

## บทที่ 5

### ผลการวิเคราะห์ข้อมูล

#### 5.1 ผลการศึกษาคุณสมบัติของดินตัวอย่าง

การเลือกดินตัวอย่างมาใช้ในการทดลองตามกลุ่มเนื้อดิน คือ ดินร่วนเหนียวปนทราย (sandy clay loam) จากกลุ่มดินเนื้อปานกลาง ดินร่วนเหนียว (clay loam) จากกลุ่มดินเนื้อละเอียด และดินทรายร่วน (loamy sand) จากกลุ่มดินเนื้อหยาบ สามารถนำมาหาสมบัติอื่น ๆ ของดินตัวอย่างได้ดังตารางที่ 5.1

ตารางที่ 5.1 สมบัติของตัวอย่างดิน

สมบัติของดิน	ดินร่วนเหนียว ปนทราย	ดินร่วนเหนียว	ดินทรายร่วน
1. พีเอช* (pH)	7.2	7.2	7.8
2. ปริมาณเหล็ก*	0.6 mg/kg	1.2 mg/kg	0.3 mg/kg
3. ปริมาณอาร์เซนิกในดิน	n.a.	n.a.	n.a.
4. ค่าความจุแลกเปลี่ยนแคตไอออนของดิน* (CEC)	6.3 cmol kg <sup>-1</sup>	13.7 cmol kg <sup>-1</sup>	2.7 cmol kg <sup>-1</sup>
5. ค่าความพรุน (Porosity)	0.46	0.50	0.32
6. ความหนาแน่น (Bulk Density)	1.43 g cm <sup>-3</sup>	1.32 g cm <sup>-3</sup>	1.80 g cm <sup>-3</sup>
7. สัดส่วนของเนื้อดิน			
- ทราย (sand)	56%	42%	86%
- ทรายแป้ง (silt)	24%	28%	6%
- ดินเหนียว (clay)	20%	30%	8%

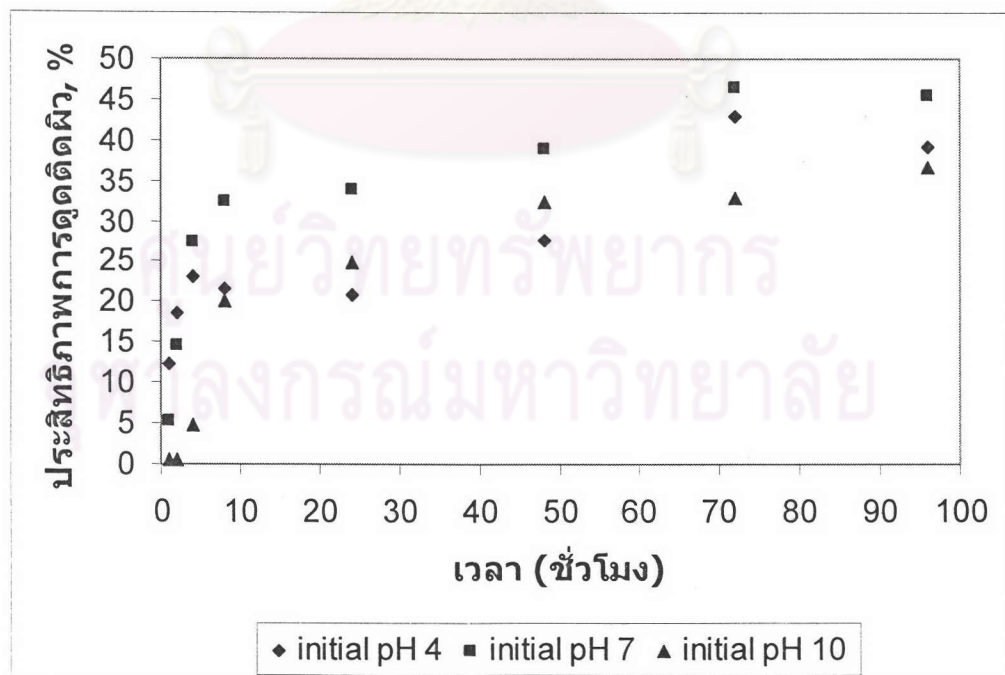
\* คู่มือการวิเคราะห์ดินและพืช กลุ่มงานวิจัยเคมีดิน กองปฐพีวิทยา กรมวิชาการเกษตร

จากข้อมูลการวิเคราะห์ดินเบื้องต้น พบว่า ปริมาณเหล็ก ค่าความจุแลกเปลี่ยนแคตไอออนของดิน และดินเหนียว คือ ดินร่วนเหนียว > ดินร่วนเหนียวปนทราย > ดินทรายร่วน ตามลำดับ ซึ่งเป็นปัจจัยหนึ่งที่มีความสัมพันธ์กับความสามารถในการดูดติดผิวของอาร์เซนิก

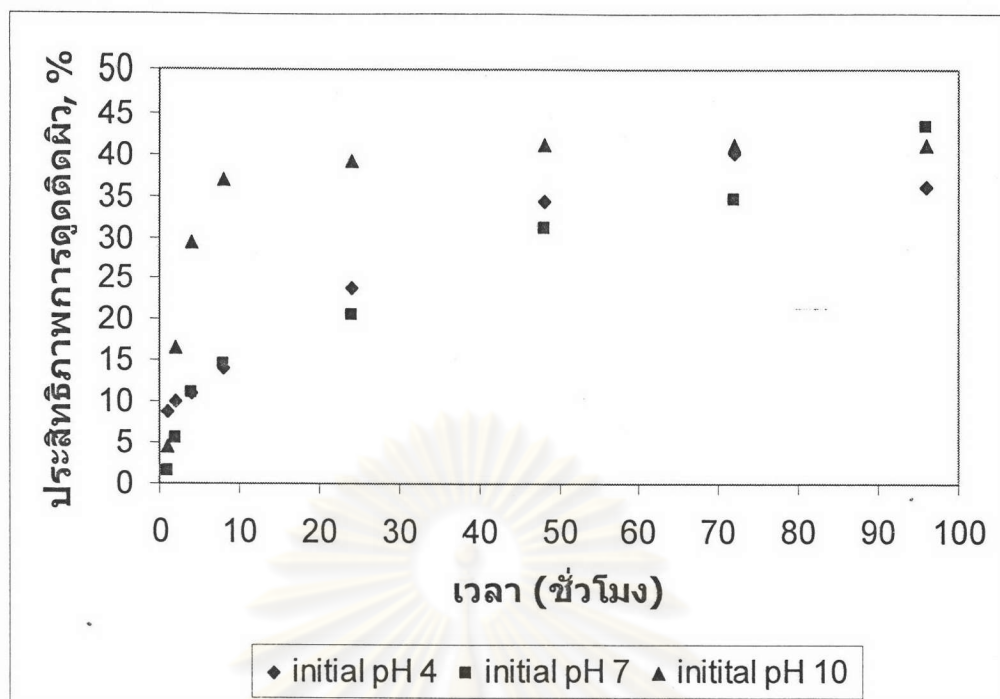
โดยดินตัวอย่างที่มีปริมาณแร่ดินเหนียวมากก็มีโอกาสที่จะเกิดการดูดติดผิวได้มากกว่าดินตัวอย่างที่มีปริมาณแร่ดินเหนียวที่น้อยกว่า ดังนั้น ลำดับของความสามารถในการดูดติดผิวของอาร์เซไนท์ที่น่าจะเป็นคือ คือ ดินร่วนเหนียว > ดินร่วนเหนียวปนทราย > ดินทรายร่วน นอกจากนี้ความสามารถในการดูดติดผิวของอาร์เซไนท์ยังอาจต้องพิจารณาถึงแร่ตัวอื่นที่เป็นองค์ประกอบในดินอีก เช่น Goethite ( $\text{FeOOH}$ ) Gibbsite ( $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ ) เป็นต้น

## 5.2 ผลการศึกษาเวลาสัมพัทธ์ที่เหมาะสมในการดูดติดผิวอาร์เซไนท์ในดินตัวอย่าง

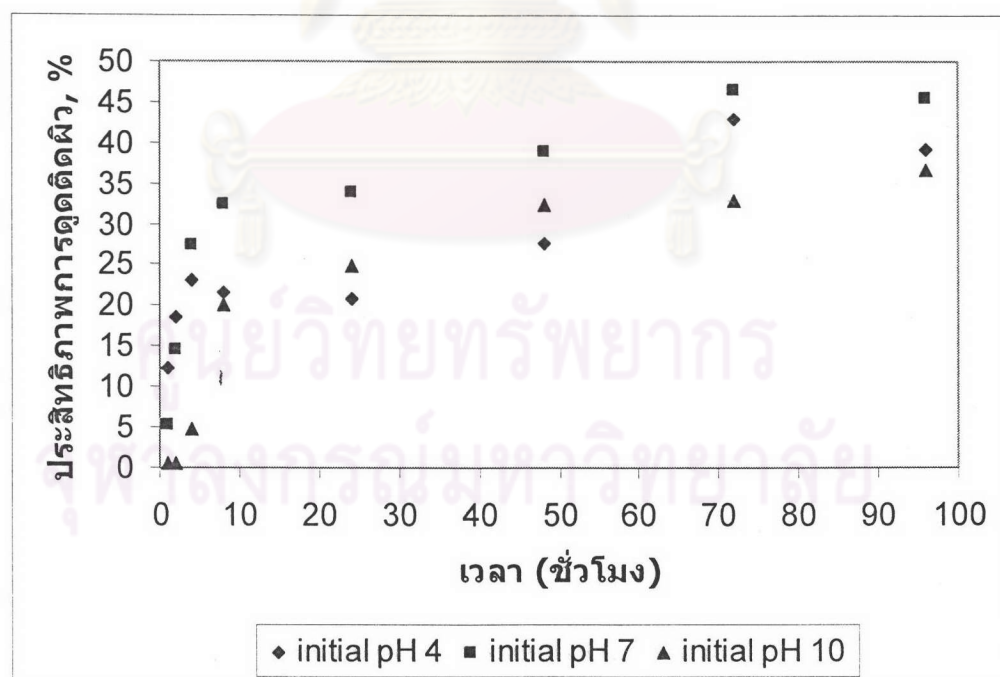
การศึกษาเวลาสัมพัทธ์ที่เหมาะสมในการดูดติดผิวอาร์เซไนท์ด้วยดินตัวอย่าง โดยใช้ความเข้มข้นของสารละลายอาร์เซไนท์ 15 มิลลิกรัมต่อลิตร (0.2 โมลาร์) ปริมาตร 50 มิลลิลิตรต่อปริมาณตัวอย่างดินทั้ง 3 กลุ่มดิน เท่ากับ 1 กรัม (ซึ่งน้ำหนักดินตัวอย่างให้มีความคลาดเคลื่อนไม่เกิน 0.0020 กรัม) และปรับพีเอชเริ่มต้นให้สารละลายอาร์เซไนท์เท่ากับ 4 7 และ 10 ทำการทดลองโดยไม่ใช้บัฟเฟอร์ จากนั้นนำตัวอย่างทั้งหมดไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าที่ความเร็วรอบการเขย่าเท่ากับ 200 รอบต่อนาที ณ อุณหภูมิห้อง โดยเก็บตัวอย่างตามช่วงเวลา 1 2 4 8 24 48 72 และ 96 ชั่วโมง (แสดงรายละเอียดไว้ในภาคผนวก ข.) ซึ่งผลการทดลองแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพในการดูดติดผิวของอาร์เซไนท์ตามช่วงเวลาเก็บตัวอย่างดังรูปที่ 5.1 – 5.3



รูปที่ 5.1 ประสิทธิภาพในการดูดติดผิวของอาร์เซไนท์ด้วยดินร่วนเหนียวปนทราย ที่ช่วงเวลาต่างๆ



รูปที่ 5.2 ประสิทธิภาพในการดูดติดผิวของอาร์เซนไนท์ด้วยดินร่วนเหนียว ที่ช่วงเวลาต่างๆ



รูปที่ 5.3 ประสิทธิภาพในการดูดติดผิวของอาร์เซนไนท์ด้วยดินทรายร่วน ที่ช่วงเวลาต่างๆ



เมื่อพิจารณาจากรูปที่ 5.1 – 5.3 ซึ่งแสดงค่าประสิทธิภาพในการดูดติดผิวของอาร์เซไนท์และความสามารถในการดูดติดผิวของอาร์เซไนท์จะเห็นได้ว่า ตั้งแต่เวลาเริ่มต้นจนถึงประมาณ 8 ชั่วโมง ประสิทธิภาพในการดูดติดผิวของอาร์เซไนท์เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว จากนั้นมีการเพิ่มขึ้นที่ลดน้อยตามจำนวนชั่วโมงที่เพิ่มขึ้นจนกระทั่งเริ่มคงที่ (S.E. O'Reilly et al., 2001)

ประสิทธิภาพในการดูดติดผิวของอาร์เซไนท์ที่สภาวะสมดุลที่พีเอชต่าง ๆ สำหรับดินร่วนเหนียวปนทรายอยู่ในช่วง 36.71% - 45.41% ดินร่วนเหนียวอยู่ในช่วง 36.18% - 43.55% และดินทรายร่วนอยู่ในช่วง 40.05% - 42.92% จะเห็นได้ว่าประสิทธิภาพในการดูดติดผิวของอาร์เซไนท์ของดินตัวอย่างทั้ง 3 ชนิดดินมีค่าใกล้เคียงกันเมื่อใช้ดินตัวอย่างในการดูดติดผิว เท่ากับ 1 กรัม

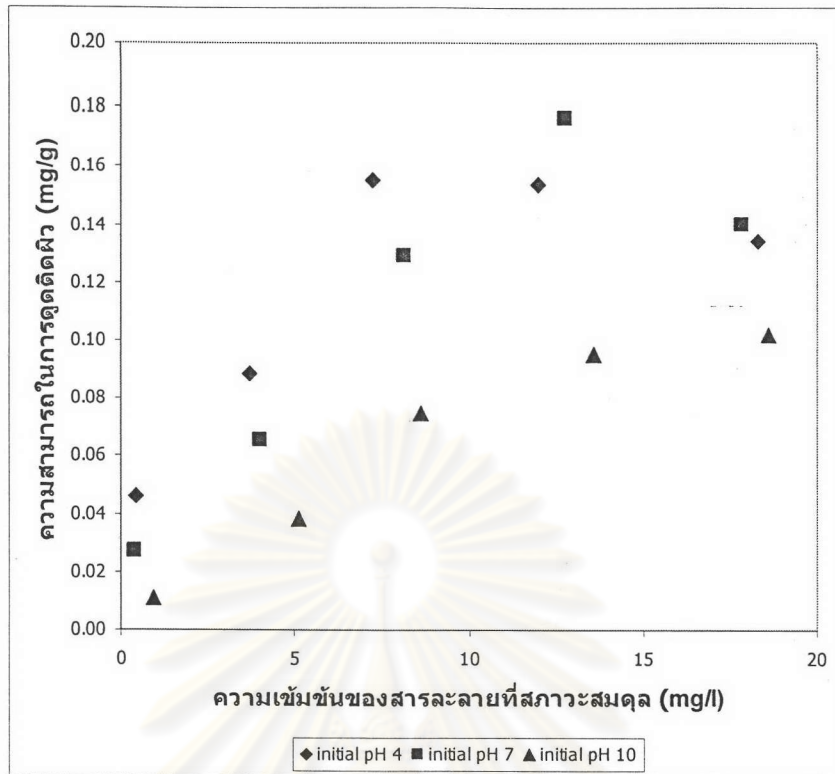
เนื่องจากดินตัวอย่างมีส่วนประกอบหลากหลายประเภท ซึ่งในแต่ละประเภทนั้นจะมีคุณสมบัติในการดูดติดผิวที่ต่างกัน ดังนั้นเวลาในการเข้าสู่สมดุลของการดูดติดผิวจึงต่างกัน แต่เมื่อพิจารณาจากรูปที่ 5.1 – 5.3 แสดงให้เห็นว่าเวลาสัมผัสที่ 96 ชั่วโมง เป็นเวลาที่มีการดูดติดผิวของอาร์เซไนท์ที่ค่อนข้างคงที่และมีค่าสูงสุด ด้วยเหตุนี้จึงเลือกเวลาสัมผัสที่ 96 ชั่วโมงมาใช้ในการทำทดลองแบบแบตช์

### 5.3 การศึกษาความสามารถในการดูดติดผิวของอาร์เซไนท์ด้วยดินตัวอย่างที่พีเอชต่างๆ

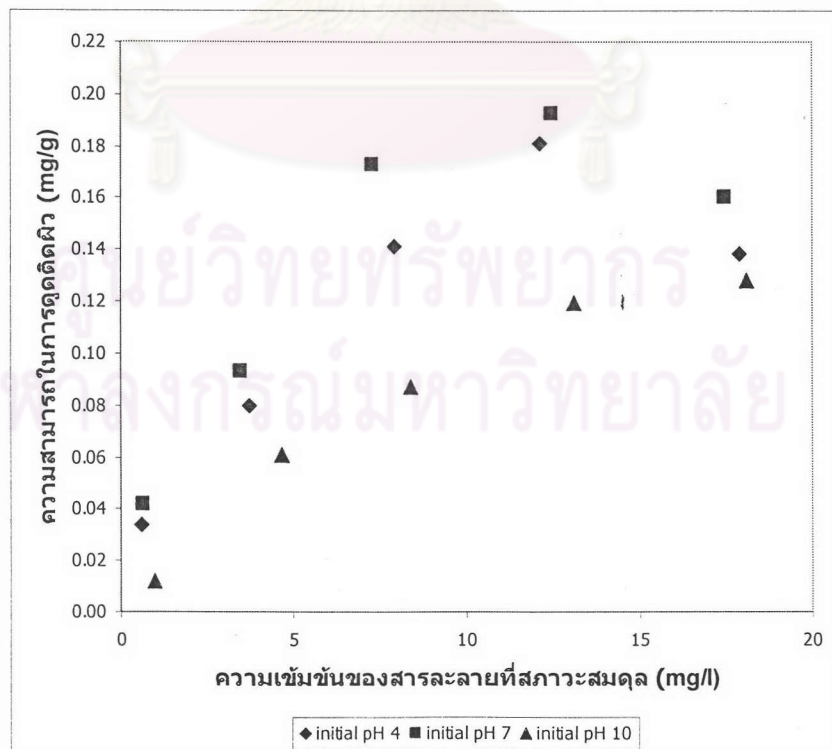
การศึกษาทำโดยใช้ความเข้มข้นของสารละลายอาร์เซไนท์เริ่มต้น 1 5 10 15 และ 20 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งทำการทดลองที่พีเอชเริ่มต้น เท่ากับ 4 7 และ 10 ทำการทดสอบความสามารถในการดูดติดผิวของอาร์เซไนท์ด้วยดินตัวอย่าง 3 กลุ่มดินโดยใช้ปริมาณดิน 1 กรัม (ซึ่งน้ำหนักดินตัวอย่างให้มีความคลาดเคลื่อนไม่เกิน 0.0020 กรัม) เป็นเวลา 96 ชั่วโมง ผลการทดลองแสดงไว้ในภาคผนวก ค. ซึ่งสามารถนำมาสร้างเป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถในการดูดติดผิวของอาร์เซไนท์กับความเข้มข้นที่สภาวะสมดุลสำหรับดินตัวอย่างชนิดต่างๆ เพื่อพิจารณาถึงพีเอชที่มีผลต่อความสามารถในการดูดติดผิวของดินแต่ละชนิด เป็นดังรูปที่ 5.4 – 5.6

และเมื่อนำผลการทดลองมาสร้างเป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถในการดูดติดผิวของอาร์เซไนท์กับความเข้มข้นที่สภาวะสมดุลแยกตามพีเอชต่างๆ เพื่อพิจารณาถึงความสามารถดูดติดผิวของชนิดดินที่พีเอชต่าง ๆ ดังรูปที่ 5.7 – 5.9

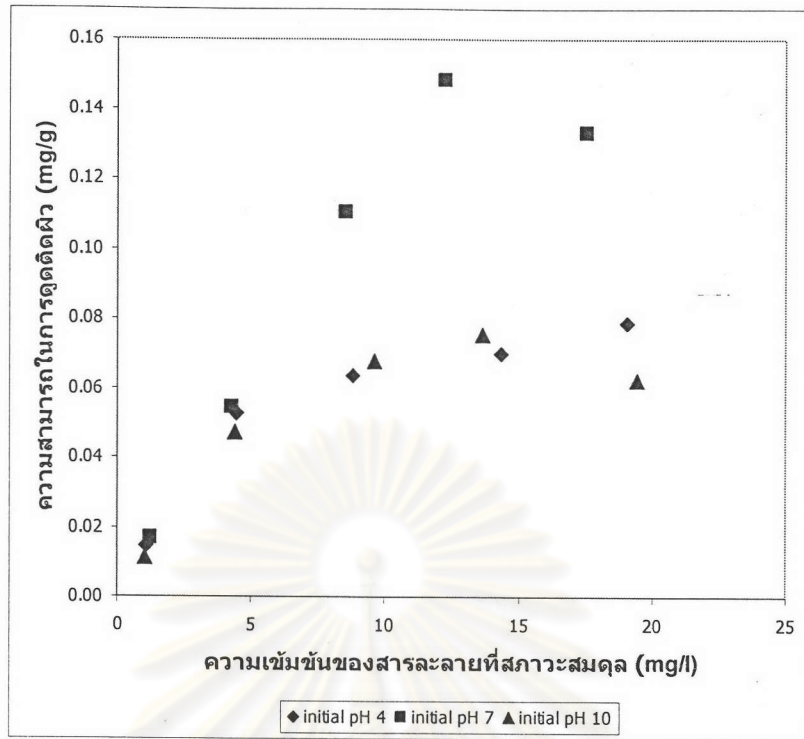




รูปที่ 5.4 ความสามารถในการดูดติดผิวของอาร์เซไนต์ด้วยดินร่วนเหนียวปนทราย

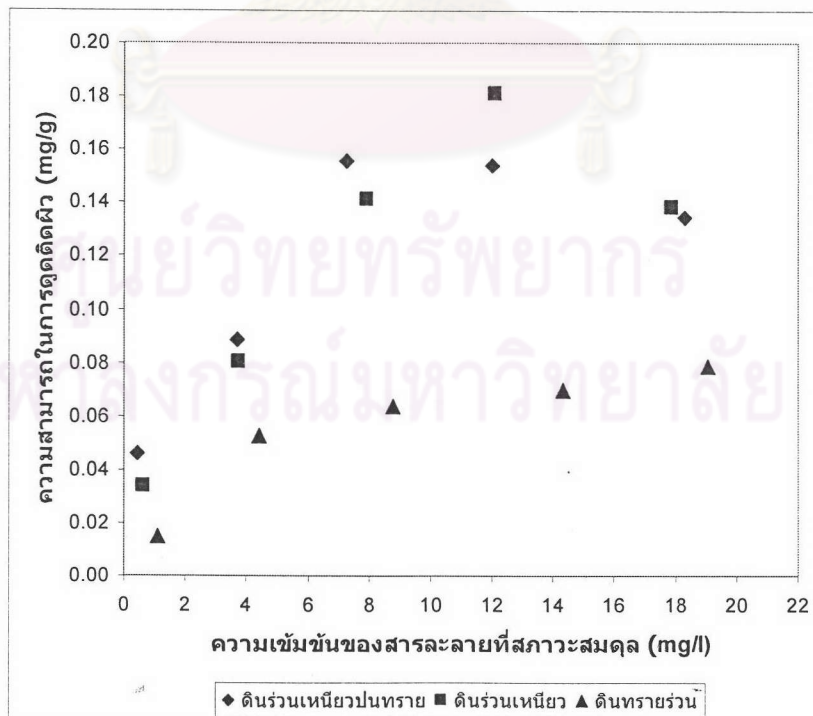


รูปที่ 5.5 ความสามารถในการดูดติดผิวของอาร์เซไนต์ด้วยดินร่วนเหนียว



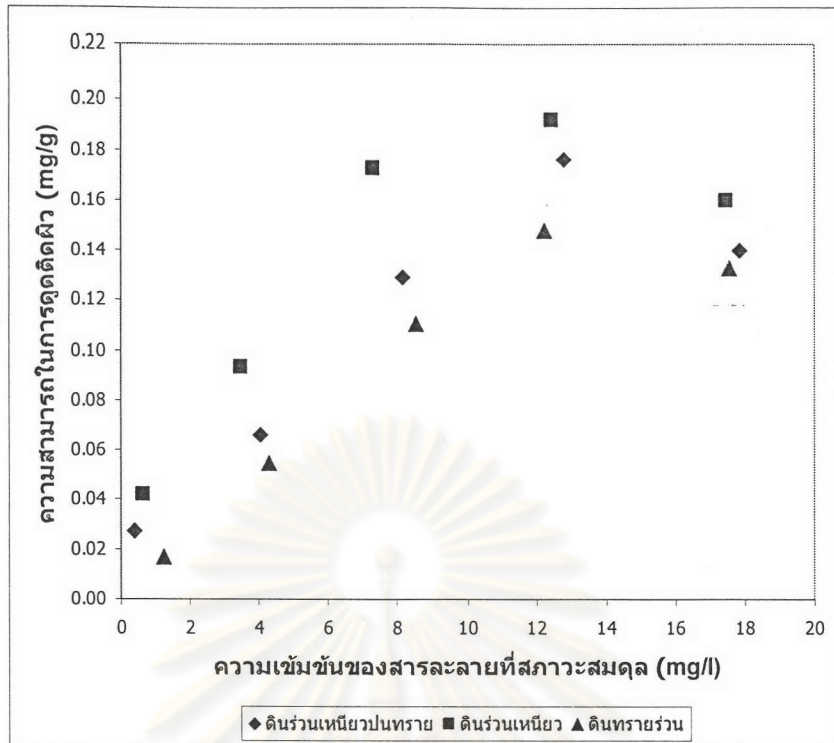
รูปที่ 5.6

ความสามารถในการดูดติดผิวของอาร์เซนไนต์ด้วยดินทรายร่วน

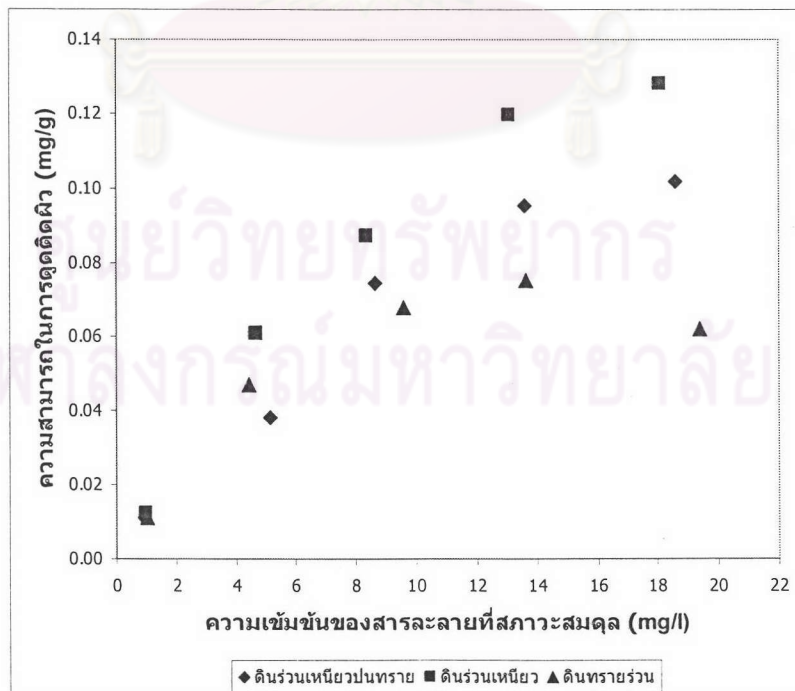


รูปที่ 5.7

ความสามารถในการดูดติดผิวของอาร์เซนไนต์ที่พีเอชเริ่มต้น เท่ากับ 4



รูปที่ 5.8 ความสามารถในการดูดติดผิวของอาร์เซไนท์ที่พีเอชเริ่มต้น เท่ากับ 7



รูปที่ 5.9 ความสามารถในการดูดติดผิวของอาร์เซไนท์ที่พีเอชเริ่มต้น เท่ากับ 10



จากกราฟในรูปที่ 5.4 จะสังเกตได้ว่า ชนิดดินร่วนเหนียวปนทรายมีการดูดติดผิวดีที่สุดที่พีเอช 7 ( $6.81 \pm 0.36$ ) นั่นคือสามารถดูดติดผิวได้ถึง 0.181 มิลลิกรัมต่อกรัม ส่วนความสามารถในการดูดติดผิวที่พีเอช 4 ( $4.31 \pm 0.02$ ) จะมีค่าความสามารถในการดูดติดผิวเท่ากับ 0.155 มิลลิกรัมต่อกรัม และที่พีเอช 10 ( $9.41 \pm 0.51$ ) เท่ากับ 0.128 มิลลิกรัมต่อกรัม

สำหรับดินร่วนเหนียวเมื่อดูแนวโน้มของการดูดติดผิวแล้วมีลำดับของพีเอชที่มีการดูดติดผิวของอาร์เซไนท์ คือ พีเอช 7 ( $7.43 \pm 0.23$ ) > 4 ( $4.65 \pm 0.10$ ) > 10 ( $9.44 \pm 0.44$ ) ดังแสดงในรูปที่ 5.5 ซึ่งมีค่าความสามารถในการดูดติดผิวเป็น 0.192 มิลลิกรัมต่อกรัม 0.181 มิลลิกรัมต่อกรัม และ 0.102 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ

ในรูปที่ 5.6 ดินทรายร่วนมีลำดับของพีเอชที่มีการดูดติดผิวดีที่สุดที่พีเอช 7 ( $6.47 \pm 0.34$ ) เท่ากับ 0.148 มิลลิกรัมต่อกรัม รองลงมาคือ ที่พีเอช 4 ( $4.25 \pm 0.02$ ) เท่ากับ 0.079 มิลลิกรัมต่อกรัม และที่พีเอช 10 ( $9.69 \pm 0.23$ ) ซึ่งมีความสามารถในการดูดติดผิวเท่ากับ 0.075 มิลลิกรัมต่อกรัม

จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่า ค่าความสามารถในการดูดติดผิวของอาร์เซไนท์มีค่าสูงที่สุดที่พีเอช 7 โดยรูปของอาร์เซไนท์ที่สามารถดูดติดผิวได้ดีจะอยู่ในรูป  $H_3AsO_3$  ซึ่งมีประจุเป็นศูนย์ (ดูรูปที่ 3.1) ในขณะที่ดินเหนียวมีประจุเป็นลบจึงสามารถดูดติดผิวได้ดีกว่ารูป  $H_2AsO_3^-$  และ  $HAsO_3^{2-}$  โดยความสามารถในการดูดติดผิวจะมีค่ามากขึ้นเมื่อใกล้ค่า  $pK_{a,1}$  (อ้างถึง Rubinson and Rubinson, 1998 ใน Markus Grafe et. Al., 2002) และอยู่ในรูป  $H_3AsO_3$  ดังกล่าว นอกจากนั้นการดูดติดผิวของอาร์เซไนท์กับดินตัวอย่างยังขึ้นอยู่กับค่า Point of Zero Charge (PZC) โดยความสามารถในการดูดติดผิวของอาร์เซไนท์ที่มีต่อแร่ดินเหนียวมีค่ามากที่สุดอยู่ในช่วงพีเอช 7 – 8.5 (Sabine Goldberg et al., 2000)

กราฟความสัมพันธ์ของดินร่วนเหนียวปนทราย ดินร่วนเหนียว และดินทรายร่วนเปรียบเทียบกับที่พีเอชต่างๆเป็นดังในรูปที่ 5.7 – 5.9 พบว่า ที่พีเอช 4 7 และ 10 มีลำดับของความสามารถในการดูดติดผิวของดินตัวอย่างคือ ดินร่วนเหนียว > ดินร่วนเหนียวปนทราย > ดินทรายร่วน

#### 5.4 การศึกษาถึงสมการไอโซเทอมการดูดติดผิว (Adsorption Isotherm) จากการดูดติดผิวของอาร์เซไนท์ด้วยดินตัวอย่างในการทำการทดลองแบบแบตช์

เมื่อนำผลที่ได้มาสร้างเป็นกราฟความสัมพันธ์จะได้ไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบเชิงเส้น (Linear Adsorption Isotherm) แบบแลงมัวร์ (Langmuir Adsorption Isotherm) และแบบฟรุนดลิช (Freundlich Adsorption Isotherm) ซึ่งแสดงไว้ในภาคผนวก ค. เพื่อพิจารณาว่าการดูดติดผิวของอาร์เซไนท์ในดินตัวอย่างสอดคล้องกับการดูดติดผิวประเภทใด โดยพิจารณาจาก R-Square ของกราฟไอโซเทอม ซึ่งค่า R-Square ของกราฟไอโซเทอมของการดูดติดผิวแสดงไว้ดังตารางที่ 5.5

ตารางที่ 5.2 ค่า R-Square ของไอโซเทอมของการดูดติดผิวของอาร์เซไนท์ด้วยดินตัวอย่าง

พีเอช	ชนิดของดิน	Linear Isotherm	Langmuir Isotherm	Freundlich Isotherm
4	ดินร่วนเหนียวปนทราย	-0.6278	0.9423	0.8890
	ดินร่วนเหนียว	0.1963	0.9745	0.9263
	ดินทรายร่วน	0.3181	0.9924	0.9190
7	ดินร่วนเหนียวปนทราย	0.3533	0.9487	0.9387
	ดินร่วนเหนียว	0.0524	0.9734	0.9200
	ดินทรายร่วน	0.6477	0.9977	0.9619
10	ดินร่วนเหนียวปนทราย	0.8393	0.9980	0.9754
	ดินร่วนเหนียว	0.8398	0.9940	0.9839
	ดินทรายร่วน	0.1450	0.9898	0.8821

จากตารางที่ 5.2 จะเห็นได้ว่าค่า R-Square ของไอโซเทอมแบบแลงมัวร์ (Langmuir Isotherm) มีค่าสูงที่สุดเมื่อเทียบกับไอโซเทอมแบบเชิงเส้น (Linear Isotherm) และไอโซเทอมแบบฟรุนดลิช (Freundlich Isotherm) ซึ่งแอนไอออนที่ถูกดูดติดผิวเป็นฟังก์ชันของความเข้มข้นของสารละลายแอนไอออนที่สภาวะสมดุล (D.L. Corwin et. al., 1999) ดังนั้น ไอโซเทอมการดูดติดผิวของอาร์เซไนท์ด้วยดินตัวอย่างจึงสอดคล้องกับไอโซเทอมแบบแลงมัวร์

### 5.5 การหาค่าพารามิเตอร์ของการดูดติดผิว (Adsorption Parameter)

จากผลการทดลองในหัวข้อที่ 5.5 ทำให้ทราบว่า การดูดติดผิวของอาร์เซนิกด้วยดิน ตัวอย่างทั้ง 3 กลุ่มดินส่วนใหญ่เป็นการดูดติดผิวแบบแลงมัวร์ ซึ่งสมการของแลงมัวร์เป็นสมการที่ใช้อธิบายการดูดติดผิวแบบชั้นเดียว (monolayer) โดยที่สมการในรูปสมการเชิงเส้น คือ

$$\frac{1}{Q} = \frac{1}{ab} \frac{1}{C_e} + \frac{1}{a} \quad (3.15)$$

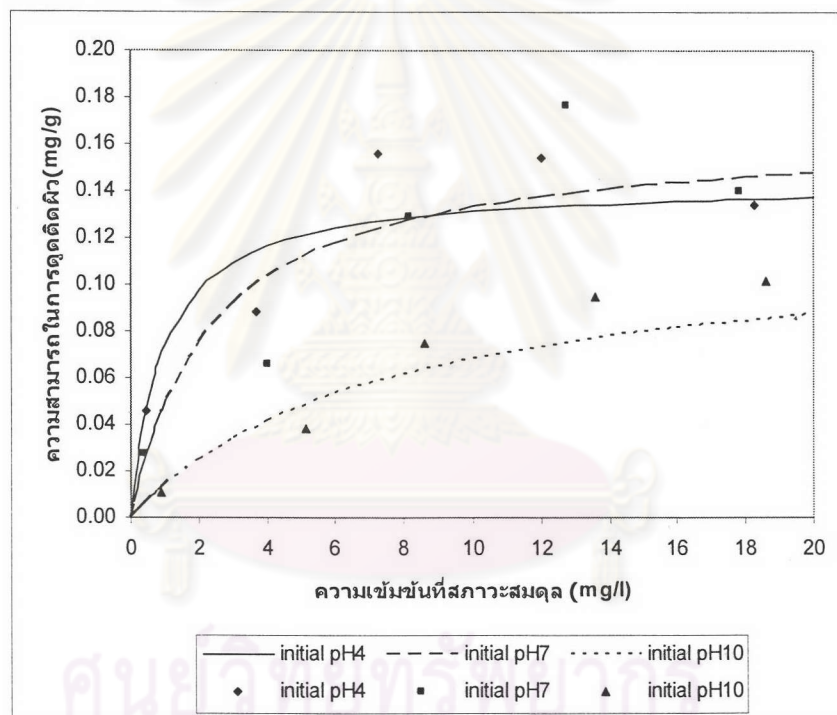
จากสมการดังกล่าวจะเห็นได้ว่าจะมีพารามิเตอร์ของการดูดติดผิวอยู่ 2 ค่า คือ a และ b ซึ่งการหาค่าพารามิเตอร์ทั้งสองได้จากสมการไอโซเทอมของการดูดติดผิวของอาร์เซนิกด้วยตัวอย่างดิน โดยค่า a และ b จากสมการไอโซเทอมแบบแลงมัวร์ที่ได้จากการทดลองแสดงไว้ในตารางที่ 5.3

ตารางที่ 5.3 ค่าพารามิเตอร์ของการดูดติดผิวที่หาได้จากสมการไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบแลงมัวร์ของตัวอย่างดิน ที่สภาวะพีเอชต่างๆ

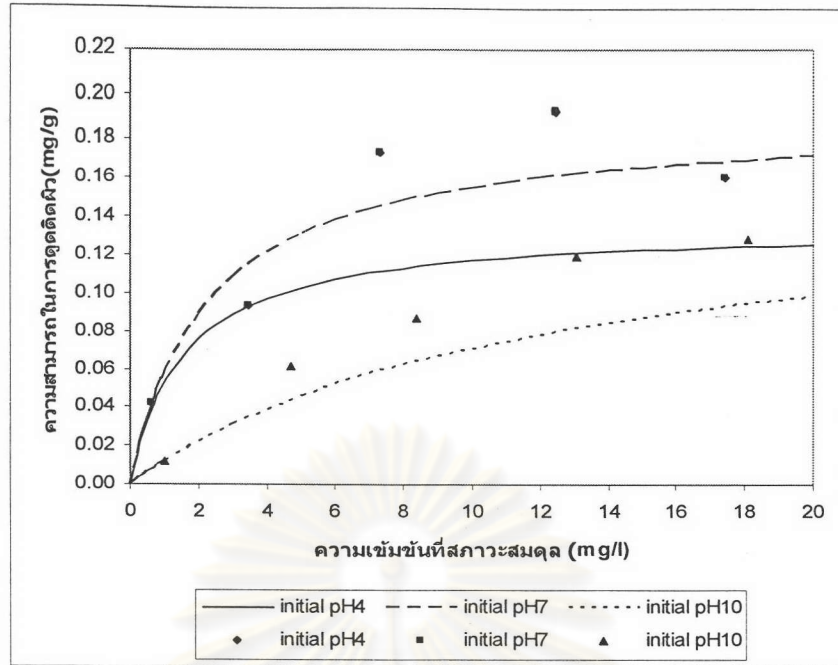
พีเอช	ชนิดของดิน	สมการไอโซเทอม	a	b
4	ดินร่วนเหนียวปนทราย	$1/Q = 6.503(1/C_e) + 6.9675$	0.144	1.071
	ดินร่วนเหนียว	$1/Q = 14.616(1/C_e) + 6.0603$	0.165	0.415
	ดินทรายร่วน	$1/Q = 63.199(1/C_e) + 8.317$	0.120	0.132
7	ดินร่วนเหนียวปนทราย	$1/Q = 11.546(1/C_e) + 7.3935$	0.135	0.640
	ดินร่วนเหนียว	$1/Q = 11.966(1/C_e) + 5.2493$	0.191	0.439
	ดินทรายร่วน	$1/Q = 70.475(1/C_e) + 1.8455$	0.054	0.026
10	ดินร่วนเหนียวปนทราย	$1/Q = 78.09(1/C_e) + 2.0332$	0.492	0.026
	ดินร่วนเหนียว	$1/Q = 77.77(1/C_e) + 6.3155$	0.158	0.081
	ดินทรายร่วน	$1/Q = 81.892(1/C_e) + 7.2326$	0.138	0.088



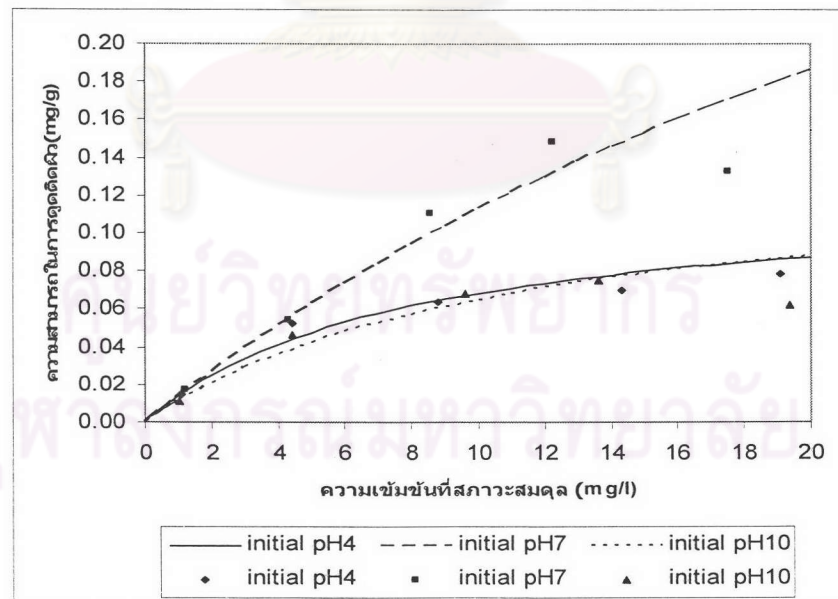
ตรวจทดสอบสมการไอโซเทอมโดยแทนค่า  $C_e$  และค่าพารามิเตอร์  $a$  และ  $b$  ลงในสมการแลงมัวร์ (สมการที่ 3.13) จะได้ค่า  $Q$  ดังตารางที่ ๓.2 ซึ่งในภาคผนวก ง. จะได้เส้นแนวโน้มความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถในการดูดติดผิวของอาร์เซไนท์ด้วยดินตัวอย่างกับความเข้มข้นของอาร์เซไนท์ที่สภาวะสมดุล ที่พีเอชต่างๆ ดังรูปที่ 5.16 – 5.18 และเมื่อพล็อตเส้นแนวโน้มความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถในการดูดติดผิวของอาร์เซไนท์กับความเข้มข้นของอาร์เซไนท์ที่สภาวะสมดุล ที่พีเอชต่างๆ ด้วยดินตัวอย่างชนิดต่างๆ จะเป็นดังรูปที่ 5.19 – 5.21



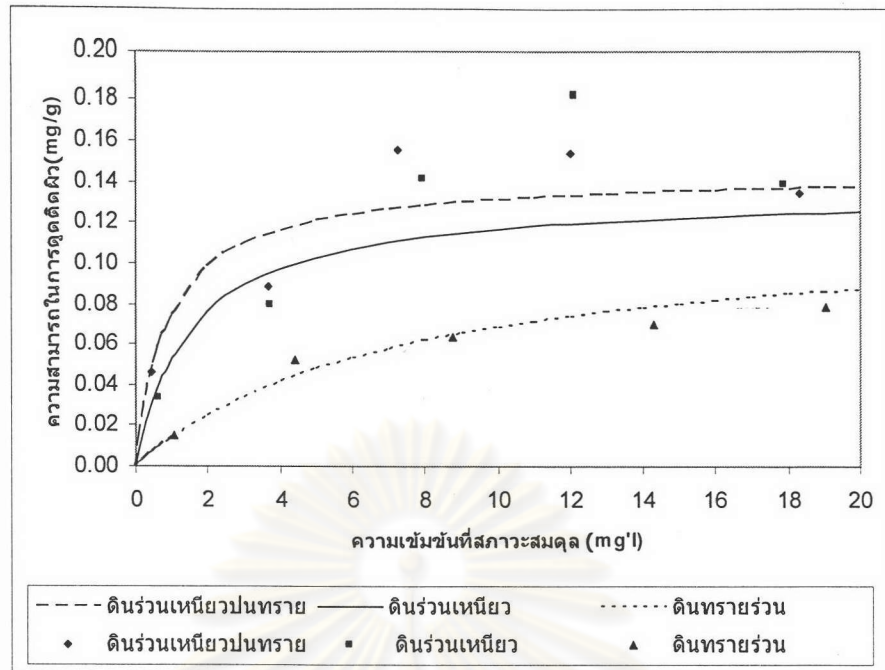
รูปที่ 5.16 เส้นแนวโน้มความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถในการดูดติดผิวของอาร์เซไนท์ด้วยดินร่วนเหนียวปนทราย และความเข้มข้นของอาร์เซไนท์ที่สภาวะสมดุล ที่พีเอชต่างๆ โดยแทนค่าสมการและพารามิเตอร์ที่ได้จากทดลอง



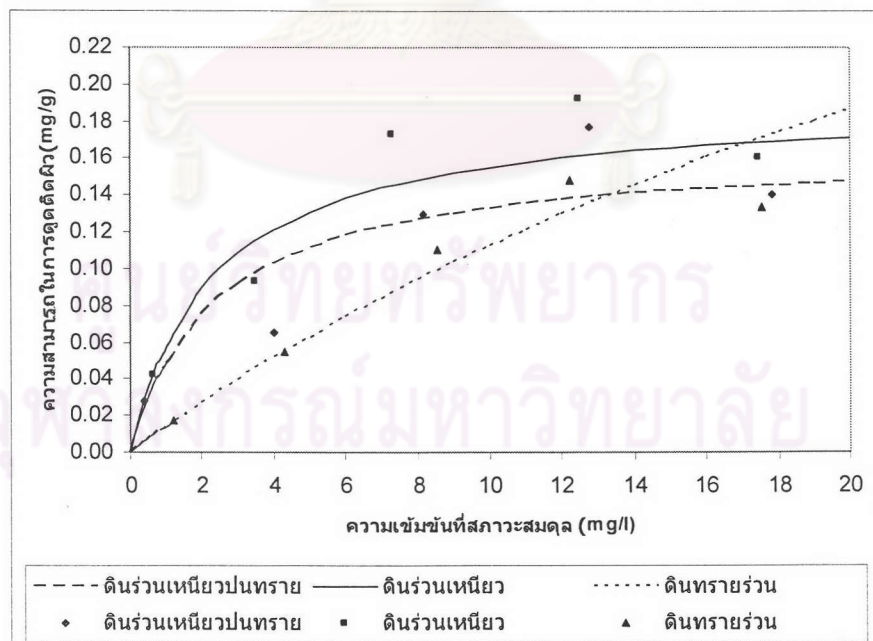
รูปที่ 5.17 เส้นแนวโน้มความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถในการดูดซับของอาร์เซไนต์ด้วยดินร่วนเหนียว และความเข้มข้นของอาร์เซไนต์ที่สภาวะสมดุล ที่พีเอชต่างๆ โดยแทนค่าสมการและพารามิเตอร์ที่ได้จากทดลอง



รูปที่ 5.18 เส้นแนวโน้มความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถในการดูดซับของอาร์เซไนต์ด้วยดินทรายร่วน และความเข้มข้นของอาร์เซไนต์ที่สภาวะสมดุล ที่พีเอชต่างๆ โดยแทนค่าสมการและพารามิเตอร์ที่ได้จากทดลอง

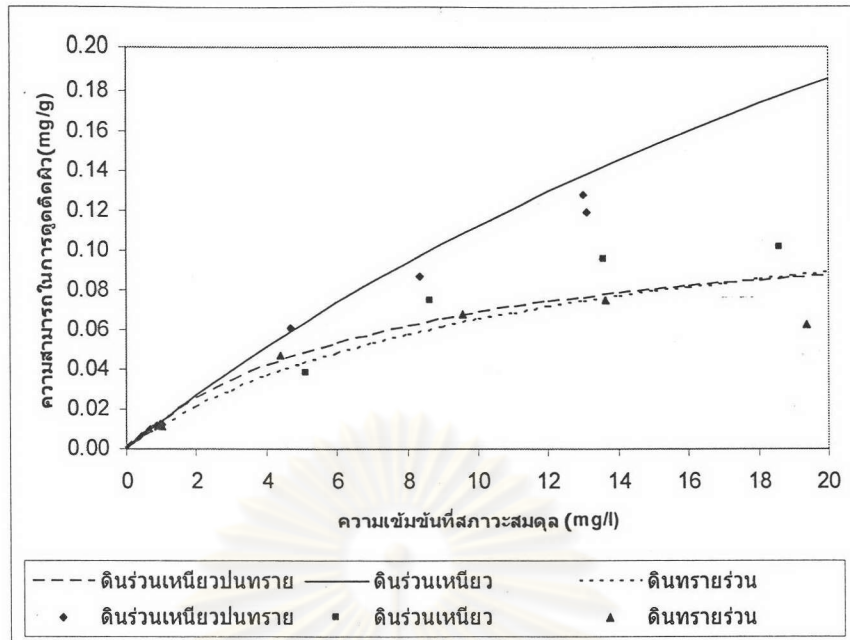


รูปที่ 5.19 เส้นแนวโน้มความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถในการดูดติดผิวของอาร์เซนไนท์ด้วยดินตัวอย่าง และความเข้มข้นของอาร์เซนไนท์ที่สภาวะสมดุล ที่พีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 4 โดยแทนค่าสมการและพารามิเตอร์ที่ได้จากทดลอง



รูปที่ 5.20 เส้นแนวโน้มความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถในการดูดติดผิวของอาร์เซนไนท์ด้วยดินตัวอย่าง และความเข้มข้นของอาร์เซนไนท์ที่สภาวะสมดุล ที่พีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 7 โดยแทนค่าสมการและพารามิเตอร์ที่ได้จากทดลอง



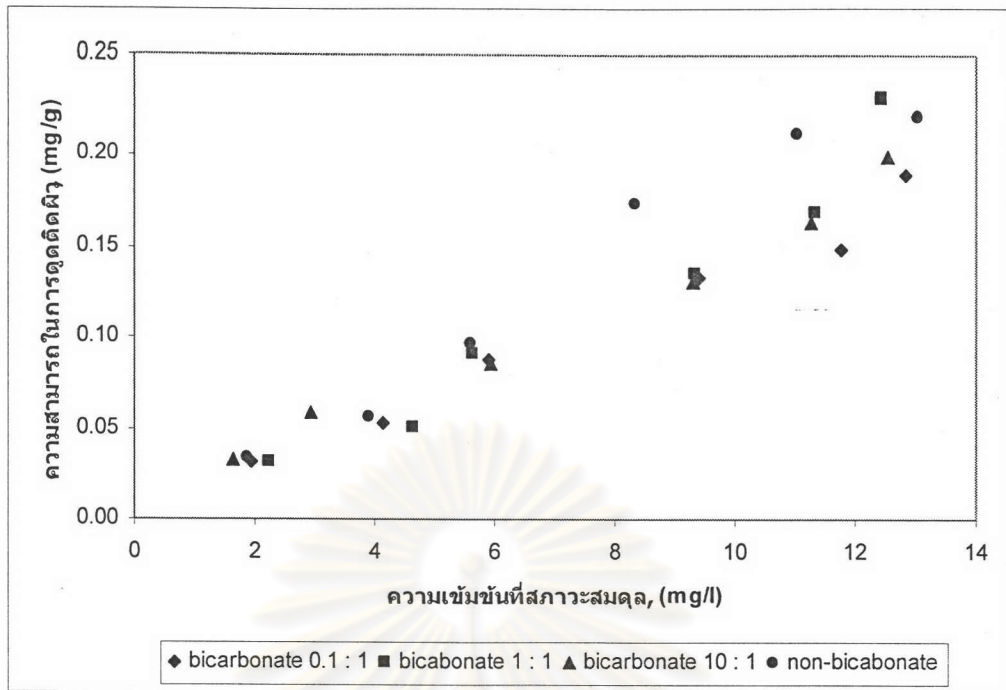


รูปที่ 5.21 เส้นแนวโน้มความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถในการดูดติดผิวของอาร์เซนไนท์ด้วยดินตัวอย่าง และความเข้มข้นของอาร์เซนไนท์ที่สภาวะสมดุล ที่พีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 10 โดยแทนค่าสมการและพารามิเตอร์ที่ได้จากทดลอง

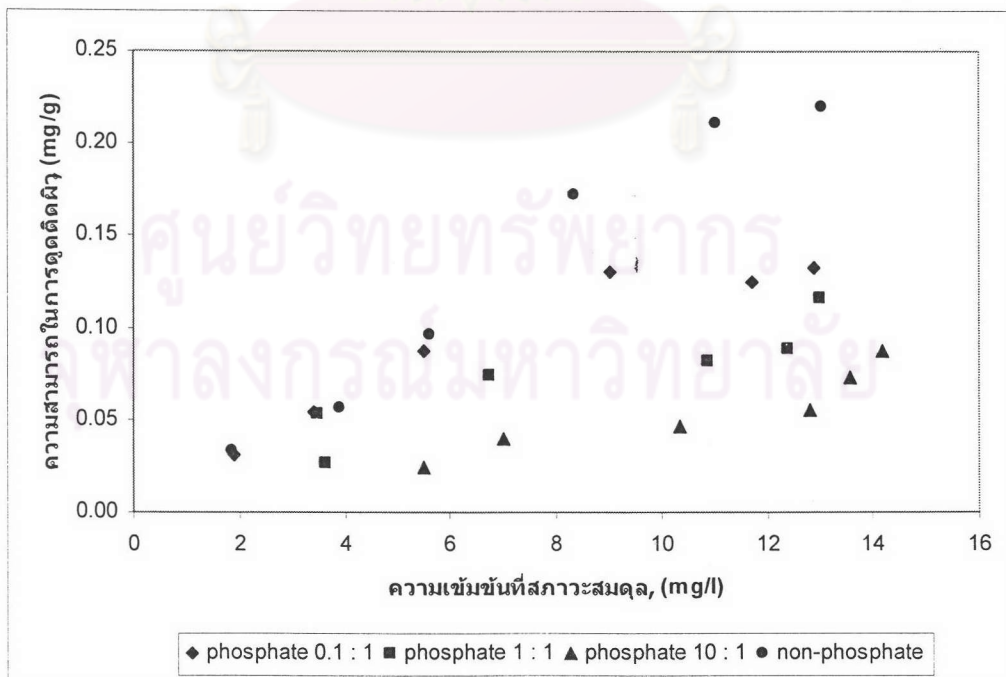
## 5.6 การศึกษาผลของอ็อนรบกวนที่มีต่อการดูดติดผิวของอาร์เซนไนท์ในดินตัวอย่าง

การศึกษาทำโดยใช้ความเข้มข้นของสารละลายอาร์เซนไนท์ 15 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยทำการเติมอ็อนรบกวน คือ ไบคาร์บอเนตและฟอสเฟต ในอัตราส่วน 0.1:1 1:1 และ 10:1 ซึ่งทำการทดลองที่พีเอชเริ่มต้น เท่ากับ 7 และทำการทดสอบความสามารถในการดูดติดผิวของอาร์เซนไนท์ด้วยดินร่วนเหนียวโดยใช้ปริมาณดิน 0.5 1 2 5 และ 10 กรัม (ซึ่งน้ำหนักดินตัวอย่างให้มีความคลาดเคลื่อนไม่เกิน 0.0020 กรัม) เป็นเวลา 96 ชั่วโมง ผลการทดลองแสดงไว้ในภาคผนวก จ. ซึ่งสามารถนำมาสร้างเป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถในการดูดติดผิวของอาร์เซนไนท์กับความเข้มข้นที่สภาวะสมดุล เพื่อพิจารณาถึงผลของอ็อนรบกวนที่มีต่อความสามารถในการดูดติดผิวของอาร์เซนไนท์ เป็นดังรูปที่ 5.22 – 5.23

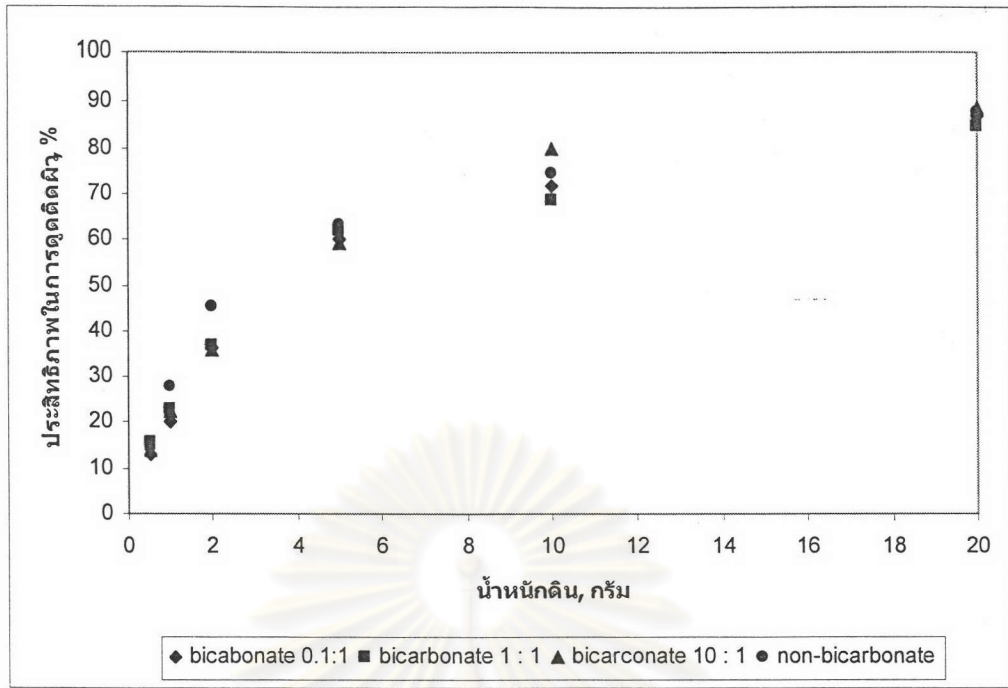
และเมื่อนำผลการทดลองมาสร้างเป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพในการดูดติดผิวของอาร์เซนไนท์เทียบกับน้ำหนักดินตัวอย่าง จะได้ดังรูปที่ 5.24 – 5.25



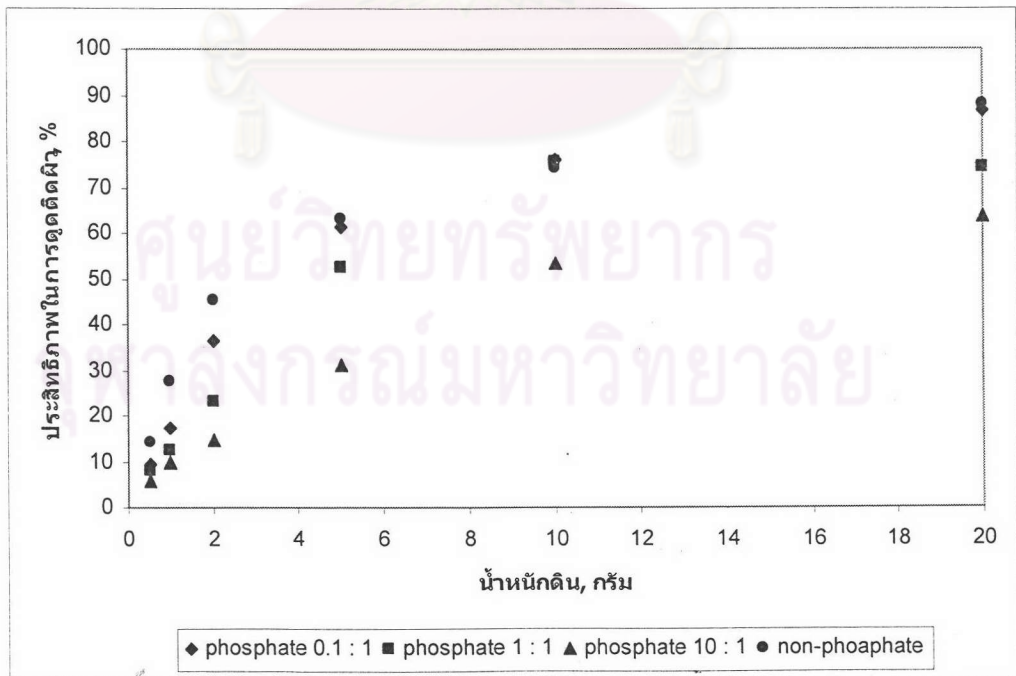
รูปที่ 5.22 ความสามารถในการดูดติดผิวของอาร์เซไนท์เมื่อมีไอออนไบคาร์บอเนตรบกวน



รูปที่ 5.23 ความสามารถในการดูดติดผิวของอาร์เซไนท์เมื่อมีไอออนฟอสเฟตรบกวน



รูปที่ 5.24 ประสิทธิภาพในการดูดซับของอาร์เซไนท์เมื่อมีไอออนไบคาร์บอเนตรบกวน



รูปที่ 5.25 ประสิทธิภาพในการดูดซับของอาร์เซไนท์เมื่อมีไอออนฟอสเฟตรบกวน





จากผลการทดลอง พบว่า ความสามารถในการดูดติดผิวของอาร์เซไนท์ลดลงเล็กน้อยเมื่อมีไอออนไบคาร์บอเนตรบกวน โดยเปรียบเทียบลำดับของความสามารถในการดูดติดผิวของอาร์เซไนท์ที่น้ำหนักดินตัวอย่างสูงสุด คือ เมื่อไม่ใส่ไบคาร์บอเนต 0.033 มิลลิกรัมต่อกรัม (87.84%) ในขณะที่เมื่อใส่ไบคาร์บอเนตในอัตราส่วน 0.1:1 1:1 10:1 มีความสามารถในการดูดติดผิวของอาร์เซไนท์ เท่ากับ 0.032 มิลลิกรัมต่อกรัม (86.98%) 0.031 มิลลิกรัมต่อกรัม (84.90%) และ 0.032 มิลลิกรัมต่อกรัม (88.81%) ตามลำดับ ซึ่งเป็นค่าความสามารถในการดูดติดผิวที่ใกล้เคียงกัน ดังนั้นความสามารถในการดูดติดผิวของอาร์เซไนท์ไม่ขึ้นอยู่กับอัตราส่วนของไบคาร์บอเนตที่ใส่ลงไป

ส่วนความสามารถในการดูดติดผิวของอาร์เซไนท์เมื่อมีไอออนฟอสเฟตรบกวนนั้นลดลงเห็นได้ชัดกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับเมื่อไม่ใส่ฟอสเฟต คือ 0.033 มิลลิกรัมต่อกรัม (87.84%) นั่นคือลำดับของการดูดติดผิวที่อัตราส่วน 0.1 1 และ 10 เท่ากับ 0.031 มิลลิกรัมต่อกรัม (86.57%) 0.026 มิลลิกรัมต่อกรัม (74.32%) และ 0.024 มิลลิกรัมต่อกรัม (63.45%) นั่นคือเมื่อใส่ฟอสเฟตในอัตราส่วนที่มากขึ้นจะทำให้การดูดติดผิวของอาร์เซไนท์ลดลงเรื่อย ๆ

เนื่องจากการดูดติดผิวของอาร์เซไนท์ในดินเป็นการดูดติดผิวที่ inner-sphere ในขณะที่ฟอสเฟตมีการดูดติดผิวที่พื้นผิวภายในเช่นกัน ดังนั้นจึงเกิดการแข่งขันในการดูดติดผิว ทำให้ความสามารถในการดูดติดผิวของอาร์เซไนท์ในดินตัวอย่างลดลง ซึ่งผลการทดลองนี้สอดคล้องกับนักวิจัยท่านอื่นๆ ได้แก่ E. smith et al. (2002) และ Meng X. et al. (2002) เป็นต้น ส่วนการดูดติดผิวของไบคาร์บอเนตเป็นการดูดติดผิวที่ outer-sphere ซึ่งเป็นพื้นที่ผิวคนละส่วนกับการดูดติดผิวของอาร์เซไนท์ ดังนั้นจึงมีผลกระทบต่อ การดูดติดผิวของอาร์เซไนท์น้อยกว่า ผลการทดลองนี้สอดคล้องกับผลการวิจัยของ Myoung-Jin Kim et al., 2001

เมื่อพิจารณาถึงประสิทธิภาพในการดูดติดผิวของอาร์เซไนท์ พบว่า การเติมไบคาร์บอเนตในอัตราส่วนต่างๆ มีผลต่อการดูดติดผิวน้อย แต่เมื่อพิจารณาประสิทธิภาพในการดูดติดผิวของอาร์เซไนท์เมื่อมีไอออนฟอสเฟตรบกวนจะเห็นได้ชัดว่า เมื่อมีอัตราส่วนของฟอสเฟตมากขึ้น ประสิทธิภาพของการดูดติดผิวจะลดลง

## 5.7 การทดลองหาค่าสัมประสิทธิ์การกระจายตัว (Dispersion Coefficient) ของดิน ตัวอย่าง ด้วยการทดลองแบบคอลัมน์

การทดลองใช้ชุดทดลองแบบคอลัมน์ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.54 เซนติเมตร (1 นิ้ว) ภายในบรรจุดินตัวอย่างให้มีความสูงของชั้นดินเท่ากับ 20 เซนติเมตร สำหรับสารเทรเซอร์ (Tracer) ใช้เป็นสารละลายโบรไมด์ที่มีความเข้มข้นเท่ากับ 15 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยกำหนดให้ความเร็วการไหลของสารละลายโบรไมด์ที่ผ่านคอลัมน์เท่ากับ 3 เซนติเมตรต่อชั่วโมง (15 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง) แล้วทำการเก็บตัวอย่างน้ำที่ไหลออกจากคอลัมน์ เมื่อความเข้มข้นของสารละลายโบรไมด์ที่ออกจากคอลัมน์เท่ากับความเข้มข้นของสารละลายที่ป้อนเข้าสู่คอลัมน์ ให้เปลี่ยนเป็นป้อนน้ำกลั่นเข้าสู่คอลัมน์แทนสารละลายโบรไมด์ จนกระทั่งความเข้มข้นของสารละลายโบรไมด์ที่ออกมาเท่ากับศูนย์ โดยชุดอุปกรณ์ทดลองเป็นดังรูปที่ 4.3 – 4.4

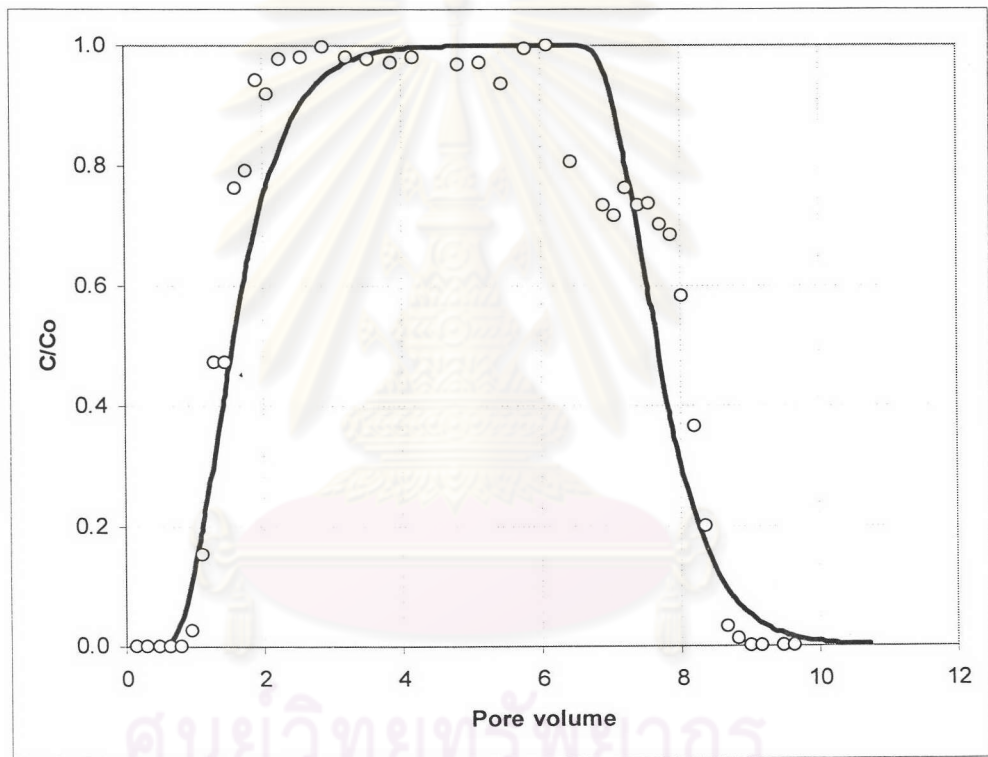
จากการทดลอง (แสดงไว้ภาคผนวก จ.) พบว่า ปริมาตรสารละลายโบรไมด์ทั้งหมดที่ไหลผ่านคอลัมน์ตั้งแต่เริ่มต้นจนถึงความเข้มข้นของสารละลายโบรไมด์เข้าคอลัมน์เท่ากับความเข้มข้นของสารละลายโบรไมด์ที่ออกจากคอลัมน์ของดินเหนียวร่วนปนทรายและดินเหนียวร่วน มีปริมาตรเท่ากับ 0.285 ลิตร คิดเป็น 6.12 เท่าของ Pore volume ซึ่งใช้เวลาไป 19 ชั่วโมง สำหรับดินทรายร่วน มีปริมาตรเท่ากับ 0.270 ลิตร คิดเป็น 8.30 เท่าของ Pore volume ซึ่งใช้เวลาไป 18 ชั่วโมง

ในทางกลับกัน เมื่อป้อนน้ำกลั่นหลังจากความเข้มข้นของสารละลายโบรไมด์เข้าคอลัมน์เท่ากับความเข้มข้นของสารละลายโบรไมด์ที่ออกจากคอลัมน์ ซึ่งนับตั้งแต่เริ่มต้นจนปริมาณโบรไมด์ เท่ากับ ศูนย์ สำหรับดินร่วนเหนียวปนทรายและดินร่วนเหนียว ใช้ปริมาณน้ำกลั่นรวมถึงโบรไมด์ เท่ากับ 0.450 ลิตร หรือ 9.64 เท่าของ Pore volume โดยใช้เวลาไปทั้งหมด 30 ชั่วโมง ส่วนดินทรายร่วน ใช้ปริมาณโบรไมด์และน้ำกลั่นเท่ากับ 0.345 ลิตร หรือ 10.61 เท่าของ Pore volume คิดเป็นเวลาที่ใช้ไปทั้งหมด 23 ชั่วโมง

นำค่าต่างๆ ข้างต้นไปพล็อตกราฟ Breakthrough curve ซึ่งต้องนำไปใช้ในการหาค่าสัมประสิทธิ์ของการกระจายตัว (Dispersion coefficient) ป้อนค่าลงในโปรแกรมคอมพิวเตอร์ คือ STANDMOD โดยใช้โปรแกรมย่อยชื่อ CFITIM เมื่อกำหนดค่าต่างๆ ของโปรแกรมแล้วให้โปรแกรมทำการ Fitted curve เพื่อหาค่า Peclet number เพื่อนำไปคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์ของการกระจายตัว

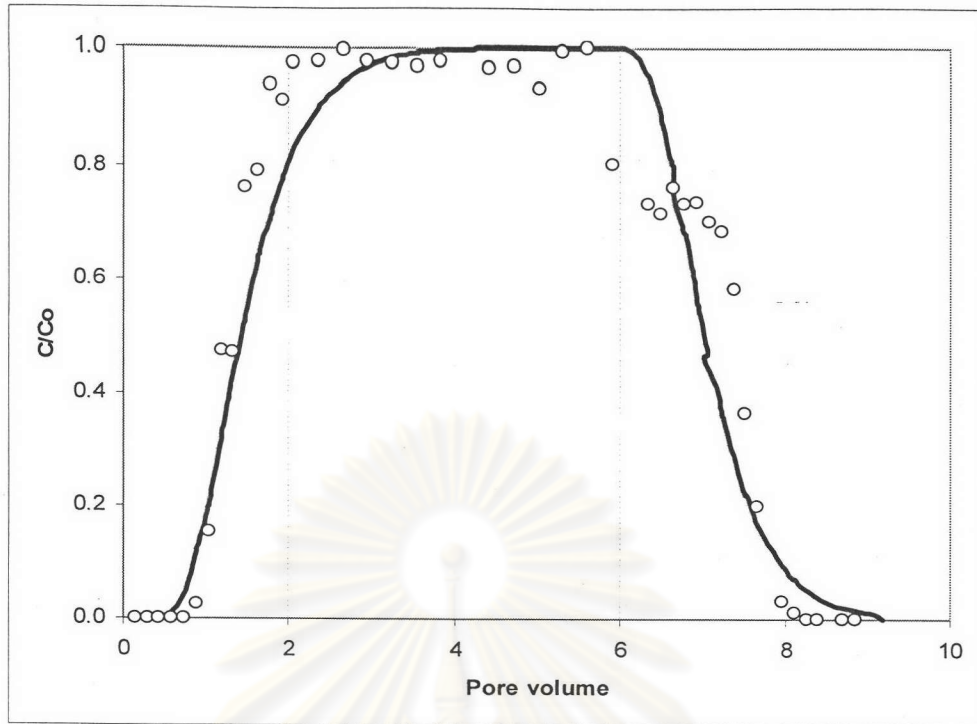
ค่า Breakthrough curve และการประมาณค่าโดยโปรแกรมแสดงไว้ดังรูปที่ 5.26 5.27 และ 5.28 ซึ่งผลการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม CFITIM ที่ Fitted curve ใช้ในการคำนวณหาค่า Peclet number

โปรแกรม CFITIM คำนวณค่า Peclet number ได้เท่ากับ 12.36470 12.12356 และ 4.88164 สำหรับคอลัมน์ของดินร่วนเหนียวปนทราย ดินร่วนเหนียว และคอลัมน์ของดินทรายร่วน ตามลำดับ ซึ่งนำค่าที่ได้ไปคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์ของการกระจายตัว (D) จะได้เท่ากับ  $2.89 \times 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{s}$  (10.41 cm/hr) สำหรับคอลัมน์ดินร่วนปนทรายเหนียวและ  $2.71 \times 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{s}$  (9.77 cm/hr) สำหรับดินร่วนเหนียว ส่วนคอลัมน์ดินทรายร่วน ได้เท่ากับ  $1.05 \times 10^{-2} \text{ cm}^2/\text{s}$  (37.90 cm/hr)

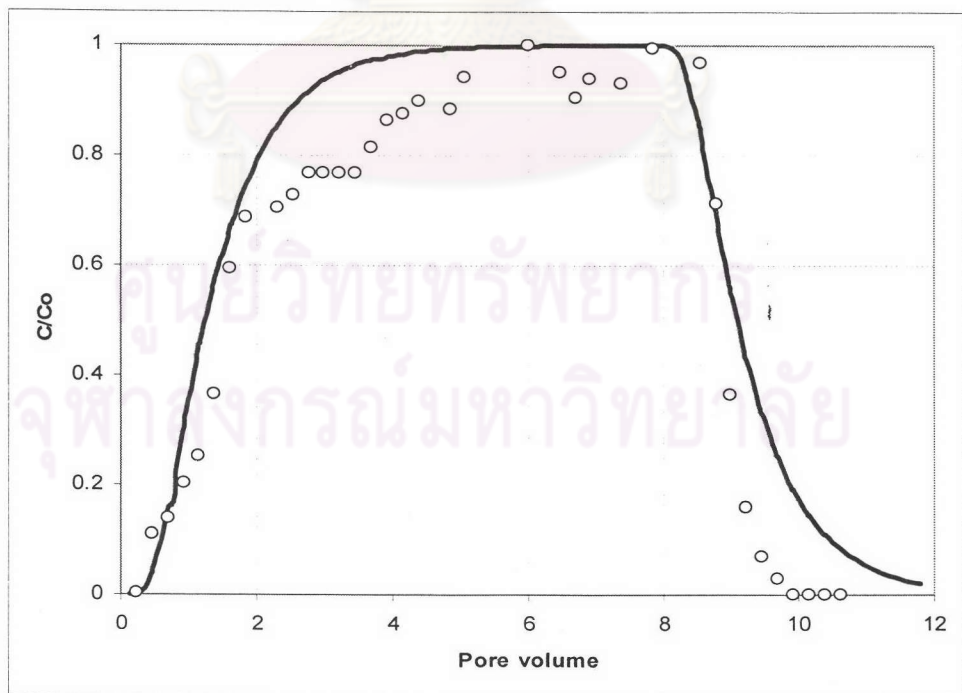


รูปที่ 5.26 Breakthrough curve ของสารละลายโบรไมด์ที่ไหลผ่านคอลัมน์ดินร่วนเหนียวปนทราย ที่ความเข้มข้นของสารละลายโบรไมด์เริ่มต้นเท่ากับ 15 มิลลิกรัมต่อลิตร





รูปที่ 5.27 Breakthrough curve ของสารละลายโบรไมด์ที่ไหลผ่านคอลัมน์ดินร่วนเหนียว ที่ความเข้มข้นของสารละลายโบรไมด์เริ่มต้นเท่ากับ 15 มิลลิกรัมต่อลิตร



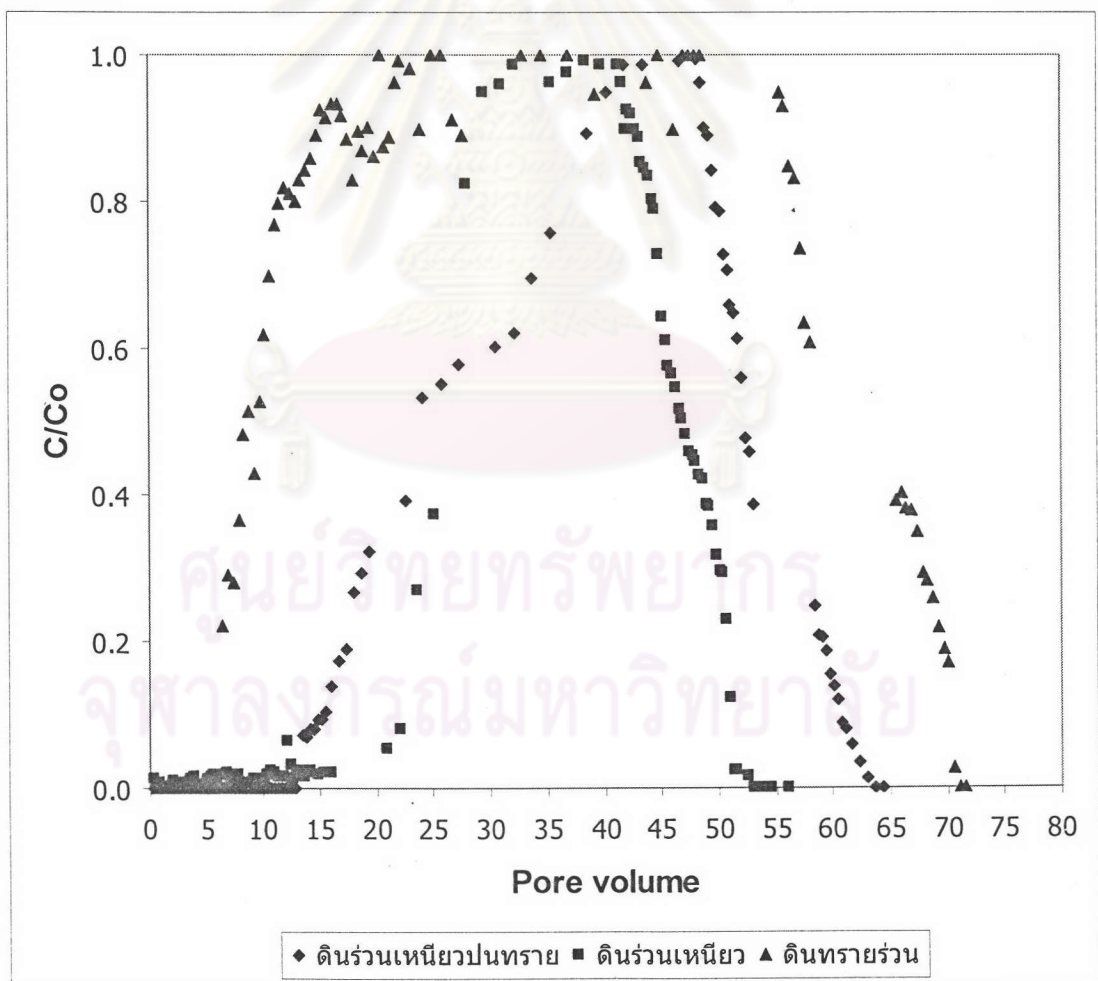
รูปที่ 5.28 Breakthrough curve ของสารละลายโบรไมด์ที่ไหลผ่านคอลัมน์ดินทรายร่วน ที่ความเข้มข้นของสารละลายโบรไมด์เริ่มต้นเท่ากับ 15 มิลลิกรัมต่อลิตร



## 5.8 การศึกษาผลการดูดติดผิวของอาร์เซไนต์ด้วยดินตัวอย่าง โดยทำการทดลองแบบคอลัมน์

ทำการทดลองด้วยชุดคอลัมน์ โดยทำการทดลองกับดินร่วนเหนียวปนทราย ดินร่วนเหนียว และดินทรายร่วนที่พีเอช 7 ส่วนที่พีเอช 4 และพีเอช 10 ทำการทดลองกับดินร่วนเหนียว สำหรับการทดลองอ็อนรบกวนที่มีผลต่อการดูดติดผิวของอาร์เซไนต์ที่ใช้ดินร่วนเหนียว ซึ่งอัตราส่วนที่ใช้คือ ไบคาร์บอเนต 1:1 และ 10:1 ฟอสเฟตใช้อัตราส่วน 1:1 และ 10:1 เช่นกัน โดยผลการทดลองที่ได้แสดงไว้ในภาคผนวก ข.

เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบผลการทดลองที่พีเอช เท่ากับ 7 ของดินร่วนเหนียวปนทราย ดินร่วนเหนียว และดินทรายร่วน จะเป็นดังรูปที่ 5.29



รูปที่ 5.29 ผลการทดลองแบบคอลัมน์ที่พีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 7 ของดินร่วนเหนียวปนทราย ดินร่วนเหนียว และดินทรายร่วน

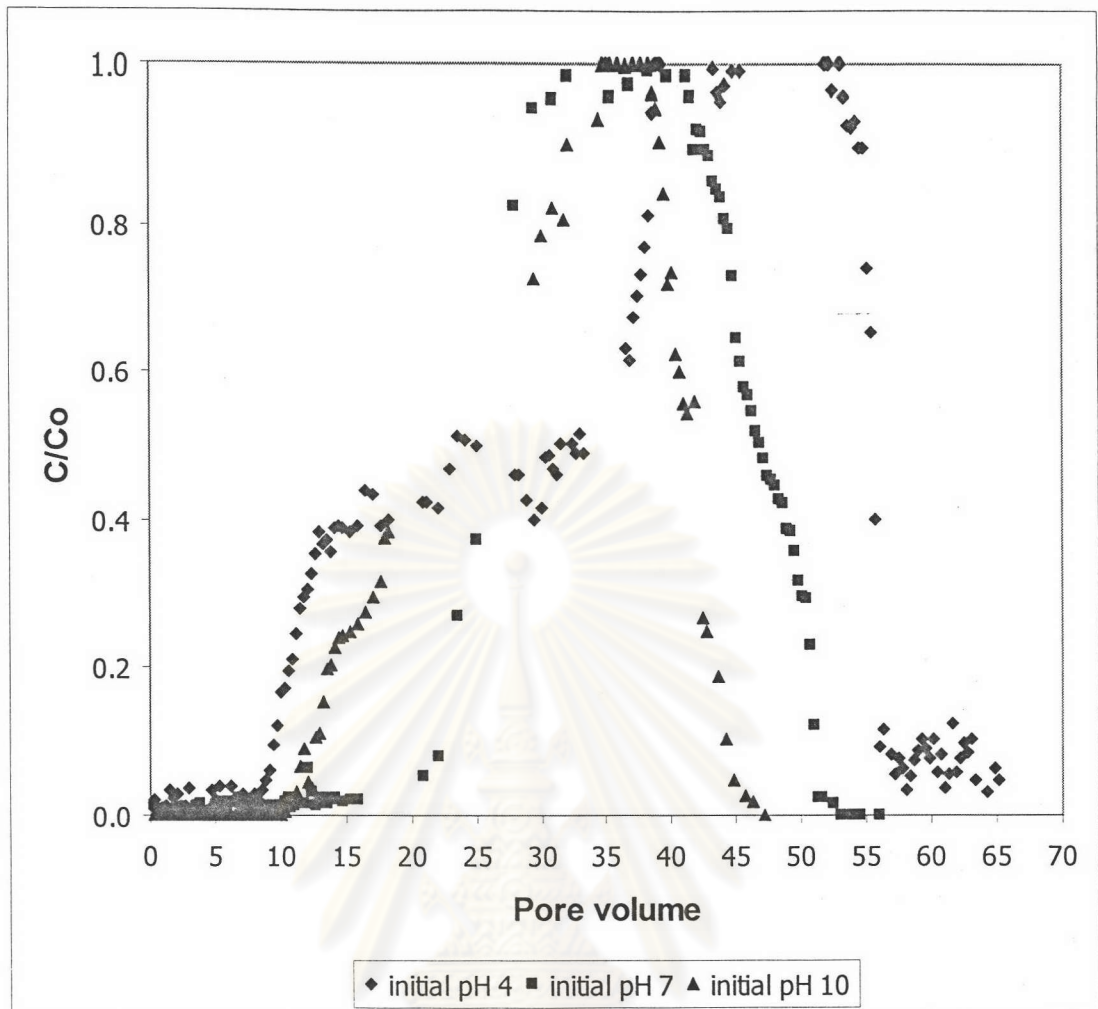
จากรูปที่ 5.29 เมื่อพิจารณา Breakthrough curve ที่ได้จากการทดลองแบบคอลัมน์ พบว่า ดินร่วนเหนียวปนทราย ใช้ปริมาตรสารละลายอาร์เซไนท์ที่ไหลผ่านคอลัมน์ตั้งแต่เริ่มต้น จนถึงความเข้มข้นของสารละลายอาร์เซไนท์ออกจากคอลัมน์เท่ากับ ความเข้มข้นของสารละลาย อาร์เซไนท์ที่เข้าคอลัมน์ ( $C/C_0 = 1$ ) เท่ากับ 2.250 ลิตร คิดเป็น 48.22 เท่าของ Pore volume ซึ่งใช้เวลาไป 150 ชั่วโมง และเมื่อป้อนน้ำกลั่นหลังจาก  $C/C_0 = 1$  ใช้ปริมาณน้ำกลั่นรวมถึงอาร์ เซไนท์ เท่ากับ 3.000 ลิตร หรือ 64.29 เท่าของ Pore volume โดยใช้เวลาไปทั้งหมด 200 ชั่วโมง

ปริมาตรสารละลายอาร์เซไนท์ที่ไหลผ่านคอลัมน์ของดินร่วนเหนียวตั้งแต่เริ่มต้นจนถึง  $C/C_0 = 1$  เท่ากับ 2.100 ลิตร คิดเป็น 41.29 เท่าของ Pore volume ใช้เวลาไป 140 ชั่วโมง และ เมื่อป้อนน้ำกลั่นหลังจาก  $C/C_0 = 1$  ใช้ปริมาณน้ำกลั่นรวมถึงอาร์เซไนท์ เท่ากับ 2.850 ลิตร หรือ 56.04 เท่าของ Pore volume โดยใช้เวลาไปทั้งหมด 190 ชั่วโมง

สำหรับดินทรายร่วน ปริมาตรสารละลายอาร์เซไนท์ที่ไหลผ่านคอลัมน์ตั้งแต่เริ่มต้นจนถึง  $C/C_0 = 1$  เท่ากับ 1.800 ลิตร คิดเป็น 55.37 เท่าของ Pore volume ใช้เวลาไป 120 ชั่วโมง และ เมื่อป้อนน้ำกลั่นหลังจาก  $C/C_0 = 1$  ใช้ปริมาณน้ำกลั่นรวมถึงอาร์เซไนท์ เท่ากับ 2.325 ลิตร หรือ 71.52 เท่าของ Pore volume ใช้เวลาไปทั้งหมด 155 ชั่วโมง

การเปรียบเทียบผลการทดลองที่พีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 7 ของดินทั้ง 3 ชนิด พบว่า ลำดับ ของความสามารถในการดูดติดผิวของอาร์เซไนท์จากจุดเริ่มต้นจนถึง  $C/C_0 = 1$  ก่อนเปลี่ยนเป็น น้ำกลั่น คือ ดินร่วนเหนียว (0.1453 มิลลิกรัมต่อกรัม) > ดินร่วนเหนียวปนทราย (0.1270 มิลลิกรัมต่อกรัม) > ดินทรายร่วน (0.0305 มิลลิกรัมต่อกรัม) และเมื่อพิจารณาที่เริ่มมีค่าจุด  $C/C_0 > 0$  พบว่า มีลำดับเป็น ดินทรายร่วน ดินร่วนเหนียวปนทราย และดินร่วนเหนียว แสดงให้เห็นว่า ความสามารถในการดูดติดผิวของอาร์เซไนท์ด้วยดินทรายร่วน < ดินร่วนเหนียวปนทราย < ดินร่วน เหนียว ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองแบบแบตช์ ในทางกลับกันหลังจากเปลี่ยนเป็นน้ำกลั่นแล้ว ปริมาณ Pore volume ที่ใช้ไปสำหรับดินร่วนเหนียวปนทราย ดินร่วนเหนียว และดินทรายร่วน เท่ากับ 16.0737 14.7464 และ 16.1489 ตามลำดับ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการคายตัว (desorption) เกิดขึ้นในลักษณะที่ใกล้เคียงกันทุกชนิดดิน

เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบผลการทดลองการดูดติดผิวของอาร์เซไนท์ด้วยดินร่วนเหนียว ที่ พีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 4 7 และ 10 จะได้ดังแสดงในรูปที่ 5.30



รูปที่ 5.30 ผลการทดลองแบบคอลัมน์ของดินร่วนเหนียว ที่พีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 4 7 และ 10

ปริมาตรสารละลายอาร์เซนิกที่ไหลผ่านคอลัมน์ของดินร่วนเหนียวที่พีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 4 ตั้งแต่เริ่มต้นจนถึง  $C/C_0 = 1$  เท่ากับ 2.700 ลิตร คิดเป็น 53.09 เท่าของ Pore volume ใช้เวลาไป 180 ชั่วโมง และเมื่อป้อนน้ำกลั่นหลังจาก  $C/C_0 = 1$  ใช้ปริมาณน้ำกลั่นรวมถึงอาร์เซนิก เท่ากับ 3.315 ลิตร หรือ 65.18 เท่าของ Pore volume โดยใช้เวลาไปทั้งหมด 221 ชั่วโมง

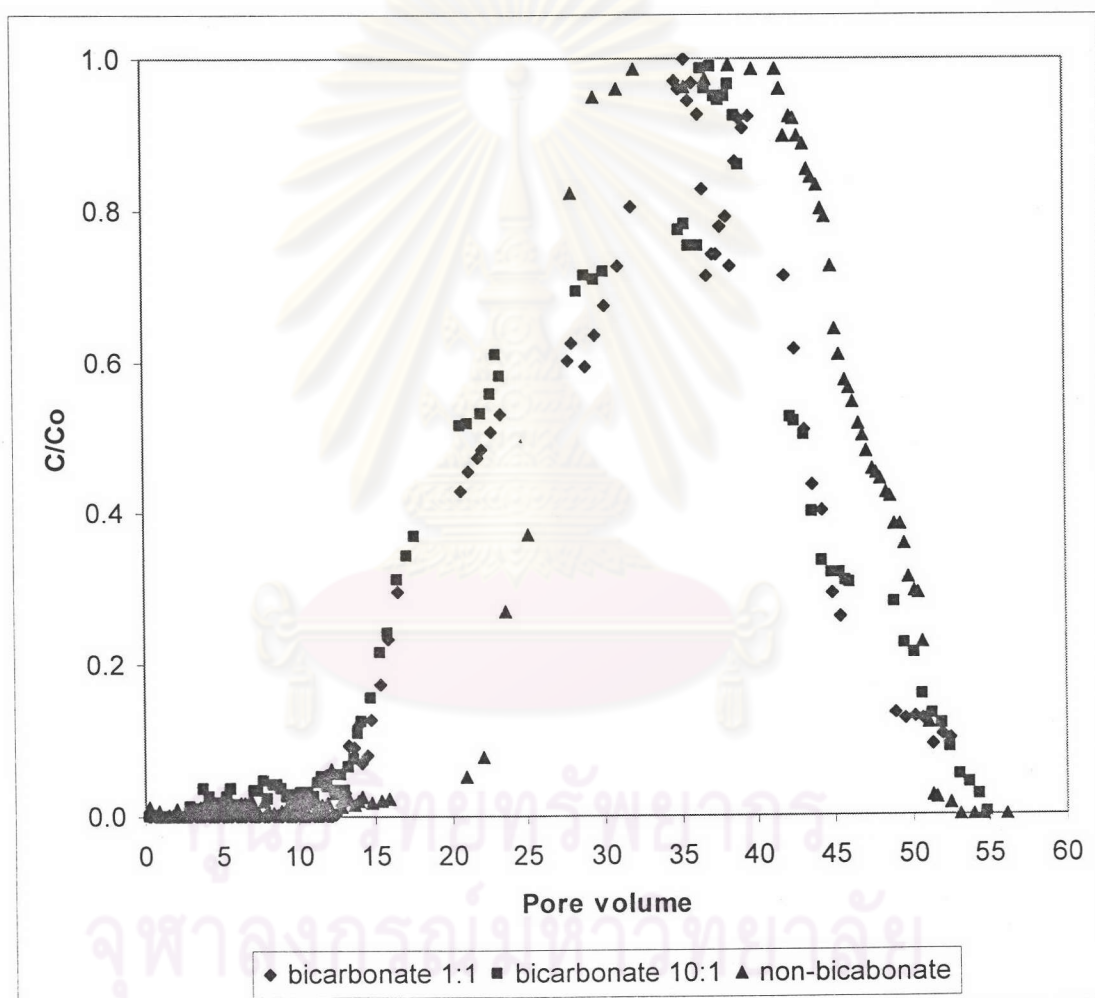
ที่พีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 10 ปริมาตรสารละลายอาร์เซนิกที่ไหลผ่านคอลัมน์ของดินร่วนเหนียวตั้งแต่เริ่มต้นจนถึง  $C/C_0 = 1$  เท่ากับ 1.900 ลิตร คิดเป็น 38.34 เท่าของ Pore volume โดยใช้เวลาไป 130 ชั่วโมง และเมื่อป้อนน้ำกลั่นหลังจาก  $C/C_0 = 1$  ใช้ปริมาณน้ำกลั่นรวมถึงอาร์เซนิก เท่ากับ 2.400 ลิตร หรือ 47.19 เท่าของ Pore volume ใช้เวลาไปทั้งหมด 160 ชั่วโมง

เปรียบเทียบผลการทดลองของดินร่วนเหนียว ที่พีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 4 7 และ 10 พบว่า ลำดับของปริมาณ Pore volume ของอาร์เซนิกจากจุดเริ่มต้นจนถึง  $C/C_0 = 1$  คือ พีเอช 4 (0.2317 มิลลิกรัมต่อกรัม) > พีเอช 7 (0.1453 มิลลิกรัมต่อกรัม) > พีเอช 10 (0.1307 มิลลิกรัม



ต่อกรัม) ซึ่งให้เห็นว่าความสามารถในการดูดติดผิวของอาร์เซไนต์ที่พีเอช 10 < พีเอช 7 < พีเอช 4 ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองแบบแบคทีเรีย ในทางกลับกันหลังจากเปลี่ยนเป็นน้ำกลั่นแล้ว ปริมาณ Pore volume ที่ใช้ไปสำหรับพีเอช 4 พีเอช 7 และพีเอช 10 เท่ากับ 12.0920 14.7464 และ 8.8479 ตามลำดับ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการคายตัว (desorption) เกิดขึ้นได้ดีที่พีเอช 10 พีเอช 4 และพีเอช 7 ตามลำดับ

การพิจารณาเปรียบเทียบผลการทดลองการดูดติดผิวของอาร์เซไนต์ด้วยดินร่วนเหนียว เมื่อมีผลของอิออนไบคาร์บอเนตรบกวนที่อัตราส่วน 1:1 และ 10:1 แสดงไว้ดังรูปที่ 5.31



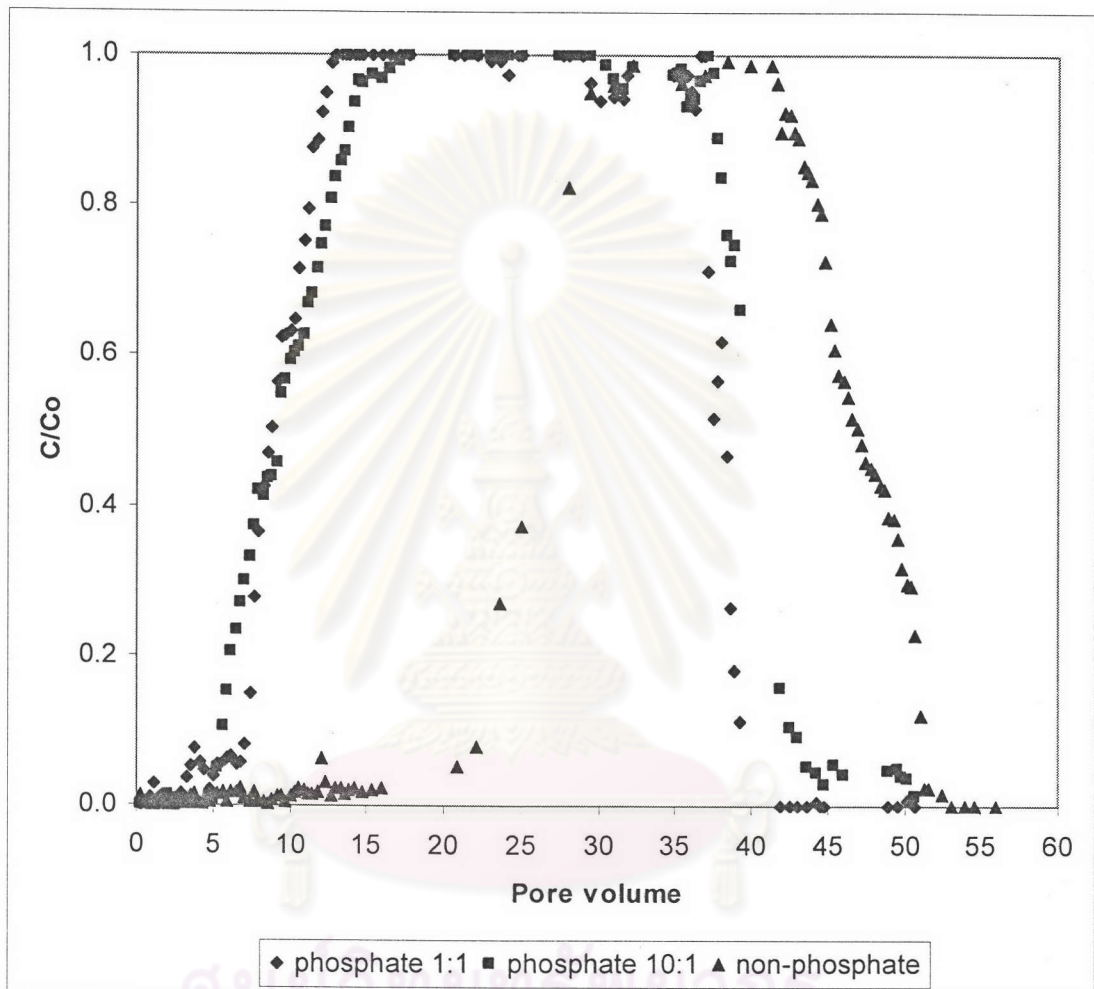
รูปที่ 5.31 ผลการทดลองแบบคอลัมน์ของดินร่วนเหนียว เมื่อมีอิออนไบคาร์บอเนตรบกวน

เมื่อพิจารณาจากรูปที่ 5.31 จะเห็นว่าสัดส่วนของอิออนรบกวนไบคาร์บอเนต 1:1 และ 10:1 มีผลของการดูดติดผิวที่ใกล้เคียงกัน คือ ที่จุด  $C/C_o = 1$  ก่อนเปลี่ยนเป็นน้ำกลั่นมีความสามารถในการดูดติดผิว เท่ากับ 0.1342 มิลลิกรัมต่อกรัม และ 0.1347 มิลลิกรัมต่อกรัม



ตามลำดับ ซึ่งแสดงว่าอัตราส่วนของอิออนรบกวนไบคาร์บอเนตมีผลต่อการดูดติดผิวน้อย แต่เมื่อเทียบกับที่ไม่มีอิออนไบคาร์บอเนตรบกวนแล้ว พบว่า สามารถดูดติดผิวน้อยกว่าเล็กน้อย

พิจารณาเปรียบเทียบผลการทดลองการดูดติดผิวของอาร์เซไนท์ด้วยดินร่วนเหนียว เมื่อมีผลของอิออนฟอสเฟตรบกวนที่อัตราส่วน 1:1 และ 10:1 แสดงไว้ดังรูปที่ 5.32



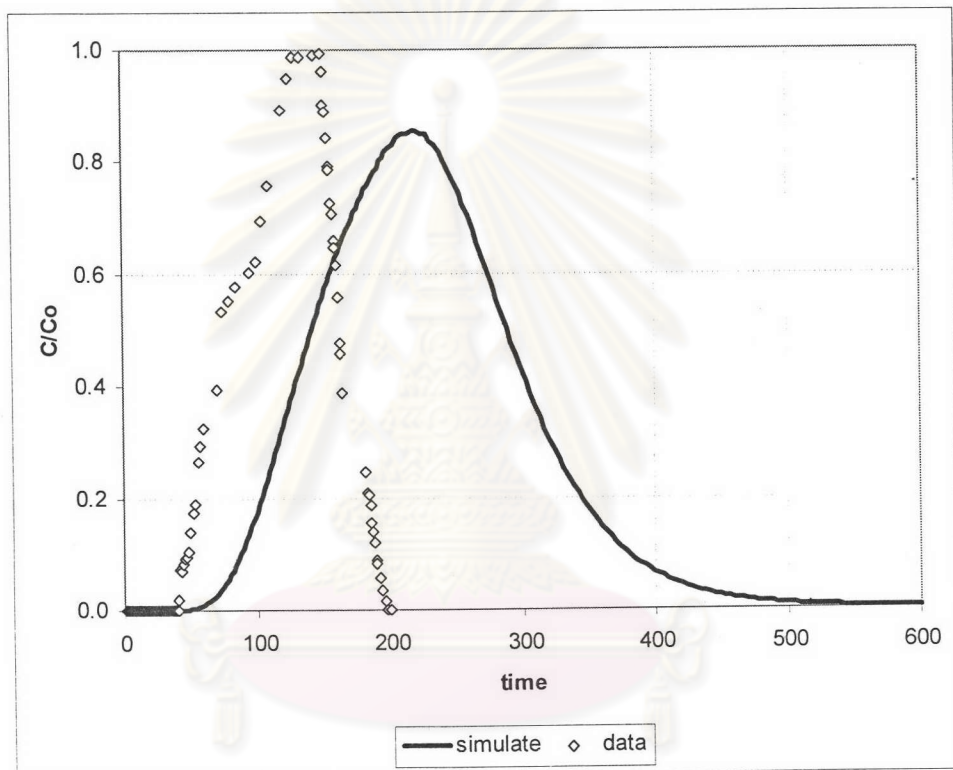
รูปที่ 5.32 ผลการทดลองแบบคอลัมน์ของดินร่วนเหนียว เมื่อมีอิออนฟอสเฟตรบกวน

อิออนฟอสเฟตรบกวนที่อัตราส่วน 1:1 และ 10:1 ดังรูปที่ 5.32 แสดงให้เห็นว่าอัตราส่วนของอิออนรฟอสเฟตบวกรบกวน 1:1 และ 10:1 มีผลของการดูดติดผิวที่ใกล้เคียงกัน คือ ที่จุด  $C/Co = 1$  ก่อนเปลี่ยนเป็นน้ำกลั่นมีค่าความสามารถในการดูดติดผิว เท่ากับ 0.0643 มิลลิกรัมต่อกรัม และ 0.0698 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ แต่อัตราส่วนของอิออนรบกวนฟอสเฟตเมื่อเทียบกับที่ไม่มีอิออนฟอสเฟตรบกวนแล้ว มีผลต่อความสามารถในการดูดติดผิวอย่างมาก



## 5.9 การทดลองแบบคอลัมน์เปรียบเทียบผลกับการวิเคราะห์ด้วยคอมพิวเตอร์โปรแกรม

การเปรียบเทียบ Breakthrough curve ที่ได้จากการคอมพิวเตอร์โปรแกรม HYDRUS2D และ Breakthrough curve ที่ได้จากการทดลองแบบคอลัมน์ ซึ่งแสดงไว้ดังรูปที่ 5.33 ถึง 5.37 ในการกำหนดค่าพารามิเตอร์ให้กับโปรแกรม HYDRUS2D จะใช้ข้อมูลที่สุดคล้องกับผลการทดลองแบบคอลัมน์ ซึ่งค่าพารามิเตอร์ต่างๆ แสดงไว้ในภาคผนวก ซ.



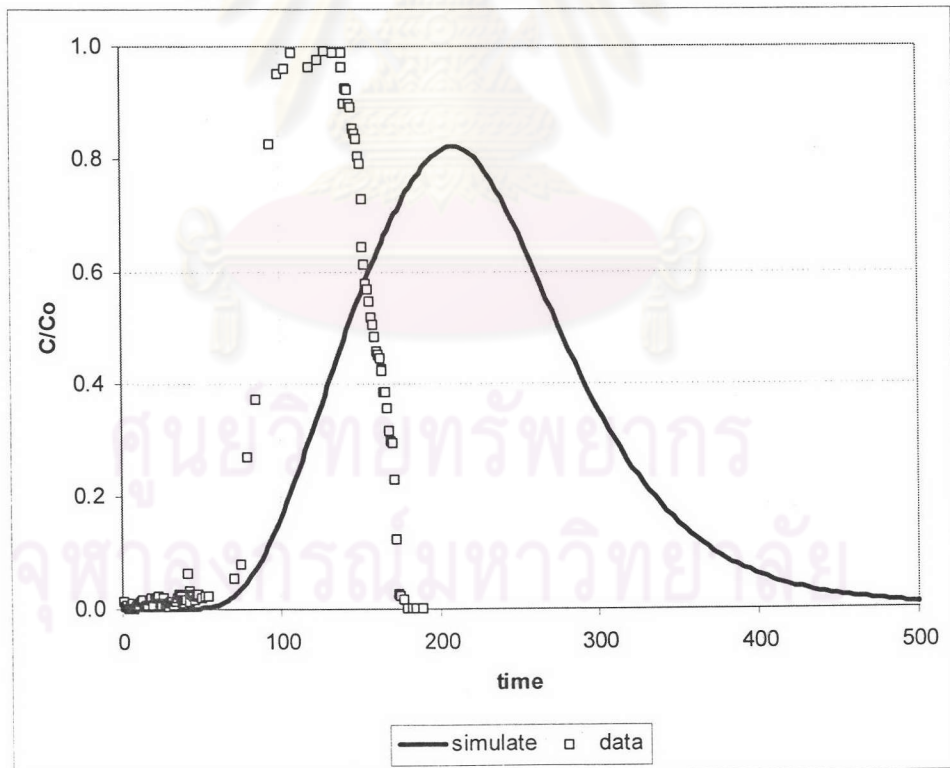
รูปที่ 5.33 Breakthrough curve จากการประมาณโดยโปรแกรม HYDRUS2D เปรียบเทียบกับการทดลองแบบคอลัมน์ของดินร่วนเหนียวปนทราย ที่พีเอช 7

จากรูปที่ 5.33 การทดลองแบบคอลัมน์ของดินร่วนเหนียวปนทราย มีค่าของ Breakthrough curve ที่จุด  $C/Co = 1$  ก่อนเปลี่ยนเป็นน้ำกลั่น ใช้เวลาเท่ากับ 150 ชั่วโมง และเมื่อพิจารณาเปรียบเทียบ Breakthrough curve ที่ได้จากการทดลองแบบคอลัมน์กับการประมาณค่าโดยโปรแกรม HYDRUS2D จะเห็นได้ว่า ถ้าใช้พารามิเตอร์ในการเปลี่ยนจากสารละลายอาร์เซไนท์เป็นน้ำกลั่นที่เวลาเดียวกัน จะทำให้กราฟที่ได้จากโปรแกรม HYDRUS2D มีค่า  $C/Co < 1$  นั้นแสดงว่าการประมาณค่าความสามารถในการดูดติดผิวของอาร์เซไนท์ด้วยโปรแกรม

HYDRUS2D มีค่าสูงกว่าความเป็นจริง ซึ่งสาเหตุเนื่องมาจากการป้อนค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการทดลองแบบแบตช์ เพราะในการทำการทดลองแบบแบตช์มีระยะเวลาในการสัมผัสระหว่างสารละลายอาร์เซไนท์และอนุภาคดินมากกว่า อีกทั้งมีการเขย่าดินและสารละลายอาร์เซไนท์ทำให้เกิดปฏิกิริยาจนเข้าสู่สภาวะสมดุลได้รวดเร็วขึ้น เมื่อเทียบกับการทดลองแบบคอลัมน์ที่ทำให้สารละลายอาร์เซไนท์ไหลผ่านคอลัมน์ดินเท่านั้น ทำให้การเข้าสู่สมดุลของการดูดติดผิวของอาร์เซไนท์เกิดได้ไม่ทัน ค่าที่ได้จากการทดลองแบบคอลัมน์จึงมีค่าต่ำกว่าค่าที่ได้จากการประมาณด้วยโปรแกรม HYDRUS2D

เมื่อพิจารณา Breakthrough curve ในส่วนของการคายตัว (desorption) โดยพิจารณาจากความชัน (slope) ของกราฟ จะเห็นว่าค่าความชันของกราฟที่ได้จากการประมาณด้วยโปรแกรม HYDRUS2D มีค่าใกล้เคียงกับผลการทดลองแบบคอลัมน์ ซึ่งแสดงว่าการป้อนน้ำกลั่นเข้าสู่คอลัมน์ทำให้อาร์เซไนท์ถูกชะออกไปได้อย่างรวดเร็ว

การทดลองแบบคอลัมน์ของดินร่วนเหนียวเปรียบเทียบกับ Breakthrough curve ที่ได้จากการคอมพิวเตอร์โปรแกรม HYDRUS2D เป็นดังรูปที่ 5.34

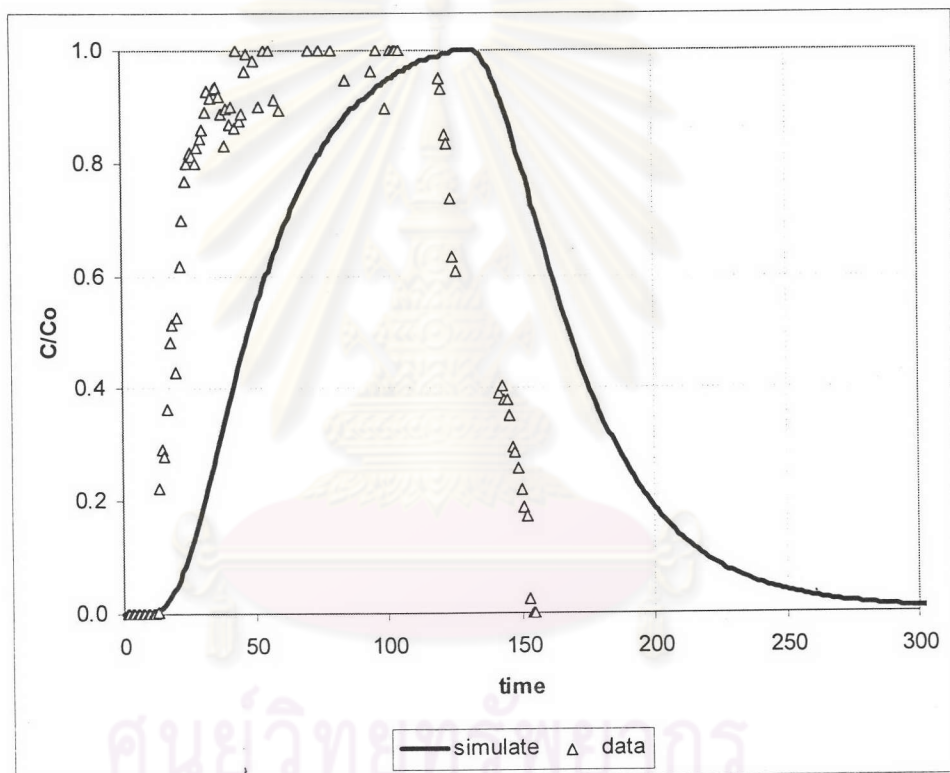


รูปที่ 5.34 Breakthrough curve จากการประมาณโดยโปรแกรม HYDRUS2D เปรียบเทียบกับการทดลองแบบคอลัมน์ของดินร่วนเหนียว ที่พีเอช 7



ค่าของ Breakthrough curve ที่จุด  $C/C_0 = 1$  ก่อนเปลี่ยนเป็นน้ำกลั่นของการทดลองแบบคอลัมน์ของดินร่วนเหนียว ใช้เวลาเท่ากับ 140 ชั่วโมง โดยที่เวลาประมาณ 100 ชั่วโมง ค่าของ  $C/C_0 \approx 1$  สำหรับการทดลองแบบคอลัมน์ แต่ผลการประมาณด้วยโปรแกรม HYDRUS2D มีค่า  $C/C_0 < 0.2$  แสดงให้เห็นว่าค่าความสามารถในการดูดซับที่ได้อาจจากการทดลองคอลัมน์ดินร่วนเหนียวมีค่าน้อยกว่าโปรแกรม HYDRUS2D ส่วนผลของการคายตัวที่พิจารณาจากความสัมพันธ์ของกราฟมีค่าใกล้เคียงกัน

ค่า Breakthrough curve ที่ได้จากโปรแกรม HYDRUS2D เปรียบเทียบกับผลการทดลองแบบคอลัมน์ของดินทรายร่วน แสดงดังรูปที่ 5.35



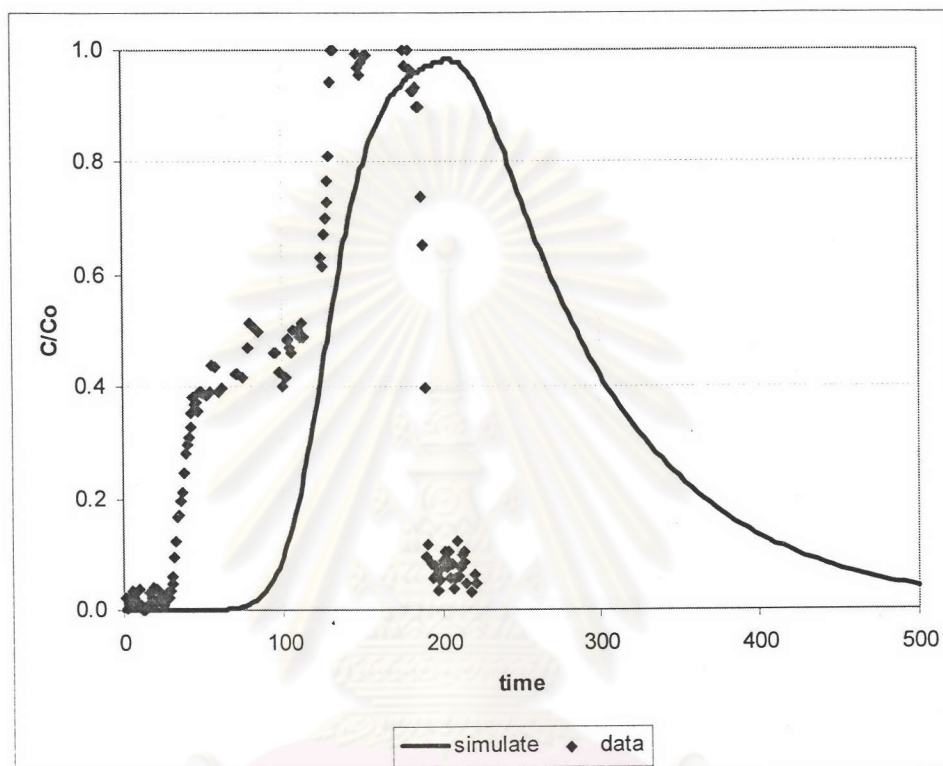
รูปที่ 5.35 Breakthrough curve จากการประมาณโดยโปรแกรม HYDRUS2D เปรียบเทียบกับการทดลองแบบคอลัมน์ของดินทรายร่วน ที่พีเอช 7

เวลาที่จุด  $C/C_0 = 1$  ก่อนเปลี่ยนเป็นน้ำกลั่นของดินทรายร่วน เท่ากับ 120 ชั่วโมง จาก Breakthrough curve ที่ได้จากโปรแกรม HYDRUS2D เปรียบเทียบกับผลการทดลองแบบคอลัมน์ จะเห็นว่าเวลาที่จุด  $C/C_0 = 1$  ของการทดลองแบบคอลัมน์ถึงเร็วกว่าการประมาณด้วยโปรแกรม ซึ่งแสดงว่า ความสามารถในการดูดซับที่ได้อาจจากการประมาณด้วยโปรแกรม HYDRUS2D มีค่า



มากกว่าผลการทดลองแบบคอลัมน์ ในทางกลับกันผลของการคายตัวที่พิจารณาจากความชันของกราฟมีค่าใกล้เคียงกัน

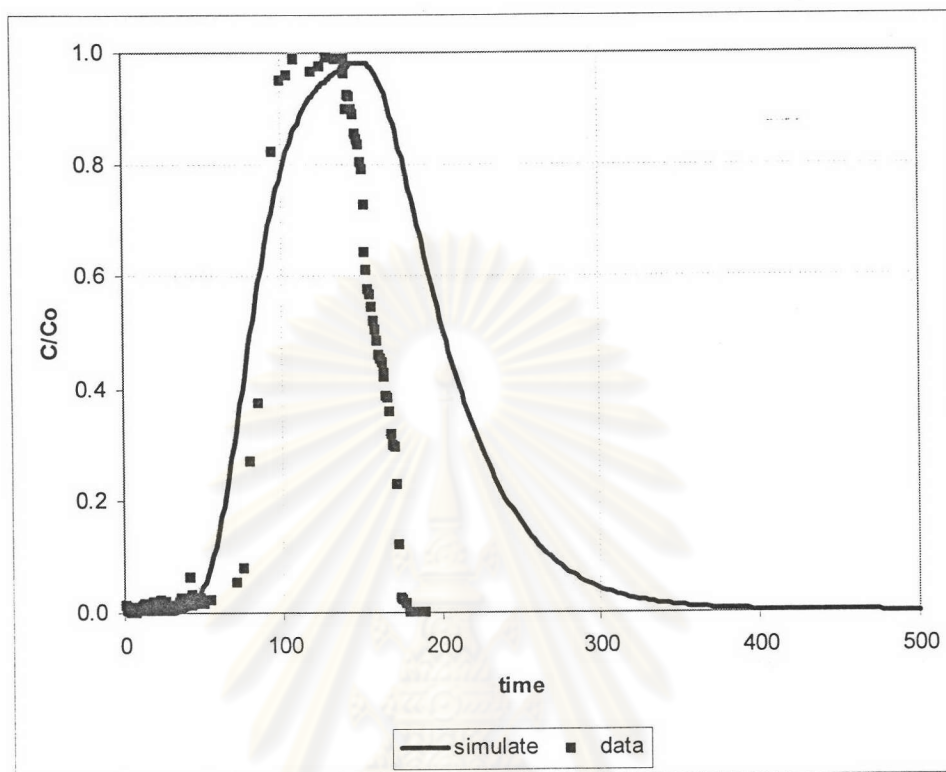
ผลการทดลองแบบคอลัมน์ของดินร่วนเหนียวที่พีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 4 เปรียบเทียบกับการประมาณค่า Breakthrough curve ด้วยโปรแกรม HYDRUS2D เป็นดังรูปที่ 5.36



รูปที่ 5.36 Breakthrough curve จากการประมาณโดยโปรแกรม HYDRUS2D เปรียบเทียบกับการทดลองแบบคอลัมน์ของดินร่วนเหนียว ที่พีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 4

จากผลการทดลองแบบคอลัมน์ เวลาที่จุด  $C/C_0 = 1$  ก่อนเปลี่ยนเป็นน้ำกลั่นของดินทรายร่วน เท่ากับ 180 ชั่วโมง ซึ่งจะเห็นว่าที่จุด  $C/C_0 = 0$  จนถึงจุด  $C/C_0 \approx 0.4$  การดูดติดผิวของอาร์เซนไนท์เกิดขึ้นได้เร็วกว่าการประมาณค่าด้วยโปรแกรม HYDRUS2D แสดงว่าพฤติกรรม การดูดติดผิวของอาร์เซนไนท์ในช่วงแรกนี้เกิดขึ้นได้เร็วกว่าการประมาณด้วยโปรแกรม แต่หลังจากเวลา 100 ชั่วโมง ที่จุด  $C/C_0 > 0.4$  ค่าการดูดติดผิวของอาร์เซนไนท์กลับมีค่าใกล้เคียงกับการประมาณด้วยโปรแกรม HYDRUS2D ส่วนการคายตัวโดยพิจารณาจากความชันของกราฟแล้วพบว่าผลการคายตัวจากการทดลองแบบคอลัมน์จะเกิดขึ้นได้เร็วกว่าการประมาณด้วยโปรแกรม

การประมาณค่า Breakthrough curve ด้วยโปรแกรม HYDRUS2D เปรียบเทียบกับการทดลองแบบคอลัมน์ที่พีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 10 ของดินร่วนเหนียว ได้ดังรูปที่ 5.37



รูปที่ 5.37 Breakthrough curve จากการประมาณโดยโปรแกรม HYDRUS2D เปรียบเทียบกับการทดลองแบบคอลัมน์ของดินร่วนเหนียว ที่พีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 10

กราฟ Breakthrough curve ของการดูดติดผิวของอาร์เซไนท์จากรูปที่ 5.37 ที่ได้จากการประมาณด้วยโปรแกรม HYDRUS2D มีค่าใกล้เคียงกับการทดลองแบบคอลัมน์ แต่ความสามารถในการคายตัวของอาร์เซไนท์ในการทดลองแบบคอลัมน์จะมีค่ามากกว่าการประมาณด้วยโปรแกรม

การวิเคราะห์การเคลื่อนที่ของอาร์เซไนท์โดยนำค่าพารามิเตอร์ของการดูดติดผิว (Adsorption parameter) จากการทดลองแบบแบตช์ ในหัวข้อ 5.6 และค่าสัมประสิทธิ์การกระจายตัว (Dispersion coefficient) จากการทดลองแบบคอลัมน์ ในหัวข้อ 5.8 ป้อนค่าลงในโปรแกรม HYDRUS2D เพื่อให้โปรแกรมคำนวณเพื่อสร้าง Breakthrough curve ซึ่งกราฟของ Breakthrough curve แสดงไว้ในภาคผนวก ข.

จากผลการทดลองแบบคอลัมน์เปรียบเทียบกับผลจากการประมาณค่าโดยโปรแกรม HYDRUS2D ทำให้ทราบว่าในความเป็นจริงการดูดติดผิวของอาร์เซไนท์ด้วยดินตัวอย่างที่เกิดขึ้น

ในคอลัมน์นั้นเป็นกระบวนการดูดติดผิวแบบไม่เข้าสู่สมดุลของการดูดติดผิว (Non-equilibrium adsorption process) ซึ่งเมื่อนำเอาสมการแบบจำลองการเคลื่อนที่ที่ตั้งอยู่บนสมมติฐานที่ว่า การดูดติดผิวจะต้องอยู่ในสภาวะสมดุล (Local Equilibrium Assumption) มาทำการประมาณการเคลื่อนที่ จึงทำให้เกิดความแตกต่างระหว่างค่าที่ได้จากการประมาณโดยแบบจำลองคอมพิวเตอร์ กับข้อมูลที่ได้จากการทดลองในสภาพเหมือนจริง ซึ่ง Local Equilibrium Assumption นี้จะเป็นไปตามแนวคิดที่ว่า เมื่ออนุภาคดินสัมผัสกับสารละลายอาร์เซไนท์ อนุภาคดินจะสามารถดูดติดผิวอาร์เซไนท์ได้ทันทีโดยไม่ต้องอาศัยเวลาสัมผัส จึงทำให้ความสามารถในการดูดติดผิวไม่ได้ขึ้นอยู่กับเวลาสัมผัส

แต่เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบค่าความสามารถในการดูดติดผิวของอาร์เซไนท์ในดินตัวอย่างของการทดลองแบบแบตช์และการทดลองแบบคอลัมน์จะได้ผลดังตารางที่ 5.4 ซึ่งจะเห็นได้ว่าค่าความสามารถในการดูดติดผิวของอาร์เซไนท์ในดินตัวอย่างจากการทดลองแบบแบตช์มีค่ามากกว่าการทดลองแบบคอลัมน์ แสดงว่าการดูดติดผิวของอาร์เซไนท์จากการทดลองแบบคอลัมน์เป็นแบบไม่สมดุล ในขณะที่ผลการทดลองแบบแบตช์เป็นความสามารถในการดูดติดผิวที่สภาวะสมดุล ดังนั้นผลการประมาณการเคลื่อนที่ที่ได้จากโปรแกรม HYDRUS2D จึงคลาดเคลื่อนจากความเป็นจริง

ตารางที่ 5.4 เปรียบเทียบค่าความสามารถในการดูดติดผิวของอาร์เซไนท์จากการทดลองแบบแบตช์และการทดลองแบบคอลัมน์

พีเอช	ชนิดของเนื้อดิน	แบตช์	คอลัมน์
7	ดินร่วนเหนียวปนทราย	0.135	0.127
	ดินร่วนเหนียว	0.191	0.145
	ดินทรายร่วน	0.054	0.031
4	ดินร่วนเหนียว	0.165	0.232
10	ดินร่วนเหนียว	0.138	0.131



กระบวนการการดูดติดผิวแบบไม่สมดุล (Non-equilibrium adsorption process) นั้นอธิบายการดูดติดผิวแบบไม่สมดุลนี้ได้ 2 แนวคิด คือ

แนวคิดแรก การดูดติดผิวที่เกิดขึ้นเป็นกระบวนการ Chemical Non-equilibrium sorption ซึ่งสามารถอธิบายได้โดยแบบจำลองของ Two-site sorption กล่าวคือ ในการดูดติดผิวจะมีพื้นที่ของการดูดติดผิวอยู่ 2 แบบ พื้นที่ในการดูดติดผิวแบบแรกจะเกิดการดูดติดผิวแบบสมดุลตาม Local Equilibrium Assumption คือการดูดติดผิวได้ทันทีเมื่อดินพบกับสารละลายอาร์เซไนท์โดยไม่ขึ้นกับเวลาสัมผัส ส่วนพื้นที่ในการดูดติดผิวแบบที่สองจะไม่เป็นไปตาม Local Equilibrium Assumption คือไม่สามารถดูดติดผิวได้ทันที แต่ต้องอาศัยเวลาสัมผัสชั่วระยะเวลาหนึ่ง จึงจะสามารถเข้าสู่สมดุลของการดูดติดผิวได้ ดังนั้นหากเกิดกระบวนการ Two-site sorption ขึ้น ความสามารถในการดูดติดผิวก็จะขึ้นกับเวลาสัมผัส

แนวคิดที่สอง การดูดติดผิวที่เกิดขึ้นเป็นกระบวนการ Physical Non-equilibrium sorption กล่าวคือ เมื่อพิจารณาถึงขนาดของรูพรุน (Pore size) ของอนุภาคดิน ซึ่งมีขนาดไม่เท่ากันอาจจะกว้างใหญ่พอที่สารละลายอาร์เซไนท์จะเดินทางเข้าไปสู่พื้นที่ดูดติดผิวได้อย่างรวดเร็ว หรืออาจจะมีขนาดเล็ก แคบ และเป็นทางยาวยากต่อการเคลื่อนที่เข้าไปสู่พื้นที่ดูดติดผิว จนบางครั้งการเคลื่อนที่แบบการกระจายตัว (Dispersion) ของอาร์เซไนท์จึงอาจกลายเป็นการเคลื่อนที่แบบการแพร่ (Diffusion) ซึ่งการเคลื่อนที่แบบ Diffusion นี้จะขึ้นอยู่กับขนาดของรูพรุน (Pore size) และเวลาสัมผัส เพราะต้องใช้เวลาสัมผัสช่วงหนึ่งในการที่อาร์เซไนท์จะเดินทางเข้าสู่รูพรุนเพื่อไปสู่พื้นที่ของการดูดติดผิว ดังนั้นหากการเคลื่อนที่ของอาร์เซไนท์เข้าสู่ดินส่วนใหญ่เป็นแบบ Diffusion แล้ว ความสามารถในการดูดติดผิวก็จะขึ้นกับเวลาสัมผัส ซึ่งไม่เป็นไปตาม Local Equilibrium Assumption

จากที่ได้เปรียบเทียบ Breakthrough curve ของการทดลองแบบคอลัมน์กับการประมาณโดยโปรแกรม HYDRUS2D จะพบว่า การประมาณค่าโดยโปรแกรมของดินร่วนเหนียวที่พีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 10 มีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการทดลองแบบคอลัมน์มากที่สุด ส่วนที่สภาวะพีเอชและชนิดดินอื่นนั้นถือว่า การประมาณความสามารถในการเคลื่อนที่การโดยใช้โปรแกรม HYDRUS2D นั้นไม่ประสบผลสำเร็จ เพราะ Breakthrough curve ที่ได้จากการทดลองแบบคอลัมน์ต่างจากที่ได้จากโปรแกรมอย่างมาก จึงสรุปได้ว่าโปรแกรม HYDRUS2D จะสามารถใช้ในการประมาณการเคลื่อนที่ของอาร์เซไนท์ในดินได้ใกล้เคียงกับสภาพจริงในสภาวะที่พีเอชเป็นค่าส่วนที่สภาวะพีเอชและชนิดดินอื่น โปรแกรม HYDRUS2D ไม่สามารถประมาณได้ใกล้เคียงกับสภาพความเป็นจริง ซึ่งถือเป็นค่าที่ไม่ปลอดภัยหากนำไปใช้จริง กล่าวคือ จากการทดลองแบบคอลัมน์ค่า Breakthrough โดยใช้เวลาน้อยกว่าการประมาณของโปรแกรมในทุก ๆ ชนิดดินที่พีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 7 ซึ่งเป็นสภาวะของน้ำใต้ดินธรรมชาติเป็นส่วนใหญ่ หากนำเอาข้อมูลที่ได้จากการ

ประมาณโดยโปรแกรมไปใช้ในการออกแบบระบบ Pump and Treat และ Remediation โดยไม่มีการตรวจสอบด้วยการทดลองแบบคอลัมน์จะทำให้ระบบที่ออกแบบนั้นไม่สามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพในสภาพความเป็นจริง รวมไปถึงหากนำข้อมูลที่ได้ไปใช้ในการประมาณการเคลื่อนที่ของอาร์เซนที่รั่วไหลลงสู่ดินก็จะได้ลักษณะการเคลื่อนที่ซึ่งช้ากว่าความเป็นจริง ทำให้เกิดความเสียหายต่อระบบนิเวศ และสภาพแวดล้อม ซึ่งส่งผลกระทบต่อสภาพความเป็นอยู่ และความปลอดภัยในการดำรงชีวิตของมนุษย์



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย