สารบัญ

	หน้า
สารบัญ	(13)
รายการตาราง	(17)
รายการภาพประกอบ	(18)
ตัวย่อและสัญลักษณ์	(21)
บทที่	
1 บทนำ	1
1.1 บทนำ	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ	3
1.3 ขอบเขตการศึกษา	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
2 การตรวจเอกสาร	
2.1 ชั้นกันซึมดินเหนียวบดอัด (Compacted clay liners) ในสถานที่ฝังกลบมูลฝอย	4
2.1.1 คุณสมบัติของดินเหนียว	6
2.1.1.1 ประจุลบของแร่ดินเหนียว (Negative charge of clay mineral)	6
2.1.1.2 ความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวก	7
2.2 เบนโทไนต์ (Bentonite)	7
2.2.1 โครงสร้างหลัก	7
2.2.2 ความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุของเบนโทไนต์	8
2.2. 3 การนำเบนโทไนต์ไปใช้ประโยชน์	8
2.2. 4 แหล่งเบนโทไนต์ที่สำคัญ	9
2.3 ทฤษฎีการเคลื่อนที่ของสารปนเปื้อนในตัวกลางพรุน	9
2.3.1 กระบวนการเคลื่อนที่แบบการพา (Advection)	9
2.3.2 กระบวนการเคลื่อนที่แบบการแพร่ (Diffusion)	11
2.3.3 สมการการเคลื่อนที่ของสารละลายในดินที่ขึ้นกับเวลา	11
2.4 การทดสอบแบบสดมภ์ (Column test)	14
2.4.1 การหาค่าพารามิเตอร์การเคลื่อนที่จาก Breakthrough curve	14

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.4.2 การหาค่าพารามิเตอร์การเคลื่อนที่จาก Concentration profile 16

2.5 การทดสอบแบบแบทช์ (Batch adsorption test) 17

2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 19

3 วิธีการวิจัย 23

3.1 การสร้างอุปกรณ์สำหรับการทดสอบ 23

3.1.1 การสร้าง Rigid wall permeameter 23

(a) ส่วนประกอบของ Rigid wall permeameter 23

(b) การประกอบ Rigid wall permeameter 26

3.1.2 การสร้างอุปกรณ์การทดสอบแบบสคมภ์พร้อมระบบเพิ่มความดัน แบบความดันคงที่ 27

(a) ส่วนประกอบของอุปกรณ์ 27

(b) การประกอบอุปกรณ์การทดสอบแบบสดมภ์ 27

3.2 การทดสอบหาคุณสมบัติของเบนโทไนต์และดินเหนียว 28

3.3 การหาค่า K ของทรายผสมเบนโทไนต์และดินเหนียว 29

3.3.1 การหาค่า K ของทรายผสมเบนโทไนต์ 29

3.3.2 การหาค่า K ของดินเหนียว 31

3.4 การทดสอบความต้านทานสารเคมีของค่า K 31

3.5 การหาค่าพารามิเตอร์การเคลื่อนที่ของทรายผสมเบนโทไนต์และดินเหนียวเมื่อทดสอบกับโลหะหนัก 33

3.5.1 การหาค่า K โดยวิธีระดับน้ำคงที่ 34

3.5.2 การหาความเข้มข้นสุดท้ายสารละลายเพื่อคำนวณพารามิเตอร์การเคลื่อนที่ 36

3.5.2.1 การหาค่าความเข้มข้นของโลหะหนักใน Effluent เทียบกับเวลา 36

3.5.2.2 การหาค่าความเข้มข้นสุดท้ายของโลหะหนักจากการสกัดโลหะหนักออกจากดินด้วยวิธีการย่อยด้วยกรด 37

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.5.3 การคำนวณหาค่าพารามิเตอร์การเคลื่อนที่ 39

3.5.3.1 การคำนวณหาค่าพารามิเตอร์การเคลื่อนที่จากการหาค่าความเข้มข้นของโลหะหนักของ Effluent เทียบกับเวลา 39

3.5.3.2 การคำนวณหาค่าพารามิเตอร์การเคลื่อนที่จากค่าความเข้มข้นของโลหะหนักจากการสกัดโลหะหนักออกจากตัวอย่างดินที่แบ่งเป็นชั้นๆ ด้วยวิธีการย่อยด้วยกรด 41

3.6 วิธีการทดสอบแบบแบทช์ (Batch adsorption test) 41

3.7 การวิเคราะห์ความเข้มข้นของสารละลายที่ศึกษา 44

3.7.1 การวิเคราะห์หาความเข้มข้นของสารละลายโลหะหนัก 44

3.7.2 การวิเคราะห์หาความเข้มข้นของสารละลายคลอไรด์ (Cl^-) ด้วยวิธี Argentometric method หรือ Mohr method (APHA, AWWA and WEF, 1995) 44

3.7.2.1 สารเคมีที่ใช้ในการวิเคราะห์ 44

3.7.2.2 ขั้นตอนการวิเคราะห์ 45

4 ผลการศึกษา 46

4.1 ผลการศึกษาคุณสมบัติของดิน 46

4.2 ผลการศึกษาค่า K 48

4.2.1 ผลการศึกษาค่า K ของทรายผสมเบนโทไนต์เพื่อหาปริมาณเบนโทไนต์ที่เหมาะสม 48

4.2.2 ผลการศึกษาค่า K ของทรายผสมเบนโทไนต์ ดินลูกรังคอหงส์และดินเหนียวเกาะยอ 50

4.3 ผลการศึกษาความต้านทานของสารเคมีของค่า K 50

4.3.1 ความต้านทานสารเคมีของทรายผสมเบนโทไนต์ 50

4.3.2 ความต้านทานสารเคมีของดินลูกรังคอหงส์ 52

4.3.3 ความต้านทานสารเคมีของดินเหนียวเกาะยอ 54

4.4 คุณสมบัติการดูดติดผิว 54

4.4.1 ไอโซเทอมของการดูดติดผิว 60

สารบัญ (ต่อ)

		หน้า
4.5	ผลการศึกษาค่าพารามิเตอร์การเคลื่อนที่	63
4.5.1	ผลการศึกษาค่าพารามิเตอร์การเคลื่อนที่ของดินลูกรังคอหงส์จาก Breakthrough curves	63
4.5.1.1	ค่า K ของดินลูกรังคอหงส์เมื่อทดสอบด้วย Mixed solution	63
4.5.1.2	พารามิเตอร์การเคลื่อนที่ของดินลูกรังคอหงส์	65
4.5.2	ค่าพารามิเตอร์การเคลื่อนที่จาก Concentration profile	68
4.5.2.1	ค่า K ของดินตัวอย่าง	68
4.5.2.2	พารามิเตอร์การเคลื่อนที่จาก Concentration profile	73
5	ความหนาของชั้นกันซึม	77
5.1	ชั้นกันซึมตามมาตรฐานของกระทรวงวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยี และสิ่งแวดล้อม (2542)	77
5.2	การวิเคราะห์ความหนาของชั้นกันซึม	77
5.2.1	การออกแบบความหนาของชั้นกันซึม	77
5.2.2	ผลการวิเคราะห์ความหนาของชั้นกันซึม	80
6	บทสรุปและข้อเสนอแนะ	101
6.1	บทสรุป	101
6.2	ข้อเสนอแนะ	103
บรรณานุกรม		104
ภาคผนวก	ผลงานตีพิมพ์	107
ภาคผนวก ก	Compacted sand-bentonite mixtures for hydraulic containment liners	ก-1
ภาคผนวก ข	พารามิเตอร์การเคลื่อนที่และการดูดโลหะหนักติดผิวของดินลูกรังบดอัด	ข-1
ภาคผนวก ค	การหน่วงโลหะหนักของชั้นกันซึมดินเหนียวบดอัด	ค-1

รายการตาราง

ตาราง		หน้า
2.1	ลำดับการดูดซับโลหะหนักตามชนิดของแร่ดินเหนียว	6
3.1	รายละเอียดความแตกต่างของอัตราส่วนทรายผสมเบนโทไนต์เพื่อหาค่า K	30
3.2	ระดับความเข้มข้นของ Cr^{3+} ที่ใช้ในการทดสอบความต้านทานสารเคมีของค่า K ของดินทั้ง 3 ชนิด	33
3.3	ความเข้มข้นของโลหะหนักที่ใช้ในการทดสอบหาค่าพารามิเตอร์การเคลื่อนที่	36
3.4	ความเข้มข้นของ Influent ที่ใช้ในการทดสอบหา Breakthrough curve	37
3.5	ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายโลหะหนักที่ใช้เป็น Influent	38
3.6	รายละเอียดความเข้มข้นของโลหะหนักที่ใช้ในการทดสอบแบบแบทช์	42
3.7	ช่วงความยาวคลื่นที่ใช้ในการวัดโลหะหนักด้วยเครื่อง Flame atomic absorption spectrophotometer	44
4.1	คุณลักษณะบางประการของเบนโทไนต์ ดินลูกรังคอหงส์ และดินเหนียวเกาะยอ	47
4.2	ผลการศึกษาค่า K ของทรายผสมเบนโทไนต์	50
4.3	ค่าคงที่ของไอโซเทอมแบบ Freundlich	61
4.4	ค่า K_p และ Adsorption capacity จากไอโซเทอมแบบเส้นตรง 61	
4.5	ค่าปริมาณสูงสุดของมวลโลหะหนักที่ถูกดูดติดผิวต่อน้ำหนักของมวลดิน (X_m) และ Adsorption capacity จากไอโซเทอมแบบ Langmuir	62
4.6	การเปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับโลหะหนักของเบนโทไนต์, ดินลูกรังคอหงส์และดินเหนียวเกาะยอ	62
4.7	ผลค่า D, R และ n จาก Breakthrough curve (C_t/C_0) ของดินลูกรังคอหงส์เมื่อทดสอบด้วย Mixed solution	68
4.8	ผลค่า D, R และ n จาก Concentration profile (C_L/C_0) ของดินทั้ง 3 ชนิด	76
5.1	ค่าความเข้มข้นของโลหะหนักในน้ำชะมูลฝอยจากสถานที่ฝังกลบมูลฝอย (C_0) และค่าความเข้มข้นมาตรฐาน (C_{std}) จากมาตรฐานคุณภาพน้ำใต้ดิน	78
5.2	ระยะเวลาที่ค่าความเข้มข้นที่ด้านล่างของชั้นกันซึมมากกว่าค่าความเข้มข้นมาตรฐาน เมื่อกำหนดค่าความหนาของชั้นกันซึมให้เท่ากับ 60 cm	99
5.3	ค่าความหนาที่เหมาะสมของชั้นกันซึมเมื่อกำหนดเวลาในการใช้งานชั้นกันซึมเท่ากับ 100 ปี	100

รายการภาพประกอบ

ภาพประกอบ		หน้า
1.1	การเคลื่อนที่ของสารปนเปื้อนจากสถานที่ฝังกลบไปสู่น้ำใต้ดิน	2
2.1	วัสดุกันซึมแบบดินที่มีอัตราการไหลซึมต่ำ (Low permeable soil liner)	5
2.2	โครงสร้างของมอนต์มอริลโลไนต์แบบ 2 : 1	8
2.3	กฎทรงมวลของการเคลื่อนที่ของสารปนเปื้อนในหน่วยปริมาตร	12
2.4	การทดสอบแบบสดมภ์พร้อมด้วยอุปกรณ์เพิ่มแรงดันคงที่	15
2.5	Breakthrough curve	15
2.6	ไอโซเทอมแบบ Freundlich และเส้นตรง	18
3.1	ขั้นตอนการศึกษา	24
3.2	ขั้นตอนการศึกษา(ต่อ)	25
3.3	ลำดับการประกอบอุปกรณ์ Rigid wall permeameter สำหรับ Falling head test	26
3.4	ลำดับการประกอบอุปกรณ์เพื่อทดสอบแบบสดมภ์	28
3.5	ดินที่ใช้ในการทดสอบ (ก) เบนโทไนต์ (ข) ดินลูกรังคอหงส์ และ (ค) ดินเหนียวเกาะยอ	29
3.6	การหาค่า K ด้วยวิธี Falling head test method ตามมาตรฐาน ASTM (D2434)	32
3.7	การทดสอบแบบสดมภ์	35
3.8	การแบ่งดินที่ถอดออกจาก Mold เพื่อแบ่งดินไปหาความชื้นและแบ่งชั้นดินออกเป็น A – F	38
3.9	การสกัดโลหะหนักออกจากดินด้วยวิธีการย่อยด้วยกรด	40
3.10	การทดสอบแบบแบทช์	43
4.1	ค่า K ของทรายผสมเบนโทไนต์	49
4.2	ผลการศึกษาค่า K ของทรายผสมเบนโทไนต์ที่ 5% ดินลูกรังคอหงส์และดินเหนียวเกาะยอ	51
4.3	ความสัมพันธ์ระหว่างค่า K ของทรายผสมเบนโทไนต์ที่ทดสอบด้วยสารละลายโลหะหนัก Cr^{3+}	52
4.4	ความสัมพันธ์ระหว่างค่า K ของดินลูกรังคอหงส์ที่ทดสอบด้วยสารละลายโลหะหนัก Cr^{3+}	53
4.5	ความสัมพันธ์ระหว่างค่า K ของดินเหนียวเกาะยอที่ทดสอบด้วยสารละลายโลหะหนัก Cr^{3+}	55

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบ		หน้า
4.6	ไอโซเทอมการดูดติดผิวของ Cd^{2+} โดยเบนโทไนต์ ดินลูกรังคอหงส์ และดินเหนียวเกาะยอ	56
4.7	ไอโซเทอมการดูดติดผิวของ Pb^{2+} โดยเบนโทไนต์ ดินลูกรังคอหงส์ และดินเหนียวเกาะยอ	56
4.8	ไอโซเทอมการดูดติดผิวของ Zn^{2+} โดยเบนโทไนต์ ดินลูกรังคอหงส์ และดินเหนียวเกาะยอ	57
4.9	ไอโซเทอมการดูดติดผิวของ Cr^{3+} โดยเบนโทไนต์ ดินลูกรังคอหงส์ และดินเหนียวเกาะยอ	57
4.10	ไอโซเทอมการดูดติดผิวของ Ni^{2+} โดยเบนโทไนต์ ดินลูกรังคอหงส์ และดินเหนียวเกาะยอ	58
4.11	ไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบ Langmuir ของเบนโทไนต์	58
4.12	ไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบ Freundlich ของดินลูกรังคอหงส์	59
4.13	ไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบ Langmuir ของดินเหนียวเกาะยอ	59
4.14	ความสัมพันธ์ของค่า K กับเวลาของดินลูกรังคอหงส์เมื่อทดสอบกับ Mixed solution	64
4.15	ความเข้มข้นของสุดท้ายของ Effluents จากดินลูกรังคอหงส์เมื่อทดสอบด้วย Mixed solution	66
4.16	ผลการฟิตระหว่าง Breakthough curve จากการหา C_t/C_0 จากการทดสอบ และการคำนวณของดินลูกรังคอหงส์เมื่อทดสอบด้วย Mixed solution	67
4.17	ความสัมพันธ์ของค่า K กับเวลาของทรายผสมเบนโทไนต์ที่ 5 %	70
4.18	ความสัมพันธ์ของค่า K กับเวลาของดินลูกรังคอหงส์	71
4.19	ความสัมพันธ์ของค่า K กับเวลาของดินเหนียวเกาะยอ	72
4.20	Concentration profile ของสารละลายโลหะหนักในทรายผสมเบนโทไนต์ที่ 5 % ที่เวลา 80 วัน	74
4.21	Concentration profile ของสารละลายโลหะหนักในดินเหนียวเกาะยอที่เวลา 440 วัน สำหรับทดสอบ Cr^{3+} และ 388 วัน สำหรับทดสอบ Cd^{2+}, Ni^{2+}, Pb^{2+} และ Zn^{2+}	75
5.1	ชั้นกันซึม	79

ฝ่ายหอสมุด
คุณหญิงหลง อรรถกระวีสุนทร

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบ		หน้า
5.2	ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Relative effluent concentration (C_L/C_0) กับเวลาของชั้นกันซึมทรายผสมเบนโทไนต์ที่ 5% หนา 60 cm	81
5.3	ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Relative effluent concentration (C_L/C_0) กับเวลาของชั้นกันซึมดินลูกรังคอหงส์หนา 60 cm	82
5.4	ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Relative effluent concentration (C_L/C_0) กับเวลาของชั้นกันซึมดินเหนียวเกาะยอหนา 60 cm	83
5.5	Breakthrough curves ของ Cd^{2+} ผ่านชั้นกันซึมทรายผสมเบนโทไนต์ที่ 5% หนา 60 cm	84
5.6	Breakthrough curves ของ Ni^{2+} ผ่านชั้นกันซึมทรายผสมเบนโทไนต์ที่ 5% หนา 60 cm	85
5.7	Breakthrough curves ของ Pb^{2+} ผ่านชั้นกันซึมทรายผสมเบนโทไนต์ที่ 5% หนา 60 cm	86
5.8	Breakthrough curves ของ Zn^{2+} ผ่านชั้นกันซึมทรายผสมเบนโทไนต์ที่ 5% หนา 60 cm	87
5.9	Breakthrough curves ของ Cr^{3+} ผ่านชั้นกันซึมดินลูกรังคอหงส์หนา 60 cm	88
5.10	Breakthrough curves ของ Cd^{2+} ผ่านชั้นกันซึมดินลูกรังคอหงส์หนา 60 cm	89
5.11	Breakthrough curves ของ Ni^{2+} ผ่านชั้นกันซึมดินลูกรังคอหงส์หนา 60 cm	90
5.12	Breakthrough curves ของ Pb^{2+} ผ่านชั้นกันซึมดินลูกรังคอหงส์หนา 60 cm	91
5.13	Breakthrough curves ของ Zn^{2+} ผ่านชั้นกันซึมดินลูกรังคอหงส์หนา 60 cm	92
5.14	Breakthrough curves ของ Cr^{3+} ผ่านชั้นกันซึมดินเหนียวเกาะยอหนา 60 cm	93
5.15	Breakthrough curves ของ Cd^{2+} ผ่านชั้นกันซึมดินเหนียวเกาะยอหนา 60 cm	94
5.16	Breakthrough curves ของ Ni^{2+} ผ่านชั้นกันซึมดินเหนียวเกาะยอหนา 60 cm	95
5.17	Breakthrough curves ของ Pb^{2+} ผ่านชั้นกันซึมดินเหนียวเกาะยอหนา 60 cm	96
5.18	Breakthrough curves ของ Zn^{2+} ผ่านชั้นกันซึมดินเหนียวเกาะยอหนา 60 cm	97

ตัวย่อและสัญลักษณ์

A	=	พื้นที่หน้าตัดของดิน มีหน่วยเป็น L^2
b	=	ค่าคงที่ของการดูดซับ มีหน่วยเป็น L/mg
C_f	=	ความเข้มข้นสุดท้ายของสารละลายที่ใช้เป็น Effluent มีหน่วยเป็น mg/L
C_0	=	ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายที่ใช้เป็น Influent มีหน่วยเป็น mg/L
C_s	=	ความเข้มข้นของโลหะหนักที่ถูกดูดติดผิวในดินที่แบ่งเป็นชั้นๆ
C_{sm}	=	ความเข้มข้นสูงสุดของโลหะหนักที่ถูกดูดติดผิวในดินที่แบ่งเป็นชั้นๆ
C_t	=	ความเข้มข้นของโลหะหนักของ Effluent
CEC	=	ความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวก (Cation exchange capacity) มีหน่วยเป็น meq/100g
D	=	สัมประสิทธิ์การแพร่ (Diffusion coefficient) มีหน่วยเป็น cm^2/s
ΔH	=	ค่าความแตกต่างของระดับของน้ำ
i	=	ความชันทางชลศาสตร์ (Hydraulic gradient)
J_D	=	อัตราการเคลื่อนที่ของมวลของสารปนเปื้อนที่เคลื่อนที่แบบการแพร่ผ่านชั้นกันซึมต่อหน่วยพื้นที่ (Diffusive mass flux) มีหน่วยเป็น M/L^2
K	=	ค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่าน (Hydraulic conductivity) มีหน่วยเป็น cm/s
K_F	=	สัมประสิทธิ์พาร์ทิชั่นของสมการแบบ Freundlich มีหน่วยเป็น L/kg
K_P	=	สัมประสิทธิ์พาร์ทิชั่น (Partition Uoefficient) มีหน่วยเป็น L/kg
L	=	ความหนาของตัวอย่างดิน
LL	=	ค่าพิกัดความเหลวของดิน (Liquid limit) มีหน่วยเป็น %
M_q	=	มวลของสารละลายที่ถูกดูดติดผิว (Mass sorbed) มีหน่วยเป็น gm
M_s	=	น้ำหนักของดิน มีหน่วยเป็น gm
MSE	=	ค่าเฉลี่ยของผลต่างยกกำลังสอง (Mean Squared Error)
n	=	ความพรุนของดิน
1/n	=	ค่าคงที่ที่แสดงถึงการขึ้นตรงกับความเข้มข้นของสารละลาย Correction factor
P200	=	ปริมาณดิน มีหน่วยเป็น % ที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 200
PI	=	ดัชนีความเหนียวของดิน (Plasticity index) มีหน่วยเป็น %
P_L	=	พิกเลย์นัมเบอร์ (Peclet number)

ตัวย่อและสัญลักษณ์ (ต่อ)

q	=	อัตราส่วนระหว่างมวลของสารละลายที่ถูกดูดติดผิวต่อน้ำหนักของดินที่ใช้ มีหน่วยเป็น gm/gm
Q	=	อัตราการไหล มีหน่วยเป็น L^3/t
q_{max}	=	มวลโลหะหนักที่ถูกดูดติดผิวสูงสุดต่อมวลของดินที่ดูดสารนั้นๆ
R	=	แฟคเตอร์การหน่วง (Retardation factor)
T_R	=	เฟคเตอร์ของเวลา (Time factor)
V_s	=	ความเร็วในการไหลซึมของน้ำในดิน (Seepage velocity) มีหน่วยเป็น L/t
X_m	=	ปริมาณสูงสุดของมวลโลหะหนักที่ถูกดูดติดผิวต่อน้ำหนักของมวลดิน มีหน่วยเป็น mg/g
Δz	=	ความหนาของดิน