

ภาคผนวก ค      —

**การหวังโลหะหนักของชั้นกันซึมดินเหนียวบดอัด**

## การหน่วงโลหะหนักของชั้นกันซึมดินเหนียวบดอัด

### RETARDATION OF HEAVY METALS IN COMPACTED CLAY LINERS

ธนิต เฉลิมยานนท์ (Tanit Chalermyanont)<sup>1</sup>

สุรพล อารีย์กุล (Surapon Arrykul)<sup>2</sup>

นันทนิตย์ เจริญไธสง (Nantanit Charoenthaisong)<sup>3</sup>

<sup>1</sup>ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ tanit.c@psu.ac.th

<sup>2</sup>รองศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ surapon.a@psu.ac.th

<sup>3</sup>ผู้ช่วยวิจัย ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ nantanitc@hotmail.com

**บทคัดย่อ :** ดินเหนียวบดอัดมักถูกใช้เป็นชั้นกันซึมสำหรับบ่อฝังกลบมูลฝอยหรือบ่อบำบัดน้ำเสีย การเคลื่อนที่ของสารปนเปื้อนผ่านชั้นดินเหนียวประกอบด้วย การแพร่ การพา และการหน่วง ดินเหนียวซึ่งมีประจุลบสามารถหน่วงสารปนเปื้อนซึ่งเป็นสารละลายที่มีประจุบวกได้ ความสามารถในการหน่วงของดินต่อสารละลายเรียกว่า แฟกเตอร์การหน่วง การวิจัยครั้งนี้ได้ศึกษาหาค่าแฟกเตอร์การหน่วงโดยใช้การทดสอบสองแนวทางได้แก่ การหาค่าแฟกเตอร์การหน่วงโดยคำนวณจากสัมประสิทธิ์การแบ่งที่ได้จากการทำการทดสอบแบบแบทช์ และการหาค่าแฟกเตอร์การหน่วงโดยตรงจากการทดสอบแบบสดมภ์ ดินเหนียว 2 ชนิดถูกใช้ในการทดสอบอันได้แก่ดินลูกรังและดินเหนียวมาริน โดยใช้สารละลายโลหะหนัก 3 ชนิด ได้แก่ ตะกั่ว สังกะสี และ แคดเมียม ผลการทดสอบพบว่า ดินเหนียวมารินมีความสามารถในการหน่วงมากกว่าดินลูกรัง ลำดับการหน่วงจากมากไปน้อยของดินทั้งสองชนิดต่อสารละลายโลหะหนัก สอดคล้องกันและสามารถเรียงจากมากไปน้อยดังนี้ ตะกั่ว สังกะสี และ แคดเมียม นอกจากนี้ยังพบว่า ค่าแฟกเตอร์การหน่วงที่ได้จากการทดสอบแบบสดมภ์มีค่าที่ต่ำกว่าและถูกต้องมากกว่าค่าที่ได้จากการทดสอบแบบแบทช์

**ABSTRACT :** Compacted clay is normally used as a liner in landfills or waste water containment facilities. Transport mechanism of contaminants through the compacted clay consists of advective transport, diffusive transport, and retardation. A clayey soil having negative charges can retard the transport of positively-charged solutions. In this study, retardation factors of two clayey soils were determined using two approaches. For the first approach, the retardation factors were calculated using a partitioning coefficient obtained from a batch adsorption test. The second approach for determining retardation factors was achieved by conducting a column test. Two local clayey soils, namely a lateritic soil and a marine clay, and three heavy metal solutions, namely lead, zinc, and cadmium, were used to determine their retardation factors. Experimental results indicate that the marine clay had greater retardation capability than that of the lateritic soil. Retardation capability of both soils on heavy metal solutions ranked by descending order was lead, zinc, and cadmium. In additions, the retardation factors obtained from the column tests were less and more realistic than those obtained from batch adsorption tests.

**KEYWORDS :** Retardation, Heavy metal, Compacted clay, Liners, Contaminant transport

# 1. บทนำ

ชั้นกันซึม (Liner) ของบ่อฝังกลบมูลฝอยที่ก่อสร้างอย่างถูกต้องหลักสุขภาพพล ต้องสามารถป้องกันการไหลซึมของน้ำชะมูลฝอยที่มีสารปนเปื้อน ไม่ให้ไหลผ่านลงไปสู่ชั้นน้ำใต้ดิน ดังนั้นสร้างชั้นกันซึมที่ดีต้องเลือกใช้ดินให้เหมาะสมด้วย การเคลื่อนที่ของสารปนเปื้อนผ่านชั้นกันซึมประกอบด้วย การพา (Advective transport) การแพร่ (Diffusive transport) และการหน่วง (Retardation) คุณสมบัติของชั้นกันซึมที่ดีคือต้องมีค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่าน (Hydraulic conductivity, K) ต่ำกว่า  $1 \times 10^{-7}$  cm/s ซึ่งจะทำให้การเคลื่อนที่แบบการพาของน้ำชะมูลฝอยต่ำ

คุณสมบัติที่เหมาะสมจะใช้เป็นชั้นกันซึมที่ดีอีกอย่างหนึ่งคือความสามารถในการหน่วง ซึ่งก็คือความสามารถในการดูดซับสารปนเปื้อนในน้ำชะมูลฝอยมาติดผิวของอนุภาคดิน ทำให้การเคลื่อนที่ของสารปนเปื้อนช้าลง โดยดินเหนียวที่นำมาใช้เป็นชั้นกันซึมจะมีประจุลบซึ่งเกิดขึ้นตามธรรมชาติ ประจุลบนี้สามารถดูดติดผิวหรือหน่วงประจุบวกของสารปนเปื้อนที่อยู่ในน้ำชะมูลฝอยได้ ดินเหนียวแต่ละชนิดจะมีความสามารถในการหน่วงได้ไม่เท่ากัน ความสามารถในการหน่วงโลหะหนักสามารถแสดงได้โดยใช้พารามิเตอร์ที่เรียกว่า แฟกเตอร์การหน่วง (Retardation factor, R)

การศึกษาครั้งนี้ ได้เสนอและเปรียบเทียบวิธีการหาค่า R ของดินเหนียวบดอัดสองชนิดอันได้แก่ดินลูกรังและดินเหนียวมาริน และ โลหะหนักสามชนิดอันได้แก่  $Pb^{2+}$ ,  $Cd^{2+}$ , และ  $Zn^{2+}$  โดยใช้วิธีการหาค่า R สองวิธีได้แก่ การคำนวณโดยผลการทดลองแบบแบตช์ (Batch adsorption test) และการคำนวณโดยใช้ผลการทดสอบแบบสดมภ์ (Column test)

## 2. ทฤษฎีการเคลื่อนที่ของสารปนเปื้อน

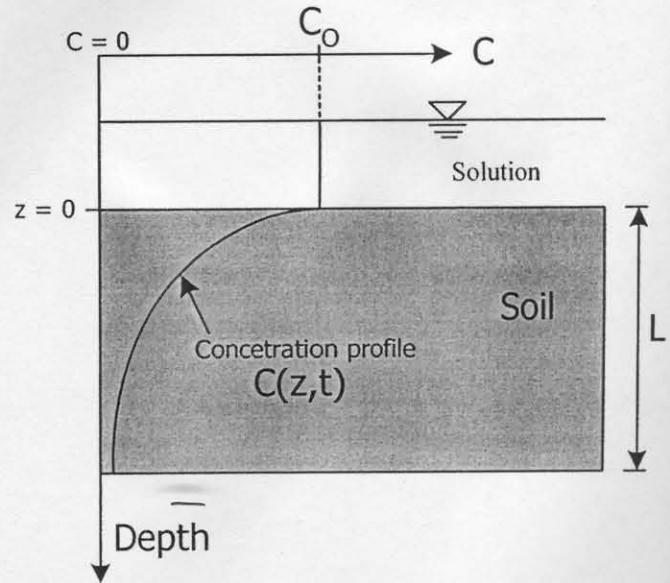
### 2.1 การเคลื่อนที่ของสารปนเปื้อนในดิน

การเคลื่อนที่ของสารปนเปื้อนที่เป็นสารที่มีประจุบวกในดินประกอบด้วย 2 กลไกหลัก ได้แก่ การเคลื่อนที่แบบการพา (Advection) และ การเคลื่อนที่แบบการแพร่ (Diffusion) นอกจากนั้นถ้าในดินมีประจุลบ ดินชนิดนี้ก็สามารถหน่วง (Retardation) การเคลื่อนที่ของสารปนเปื้อนเหล่านี้ได้ด้วย การเคลื่อนที่ของสารละลายในดินในรูปของความเข้มข้นเทียบกับเวลา (t) และความลึก (z) ในดินได้แสดงในรูปที่ 1 สมการที่ใช้

อธิบายการเคลื่อนที่นี้เรียกว่า สมการการพาและการแพร่ (Advection-Diffusion Equation) [1]

$$D \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} - v_s \frac{\partial C}{\partial z} = \frac{\partial C}{\partial t} \tag{1}$$

เมื่อ D = Diffusion coefficient, C = ความเข้มข้นของสารปนเปื้อน,  $v_s$  = ความเร็วในการไหลซึมของน้ำในดิน, L = ความหนาของดิน และ R = แฟกเตอร์การหน่วง



รูปที่ 1 ความเข้มข้นของสารละลายในดิน

### 2.2 การหาค่า R

การหาค่า R สามารถกระทำได้ 2 วิธี ดังมีรายละเอียดดังนี้

1) การหาค่า R โดยใช้ผลการทดลองแบบแบตช์

ผลการทดลองแบบแบตช์จะแสดงในรูปของไอโซเทอม สำหรับไอโซเทอมแบบเส้นตรง ความชันของไอโซเทอมเรียกว่าสัมประสิทธิ์พาร์ทิชัน (Partitioning coefficient,  $K_p$ ) ค่า R สามารถคำนวณได้จาก [1]

$$R = 1 + \frac{\rho_d K_p}{n} \tag{2}$$

เมื่อ  $\rho_d$  = ความหนาแน่นแห้งของดิน, n = ความพรุนของดิน

2) การหาค่า R โดยใช้ผลการทดสอบแบบสดมภ์

Shackelford (1990) [2] เสนอคำตอบของสมการการเคลื่อนที่ในหนึ่งมิติของสารละลายในดิน (สมการที่ 1) ในรูปของ

Analytical solution ในรูปของความเข้มข้นสัมพัทธ์ (Relative concentration,  $C(z,t)/C_0$ ) ดังแสดงในสมการที่ 3

$$\frac{C(z,t)}{C_0} = \frac{1}{2} \left\{ \operatorname{erfc} \left[ \frac{1-T_R}{2\sqrt{\frac{T_R}{P_L}}} \right] + \exp(P_L) \operatorname{erfc} \left[ \frac{1+T_R}{2\sqrt{\frac{T_R}{P_L}}} \right] \right\} \quad (3)$$

เมื่อ  $C(z,t)$  คือ ความเข้มข้นของสารละลายในดินที่ความลึก  $z$  และ เวลา  $t$ ,  $C_0$  คือความเข้มข้นเริ่มต้นที่ต้นน้ำ (Effluent concentration),  $T_R$  คือ เฟคเตอร์ของเวลา (Time Factor) =  $\frac{V_s t}{Rz}$  และ  $P_L$  คือ พิกเลย์นัมเบอร์ (Peclet Number) =  $\frac{V_s z}{D}$

ผลการทดสอบแบบสดมภ์สามารถนำไปคำนวณหาค่า  $R$  ได้ โดยใช้ผลความเข้มข้นสัมพัทธ์ซึ่งเป็นค่าความเข้มข้นของสารละลายในช่องว่างในดิน หรือใช้ค่าความเข้มข้นของสารละลายที่ถูกดูดติดผิวโดยดิน มาพิดกับสมการที่ 3 โดยวิธี Trial and error

### 3. วิธีการศึกษา

#### 3.1 ดินเหนียวและโลหะหนัก

การศึกษานี้ได้ศึกษาโลหะหนัก 3 ชนิด ได้แก่ แคดเมียม, ตะกั่ว, และ สังกะสี ซึ่งเตรียมจากการละลาย  $CdCl_2$ ,  $PbCl_2$ , และ  $ZnCl_2$  ด้วยน้ำกลั่น (Deionized Water) และดินที่ใช้ศึกษามี 2 ชนิด คือ ดินลูกรังคองหงส์และดินเหนียวเกาะขย ซึ่งดินทั้งสองถูกจำแนกเป็น ดินเหนียวที่มีความเป็นพลาสติกต่ำ (CL) ตาม Unified soil classification system ค่าความหนาแน่นแห้งและความพรุนเท่ากับ  $1718 \text{ kg/m}^3$  และ  $0.38$  สำหรับดินลูกรัง และ  $1560 \text{ kg/m}^3$  และ  $0.42$  สำหรับดินเหนียวมารินตามลำดับ

#### 3.2 การทดสอบแบบแบทช์ (Batch Adsorption Test)

การทดสอบแบบแบทช์ ทำโดยใช้ ดินลูกรังและดินเหนียวมารินที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 200 ตัวอย่างละ  $1 \text{ g}$  นำมาผสมกับสารละลายโลหะหนักทั้ง 5 ชนิด ที่มีความเข้มข้นตั้งแต่  $1$  ถึง  $4,000 \text{ mg/L}$  โดยในแต่ละความเข้มข้นมีปริมาตร  $25 \text{ mL}$ . [3] ใช้ความเข้มข้นทั้งหมด ประมาณ  $12-18$  ค่าความเข้มข้น และทำการทดลองซ้ำในแต่ละความเข้มข้น 2 ซ้ำ

ในแต่ละการทดลอง เริ่มต้นจากนำดินมาใส่ในขวด Centrifuge ขนาด  $30 \text{ mL}$  หลังจากนั้นนำสารละลายโลหะหนักที่เตรียมไว้มาผสม ทำหลอดทดลองควบคุม (Blank) ซึ่งเป็นดินผสมน้ำกลั่นปิดฝา แล้วนำไปเขย่าทันที ด้วยเครื่องเขย่า ที่ความเร็วรอบ  $300 \text{ rpm}$  เป็นเวลา  $24$  ชั่วโมง หลังจากนั้นจะนำไปปั่นให้ชั้นของดินและสารละลายโลหะหนักแยกชั้นกัน ด้วยเครื่อง Centrifuge Sorwall Super T21 ที่ความเร็วรอบประมาณ  $4,000-8,000 \text{ rpm}$  เป็นเวลา  $10 \text{ min}$  ที่อุณหภูมิ  $20^\circ\text{C}$  แล้วนำสารละลายโลหะหนักที่แยกจากชั้นดินอยู่ด้านบนของหลอดทดลอง ไปเจือจางแล้ววิเคราะห์หาความเข้มข้นของโลหะหนัก ด้วยเครื่อง Flame Atomic Absorption Spectrophotometer ยี่ห้อ Varian รุ่น 220 A Australia ในการทดลอง Batch นี้ จะใช้ความเข้มข้นของสารละลายประมาณ  $12$  ค่า ต่อหนึ่งชนิดของดินและต่อหนึ่งชนิดของโลหะหนัก ดังนั้นการทดลอง Batch ทั้งหมดรวมเป็นจำนวน  $72$  ครั้ง

#### 3.3 การทดสอบแบบสดมภ์ (Column Test)

การทดสอบแบบสดมภ์ทำโดยนำดินลูกรัง และดินเหนียวมาริน มาเพิ่มความชื้นเพื่อให้มีปริมาณความชื้นที่มากกว่าปริมาณความชื้นที่เหมาะสม  $2\%$  (เท่ากับ  $20\%$  และ  $19\%$  สำหรับดินลูกรังและดินเหนียวมาริน ตามลำดับ) แล้วปล่อยให้ทิ้งไว้  $24$  ชั่วโมง เพื่อให้ความชื้นกระจายทั่วมวลดิน จากนั้นนำดินไปบดอัดใน mold โดยใช้เครื่องบดอัดอัตโนมัติ (ELE Automatic Compactor) ตามมาตรฐาน Standard Proctor Compaction ASTM (D698) จากนั้นนำดินที่บดอัดแล้วไปทดลองหาค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่านด้วยวิธี Constant Head Test Method ASTM (D2434)

เมื่อค่า  $K$  คงที่แล้ว จากนั้นทำการเปลี่ยนสารละลายที่ใช้ทดลองผ่านดินจากน้ำ DI มาเป็นสารละลายโลหะหนักผสม (Mixed Solution) ซึ่งมีความเข้มข้นของโลหะหนักแต่ละชนิดเท่ากับ  $0.001 \text{ M}$  ซึ่งเตรียมโดยละลาย  $CdCl_2$ ,  $PbCl_2$ , และ  $ZnCl_2$  ด้วยน้ำ DI เมื่อปล่อยให้สารละลายโลหะหนักผสมไหลผ่านไปในดินตามระยะเวลาที่ต้องการแล้ว ทำการถอดดินตัวอย่างออกจาก Mold แล้วแบ่งดินตามความหนา ออกเป็น  $6$  ชั้น โดยแต่ละชั้นมีความหนาประมาณ  $1 \text{ cm}$  ดินแต่ละชั้นถูกนำไปหาความเข้มข้นของสารละลายโลหะหนักที่ถูกดินดูดติดผิว

การหาความเข้มข้นของสารละลายโลหะหนักที่ถูกดูดซับโดยดิน  
 ฝึทำโดยการสกัดโลหะหนักออกจากดินด้วยวิธีการย่อยด้วยกรด  
 [4] โดยนำดินที่บดแล้ว 0.5 g ใส่ในบีกเกอร์ เติมกรด HNO<sub>3</sub> 2  
 mL และกรด HCl 4 mL เพื่อสกัดโลหะหนักออกจากดิน แล้วปิด  
 ด้วยกระดาษฟิวส์ เพื่อป้องกันการระเหยแล้วนำไปวางไว้บน  
 Hot plate ที่อุณหภูมิประมาณ 100°C นาน 2 ชั่วโมง จากนั้น  
 นำไปกรองด้วยกระดาษกรอง Whatman เบอร์ 42 เจือจางด้วย  
 กรด HNO<sub>3</sub> 1% แล้วปรับปริมาตรให้ได้ 50 mL แล้วนำไป  
 วิเคราะห์หาความเข้มข้นของโลหะหนัก

ความเข้มข้นของโลหะหนักจากการสกัดโลหะหนักออกจาก  
 ตัวอย่างดินที่แบ่งเป็นชั้นๆ (C<sub>s</sub>) ถูกนำไปคำนวณหาอัตราส่วน  
 ระหว่างความเข้มข้นของโลหะหนักที่ถูกดูดซับในดิน (C<sub>s</sub>) ต่อ  
 ความเข้มข้นสูงสุดของโลหะหนักที่ถูกดูดซับในดิน (C<sub>sm</sub>) ของโลหะ  
 หนักในบริเวณดินชั้นแรก (ลึกประมาณ 0.7 cm) เรียกว่าความ  
 เข้มข้นสัมพัทธ์ (Relative adsorbed concentration, C<sub>s</sub>/C<sub>sm</sub>)

การคำนวณค่า R ทำได้โดยคำนวณค่า C<sub>s</sub>/C<sub>sm</sub> โดยใช้  
 สมการที่ 3 โดยการลองผิดลองถูกค่า R ไปเรื่อยๆ ค่า R ที่ถูกต้อง  
 จะเป็นค่า R ที่ทำให้ ค่า C<sub>s</sub>/C<sub>sm</sub> ที่คำนวณได้สอดคล้องกับค่า  
 C<sub>s</sub>/C<sub>sm</sub> ที่ได้จากการทดสอบแบบสดมภ์

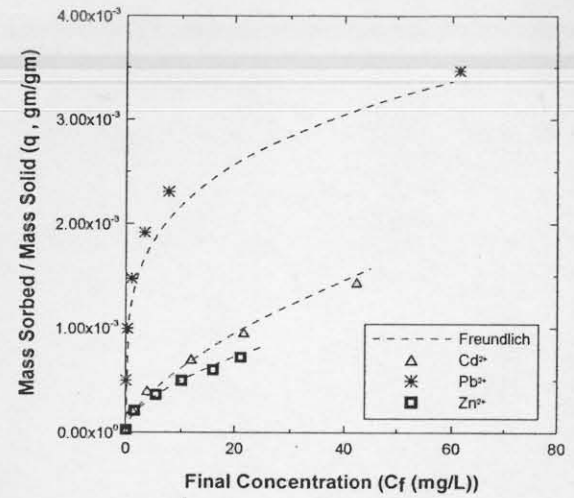
4. ผลการศึกษา

4.1 ผลการทดสอบแบบแบทช์

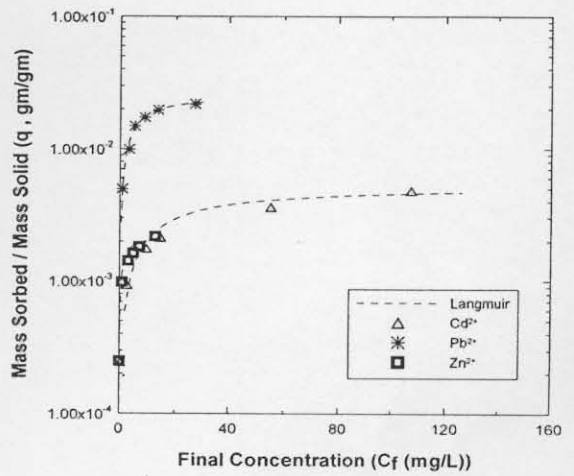
ผลการทดสอบแบบแบทช์ในรูปของไอโซเทอม  
 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของมวลโลหะหนัก  
 ที่ถูกดูดซับต่อมวลของดินลูกรังที่ใช้ในการทดสอบ (q)  
 และความเข้มข้นสุดท้ายของสารละลายโลหะหนักเมื่อ  
 กระบวนการดูดซับสมดุลแล้ว (Equilibrium  
 concentration, C<sub>f</sub>) ผลการทดลองพบว่าสมการไอโซเทอม  
 ของ Freundlich และ Langmuir สอดคล้องกับดินลูกรังและดิน  
 เหนียวมารินตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 2 และ 3

อย่างไรก็ตามสำหรับสารละลายโลหะหนักในส่วนที่ความ  
 เข้มข้นต่ำ ไอโซเทอมในส่วนนี้จะประมาณได้ว่ามีลักษณะเป็น  
 เส้นตรง [5] ผลการฟิตไอโซเทอมส่วนที่มีความเข้มข้นต่ำด้วย  
 สมการเส้นตรง แสดงในรูปของความชัน หรือค่าสัมประสิทธิ์  
 การแบ่งได้แสดงไว้ในตารางที่ 1 สำหรับทุกโลหะหนักสัมประ  
 สัมพันธ์การแบ่งของดินเหนียวมารินมีค่ามากกว่าของดินลูกรัง

เนื่องจากความชันของไอโซเทอมของดินเหนียวมารินมีค่า  
 มากกว่าดินลูกรัง



รูปที่ 2 ไอโซเทอมของดินลูกรัง



รูปที่ 3 ไอโซเทอมของดินเหนียวมาริน

ตารางที่ 1 ค่าสัมประสิทธิ์การแบ่ง (K<sub>p</sub>)

โลหะหนัก	K <sub>p</sub> (L/kg)	
	ดินลูกรัง	ดินเหนียวมาริน
Pb <sup>2+</sup>	56.48	801.96
Zn <sup>2+</sup>	34.19	288.13
Cd <sup>2+</sup>	33.99	65.55

4.2 ผลการทดสอบแบบสดมภ์

ผลการทดสอบแบบสดมภ์รูปของความสัมพันธ์ระหว่าง  
 C<sub>s</sub>/C<sub>sm</sub> และความลึก (Relative adsorbed concentration profile)  
 ได้แสดงไว้ในรูปที่ 4 และ 5 สำหรับดินลูกรังและดินเหนียวมา  
 ริน ตามลำดับ โดยสังเกตได้ว่าค่า C<sub>s</sub>/C<sub>sm</sub> จะมีค่าสูงในบริเวณ  
 ด้านบนของตัวอย่างดินแล้วลดต่ำลงเรื่อยๆตามความลึก ซึ่ง

สามารถอธิบายได้ว่า ดินที่ด้านบนมีการดูดซับโลหะหนักอย่างเต็มความสามารถแล้ว ในขณะที่ตัวอย่างดินในบริเวณที่ลึกลงยังสามารถดูดโลหะหนักติดผิวได้อีก สำหรับดินเหนียวมารินซึ่งใช้เวลาในการทดลอง 388 วัน ค่า  $C_s/C_{sm}$  ที่ด้านล่างสุดของตัวอย่างดินเป็นศูนย์ซึ่งหมายความว่ายังไม่มีสารละลายโลหะหนักเคลื่อนที่มาถึงระดับนี้เลย

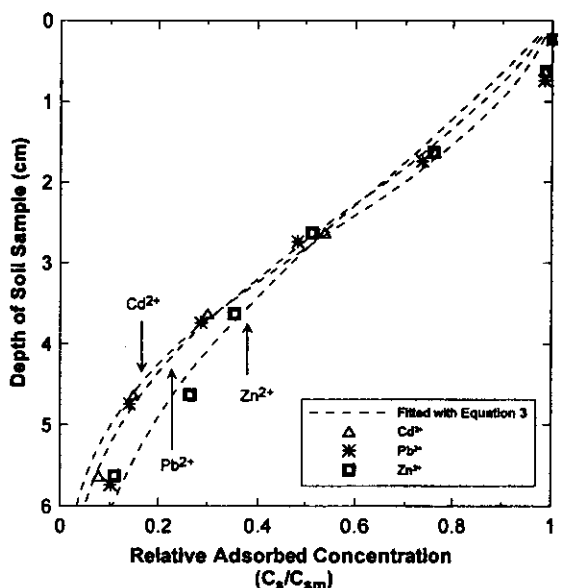
เมื่อพืด Relative adsorbed concentration profile โดยการ trial and error ค่าพารามิเตอร์การเคลื่อนที่ R จน Relative adsorbed concentration profile ที่พืดโดยแทนค่า R ลงในสมการที่ 3 ให้ผลสอดคล้องกับ Relative adsorbed concentration profile จากผลการทดลองแบบสดมภ์ เส้นประในรูปที่ 4 และ 5 แสดง Relative adsorbed concentration profile ที่ได้จากสมการที่ 3 ค่า R ที่สอดคล้องกับผลการทดลองแบบสดมภ์และค่า R จากนักวิจัยอื่นๆ ได้แสดงไว้ในตารางที่ 2 ผลจากการพืด Relative adsorbed concentration profile ยังประกอบด้วยค่า Diffusion coefficient (D) อีกด้วย แต่ค่าดังกล่าวอยู่นอกเหนือขอบเขตของ Paper นี้จึงไม่ขอกล่าวถึง

4.3 ค่าแฟคเตอร์การหน่วง

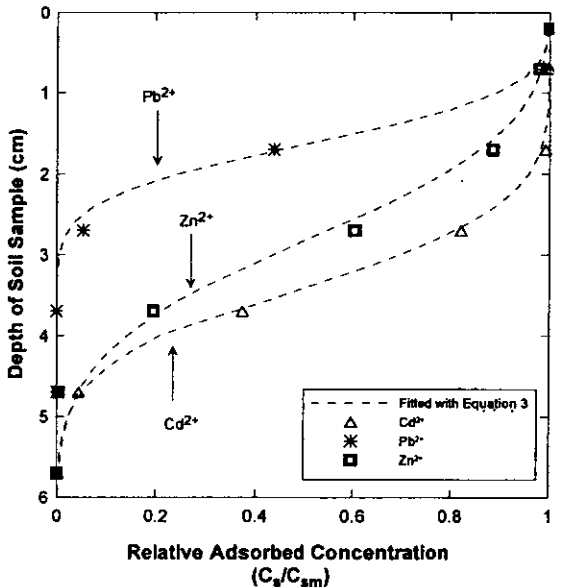
ค่า R ของดินลูกรังและดินเหนียวมาริน ค่าพวนจากผลการทดสอบแบบแบทช์และผลการทดสอบแบบสดมภ์โดยใช้สมการที่ 2 และ 3 ตามลำดับได้แสดงไว้ในตารางที่ 2 เมื่อเปรียบเทียบค่า R ที่คำนวณจากการทดสอบแบบแบทช์และการทดสอบแบบสดมภ์พบว่า ค่า R ที่คำนวณได้จากการทดสอบแบบสดมภ์มีค่าน้อยกว่าอย่างมากและเป็นค่าที่น่าเชื่อถือมากกว่าเพราะว่าค่าพวนจากผลการทดลองการเคลื่อนที่และการดูดซับจริงของสารละลายโลหะหนักในดินบดอัด ในขณะที่ค่า R ที่คำนวณได้จากการทดสอบแบบแบทช์เป็นค่าประมาณที่ให้ค่าค่อนข้างสูงเนื่องจากการทดสอบกับสารแขวนลอยที่มีพื้นที่ผิวมากและไม่มีการไหลของน้ำจึงสามารถดูดซับโลหะหนักได้อย่างสมบูรณ์ [4,6]

ความสามารถในการหน่วงของดินเหนียวต่อโลหะหนักสามารถพิจารณาได้จากค่า R โดยดินเหนียวที่สามารถหน่วงโลหะหนักชนิดนั้นๆ ได้ดีกว่า จะมีค่า R มากกว่า ซึ่งเมื่อพิจารณา ค่า R ของดินทั้ง 2 ชนิดสำหรับโลหะหนักทั้ง 3 ชนิด จากผลการทดสอบแบบสดมภ์ในตารางที่ 2 พบว่า เมื่อพิจารณาในแต่ละชนิดของโลหะหนัก ดินเหนียวมารินสามารถหน่วงโลหะหนักได้ดีกว่าดินลูกรัง ซึ่งสอดคล้องกับความสามารถแลกเปลี่ยนประจุ

บวก (Cation exchange capacity) ของดินเหนียวมารินที่มีมากกว่าของดินลูกรัง [7]



รูปที่ 4 Relative adsorbed concentration profile ของสารละลายโลหะหนักในดินลูกรังที่เวลา 71 วัน สำหรับ  $Pb^{2+}$  และ 31 วัน สำหรับ  $Cd^{2+}$  และ  $Zn^{2+}$



รูปที่ 5 Relative adsorbed concentration profile ของสารละลายโลหะหนักในดินเหนียวมารินที่เวลา 388 วัน

ลำดับการหน่วงของโลหะหนักทั้ง 3 ชนิดเมื่อพิจารณาจากค่า R จากผลการทดสอบแบบสดมภ์ (ตารางที่ 2) พบว่าทั้งดินลูกรังและดินเหนียวมารินมีค่า R สำหรับ  $Pb^{2+} > Zn^{2+} > Cd^{2+}$  แสดงให้เห็นว่า ดินทั้ง 2 ชนิด สามารถหน่วง  $Pb^{2+}$  ได้ดีที่สุด และที่มีความสามารถในการหน่วง  $Cd^{2+}$  ได้ต่ำที่สุด

ตารางที่ 2 ค่า R ของดินลูกรังและดินเหนียวมารีนคำนวณจากผลการ

ทดสอบแบบแบทช์และแบบสดมภ์

โลหะหนัก	ค่าแฟคเตอร์การหน่วง (Retardation factor, R)					
	ดินลูกรัง		ดินเหนียวทะเล		Lufkin clay*	Loess loam**
	แบทช์	สดมภ์	แบทช์	สดมภ์		
Pb <sup>2+</sup>	258.1	50.2	3014.8	79.10	-	347-647
Zn <sup>2+</sup>	156.7	16.7	1083.8	51.36	92.7	-
Cd <sup>2+</sup>	115.7	10.0	247.3	37.00	371.0	33-45

\*[2], \*\*[8]

5. สรุป

ผลการทดสอบแบบแบทช์และผลการทดสอบแบบสดมภ์โดยใช้ดินลูกรังและดินเหนียวมารีนกับโลหะหนักสามชนิดอันได้แก่ Pb<sup>2+</sup>, Cd<sup>2+</sup>, และ Zn<sup>2+</sup> สามารถสรุปผลการทดลองได้ดังนี้

1) ผลการทดสอบแบบแบทช์พบว่าสมการไอโซเทอมของ Freundlich และ Langmuir สอดคล้องไอโซเทอมดินลูกรังและดินเหนียวมารีนตามลำดับ

2) ผลการทดสอบแบบแบทช์ในส่วนที่มีความเข้มข้นต่ำสามารถประมาณได้ว่า ไอโซเทอมมีลักษณะเป็นเส้นตรงโดยความชันของไอโซเทอมแบบเส้นตรงก็คือค่าสัมประสิทธิ์การแบ่ง และ สัมประสิทธิ์การแบ่งของดินเหนียวมารีนมีค่ามากกว่าของดินลูกรังในทุกชนิดของโลหะหนัก

3) ผลการทดสอบแบบสดมภ์แสดงในรูปของ Relative adsorbed concentration profile สำหรับดินทั้งสองชนิดและโลหะหนักทั้งสามชนิด ค่า Relative adsorbed concentration มีค่าสูงบริเวณด้านบนของตัวอย่าง (ต้นน้ำ) และมีค่าลดลงตามความลึกซึ่งสามารถอธิบายได้ว่า ดินที่ด้านบนมีการดูดติดผิวอย่างเต็มความสามารถแล้ว ในขณะที่ตัวอย่างดินในบริเวณที่ลึกลงยังสามารถดูดโลหะหนักติดผิวได้อีก

4) ค่า R ที่คำนวณได้จากการทดสอบแบบสดมภ์มีค่าน้อยกว่าค่า R ที่คำนวณจากผลการทดสอบแบบแบทช์อย่างมาก โดยค่า R จากผลการทดสอบแบบสดมภ์เป็นค่าที่น่าเชื่อถือมากกว่า

5) พิจารณาค่า R ของของโลหะหนักแต่ละชนิด ดินเหนียวมารีนสามารถหน่วงโลหะหนักได้ดีกว่าดินลูกรัง

6) สำหรับดินทั้งสองชนิด ลำดับการหน่วงของโลหะหนักมีดังนี้ Pb<sup>2+</sup> > Zn<sup>2+</sup> > Cd<sup>2+</sup>

6. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยชิ้นนี้ได้รับการสนับสนุนวิจัยจากสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย ตามสัญญาหมายเลข MRG 4680044 ผู้เขียนขอขอบคุณ ผศ.ดร. เพ็ญใจ สมพงษ์ชัยกุล ผศ.ดร. สุเมธ ไซประพัทธ์ และ ผศ.ดร. ผกามาศ เจษฎพัฒนานนท์ สำหรับข้อเสนอแนะในการทำวิจัย ขอขอบคุณ คุณทิตยา แซ่เอ็ง และคุณพลวัฒน์ คงสม สำหรับความช่วยเหลือในการทำารทดลอง

7. เอกสารอ้างอิง

[1] Freeze, R.A. and Cherry, J.A., 1979. Groundwater, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey.

[2] Shackelford, C.D., 1990. Transit-Time Design of Earthen Barriers. Engineering Geology, 29 : 79-94.

[3] Li, Loretta Y. and Li, Franky, 2001. Heavy Metal Sorption and Hydraulic Conductivity Studies Using Three Types of Bentonite Admixec. Journal of Environmental Engineering, 127(5) : 420-429

[4] Tanchuling, M.A., Khan, M.R. and Kusakabe, O. 2003. Zinc Sorption in Clay Using Batch Equilibrium and Column Leaching Tests. RMZ-Materials and Geoenvironment. 50(1): 381-384.

[5] Fetter, C.W. 1993. Contaminant Hydrogeology, Prentice Hall, New Jersey.

[6] Shackelford, C.D., 1994. Critical Concepts for Column Testing, Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 120, 1804-1828.

[7] นันทนิตย์ เจริญไธสง, 2549. ศึกษาของการใช้ทรายผสมเบนโทไนต์และดินเหนียวสงขลาเพื่อใช้เป็นชั้นกันซึมในสถานที่ฝังกลบมูลฝอย วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาการจัดการสิ่งแวดล้อม คณะการจัดการสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

[8] Roehl, K.E. and Czurda, K. 1998. Diffusion and Solid Speciation of Cd and Pb in Clay Liners, Applied Clay Science, 12, 387-402.