อกรัม ทำให้โครเมตเคลื่อนตัวได้ช้าที่สุด ในขณะที่การทดลองที่พีเอช 7 และ 10 ต้องใช้สารละลายโครเมตเป็นปริมาตร 7 และ 5 เท่าของ Pore Volume และมีความสามารถดูดซับของโครเมตเท่ากับ 0.0077 และ 0.0041 มิลลิกรัมต่อกรัม ลดลงตามลำดับ ทำให้โครเมตเคลื่อนตัวได้เร็วขึ้นตามลำดับ ดังในรูปที่ 4.52



รูปที่ 4.52 กราฟเปรียบเทียบอัตราส่วนระหว่างความเข้มข้นของโครเมตขาออกกับความเข้มข้นขาเข้ากับปริมาตรสารละลายโครเมตเป็นจำนวนเท่าของ Pore Volume และความสามารถในการดูดซับของโครเมตที่ความเร็วน้ำผ่านรูพรุน 9.9 เซนติเมตรต่อชั่วโมง ที่พีเอช 4,7 และ 10 และความแรงไอออน 0.01 โมล

ชุดการทดลองที่ความเร็วน้ำผ่านรูพรุน 19.7 เซนติเมตรต่อชั่วโมง พบว่าการทดลองที่พีเอชที่แตกต่างกันทำให้โครเมตเคลื่อนตัวได้ต่างกันดังนี้คือ การทดลองที่พีเอช 4 ต้องใช้ปริมาตรสารละลายโครเมตเป็นจำนวน 22 เท่าของ Pore Volume จึงสามารถถึงจุด Break Through ได้ และมีสามารถในการดูดซับ 0.0212 มิลลิกรัมต่อกรัม ทำให้โครเมตเคลื่อนตัวได้ช้าที่สุด แต่ในขณะที่การทดลองที่พีเอช 7 และ 10 ต้องใช้สารละลายโครเมตเป็นปริมาตร 5 และ 4 เท่าของ Pore Volume และมีความสามารถดูดซับของโครเมตเท่ากับ 0.0039 และ 0.0040 มิลลิกรัมต่อกรัมตามลำดับ ซึ่งเป็นค่าที่ใกล้เคียงกัน ทำให้โครเมตเคลื่อนตัวได้ใกล้เคียงกัน ดังในรูปที่ 4.53



รูปที่ 4.53 กราฟเปรียบเทียบอัตราส่วนระหว่างความเข้มข้นของโครเมตขาออกกับความเข้มข้นขาเข้ากับปริมาตรสารละลายโครเมตเป็นจำนวนเท่าของ Pore Volume และความสามารถในการดูดซับของโครเมตที่ความเร็วน้ำผ่านรูพรุน 19.7 เซนติเมตรต่อชั่วโมง ที่พีเอช 4, 7 และ 10 และความแรงไอออน 0.01 โมล

จากผลการทดลองข้างต้น สามารถสรุปได้ดังนี้คือ

1.ในทุกชุดการทดลองที่ความเร็วน้ำผ่านรูพรุน 2.5, 4.9 และ 9.9 เซนติเมตรต่อชั่วโมง การเพิ่มของพีเอช 4 เป็น พีเอช 7 และ 10 ทำให้โครเมตถูกดูดซับได้น้อยลงตามลำดับ ส่งผลให้โครเมตเคลื่อนตัวได้เร็วขึ้น

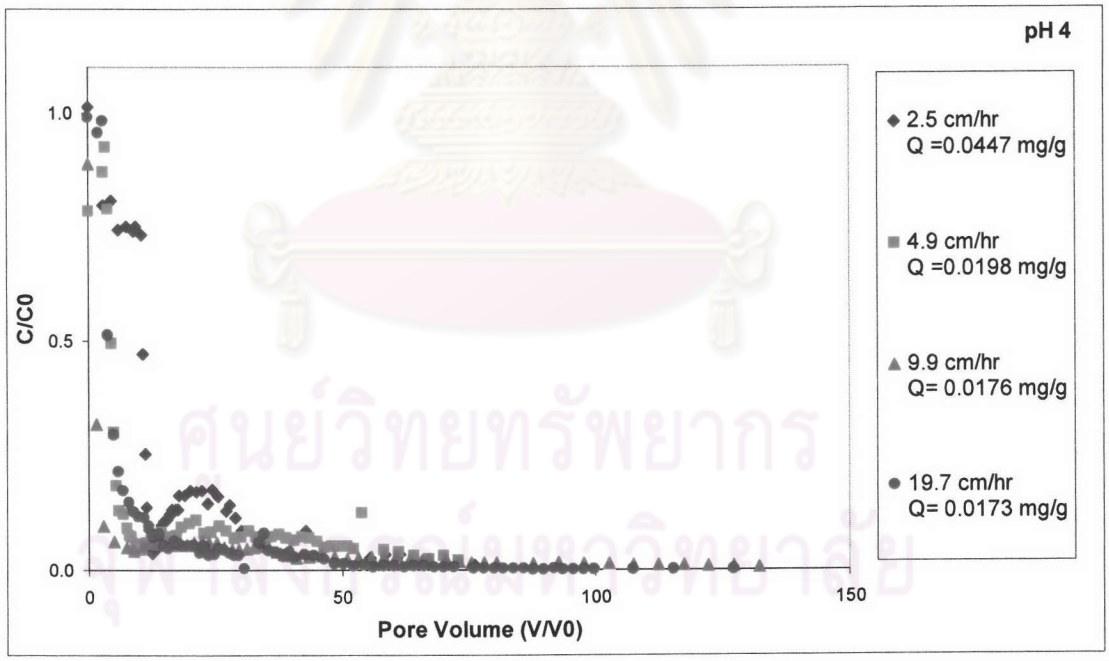
2.ในชุดการทดลองที่ความเร็วน้ำผ่านรูพรุน 19.7 เซนติเมตรต่อชั่วโมง ที่พีเอช 4 โครเมตถูกดูดซับมากที่สุด ส่งผลให้โครเมตเคลื่อนได้ช้าที่สุด ในขณะที่ที่พีเอชที่ 7 และ 10 โครเมตถูกดูดซับได้ใกล้เคียงกัน โครเมตจึงเคลื่อนตัวได้ใกล้เคียงกัน

3.การทดลองนี้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Maraqa และคณะ (1982)

เมื่อหลังจากความเข้มข้นของโครเมตขาออกเท่ากับกับความเข้มข้นขาเข้า (C/C0 =1) ได้ทำการทดลองการคายตัวของโครเมตโดยใช้น้ำปราศจากไอออน (DI) ที่มีค่าพีเอชประมาณ 7 เติมแทนการเติมสารละลายโครเมตและสามารถคำนวณความสามารถในการคายตัวของโครเมต (q) ในแต่ละความเร็วน้ำผ่านรูพรุน ได้จากพื้นที่ใต้กราฟของกราฟอัตราส่วนความเข้มข้นของโครเมตกับปริมาตรเป็นจำนวนเท่าของ Pore Volume ที่ทำให้ความเข้มข้นขาออกมีค่าน้อยมากๆ (C/C0

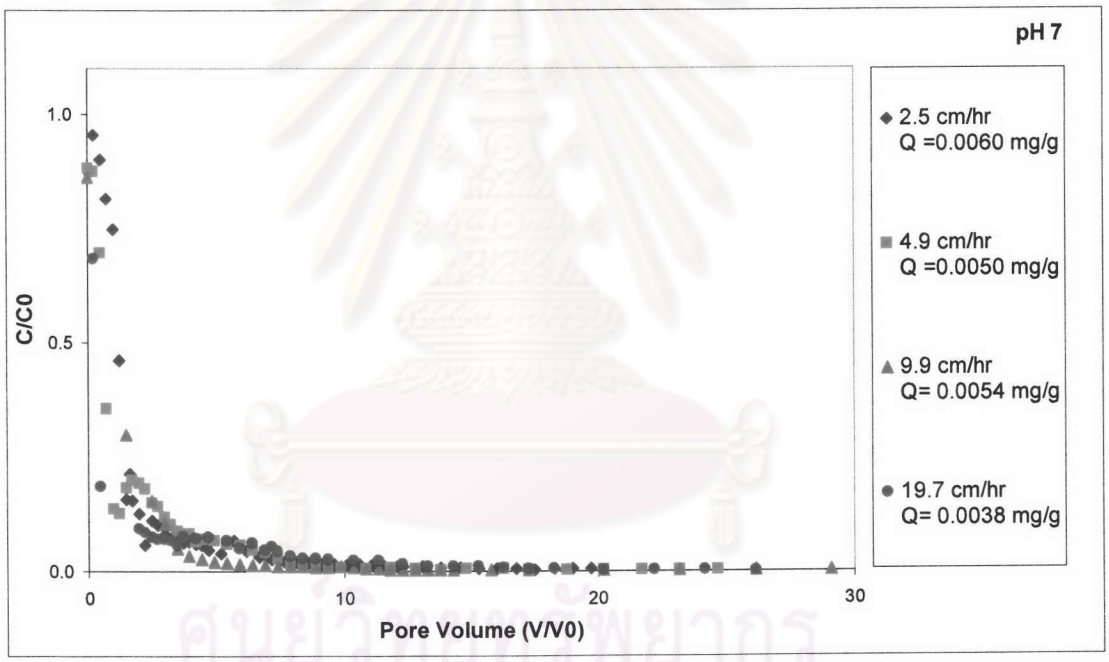
< 0.02%) เพื่อให้การเปรียบเทียบชัดเจนยิ่งขึ้น นำข้อมูลจากการทดลองมาเขียนกราฟเปรียบเทียบอัตราส่วนความเข้มข้นของโครเมต กับปริมาตรเป็นจำนวนเท่าของ Pore Volume ที่ใช้ในการทดลองเฉพาะช่วงหลังที่มีการคายตัวของโครเมตเกิดขึ้น สามารถสรุปผลของความเร็วน้ำผ่านรูพรุนที่มีผลต่อการเคลื่อนตัวของโครเมตในการทดลองแต่ละพีเอชได้ดังต่อไปนี้

หลังจากการทดลองการเคลื่อนตัวของโครเมตที่พีเอช 4 ความแรงไอออน 0.01 โมล ใช้ความเร็วน้ำผ่านรูพรุน 2.5 เซนติเมตรต่อชั่วโมง ใช้เวลาในการชะละลายโครเมตต้องใช้เวลา 640 ชั่วโมง หรือใช้ปริมาตรสารละลายโครเมตเป็นจำนวน 76 เท่าของ Pore Volume และคำนวณความสามารถในการคายตัวได้ 0.0447 มิลลิกรัมต่อกรัม ซึ่งเป็นค่าที่สูงมากทำให้โครเมตค่อยๆ คายตัวได้มากที่สุด ในขณะที่การทดลองที่ใช้ความเร็วน้ำผ่านรูพรุน 4.9, 9.9 และ 19.7 เซนติเมตรต่อชั่วโมง ใช้เวลาในการชะละลายโครเมต ต้องใช้เวลา 308, 268 และ 129 ชั่วโมง หรือใช้ปริมาตรสารละลายโครเมตเป็นจำนวน 79, 127 และ 127 เท่าของ Pore Volume ตามลำดับ และมีความสามารถดูดซับของโครเมตเท่ากับ 0.0198, 0.0176 และ 0.0173 มิลลิกรัมต่อกรัม ซึ่งเป็นค่าที่ใกล้เคียงกันมาก ดังรูปที่ 4.54



รูปที่ 4.54 กราฟเปรียบเทียบอัตราส่วนระหว่างความเข้มข้นของโครเมตขาออกกับความเข้มข้นขาเข้ากับปริมาตรสารละลายโครเมตเป็นจำนวนเท่าของ Pore Volume และความสามารถในการคายตัวของโครเมตที่ความเร็วน้ำผ่านรูพรุน 2.5, 4.9, 9.9 และ19.7 เซนติเมตรต่อชั่วโมงหลังจากการทดสอบการดูดซับที่พีเอช 4 ด้วยน้ำปราศจากไอออน

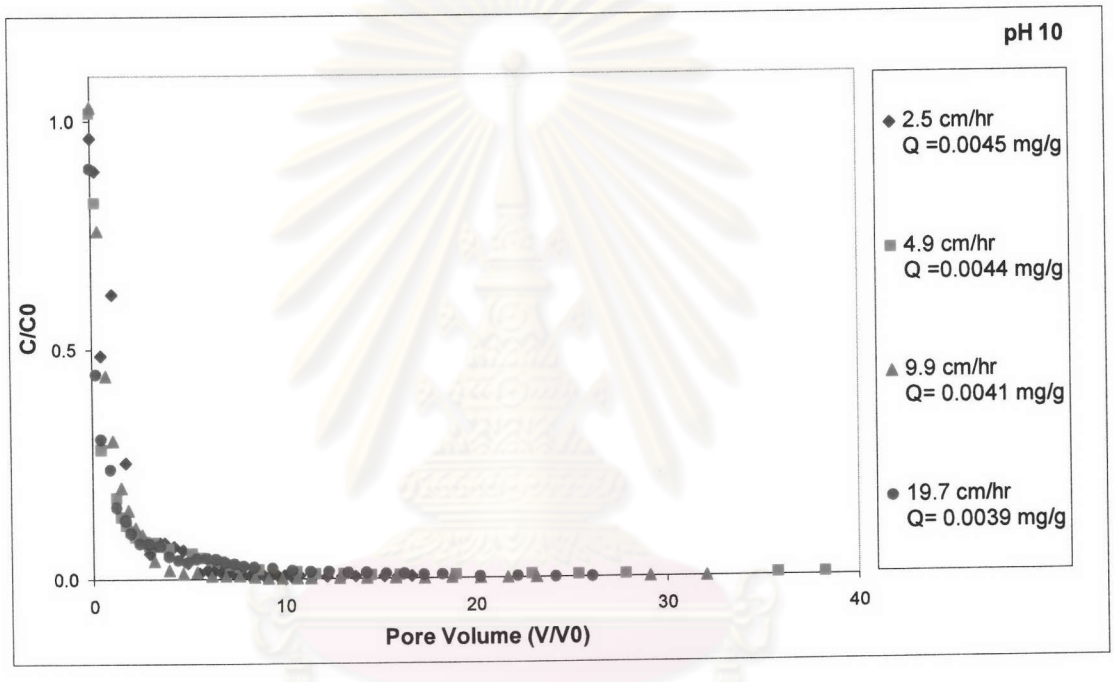
หลังจากการทดลองการเคลื่อนตัวของโครเมตที่พีเอช 7 ความแรงไอออน 0.01 โมล ใช้ความเร็วน้ำผ่านรูพรุน 2.5 เซนติเมตรต่อชั่วโมง ใช้เวลาในการชะละลายโครเมตต้องใช้เวลา 158 ชั่วโมง หรือใช้ปริมาตรสารละลายโครเมตเป็นจำนวน 24 เท่าของ Pore Volume และคำนวณความสามารถในการคายตัวได้ 0.0060 มิลลิกรัมต่อกรัมซึ่งเป็นค่าที่มากที่สุด ในขณะที่การทดลองที่ใช้ความเร็วน้ำผ่านรูพรุน 4.9, 9.9 และ 19.7 เซนติเมตรต่อชั่วโมง ใช้เวลาในการชะละลายโครเมต ต้องใช้เวลา 93, 25 และ 24 ชั่วโมง หรือใช้ปริมาตรสารละลายโครเมตเป็นจำนวน 27, 34 และ 25 เท่าของ Pore Volume ตามลำดับ และมีความสามารถดูดซับของโครเมตเท่ากับ 0.0050, 0.0054 และ 0.0038 มิลลิกรัมต่อกรัม ซึ่งพิจารณาโดยรวมพบว่าค่าความสามารถการคายตัวมีค่าลดลงเมื่อเพิ่มค่าความเร็วน้ำผ่านรูพรุน แต่ก็มีค่าใกล้เคียงกัน ทำให้โครเมตเคลื่อนตัวได้ใกล้เคียงกัน ซึ่งเห็นความแตกต่างน้อยมาก ดังรูปที่ 4.55



รูปที่ 4.55 กราฟเปรียบเทียบอัตราส่วนระหว่างความเข้มข้นของโครเมตขาออกกับความเข้มข้นขาเข้ากับปริมาตรสารละลายโครเมตเป็นจำนวนเท่าของ Pore Volume และความสามารถในการคายตัวของโครเมตที่ความเร็วน้ำผ่านรูพรุน 2.5, 4.9, 9.9 และ19.7 เซนติเมตรต่อชั่วโมงหลังจากการทดสอบการดูดซับที่พีเอช 7 ด้วยน้ำปราศจากไอออน

หลังจากการทดลองการเคลื่อนตัวของโครเมตที่พีเอช 10 ความแรงไอออน 0.01 โมล ใช้ความเร็วน้ำผ่านรูพรุน 2.5 เซนติเมตรต่อชั่วโมง ใช้เวลาในการชะละลายโครเมตต้องใช้เวลา 135 ชั่วโมง หรือใช้ปริมาตรสารละลายโครเมตเป็นจำนวน 17 เท่าของ Pore Volume และคำนวณ

ความสามารถในการคายตัวได้ 0.0045 มิลลิกรัมต่อกรัม ในขณะที่การทดลองที่ใช้ความเร็วน้ำผ่านรูพรุน 4.9, 9.9 และ 19.7 เซนติเมตรต่อชั่วโมง ใช้เวลาในการชะละลายโครเมต ต้องใช้เวลา 93, 65 และ 31 ชั่วโมง หรือใช้ปริมาตรสารละลายโครเมตเป็นจำนวน 22, 33 และ 30 เท่าของ Pore Volume ตามลำดับ และมีความสามารถดูดซับของโครเมตเท่ากับ 0.0044, 0.0041 และ 0.0039 มิลลิกรัมต่อกรัม ซึ่งพิจารณาโดยรวมพบว่าความสามารถในการคายตัวมีค่าใกล้เคียงกัน ความเร็วน้ำผ่านรูพรุนไม่มีผลต่อการคายตัวของโครเมต ทำให้โครเมตเคลื่อนตัวได้ใกล้เคียงกันดังรูปที่ 4.56



รูปที่ 4.56 กราฟเปรียบเทียบอัตราส่วนระหว่างความเข้มข้นของโครเมตขาออกกับความเข้มข้นขาเข้ากับปริมาตรสารละลายโครเมตเป็นจำนวนเท่าของ Pore Volume และความสามารถในการคายตัวของโครเมตที่ความเร็วน้ำผ่านรูพรุน 2.5, 4.9, 9.9 และ19.7 เซนติเมตรต่อชั่วโมงหลังจากการทดสอบการดูดซับที่พีเอช 10 ด้วยน้ำปราศจากไอออน

และเมื่อนำค่าความสามารถจากการดูดซับในการเคลื่อนตัวในช่วงแรกเพื่อเปรียบกับกับค่าความสามารถในการคายตัว คำนวณค่าประสิทธิภาพการคายตัวได้ดังตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 เปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับ และการคายตัวของโครเมตรวมทั้งค่าประสิทธิภาพการคายตัวของโครเมตในชุดการทดลองที่ 4, 7 และ 10 ที่ความเร็วน้ำผ่านรูพรุน 2.5, 4.9, 9.9 และ 19.9 เซนติเมตรต่อชั่วโมง

พีเอช	ความเร็วน้ำผ่านรูพรุน (เซนติเมตรต่อชั่วโมง)	ความสามารถในการดูดซับของโครเมต ;Q (mg/g)	ความสามารถในการคายตัวของโครเมต ;q (mg/g)	ประสิทธิภาพการคายตัวของโครเมต ; %
4	2.5	0.1419	0.0447	32
	4.9	0.0217	0.0198	91
	9.9	0.0211	0.0176	83
	19.7	0.0212	0.0173	82
7	2.5	0.0285	0.0060	21
	4.9	0.0094	0.0050	53
	9.9	0.0077	0.0054	70
	19.7	0.0039	0.0038	97
10	2.5	0.0128	0.0045	35
	4.9	0.0073	0.0044	60
	9.9	0.0041	0.0041	100
	19.7	0.0040	0.0039	98

จากข้างต้น สามารถเปรียบเทียบความเร็วน้ำผ่านรูพรุนต่อประสิทธิการคายตัวได้ดังนี้

การทดลองการคายตัวหลังการทดลองที่พีเอช 4 ที่ 2.5 เซนติเมตรต่อชั่วโมง มีประสิทธิภาพการคายตัวที่น้อยที่สุด คือร้อยละ 32 ของความสามารถในการดูดซับของโครเมต และเมื่อเพิ่มความเร็วน้ำผ่านรูพรุนที่มีค่ามากขึ้นคือ 4.9, 9.9 และ 19.7 เซนติเมตรต่อชั่วโมง มีประสิทธิภาพของการคายตัว ร้อยละ 91 83 และ 82 ของความสามารถในการดูดซับของโครเมต ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกัน สรุปได้ว่า ความเร็วน้ำผ่านรูพรุนที่มากกว่า 4.9 เซนติเมตรต่อชั่วโมงไม่มีผลต่อประสิทธิภาพการคายตัวของโครเมต แต่ยังคงทำให้โครเมตคายตัวออกมาไม่หมด

การทดลองการคายตัวหลังการทดลองที่พีเอช 7 ที่ 2.5 เซนติเมตรต่อชั่วโมง มีประสิทธิภาพการคายตัวมีค่าน้อยที่สุด คือร้อยละ 21 ของความสามารถในการดูดซับของโครเมต และเมื่อเพิ่มความเร็วน้ำผ่านรูพรุนที่มีค่ามากขึ้นคือ 4.9, 9.9 และ 19.7 เซนติเมตรต่อชั่วโมง มีประสิทธิภาพของการคายตัว ร้อยละ 53 70 และ 97 ของความสามารถในการดูดซับของโครเมต ซึ่งมีค่ามากขึ้นตามลำดับ จึงสรุปได้ว่าการเพิ่มความเร็วน้ำผ่านรูพรุนที่มากขึ้นมีผลต่อ

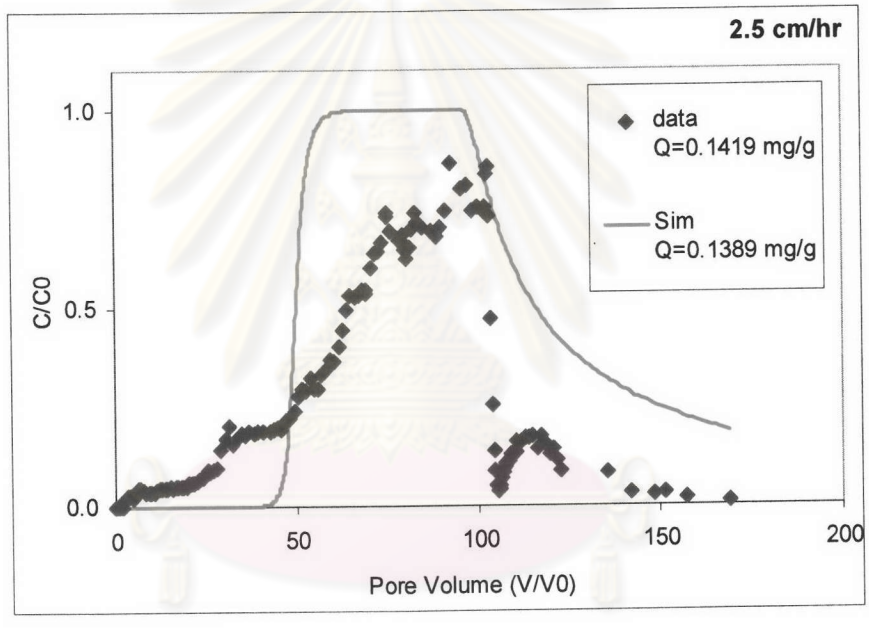
ประสิทธิภาพการคายตัวของโครเมตที่มากขึ้นด้วย โดยที่ความเร็วน้ำผ่ารูพรุน 19.7 เซนติเมตรต่อชั่วโมง ทำให้โครเมตคายตัวออกมาได้มากที่สุดและได้เกือบทั้งหมด

การทดลองการคายตัวหลังการทดลองที่พีเอช 10 ที่ 2.5 เซนติเมตรต่อชั่วโมงมีประสิทธิภาพการคายตัวน้อยที่สุด คือร้อยละ 35 ของความสามารถในการดูดซับของโครเมต และเมื่อเพิ่มความเร็วน้ำผ่านรูพรุนที่มีค่ามากขึ้นคือ 4.9 เซนติเมตรต่อชั่วโมง พบว่าประสิทธิภาพของการคายตัวมีค่ามากขึ้นเป็นร้อยละ 60 ของความสามารถในการดูดซับของโครเมต แต่เมื่อเพิ่มความเร็วน้ำผ่านรูพรุนเป็น 9.9 และ 19.7 เซนติเมตรต่อชั่วโมง มีประสิทธิภาพของการคายตัวเป็นร้อยละ 100 และ 98 ของความสามารถในการดูดซับของโครเมต ซึ่งทำให้โครเมตชะละลายออกมาได้เกือบทั้งหมด สรุปได้ว่า ความเร็วน้ำผ่านรูพรุนที่มากกว่า 9.9 เซนติเมตรต่อชั่วโมงทำให้โครเมตคายตัวออกมาได้ทั้งหมด

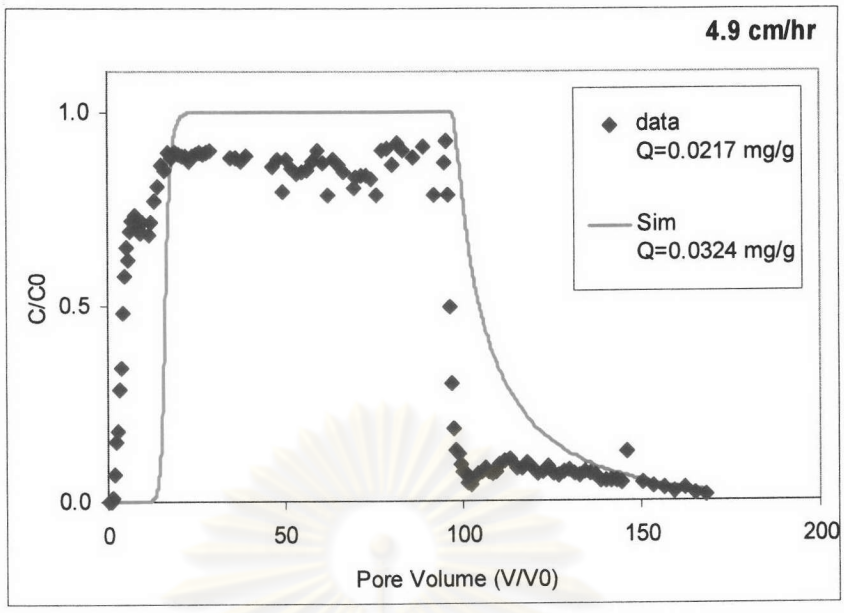
4.6 การวิเคราะห์การเคลื่อนตัวของโครเมตในน้ำใต้ดินด้วยแบบจำลองคอมพิวเตอร์

ในขั้นตอนนี้ เลือกใช้โปรแกรม HYDRUS2D โดยใช้ค่าพารามิเตอร์ในการดูดซับ (Adsorption Parameter) จากการทดลองแบบกะในหัวข้อ 4.2 และ 4.3 และค่าสัมประสิทธิ์การกระจายตัว (Dispersion Coefficient) จากการทดลองแบบคอลัมน์โดยใช้สารตามรอย (Tracer) ในในหัวข้อ 4.4 แล้วป้อนค่าดังกล่าวเข้าสู่ตัวโปรแกรม HYDRUS2D เพื่อให้โปรแกรมทำการคำนวณเพื่อจำลองข้อมูล (Simulated Data) การเคลื่อนตัวของโครเมต และแสดงในรูปแบบของกราฟเปรียบเทียบอัตราส่วนระหว่างความเข้มข้นของโครเมตขาออกกับความเข้มข้นขาเข้า กับปริมาตรเป็นจำนวนเท่าของ Pore Volume โดยป้อนค่าพารามิเตอร์การดูดซับที่พีเอช 4, 7, 10 โดยแต่ละค่าพีเอช มีความเร็วน้ำผ่านรูพรุน 2.5, 4.9, 9.9 และ 19.7เซนติเมตรต่อชั่วโมง ซึ่งนำไปเทียบกับผลการทดลองในหัวข้อ 4.5 โดยข้อมูลจากการทดลองแบบคอลัมน์จะแสดงในรูปของจุดเพื่อเปรียบเทียบกับ ข้อมูลที่ได้จากการจำลองของโปรแกรม HYDRUS2D ซึ่งแสดงในรูปแบบของเส้นต่อเนื่อง ในขั้นตอนนี้ทำการเปลี่ยนเวลาที่ใช้ในการทดลองจากเวลา (ชั่วโมง)ไปเป็นจำนวนเท่าของปริมาตรของรูพรุน (Pore Volume หรือ V/V0) เพื่อใช้ในการเปรียบเทียบความแตกต่างของกราฟอัตราส่วนระหว่างความเข้มข้นของโครเมตขาออกกับความเข้มข้นขาเข้า กับปริมาตรเป็นจำนวนเท่าของ Pore Volume ของโครเมตได้ง่ายขึ้น และทำการเปรียบเทียบความแตกต่างค่าความสามารถในการดูดซับของผลการทดลองแบบคอลัมน์จริง และผลจากการจำลองข้อมูลโดยโปรแกรม HYDRUS2D สำหรับชุดข้อมูลในการป้อนเข้าสู่ตัวโปรแกรม HYDRUS2D ได้แสดงในภาคผนวก จ.

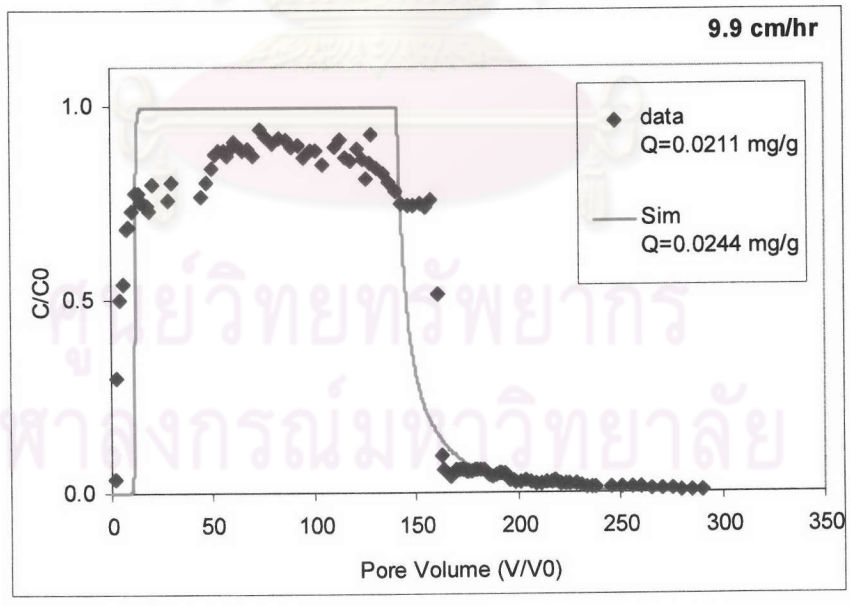
พิจารณาเปรียบเทียบของการทดลองที่พีเอช 4 ที่เปรียบเทียบในแต่ละความเร็วน้ำผ่านรูพรุน 2.5, 4.9, 9.9 และ 19.7 เซนติเมตรต่อชั่วโมง พบว่า ที่ความเร็วน้ำผ่านรูพรุน 2.5 เซนติเมตร ซึ่งการทดลองจริงได้ค่าความสามารถในการดูดซับเท่ากับ 0.1419 มิลลิกรัมต่อกรัมและแบบจำลองประมาณค่าไว้เท่ากับ 0.1389 มิลลิกรัมต่อกรัม ซึ่งมีค่าที่ใกล้เคียงกัน แต่หากเพิ่มความเร็วน้ำผ่านรูพรุนที่มากขึ้น คือ 4.9, 9.9 และ 19.7 เซนติเมตรต่อชั่วโมง การทดลองจริงได้ค่าความสามารถในการดูดซับเท่ากับ 0.0217, 0.0211 และ 0.0212 มิลลิกรัมต่อกรัม ในขณะที่แบบจำลองประมาณค่าไว้เท่ากับ 0.0324, 0.0244 และ 0.0233 มิลลิกรัมต่อกรัมตามลำดับ ซึ่งเห็นได้ว่าการประมาณค่าจากแบบจำลองมีค่าที่มากกว่า ทำให้โครเมต เคลื่อนตัวได้ช้ากว่าการทดลองจริง ดังแสดงในรูปที่ 4.57 ถึง 4.60



รูปที่ 4.57 กราฟเปรียบเทียบอัตราส่วนระหว่างความเข้มข้นของโครเมตขาออกกับความเข้มข้นขาเข้ากับปริมาตรสารละลายโครเมตเป็นจำนวนเท่าของ Pore Volume กับการจำลองข้อมูลโดยโปรแกรม HYDRUS2D ที่ความเร็วน้ำผ่านรูพรุน 2.5 เซนติเมตรต่อชั่วโมง ที่พีเอช 4 ความแรงไอออน 0.01 โมล

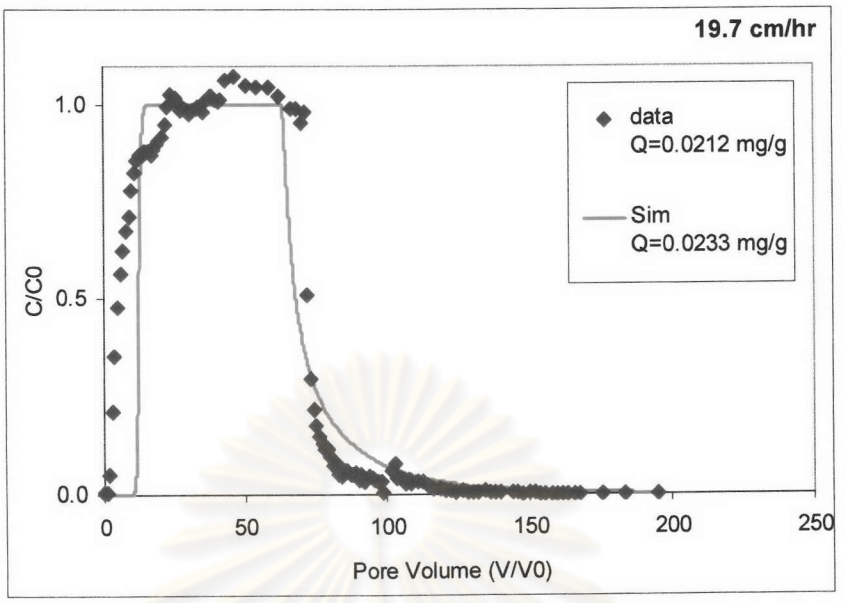


รูปที่ 4.58 กราฟเปรียบเทียบอัตราส่วนระหว่างความเข้มข้นของโครเมตขาออกกับความเข้มข้นขาเข้ากับปริมาตรสารละลายโครเมตเป็นจำนวนเท่าของ Pore Volume กับการจำลองข้อมูลโดยโปรแกรม HYDRUS2D ที่ความเร็วน้ำผ่านรูพรุน 4.9 เซนติเมตรต่อชั่วโมง ที่พีเอช 4 ความแรงไอออน 0.01 โมล



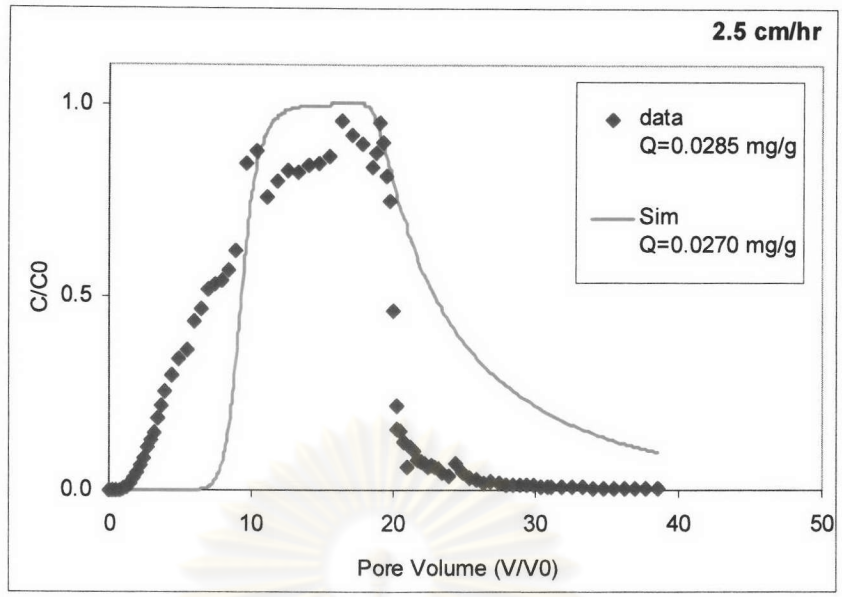
รูปที่ 4.59 กราฟเปรียบเทียบอัตราส่วนระหว่างความเข้มข้นของโครเมตขาออกกับความเข้มข้นขาเข้ากับปริมาตรสารละลายโครเมตเป็นจำนวนเท่าของ Pore Volume กับการจำลองข้อมูลโดยโปรแกรม HYDRUS2D ที่ความเร็วน้ำผ่านรูพรุน 9.9 เซนติเมตรต่อชั่วโมง ที่พีเอช 4 ความแรงไอออน 0.01 โมล

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

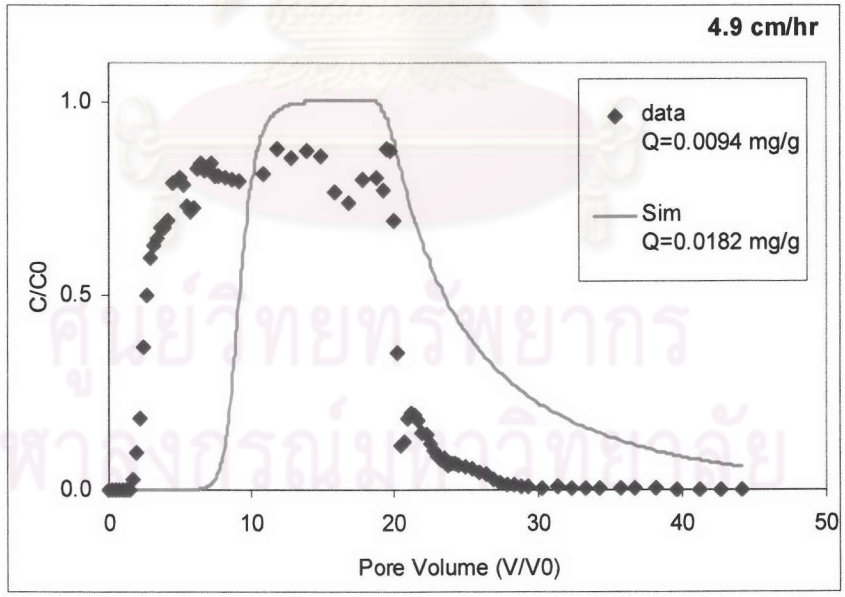


รูปที่ 4.60 กราฟเปรียบเทียบอัตราส่วนระหว่างความเข้มข้นของโครเมตขาออกกับความเข้มข้นขาเข้ากับปริมาตรสารละลายโครเมตเป็นจำนวนเท่าของ Pore Volume กับการจำลองข้อมูลโดยโปรแกรม HYDRUS2D ที่ความเร็วน้ำผ่านรูพรุน 19.7 เซนติเมตรต่อชั่วโมง ที่พีเอช 4 ความแรงไอออน 0.01 โมล

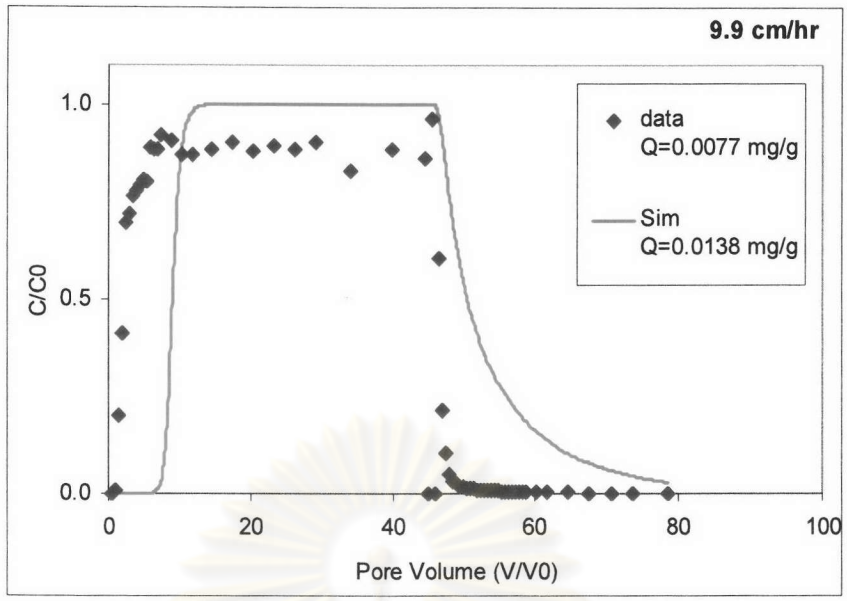
พิจารณาเปรียบเทียบของการทดลองที่พีเอช 7 ที่ความเร็วน้ำผ่านรูพรุน 2.5 เซนติเมตรต่อชั่วโมง ซึ่งการทดลองจริงได้ค่าความสามารถในการดูดซับเท่ากับ 0.0285 มิลลิกรัมต่อกรัม ในขณะที่แบบจำลองประมาณค่าไว้เท่ากับ 0.0270 มิลลิกรัมต่อกรัม ซึ่งมีค่าที่ใกล้เคียงกัน แต่หากเพิ่มความเร็วน้ำผ่านรูพรุนที่มากขึ้น คือ 4.9, 9.9 และ 19.7 เซนติเมตรต่อชั่วโมง การทดลองจริงได้ค่าความสามารถในการดูดซับเท่ากับ 0.094, 0.0077 และ 0.0039 มิลลิกรัมต่อกรัม ในขณะที่แบบจำลองประมาณค่าไว้เท่ากับ 0.0182, 0.0138 และ 0.0099 มิลลิกรัมต่อกรัมตามลำดับ ซึ่งเห็นได้ว่าการประมาณค่าจากแบบจำลองมีค่าที่มากกว่าค่าที่ได้จากการทดลองจริง ทำให้โครเมตเคลื่อนตัวได้ช้ากว่าการทดลองจริง ดังแสดงในรูปที่ 4.61 ถึง 4.64



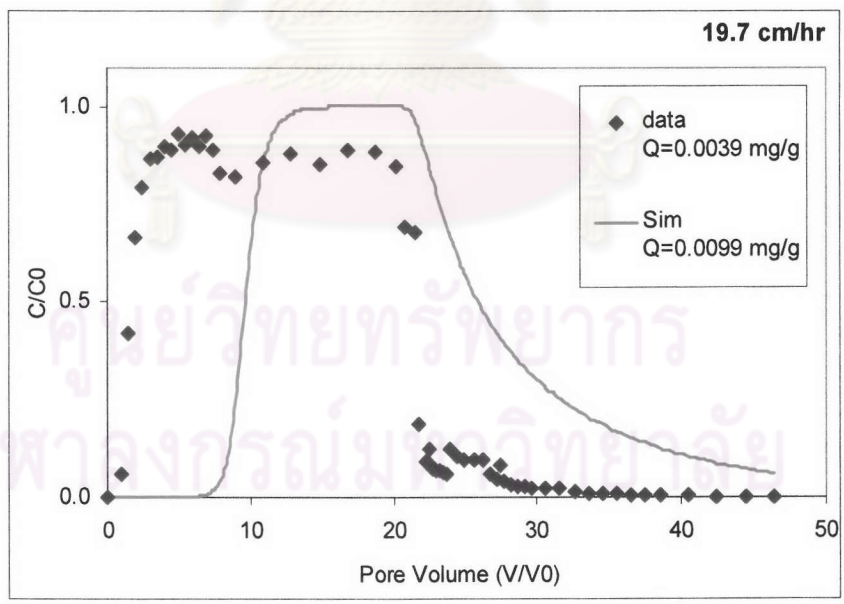
รูปที่ 4.61 กราฟเปรียบเทียบอัตราส่วนระหว่างความเข้มข้นของโครเมตขาออกกับความเข้มข้นขาเข้ากับปริมาตรสารละลายโครเมตเป็นจำนวนเท่าของ Pore Volume กับการจำลองข้อมูลโดยโปรแกรม HYDRUS2D ที่ความเร็วน้ำผ่านรูพรุน 2.5 เซนติเมตรต่อชั่วโมง ที่พีเอช 7 ความแรงไอออน 0.01 โมล



รูปที่ 4.62 กราฟเปรียบเทียบอัตราส่วนระหว่างความเข้มข้นของโครเมตขาออกกับความเข้มข้นขาเข้ากับปริมาตรสารละลายโครเมตเป็นจำนวนเท่าของ Pore Volume กับการจำลองข้อมูลโดยโปรแกรม HYDRUS2D ที่ความเร็วน้ำผ่านรูพรุน 4.9 เซนติเมตรต่อชั่วโมง ที่พีเอช 7 ความแรงไอออน 0.01 โมล

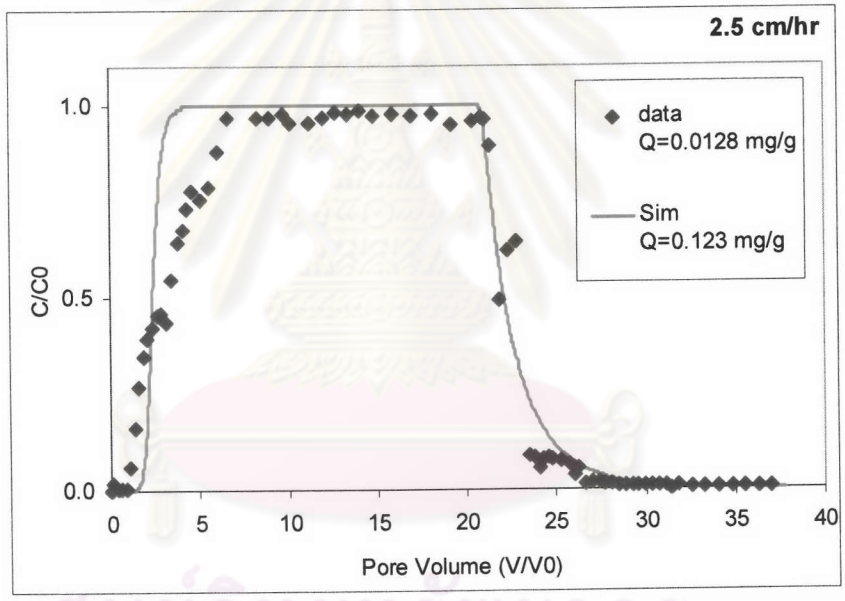


รูปที่ 4.63 กราฟเปรียบเทียบอัตราส่วนระหว่างความเข้มข้นของโครเมตขาออกกับความเข้มข้นขาเข้ากับปริมาตรสารละลายโครเมตเป็นจำนวนเท่าของ Pore Volume กับการจำลองข้อมูลโดยโปรแกรม HYDRUS2D ที่ความเร็วน้ำผ่านรูพรุน 9.9 เซนติเมตรต่อชั่วโมง ที่พีเอช 7 ความแรงไอออน 0.01 โมล

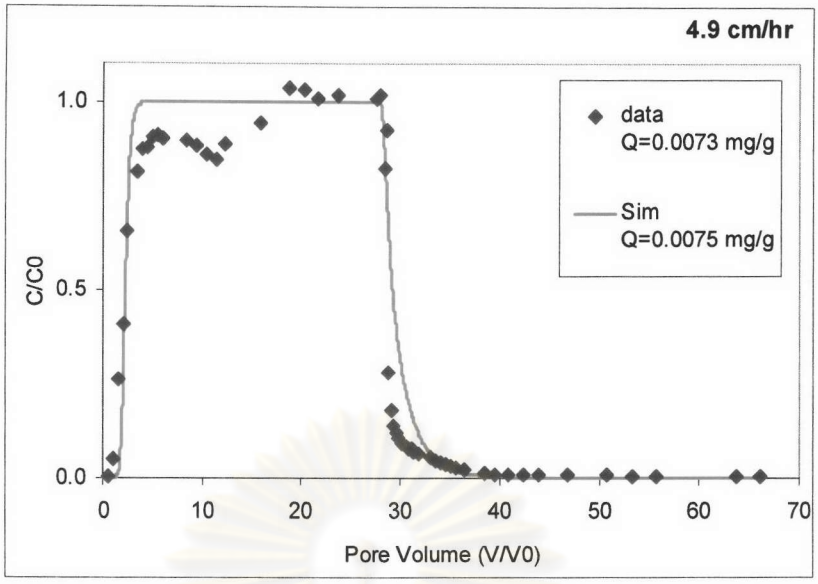


รูปที่ 4.64 กราฟเปรียบเทียบอัตราส่วนระหว่างความเข้มข้นของโครเมตขาออกกับความเข้มข้นขาเข้ากับปริมาตรสารละลายโครเมตเป็นจำนวนเท่าของ Pore Volume กับการจำลองข้อมูลโดยโปรแกรม HYDRUS2D ที่ความเร็วน้ำผ่านรูพรุน 19.7 เซนติเมตรต่อชั่วโมง ที่พีเอช 7 ความแรงไอออน 0.01 โมล

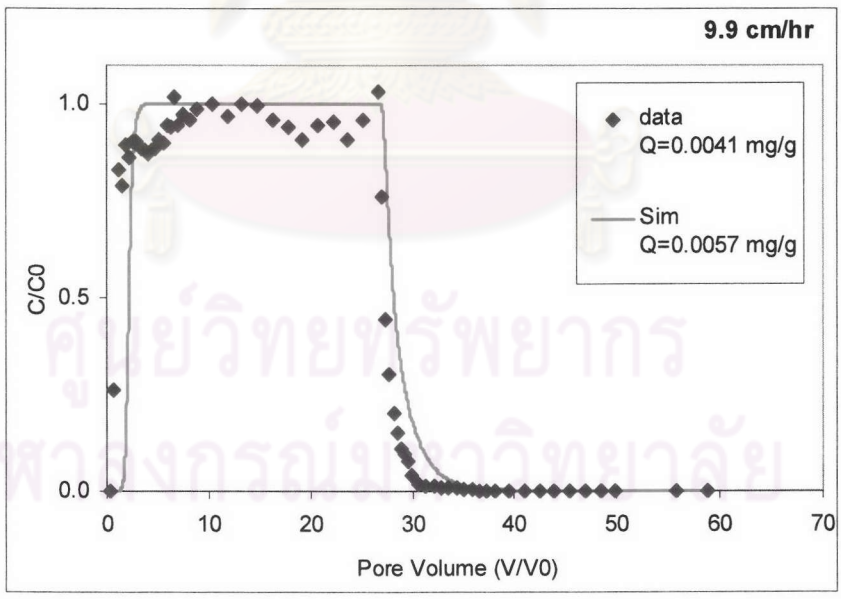
พิจารณาเปรียบเทียบของการทดลองที่พีเอช 10 ที่ความเร็วน้ำผ่านรูพรุน 2.5 และ 4.9 เซนติเมตรต่อชั่วโมง ซึ่งการทดลองจริงได้ค่าความสามารถในการดูดซับเท่ากับ 0.0285 และ 0.0073 มิลลิกรัมต่อกรัม ในขณะที่แบบจำลองประมาณค่าไว้เท่ากับ 0.0123 และ 0.0075 มิลลิกรัมต่อกรัมตามลำดับ ซึ่งมีค่าที่ใกล้เคียงกันทำให้ผลจากการทดลองจริงและจากแบบจำลองมีลักษณะใกล้เคียงกัน แต่หากเพิ่มความเร็วน้ำผ่านรูพรุนที่มากขึ้น คือ 9.9 และ 19.7 เซนติเมตรต่อชั่วโมง การทดลองจริงได้ค่าความสามารถในการดูดซับเท่ากับ 0.0041 และ 0.0040 มิลลิกรัมต่อกรัม ในขณะที่แบบจำลองประมาณค่าไว้เท่ากับ 0.0057 และ 0.0053 มิลลิกรัมต่อกรัมตามลำดับ ซึ่งเห็นได้ว่าการประมาณค่าจากแบบจำลองมีค่าที่มากกว่าค่าที่ได้จากการทดลองจริงเพียงเล็กน้อย ทำให้โครเมต เคลื่อนตัวได้ช้ากว่าการทดลองจริงเพยงเล็กน้อยเช่นกัน ดังแสดงในรูปที่ 4.65 ถึง 4.69



รูปที่ 4.65 กราฟเปรียบเทียบอัตราส่วนระหว่างความเข้มข้นของโครเมตขาออกกับความเข้มข้นขาเข้ากับปริมาตรสารละลายโครเมตเป็นจำนวนเท่าของ Pore Volume กับการจำลองข้อมูลโดยโปรแกรม HYDRUS2D ที่ความเร็วน้ำผ่านรูพรุน 2.5 เซนติเมตรต่อชั่วโมง ที่พีเอช 10 ความแรงไอออน 0.01 โมล

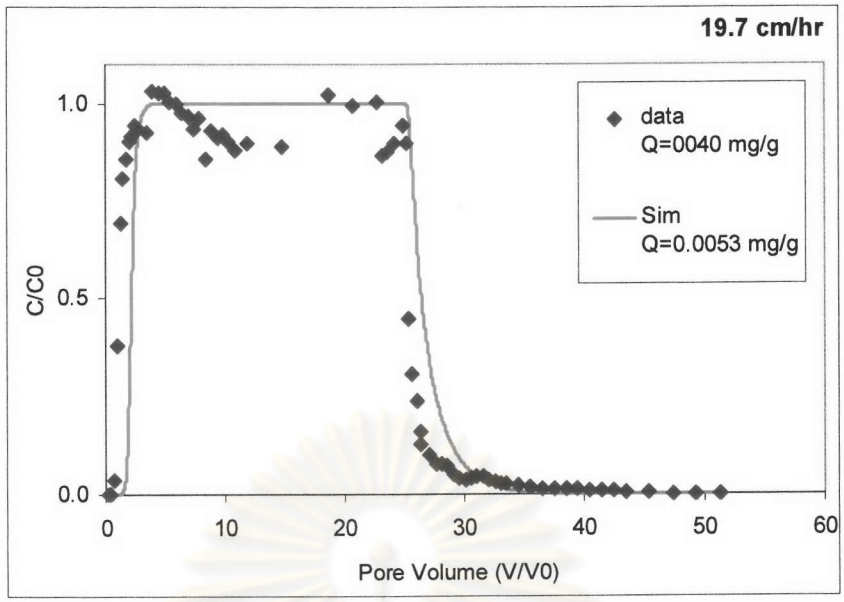


รูปที่ 4.66 กราฟเปรียบเทียบอัตราส่วนระหว่างความเข้มข้นของโครเมตขาออกกับความเข้มข้นขาเข้ากับปริมาตรสารละลายโครเมตเป็นจำนวนเท่าของ Pore Volume กับการจำลองข้อมูลโดยโปรแกรม HYDRUS2D ที่ความเร็วน้ำผ่านรูพรุน 4.9 เซนติเมตรต่อชั่วโมง ที่พีเอช 10 ความแรงไอออน 0.01 โมล



รูปที่ 4.67 กราฟเปรียบเทียบอัตราส่วนระหว่างความเข้มข้นของโครเมตขาออกกับความเข้มข้นขาเข้ากับปริมาตรเป็นจำนวนเท่าของ Pore Volume ของโครเมต กับการจำลองข้อมูลโดยโปรแกรม HYDRUS2D ที่ความเร็วน้ำผ่านรูพรุน 9.9 เซนติเมตรต่อชั่วโมง ที่พีเอช 10 ความแรงไอออน 0.01 โมล

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.68 กราฟเปรียบเทียบอัตราส่วนระหว่างความเข้มข้นของโครเมตขาออกกับความเข้มข้นขาเข้ากับปริมาตรเป็นจำนวนเท่าของ Pore Volume ของโครเมต กับการจำลองข้อมูลโดยโปรแกรม HYDRUS2D ที่ความเร็วน้ำผ่านรูพรุน 19.7 เซนติเมตรต่อชั่วโมง ที่พีเอช 10 ความแรงไอออน 0.01 โมล

จากรูปที่ 4.57 ถึง 4.68 ทำการเปรียบเทียบความแตกต่างของผลการทดลองแบบคอลัมน์และผลจากการจำลองค่าโดยโปรแกรม HYDRUS2D พบว่าความแตกต่างกันมากในชุดการทดลองแบบคอลัมน์ที่ใช้ความเร็วน้ำผ่านรุพรุนที่สูงมากขึ้นตามลำดับ ทำให้ทราบว่าในความเป็นจริงการดูดซับของโครเมต ด้วยดินที่เกิดขึ้นในคอลัมน์นั้น เป็นกระบวนการดูดซับแบบไม่เข้าสู่สมดุล (Non-equilibrium adsorption process) เนื่องจากสมการการจำลองการเคลื่อนที่ของโปรแกรม HYDRUS2D ตั้งอยู่บนสมมติฐานว่าการดูดซับจะต้องอยู่ในสภาวะสมดุล (Local Equilibrium Assumption) มาทำการประมาณการเคลื่อนที่ทำให้เกิดความแตกต่างขึ้น

โดยสมมติฐานว่าการดูดซับจะต้องอยู่ในสภาวะสมดุล (Local Equilibrium Process) เป็นไปตามแนวคิดว่า เมื่ออนุภาคดินสัมผัสกับสารละลายโครเมต อนุภาคดินจะสามารถดูดซับโครเมตได้ทันที โดยไม่ต้องอาศัยเวลาสัมผัส หรือความสามารถในการดูดซับไม่ได้ขึ้นอยู่กับเวลาสัมผัส ในขณะที่ กระบวนการดูดซับแบบไม่สมดุล (Non-equilibrium adsorption Process) นั้นสามารถอธิบายด้วยแนวคิดสองแนวคือ การดูดซับทางเคมีแบบไม่เข้าสู่สมดุล (Chemical non-equilibrium Adsorption) และการดูดซับทางกายภาพแบบกายภาพ (Physical non-equilibrium Adsorption)

แนวคิดแรก การดูดซับที่เป็นประบวนการ Chemical non-equilibrium Adsorption ซึ่งสามารถอธิบายได้โดยแบบจำลอง Two-site sorption คือ ในการดูดซับจะมีพื้นที่ของการดูดซับ

อยู่ 2 แบบ แบบแรกจะเกิดการดูดซับแบบสมดุลตาม Local Equilibrium Assumption คือดูดซับเกิดขึ้นทันทีเมื่อโครเมตสัมผัสกับอนุภาคดินโดยไม่ขึ้นกับเวลาสัมผัส และแบบที่สอง พื้นที่การดูดซับจะไม่เป็นไปตาม Local Equilibrium Assumption คือไม่สามารถดูดซับได้ทันที ต้องอาศัยเวลาสัมผัสชั่วระยะเวลาหนึ่ง จึงจะสามารถเข้าสู่สมดุลของการดูดซับได้ ดังนั้นหากการดูดซับเป็นไปตามกระบวนการ Two-site sorption ความสามารถในการดูดซับก็จะขึ้นกับเวลาสัมผัส อนึ่ง เนื่องจากดินตัวอย่างที่นำมาใช้มีปริมาณ Kaolinite ถึง 7.81% ซึ่งอาจจะเป็นพื้นที่ที่โครเมตถูกดูดซับได้ทันทีภายใน 10 ชั่วโมง (Ward และ Bassett,1999) ส่วนพื้นผิวอื่นๆ อาจต้องใช้เวลาสัมผัสที่มากขึ้น โดยขึ้นกับเวลา

แนวคิดที่สอง การดูดซับที่เกิดขึ้นเป็นประบวนการ Physical non-equilibrium Adsorption กล่าวคือ พิจารณาถึงขนาดของรูพรุน (Pore size) ของอนุภาคดินที่ขนาดแตกต่างกันเรียงตัวแบบไม่มีแบบแผน ซึ่งหากช่องว่างของรูพรุนขนาดใหญ่ โครเมตจะเดินทางเข้าไปสู่พื้นที่ดูดซับได้อย่างรวดเร็วอย่างทันทีทันใด และหากช่องว่างรูพรุนมีขนาดเล็ก แคบ ทำให้โครเมตเคลื่อนที่เข้าไปสู่พื้นที่ดูดซับได้ยากกว่า ซึ่งอาจกลายเป็นการเคลื่อนที่แบบการแพร่ (Diffusion) แทนที่จะเป็นการเคลื่อนที่แบบการกระจายตัว (Dispersion) และการเคลื่อนที่แบบการแพร่นี้ มีปัจจัยคือขนาดของรูพรุน และเวลาสัมผัส ซึ่งต้องใช้เวลาสัมผัสช่วงหนึ่งในการที่โครเมตจะเคลื่อนตัวสู่รูพรุนขนาดเล็กนั้น ดังนั้นหากการเคลื่อนที่ของโครเมตส่วนมากเป็นแบบการแพร่แล้ว ความสามารถในการดูดซับก็จะขึ้นกับเวลาสัมผัส ซึ่งไม่เป็นไปตาม Local Equilibrium Assumption

จากสมมติฐานข้างต้น เมื่อทำการเปรียบเทียบ กราฟอัตราส่วนระหว่างความเข้มข้นของโครเมตขาออกกับความเข้มข้นขาเข้ากับปริมาตรเป็นจำนวนเท่าของ Pore Volume ของโครเมต ผลการทดลองแบบคอลัมน์กับการจำลองข้อมูลด้วยโปรแกรม HYDRUS2D พบว่าการทดลองที่ใช้ความเร็วน้ำผ่านรูพรุนที่ไหลช้าๆ ได้แก่ การทดลองที่ใช้ความเร็วน้ำผ่านรูพรุน 2.5 เซนติเมตรต่อชั่วโมงในทุกค่าพีเอชให้ผลการจำลองข้อมูลใกล้เคียงกับผลการทดลองจากคอลัมน์จริงมากกว่าการทดลองที่ใช้ความเร็วน้ำผ่านรูพรุนที่สูงกว่า คือ 4.9, 9.9, และ 19.7 เซนติเมตรต่อชั่วโมงตามลำดับ เนื่องจากการเกิดการเคลื่อนตัวแบบไม่เข้าสู่สมดุลนั่นเอง ซึ่งในการปฏิบัติงานจริงเพื่อทำการประมาณการเคลื่อนตัวของโครเมต หรือเพื่อนำข้อมูลไปร่วมกับออกแบบระบบสูบเพื่อบำบัด หรือการบำบัดใดๆ จำเป็นต้องพึงระวังการใช้ข้อมูลที่จำลองจากโปรแกรม เนื่องจากโปรแกรมอาจจะประมาณเวลาการเคลื่อนที่ของ โครเมตได้ช้ากว่าเวลาที่เกิดขึ้นจริง โดยเฉพาะหากพื้นที่ที่มีการปนเปื้อนนั้น มีการไหลของน้ำใต้ดินสูง ซึ่งก่อให้เกิดความเสียหายต่อระบบนิเวศน์ และความปลอดภัยของมนุษย์และสัตว์ ดังนั้นจำเป็นต้องมีการทดลองแบบคอลัมน์ที่มีสภาพใกล้เคียงกับพื้นที่จริงและเทียบกับโปรแกรมด้วย