# ภาคผนวก ก

## วิธีการคำนวณหาค่า K

### 1. วิธีการคำนวณหาค่า K สำหรับการทดลองแบบสดมภ์ด้วยวิธี Falling Head Test

ตัวอย่างการคำนวณ

ทรายผสมเบนโทไนต์ที่ 5 % เมื่อถูกบดอัดใน Mold มีขนาดความสูงของตัวอย่างดิน (L) = 11.65 cm มีพื้นที่หน้าตัดของตัวอย่างดิน (A) = 82.80 $cm^2$ จากนั้นนำตัวอย่างดินที่บดอัดแล้ว ไปทดสอบแบบสดมภ์ ด้วยวิธี Falling Head Test เป็นเวลา 1 วัน โดยมี head different ณ เวลา $t_1$ = 190.4 cm และ $t_2$ = 188.3 cm (พื้นที่หน้าตัดของ standpipe ; a = 0.28 $cm^2$) จากข้อมูลดังกล่าวสามารถนำไปคำนวณหาค่า K ตามสมการ 3.1 ได้ดังนี้

$$K = \frac{\left(0.28\ cm^2 \times 11.65\ cm\right)}{\left(82.80\ cm^2 \times 1\ d \times \frac{24\ hr}{1\ d} \times \frac{60\ min}{1\ hr} \times \frac{60\ s}{1\ min}\right)} \lambda n\left[\frac{190.4\ cm}{188.3\ cm}\right]$$

$$= 5.057 \times 10^{-9}\ cm/s$$

ดังนั้นค่า K ของทรายผสมเบนโทไนต์ เมื่อทดลองด้วยวิธี Falling Head Test มีค่าเท่ากับ 5.06 x $10^{-9}$ cm/s

### 2. วิธีการคำนวณหาค่า K สำหรับการทดลองแบบสดมภ์ด้วยวิธีระดับน้ำคงที่

ตัวอย่างการคำนวณ

ทรายผสมเบนโทไนต์ที่ 5 % เมื่อถูกบดอัดใน Mold มีขนาดความสูงของตัวอย่างดิน (L) = 5.76 cm มีพื้นที่หน้าตัดของตัวอย่างดิน (A) = 82.80 $cm^2$ จากนั้นนำตัวอย่างดินที่บดอัดแล้ว ไปทดสอบแบบสดมภ์ ด้วยวิธีระดับน้ำคงที่ โดยให้พลังงานขับเคลื่อนน้ำ ($\Delta H$) = 0.8 ksc (0.1

ksc = 100 cm) ทดลองเป็นเวลา 0.80 วัน พบว่า มีปริมาณน้ำที่ไหลผ่านตัวอย่างดิน ($V_w$) เท่ากับ 47 mL (เมื่อ 1 mL = 1 $cm^3$) จากข้อมูลดังกล่าวสามารถนำไปคำนวณหา ค่า K ได้ดังนี้

คำนวณอัตราการไหลจากสูตร $$Q = \frac{V_w}{\Delta t} = \frac{47\ cm^3}{0.80\ d}$$

จะได้ว่า ทรายผสมเบนโทไนต์ที่ 5% เมื่อทำการทดลอง 0.80 d พบว่า มีปริมาณน้ำที่ไหลผ่านตัวอย่างดิน ($V_w$) 47 $cm^3$ ดังนั้นที่เวลาทดลองเท่ากับ 1 d ต้องมี $V_w$ = 58.90 $cm^3$ โดยเมื่อนำไปแทนค่าเพื่อคำนวณหาค่า K ตามสมการ 3.2 จะได้ดังนี้

$$K = \frac{\left(58.90\frac{cm^3}{d}\times\frac{1\ d}{24\ hr}\times\frac{1\ hr}{60\ min}\times\frac{1\ min}{60\ sec}\right)}{\left(\frac{800\ cm}{5.76\ cm}\right)\times 82.80\ cm^2} = 5.93\times10^{-8}\ cm/s$$

ดังนั้นค่า K ของทรายผสมเบนโทไนต์ เมื่อทดลองด้วยวิธีระดับน้ำคงที่ มีค่าเท่ากับ 5.06 x $10^{-9}$ cm/s

# ภาคผนวก ข

## วิธีการคำนวณผลวิเคราะห์ตามการทดลองแบบแบทช์

ตัวอย่างการคำนวณ

การทดลองเบนโทไนต์ ($M_s$) 0.5 g ผสมกับสารละลายโลหะหนัก Cd ที่มีความเข้มข้นตั้งแต่ 100 mg/L – 1,200 mg/L จำนวน 25 mL ทำการเขย่าทันทีที่เวลา 24 hr แล้วนำไปแยกชั้นของดินด้วยเครื่อง Centrifuge เมื่อนำสารละลายด้านบนไปวิเคราะห์หาค่าความเข้มข้นสุดท้าย ($C_f$) พบว่า สารละลายโลหะหนักที่มีความเข้มข้นเริ่มต้น ($C_i$) เท่ากับ 100 mg/L มีค่า $C_f$ เท่ากับ 21.65 mg/L สามารถนำไปคำนวณหาค่า $M_q$ และ q ได้ดังต่อไปนี้

จากสมการ 2.13 สามารถหาค่า $M_q$ ได้ดังนี้

$$M_q = \left(100\frac{mg}{L} - 21.65\frac{mg}{L}\right) \times 25\,mL \times \frac{1\,L}{10^3\,mL}$$

$$= 1.96\,mg = 1.96 \times 10^{-3}\,g$$

แทนค่าในสมการ 2.14 เพื่อหาค่า q

$$q = \frac{1.96 \times 10^{-3}\,g}{0.5\,g} = 3.92 \times 10^{-3}$$

ดังนั้นการทดลองเบนโทไนต์ 0.5 g ผสมกับสารละลายโลหะหนัก Cd ที่มีความเข้มข้นเริ่มต้น ($C_i$) เท่ากับ 100 mg/L มีค่า q เท่ากับ 3.92 x $10^{-3}$ โดยเมื่อคำนวณหาค่า q ของทุกๆ ระดับความเข้มข้นเริ่มต้นตั้งแต่ 100 – 1,200 mg/L แล้วจะสามารถนำไปหาไอโซเทอมได้ดังนี้

1) Freundlich Isotherm

การคำนวณตามสมการแบบ Freundlich Isotherm (สมการที่ 2.16) สามารถหาได้จากการแทนค่าในรูปของสมการเส้นตรงจากสมการ 2.16 โดยใช้ความสัมพันธ์ของ loq q (แกน y) และ loq $C_f$ (แกน x) ได้ผลสมการเส้นตรงดังนี้

$$y = 0.46\,x - 2.65$$

ดังนั้นเมื่อแทนค่าในสมการ 2.16 จะได้ค่า 1/n เท่ากับ 0.46 และ loq $K_F$ เท่ากับ – 2.65 นำไปหาค่า $K_F$ ได้ดังนี้

$$\log K_F = -2.65$$

$$K_F = 10^{-2.65} = 2{,}230.16\,\frac{L}{kg}$$

ค่าสัมประสิทธิ์พาร์ทิชั่น ($K_F$) ที่ได้จาก Freundlich Isotherm มีค่าเท่ากับ 2,230.16 L/kg

2) Linear Isotherm

การคำนวณตามสมการแบบ Linear Isotherm (สมการที่ 2.17) ซึ่งเป็นสมการเส้นตรงที่ได้จากการหาความสัมพันธ์ระหว่าง $C_f$ (แกน x) และ q (แกน y) โดยใช้จุดสุดท้ายที่ค่า q เริ่มคงที่ตัดจุดเริ่มต้นที่ค่าศูนย์ ได้ผลสมการดังนี้

$$y = 8.29 \times 10^{-5}\,x$$

ดังนั้น

$$K_P = 8.29 \times 10^{-5}\,\frac{L}{mg} \times \frac{10^6\,mg}{1\,kg} = 82.85\,\frac{L}{kg}$$

ค่า $K_p$ จาก Linear Isotherm สามารถนำไปคำนวณหา Sorption Capacity ได้ ซึ่งคำนวณได้จากค่า $M_q$ ณ จุดสุดท้ายที่ค่า q เริ่มคงที่ โดยจุดสุดท้ายที่ค่า q เริ่มคงที่ พบว่ามีค่า $M_q$ เท่ากับ 15.59 mg แสดงการคำนวณดังนี้

$$1\text{ eq of } Cd^{2+} = \frac{\text{MW}}{\text{จำนวนประจุ}}(\text{g}) = \frac{112.42\times10^{3}}{2}(\text{mg})$$

ดังนั้น

$Cd^{2+}$ หนักทั้งหมด $\frac{112.42\times10^{3}}{2}$ mg มีจำนวน 1 eq

ถ้า $Cd^{2+}$ หนัก 15.59 mg จะมีจำนวน $\frac{(15.59\text{ mg})\times 1\text{ eq}}{\left(\frac{112.42\times10^{3}}{2}\right)\text{mg}}$

$$= 2.77\times10^{-4}\text{ eq}$$
$$= 0.28\text{ meq}$$

จะได้ว่า

เบนโทไนต์ 0.5 g มี $Cd^{2+}$ เป็นจำนวน 0.28 meq

ถ้าใช้เบนโทไนต์ 100 g จะมี $Cd^{2+}$ เป็นจำนวน $\frac{0.28\text{ meq}\times100\text{ g}}{0.5\text{ g}}$

$$= 55.47\text{ meq}$$

ดังนั้นเบนโทไนต์มีค่า Sorption Capacity ของ $Cd^{2+}$ เท่ากับ 55.47 meq/100g ของดิน

3) Langmuir Isotherm

การคำนวณตามสมการแบบ Langmuir Isotherm (สมการ 2.18) สามารถหาได้จากการแทนค่าในรูปของสมการเส้นตรงจากสมการ 2.18 โดยใช้ความสัมพันธ์ระหว่าง $C_f/q$ (แกน y) มีหน่วยเป็น g/L และ $C_f$ (แกน x) มีหน่วยเป็น mg/L ได้ผลตามสมการเส้นตรงดังนี้

$$y = 0.025\,x + 2.301$$

ดังนั้นเมื่อแทนค่าในสมการ 2.18 จะได้ดังนี้

$$\frac{1}{X_m} = 0.025\frac{g}{mg}$$

ดังนั้น

$$X_m = \frac{1\ mg}{0.025\ g} = 39.37\frac{mg}{g}$$

ค่า $X_m$ จาก Langmuir Isotherm สามารถนำไปคำนวณหา Sorption Capacity ที่ได้จากสมการ Langmuir ซึ่งคำนวณได้ดังนี้

จาก $Cd^{2+}$ หนักทั้งหมด $\frac{112.42\times10^{3}}{2}$ mg มีจำนวน 1 eq

ถ้า $Cd^{2+}$ หนัก 39.370 mg จะมีจำนวน $\frac{(39.37\ mg)\times 1\ eq}{\left(\frac{112.42\times10^{3}}{2}\right)mg}$

$$= 7.00\times10^{-4}\ eq$$

$$= 0.70\ meq$$

จะได้ว่า

เบนโทไนต์ 1 g มี $Cd^{2+}$ เป็นจำนวน 0.70 meq

ถ้าใช้เบนโทไนต์ 100 g จะมี $Cd^{2+}$ เป็นจำนวน $\frac{0.70 \text{ meq} \times 100 \text{ g}}{1 \text{ g}}$

$= 70.04$ meq

ดังนั้นเบนโทไนต์มีค่า Sorption Capacity ของ $Cd^{2+}$ จาก Langmuir Isotherm เท่ากับ 70.04 meq/100g ของดิน

# ภาคผนวก ค

## วิธีการคำนวณเพื่อหาค่าพารามิเตอร์การเคลื่อนที่

### 1. การคำนวณเพื่อหาค่าพารามิเตอร์การเคลื่อนที่จาก Breakthrough Curves

ตัวอย่างการคำนวณ

การทดลองแบบสดมภ์ระหว่างดินลูกรังคอหงส์ที่ถูกบดอัดใน Mold หนา 5.64 cm กับสารละลายโลหะหนัก Mixed Solution (i = 88.65) ทำการเก็บตัวอย่างน้ำที่ไหลผ่านดินเมื่อเวลาผ่านไปจนกระทั่งค่าความเข้มข้นสุดท้ายมีค่าเท่ากับค่าความเข้มข้นเริ่มต้น ต้องการหาค่าพารามิเตอร์การเคลื่อนที่ D, R และ n ของดินลูกรังคอหงส์กับ Ni ผลการทดลองพบว่า มีค่า K เฉลี่ย เท่ากับ 5.38 x $10^{-8}$ cm/s ใช้ระยะเวลาการทดลองทั้งหมดจนกระทั่งถึง Breakthrough สำหรับ Ni ประมาณ 133.75 วัน โดยหลังเสร็จสิ้นการทดลองให้สารละลายไหลผ่านตัวอย่างดิน พบว่า ตัวอย่างดินมีความชื้นเท่ากับ 0.1914 % ($G_s$ = 2.72) สามารถคำนวณตามขั้นตอนได้ดังนี้

1.1 การหาค่า $C_t/C_0$ ที่ได้จากการคำนวณตามสมการ 2.11

- หาค่า n จากสูตร

$$e = w \times G_s = 0.191 \times 2.72 = 0.52$$

ดังนั้นสามารถหาค่า n ได้จาก

$$n = \frac{e}{1+e} = \frac{0.52}{1+0.52} = 0.34$$

- หาค่า $P_L$ จากสูตร

$$V_s = \frac{K \times i}{n} = \frac{\left(5.38 \times 10^{-8}\ cm/s\right) \times 88.65}{0.34}$$

$$= 1.39 \times 10^{-5}\ cm/s$$

แทนค่าในสูตร

$$P_L = \frac{V_s z}{D} \quad \text{(สมมุติให้ค่า D เท่ากับ } 1.00 \times 10^{-5} \text{ cm}^2/\text{s)}$$

$$= \frac{\left(1.39\times10^{-5}\ \text{cm/s}\right)\times 5.64\ \text{cm}}{1.00\times10^{-5}\ \text{cm}^2/\text{s}} = 7.86$$

- หาค่า $T_R$ จากสูตร (แสดงตัวอย่างการคำนวณที่เวลาในการเก็บตัวอย่างน้ำไหลผ่านดิน เป็นเวลา 29.05 d จากตารางภาคผนวก 1)

$$T_R = \frac{V_s \times t}{R \times z} \quad \text{(สมมุติให้ค่า R เท่ากับ 5.00)}$$

$$= \frac{\left(1.39\times10^{-5}\ \text{cm/s}\right)\times 29.05\ \text{d}\times\frac{24\ \text{hr}}{1\ \text{d}}\times\frac{60\ \text{min}}{1\ \text{hr}}\times\frac{60\ \text{s}}{1\ \text{min}}}{5\times 5.64\ \text{cm}}$$

$$= 1.24$$

- หาค่า $C_t/C_0$ จากการคำนวณ (ตารางภาคผนวก 1) โดยแทนค่าในสมการ 2.11

$$\frac{C_{(z,t)}}{C_0} = \frac{1}{2}\left\{\text{erfc}\left[\frac{1-1.24}{2\sqrt{\frac{1.24}{7.86}}}\right] + \exp(7.859)\,\text{erfc}\left[\frac{1+1.24}{2\sqrt{\frac{1.24}{7.86}}}\right]\right\}$$

$$= 2.80\times10^{-1}$$

1.2 การคำนวณหาค่าพารามิเตอร์การเคลื่อนที่ D และ R

ค่าความต่างระหว่าง $C_t/C_0$ จากการคำนวณตามสมการ 2.11 และ $C_t/C_0$ ที่ได้จากการทดลองจะถูกแสดงด้วยค่าผลต่างยกกำลังสอง ดังนั้นที่เวลา 29.05 d จะได้

$$\text{ค่าผลต่างยกกำลังสอง} = \left((7.52\times10^{-1})-(2.23\times10^{-1})\right)^2$$
$$= 2.80\times10^{-1}$$

หาค่า MSE ซึ่งสามารถคำนวณได้จากค่าผลต่างยกกำลังสองจากสูตร

$$\text{MSE} = \frac{\text{ผลรวมของค่าผลต่างยกกำลังสอง}}{\text{จำนวนข้อมูล}}$$

จากผลตัวอย่างการคำนวณในตารางภาคผนวก 1 จะได้ว่า เมื่อมีค่า D เท่ากับ 1.00 x $10^{-5}$ $cm^2/s$ และค่า R เท่ากับ 5.00 จะได้ค่า MSE เท่ากับ 5.43 x $10^{-2}$ จากนั้นเมื่อทำการ Trial Error สำหรับค่า D และค่า R โดยใช้ Solver ที่มีอยู่ใน Microsoft Excel เพื่อให้ได้ค่า MSE ที่น้อยที่สุด

ผลการ Trial and Error ค่า D และค่า R ด้วย Solver เมื่อกำหนดให้ค่า MSE น้อยที่สุดพบว่า มีค่า D มีค่าเท่ากับ 2.16 x $10^{-6}$ $cm^2/s$ และค่า R มีค่าเท่ากับ 7.6 โดยจะมีค่า MSE เท่ากับ 3.96 x $10^{-4}$

ตารางภาคผนวก 1 แสดงตัวอย่างการคำนวณเพื่อหาค่าพารามิเตอร์การเคลื่อนที่จาก Breakthrough Curves (กำหนดให้ ค่า D เท่ากับ $1.00 \times 10^{-5}$ $cm^2/s$ และค่า R เท่ากับ 5.00)

| **Time (d)** | **$T_R$** | **$C_{(z,t)}/C_0$ จากการคำนวณ ตามสมการ 2.11** | **$C_t/C_0$ ที่ได้จากการ ทดลอง** | **ค่าผลต่างยกกำลังสอง (Squ. Diff.)** |
|---|---|---|---|---|
| 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| 1.87 | 0.08 | $1.01 \times 10^{-10}$ | $4.11 \times 10^{-4}$ | $1.69 \times 10^{-7}$ |
| 4.92 | 0.21 | $5.36 \times 10^{-4}$ | $4.71 \times 10^{-4}$ | $4.17 \times 10^{-9}$ |
| 9.05 | 0.39 | $3.80 \times 10^{-2}$ | $7.36 \times 10^{-4}$ | $1.39 \times 10^{-3}$ |
| 13.08 | 0.56 | $1.67 \times 10^{-1}$ | $1.62 \times 10^{-3}$ | $2.73 \times 10^{-2}$ |
| 18.90 | 0.81 | $4.22 \times 10^{-1}$ | $3.78 \times 10^{-2}$ | $1.47 \times 10^{-1}$ |
| 29.05 | 1.24 | $7.52 \times 10^{-1}$ | $2.23 \times 10^{-1}$ | $2.80 \times 10^{-1}$ |
| 38.77 | 1.66 | $8.99 \times 10^{-1}$ | $6.25 \times 10^{-1}$ | $7.52 \times 10^{-2}$ |
| 44.90 | 1.92 | $9.44 \times 10^{-1}$ | $8.38 \times 10^{-1}$ | $1.13 \times 10^{-2}$ |
| 49.98 | 2.13 | $9.65 \times 10^{-1}$ | $9.55 \times 10^{-1}$ | $1.03 \times 10^{-4}$ |
| 55.75 | 2.38 | $9.80 \times 10^{-1}$ | $1.00 \times 10^{0}$ | $3.96 \times 10^{-4}$ |
| **MSE =** | | | | $5.43 \times 10^{-2}$ |

**2. การคำนวณเพื่อหาค่าพารามิเตอร์การเคลื่อนที่จาก Concentration Profile**

ตัวอย่างการคำนวณ

การทดลองแบบสดมภ์ระหว่างทรายผสมเบนโนไนต์ที่ 5% ที่ถูกบดอัดใน Mold หนา 5.68 cm กับสารละลายโลหะหนัก Pb (i = 140.85) ต้องการหาค่าพารามิเตอร์การเคลื่อนที่ D, R และ n ของดินลูกรังคอหงส์กับ Pb โดยใช้ระยะเวลาการทดลองทั้งหมดประมาณ 130.86 วัน พบว่ามีค่า K เฉลี่ย เท่ากับ $8.14 \times 10^{-8}$ cm/s จากนั้นทำการถอดตัวอย่างดินออกจาก Mold แล้วแบ่งดินออกเป็น 6 ชั้น ตามความลึกของชั้นดินเพื่อทำการสกัดหาความเข้มข้นออกจากดิน (ตัวอย่างดินมีความชื้นเท่ากับ 0.13 % และมีค่า $G_s = 2.64$) สามารถคำนวณตามขั้นตอนได้ดังนี้

2.1 การหาค่า $C_s/C_{sm}$ ที่ได้จากการคำนวณตามสมการ 2.11

- หาค่า n จากสูตร

$$e = w \times G_s = 0.13 \times 2.64 = 0.34$$

ดังนั้นสามารถหาค่า n ได้จาก

$$n = \frac{e}{1+e} = \frac{0.34}{1+0.34} = 0.25$$

- หาค่า $P_L$ จากสูตร

$$V_s = \frac{K \times i}{n} = \frac{\left(8.14 \times 10^{-8}\ cm/s\right) \times 140.85}{0.25}$$
$$= 4.53 \times 10^{-5}\ cm/s$$

แทนค่าในสูตร เพื่อหาค่า $P_L$ (แสดงตัวอย่างการคำนวณเมื่อมีความลึกของตัวอย่างดิน เท่ากับ 1.70 cm ดังในตารางภาคผนวก 2)

$$P_L = \frac{V_s \times z}{D}$$ (สมมุติให้ค่า D เท่ากับ 1.00 x $10^{-5}$ $cm^2/s$)

$$= \frac{\left(4.53 \times 10^{-5}\ cm/s\right) \times 1.70\ cm}{1.00 \times 10^{-5}\ cm^2/s} = 7.70$$

- หาค่า $T_R$ จากสูตร

$$T_R = \frac{V_s \times t}{R \times z}$$ (สมมุติให้ค่า R เท่ากับ 100.00)

$$= \frac{\left(4.53\times10^{-5}\ \text{cm/s}\right)\times 130.86\ \text{d}\times\frac{24\ \text{hr}}{1\ \text{d}}\times\frac{60\ \text{min}}{1\ \text{hr}}\times\frac{60\ \text{s}}{1\ \text{min}}}{100.00\times 1.70\ \text{cm}}$$

$$= 3.01$$

- หาค่า $C_s/C_{sm}$ จากการคำนวณ (ตารางภาคผนวก 2) โดยแทนค่าในสมการ 2.11

$$\frac{C_s(z,t)}{C_{sm}} = \frac{1}{2}\left\{\text{erfc}\left[\frac{1-3.01}{2\sqrt{\frac{3.01}{7.70}}}\right]+\exp(7.697)\,\text{erfc}\left[\frac{1+3.01}{2\sqrt{\frac{3.01}{7.70}}}\right]\right\}$$

$$= 0.99$$

1.2 การคำนวณหาค่าพารามิเตอร์การเคลื่อนที่จาก Concentration Profile

ค่าความต่างระหว่าง $C_s/C_{sm}$ จากการคำนวณตามสมการ 2.11 และ $C_s/C_{sm}$ ที่ได้จากการทดลองจะถูกแสดงด้วยค่าผลต่างยกกำลังสอง ดังนั้นที่ความลึกของตัวอย่างดิน 1.70 cm จะได้

$$\text{ค่าผลต่างยกกำลังสอง} = (0.99-0.81)^2$$
$$= 0.04$$

หาค่า MSE ซึ่งสามารถคำนวณได้จากค่าผลต่างยกกำลังสอง จากสูตร

$$\text{MSE} = \frac{\text{ผลรวมของค่าผลต่างยกกำลังสอง}}{\text{จำนวนข้อมูล}}$$

จากผลตัวอย่างการคำนวณในตารางภาคผนวก 2 จะได้ว่า เมื่อมีค่า D เท่ากับ 1.00 x $10^{-5}$ $cm^2/s$ และค่า R เท่ากับ 100.00 จะได้ค่า MSE เท่ากับ 0.134 จากนั้นเมื่อทำการ Trial

Error สำหรับค่า D และค่า R โดยใช้ Solver ที่มีอยู่ใน Microsoft Excel เพื่อให้ได้ค่า MSE ที่น้อยที่สุด

ผลการ Trial and Error ค่า D และค่า R ด้วย Solver เมื่อกำหนดให้ค่า MSE น้อยที่สุดพบว่า มีค่า D มีค่าเท่ากับ 1.97 x $10^{-5}$ $cm^2/s$ และค่า R มีค่าเท่ากับ 183.11 โดยจะมีค่า MSE เท่ากับ 1.35 x $10^{-3}$

ตารางภาคผนวก 2 แสดงตัวอย่างการคำนวณเพื่อหาค่าพารามิเตอร์การเคลื่อนที่ D และ R ของ
ดินลูกรังคอหงส์กับความเข้มข้นของ Pb ที่สกัดออกมาจากตัวอย่างดิน ($C_L$)
(กำหนดให้ ค่า D เท่ากับ 1.00 x $10^{-5}$ $cm^2/s$ และค่า R เท่ากับ 100.00)

| **ความลึกของตัวอย่างดิน (cm)** | **$P_L$** | **$T_R$** | **$C_s/C_{sm}$ จากการคำนวณตามสมการ 2.11** | **$C_s/C_{sm}$ ที่ได้จากการทดลอง** | **ค่าผลต่างยกกำลังสอง (Squ. Diff.)** |
|---|---|---|---|---|---|
| 0.70 | 3.17 | 7.31 | 1.00 | 1.00 | 0.00 |
| 1.70 | 7.70 | 3.01 | 0.99 | 0.81 | 0.04 |
| 2.70 | 12.22 | 1.90 | 0.97 | 0.68 | 0.08 |
| 3.70 | 16.75 | 1.38 | 0.87 | 0.32 | 0.30 |
| 4.70 | 21.28 | 1.09 | 0.67 | 0.17 | 0.25 |
| 5.70 | 25.81 | 0.90 | 0.40 | 0.02 | 0.14 |
| **MSE =** | | | | | 0.13 |

# ภาคผนวก ง

## วิธีการคำนวณเพื่อหาค่าความหนาของชั้นกันซึมดินเหนียวบดอัด

ตัวอย่างที่ 1 ต้องการหาความหนาของทรายผสมเบนโทไนต์ 5 % โดยมี Cd เป็นสารที่สนใจ ซึ่งในการออกแบบต้องการให้ค่าความเข้มข้นของ Cd ที่ด้านล่างของชั้นกันซึม ($C_0$) ต้องไม่มากกว่า 0.276 mg/L (ตาราง 5.1) โดยกำหนด Design life = 100 ปี และมีค่าความชันทางชลศาสตร์ (i) เท่ากับ 1.5 ได้แสดงค่าพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องในการคำนวณไว้ในตาราง 5.2 มีขั้นตอนในการคำนวณดังนี้

| คุณสมบัติของดิน | ค่า |
|---|---|
| ค่า K (cm/s) | $1.55 \times 10^{-8}$ |
| ความชื้น (%) | 13.26 |
| ความพรุน (n) | 0.26 |
| ค่า D ($cm^2/s$) | $5.01 \times 10^{-6}$ |
| ค่า R | 39.99 |

1) หาค่าความเร็วของการไหลซึม (Vs) จากสูตร

$$V_s = \frac{K \times i}{n}$$

$$= \frac{\left(1.55 \times 10^{-8}\ cm/s\right)(1.5)}{0.26} = 8.98 \times 10^{-8}\ cm/s$$

สมมุติค่าความหนาของชั้นกันซึม (L) ให้มีค่าเท่ากับ 60 cm และกำหนดให้เวลาที่ใช้ในการเคลื่อนที่ของมวลสาร (t) เท่ากับ 100 ปี เพื่อหาค่า $P_L$ และ $T_R$ ดังนี้

2) การหาค่า $P_L$ และ $T_R$ จากสูตร

$$P_L = \frac{V_s \times z}{D}$$

$$= \frac{\left(8.98 \times 10^{-8}\ cm/s\right)(60\ cm)}{5.01 \times 10^{-6}\ cm^2/s} = 1.08$$

$$T_R = \frac{V_s \times t}{R \times z}$$

$$= \frac{\left(8.98\times10^{-8}\,\text{cm/s}\right)\left(100\,\text{y}\right)\left(\frac{365\,\text{d}}{1\,\text{y}}\times\frac{24\,\text{hr}}{1\,\text{d}}\times\frac{60\,\text{min}}{1\,\text{h}}\times\frac{60\,\text{s}}{1\,\text{min}}\right)}{\left(39.99\right)\left(60\,\text{cm}\right)}$$

$$= 0.12$$

3) ค่า $P_L$ และ $T_R$ จะถูกนำไปแทนค่าในสมการ 2.11 เพื่อหาค่า $C_t/C_0$ (Normalized Effluent Concentration) ได้ดังนี้

$$\frac{C(z,t)}{C_0} = \frac{1}{2}\left\{\text{erfc}\left[\frac{1-0.12}{2\sqrt{\frac{0.12}{1.08}}}\right] + \exp(1.076)\,\text{erfc}\left[\frac{1+0.12}{2\sqrt{\frac{0.12}{1.08}}}\right]\right\}$$

$$= 5.48\times10^{-2}$$

4) คำนวณหา $(C_t/C_0) \times C_{0\ \text{of leachates}}$ โดย $C_{0\ \text{of leachates}}$ เป็นค่าความเข้มข้นเฉลี่ยของ Cd ในน้ำชะมูลฝอยจากสถานที่ฝังกลบทั้ง 4 แห่ง (ตาราง 5.1) มีรายละเอียดการคำนวณดังนี้

$$C_{0\ \text{average of leachates}} = \frac{\left(0.28\frac{\text{mg}}{\text{L}} + 0.01\frac{\text{mg}}{\text{L}} + 0.02\frac{\text{mg}}{\text{L}} + 0.0005\frac{\text{mg}}{\text{L}}\right)}{4}$$

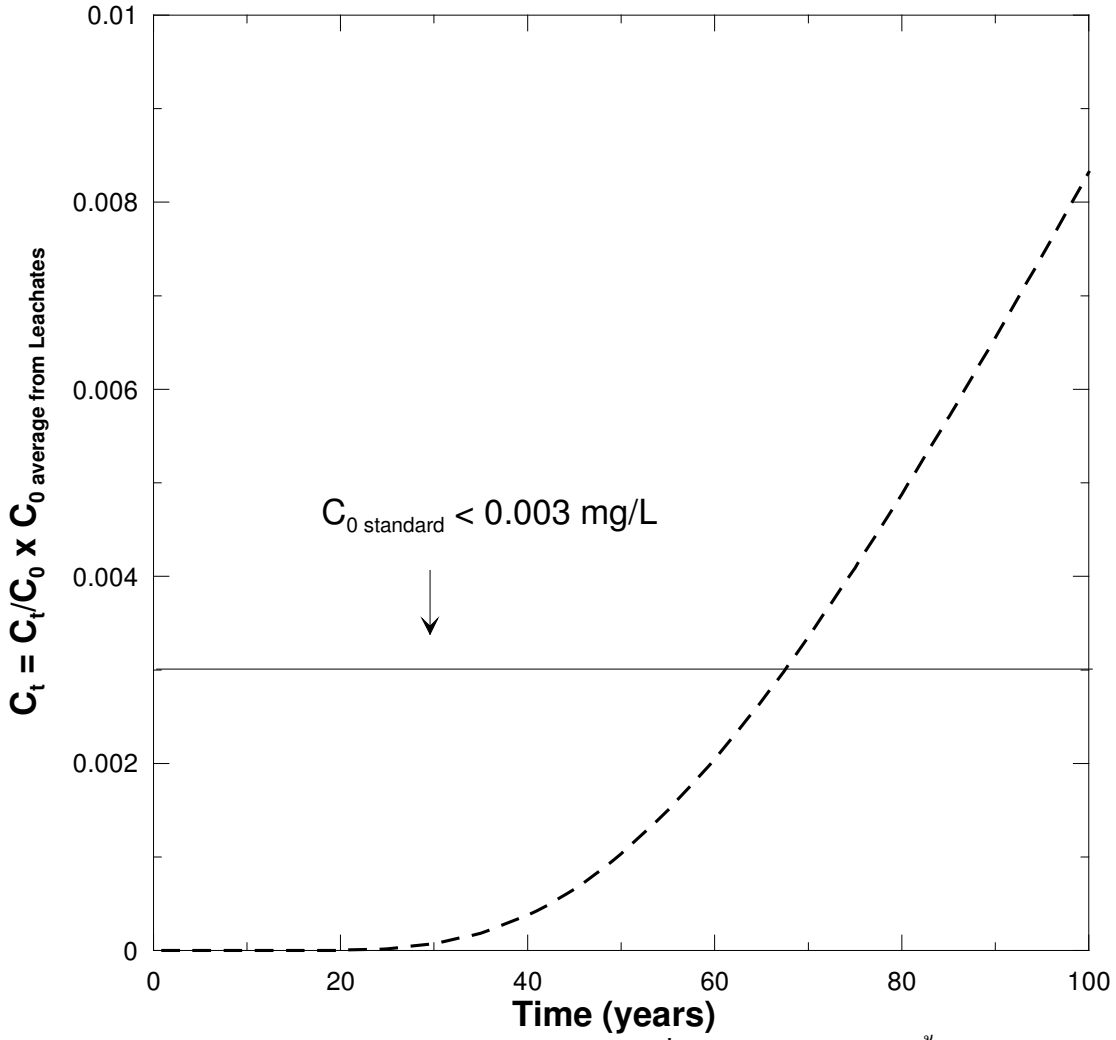
$$= 0.77\,\text{mg/L}$$

ดังนั้น

$$\left(\frac{C_{(z,t)}}{C_0}\right)\times C_0 = \left(5.48\times10^{-2}\right)(0.08) = 4.20\times10^{-3}\,\text{mg/L}$$

5) ดังนั้น ณ เวลา (t) เท่ากับ 100 ปี ที่ด้านล่างของชั้นกันซึมทรายผสมเบนโทไนต์ 5% (หนา 60 cm) มีค่าความเข้มข้นของ Cd เท่ากับ 4.20 x $10^{-3}$ mg/L ซึ่งเกินค่ามาตรฐานจากมาตรฐานน้ำใต้ดิน (ตาราง 5.1) โดยได้ระบุว่าความเข้มข้นของ Cd ในน้ำใต้ดินต้องมีค่าไม่เกิน0.003 mg/L

6) คำนวณหา $(C_t/C_0) \times C_{0\ of\ leachates}$ โดยเปลี่ยนแปลงเวลา (t) ตั้งแต่ 1-100 ปี แล้วนำไปหา Breakthrough ระหว่าง $(C_t/C_0) \times C_{0\ of\ leachates}$ กับเวลา (t) ซึ่งเมื่อถูกเปรียบเทียบด้วย ค่ามาตรฐาน ($C_{Std}$) แล้ว เวลาที่ใช้ในการเคลื่อนที่ (t) จะต้องใกล้เคียง 100 ปีมากที่สุด โดยจากตัวอย่างผลการคำนวณในภาพประกอบผนวก 1 สรุปได้ว่า ที่ด้านล่างของชั้นกันซึมทรายผสม เบนโทไนต์ที่ 5% ที่มีความหนา 60 cm สามารถป้องกันความเข้มข้นของ Cd ในน้ำชะมูลฝอยไม่ให้มีค่าความเข้มข้นเกินมาตรฐานน้ำใต้ดินได้เป็นระยะเวลา 67.4 ปี




ภาพประกอบภาคผนวก 1 ผลตัวอย่างการคำนวณเพื่อหาค่าความหนาของชั้นกันซึม