

ตารางที่ 4.8 ผลค่า D, R และ n จาก Concentration profile (C_L/C_0) ของดินทั้ง 3 ชนิด

a) ทราบผลสมเบนโทไนต์ที่ 5 %				
โลหะหนัก	D (cm ² /s)	R	n	MSE
Pb ²⁺	1.72 x 10 ⁻⁵	130.00	0.26	0.0031274
Ni ²⁺	1.77 x 10 ⁻⁵	115.09	0.26	0.0022115
Zn ²⁺	1.12 x 10 ⁻⁵	111.31	0.26	0.0015020
Cd ²⁺	1.40 x 10 ⁻⁵	89.93	0.26	0.0026762
b) ดินเหนียวเกาะยอ				
โลหะหนัก	D (cm ² /s)	R	n	MSE
Cr ³⁺	1.80 x 10 ⁻⁷	81.00	0.38	0.0031936
Pb ²⁺	3.50 x 10 ⁻⁷	79.10	0.42	0.0004673
Ni ²⁺	9.14 x 10 ⁻⁷	47.10	0.42	0.0002715
Zn ²⁺	8.90 x 10 ⁻⁷	43.36	0.42	0.0009201
Cd ²⁺	4.00 x 10 ⁻⁷	37.00	0.42	0.0000578

บทที่ 5

ความหนาของชั้นกันซึม

5.1 ชั้นกันซึมตามมาตรฐานของกระทรวงวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม

การนำดินเหนียวบดอัดมาใช้เป็นชั้นกันซึมตามมาตรฐานกระทรวงวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม (2542) ได้กำหนดว่า ให้มีความหนาของชั้นดินเหนียวบดอัดประมาณ 60 cm และต้องมีอัตราการไหลซึมต่ำ โดยต้องมีค่า K ไม่เกิน 1×10^{-7} cm/s ตามที่ได้อธิบายรายละเอียดไว้แล้วในข้อ 2.1 ในบทที่ 2 โดยข้อกำหนดดังกล่าวถูกใช้ในการออกแบบชั้นกันซึมดินเหนียวบดอัดในสถานที่ฝังกลบมูลฝอย ซึ่งดินเหนียวที่นำมาบดอัดเป็นชั้นกันซึมนี้มีคุณสมบัติในดินที่แตกต่างกันตามแหล่งดิน คุณสมบัติของดินเหนียวที่มีผลต่อการออกแบบชั้นกันซึมที่เหมาะสม คือ ค่า K , ค่า R และ ค่า D ดังนั้นชั้นกันซึมดินเหนียวบดอัดต้องมีการหาความหนาที่เหมาะสมตามคุณสมบัติของดินเหนียวนั้นๆ ด้วย

5.2 การวิเคราะห์ความหนาของชั้นกันซึม

5.2.1 การออกแบบความหนาของชั้นกันซึม

การออกแบบความหนาของชั้นกันซึม (L) (ภาพประกอบที่ 5.1 ชั้นกันซึม) สำหรับการใช้ทรายผสมเบนโทไนต์และดินเหนียว สามารถทำได้โดยใช้หลักการว่า ความเข้มข้นของสารปนเปื้อน (C_L) ที่จะเคลื่อนที่ผ่านชั้นกันซึมออกไปสู่ชั้นดินด้านล่าง จะต้องไม่มากกว่าค่าความเข้มข้นมาตรฐานของน้ำใต้ดิน (C_{Std} , ตารางที่ 5.1) ดังนั้นจากข้อมูลความเข้มข้นเริ่มต้น (C_0) ซึ่งก็คือความเข้มข้นของโลหะหนักในน้ำชะมูลฝอย, เวลาในการเคลื่อนที่ และพารามิเตอร์การเคลื่อนที่ในบทที่ 4 ค่าความหนาที่เหมาะสม สามารถคำนวณได้โดย ขั้นตอนดังต่อไปนี้

1) กำหนดความหนาของชั้นกันซึม (L) ให้มีค่าเท่ากับ 60 cm ตามที่มาตรฐานกำหนด และกำหนดให้เวลา (t) ที่ใช้ในการเคลื่อนที่ของสารละลายโลหะหนัก เท่ากับ 100 ปี

2) คำนวณค่า P_L (Peclet Number) และ T_R (Time Factor) จากสูตร

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

$$T_R = \frac{V_s t}{Rz}$$

ตารางที่ 5.1 ค่าความเข้มข้นของโลหะหนักในน้ำชะมูลฝอยจากสถานที่ฝังกลบมูลฝอย (C_0) และค่าความเข้มข้นมาตรฐาน (C_{Std}) จากมาตรฐานคุณภาพน้ำใต้ดิน

	แหล่งข้อมูล	โลหะหนัก							
		Cadmium (mg/L Cd)	Chromium (mg/L Cr)	Chromium (Hexavalent) (mg/L)	Chromium Total (mg/L Cr)	Chromium Trivalent (mg/L)	Lead (mg/L Pb)	Nickel (mg/L Ni)	Zinc (mg/L Zn)
ข้อมูลพื้นฐานของแหล่งข้อมูล	สำนักทรัพยากรธรรมชาติ กรุงเทพมหานคร (ข้อมูลในเดือนมกราคม-มีนาคม 2546)	< 0.01	-	-	< 0.05	-	< 0.05	< 0.05	-
	การบำบัดน้ำชะมูลฝอยจากสถานที่ฝังกลบ ของเทศบาลนครอุดรธานีด้วยสารโพลิเมอร์ เพอร์ริคัลเลต (วัชรชัย วิเชียรเรศ, 2544)	0.276	-	-	-	-	4.550	-	0.743
	รายงานฉบับสมบูรณ์โครงการศึกษาความ เหมาะสมและออกแบบรายละเอียดเพื่อ ปรับปรุงระบบกำจัดมูลฝอยเทศบาลนคร ขอนแก่น มีนาคม 2541	< 0.02	< 0.07	-	-	-	< 0.05	-	0.57
	(เทศบาลนครขอนแก่น, 2541 อ้างถึงใน ไพฑูรย์ พรหมเทศ, 2545)								
	เทศบาลนครนครราชสีมา จังหวัดสงขลา (ข้อมูลในเดือนมกราคม 2546)	< 0.0005	-	< 0.02	-	0.14	0.0023	< 0.002	0.017
มาตรฐานคุณภาพน้ำใต้ดิน ประกาศคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ ฉบับที่ 20 พ.ศ. 2543 (C_{Std})	USEPA, 1986	0 – 0.375	0.02 – 18	-	-	-	0.001 – 1.44	-	0.6 – 220
		< 0.003	-	< 0.05	-	-	< 0.01	< 0.02	< 5.0

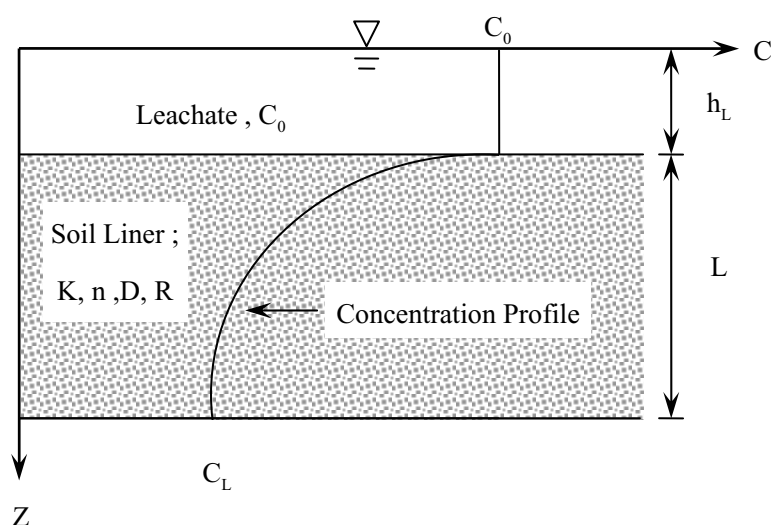
เมื่อค่า D และ R เป็นพารามิเตอร์การเคลื่อนที่ของสารละลายโลหะหนักในดินที่ได้จากบทที่ 4 , v_s คือ ความเร็วของการไหลซึม มีค่าเท่ากับ $\frac{Ki}{n}$, i คือ ความชันทางชลศาสตร์ มีค่าเท่ากับ $\frac{h_L}{(h_L + L)}$ โดย h_L คือ ความสูงของน้ำชะมูลฝอยหรือสารละลายโลหะหนักเหนือชั้นกันซึมในที่นี้ให้ใช้ค่าเท่ากับ 30 cm ซึ่งเป็นค่าที่แนะนำโดย USEPA

3) คำนวณค่า C_L/C_0 (Relative effluent concentration) โดยแทนค่า P_L และ T_R ในสมการที่ 2.11

4) คำนวณค่าความเข้มข้นของสารละลายโลหะหนักที่ไหลผ่านชั้นกันซึมลงไปสู่ดินด้านล่าง (C_L) โดยคูณค่า C_L/C_0 ที่ได้จากข้อ 3 ด้วย $C_{0 \text{ of leachates}}$ เมื่อ $C_{0 \text{ of leachates}}$ เป็นค่าความเข้มข้นของโลหะหนักในน้ำชะมูลฝอยจากสถานที่ฝังกลบ

5) เปรียบเทียบค่า C_L ที่คำนวณได้กับค่ามาตรฐานความเข้มข้น (C_{Std}) จากมาตรฐานน้ำใต้ดิน (ตารางที่ 5.1) ตลอดเวลา 100 ปี โดยพล็อต Breakthrough curve

6) พิจารณาหาความหนาของชั้นกันซึมจาก Breakthrough curve โดยพิจารณาจากค่าความเข้มข้น C_L กับ C_{Std} ในกรณีที่ C_L มากกว่า C_{Std} หมายความว่า ความหนาของชั้นกันซึม (L) น้อยเกินไป ต้องมีการเพิ่มความหนา เพื่อให้ค่า C_L ใกล้เคียงกับค่า C_{Std} และทำในทางตรงกันข้ามถ้า C_L น้อยกว่า C_{Std}



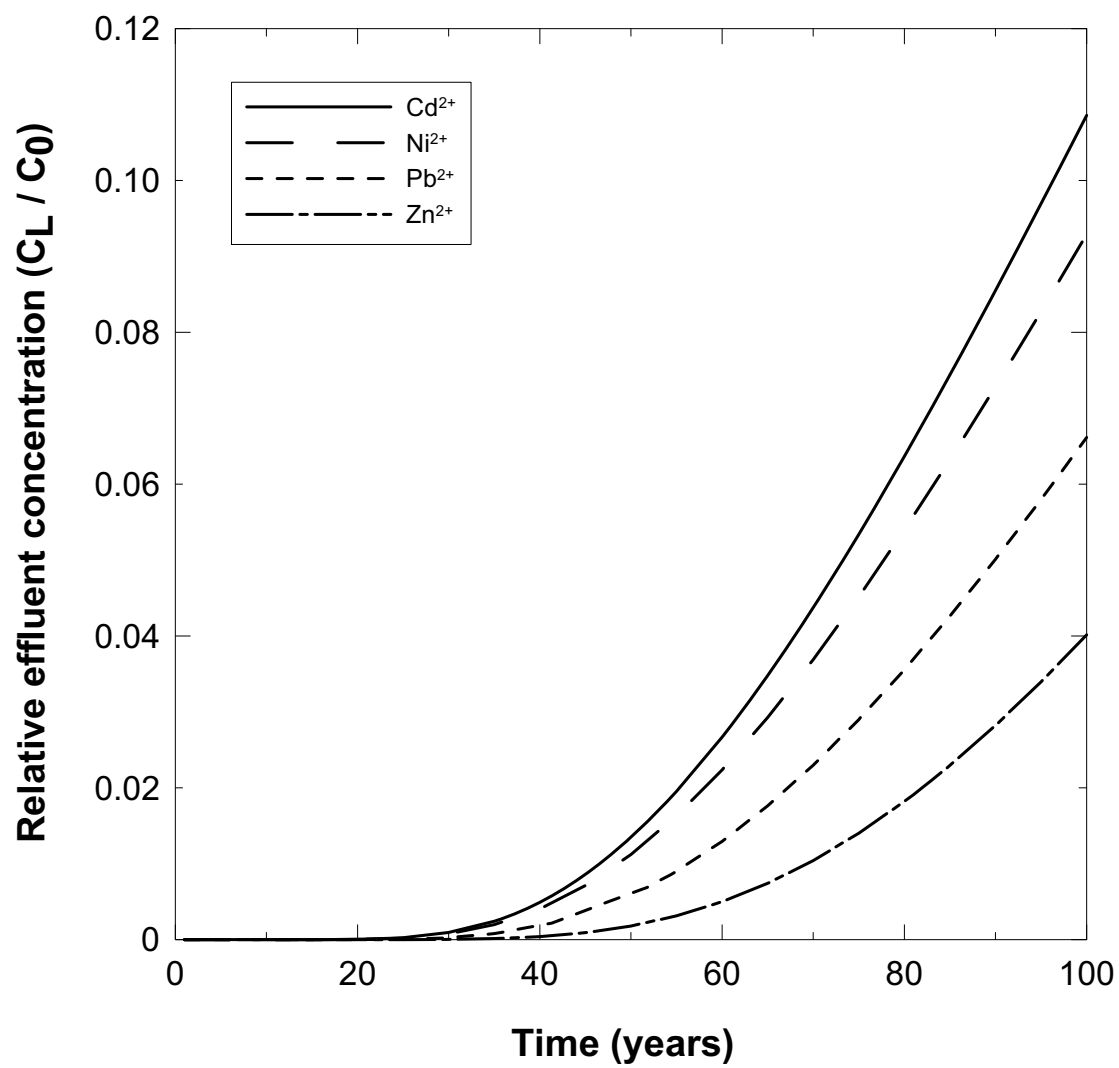
ภาพประกอบที่ 5.1 ชั้นกันซึม

5.2.2 ผลการวิเคราะห์ความหนาของชั้นกันซึม

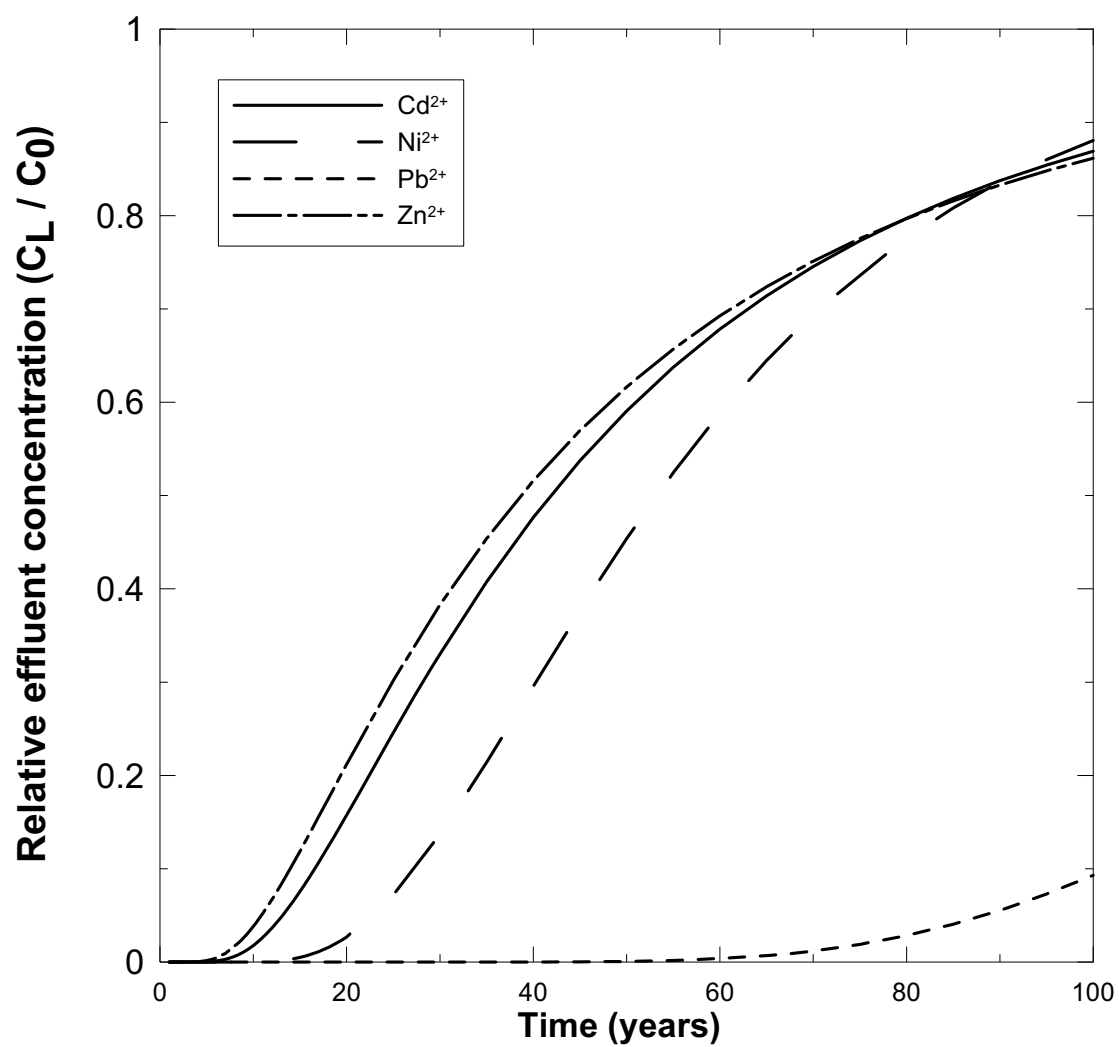
ความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า C_L/C_0 ของโลหะหนักกับเวลาของดินทั้ง 3 ชนิด อันได้แก่ ทรายผสมเบนโทไนต์ที่ 5% ดินลูกรังคอหงส์และดินเหนียวเกาะยอกับสารละลายลายโลหะหนักทั้ง 5 ชนิด ได้แสดงในภาพประกอบที่ 5.2, 5.3 และ 5.4 ตามลำดับ

ความเข้มข้นของสารละลายโลหะหนักที่เคลื่อนที่ผ่านชั้นกันซึมลงสู่ดินด้านล่าง (Effluent concentration, C_L) จะขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของสารละลายโลหะหนักในน้ำชะมูลฝอย (C_0) ในการศึกษาครั้งนี้ ได้ใช้ข้อมูลความเข้มข้นของสารละลายโลหะหนักในน้ำชะมูลฝอย จาก 5 แหล่งด้วยกัน (ตารางที่ 5.1) คือ (1) สำนักรักษาความสะอาด กรุงเทพมหานคร (2) เทศบาลอุดรธานี (3) เทศบาลนครขอนแก่น (4) เทศบาลนครหาดใหญ่ และ (5) USEPA (1986) และเนื่องจากข้อมูลจากทั้ง 4 แหล่งในประเทศไทยมีความหลากหลาย จึงใช้วิธีการทางสถิติจัดการกับข้อมูล กล่าวคือ สำหรับข้อมูลความเข้มข้นของโลหะหนักในประเทศไทย ได้เลือกใช้ค่าสูงสุด (Maximum) และค่าเฉลี่ย (Average) ของความเข้มข้นของข้อมูลจากทั้ง 4 แหล่ง

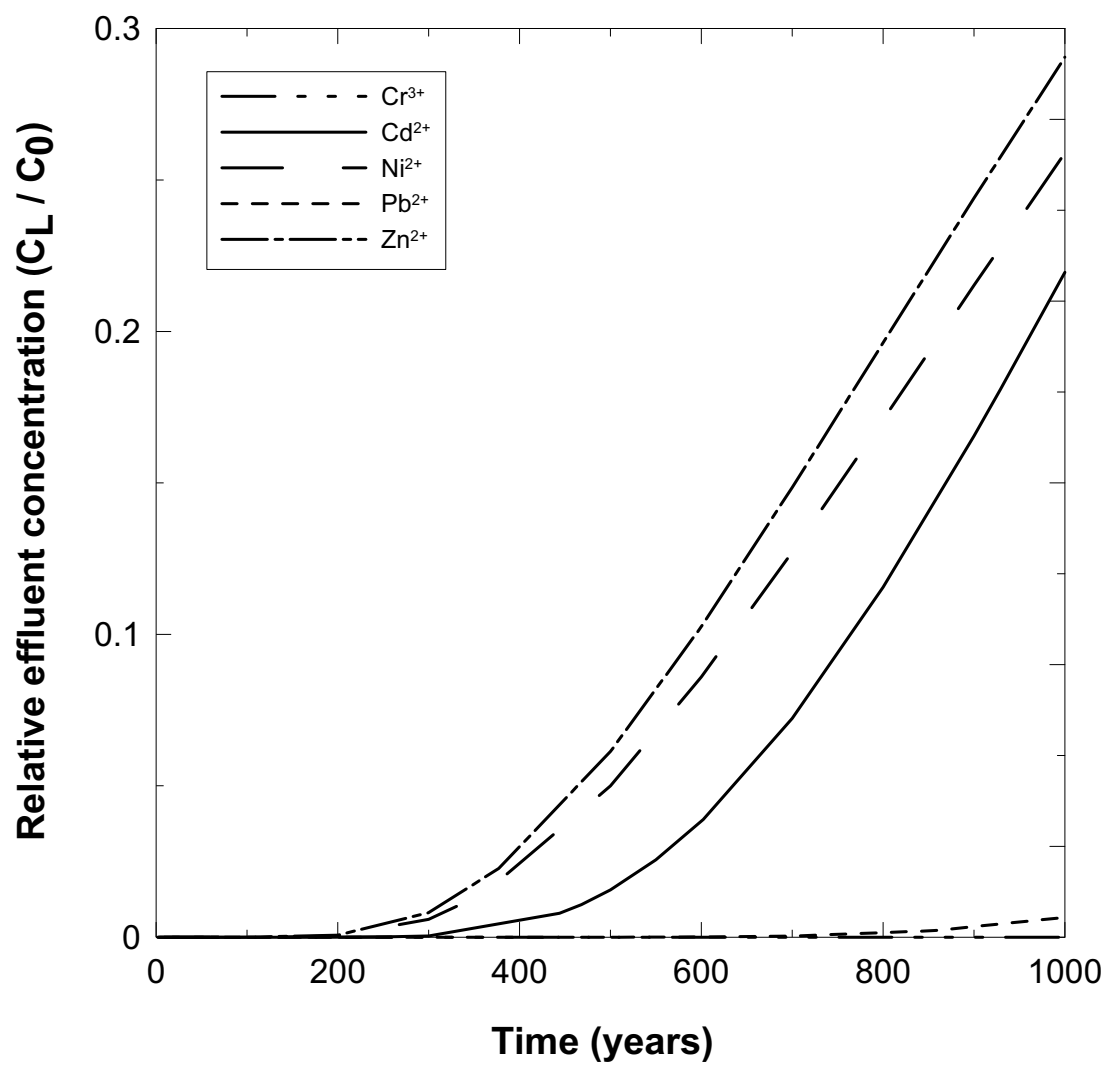
ค่า C_L ที่คำนวณได้จากการใช้ค่าความเข้มข้นเริ่มต้น 3 ค่า อันได้แก่ ค่าความเข้มข้นสูงสุดในน้ำชะมูลฝอยในประเทศไทย ($C_{0\max}$), ค่าความเข้มข้นเฉลี่ยในน้ำชะมูลฝอยในประเทศไทย ($C_{0\text{avg}}$) และค่าความเข้มข้นสูงสุดของ USEPA ของสารละลายโลหะหนัก 5 ชนิด (Cr^{3+} , Cd^{2+} , Ni^{2+} , Pb^{2+} และ Zn^{2+}) และดิน 3 ชนิด (ทรายผสมเบนโทไนต์, ดินลูกรังคอหงส์และดินเหนียวเกาะยอ) ที่มีความหนา 60 cm ตามมาตรฐานกระทรวงวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม (2542) ได้แสดงไว้ในภาพประกอบที่ 5.5 ถึง 5.18 ค่า Effluent concentration (C_L) ในภาพประกอบที่ 5.5 ถึง 5.18 ได้จากการคูณค่า C_L/C_0 ในภาพประกอบที่ 5.2 ถึง 5.4 ด้วยค่า $C_{0\max}$, $C_{0\text{avg}}$ หรือ $C_{0\text{USEPA}}$ นอกจากนั้นแล้ว ในภาพประกอบที่ 5.5 ถึง 5.18 ยังมีการแสดงค่าความเข้มข้นมาตรฐานที่ยอมรับได้สำหรับสารละลายโลหะหนักในน้ำใต้ดินที่ได้จากตารางที่ 5.1 เพื่อใช้ประกอบการเปรียบเทียบกับค่า C_L ด้วย



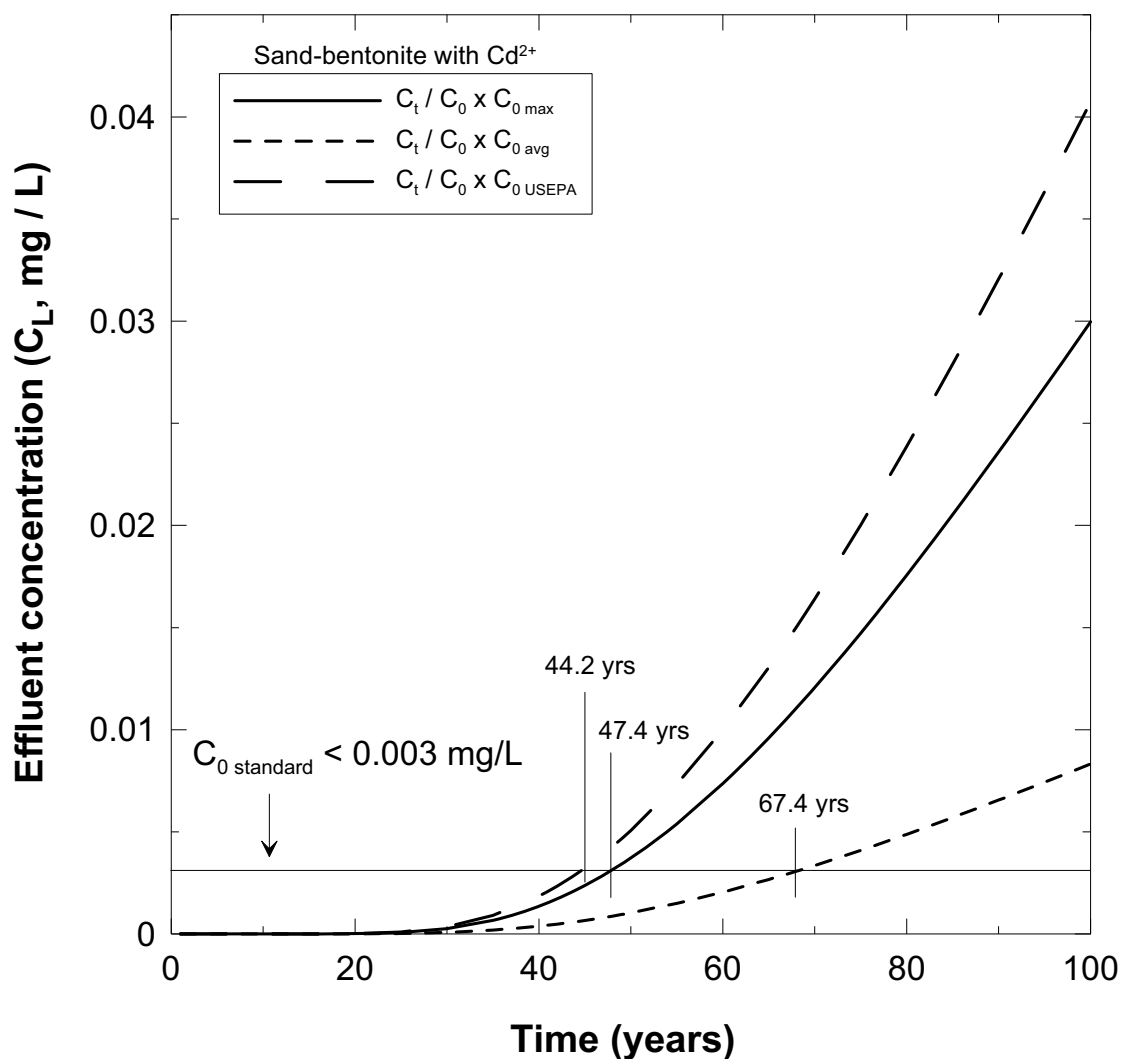
ภาพประกอบที่ 5.2 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Relative effluent concentration (C_L / C_0)
กับเวลาของชั้นกั้นซึมทรายผสมเบนโทไนต์ที่ 5% หนา 60 cm



ภาพประกอบที่ 5.3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Relative effluent concentration (C_L / C_0)
กับเวลาของชั้นกั้นซึมดินลูกรังคอกหงส์หนา 60 cm



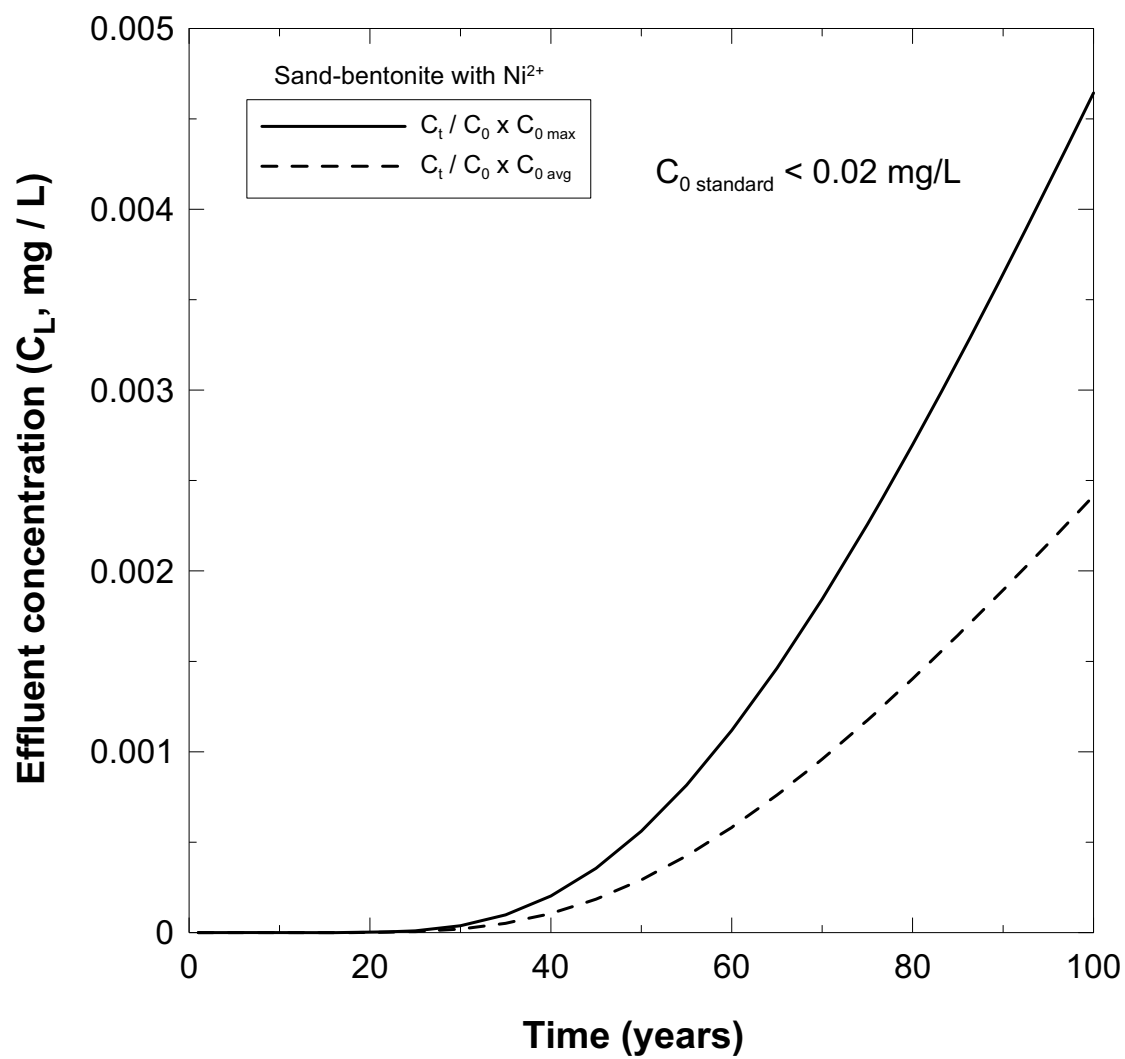
ภาพประกอบที่ 5.4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Relative effluent concentration (C_L / C_0)
กับเวลาของชั้นกั้นซึมดินเหนียวเกาะยอหนา 60 cm



หมายเหตุ	$C_t / C_0 \times C_{0 \max}$	หมายถึง	C_t / C_0 คูณด้วยค่าความเข้มข้นสูงสุดของโลหะหนักในน้ำชะมูลฝอยจากสถานที่ฝังกลบทั้ง 4 แห่งในประเทศไทย (ตารางที่ 5.1)
	$C_t / C_0 \times C_{0 \text{ avg}}$	หมายถึง	C_t / C_0 คูณด้วยค่าความเข้มข้นเฉลี่ยของโลหะหนักในน้ำชะมูลฝอยจากสถานที่ฝังกลบทั้ง 4 แห่งในประเทศไทย (ตารางที่ 5.1)
	$C_t / C_0 \times C_{0 \text{ USEPA}}$	หมายถึง	C_t / C_0 คูณด้วยค่าความเข้มข้นสูงสุดของโลหะหนักในน้ำชะมูลฝอยจากสถานที่ฝังกลบตามข้อมูลของ USEPA (1986) (ตารางที่ 5.1)
	$C_{0 \text{ Std}}$	หมายถึง	ค่าความเข้มข้นของ Cd ตามมาตรฐานน้ำใต้ดิน (ตารางที่ 5.1)

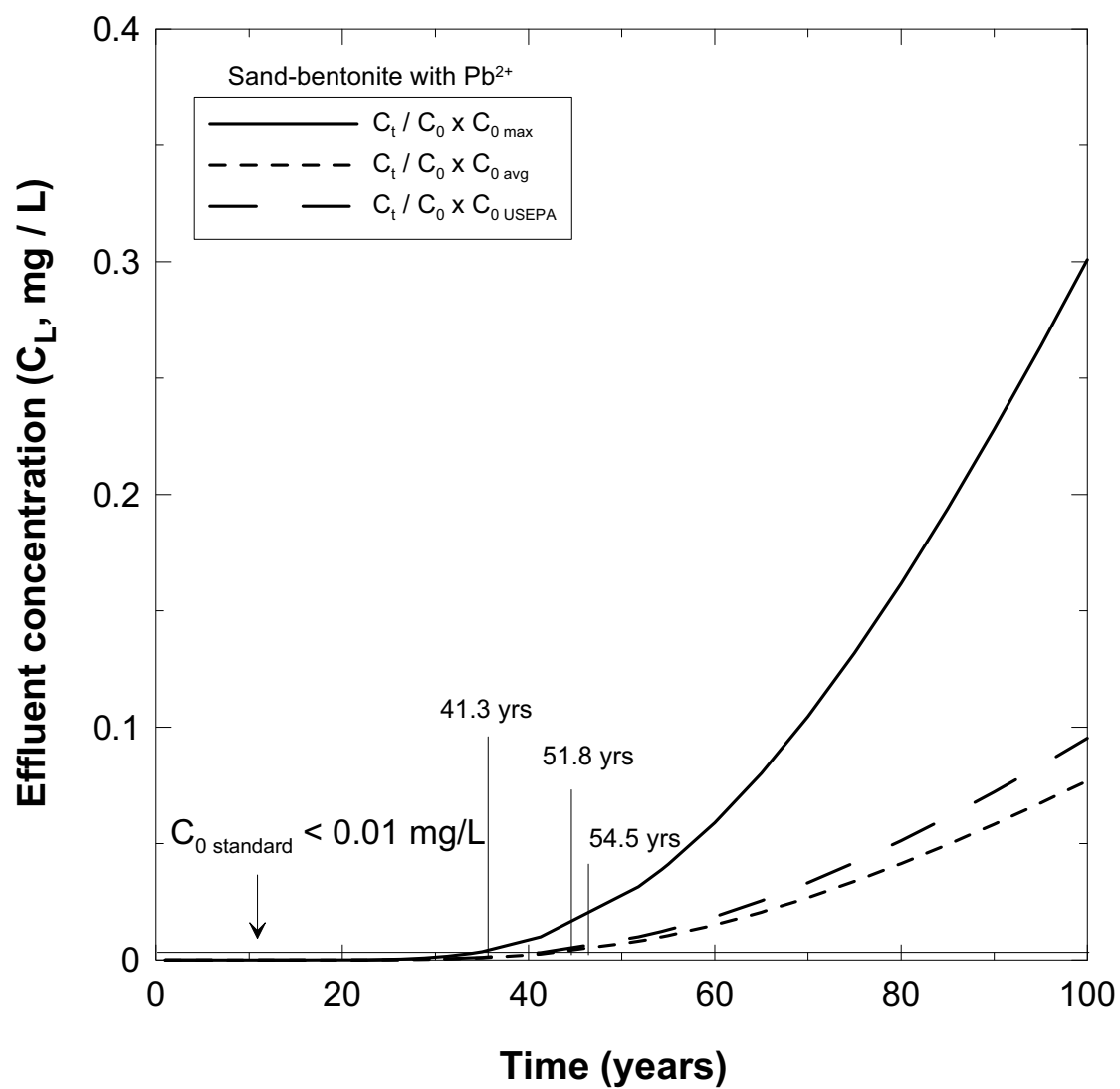
ภาพประกอบที่ 5.5 Breakthrough curves ของ Cd²⁺ ผ่านชั้นกั้นซึมทรายผสมเบนโทไนต์ที่ 5%

หน้า 60 cm

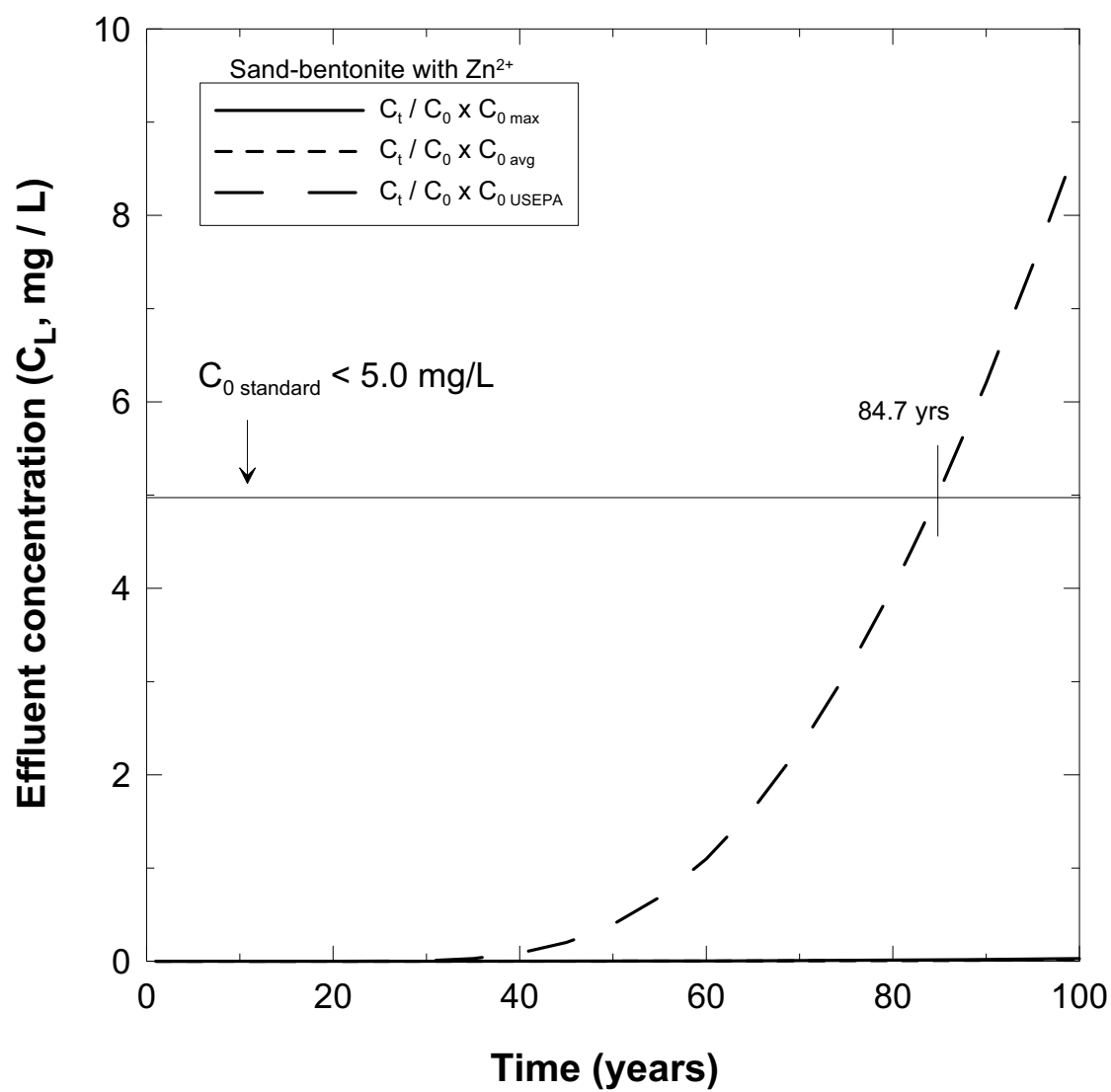


ภาพประกอบที่ 5.6 Breakthrough curves ของ Ni^{2+} ผ่านชั้นกั้นซึมทรายผสมเบนโทไนต์ที่ 5%

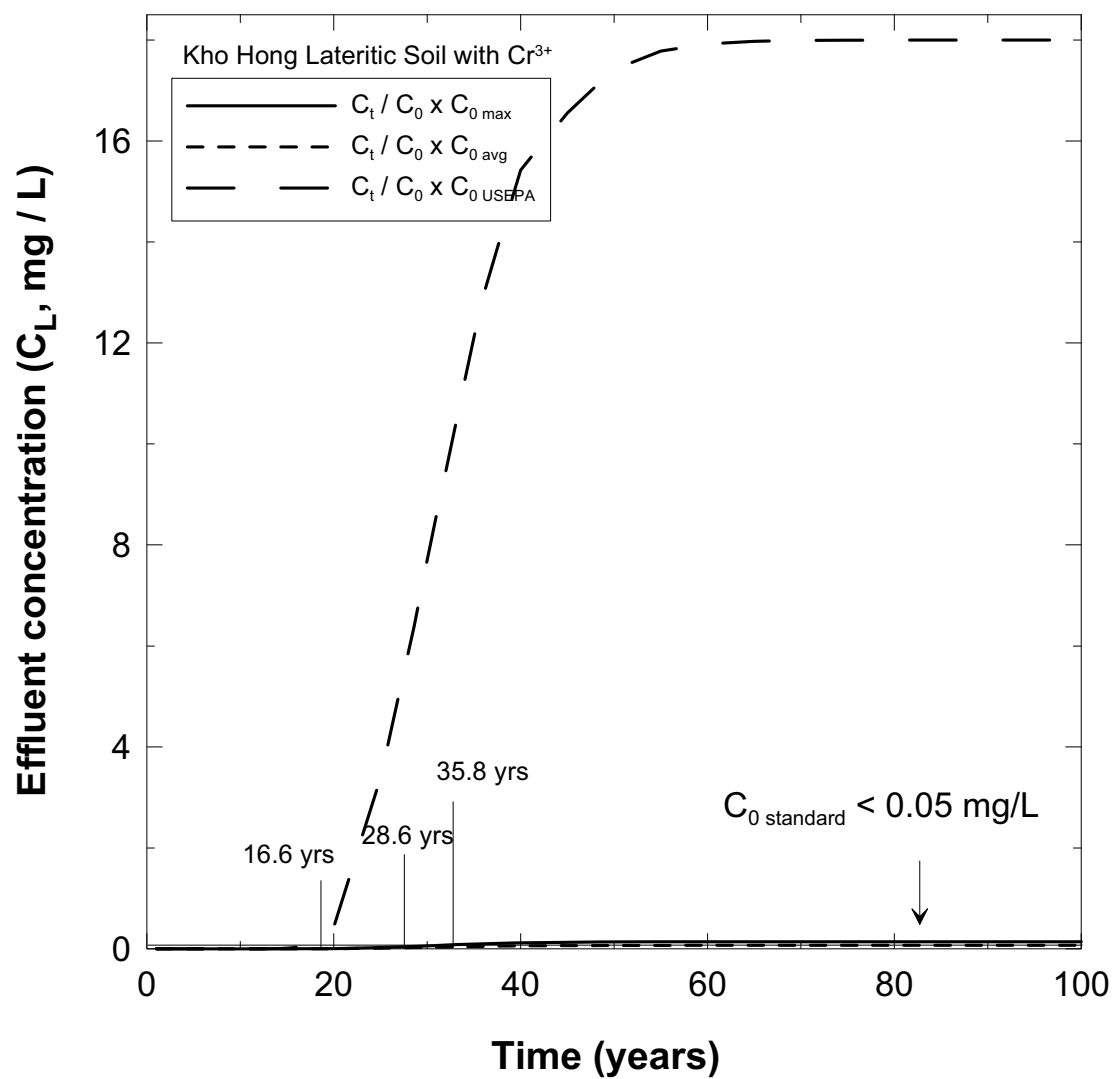
หนา 60 cm



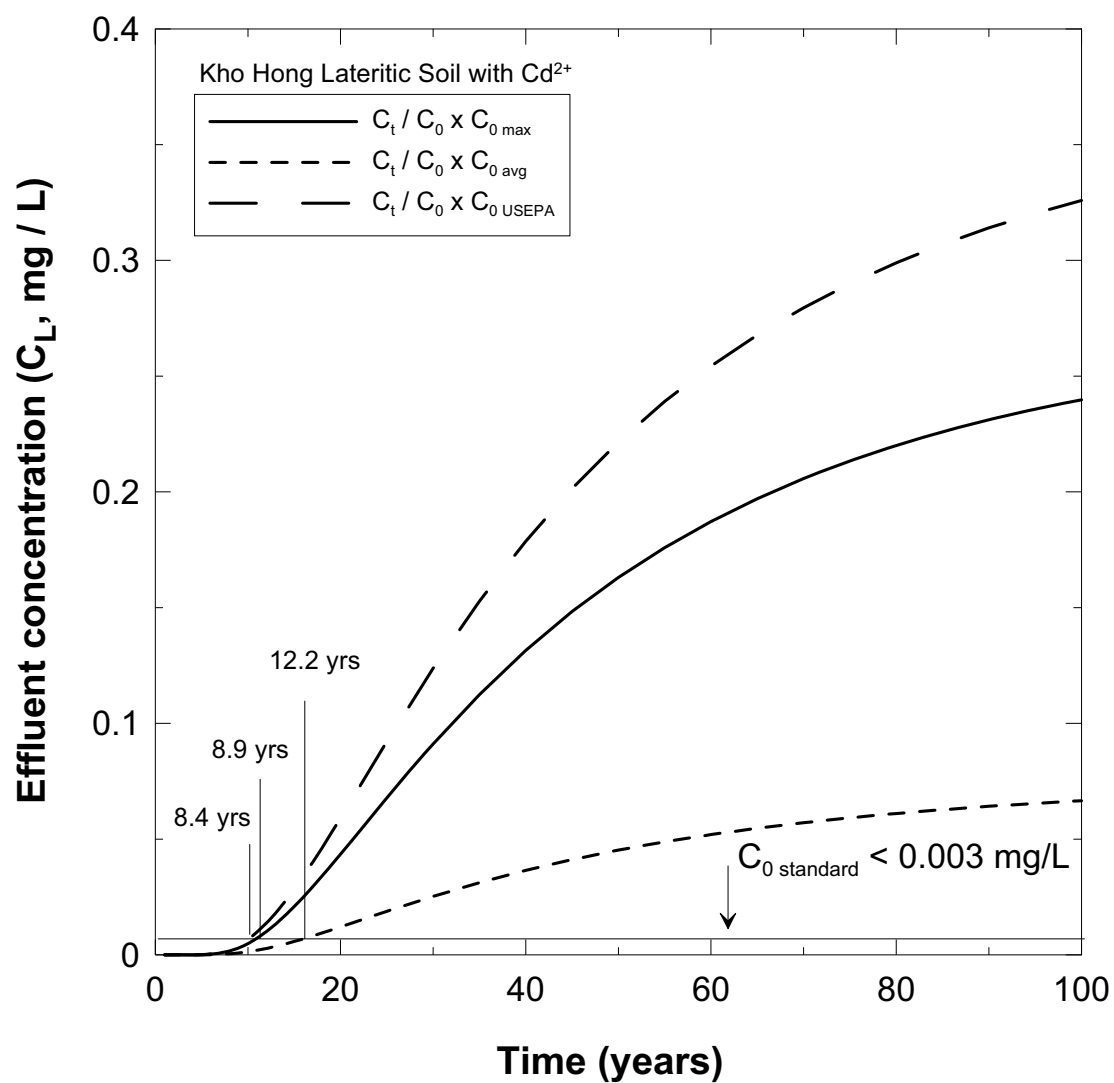
ภาพประกอบที่ 5.7 Breakthrough curves ของ Pb²⁺ ผ่านชั้นกั้นซึมทรายผสมเบนโทไนต์ที่ 5%
หนา 60 cm



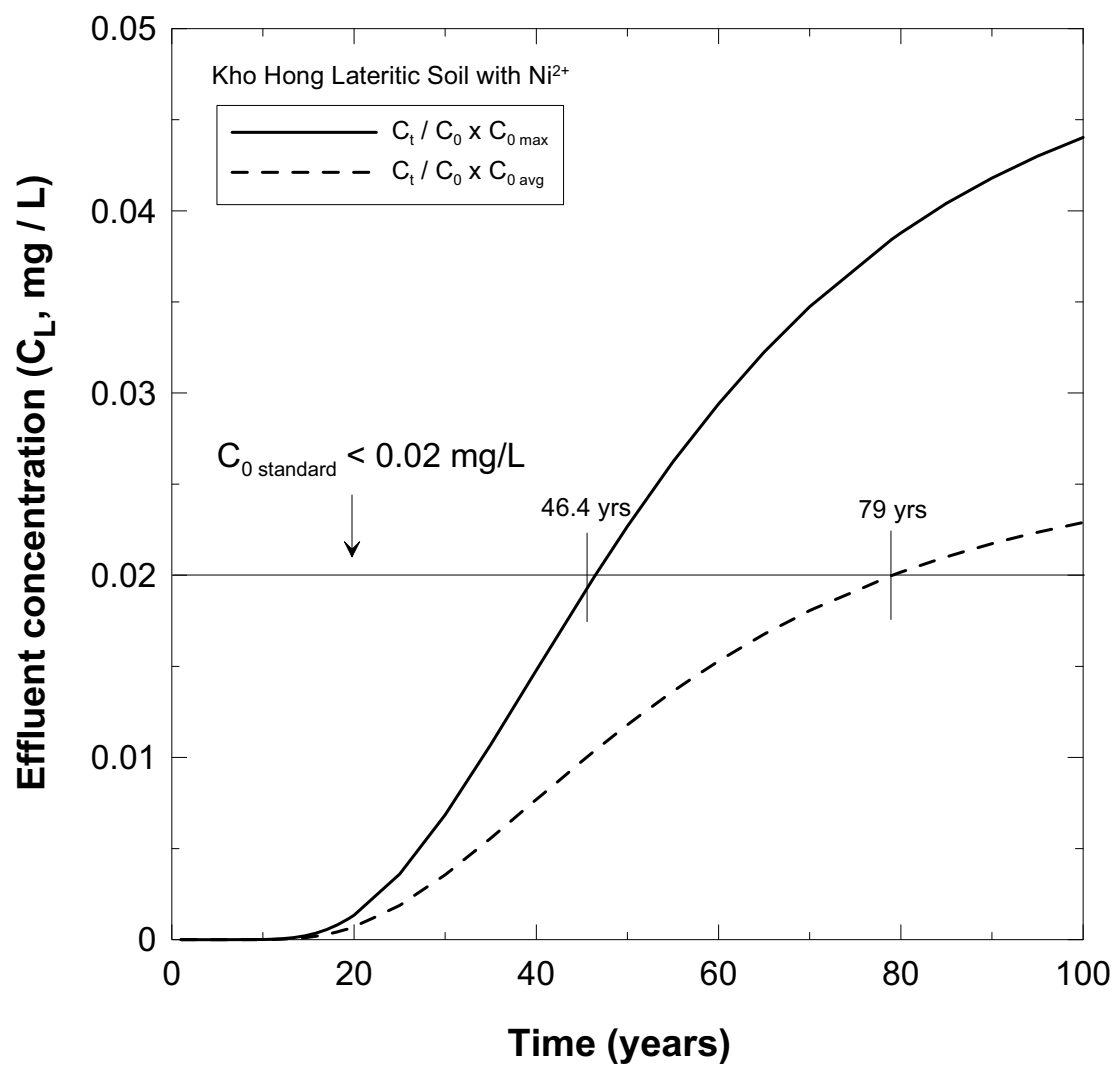
ภาพประกอบที่ 5.8 Breakthrough curves ของ Zn^{2+} ผ่านชั้นกั้นซึมทรายผสมเบนโทไนต์ที่ 5%
หนา 60 cm



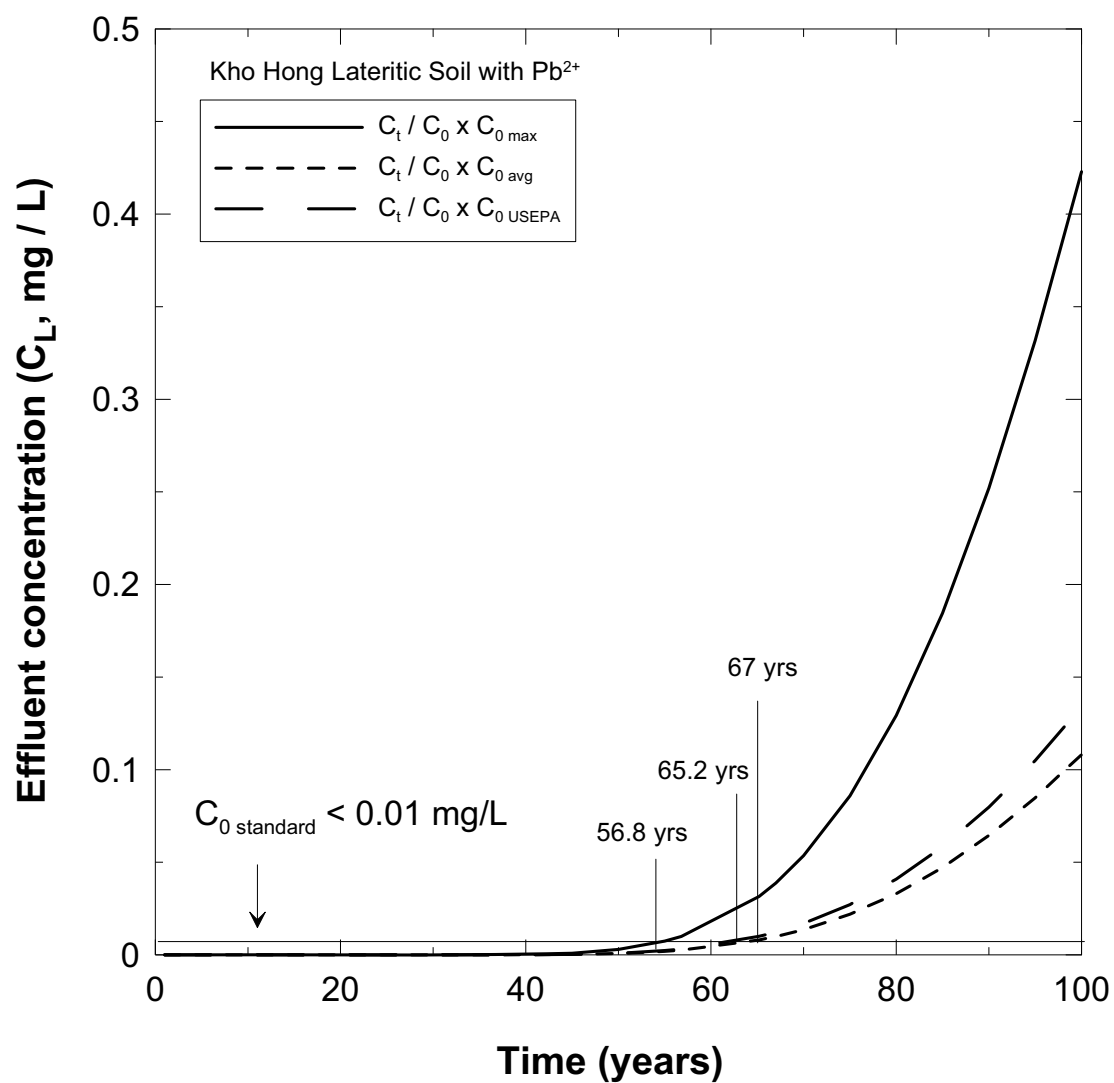
ภาพประกอบที่ 5.9 Breakthrough curves ของ Cr^{3+} ผ่านชั้นกั้นซึมดินลูกรังคอหงส์หนา 60 cm



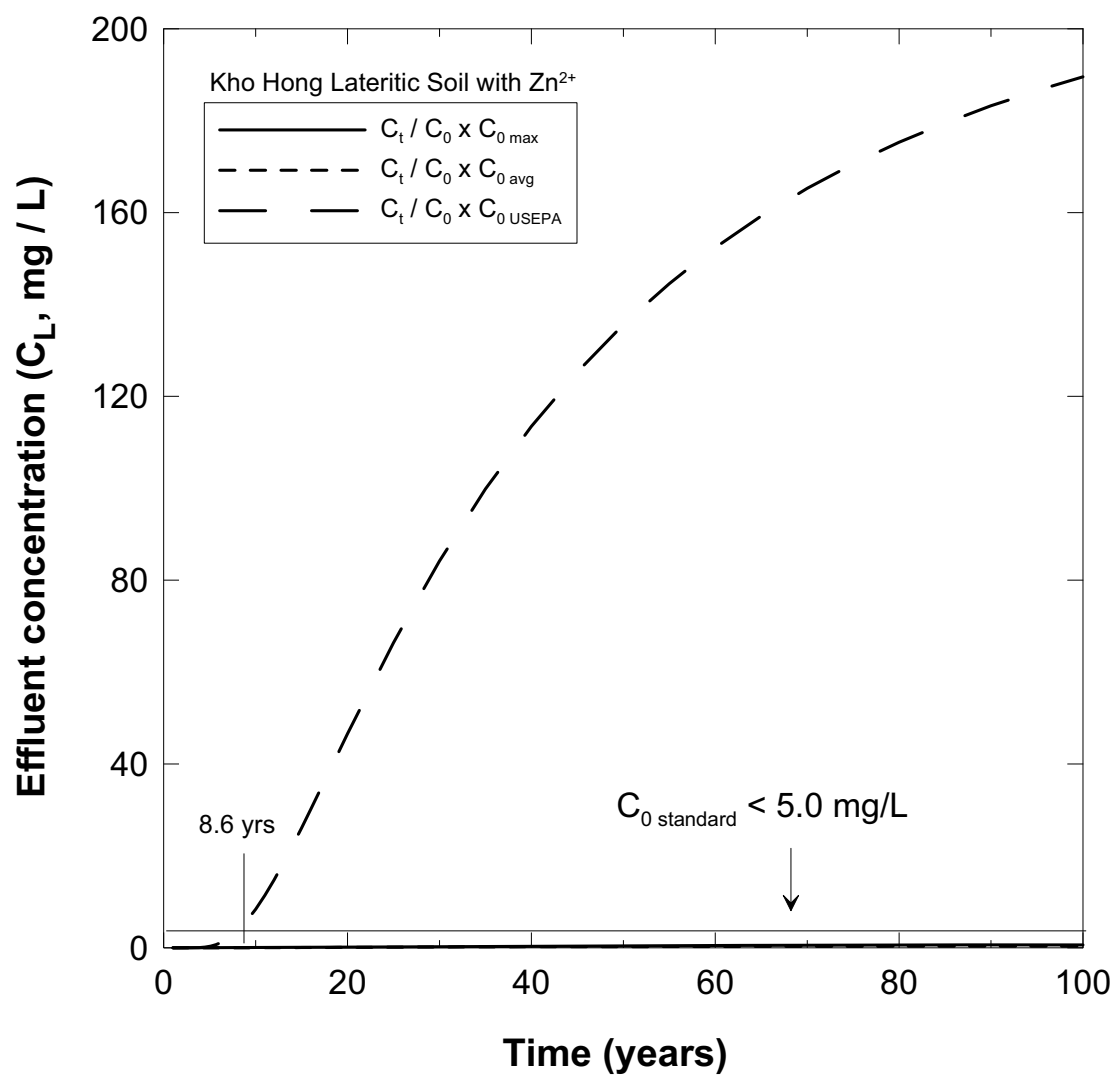
ภาพประกอบที่ 5.10 Breakthrough curves ของ Cd^{2+} ผ่านชั้นกั้นซึมดินลูกรังคอหงส์หนา 60 cm



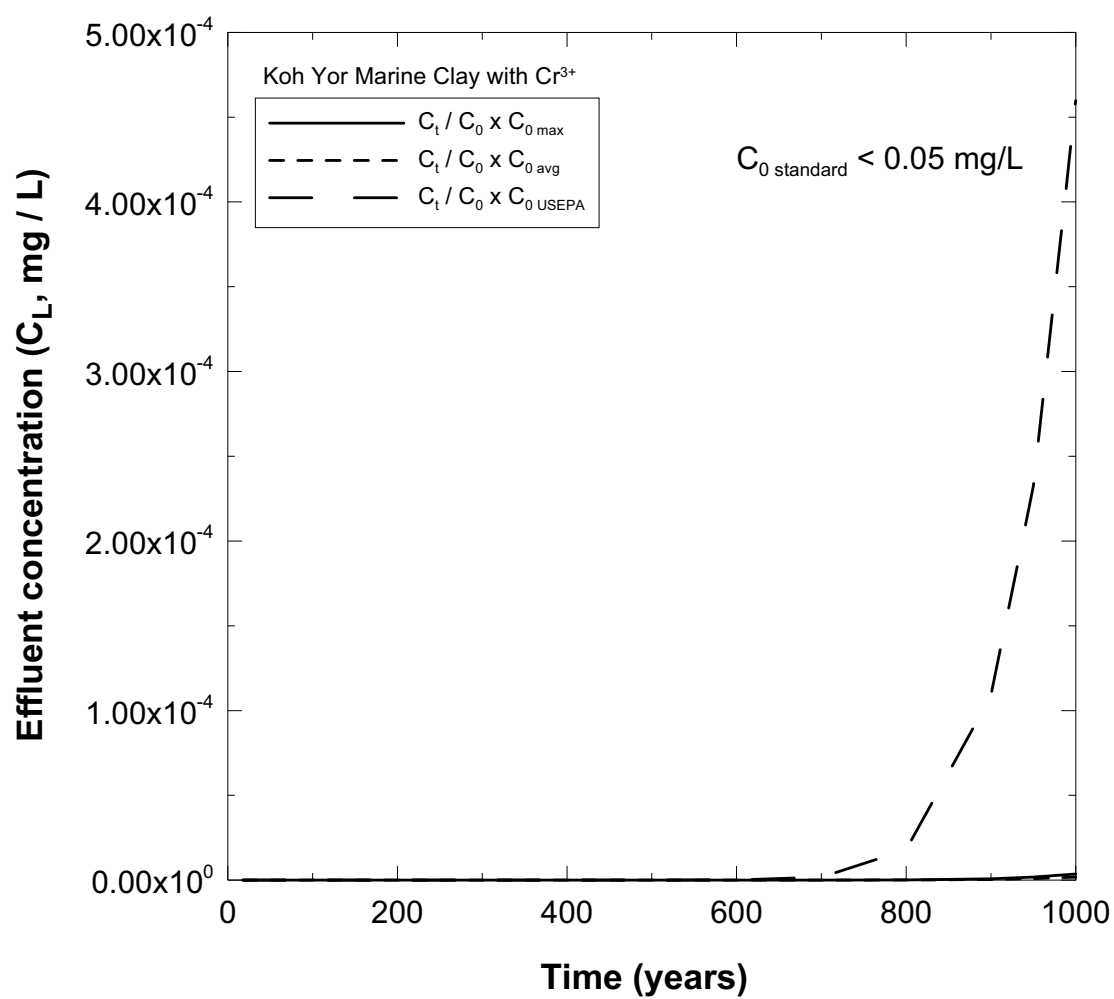
ภาพประกอบที่ 5.11 Breakthrough curves ของ Ni^{2+} ผ่านชั้นกั้นซึมดินลูกรังคอหงส์หนา 60 cm



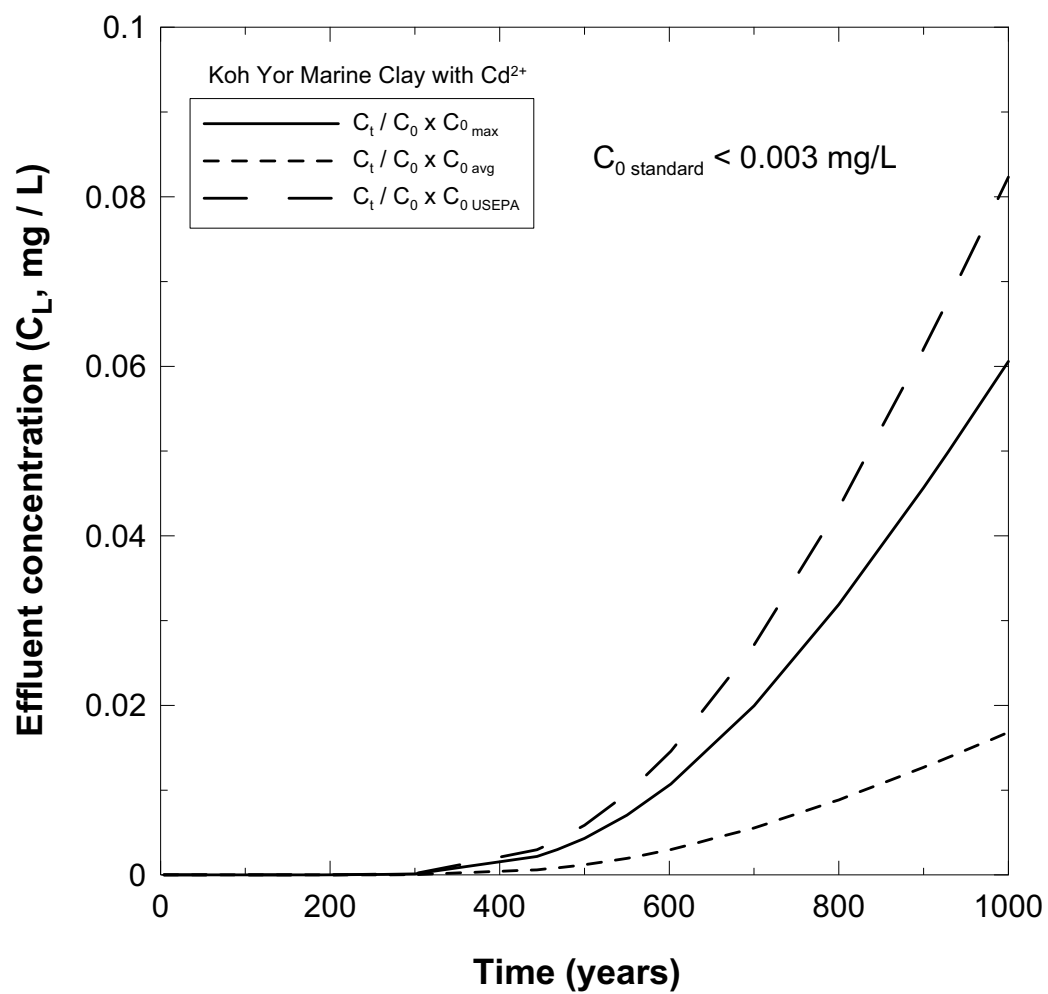
ภาพประกอบที่ 5.12 Breakthrough curves ของ Pb^{2+} ผ่านชั้นกั้นซึมดินลูกรังคอหงส์หนา 60 cm



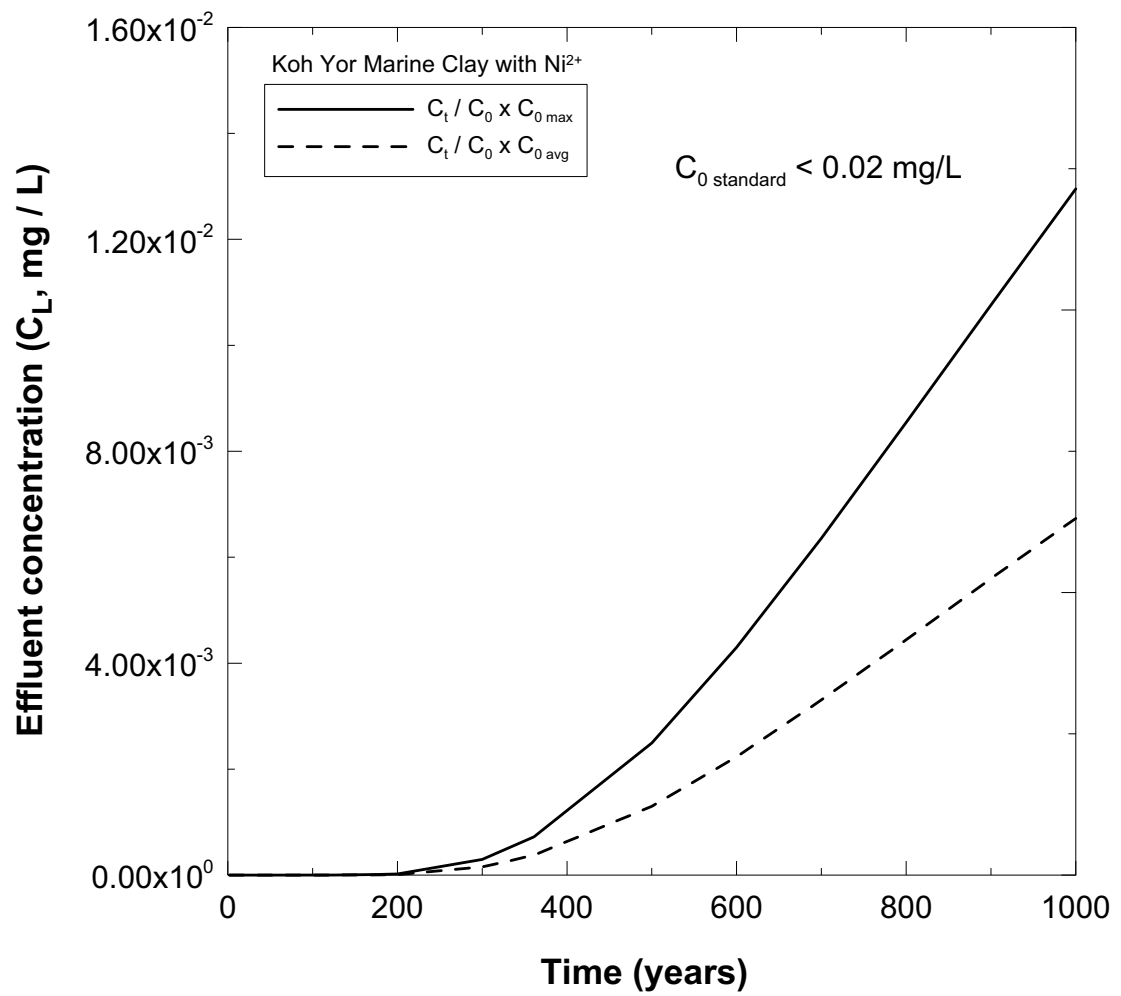
ภาพประกอบที่ 5.13 Breakthrough curves ของ Zn^{2+} ผ่านชั้นกั้นซึมดินลูกรังคอหงส์หนา 60 cm



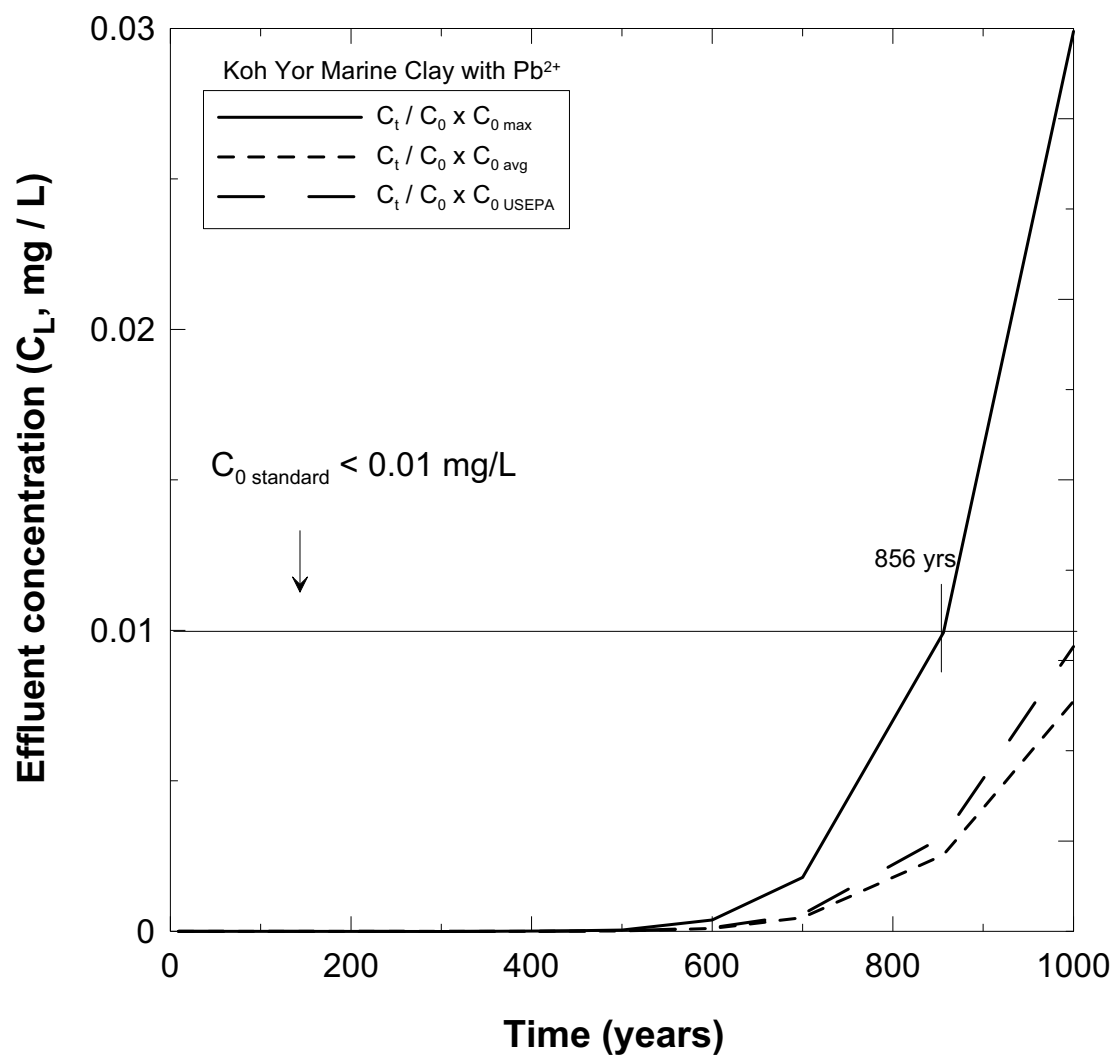
ภาพประกอบที่ 5.14 Breakthrough curves ของ Cr^{3+} ผ่านชั้นกั้นซึมดินเหนียวเกาะยอหนา 60 cm



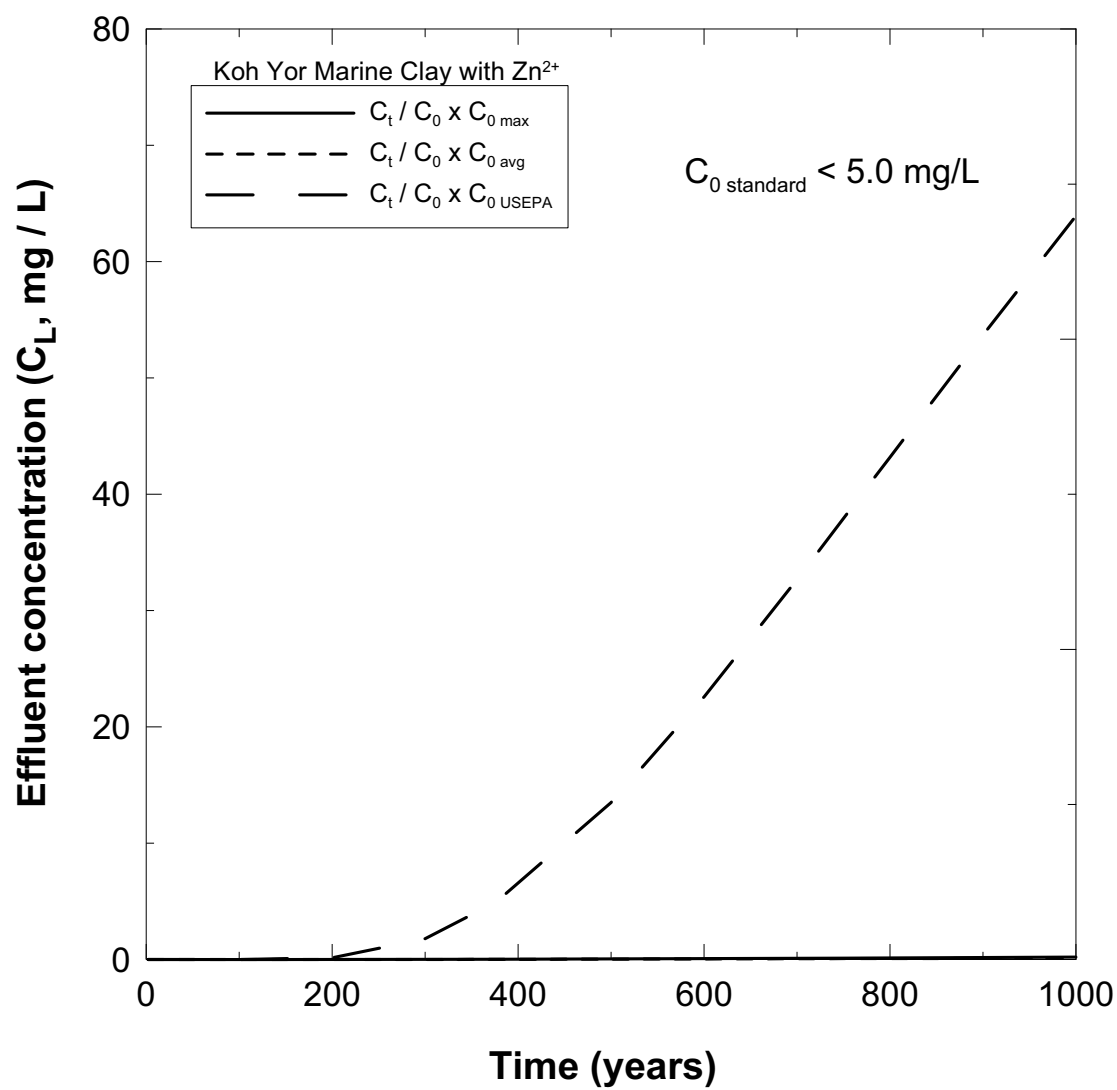
ภาพประกอบที่ 5.15 Breakthrough curves ของ Cd^{2+} ผ่านชั้นกั้นซึมดินเหนียวเกาะยอหนา 60 cm



ภาพประกอบที่ 5.16 Breakthrough curves ของ Ni^{2+} ผ่านชั้นกั้นซึมดินเหนียวเกาะยอหนา 60 cm



ภาพประกอบที่ 5.17 Breakthrough curves ของ Pb^{2+} ผ่านชั้นกั้นซึมดินเหนียวเกาะยอหนา 60 cm



ภาพประกอบที่ 5.18 Breakthrough curves ของ Zn^{2+} ผ่านชั้นกั้นซึมดินเหนียวเกาะยอหนา 60 cm

ผลการวิเคราะห์ความหนาของชั้นกันซึมจาก Breakthrough curves ในรูปที่ 5.5 ถึง 5.18 สามารถสรุปผลได้เป็น 2 ส่วน คือ ระยะเวลาที่ค่าความเข้มข้นที่ด้านล่างของชั้นกันซึมหนา 60 cm มากกว่าความเข้มข้นมาตรฐานหรือ $C_L > C_{Std}$ (ตารางที่ 5.2) และความหนาที่เหมาะสมของชั้นกันซึมเมื่อกำหนดให้เวลาในการใช้งานชั้นกันซึมเท่ากับ 100 ปี (ตารางที่ 5.3)

สำหรับชั้นกันซึมดินเหนียวเกาะยอที่มีความหนา 60 cm เมื่อใช้ข้อมูลค่าความเข้มข้นของสารปนเปื้อนจากสถานที่ฝังกลบทั้ง 4 แห่งในประเทศไทยและ USEPA (1986) ในการคำนวณ ข้อมูลในตารางที่ 5.2 แสดงให้เห็นว่า ความเข้มข้นของโลหะหนักทั้ง 5 ชนิด ได้แก่ Cr^{3+} , Cd^{2+} , Ni^{2+} , Pb^{2+} และ Zn^{2+} ในน้ำชะมูลฝอยที่ด้านล่างของชั้นกันซึมดินเหนียวเกาะยอ ต้องใช้ระยะเวลามากกว่า 100 ปี ที่ค่าความเข้มข้นของสารปนเปื้อนเกินค่ามาตรฐานน้ำใต้ดิน ดังนั้นชั้นกันซึมดินเหนียวเกาะยอจึงเหมาะสมกับสารละลายทุกชนิด

ค่าความหนาที่เหมาะสมของชั้นกันซึมดินเหนียวบดอัดทั้ง 3 ชนิด เมื่อกำหนดให้ระยะเวลาในการออกแบบชั้นกันซึมเท่ากับ 100 ปี โดยใช้ข้อมูลความเข้มข้นของสารปนเปื้อนในน้ำชะมูลฝอยทั้ง 4 แห่งในประเทศไทย และ USEPA (1986) ในการคำนวณ ได้แสดงไว้ในตารางที่ 5.3 โดยพบว่า ความหนาที่เหมาะสมของชั้นกันซึมมีค่าอยู่ในช่วง 66 cm ถึง 129 cm และ 72 cm ถึง 271 cm สำหรับทรายผสมเบนโทไนต์และดินลูกรังคอกหงส์ ตามลำดับ ในขณะที่ชั้นกันซึมดินเหนียวเกาะยอมีความหนาที่เหมาะสมต่ำกว่า 60 cm อยู่ที่ 5 cm ถึง 29 cm อย่างไรก็ตามความหนาที่น้อยเกินไป (เช่น ความหนา 5 cm) อาจจะมีปัญหาในการก่อสร้างและความไม่สมบูรณ์ในการก่อสร้างอาจนำไปสู่การรั่วของชั้นกันซึมได้ ซึ่งไม่แนะนำให้ชั้นกันซึมที่บางกว่า 30 cm

ผลการวิเคราะห์ในตารางที่ 5.2 และ 5.3 แสดงให้เห็นว่า การใช้ทรายผสมเบนโทไนต์ที่ 5% และดินลูกรังคอกหงส์ สำหรับเป็นชั้นกันซึมหนา 60 cm ตามมาตรฐานกระทรวงวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม (2542) เพียงอย่างเดียว ไม่สามารถลดการปนเปื้อนของสารปนเปื้อนในน้ำชะมูลฝอยลงสู่ดินและน้ำใต้ดินในระยะเวลา 100 ปีได้ ดังนั้นควรมีการใช้ผ้าพลาสติกปูที่พื้นด้านล่างของชั้นกันซึมดินเหนียวบดอัดทั้ง 2 ชนิด เพื่อเป็นการลดต้นทุนในการก่อสร้างสถานที่ฝังกลบมูลฝอยสำหรับการใช้ดินเหนียวเกาะยอเพื่อเป็นชั้นกันซึม เมื่อมีค่าความเข้มข้นของสารปนเปื้อนในน้ำชะมูลฝอยเท่ากับข้อมูลจากตารางที่ 5.1 พบว่า ชั้นกันซึมดินเหนียวเกาะยอที่มีความหนาประมาณ 30 cm เป็นความหนาที่เหมาะสม

ตารางที่ 5.2 ระยะเวลาที่ค่าความเข้มข้นที่ด้านล่างของชั้นกันซึมมากกว่าค่าความเข้มข้นมาตรฐานเมื่อกำหนดค่าความหนาของชั้นกันซึมให้เท่ากับ 60 cm

a) ทรายผสมเบนโทไนต์ที่ 5%			
โลหะหนัก	จำนวนปีที่ค่าความเข้มข้นที่ด้านล่างของชั้นกันซึมมากกว่ามาตรฐาน (ปี)		
	$C_{0 \max}$	$C_{0 \text{ avg}}$	$C_{0 \text{ USEPA}}$
Cd^{2+}	47.4	67.4	44.2
Ni^{2+}	270.2	810.8	-
Pb^{2+}	41.3	54.5	51.8
Zn^{2+}	> 1,000	> 1,000	84.7
b) ดินลูกรังคอหงส์			
โลหะหนัก	จำนวนปีที่ค่าความเข้มข้นที่ด้านล่างของชั้นกันซึมมากกว่ามาตรฐาน (ปี)		
	$C_{0 \max}$	$C_{0 \text{ avg}}$	$C_{0 \text{ USEPA}}$
Cd^{2+}	8.9	12.2	8.4
Ni^{2+}	46.4	79	-
Pb^{2+}	56.8	67	65.2
Zn^{2+}	> 1,000	> 1,000	8.6
c) ดินเหนียวเกาะยอ			
โลหะหนัก	จำนวนปีที่ค่าความเข้มข้นที่ด้านล่างของชั้นกันซึมมากกว่ามาตรฐาน (ปี)		
	$C_{0 \max}$	$C_{0 \text{ avg}}$	$C_{0 \text{ USEPA}}$
Cr^{3+}	4,333	6,636	1,572
Cd^{2+}	468	602	444
Ni^{2+}	1,351	3,001	-
Pb^{2+}	856	1,042	1,008
Zn^{2+}	> 5,000	> 5,000	377

หมายเหตุ	$C_{0 \max}$	หมายถึง	ค่าความเข้มข้นสูงสุดของโลหะหนักในน้ำชะมูลฝอยจาก สถานที่ฝังกลบทั้ง 4 แห่งในประเทศไทย (ตารางที่ 5.2)
	$C_{0 \text{ avg}}$	หมายถึง	ค่าความเข้มข้นเฉลี่ยของโลหะหนักในน้ำชะมูลฝอยจากสถานที่ฝังกลบทั้ง 4 แห่งในประเทศไทย (ตารางที่ 5.2)
	$C_{0 \text{ USEPA}}$	หมายถึง	ค่าความเข้มข้นสูงสุดของโลหะหนักในน้ำชะมูลฝอยจากสถานที่ฝังกลบตามข้อมูลของ USEPA (1986) (ตารางที่ 5.2)

ตารางที่ 5.3 ค่าความหนาที่เหมาะสมของชั้นกันซึมเมื่อกำหนดเวลาในการใช้งานชั้นกันซึม
เท่ากับ 100 ปี

a) ทรายผสมเบนโทไนต์ที่ 5%			
โลหะหนัก	ความหนาของชั้นกันซึมที่เหมาะสม (cm)		
	$C_{0 \max}$	$C_{0 \text{ avg}}$	$C_{0 \text{ USEPA}}$
Cd^{2+}	90	75	93
Ni^{2+}	34	17	-
Pb^{2+}	96	83	85
Zn^{2+}	< 7	< 7	66
b) ดินลูกรังคอหงส์			
โลหะหนัก	ความหนาของชั้นกันซึมที่เหมาะสม (cm)		
	$C_{0 \max}$	$C_{0 \text{ avg}}$	$C_{0 \text{ USEPA}}$
Cr^{3+}	197	173	271
Cd^{2+}	246	213	223
Ni^{2+}	104	73	-
Pb^{2+}	85	77	78
Zn^{2+}	< 7	< 7	249
c) ดินเหนียวเกาะยอ			
โลหะหนัก	ความหนาของชั้นกันซึมที่เหมาะสม (cm)		
	$C_{0 \max}$	$C_{0 \text{ avg}}$	$C_{0 \text{ USEPA}}$
Cr^{3+}	7	5	14
Cd^{2+}	26	22	27
Ni^{2+}	14	8	-
Pb^{2+}	19	17	17
Zn^{2+}	< 7	< 7	30

หมายเหตุ	$C_{0 \max}$	หมายถึง	ค่าความเข้มข้นสูงสุดของโลหะหนักในน้ำชะมูลฝอยจาก สถานที่ฝังกลบทั้ง 4 แห่ง ในประเทศไทย (ตารางที่ 5.2)
	$C_{0 \text{ avg}}$	หมายถึง	ค่าความเข้มข้นเฉลี่ยของโลหะหนักในน้ำชะมูลฝอยจากสถานที่ฝังกลบทั้ง 4 แห่ง ในประเทศไทย (ตารางที่ 5.2)
	$C_{0 \text{ USEPA}}$	หมายถึง	ค่าความเข้มข้นสูงสุดของโลหะหนักในน้ำชะมูลฝอยจากสถานที่ฝังกลบตามข้อมูล ของ USEPA (1986)(ตารางที่ 5.2)

บทที่ 6

บทสรุปและข้อเสนอแนะ

6.1 บทสรุป

การศึกษาคูสมบัตินี้ของการใช้ดิน 3 ชนิด เพื่อใช้เป็นชั้นกันซึมในสถานที่ฝังกลบมูลฝอย ประกอบด้วย ทราศผสมเบนโทไนต์ ดินลูกรังคอหงส์ และดินเหนียวเกาะยอ (ดินเหนียวทะเล) การศึกษาคูสมบัติของดินหลายประการ เช่น การทดสอบการบดอัด การทดสอบหาคูสมบัติพื้นฐาน การทดสอบหาคูสมบัติทางเคมี การทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่าน การทดสอบหาค่าพารามิเตอร์การเคลื่อนที่โดยวิธีทดสอบแบบแบทช์ และการทดสอบแบบสดมภ์ โดยมีโลหะหนักที่ศึกษา 5 ชนิด ได้แก่ Cd^{2+} , Pb^{2+} , Zn^{2+} , Ni^{2+} และ Cr^{3+} คูสมบัติดังกล่าวข้างต้นได้ถูกนำไปคำนวณหาค่าความหนาของชั้นกันซึมดินเหนียวบดอัดที่เหมาะสมของดินทั้ง 3 ชนิด ผลการศึกษามีสรุปได้ดังนี้

- 1) เบนโทไนต์ถูกจำแนกเป็นดินเหนียวที่มีความเป็นพลาสติกสูง (High plasticity clay, CH) ดินลูกรังคอหงส์และดินเหนียวเกาะยอ ถูกจำแนกเป็นดินเหนียวที่มีความเป็นพลาสติกต่ำ (Low plasticity clay, CL) ตามวิธีการจำแนกแบบ Unified Soil Classification System (USCS)
- 2) ดินเหนียวเกาะยอ มีปริมาณ SO_4^{2-} และ Cl^- มาก เนื่องจากเป็นดินเหนียวมารีน (Marine clay) ในขณะที่ดินลูกรังคอหงส์ มีปริมาณเหล็กมาก ความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวกจากมากไปน้อย ได้แก่ เบนโทไนต์, ดินเหนียวเกาะยอ และดินลูกรังคอหงส์ ตามลำดับ
- 3) การบดอัดทราศผสมเบนโทไนต์ พบว่า ทราศผสมเบนโทไนต์ จะต้องมีความหนาเบนโทไนต์ไม่น้อยกว่า 3% จึงจะให้ค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่าน ไม่มากกว่า $1 \times 10^{-7} \text{ cm/s}$ สำหรับปริมาณเบนโทไนต์ที่มากกว่า 5% ค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่าน ไม่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญในช่วง 10^{-9} cm/s
- 4) ค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่านของทราศผสมเบนโทไนต์ที่ 5% , ดินเหนียวเกาะยอ และดินลูกรังคอหงส์ ที่ถูกบดอัดโดยวิธีมาตรฐาน เท่ากับ 5.15×10^{-9} , 3.39×10^{-8} และ 5.67×10^{-8} ตามลำดับ
- 5) การทดสอบความต้านทานสารเคมีของค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่านของดินทั้ง 3 ชนิด กับสารละลายโลหะหนัก Cr^{3+} เป็นเวลาประมาณ 500 วัน พบว่า ค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่าน ของดินยังคงต่ำกว่า $1 \times 10^{-7} \text{ cm/s}$ ถ้าความเข้มข้นของสารละลาย Cr^{3+} ไม่เกิน

0.001 M สำหรับทรายผสมเบนโทไนต์และดินลูกรังคอหงส์ และไม่เกิน 0.01 M สำหรับดินเหนียวเกาะยอ ตามลำดับ

6) ผลการทดสอบแบบแบทช์ แสดงให้เห็นว่า ความสามารถในการดูดโลหะหนักมาติดผิวเรียงจากมากไปน้อย ได้แก่ เบนโทไนต์, ดินเหนียวเกาะยอ และดินลูกรังคอหงส์ ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุของดินทั้ง 3 ชนิด

7) ชนิดของโลหะหนักที่ถูกดูดติดผิวโดยดิน พิจารณาจากค่า Adsorption capacity เรียงจากมากไปน้อย ได้แก่ Cr^{3+} , Pb^{2+} , Cd^{2+} , Zn^{2+} และ Ni^{2+} สำหรับเบนโทไนต์, Cr^{3+} , Pb^{2+} , Ni^{2+} , Zn^{2+} และ Cd^{2+} สำหรับดินลูกรังคอหงส์ และ Cr^{3+} , Pb^{2+} , Cd^{2+} , Ni^{2+} และ Zn^{2+} สำหรับดินเหนียวเกาะยอ ตามลำดับ

8) ไอโซเทอมของดินลูกรังคอหงส์สอดคล้องกับสมการของ Freundlich ในขณะที่ไอโซเทอมของดินเหนียวเกาะยอและเบนโทไนต์ สอดคล้องกับสมการของ Langmuir

9) พารามิเตอร์การเคลื่อนที่ของดินลูกรังคอหงส์ จากการทดสอบแบบสดมภ์ พิจารณาจาก Breakthrough curve พบว่า สารละลายที่ Breakthrough ช้า จะมีค่า R สูง ดังต่อไปนี้ Pb^{2+} ($R = 36.00$), Ni^{2+} ($R = 7.60$), Cd^{2+} ($R = 7.00$), Zn^{2+} ($R = 6.53$) และ Cl^- ($R = 1.00$) ตามลำดับ ในขณะที่ค่า D ของสารละลายทั้งหมดมีค่าใกล้เคียงกันในช่วง $1.00 \times 10^{-5} - 6.20 \times 10^{-6} \text{ cm}^2/\text{s}$

10) พารามิเตอร์การเคลื่อนที่ของทรายผสมเบนโทไนต์ พิจารณาจาก Concentration profile พบว่า ค่า R ของสารละลายโลหะหนักมีดังต่อไปนี้ Cd^{2+} ($R = 89.93$), Ni^{2+} ($R = 115.09$), Pb^{2+} ($R = 130.00$) และ Zn^{2+} ($R = 111.31$) ตามลำดับ โดยค่า D อยู่ในช่วง $10^{-5} \text{ cm}^2/\text{s}$

11) พารามิเตอร์การเคลื่อนที่ของดินเหนียวเกาะยอ พิจารณาจาก Concentration profile พบว่า ค่า R ของสารละลายโลหะหนักมีดังต่อไปนี้ Cr^{3+} ($R = 81.00$), Cd^{2+} ($R = 37.00$), Ni^{2+} ($R = 47.10$), Pb^{2+} ($R = 79.10$) และ Zn^{2+} ($R = 43.36$) ตามลำดับ โดยค่า D อยู่ในช่วง $10^{-7} \text{ cm}^2/\text{s}$

12) สำหรับโลหะหนักทุกชนิด ความหนาที่เหมาะสมของชั้นกันซึมทรายผสมเบนโทไนต์ ไม่ควรมีค่าน้อยกว่า 100 cm

13) สำหรับการใช้ดินเหนียวเกาะยอเพื่อเป็นชั้นกันซึม พบว่า สามารถใช้ชั้นกันซึมดินเหนียวเกาะยอที่มีความหนาเท่ากับ 60 cm ตามมาตรฐานกระทรวงวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยี และสิ่งแวดล้อม (2542) ได้

14) ความหนาที่เหมาะสมของชั้นกันซึมดินลูกรังคอหงส์ มีค่าตั้งแต่ 73 ถึง 270 cm ดังนั้นการใช้ดินลูกรังคอหงส์หนา 60 cm สำหรับเป็นชั้นกันซึมตามมาตรฐานกระทรวงวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม (2542) เพียงอย่างเดียว ไม่สามารถป้องกันการปนเปื้อนของสารปนเปื้อนในน้ำชะมูลฝอยลงสู่ดินและน้ำใต้ดินในระยะเวลา 100 ปีได้ ความหนาที่

เหมาะสมของดินลูกรังคอหงส์ อาจจะต้องหนาถึง 270 cm อย่างไรก็ตามชั้นกันซึมที่หนาเกินไปจะมีค่าค่อนข้างแพงและไม่เหมาะสมในทางปฏิบัติ ดังนั้นจึงแนะนำให้ใช้ HDPE ปูที่พื้นด้านล่างของชั้นกันซึมบดอัด

6.2 ข้อเสนอแนะ

ผู้วิจัยได้รวบรวมปัญหา อุปสรรค ข้อสังเกตและแนวทางแก้ไขสำหรับงานวิจัยนี้ โดยมีรายละเอียดต่อไปนี้

1) การประกอบชุดอุปกรณ์ทดสอบแบบสดมภ์ เพื่อทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่านของดินที่มีค่าความเหนียวค่อนข้างต่ำนั้น นอกจากการใส่เยื่อกรอง (Geotextile) ที่ด้านบนและล่างของตัวอย่างดินที่บดอัดแล้วใน Mold ควรมีการใส่กระดาษกรองเพิ่มด้วย เพื่อช่วยในการกรองเศษดินที่จะหลุดออกมาคือน้ำตัวอย่างที่ไหลออกจากตัวอย่างดินได้ ซึ่งจะทำให้ตัวอย่างที่ได้ใส ไม่มีตะกอนความขุ่นของเศษดิน

2) การหาค่าพารามิเตอร์การเคลื่อนที่จาก Breakthrough curve เป็นวิธีการที่จำเป็นต้องใช้ระยะเวลานานในการทดสอบเพื่อให้ค่าความเข้มข้นของน้ำที่ไหลผ่านตัวอย่างดินมีค่าเท่ากับค่าความเข้มข้นเริ่มต้น ($C_t/C_0 = 1$) หากตัวอย่างเป็นดินเหนียว ระยะเวลาที่ใช้ในการทดสอบต้องมากกว่า 1 ปี (ขึ้นอยู่กับความหนาของดินในสดมภ์) ดังนั้นสำหรับการหาค่าพารามิเตอร์การเคลื่อนที่ของดินเหนียวที่มีค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่านต่ำๆ และมีระยะเวลาอันจำกัดแล้ววิธี Concentration Profile จัดเป็นวิธีที่เหมาะสมกว่า

3) การหาค่าพารามิเตอร์การเคลื่อนที่จาก Concentration Profile ของสารละลายหลายชนิดใน Mixed solution เป็นวิธีการที่ไม่เหมาะกับดินที่มีค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่านที่ค่อนข้างสูง เนื่องจากสารละลายหลายชนิดจะเคลื่อนที่ด้วยอัตราเร็วที่ไม่เท่ากัน ซึ่งจะทำให้ไม่สามารถหา Concentration profile ของสารที่เคลื่อนที่ด้วยอัตราที่เร็ว (R น้อย) ได้ ส่งผลให้ไม่สามารถนำค่าความเข้มข้นไปคำนวณหาค่าพารามิเตอร์การเคลื่อนที่ได้

4) แม้ว่าดินเหนียวเกาะขอมจะมีคุณสมบัติที่เหมาะสม สำหรับใช้เป็นชั้นกันซึมดินเหนียวบดอัด กล่าวคือ ค่าความหนาเพียง 30 cm ก็สามารถลดการเคลื่อนที่ของสารปนเปื้อนในน้ำชะมูลฝอยได้ แต่อย่างไรก็ตามดินเหนียวเกาะขอมก็ยังมีปริมาณ Cl^- อยู่ในดินสูงมาก ซึ่งหากมีการนำดินเหนียวเกาะขอมมาใช้เป็นชั้นกันซึม ก็มีความเป็นไปได้ที่ Cl^- ในดินเหนียวเกาะขอมจะถูกชะออกจากดิน แล้วไหลไปพร้อมกับสารปนเปื้อน ซึ่งอาจทำให้เกิดปัญหาความเค็มหรือกร่อยของแหล่งน้ำใต้ดินได้

บรรณานุกรม

กระทรวงวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม. 2542. *เกณฑ์ มาตรฐาน และแนวทางการจัดการขยะมูลฝอยชุมชน*. พิมพ์ครั้งที่ 3. กรุงเทพฯ : โรงพิมพ์คุรุสภาลาดพร้าว.

เทศบาลนครขอนแก่น. 2541. *รายงานฉบับสมบูรณ์โครงการศึกษาความเหมาะสมและออกแบบรายละเอียดเพื่อปรับปรุงระบบกำจัดมูลฝอยเทศบาลนครขอนแก่น มีนาคม 2541*.
ขอนแก่น : เทศบาลนครขอนแก่น.

รัชชัย วิเชียรเครือ. 2544. “ การบำบัดน้ำชะมูลฝอยจากสถานที่ฝังกลบของเทศบาลนครอุดรธานี ด้วยสารโพลีเมอร์ฟอรัคซัลเฟต” , วิทยานิพนธ์ สาธารณสุขศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาอนามัยสิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยขอนแก่น. (สำเนา).

นรพัทธ์ ทรงเดชะ. 2540. “ การปนเปื้อนของมลสารบางชนิดในน้ำใต้ดินบริเวณกำจัดขยะโดยวิธีฝังกลบที่ตำบลเกาะแก้ว อ. เมือง จ. สงขลา” , วิทยานิพนธ์ วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาวิชาการจัดการสิ่งแวดล้อม คณะการจัดการสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์. (สำเนา).

ประกาศคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ ฉบับที่ 20 (2543) ออกตามความในพระราชบัญญัติส่งเสริมและรักษาคุณภาพสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ พ.ศ. 2535 เรื่องกำหนดมาตรฐานคุณภาพน้ำใต้ดิน ตีพิมพ์ในราชกิจจานุเบกษา เล่ม 117 ตอนพิเศษ 95 ง ลงวันที่ 15 กันยายน 2543

ไพฑูรย์ พรหมเทศ. 2545. “ ประสิทธิภาพการบำบัดน้ำชะมูลฝอยโดยระบบถังเกรอะ-กรองไร้ออกซิเจนร่วมกับถังทรายกรอง” , วิทยานิพนธ์ สาธารณสุขศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาอนามัยสิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยขอนแก่น. (สำเนา).

มณเฑียร กังคศิเทียม. 2529. *กลศาสตร์ของดินด้านวิศวกรรม*. กรุงเทพฯ : กองวิจัยและทดลองกรมชลประทาน.

วิสา คงนคร. 2546. “ การเคลื่อนตัวและการย่อยสลายทางชีววิทยาของเบนซีนในชั้นน้ำใต้ดินอิ่มตัว” , วิทยานิพนธ์ วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. (สำเนา).

- สรินทร ลีนปนาท. 2549. “ดินเบนโทไนต์”, สถาบันวิจัยโลหะและวัสดุ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย (ออนไลน์). เข้าถึงได้จาก : <http://www.material.chula.ac.th/Radio45/June/radio6-2.htm>. [28 เมษายน 2549]
- สำนักรักษาความสะอาด. 2549. “ข้อมูลขยะมูลฝอยของกรุงเทพมหานคร”, สำนักรักษาความสะอาด กรุงเทพมหานคร(ออนไลน์). เข้าถึงได้จาก : <http://203.155.220.217/dopc/info/ShowYear.asp>. [28 เมษายน 2549]
- อาทิพย์ ฉลองจันทร์. 2545. “การหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่-การกระจายและค่าตัวประกอบความหน่วงของการเคลื่อนที่ของสารละลายเกลือผ่านดิน” , วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยขอนแก่น. (สำเนา).
- Abollino, O., Malandrino, M., Sarzanini, C. and Mentasti, E. 2003. Adsorption of Heavy Metals on Na-Montmorillonite : Effect of pH and Organic Substances. Water Research. 37 : 1619-1627.
- Amatya, B.L. and Takemura, J. 2002. Contaminant Transport through Bangkok Clay as a Liner of Landfill. Proceeding of the Eight National Convention on Civil Engineering. Thailand : Khon Kaen.
- APHA, AWWA and WEF. 1995. Standard Methods for The Examination of Water and Wastewater. 19 th ed. Maryland : American Public Health Association.
- El-Fadel, M., Findikakis, N. and Leckie, O. 1997. Environmental Impact of Solid Waste Landfilling. Journal of Environmental Management. 50 : 1-25
- Gleason, M.H., Daniel, D.E., and Eykholt. 1997. Calcium and Sodium Bentonite for Hydraulic Containment Applications. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. 123(5) : 438-445.
- Kim, Y.K., Edil, T.B. and Park, J.K. 2001. Effective Porosity and Seepage Velocity in Column Tests on Compacted Clay. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. 123(12) : 1135-1142.

- Kim, J.Y., Edil, T.B. and Park, J.K. 2001. Volatile Organic Compound (VOC) Transport Through Compacted Clay. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. 127(2) : 126-134.
- Li, L.Y. and Li, F. 2001. Heavy Metal Sorption and Hydraulic Conductivity Studies Using Three Tyypes of Bentonite Admixec, *Journal of Environmental Engineering*.. 127(5) : 420-429
- Shackelford, C.D.1990. Transit-Time Design of Earthen Barriers. *Engineering Geology*. 29 : 79-94.
- Shackelford, C.D.1993. Contaminant Transport. *Geotechnical Practice for Waste Disposal*. London : Chapman & Hall
- Shackelford, C.D.1994. Critical Concepts for Column Testing. *Journal of Geotechnical Engineering*. 120 : 1804-1828.
- 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.
- USEPA, 1986. Subtitle D Study, Phase Report, U.S. Environmental Protection Agency EPA/50-SW-86/054.
- Yong, R.N. 2000. *Geoenvironmental Engineering : Contaminated Soils, Pollutant Fate, and Mitigation*. New York : CRC Press LLC

ภาคผนวก
ผลงานตีพิมพ์

ภาคผนวก ก

Compacted sand-bentonite mixtures for hydraulic containment liners

Compacted sand-bentonite mixtures for hydraulic containment liners

Tanit Chalermyanont¹ and Surapon Arrykul²

Abstract

Chalermyanont, T. and Arrykul, S.

Compacted sand-bentonite mixtures for hydraulic containment liners

Songklanakarin J. Sci. Technol., 2005, 27(2) : 313-323

Sand is a pervious material in nature. Mixing sand with appropriate bentonite contents yields sand-bentonite mixtures having low hydraulic conductivity that can be used as hydraulic containment liners. In this study, compaction tests were conducted to determine the optimum water content and maximum dry unit weight of compacted sand-bentonite mixtures. Direct shear and hydraulic conductivity tests were conducted to assess the shear strength parameters and hydraulic conductivity of compacted sand-bentonite mixtures. Test results indicate that hydraulic conductivity of mixtures decreases about four orders of magnitude when mixed with 5% bentonite or more. Mixing sand with bentonite, however, results in a decreased shear strength of the mixtures due to the swell of bentonite when soaked with water. For the mixtures with bentonite content varying from 0 to 9%, the hydraulic conductivity of the mixtures decreases from 3.60×10^{-5} to 4.13×10^{-9} cm/s; while the corresponding friction angle and swell ranges from 49 to 22 degrees and 0.85 to 10.32%, respectively. In addition, the compacted sand-bentonite mixture with 3% bentonite content could achieve low hydraulic conductivity of 1×10^{-7} cm/s which is a regular requirement for hydraulic containment liners, while still having relatively high shear strength.

Key words : sand-bentonite mixture, hydraulic conductivity, liners

¹Ph.D.(Civil and Environmental Engineering), Department of Civil Engineering, ²Ph.D.(Applied Geochemistry), Assoc. Prof., Department of Mining and Materials Engineering, Faculty of Engineering, Prince of Songkla University, Hat Yai, Songkhla, Thailand, 90112 Thailand

Corresponding e-mail: chtanit@ratree.psu.ac.th

Received, 17 June 2004 Accepted, 26 August 2004

บทคัดย่อ

ชนิด เจริมยานนท์¹ และ สุรพล อารีรักษ์²

ทรายผสมเบนโทไนต์บดอัดสำหรับชั้นกันซึมในสถานที่เก็บน้ำ

ว. สงขลานครินทร์ วทท. 2548 27(2) : 313-323

ทรายเป็นวัสดุที่น้ำซึมผ่านได้ง่ายตามธรรมชาติ การผสมทรายกับเบนโทไนต์ในสัดส่วนที่เหมาะสมแล้วนำไปบดอัด จะทำให้ได้วัสดุผสมที่มีค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่านต่ำ และสามารถนำไปใช้เป็นชั้นกันซึมในสถานที่กักเก็บน้ำและสถานที่ฝังกลบมูลฝอยได้ ในการศึกษาครั้งนี้ได้มีการทดสอบการบดอัดเพื่อหาค่าปริมาณความชื้นที่เหมาะสมและค่าหน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุดของทรายผสมเบนโทไนต์ รวมทั้งการทดสอบแรงเฉือนโดยตรงเพื่อหาค่ากำลังของดิน และการทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่าน ผลการทดสอบพบว่าค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่านลดลงถึง 10,000 เท่าเมื่อผสมทรายกับเบนโทไนต์ปริมาณตั้งแต่ 5% โดยน้ำหนัก อย่างไรก็ตามการผสมทรายกับเบนโทไนต์จะทำให้กำลังของวัสดุผสมลดลง เนื่องจากการบวมตัวของวัสดุผสมจากการขยายตัวของเบนโทไนต์เมื่อสัมผัสกับน้ำ เมื่อบดอัดทรายผสมเบนโทไนต์ปริมาณจาก 0% ถึง 9% แล้วทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่านลดลงจาก 3.60×10^{-5} เป็น 4.13×10^{-7} ซม./วินาที ค่ามุมเสียดทานลดลงจาก 49 องศา เป็น 22 องศา และการบวมตัวเพิ่มจาก 0.85% เป็น 10.32% การใช้ทรายผสมเบนโทไนต์เพียง 3% ก็เพียงพอที่จะให้ค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่านน้อยกว่า 1×10^{-7} ซม./วินาที ซึ่งเป็นค่าที่ต้องการในการสร้างชั้นกันซึมและยังคงมีค่ากำลังเฉือนที่สูง

¹ภาควิชาวิศวกรรมโยธา ²ภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อำเภอหาดใหญ่ จังหวัดสงขลา 90112

Hydraulic containments such as reservoirs and waste containment such as landfill are required to have appropriate liners in order to prevent leaks. Compacted clays are usually used as the liners because they are very impervious. Hydraulic conductivity of compacted clays is usually less than 1×10^{-7} cm/s. To build the liners with sand is difficult because, naturally, sand is a pervious material. Hydraulic conductivity of sand ranges from 1 to 1×10^{-5} cm/s (Freeze and Cherry, 1979). The hydraulic conductivity of sand can be reduced if sand is mixed with a very impervious material such as bentonite.

Bentonite refers to any material that is primarily composed of the montmorillonite group of minerals and whose physical properties are dictated by the montmorillonite minerals (Grim and Guven, 1978). Characteristics of montmorillonite minerals include large cation exchange capacity, large specific surface area, high swelling potential, and low hydraulic conductivity to water (Gleason *et al.*, 1997).

Properties of bentonite are greatly affected by interactions between its particles and the surrounding pore fluid. The net electrical charge on bentonite particles is negative (Mitchell, 1993), which causes dissolved cations in the pore water to be attracted to the surfaces of the bentonite. The layer of water and absorbed ions that surrounds a bentonite particle is referred to as the diffuse double layer (DDL) (Mitchell, 1993; Shackelford, 1994). The size of the DDL is dominated by ionic strength, dielectric constant, and temperature (Gleason, 1997). The overlapping of DDLs of bentonite makes it difficult for water and electrolytes to flow through (Hunter, 1981; Dukhin and Derjaguin, 1974).

In this study, tests were conducted to determine appropriate sand-bentonite mixtures that could yield a hydraulic conductivity below 1×10^{-7} cm/s, which is a regular requirement for water containment and waste containment liners. Compaction tests were carried out to find out the optimum water contents and maximum dry unit

weight of sand-bentonite mixtures. Direct shear tests and hydraulic conductivity tests were carried out to determine, respectively, shear strength parameters and hydraulic conductivities of sand-bentonite mixtures compacted at 2% wet of optimum water content obtained from compaction tests. Several standard tests were also performed to obtain properties of the sand and the bentonite. Based on the test results, a suitable sand-bentonite mixture that yields low hydraulic conductivity while maintaining relatively high shear strength is recommended for use as liner in hydraulic containment applications.

Materials and Methods

Materials

The bentonite used in this study was powdered sodium bentonite manufactured by Wyo-Ben, Inc. This bentonite is generally used as drilling mud in boring activities. Sand used in this study was local sand within Songkhla Province which is typically used as a construction material. Standard tests were conducted with these two materials in order to determine their properties. The tests included: Atterberg limits, sieve analysis, specific gravity, x-ray diffraction, x-ray fluorescence spectrometry, and scanning electron micrograph.

Compaction Test

Compaction tests were carried out to assess the optimum water contents and maximum dry unit weights of sand-bentonite mixtures. Sand-bentonite mixtures were prepared by mixing 3 kg of oven-dry Songkhla sand with air-dry bentonite. The bentonite contents used were 0%, 3%, 5%, 7%, and 9% by weight. For each sand-bentonite mixture, the optimum water content and the maximum dry unit weight were determined using standard Proctor compaction method (ASTM D698). Five samples of the soil-bentonite mixture were prepared with different water contents ranging from 3 to 17%. Tap water was added to the sand-bentonite mixtures to obtain the desired water contents. The sand-bentonite mixtures were allowed to hydrate

for at least 24 hours prior to compaction. An ELE automatic compactor with a 5.5-lb hammer was used in compacting the sand-bentonite mixture into the 4-in mold (inside diameter) with 4.5-in height in order to ensure the uniform compaction for each layer. Total of 3 layers of soil-bentonite mixture were compacted for each mold. After compaction, the weight of the compacted sand-bentonite mixtures was determined along with their water contents. Correspondingly, the maximum dry unit weight and optimum water content of compacted soil-bentonite mixtures were determined from a compaction curve.

Measurement of Shear Strength Parameters

Shear strength parameters (i.e., cohesion and friction angle) of the compacted sand-bentonite mixtures which are significant parameters in stability analysis, were determined by conducting a series of direct shear tests (ASTM D3080). The sand-bentonite mixtures were compacted in a shear box of 6×6 cm² with the thickness of 4.1 cm to achieve the dry unit weight of at least 95% of maximum dry unit weight obtained previously from the compaction tests. Tap water was added to the sand-bentonite mixtures to obtain the desired water contents. The sand-bentonite mixtures were allowed to hydrate for at least 24 hours prior to compaction. Specimen water contents were set to 2% wet of optimum water content to ensure that the hydraulic conductivities of the specimens were low, as recommended by Gleason *et al.* (1997) and Daniel (1994). Two sets of direct shear tests were performed. For the first set, conventional procedures were followed. The compacted sand-bentonite mixture specimens were sheared immediately after compaction. For the second set, in order to simulate field condition of liners, the specimens were inundated for one week prior to shearing. For each direct shear test, three normal stresses were used. The normal stresses used were 17.17, 29.57, and 41.94 kPa. The strain rate of 0.5 mm/min was used for all tests and the time required for shearing the samples to fail was about 4 to 8 min.

Measurement of Hydraulic Conductivity

The hydraulic conductivity tests were performed on compacted sand-bentonite mixtures in rigid-wall permeameters. The rigid wall permeameters used in this study is shown schematically in Figure 1. A rigid wall permeameter is a compaction-mold used in compaction test, made of stainless steel tube, and mounted on top and bottom with stainless steel plates. A collar was mounted between the top plate and the permeameter in order to obtain 1-D flow through the specimen. The specimens were allowed to swell vertically at the upper end into the collar that was filled with deionized water which was boiled prior to use. Stainless steel was used in order to minimize the chemical reaction to permeant liquids. Deionized water was permeated through the specimens from the top of permeameter via a Teflon tube that

connected the top plate to the burette. Water level observed from the scale on the burette was used to identify the hydraulic gradient. The hydraulic gradient used was 10 to 15 as recommended in ASTM D5084. The graduated cylinders were used to collect the effluents at the bottom of the specimens. After the tests were completed, the final heights of samples were measured and reported in terms of percent swell, which is defined by ratio of thickness of swell in the collar to the original height of the specimen. For specimens with 5% swell or higher, the specimens were trimmed to their original height and hydraulic conductivity tests were continued until steady hydraulic conductivities of the specimens were obtained.

To ensure that the hydraulic conductivities obtained were reliable, a technique recommended

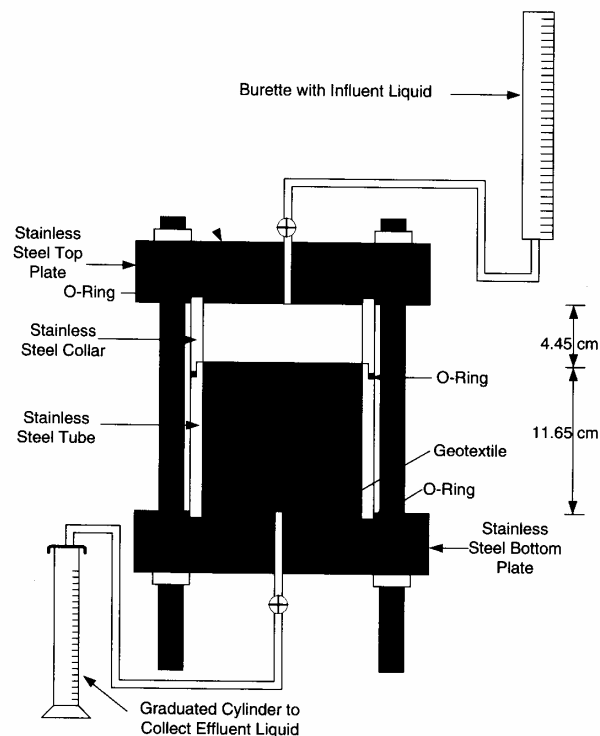


Figure 1. Rigid wall permeameter.

Table 1. Properties of sodium bentonite.

Property	Value
Liquid limit (%)	487
Plasticity index (%)	450
Percent Passing #200 Sieve	65
Specific Gravity	2.55
SiO ₂ (%)	63.97
Al ₂ O ₃ (%)	15.66
MgO (%)	4.51
Na ₂ O (%)	3.46
CaO (%)	2.62

Table 2. Maximum dry unit weight and optimum water content of compacted-sand bentonite mixtures.

Bentonite Content (%)	Maximum Dry Unit Weight (kN/m ³)	Optimum Water Content (%)
0	19.47	9.0
3	19.35	10.0
5	19.10	10.5
7	18.68	11.2
9	18.56	12.0

by Daniel (1994) was used. Following this technique, the deionized water was permeated until 1) inflow and outflow rates were reasonably equal and 2) the computed hydraulic conductivities were steady.

Results and Discussions

Properties of Bentonite

The bentonite used in this study is powdered sodium bentonite. A sieve analysis result shows that percent passing No.200 sieve of air-dry bentonite is 65%. Properties of the bentonite are listed in Table 1. Liquid limit (LL) and plasticity index (PI) of the bentonite are 487 and 450% respectively. The PI of bentonite indicates that bentonite is very highly plastic material and has high swelling potential. X-ray diffraction test results show that the bentonite consists of montmorillonite which is a very highly plastic material and consistent with PI value obtained. X-ray fluorescence spectrometry test results show that the main chemical compounds of the bentonite are silicon oxide and aluminum oxide.

Properties of Songkhla Sand

Sand used in this study is local Songkhla sand which is typically used as a construction material. The grain size distribution curve of the sand is shown in Figure 2. The corresponding coefficient of uniformity (C_u) and coefficient of curvature (C_c) are 11.7 and 1.0, respectively. Percent

passing No. 200 sieve is 6.5% and fine content of the sand is found to be nonplastic. Thus, the sand is classified as SW-SM according to the Unified Soil Classification System (USCS).

Compaction Test Results

Compaction test results of sand-bentonite mixtures are shown in Figure 3. Typical compaction curves are observed for sand-bentonite mixtures. For each compaction curve, the dry unit weight of the sand-bentonite mixture increases with increasing water content. After the optimum water content is reached, the dry unit weight decreases with further increase of water content.

The maximum dry unit weights and corresponding optimum water contents were obtained graphically from the peak of compaction curves and tabulated in Table 2. As expected, when more bentonite was added, optimum water content increased and maximum dry unit weight decreased. As shown in Figure 3, when the bentonite content varies from 0 to 9%, the maximum dry unit weight decreases from 19.47 to 18.56 kN/m³ and the corresponding optimum water content of the compacted sand-bentonite mixtures increases from 9 to 12%. When fine content (i.e., bentonite) is mixed with sand, more water is required in compaction in order to achieve maximum dry unit weight (Holtz and Kovac 1981). When water is added to the mixture, the water acts like lubricant that allows soil particles to move closer to each other, air void is minimized, and higher unit weight

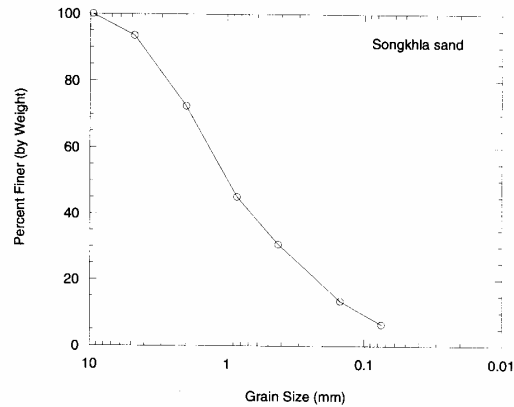


Figure 2. Grain size distribution of Songkhla sand.

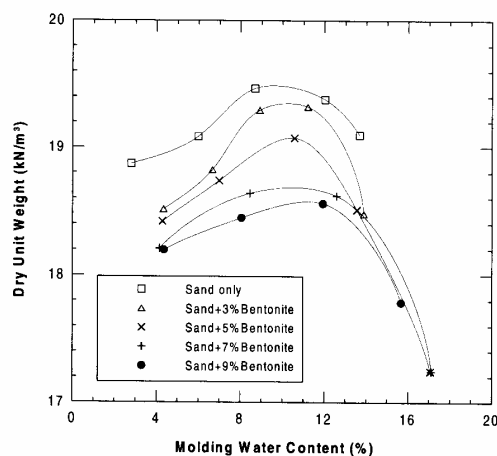


Figure 3. Compaction curves of sand-bentonite mixtures.

can be achieved.

When additional water was added after optimum water content, the dry unit weight of the compacted sand-bentonite mixtures drastically decreased particularly at high bentonite contents (i.e., 5%, 7%, and 9%) as shown in Figure 3. The bentonite swelled further when more additional water was added. At this stage, the additional water and swelled bentonite which was lighter than sand, occupied more space in the compaction mold resulting in decreasing of the dry unit weight of the mixtures.

Shear Strength Parameters

For all bentonite contents, the direct shear test results showed that maximum shear stress of sand-bentonite mixtures increases with increasing normal stress. The corresponding horizontal strain that yielded the maximum shear stress was as low as 2% for low bentonite content mixtures and up to 6% or more for high bentonite content mixtures. As expected the smaller horizontal strain was observed for stiffer material (i.e., mixtures with low bentonite content) and higher horizontal strain was observed for softer material (i.e., mixtures with

high bentonite content). Relationships between shear stress and horizontal strain of mixture with 3% bentonite content tested as molded condition are shown in Figure 4.

The Mohr-Colomb failure envelopes, obtained by conducting linear regression of maximum shear stresses and corresponding normal stresses are shown in Figure 5. The corresponding shear strength parameters are tabulated in Table 3.

For the first set of tests, the specimens of sand-bentonite mixtures were sheared immediately after compaction. As shown in Table 3 and Figure 5a, friction angle of compacted sand-bentonite mixtures decreases with increasing bentonite content. The friction angle of the sand-bentonite mixtures decreases drastically from 56 to 37 degrees with increasing bentonite content from 0 to 5% and gradually decreases from 37 to 33 degrees with increasing bentonite content from 5 to 9%.

In contrast, the cohesion increases with increasing bentonite content. Cohesion of the sand-bentonite mixtures increases drastically from approximately 0 to 21.47 kPa with increasing bentonite content from 0 to 5% and gradually increases from 21.47 to 24.90 kPa with increasing bentonite content from 5 to 9%. The results of the

direct shear tests have shown that with only 5% of bentonite added to Songkhla sand, the properties of the sand changes from sand-like materials (e.g., high friction angle and low cohesion) to be more clay-like materials (e.g., low friction angle and high cohesion).

For the second set of tests, the compacted specimens were inundated for one week prior to shearing. Inundating specimens in the water is analogous to the soil liners in the field which are normally soaked with water. Shear strength parameters obtained from this set of test should be used in design because they closely represent field condition. The inundated specimens swelled and became looser than those tested under molded condition. The swelling of the inundated specimens was due to the increase of the thickness of diffuse double layer of the bentonite particles. Since the inundated specimens were loose, their shear strengths were less than those tested under molded condition. As shown in Table 3 and Figure 5b, the friction angle of the inundated specimens decreases with increasing bentonite content. The friction angle of the sand-bentonite mixtures decreases from 49 to 22 degrees while the bentonite content varies from 0 to 9%. Only the mixtures with 0 to 3% are still having relatively high friction angle

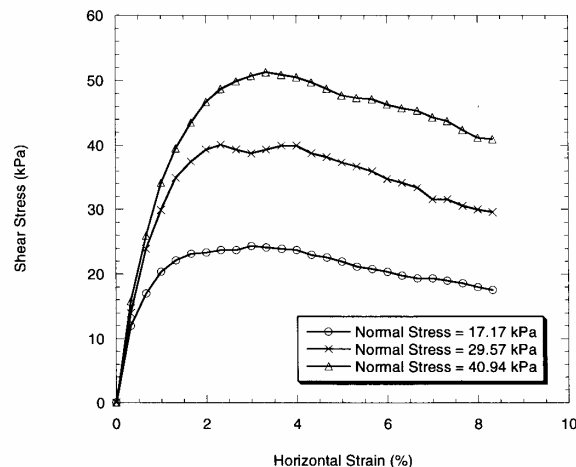


Figure 4. Stress-strain behavior of sand with 3% bentonite mixture obtained from direct shear test.

Table 3. Shear strength parameters of compacted-sand bentonite mixtures.

Bentonite Content (%)	As Molded Specimen		Inundated Specimen	
	Friction Angle (Degrees)	Cohesion (kPa)	Friction Angle (Degrees)	Cohesion (kPa)
0	56	0	49	2.85
3	47	6.43	38	12.65
5	37	21.47	30	4.84
7	35	24.11	22	5.50
9	33	24.90	22	4.72

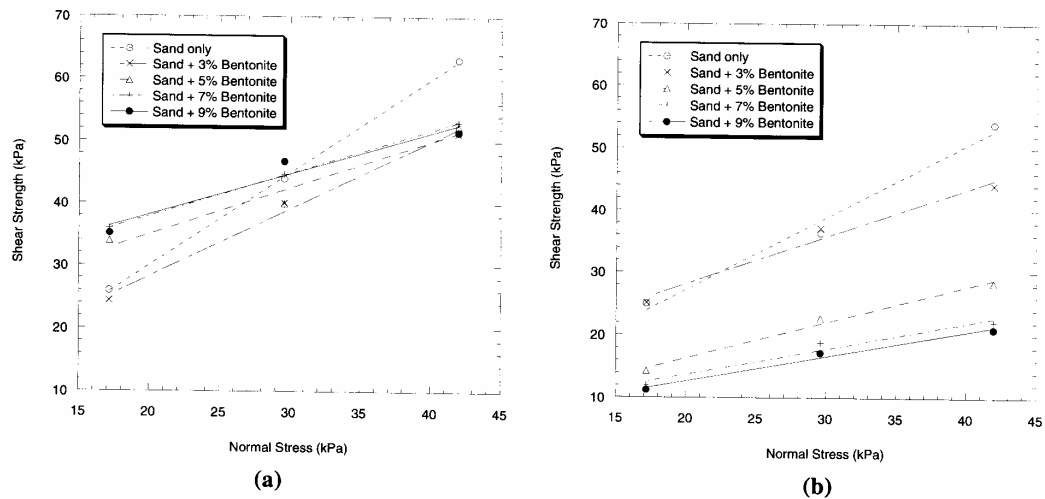


Figure 5. Mohr-Coulomb failure envelopes obtained from direct shear tests: a) as molded specimens, and b) inundated specimens.

of 49 and 38 degrees respectively; whereas, the friction angle of mixtures with high bentonite content of 7 and 9% are low because of the loosening of the mixtures due to swelling bentonite. Cohesion of the mixtures is low comparing to those tested under molded condition. The mixtures lost their cohesion because of the swell of the bentonite particles particularly at bentonite content of 5 to 9%.

Hydraulic conductivity

The hydraulic conductivity tests were conducted using rigid-wall permeameters follow-

ing procedures recommended by Daniel (1994). For all sand-bentonite mixtures, the testing process was continued until the hydraulic conductivities were reasonably constant and the rate of inflow to rate of outflow ratios were close to unity. Hydraulic conductivity test results for mixture with 3% bentonite content as a function of time are demonstrated in Figure 6. Within the first two weeks, the hydraulic conductivity and rate of inflow to rate of outflow ratio were fluctuated. After two weeks, these two values were reasonably constant which indicated that the constant flow was reached and reliable hydraulic conductivity

had been achieved. For higher bentonite contents, the time to reach constant flow was longer. For a mixture with 9% bentonite, time required to reach constant flow was about 12 weeks.

Relationship between hydraulic conductivity of sand-bentonite mixtures and percent bentonite content is shown in Figure 7. The hydraulic conductivity of sand is 3.6×10^{-3} cm/s. The hydraulic conductivity of sand-bentonite mixtures decreases with increasing bentonite content. The hydraulic conductivity reduces about four orders of magnitude with the bentonite content of 5% or more. For bentonite contents of 3 and 5%, the hydraulic conductivity of the mixtures decreases significantly to 5.13×10^{-8} and 5.15×10^{-9} cm/s, respectively. Further increase of bentonite content above 5% does not make significant reduction of hydraulic conductivity. For mixtures with 7 to 9% bentonite content, as shown in Figure 7, the hydraulic conductivities of sand-bentonite mixtures were 4.89×10^{-9} and 4.13×10^{-9} cm/s, respectively. The common regulatory requirement for compacted soil liners states that the hydraulic conductivity should be less than 1×10^{-7} cm/s. Thus, the compacted sand-bentonite mixtures with only 3% bentonite or more are adequate to use as liners.

Relationship between swell and bentonite content is shown in Figure 7. For sand without bentonite, very small swell of 0.85% was observed. The swell of sand-bentonite mixtures significantly increases with increasing the bentonite content from 0 to 5%. The swells of mixtures with 3 and 5% bentonite were 4.30 and 9.46%, respectively. Addition of bentonite content above 5% did not increase swell of the mixtures. As shown in Figure 7, the swells of mixtures with 7 and 9% bentonite content are approximately the same at 10.32%.

The hydraulic conductivities of sand-bentonite mixtures are significantly related to their swell. As shown in Figure 7, for bentonite content up to 5%, the hydraulic conductivity significantly decreases whereas, the swell significantly increases. For bentonite content greater than 5%, the swell nearly ceases to increase and so does hydraulic conductivity.

The hydraulic conductivity of sand-bentonite mixtures was less than that of the sand without bentonite. Sand particles with bentonite adhered on their surface filled up the voids between particles resulting in smaller water flow path and decreased hydraulic conductivity. Scanning Electron Microscope (SEM) pictures with 1500 times magnifica-

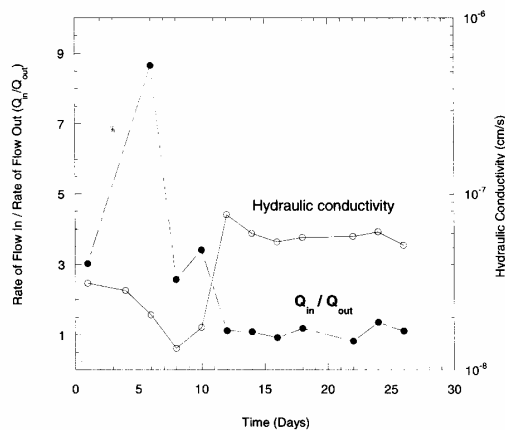


Figure 6. Ratio of inflow to outflow and hydraulic conductivity vs. time of sand with 3% bentonite mixture.

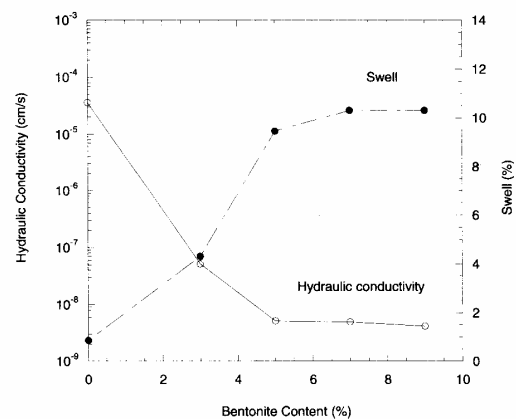


Figure 7. Hydraulic conductivity and swell vs. bentonite content of sand-bentonite mixtures.

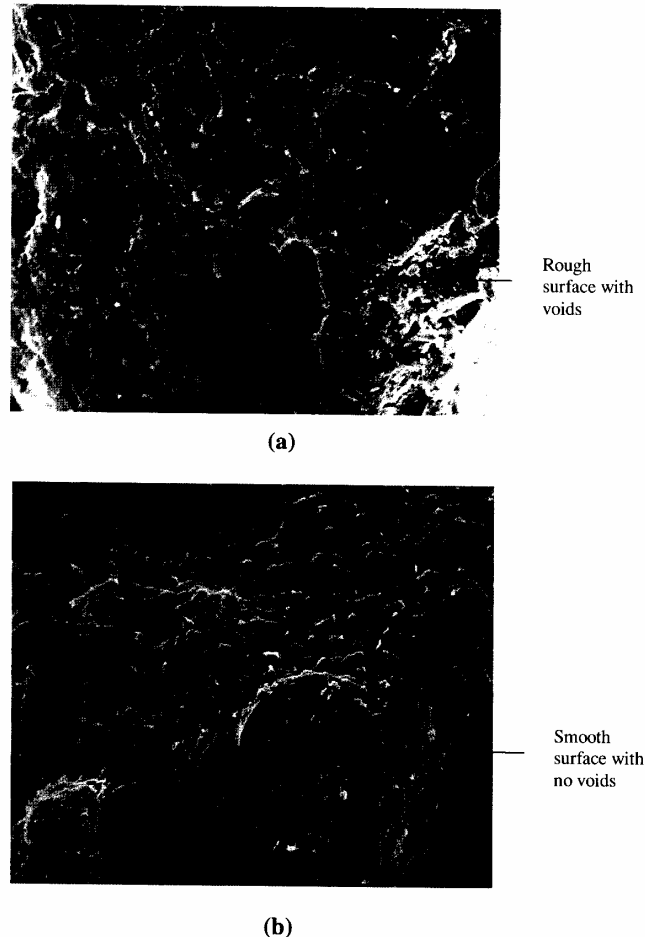


Figure 8. Scanning electron microscopy pictures with 1500 times magnification: (a) sand surface (b) sand surface with bentonite.

tion of sand surface (Figure 8a) and sand surface with the adhered bentonite (Figure 8b) shows that the sand surface was rough and full of voids. On the other hand, sand surface with the adhered bentonite was smooth and voids were filled.

Chemical resistance of the sand-bentonite mixtures was not considered in this study. Permeating sand-bentonite mixtures with high concentration solutions may results in increasing hydraulic conductivity of the mixtures. In addition, solute transport through sand-bentonite mixtures

was not included in this study. Additional tests are being conducted to cover these issues in order to assess the suitability of using sand-bentonite mixtures in liners that might face with many kinds of solutions such as landfill liners.

Conclusions

The properties of compacted sand-bentonite mixtures were assessed by conducting a series of tests. From these tests, the following conclusions

can be drawn.

1. Maximum dry unit weight decreases and optimum water content decreases with increasing bentonite content of the compacted sand-bentonite mixtures. Compaction test results show that when bentonite content varied from 0 to 9%, the maximum dry unit weight decreases from 19.47 to 18.56 kN/m³ and the corresponding optimum water content increases from 9 to 12%.

2. When varying bentonite content from 0 to 9%, the friction angle of the sand-bentonite mixtures of the inundated specimen decreases drastically from 49 (very dense) to 22 degrees (very loose). The friction angle of the compacted sand-bentonite mixtures that were inundated for one week prior to shearing was less than that of specimens tested under molded condition because of the swell of the bentonite.

3. Hydraulic conductivity of the sand-bentonite mixtures decreases with increasing bentonite content. The hydraulic conductivity decreases approximately four orders of magnitude when 5% bentonite content or more are used.

4. Hydraulic conductivity of the sand-bentonite mixtures is related to the swell of the mixtures. As swell increases, the hydraulic conductivity decreases. Use of bentonite content more than 5% does not significantly decrease hydraulic conductivity of the mixtures. In contrast, adding bentonite content more than 5% results in lower shear strength and higher swell of the mixtures.

5. The common regulatory requirement for compacted soil liners states that the hydraulic conductivity should be less than 1×10^{-7} cm/s. Thus, compacted sand-bentonite mixtures with 3% bentonite content compacted at about 2% wet of optimum water contents are qualified for use as liners in hydraulic containment applications with relatively high friction angle of 38 degrees.

Acknowledgement

Financial support for this study is provided by Thailand Research Fund. This support is gratefully acknowledged. The authors also would like to thank Ms. Nantanit Chidthaisong and Mr. Pholwat Kongsom for their assistance in conducting tests. In addition, the authors would like to thank anonymous readers for their valuable comments.

References

- Daniel, D.E. 1994. State of the art: Laboratory hydraulic conductivity tests for saturated soils, Hydraulic conductivity and waste containment transport in soil, ASTM STP 1142, ASTM, 30-78.
- Dunkhin, S.S., and Derjaguin, B.V. (eds) 1974. Electrokinetic Phenomena, John Wiley & Sons, New York.
- Freeze, R.A., and Cherry, J.A. 1979. Groundwater, Prentice Hall, New Jersey.
- Grim, R., and Guven, N. 1978. Bentonite: Geology, Mineralogy, Properties, and Uses, Elsevier Science Publishing, New York.
- Gleason, M.H., Daniel, D.E., and Eykholt, G.R. 1997. Calcium and Sodium Bentonite for Hydraulic Containment Applications, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 123(5):438-445.
- Holtz, R.D., and Kovac, W.D. 1981. An Introduction to Geotechnical Engineering, Prentice Hall, New Jersey.
- Hunter, R.J. 1981. Zeta Potential in Colloid Science, Academic Press, Inc., New York.
- Mitchell, J.K. 1993. Fundamental of Soil Behavior, 2nd ed., John Wiley & Sons, New York.
- Shackelford, C.D. 1994. Waste Soil Interactions that Alter Hydraulic Conductivity, Hydraulic Conductivity and Waste Containment Transport, ASTM STP 1142, D.E. Daniel and S.J. Trautwein, eds., ASTM, West Conshohocken, Pa., 111-168.

ภาคผนวก ข

พารามิเตอร์การเคลื่อนที่และการดูดโลหะหนักติดผิวของดินลูกรังบดอัด

พารามิเตอร์การเคลื่อนที่และ การดูดโลหะหนักติดผิวของดินลูกรังบดอัด*

ธนิต เกลิมยานนท์¹⁾ สุรพล อารีย์กุล²⁾ และ นันทนิตย์ เจริญไธสง³⁾

¹⁾ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ 90112

²⁾ รองศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ 90112

³⁾ นักศึกษาระดับปริญญาตรี คณะการจัดการสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ 90112

Email : tanit.c@psu.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้ทดสอบหาคุณสมบัติหลายประการของดินลูกรังบดอัดโดยเน้นที่พารามิเตอร์การเคลื่อนที่และการดูดติดผิวของโลหะหนัก ผลการทดสอบชี้ให้เห็นว่า ดินลูกรังเป็นดินเหนียวที่มีความเป็นพลาสติกต่ำ มีความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุต่ำ และมีความเป็นกรดเล็กน้อย โดยมีค่า pH เท่ากับ 5.5 ดินลูกรังมีสีน้ำตาลแดงเนื่องจากมีปริมาณเหล็กสูง ค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดและความชื้นที่เหมาะสมในการบดอัดเท่ากับ 1.7 g/cm³ และ 18% ตามลำดับ ผลการทดสอบแบบแบทช์สอดคล้องกับสมการไอโซเทอมของ Freundlich ความสามารถดูดติดผิวของดินลูกรังเมื่อทดสอบกับสารละลายโลหะหนักเรียงจากมากได้แก่ Cr³⁺, Pb²⁺, Ni²⁺, Zn²⁺, and Cd²⁺ ตามลำดับ ค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่านของดินลูกรังบดอัดมีค่าจาก 4.0x10⁻⁸ ถึง 5.0x10⁻⁸ cm/s การทดสอบหาความต้านทานสารเคมีของค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่านพบว่า ค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่านของดินลูกรังบดอัดมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อทดสอบด้วยสารละลายโครเมียมที่มีความเข้มข้นมากกว่า 0.001 M. Breakthrough ของสารละลายโลหะหนักจากการทดลองแบบสแตมภ์มีผลสอดคล้องกับค่าความสามารถการดูดติดผิวที่ได้จากการทดสอบแบบแบทช์ ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่และแฟกเตอร์ความหน่วงถูกคำนวณโดยการฟิต Breakthrough curves กับสมการการเคลื่อนที่ของสารละลายในดิน และสามารถนำไปใช้ในการออกแบบความหนาของชั้นกันซึมในสถานที่ฝังกลบขยะมูลฝอยได้

คำสำคัญ : โลหะหนัก, สัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่าน, แฟกเตอร์ความหน่วง, สัมประสิทธิ์การแพร่, ดินลูกรัง, การดูดติดผิว, ชั้นกันซึม

* รับต้นฉบับเมื่อวันที่ 5 ตุลาคม 2549 และได้รับบทความฉบับแก้ไขเมื่อวันที่ 8 มกราคม 2550

Transport Parameters and Heavy Metal Adsorption of a Compacted Lateritic Soil^{*}

Tanit Chalermyanont¹⁾ Surapon Arrykul²⁾ and Nantanit Charoenthaisong³⁾

¹⁾ Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Prince of Songkla University 90112

²⁾ Associate Professor, Department of Mining and Materials Engineering, Faculty of Engineering, Prince of Songkla University 90112

³⁾ Graduate Student, Faculty of Environmental Management, Prince of Songkla University 90112

Email: tanit.c@psu.ac.th

ABSTRACT

A series of tests were conducted to assess properties of Kor Hong lateritic soil, particularly transport parameters and heavy metal adsorption. Experimental results indicate that the soil was low plasticity clay with low cation exchange capacity and slightly acidic with pH of 5.5. The soil was reddish brown in color due to high iron content. Maximum dry density and optimum water content of the soil were 1.7 g/cm³ and 18%, respectively. Freundlich isotherm was found to fit well with batch adsorption test results. Heavy metal adsorption capacities of the soil ranked from the highest were Cr³⁺, Pb²⁺, Ni²⁺, Zn²⁺, and Cd²⁺, respectively. Hydraulic conductivity of the soil ranged from 4.0x10⁻⁸ to 5.0x10⁻⁸ cm/s when permeated with deionized water. Chemical compatibility test results show that the hydraulic conductivities increased with time when permeated with chromium solutions having concentrations greater than 0.001 M. Breakthrough points of heavy metal solutions obtained from column tests were consistent with adsorption capacities obtained from batch adsorption tests. Diffusion coefficient and retardation factor of the soil were calculated by fitting breakthrough curves with a transport equation. These parameters can be used for calculating a thickness of landfill liners.

Keywords : heavy metal, hydraulic conductivity, retardation factor, diffusion coefficient, lateritic soil, adsorption, landfill liner

^{*} Original manuscript submitted: October 5, 2006 and Final manuscript received: January 8, 2007

บทนำ

การขยายตัวทางอุตสาหกรรมและการทำเหมืองแร่ทำให้เกิดการนำโลหะหนักเข้าสู่สิ่งแวดล้อมทั้งในอากาศ ในน้ำ และในดิน นอกจากนั้นโลหะหนักเช่น Cd^{2+} , Zn^{2+} , Pb^{2+} และ Cr^{3+} สามารถพบได้ในน้ำชะมูลฝอยชุมชน (USEPA 1986, Ou 1989) ขยะชุมชน ขยะอุตสาหกรรม หรือขยะอันตรายในสถานที่ฝังกลบมูลฝอยมีน้ำชะมูลฝอยที่อาจรั่วซึมเป็นสารปนเปื้อนลงสู่ชั้นน้ำใต้ดินได้ (Ernst 1995) ชั้นกันซึมซึ่งก่อสร้างจากวัสดุที่บดน้ำในบ่อฝังกลบมูลฝอยทำหน้าที่ป้องกันการไหลของสารปนเปื้อนที่อยู่ในน้ำชะมูลฝอยลงสู่ชั้นน้ำใต้ดิน การใช้ดินเหนียวบดอัดซึ่งเป็นวัสดุธรรมชาติและมีราคาถูกเมื่อสามารถหาได้ในท้องถิ่นเป็นวัสดุกันซึมในสถานที่ฝังกลบจะช่วยในการลดการเคลื่อนที่ของสารละลายโลหะหนักได้ในน้ำชะมูลฝอยได้ (Li และ Li 2001) ดินเหนียวบดอัดที่เหมาะสมกับการใช้เป็นวัสดุกันซึมต้องมีค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่าน (Hydraulic Conductivity, K) ต่ำกว่า 1×10^{-7} cm/s (Gleason และ คณะ 1997) นอกจากนั้น คุณสมบัติทางเคมีบางประการทางเคมีของดิน ทำให้เกิดการหน่วง (Retardation) และการแพร่กระจาย (Diffusion) ของสารปนเปื้อนในน้ำได้ พารามิเตอร์ที่แสดงถึงคุณสมบัติดังกล่าวเรียกว่า พารามิเตอร์การเคลื่อนที่ (Transport Parameters) อันได้แก่ สัมประสิทธิ์การแพร่ (Diffusion Coefficient, D), แฟคเตอร์การหน่วง (Retardation Factor, R)

การเลือกใช้วัสดุกันซึมจะต้องคำนึงถึงความเหมาะสมหลายด้าน ดินเหนียวท้องถิ่นที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติก็สามารถนำมาใช้เป็นชั้นกันซึมตามธรรมชาติได้ (Amatya และ Takemura, 2002) ดินเหนียวที่เหมาะสมที่จะทำเป็นชั้นกันซึมสำหรับสารละลายโลหะหนักได้ต้องมีคุณสมบัติที่สำคัญ 2 ประการคือ ต้องสามารถมีค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่านที่คงที่เมื่อสารละลายโลหะหนักไหลผ่าน และต้องมีความสามารถที่จะหน่วงการเคลื่อนที่ของสารละลายโลหะหนักได้ (Li และ Li 2001) ในประเทศไทยนิยมใช้ดินลูกรัง (Lateritic soil) เป็นดินถมสำหรับงานก่อสร้างถนนเนื่องจากดินลูกรังหาได้ง่ายในท้องถิ่นและสามารถนำมาบดอัดให้แน่นได้ดี การวิจัยครั้งนี้ ได้ศึกษาคุณสมบัติพื้นฐานของดินลูกรัง โดยทำการทดลองแบบแบทช์เพื่อศึกษาความสามารถในการดูดติดผิว ทำการทดลองแบบสแตมภ์เพื่อศึกษาพารามิเตอร์การเคลื่อนที่ และ ทำการทดลองหาผลกระทบของความเข้มข้นของสารละลายโลหะหนักต่อค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่าน เพื่อนำไปประกอบการศึกษาความเหมาะสมของการใช้ดินลูกรังบดอัดเป็นชั้นกันซึมสำหรับสารละลายโลหะหนัก

การเคลื่อนที่ของสารละลายในดิน

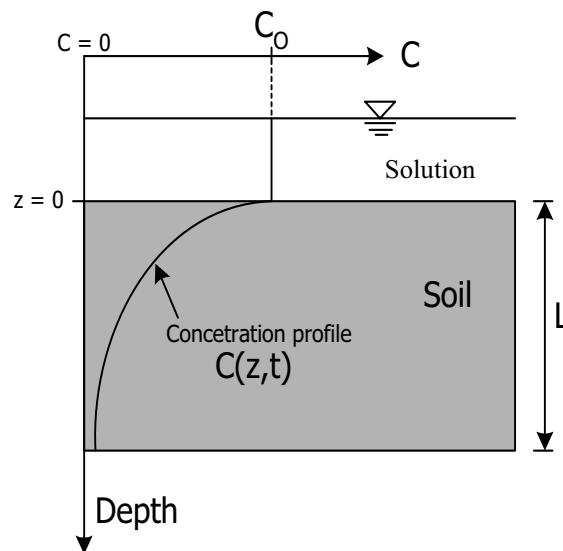
การเคลื่อนที่ของสารละลายอนินทรีย์ในดินขึ้นอยู่กับเคลื่อนที่แบบการพา (Advective transport) การเคลื่อนที่แบบการแพร่ (Diffusive transport) และปฏิกิริยาทางเคมีระหว่างดินกับสารละลาย เช่น การดูดติดผิว (Adsorption) เป็นต้น โพรไฟล์ของความเข้มข้น (รูปที่ 1) แสดงความเข้มข้นของสารละลาย (C) ที่ความลึก (z) และเวลา (t) ในดิน ซึ่งสามารถอธิบายได้โดยสมการการเคลื่อนที่ของสารละลายในดินได้ดังต่อไปนี้

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{D}{R} \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} - \frac{v_s}{R} \frac{\partial C}{\partial z} \quad (1)$$

เมื่อ v_s คืออัตราการไหลซึม (Seepage velocity) = Ki/n โดย i คือความชันชลศาสตร์ (Hydraulic gradient) และ n คือความพรุนของดิน คำตอบของสมการที่ 1 ถูกพัฒนาโดย Ogata และ Banks (1961) แล้วถูกดัดแปลงให้เหมาะสมกับการใช้งานของชั้นกันซึมโดย Shackelford (1990) ในรูปของ อัตราส่วนของความเข้มข้น (C) ต่อความเข้มข้นเริ่มต้น (Initial concentration, C_0) หรือที่เรียกว่า ความเข้มข้นสัมพัทธ์ (Relative concentration) ดังต่อไปนี้

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

โดยที่ T_R คือ เฟคเตอร์ของเวลา (Time Factor) = $\frac{v_s t}{Rz}$, P_L คือ พิกเลย์นัมเบอร์ (Peclet Number) = $\frac{v_s z}{D}$, $R = 1 + \frac{\rho_d K_p}{n}$, ρ_d คือ ความหนาแน่นแห้งของดิน และ K_p คือสัมประสิทธิ์พาร์ทิชัน (Partitioning coefficient)



รูปที่ 1 ความเข้มข้นของสารละลายในดิน

วัสดุและวิธีการศึกษา

ดินลูกรัง

ดินลูกรังที่ใช้ในการทดสอบเป็นดินลูกรังจากเขาคองหงส์ สวนสาธารณะนครหาดใหญ่ อำเภอหาดใหญ่ จังหวัดสงขลา โดยดินลูกรังคองหงส์เป็นดินที่เกิดในที่ (Residual soil) ซึ่งเกิดจากการผุพังในที่ของหินเนื่องจากกระบวนการเคมี-ฟิสิกส์ (Osinubi และ Nwaiwu 2006) ดินลูกรังคองหงส์มีสีน้ำตาลแดง ดินลูกรังตัวอย่างได้เก็บจากความลึกประมาณ 0.5 – 1.0 เมตรจากผิวดินเพื่อหลีกเลี่ยงวัสดุอินทรีย์อื่นๆ ที่ผิวดิน และถูกอบแห้ง เพื่อเตรียมพร้อมสำหรับการทดลองต่อไป

การทดสอบคุณสมบัติพื้นฐาน

การหาคุณสมบัติพื้นฐานของดินลูกรังประกอบด้วย การทดสอบหา ค่า Atterberg's limits (ASTM D4318) อันได้แก่ พิกัดความเหลวของดิน (Liquid limit) และ พิกัดพลาสติก (Plastic limit) ค่า pH ค่าปริมาณสารอินทรีย์ ค่าประจุบวกที่แลกเปลี่ยนได้ (Exchangeable cations) ค่าส่วนประกอบของแร่ธาตุต่างๆโดยวิธี X-Ray Fluorescence Spectroscopy (XRF) ค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดและปริมาณความชื้นที่เหมาะสมในการบดอัด โดยวิธีบดอัดแบบมาตรฐาน (Standard Proctor, ASTM D698) และ ค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่าน โดยวิธีระดับน้ำแปรเปลี่ยน (Falling head method, ASTM D2434) หรือ วิธีระดับน้ำคงที่ (Constant head method, ASTM D5084) โดยใช้ที่ใส่ตัวอย่างผนังแข็ง (Rigid wall permeameter) ในการทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่านได้ใช้ตัวอย่างดินลูกรังซึ่งถูกบดอัดโดยวิธีมาตรฐานโดยใช้ปริมาณน้ำมากกว่าปริมาณน้ำที่เหมาะสม 2% ซึ่งเป็นปริมาณน้ำที่ให้ค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่านต่ำที่สุดตามคำแนะนำของ Benson and Dancil (1990).

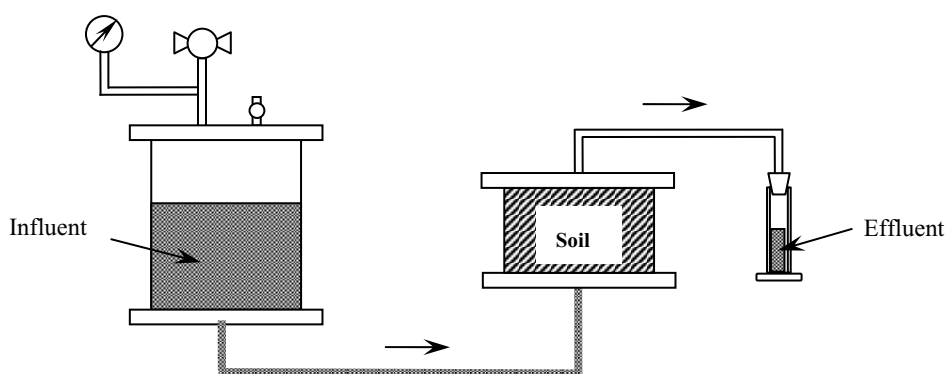
การทดสอบแบบแบทช์

การทดสอบการดูดซับแบบแบทช์ (Batch adsorption test) ถูกนำมาใช้หาคุณสมบัติการดูดซับของดินลูกรังคองหงส์กับสารละลายโลหะหนัก 5 ชนิด ได้แก่ แคดเมียม, ตะกั่ว, สังกะสี, โครเมียม และ นิกเกิล จากเตรียมโดยการละลาย CdCl_2 , PbCl_2 , ZnCl_2 , $\text{CrCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ และ $\text{NiCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ด้วยน้ำ DI (Deionized water) การทดลองเริ่มต้นจากนำดินลูกรังคองหงส์ที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 200 หน้า 1 g มาใส่ในขวด Centrifuge ขนาด 30 mL หลังจากนั้นนำสารละลายโลหะหนักปริมาตร 25 mL ที่เตรียมไว้มาผสม แล้วนำไปเขย่าทันที ด้วยเครื่องเขย่า ที่ความเร็วรอบ 300 rpm เป็นเวลา 24 ชั่วโมงเพื่อให้โลหะหนักถูกดูดซับที่ผิวดินลูกรัง หลังจากนั้นจะนำดินผสมสารละลายไปปั่นดินและสารละลายโลหะหนักแยกชั้นกัน ด้วยเครื่อง Centrifuge Sorwall Super T21 ที่ความเร็วรอบประมาณ 4,000-8,000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 10 นาที ที่อุณหภูมิ 20°C แล้วนำสารละลายโลหะหนักที่แยกจากชั้นดินอยู่ด้านบนของหลอดทดลอง ไปเจือจางแล้ววิเคราะห์หาความเข้มข้นสุดท้ายของโลหะหนักด้วยเครื่อง Flame atomic absorption spectrophotometer ยี่ห้อ Varian รุ่น 220A Australia หลังจากนั้นทำการทดลองแบบแบทช์

ซ้ำโดยเปลี่ยนความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายโลหะหนัก โดยความเข้มข้นที่ใช้จะอยู่ในช่วง 0.0089 ถึง 20.3839 mmol/L หรือ 1 ถึง 4,000 mg/L (Li และ Li, 2001) สำหรับแต่ละชนิดของสารละลายจะใช้ความเข้มข้นเริ่มต้นที่แตกต่างกันประมาณ 12 ค่า ดังนั้นการศึกษาครั้งนี้ได้ทำการทดลองแบบแบทช์ทั้งหมดรวม 60 ครั้ง

การทดสอบแบบสดมภ์

การทดสอบแบบสดมภ์ (Column test) ถูกนำมาใช้หาค่าพารามิเตอร์การเคลื่อนที่ โดยเตรียมตัวอย่างดินลูกรังคอหงส์ โดยใช้ปริมาณความชื้นที่มากกว่าปริมาณความชื้นที่เหมาะสม 2% เก็บไว้ในถุงพลาสติก 24 ชั่วโมง เพื่อให้ความชื้นกระจายทั่วมวลดิน จากนั้นนำดินไปบดอัดตามมาตรฐาน Standard Proctor compaction (ASTM D698) ใน Mold ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 4 นิ้ว สูง 2 นิ้ว โดยใช้เครื่องบดอัดอัตโนมัติ (ELE Automatic compactor) จากนั้นนำดินที่บดอัดแล้วพร้อม Mold ไปปิดด้วยแผ่นสแตนเลส ที่มีวาล์วให้น้ำเข้าออกทั้งด้านบนและด้านล่างแล้วเติมน้ำกลั่นให้ไหลผ่านเข้าไปในดินจากด้านล่างและไหลออกทางด้านบน โดย Mold ที่ใช้ในการบดอัดทำหน้าที่เป็นสดมภ์ ภาพแสดงการทดสอบสดมภ์ ได้แสดงไว้ในรูปที่ 2 สำหรับการทดสอบสดมภ์ในการศึกษาครั้งนี้มีการทดลองด้วยน้ำ DI ก่อนเปลี่ยนเป็นสารละลายโลหะหนัก เนื่องจากการเติมน้ำก่อนเติมสารละลายโลหะหนักจะทำให้ดินตัวอย่างมีค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่านต่ำกว่า การทดลองด้วยสารละลายโลหะหนักเพียงอย่างเดียวตามหลักการของ First exposure effect (Fernandez และ Quigley, 1985)



รูปที่ 2 อุปกรณ์การทดสอบแบบสดมภ์

เนื่องจากดินลูกรังคอหงส์บดอัดมีสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่านต่ำและมีการหน่วงสารละลายโลหะหนัก จึงมีการใช้ความดันที่สูงพอเพื่อให้สารละลายไหลออกจากตัวอย่างในเวลาที่เหมาะสม โดยใช้ความดันคงที่เท่ากับ 50 kPa หรือเทียบเท่ากับค่าความชันชลศาสตร์ (Hydraulic gradient) เท่ากับ 88.65 (Cabral 1992) การปรับความดันเริ่มต้นจากเพิ่มความดันครั้งละ 10 kPa รวม 5 ครั้ง โดยแต่ละครั้งจะรักษาความดันไว้ 24 ชั่วโมง เพื่อไล่อากาศในดินและเพื่อให้ น้ำไหลเข้าไปในตัวอย่างดินด้วยอัตราเร็วคงที่ ตวงปริมาตรน้ำที่ไหลผ่านดินตัวอย่างออกมาเทียบกับเวลา แล้วนำไป

คำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่านโดยวิธีความดันคงที่ รอจนให้อัตราการไหลของน้ำที่เข้าไปในตัวอย่างดินเท่ากับอัตราการไหลของน้ำออกดิน และค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่านคงที่ แล้วจึงเปลี่ยนสารที่ไหลผ่านดินตัวอย่างจากน้ำเป็นสารละลายโลหะหนัก

สารละลายโลหะหนักที่ใช้เป็นสารละลายผสม ซึ่งเตรียมจากการละลาย CdCl_2 , PbCl_2 , ZnCl_2 และ $\text{NiCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ด้วยน้ำ DI แล้วนำมาผสมกัน และโดยในสารละลายผสมนี้มีความเข้มข้นของ แคดเมียม, ตะกั่ว, สังกะสี และ นิกเกิล อย่างละ 0.001 M หรือ 112.42 mg/L, 207.26 mg/L, 65.39 mg/L, และ 58.87 mg/L ตามลำดับ หลังการเติมสารละลายแล้วจึงทำการเก็บตัวอย่างน้ำที่ไหลผ่านตัวอย่างดินออกมา (Effluent) ตามเวลา โดยเก็บทุกๆ 2-3 วัน ทำการรักษาตัวอย่างน้ำด้วยการเติมกรด HNO_3 โดยให้มี pH ของตัวอย่างน้ำต่ำกว่า 2 แล้วเก็บตัวอย่างไว้ที่อุณหภูมิ 4 °C เพื่อนำไปวิเคราะห์หาความเข้มข้นของโลหะหนักด้วยเครื่อง Flame atomic absorption spectrophotometer ยี่ห้อ Varian รุ่น 220A Australia ต่อไป

การทดสอบความต้านทานสารเคมี

การทดสอบหาความต้านทานสารเคมี (Chemical compatibility) ของค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่านของดินลูกรัง มีวัตถุประสงค์เพื่อตรวจสอบว่า ดินลูกรังจะมีความสามารถทนสารละลายโลหะหนักที่มีความเข้มข้นสูงมากเท่าไรก่อนที่จะค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่านจะสูงขึ้นจนไม่สามารถใช้เป็นชั้นกันซึมได้ การตรวจสอบความต้านทานสารเคมีของดินลูกรังทำได้โดยเตรียมดินตัวอย่างโดยวิธีเดียวกับการเตรียมดินตัวอย่างในการทำการทดสอบสมรรถนะแต่ใช้ Mold สูง 4 นิ้ว นำดินที่บดอัดแล้วไปทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่าน โดยวิธีระดับน้ำแปรเปลี่ยน โดย Mold ที่ใช้ในการบดอัดดินทำหน้าที่เป็นที่ใส่ตัวอย่างผนังแข็ง ในการทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่าน ทำได้โดยให้น้ำ DI ไหลผ่านดินตัวอย่างก่อนจนกระทั่งค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่านที่คำนวณได้มีค่าคงที่ จึงทำการเปลี่ยนสารที่ใช้ทดสอบมาเป็นสารละลาย Cr^{3+} สาเหตุที่เลือกสารละลาย Cr^{3+} ในการทดสอบนี้ก็เพราะว่า โลหะหนักที่มีประจุบวกมากจะทำให้ Diffused double layer ซึ่งเป็นแฟกเตอร์สำคัญที่มีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่านมีขนาดเล็กลง ทำให้มีค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่านมีค่าสูงขึ้นเมื่อเทียบกับโลหะหนักที่มีประจุน้อยกว่า (Mitchell 1976, Mathew และ Rao 1997, Jo และ คณะ 2001) ค่าความชันชล-ศาสตร์ที่ใช้ในการทดสอบโดยวิธีระดับน้ำแปรเปลี่ยนนี้ไม่เกิน 20 ดินตัวอย่างทั้งหมด 5 ตัวอย่าง ถูกทดสอบกับสารละลายโครเมียมที่มีความเข้มข้น 5 ระดับ จาก 0.0001 M, 0.001 M, 0.01 M, 0.1 M และ 1.0 M ค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่านของดินทั้ง 5 ตัวอย่างถูกบันทึกค่าทุกๆ 2 – 3 วัน ในช่วงเวลาทดสอบรวมประมาณ 500 วัน

ผลการศึกษา

คุณสมบัติของดินลูกรังคองหงส์

ผลการทดสอบหาคุณสมบัติของดินลูกรังคองหงส์ได้แสดงไว้ในตารางที่ 1 ดินลูกรังคองหงส์มีสีน้ำตาลแดง มีค่าพิกัดความเหลวและดัชนีความเหลวเท่ากับ 43.0% และ 21.8% ตามลำดับ ปริมาณดินที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 200 เท่ากับ 56 % ดังนั้นดินลูกรังคองหงส์สามารถจำแนกได้เป็น ดินเหนียวที่มีความเป็นพลาสติกต่ำ (Low plasticity clay, CL) ตามการจำแนกแบบ Unified soil classification system ผลการทดสอบการบดอัดพบว่า ค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุด (Maximum dry density) และค่าความปริมาณความชื้นที่เหมาะสม (Optimum water content) เท่ากับ 1.7 g/cm³ และ 18.0% ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับผลการจำแนกชนิดของดิน เนื่องจากดินเหนียวมีค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดที่ต่ำและมีค่าความปริมาณความชื้นที่เหมาะสมที่สูง

Soil Properties	
USCS Classification	CL
Color	Reddish brown
Liquid limit (L.L.) (%)	43.00
Plasticity index (P.I.) (%)	21.80
Percent passing sieve #200	56.00
Maximum dry density (g/cm ³)	1.70
Optimum water content (%)	18.00
pH	5.52
Organic content (%w/w)	4.92
SO ₄ ²⁻ (mg/kg)	822.82
Cl ⁻ (mg/kg)	100.75
Exchangeable Cations	
Na ⁺ (meq/100g)	0.87
K ⁺ (meq/100g)	0.26
Ca ²⁺ (meq/100g)	3.49
Mg ²⁺ (meq/100g)	1.00
Chemical Compositions	
SiO ₂ (%)	45.37
Al ₂ O ₃ (%)	28.69
Fe ₂ O ₃ (%)	17.32
K ₂ O (%)	6.46
SO ₃ (%)	0.18
CaO (%)	0.36

ตารางที่ 1 คุณสมบัติของดินลูกรังคองหงส์

ค่า pH ของดินลูกรังคองหังมีค่าเท่ากับ 5.52 แสดงให้เห็นว่าดินมีลักษณะเป็นกรดเล็กน้อย และมีปริมาณสารอินทรีย์เล็กน้อยที่ประมาณ 4.9% ค่าความสามารถแลกเปลี่ยนประจุบวกค่อนข้างต่ำสังเกตได้จากค่าประจุบวกที่แลกเปลี่ยนได้ (Exchangeable cation) ของดินลูกรังที่มีค่าน้อย (ตารางที่ 1) ผลการตรวจสอบปริมาณองค์ประกอบทางเคมี พบว่า ดินลูกรังประกอบด้วย Silica และ Alumina เป็นหลัก และมีปริมาณเหล็กมากเนื่องจากกระบวนการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพและเคมีจากหินจนกลายเป็นดิน

คุณสมบัติการดูดซับโลหะหนัก

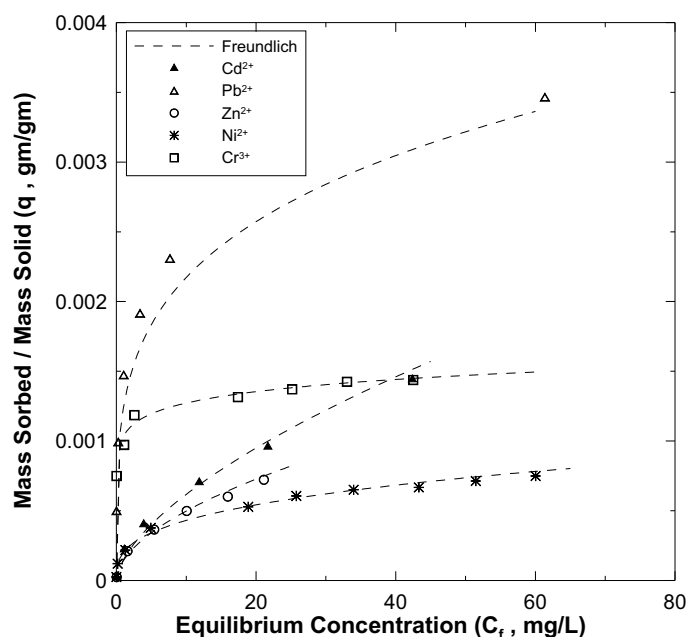
ผลการทดลองจากการทดลองแบบแบทช์ เพื่อศึกษาคุณสมบัติการดูดซับโลหะหนักของดินลูกรัง (รูปที่ 3) ได้แสดงไว้ในรูปของไอโซเทอม ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของมวลโลหะหนักที่ถูกดูดซับต่อมวลของดินลูกรังที่ใช้ในการทดสอบ (q) และความเข้มข้นสุดท้ายของสารละลายโลหะหนักเมื่อกระบวนการดูดซับสมดุลแล้ว (Equilibrium concentration, C_f) สมการไอโซเทอมของ Freundlich ถูกใช้เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่าง q และ C_f ของผลการทดลองแบบแบทช์ พารามิเตอร์ของ Freundlich ที่ได้จากการฟิต อันได้แก่ สมประสิทธิ์พาร์ทิชันของ Freundlich (K_f) และ Correction factor ($1/n$) ดังแสดงไว้ในตารางที่ 2 ไอโซเทอมของดินลูกรังกับสารละลายโลหะหนักทั้ง 5 ชนิด สอดคล้องอย่างดีกับสมการของ Freundlich โดยมีค่า R^2 อยู่ในช่วง 0.966 ถึง 0.997

สำหรับสารละลายโลหะหนักที่ความเข้มข้นต่ำ ($C_f < 5 \text{ mg/L}$) ไอโซเทอมในส่วนนี้จะประมาณได้ว่ามีลักษณะเป็นเส้นตรง (Fetter, 1993) เมื่อฟิตไอโซเทอมส่วนนี้ด้วยสมการเส้นตรง ความชันของสมการเส้นตรงที่ได้คือ สมประสิทธิ์พาร์ทิชัน (K_p) และได้แสดงไว้ในตารางที่ 2 ในขณะที่ค่าความสามารถในการดูดซับโลหะหนักของดินลูกรังได้แสดงไว้ในเทอมของค่า Adsorption capacity ซึ่งประมาณจากค่า q ที่สูงที่สุดในแต่ละการทดสอบ ค่า Adsorption capacity ได้แสดงไว้ในตารางที่ 2 ค่า Adsorption capacity แสดงให้เห็นว่า ความสามารถในการดูดซับโลหะหนักติดผิวของดินลูกรังจากมากที่สุดไปน้อยที่สุดในหน่วย $\text{meq}/100\text{g}$ มีได้แก่ Cr^{3+} , Pb^{2+} , Ni^{2+} , Zn^{2+} , และ Cd^{2+} ตามลำดับ

พารามิเตอร์การเคลื่อนที่

สมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่าน

ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่านของดินลูกรังกับเวลาหรือ Pore volume of effluent (PVE) จากการทดสอบแบบสดมภ์ได้แสดงไว้ในรูปที่ 4 โดยใช้น้ำ DI ในการไหลซึมผ่านดินลูกรังในตอนเริ่มการทดลองแล้วเปลี่ยนเป็นสารละลายผสมผ่านภายหลัง ค่าสมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่านของดินลูกรังที่ไหลผ่านด้วยน้ำ มีค่าอยู่ในช่วง $4.30 \times 10^{-8} - 5.0 \times 10^{-8} \text{ cm/s}$ เมื่อครบสองสัปดาห์ปริมาณน้ำที่ไหลเข้าและออกจากตัวอย่างมีค่าใกล้เคียงกัน จึงเปลี่ยนเป็นสารละลายผสม ค่าสมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่านของดินลูกรังค่อยๆ เพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ จนคงที่และมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ $7.58 \times 10^{-8} \text{ cm/s}$ จนจบการทดลองที่ 191 วัน หรือ 58 PVE



รูปที่ 3 ไอโซเทอมการดูดติดผิวด้วยดินลูกรังคองหงส์

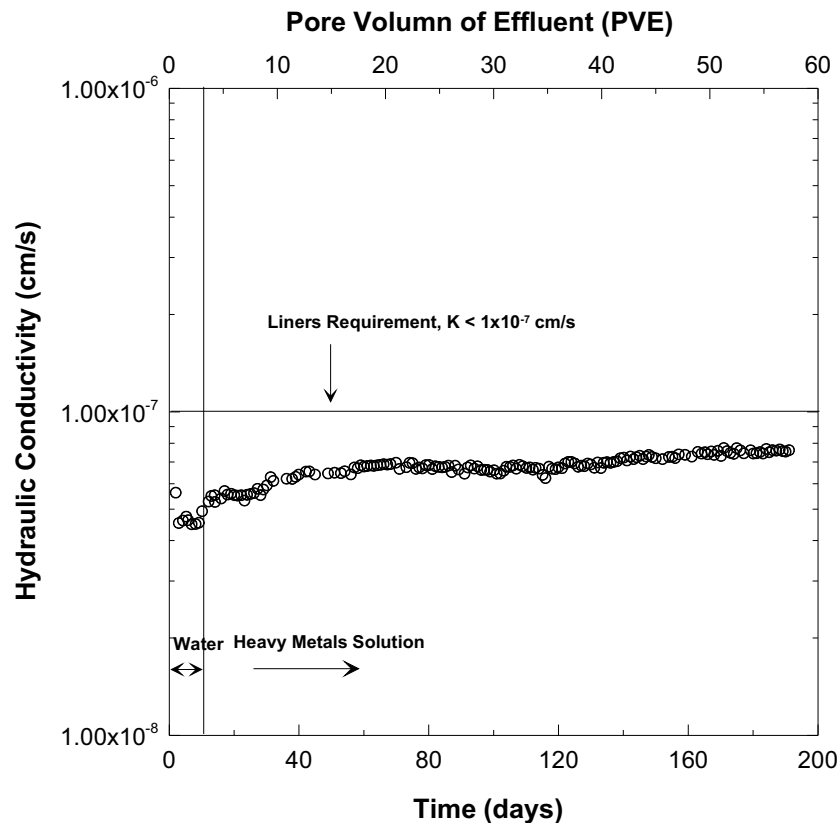
Heavy Metal Solution	Adsorption Isotherm				Adsorption Capacity (meq/100 g)
	Freundlich			Linear	
	K_F (L/kg)	$1/n$	R^2	K_p (L/kg)	
Cr^{3+}	1,033.95	0.09	0.9791	43.14	8.18
Cd^{2+}	147.70	0.62	0.9854	59.27	1.25
Pb^{2+}	1,238.51	0.24	0.9666	19.26	4.20
Zn^{2+}	141.93	0.55	0.9963	49.51	1.52
Ni^{2+}	199.99	0.33	0.9976	19.15	2.11

ตารางที่ 2 พารามิเตอร์ของไอโซเทอมของดินลูกรังคองหงส์

สัมประสิทธิ์การแพร่และแฟคเตอร์ความหน่วง

สารละลายที่ไหลผ่านดินลูกรังออกมาจากจะนำไปคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่านแล้ว สารละลายนี้ยังถูกนำไปหาค่าความเข้มข้นของโลหะหนักเทียบกับเวลา (C_t) ความสัมพันธ์ระหว่าง C_t/C_0 กับเวลาที่เรียกว่า Breakthrough curves ได้แสดงไว้ในรูปที่ 5 ลำดับการ Breakthrough

(เริ่มตรวจสอบได้ว่ามีความเข้มข้นของโลหะหนักในน้ำที่ไหลออกจากดิน) จากเร็วที่สุดไปช้าที่สุดได้แก่ Zn^{2+} , Cd^{2+} , Ni^{2+} และ Pb^{2+} ตามลำดับ โดยในภาพรวมแล้ว Zn^{2+} , Cd^{2+} , และ Ni^{2+} มี Breakthrough curves ที่คล้ายคลึงกัน ในขณะที่ Pb^{2+} มี Breakthrough ที่ช้าที่สุดและห่างจากกลุ่มแรกมาก

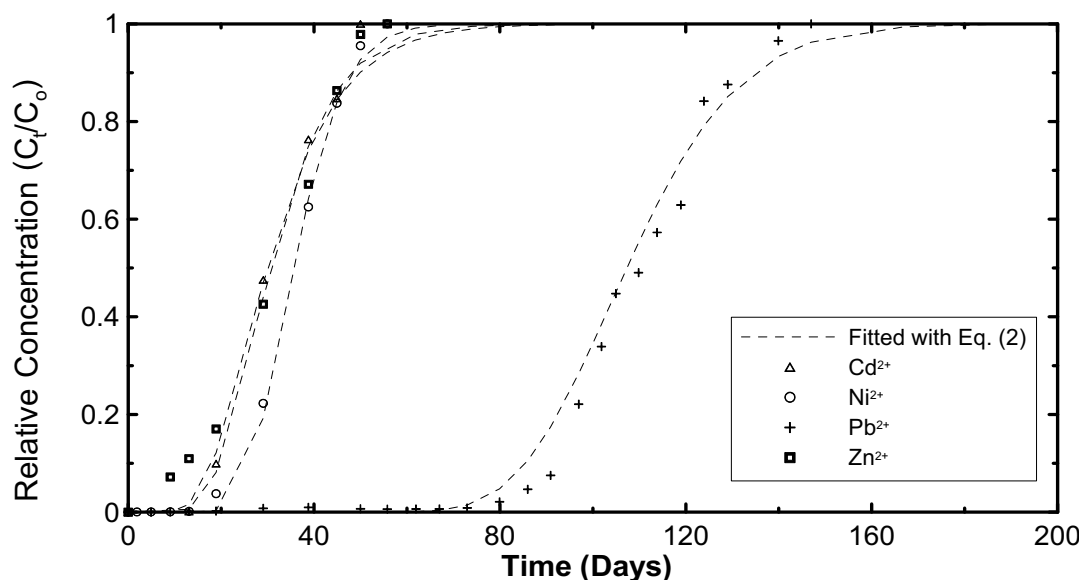


รูปที่ 4 สมบัติการยอมให้น้ำซึมผ่านของดินลูกรังคองหส์

เมื่อฟิต Breakthrough curves โดยการ Trial and error ค่าพารามิเตอร์การเคลื่อนที่ D และ R จน Breakthrough ที่ฟิตโดยแทนค่า D และ R ลงในสมการที่ 2 ให้ผลสอดคล้องกับ Breakthrough curves จากการทดลอง ซึ่งดัชนีที่ใช้บ่งบอกถึงความสอดคล้องนี้คือ ค่า Mean square error (MSE) ที่น้อยที่สุด เส้นประในรูปที่ 5 แสดง Breakthrough curve ที่ได้จากสมการที่ 2 ค่า D , R ที่สอดคล้องกับผลการทดลองแบบสดมภ์ได้แสดงไว้ในตารางที่ 3

ค่าพารามิเตอร์การเคลื่อนที่ของดินลูกรังคองหส์และสารละลายโลหะหนัก ที่แสดงไว้ในตารางที่ 3 สำหรับค่า R ซึ่งแสดงถึงความสามารถในการหน่วงโลหะหนักของดินลูกรัง พบว่า ค่า R ของ Pb^{2+} มีค่ามากที่สุด เนื่องจาก Breakthrough ออกมาช้าที่สุด ในขณะที่ค่า R ของ Zn^{2+} , Cd^{2+} , Ni^{2+} มีค่าใกล้เคียงกันและน้อยกว่าค่า R ของ Pb^{2+} เนื่องจากสารละลายโลหะหนักทั้งสามนี้ Breakthrough ออกมาก่อน ผลของค่า R ที่ได้นี้สอดคล้องกับผลการทดสอบแบบแบทช์ โดย Pb^{2+} ซึ่งมีค่า Adsorption

capacity มากที่สุดจึงถูกดูดติดผิวได้มากที่สุด ทำให้ Breakthrough ออกจากดินลูกรังตัวอย่างในการทดสอบแบบ Column ช้าที่สุด



รูปที่ 5 Breakthrough curves ของดินลูกรังคองหังส์จากการทดสอบ Column test

Heavy Metal	D (cm ² /s)	R	MSE
Cd ²⁺	5.014 x 10 ⁻⁶	7.0	0.001425
Ni ²⁺	2.160 x 10 ⁻⁶	7.6	0.000396
Pb ²⁺	1.943 x 10 ⁻⁵	36.0	0.001712
Zn ²⁺	6.164 x 10 ⁻⁶	6.5	0.004094

ตารางที่ 3 ค่าพารามิเตอร์การเคลื่อนที่ของดินลูกรังคองหังส์

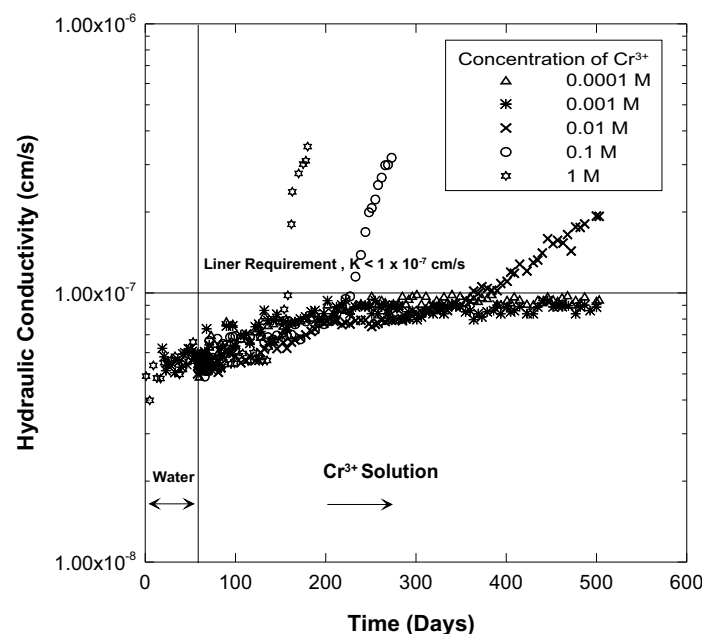
ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ (D) ซึ่งแสดงการแพร่กระจายในระดับโมเลกุลของสารละลายโลหะหนักในดินลูกรัง พบว่ามีค่าในช่วง 10⁻⁵ ถึง 10⁻⁶ cm²/s แสดงให้เห็นถึง การเคลื่อนที่แบบการแพร่ของสารละลายโลหะหนักทั้ง 4 ชนิด ซึ่งสอดคล้องกับรูปร่างของ Breakthrough curves ทั้ง 4 เส้น เมื่อพิจารณาค่า D อย่างละเอียดพบว่า ค่า D ของ Pb²⁺ มีค่ามากที่สุดแสดงให้เห็นถึงการเคลื่อนที่แบบการแพร่ที่มากที่สุดซึ่งสอดคล้องกับความชันของ Breakthrough curves ที่น้อยที่สุดในทางตรงกันข้าม ค่า D ของ Ni²⁺ มีค่าน้อยที่สุดแสดงให้เห็นถึงการเคลื่อนที่แบบการแพร่ที่น้อยที่สุดซึ่งสอดคล้องกับความชันของ Breakthrough curves ที่มากที่สุด ส่วนค่า D ของ Cd²⁺ และ Zn²⁺ มีค่าใกล้เคียงกันและมีรูปร่างของ Breakthrough curves ที่คล้ายคลึงกัน

ในการศึกษาครั้งนี้ได้มีการทดสอบแบบสดมภ์ของดินลูกรังอีกตัวอย่างหนึ่งกับสารละลาย Cr³⁺ แต่ไม่มีการตรวจพบ Cr³⁺ ในน้ำที่ไหลออกจากตัวอย่างตลอดช่วงเวลาการทดสอบ 240 วัน จึงไม่

สามารถคำนวณหาค่า D และ R ของ Cr^{3+} ได้ เหตุผลที่ไม่มี Breakthrough ของ Cr^{3+} น่าจะมีสาเหตุจากความจริงที่ว่า Cr^{3+} มีค่า R ที่สูงกว่าโลหะหนักอื่นที่ใช้ในการทดสอบครั้งนี้ทำให้มีการหน่วงไม่ให้เกิดการเคลื่อนที่ของ Cr^{3+} ออกมาจากตัวอย่างดินในช่วง 240 วันของการทดสอบ ผลการทดสอบแบบแบทช์สอดคล้องกับสมมุติฐานดังกล่าว โดยค่า Adsorption capacity ของ Cr^{3+} มีค่าสูงสุดในจำนวนสารละลายโลหะหนักที่ใช้ทดลอง (ตารางที่ 2)

ความต้านทานสารเคมี

ดินลูกรังบดอัด 5 ตัวอย่างที่ถูกไหลผ่านโดยสารละลาย Cr^{3+} ที่มีความเข้มข้น ตั้งแต่ 0.0001 M, 0.001 M, 0.01 M, 0.1 M, และ 1 M โดยใช้ระยะเวลาในการทดลองทั้งหมดประมาณ 500 วัน ค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่านของดินลูกรังตัวอย่างทั้ง 5 เมื่อทดสอบโดยน้ำ DI มีค่าประมาณ 5×10^{-8} cm/s ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่านและ เวลาได้แสดงไว้ในรูปที่ 6 ค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่านของดินลูกรังเมื่อทดลองด้วยน้ำ DI และสารละลายโครเมียมที่ระดับความเข้มข้น 0.001 M มีค่าคงที่ในช่วง 8×10^{-8} ถึง 9×10^{-8} cm/s เมื่อทดสอบนานประมาณ 500 วัน ในขณะที่ค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่านของดินลูกรังที่ทดสอบโดยของสารละลายโครเมียมที่ความเข้มข้น 0.01 M, 0.1 M และ 1 M เมื่อมีสารละลาย Cr^{3+} ไหลผ่านนานขึ้นทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่านมีค่าค่อยๆเพิ่มสูงขึ้นเรื่อยๆจนสูงกว่า 1×10^{-7} cm/s ในช่วงเวลาของการทดสอบที่ 370, 200 และ 180 วัน ตามลำดับ



รูปที่ 6 ผลของความเข้มข้นของสารละลายโครเมียมต่อค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่านของดินลูกรัง

ผลการทดลองในรูปที่ 6 แสดงให้เห็นว่า ดินลูกรังบดอัดเมื่อมีสารเคมีไหลผ่านทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่านเพิ่มขึ้น โดยอัตราหรือระยะเวลาที่ค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่านเพิ่มขึ้นนั้นจะขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของสารละลายที่ไหลผ่าน ถ้าสารละลายที่ไหลผ่านมีความเข้มข้นสูงไหลผ่านก็จะทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่านเพิ่มขึ้นสูงอย่างรวดเร็ว จนทำให้สูงกว่าค่ามาตรฐานของชั้นกันซึมที่ 1×10^{-7} cm/s ทั้งนี้อาจจะอธิบายได้ว่า สารละลายที่มีความเข้มข้นสูง จะไปทำลาย Diffused double layer หรือแผ่นฟิล์มบางๆ รอบอนุภาคของส่วนที่เป็นดินเหนียวในดินลูกรัง ทำให้ทางเดินของน้ำกว้างขึ้นส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่านสูงขึ้น ผลจากการทดลองนี้อาจใช้เตือนสำหรับการนำดินลูกรังไปใช้เป็นชั้นกันซึมสำหรับรองรับสารละลายโลหะหนัก ซึ่งอาจมีปัญหาการรั่วซึมในระยะยาว เนื่องจากผลของความเข้มข้นของสารเคมีดังกล่าว

สรุป

การศึกษาคุณสมบัติของดินลูกรังบดอัดเนื่องจากการไหลซึมผ่านของสารละลายโลหะหนัก ในครั้งนี้ ได้ศึกษาคุณสมบัติพื้นฐานของดินลูกรัง ทำการทดลองแบบแบทช์เพื่อศึกษาความสามารถในการดูดซับ การทดลองแบบสแตมภ์เพื่อศึกษาพารามิเตอร์การเคลื่อนที่ และทำการทดลองหาความต้านทานสารละลายโลหะหนักของค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่าน ผลการศึกษาสามารถสรุปได้ดังนี้

1) ความสามารถในการดูดซับสารละลายโลหะหนักมาติดผิวของดินลูกรัง จากมากที่สุดไปน้อยที่สุดได้แก่ Cr^{3+} , Pb^{2+} , Ni^{2+} , Zn^{2+} , และ Cd^{2+} ตามลำดับ โดยไอโซเทอมของดินลูกรังต่อสารละลายโลหะหนักสอดคล้องอย่างดีกับสมการของ Freundlich

2) ค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่านของดินลูกรังที่ไหลผ่านด้วยน้ำ DI มีค่าอยู่ในช่วง 4.0×10^{-8} ถึง 5.0×10^{-8} cm/s

3) ผลการทดสอบแบบสแตมภ์พบว่า ลำดับการ Breakthrough จากช้าที่สุดไปเร็วที่สุดได้แก่ สารละลาย Pb^{2+} , Ni^{2+} , Cd^{2+} และ Zn^{2+} ตามลำดับ โดยสารละลาย Ni^{2+} , Cd^{2+} , และ Zn^{2+} มี Breakthrough curves ที่ใกล้เคียงกัน ในขณะที่ Pb^{2+} มี Breakthrough ที่ช้าที่สุด

4) ค่าแฟกเตอร์ความหน่วงของ Pb^{2+} มีค่ามากที่สุด ($R = 36$) เมื่อเทียบกับแฟกเตอร์ความหน่วงของ Ni^{2+} , Cd^{2+} , และ Zn^{2+} ($R = 7.6, 7.0$, และ 6.5 ตามลำดับ) เนื่องจาก Breakthrough ออกมาช้าที่สุด ผลของค่า R ที่ได้สอดคล้องกับผลการทดสอบแบบแบทช์ โดย Pb^{2+} ซึ่งมีค่า Adsorption capacity มากที่สุด

5) ผลการทดสอบความต้านทานสารเคมี พบว่าดินลูกรังเมื่อถูกไหลผ่านโดยสารเคมีจะมีค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่านเพิ่มขึ้น โดยอัตราหรือระยะเวลาที่ค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่านเพิ่มขึ้นนั้นจะขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของสารละลายที่ไหลผ่าน ถ้าสารละลายที่ไหลผ่านมีความเข้มข้นสูงก็จะทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่านเพิ่มขึ้นสูงอย่างรวดเร็ว การใช้ดินลูกรังในการทำชั้นกันซึมสารละลายโลหะหนัก อาจจะต้องทำด้วยความระมัดระวัง ทั้งนี้เนื่องจาก ค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่านอาจมีค่าสูงกว่ามาตรฐานเมื่อมีการเคลื่อนที่ของสารละลายโลหะหนักที่มีความเข้มข้นสูงในระยะเวลาที่นานพอ

เอกสารอ้างอิง

- Amatya, B.L. and Takemura, J. 2002. "Contaminant Transport through Bangkok Clay as a Liner of Landfill" **Proceeding of the Eight National Convention on Civil Engineering**, Khon Kaen, Thailand.
- Benson, C.H. and Daniel, D.E. 1990. "Influence of Clods on Hydraulic Conductivity of Compacted Clay," *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, 116(8), 1231-1248
- Cabral, A.R. 1992. "A Study of Compatibility to Heavy Metal Transport in Permeability Testing," Ph.D. Thesis, Dept. of Civil Engineering and Applied Mechanics, McGill University, Montreal.
- Ernst, W.H.O. 1995. "Decontamination or Consolidation of Metal-Contaminated Soils by Biological Means" **Heavy Metals: Problem and Solutions**, W. Salomons, U. Forstner, and P. Mader, Eds. Springer, Berlin, 141-149.
- Fernandez, F., and Quigley, R. 1985. "Hydraulic Conductivity of Clay Liners," **Canadian Geotechnical Journal**, Ottawa, 22, 204-214.
- Fetter, C.W. 1993 **Contaminant Hydrogeology**, Prentice Hall, New Jersey.
- Gleason, M.H., Daniel, D.E., and Eykholt, G.R. 1997. "Calcium and Sodium Bentonite for Hydraulic Containment Applications," **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, ASCE, 123(5), 438-445.
- Jo, H. Y., Katsumi, T., Benson, C.H., and Edil, T.B. 2001. "Hydraulic Conductivity and Swelling of Nonprehydrated GCLs Permeated with Single-Species Salt Solutions" **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, 127(7), 557-567.
- 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
- Mathew, P.K., and Rao, S.N. 1997. "Influence of Cation on Compressibility behavior of a Marine Clay" **Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, 123(11), 1071-1073.
- Mitchell, J.K. 1976 **Fundamentals of Soil Behavior**, John Wiley and sons, Inc., New York, N.Y.
- Osinubi, K.J., and Nwaiwu, C.M.O. 2006. "Design of Compacted Lateritic Soil Liners and Covers," **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, 132(2), 203-213.
- Ou, W.C. 1989. "Soil Column Process for Landfill Leachate Treatment," Master Thesis, Asian Institute of Technology, Bangkok, Thailand.
- Shackelford, C.D. 1990. "Transit-Time Design of Earthen Barriers" **Engineering Geology**, 29 : 79-94.
- Shackelford, C.D. 1994. "Critical Concepts for Column Testing" **Journal of Geotechnical Engineering**, 120 : 1804-1828.
- USEPA, 1986. Subtitle D Study, Phase Report, U.S. Environmental Protection Agency, EPA/50-SW-86/054.

ภาคผนวก ก
การนำวงโลหะหนักของชั้นกันซึมดินเหนียวบดอัด



การหน่วงโลหะหนักของชั้นกันซึมดินเหนียวบดอัด

RETARDATION OF HEAVY METALS IN COMPACTED CLAY LINERS

ธนิต เฉลิมยานนท์ (Tanit Chalermyanont)¹

สุรพล อารีย์กุล (Surapon Arrykul)²

นันทนิตย์ เจริญไธสง (Nantanit Charoenthaisong)³

¹ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ tanit.c@psu.ac.th

²รองศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ surapon.a@psu.ac.th

³ผู้ช่วยวิจัย ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ nantanitc@hotmail.com

บทคัดย่อ : ดินเหนียวบดอัดมักถูกใช้เป็นชั้นกันซึมสำหรับบ่อฝังกลบมูลฝอยหรือบ่อบำบัดน้ำเสีย การเคลื่อนที่ของสารปนเปื้อนผ่านชั้นดินเหนียวประกอบด้วย การแพร่ การพา และการหน่วง ดินเหนียวซึ่งมีประจุลบสามารถหน่วงสารปนเปื้อนซึ่งเป็นสารละลายที่มีประจุบวกได้ ความสามารถในการหน่วงของดินต่อสารละลายเรียกว่า แฟกเตอร์การหน่วง การวิจัยครั้งนี้ได้ศึกษาหาค่าแฟกเตอร์การหน่วงโดยใช้การทดสอบสองแนวทางได้แก่ การหาค่าแฟกเตอร์การหน่วงโดยคำนวณจากสัมประสิทธิ์การแบ่งที่ได้จากการทำการทดสอบแบบเบตช์ และการหาค่าแฟกเตอร์การหน่วงโดยตรงจากการทดสอบแบบสดมภ์ ดินเหนียว 2 ชนิดถูกใช้ในการทดสอบอันได้แก่ดินลูกรังและดินเหนียวมาริน โดยใช้สารละลายโลหะหนัก 3 ชนิด ได้แก่ ตะกั่ว สังกะสี และ แคดเมียม ผลการทดสอบพบว่า ดินเหนียวมารินมีความสามารถในการหน่วงมากกว่าดินลูกรัง ลำดับการหน่วงจากมากไปน้อยของดินทั้งสองชนิดต่อสารละลายโลหะหนักสอดคล้องกันและสามารถเรียงจากมากไปน้อยดังนี้ ตะกั่ว สังกะสี และ แคดเมียม นอกจากนี้ยังพบว่า ค่าแฟกเตอร์การหน่วงที่ได้จากการทดสอบแบบสดมภ์มีค่าที่ต่ำกว่าและถูกต้องมากกว่าค่าที่ได้จากการทดสอบแบบเบตช์

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) ของบ่อฝังกลบมูลฝอยที่ก่อสร้างอย่างถูกต้องจากอิฐดินเผา ต้องสามารถป้องกันการไหลซึมของน้ำชะมูลฝอยที่มีสารปนเปื้อน ไม่ให้ไหลผ่านลงไปสู่ชั้นน้ำใต้ดิน ดังนั้นสร้างชั้นกันซึมที่ดีต้องเลือกใช้ดินให้เหมาะสมด้วย การเคลื่อนที่ของสารปนเปื้อนผ่านชั้นกันซึมประกอบด้วย การพา (Advective transport) การแพร่ (Diffusive transport) และ การหน่วง (Retardation) คุณสมบัติของชั้นกันซึมที่ดีก็ต้องมีค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่าน (Hydraulic conductivity, K) ต่ำกว่า 1×10^{-7} cm/s ซึ่งจะทำให้การเคลื่อนที่แบบการพาของน้ำชะมูลฝอยต่ำ

คุณสมบัติที่เหมาะสมจะใช้เป็นชั้นกันซึมที่ดีอีกอย่างหนึ่งคือความสามารถในการหน่วง ซึ่งก็คือความสามารถในการดูดซับปนเปื้อนในน้ำชะมูลฝอยมาติดผิวของอนุภาคดิน 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 การคำนวณโดยผลการทดลองแบบแบทช์ (Batch adsorption test) และการคำนวณโดยใช้ผลการทดสอบแบบสดมภ์ (Column test)

2. ทฤษฎีการเคลื่อนที่ของสารปนเปื้อน

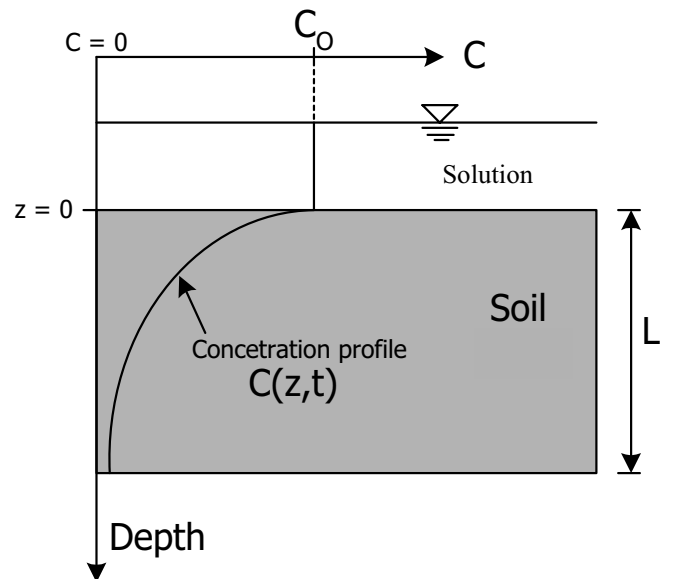
2.1 การเคลื่อนที่ของสารปนเปื้อนในดิน

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

อธิบายการเคลื่อนที่นี้เรียกว่า สมการการพาและการแพร่ (Advection-Diffusion Equation) [1]

$$\frac{D}{R} \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} - \frac{v_s}{R} \frac{\partial C}{\partial z} = \frac{\partial C}{\partial t} \quad (1)$$

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 โดยใช้ผลการทดลองแบบแบทช์

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

$$R = 1 + \frac{\rho_d K_p}{n} \quad (2)$$

เมื่อ ρ_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) = $\frac{V_s z}{D}$

ผลการทดสอบแบบสมดุลสามารถนำไปคำนวณหาค่า R ได้ โดยใช้ผลความเข้มข้นสัมพัทธ์ซึ่งเป็นค่าความเข้มข้นของสารละลายในช่องว่างในดิน หรือใช้ค่าความเข้มข้นของสารละลายที่ถูกดูดติดผิวโดยดิน มาพิตกับสมการที่ 3 โดยวิธี Trial and error

3. วิธีการศึกษา

3.1 ดินเหนียวและโลหะหนัก

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

3.2 การทดสอบแบบแบทช์ (Batch Adsorption Test)

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

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

3.3 การทดสอบแบบสมดุล (Column Test)

การทดสอบแบบสมดุลทำโดยนำดินลูกรัง และดินเหนียวมาริน มาเพิ่มความชื้นเพื่อให้มีปริมาณความชื้นที่มากกว่าปริมาณความชื้นที่เหมาะสม 2% (เท่ากับ 20% และ 19% สำหรับดินลูกรังและดินเหนียวมาริน ตามลำดับ) แล้วปล่อยให้ 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 M ซึ่งเตรียมโดยละลาย CdCl_2 , PbCl_2 , และ ZnCl_2 ด้วยน้ำ DI เมื่อปล่อยให้สารละลายโลหะหนักผสมไหลผ่านไป ในดินตามระยะเวลาที่ต้องการแล้ว ทำการถอดดินตัวอย่างออกจาก Mold แล้วแบ่งดินตามความหนา ออกเป็น 6 ชั้น โดยแต่ละชั้นมีความหนาประมาณ 1 cm ดินแต่ละชั้นถูกนำไปหาความเข้มข้นของสารละลายโลหะหนักที่ถูกดินดูดติดผิว

การหาความเข้มข้นของสารละลายโลหะหนักที่ถูกดินดูดซับ ทำโดยการสกัดโลหะหนักออกจากดินด้วยวิธีการย่อยด้วยกรด [4] โดยนำดินที่บดแล้ว 0.5 g ใส่ในบีกเกอร์ เติมกรด HNO_3 2 mL และกรด HCl 4 mL เพื่อสกัดโลหะหนักออกจากดิน แล้วปิดด้วยกระจกนาฬิกา เพื่อป้องกันการระเหยแล้วนำไปวางไว้บน Hot plate ที่อุณหภูมิประมาณ 100°C นาน 2 ชั่วโมง จากนั้นนำไปกรองด้วยกระดาษกรอง Whatman เบอร์ 42 เจือจางด้วยกรด HNO_3 1 % แล้วปรับปริมาตรให้ได้ 50 mL แล้วนำไปวิเคราะห์หาความเข้มข้นของโลหะหนัก

ความเข้มข้นของโลหะหนักจากการสกัดโลหะหนักออกจากตัวอย่างดินที่แบ่งเป็นชั้นๆ (C_s) ถูกนำไปคำนวณหาอัตราส่วนระหว่างความเข้มข้นของโลหะหนักที่ถูกดูดซับในดิน (C_s) ต่อความเข้มข้นสูงสุดของโลหะหนักที่ถูกดูดซับในดิน (C_{sm}) ของโลหะหนักในบริเวณดินชั้นแรก (ลึกประมาณ 0.7 cm) เรียกว่าความเข้มข้นสัมพัทธ์ (Relative adsorbed concentration, C_s/C_{sm})

การคำนวณค่า R ทำได้โดยคำนวณค่า C_s/C_{sm} โดยใช้สมการที่ 3 โดยการลองผิดลองถูกค่า R ไปเรื่อยๆ ค่า R ที่ถูกต้องจะเป็นค่า R ที่ทำให้ค่า C_s/C_{sm} ที่คำนวณได้สอดคล้องกับค่า C_s/C_{sm} ที่ได้จากการทดสอบแบบสดมภ์

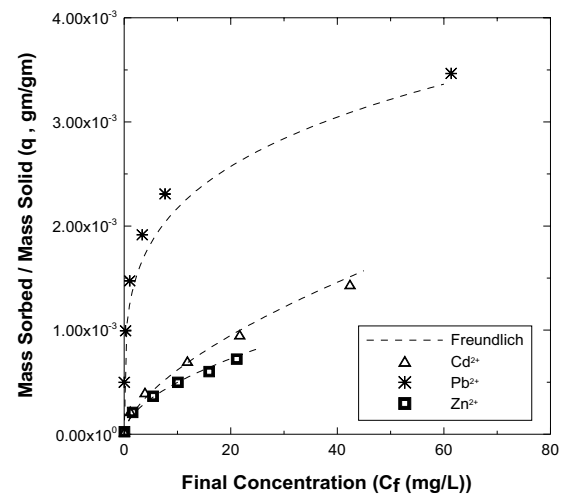
4. ผลการศึกษา

4.1 ผลการทดสอบแบบแบทช์

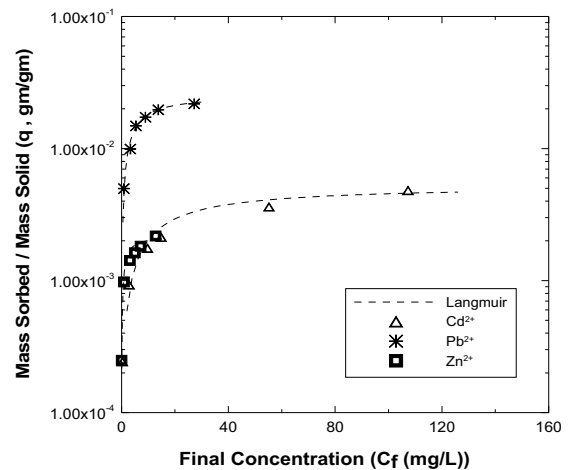
ผลการทดสอบแบบแบทช์ในรูปของไอโซเทอมแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของมวลโลหะหนักที่ถูกดูดซับต่อมวลของดินลูกรังที่ใช้ในการทดสอบ (q) และความเข้มข้นสุดท้ายของสารละลายโลหะหนักเมื่อกระบวนการดูดซับสมดุลแล้ว (Equilibrium concentration, C_f) ผลการทดลองพบว่าสมการไอโซเทอมของ Freundlich และ Langmuir สอดคล้องกับดินลูกรังและดินเหนียวตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 2 และ 3

อย่างไรก็ตามสำหรับสารละลายโลหะหนักในส่วนที่ความเข้มข้นต่ำ ไอโซเทอมในส่วนนี้จะประมาณได้ว่ามีลักษณะเป็นเส้นตรง [5] ผลการฟิตไอโซเทอมส่วนที่มีความเข้มข้นต่ำด้วยสมการเส้นตรง แสดงในรูปของความชัน หรือค่าสัมประสิทธิ์การแบ่งได้แสดงไว้ในตารางที่ 1 สำหรับทุกโลหะหนักสัมประสิทธิ์การแบ่งของดินเหนียวมีค่ามากกว่าของดินลูกรัง

เนื่องจากความชันของไอโซเทอมของดินเหนียวมีค่ามากกว่าดินลูกรัง



รูปที่ 2 ไอโซเทอมของดินลูกรัง



รูปที่ 3 ไอโซเทอมของดินเหนียว

ตารางที่ 1 ค่าสัมประสิทธิ์การแบ่ง (K_p)

โลหะหนัก	K_p (L/kg)	
	ดินลูกรัง	ดินเหนียว
Pb^{2+}	56.48	801.96
Zn^{2+}	34.19	288.13
Cd^{2+}	33.99	65.55

4.2 ผลการทดสอบแบบสดมภ์

ผลการทดสอบแบบสดมภ์รูปของความสัมพันธ์ระหว่าง C_s/C_{sm} และความลึก (Relative adsorbed concentration profile) ได้แสดงไว้ในรูปที่ 4 และ 5 สำหรับดินลูกรังและดินเหนียวตามลำดับ โดยสังเกตได้ว่าค่า C_s/C_{sm} จะมีค่าสูงในบริเวณด้านบนของดินแล้วลดค่าลงเรื่อยๆตามความลึก ซึ่ง

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

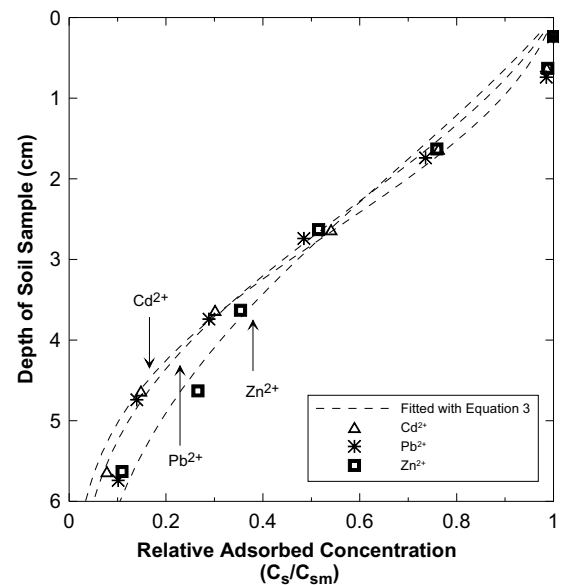
เมื่อพิต Relative adsorbed concentration profile โดยการ Trial and error ค่าพารามิเตอร์การเคลื่อนที่ R จน Relative adsorbed concentration profile ที่พิตโดยแทนค่า R ลงในสมการที่ 3 ให้ผลสอดคล้องกับ Relative adsorbed concentration profile จากผลการทดลองแบบสดมภ์ เส้นประในรูปที่ 4 และ 5 แสดง Relative adsorbed concentration profile ที่ได้จากสมการที่ 3 ค่า R ที่สอดคล้องกับผลการทดลองแบบสดมภ์และค่า R จากนักวิจัยอื่นๆได้แสดงไว้ในตารางที่ 2 ผลจากการพิต Relative adsorbed concentration profile ยังประกอบด้วยค่า Diffusion coefficient (D) อีกด้วย แต่ค่าดังกล่าวอยู่นอกเหนือขอบเขตของ Paper นี้จึงไม่บอกกล่าวถึง

4.3 ค่าแฟกเตอร์การหน่วง

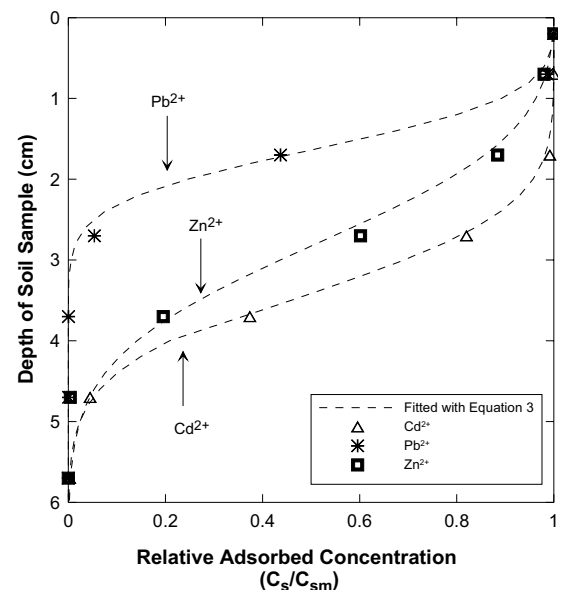
ค่า R ของดินลูกรังและดินเหนียวมาริน คำนวณจากผลการทดสอบแบบแบทช์และผลการทดสอบแบบสดมภ์โดยใช้สมการที่ 2 และ 3 ตามลำดับได้แสดงไว้ในตารางที่ 2 เมื่อเปรียบเทียบค่า R ที่คำนวณจากการทดสอบแบบแบทช์และการทดสอบแบบสดมภ์พบว่า ค่า R ที่คำนวณได้จากการทดสอบแบบสดมภ์มีค่าน้อยกว่าอย่างมากและเป็นค่าที่น่าเชื่อถือมากกว่าเพราะว่าคำนวณจากผลการทดลองการเคลื่อนที่และการดูดซับจริงของสารละลายโลหะหนักในดินบดอัด 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

ล่าับการหน่วงของโลหะหนักทั้ง 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

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

*[2], **[8]

5. สรุป

ผลการทดสอบแบบแบทช์และผลการทดสอบแบบสดมภ์โดยใช้ดินลูกรังและดินเหนียวมารีนกับโลหะหนักสามชนิดอันได้แก่ Pb²⁺, Cd²⁺, และ Zn²⁺ 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 Pb²⁺ > Zn²⁺ > Cd²⁺

6. กิตติกรรมประกาศ

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

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. ศักยภาพของการใช้ทรายผสมเบนโทไนต์และดินเหนียวสงขลาเพื่อใช้เป็นชั้นกั้นซึมในสถานที่ฝังกลบมูลฝอย 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.