



รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ

การใช้ทรายผสมเบนโทไนต์และดินเหนียว

ในชั้นกันซึมของบ่อฝังกลบมูลฝอย

Use of Sand-Bentonite Mixtures and Clays as Landfill Liners

โดย ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธนิต เฉลิมยานนท์

พฤษภาคม 2550

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ

การใช้ทรายผสมเบนโทไนต์และดินเหนียว
ในชั้นกั้นซึมของบ่อฝังกลบมูลฝอย

Use of Sand-Bentonite Mixtures and Clays as Landfill Liners

โดย ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชนิต เฉลิมยานนท์

พฤษภาคม 2550

บทคัดย่อ

ดินเหนียวบดอัดมักถูกใช้เป็นชั้นกันซึมในสถานที่ฝังกลบมูลฝอย เพื่อลดการเคลื่อนที่ของสารอินทรีย์และอนินทรีย์ในน้ำชะมูลฝอยไม่ให้ไปปนเปื้อนชั้นน้ำใต้ดินด้านล่าง งานวิจัยนี้ได้ศึกษาศักยภาพของการใช้ทรายผสมเบนโทไนต์และดินเหนียว เพื่อเป็นวัสดุในชั้นกันซึมปูพื้นของบ่อฝังกลบมูลฝอยในสถานที่ฝังกลบมูลฝอย สำหรับโลหะหนัก 5 ชนิด อันได้แก่ แคดเมียม, ตะกั่ว, สังกะสี, โครเมียมและนิกเกิล ผลการศึกษาคุณสมบัติของดิน พบว่า เบนโทไนต์ เป็นดินที่มีความเป็นพลาสติกสูง ส่วนดินลูกรังคอหงส์และดินเหนียวมารินเกาะยอ เป็นดินที่มีความเป็นพลาสติกต่ำ ความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุของเบนโทไนต์สูงกว่าดินเหนียวมารินเกาะยอและดินลูกรังคอหงส์ ตามลำดับ การศึกษาคุณสมบัติการดูดติดผิวของดินด้วยวิธีการทดสอบแบบแบทช์ พบว่า เบนโทไนต์มีความสามารถในการดูดโลหะหนักมาติดผิวได้ดีกว่าดินเหนียวมารินเกาะยอและดินลูกรังคอหงส์ ตามลำดับ ไอโซเทอมการดูดติดผิวของเบนโทไนต์และดินเหนียวมารินเกาะยอสอดคล้องกับสมการ Langmuir ในขณะที่ไอโซเทอมการดูดติดผิวของดินลูกรังคอหงส์ สอดคล้องกับสมการ Freundlich

ค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่านของทรายที่ผสมเบนโทไนต์ 3% ก็เพียงพอที่จะให้ค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่านน้อยกว่า 1×10^{-7} cm/s ในขณะที่ค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่านของทรายผสมเบนโทไนต์ที่ 5% ดินลูกรังคอหงส์ และดินเหนียวมารินเกาะยอ มีค่าเท่ากับ 5.15×10^{-9} , 3.39×10^{-8} และ 5.67×10^{-8} cm/s ตามลำดับ ค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่านของทรายผสมเบนโทไนต์, ดินลูกรังคอหงส์ และดินเหนียวมารินเกาะยอ ยังคงมีค่าคงที่ตลอดการทดสอบ 500 วัน ถ้าความเข้มข้นของสารละลายโครเมียมไม่สูงกว่า 0.001 M สำหรับทรายผสมเบนโทไนต์และดินลูกรังคอหงส์ และไม่เกิน 0.01 M สำหรับดินเหนียวมารินเกาะยอ ตามลำดับ

ค่าพารามิเตอร์การเคลื่อนที่ของสารละลายโลหะหนักในดินที่ได้จากการทดสอบแบบสดมภ์ มีค่าดังต่อไปนี้ ทรายผสมเบนโทไนต์ที่ 5% มีค่า Diffusion Coefficient (D) อยู่ในช่วง $1.12 \times 10^{-5} - 1.77 \times 10^{-5}$ cm²/s มีค่า Retardation factor (R) อยู่ในช่วง 90 – 130 ดินเหนียวมารินเกาะยอ มีค่า Diffusion coefficient (D) อยู่ในช่วง $1.80 \times 10^{-7} - 9.14 \times 10^{-7}$ cm²/s มีค่า Retardation factor (R) อยู่ในช่วง 37 – 81 ดินลูกรังคอหงส์ มีค่า Diffusion coefficient (D) อยู่ในช่วง $1.00 \times 10^{-5} - 6.164 \times 10^{-6}$ cm²/s โดยมีค่า Retardation factor (R) อยู่ในช่วง 1 – 36

ความหนาของชั้นกันซึมคำนวณจากค่าพารามิเตอร์การเคลื่อนที่ พบว่า การใช้ทรายผสมเบนโทไนต์ที่ 5% และดินลูกรังคอหงส์ สำหรับเป็นชั้นกันซึมหนา 60 cm ตามมาตรฐานกระทรวงวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม (2542) ไม่สามารถลดการปนเปื้อนของสารปนเปื้อนในน้ำชะมูลฝอยลงน้ำใต้ดินในระยะเวลา 100 ปีได้ แต่สำหรับการใช้ดินเหนียวมารินเกาะยอเพื่อเป็นชั้นกันซึม ที่มีความหนาประมาณ 30 cm จะสามารถลดการปนเปื้อนของสารปนเปื้อนลงสู่สิ่งแวดล้อมในระยะเวลา 100 ปีได้

ABSTRACT

Compacted clays are usually used in landfill as liners to minimize transport of organic and inorganic contaminant into groundwater. This study was emphasized on a potential use of sand-bentonite mixtures, Kho Hong lateritic soil and Koh Yor marine clay as landfill liners subjected to five heavy metal solutions namely; cadmium , lead , zinc , chromium and nickel. Soil properties obtained from series of experiments indicate that the bentonite was a high plasticity clay whereas Kho Hong lateritic soil and Koh Yor marine clay were low plasticity clays. Cation exchange capacities of the soils ranking from highest to lowest were; bentonite, Koh Yor marine clay and Kho Hong lateritic soil, respectively. Langmuir isotherm was fitted well with data obtained from batch adsorption test for bentonite and Koh Yor marine clay whereas, for Kho Hong lateritic soil, Freundlich isotherm provided the best fit.

Hydraulic conductivities of sand mixed with bentonite of more than 3 percent content were lower than 1×10^{-7} cm/s. The hydraulic conductivities of sand-5% bentonite content, Kho Hong lateritic soil, and Koh Yor marine clay were 5.15×10^{-9} , 3.39×10^{-8} and 5.67×10^{-8} cm/s, respectively. A series of 500 days hydraulic conductivity tests results shows that the hydraulic conductivities were compatible with chromium solution if the concentration of chromium solution were not greater than 0.001 M for sand-bentonite mixture and Kho Hong lateritic soil , and not greater than 0.01 M for Koh Yor marine clay, respectively.

Transport parameters of the soils for each heavy metal solution were obtained from column tests. For sand-5% bentonite mixture, the diffusion coefficient ranged from 1.12×10^{-5} to 1.77×10^{-5} cm²/s and the retardation factor ranged from 90 to 130. For Koh Yor marine clay, the diffusion coefficient ranged from 1.80×10^{-7} to 9.14×10^{-7} cm²/s and retardation factor ranged from 37 to 81. For Kho Hong lateritic soil, the diffusion coefficient ranged from 1.00×10^{-5} to 6.164×10^{-6} cm²/s and retardation factor ranged from 1 to 36.

Suitable thicknesses of earthen liners calculated using the transport parameter obtain from this study indicate that, for sand-bentonite mixture and Kho Hong lateritic soil, a liner thickness of 60 cm as recommended by Thai ministry of Science, Technology and Environment was not adequate for 100 years service time whereas for Koh Yor marine clay, a liner with 30 cm thickness was adequate.

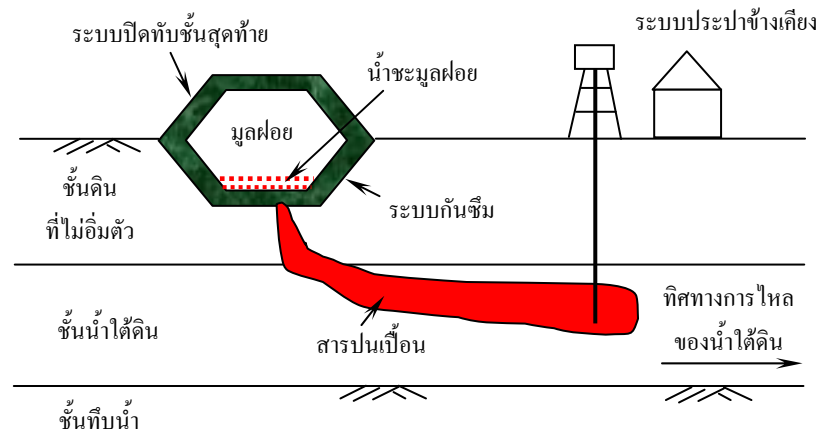
Executive Summary

บทนำ

การขยายตัวของชุมชนเมือง และการกระจายความเจริญสู่ชนบท ทำให้ประชาชนในพื้นที่เหล่านี้มีรายได้มากขึ้นความเป็นอยู่ที่ดีขึ้น รวมถึงมีความสามารถในการจับจ่ายใช้สอยมากขึ้นด้วย ผลพวงของสิ่งเหล่านี้คือ การเพิ่มขึ้นของจำนวนมูลฝอย การเพิ่มขึ้นของมูลฝอยเหล่านี้จะต้องมีการดูแล และจัดการที่ดีเพื่อคงไว้ซึ่งสุขอนามัย และสิ่งแวดล้อมของชุมชนนั้นๆ เช่น การนำไปฝังกลบในบ่อฝังกลบ การก่อสร้างบ่อฝังกลบมูลฝอยที่ดีมีความจำเป็นที่จะต้องมีชั้นกันซึมในตอนล่างของบ่อ เพื่อป้องกันการไหลซึมของน้ำชะมูลฝอยซึ่งเกิดจากการที่น้ำฝนได้ชะล้างและทำปฏิกิริยาทางเคมีกับสารหลากหลายชนิด ซึ่งบางชนิดก็เป็นสารพิษที่ปะปนอยู่ในมูลฝอย ถ้าสารพิษที่อยู่ในน้ำชะมูลฝอยไหลซึมลงไปปนเปื้อนน้ำใต้ดิน ก็จะก่อให้เกิดอันตรายต่อผู้บริโภคน้ำใต้ดินนั้นได้ ผลการศึกษาคุณสมบัติของน้ำชะมูลฝอยในประเทศไทย พบว่า มีโลหะหนักหลายชนิดมีความเข้มข้นสูง โลหะหนักเหล่านี้ถ้าซึมลงไปปนเปื้อนน้ำใต้ดินก็จะทำให้น้ำใต้ดินนั้นไม่สามารถนำมาบริโภคได้ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการศึกษาคุณสมบัติของดินที่เหมาะสมเพื่อนำมาทำเป็นชั้นกันซึม

การเคลื่อนที่ของสารปนเปื้อนที่รั่วจากสถานที่ฝังกลบไปสู่ระบบปะปาข้างอันอาจเกิดปัญหาต่อการบริโภคน้ำประปานั้นได้แสดงดังภาพประกอบที่ 1 กล่าวคือเมื่อระบบกันซึมไม่มีประสิทธิภาพ สารปนเปื้อนในน้ำชะมูลฝอยจะไหลลงไปตามน้ำใต้ดินทำให้น้ำใต้ดินปนเปื้อนเมื่อมีการสูบน้ำใต้ดินที่ปนเปื้อนไปใช้ จะทำให้เกิดปัญหากับผู้บริโภคน้ำประปานั้นได้

ดินที่ใช้ในการก่อสร้างชั้นกันซึมจำเป็นจะต้องมีคุณสมบัติหลายประการ เพื่อให้ค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่าน (K) น้อยกว่า 1×10^{-7} cm/s ซึ่งเป็นค่าที่เหมาะสมสำหรับชั้นกันซึมที่กำหนดโดยกรมควบคุมมลพิษ คุณสมบัติดังกล่าวประกอบด้วย ขนาดของเม็ดดิน, การคละกั้นของเม็ดดิน, ค่าความเป็นพลาสติกของดิน, ค่า Cation exchange capacity นอกจากนี้วิธีบดอัดและ ปริมาณน้ำที่ใช้ในการบดอัด เพื่อให้ดินอยู่ในสถานะที่แน่นขึ้นก็ยังมีส่วนทำให้น้ำซึมผ่านแล้ว คุณสมบัติทางเคมีบางประการของดิน ยังสามารถหน่วง (Retard) และ ดูดซับ (Adsorb) สารปนเปื้อนในน้ำได้อีกด้วย คุณสมบัติดังกล่าวสามารถอธิบายได้โดยพารามิเตอร์การเคลื่อนที่ (Transport Parameters) อันได้แก่ สัมประสิทธิ์การแพร่ (Diffusion coefficient, D) สัมประสิทธิ์การแบ่ง (Partition coefficient, Kp) และ แฟกเตอร์การหน่วง (Retardation factor, R)



ภาพประกอบที่ 1 การเคลื่อนที่ของสารปนเปื้อนจากสถานที่ฝังกลบไปสู่ น้ำใต้ดิน

การศึกษาค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่านและค่าพารามิเตอร์การเคลื่อนที่ของสารปนเปื้อนผ่านทรายผสมเบนโทไนต์และดินเหนียว ที่จะนำมาใช้เป็นวัสดุในชั้นกันซึมของสถานที่ฝังกลบมูลฝอย จะสามารถนำไปออกแบบชั้นกันซึมที่มีประสิทธิภาพเพื่อลดปัญหาการปนเปื้อนของน้ำใต้ดินได้

วัตถุประสงค์

การวิจัยครั้งนี้ ได้ศึกษาคูณสมบัติของดิน 3 ชนิด โดยศึกษาความสามารถในการดูดซับ ศึกษาพารามิเตอร์การเคลื่อนที่ ศึกษาค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่าน และศึกษาผลกระทบของความเข้มข้นของสารละลายโลหะหนักต่อค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่าน เพื่อนำไปประกอบการออกแบบความเหมาะสมและความหนาของการใช้ดินดังกล่าวสำหรับการใช้เป็นชั้นกันซึมสำหรับสารละลายโลหะหนัก

ขอบเขตการศึกษา

การศึกษการใช้ทรายผสมเบนโทไนต์และดินเหนียวสำหรับชั้นกันซึมของสถานที่ฝังกลบมูลฝอย ประกอบด้วยการศึกษาการเคลื่อนที่ของโลหะหนัก ผ่านชั้นทรายผสมเบนโทไนต์และดินเหนียว ในระดับห้องปฏิบัติการ โดยโลหะหนักที่ศึกษาประกอบด้วย Cadmium (Cd^{2+}), Lead (Pb^{2+}), Zinc (Zn^{2+}), Nickel (Ni^{2+}) และ Chromium (Cr^{3+})

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

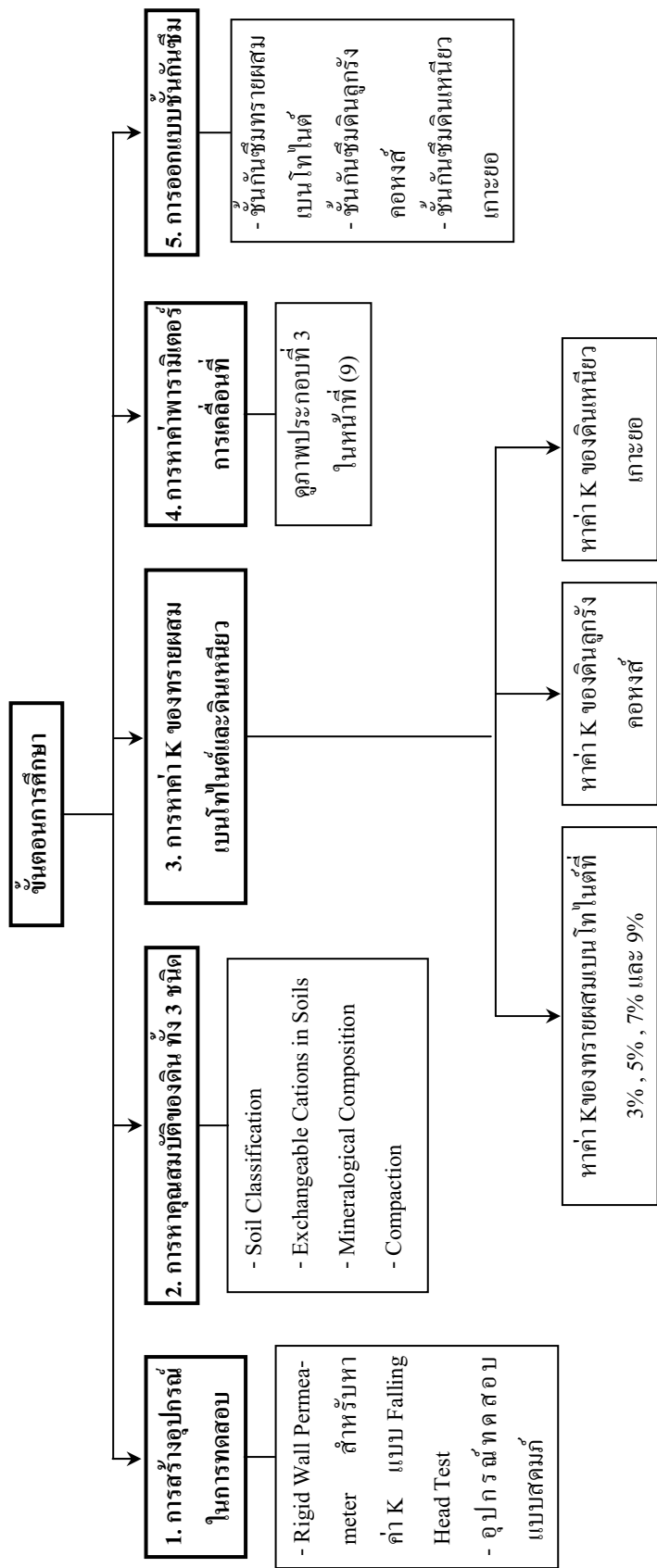
- 1.4.1 สามารถทราบถึงความเหมาะสมของทรายผสมเบนโทไนต์และดินเหนียวในการใช้เป็นวัสดุกันซึมของสถานที่ฝังกลบมูลฝอย
- 1.4.2 สามารถทราบถึงพารามิเตอร์การเคลื่อนที่ของทรายผสมเบนโทไนต์และดินเหนียว
- 1.4.3 สามารถทราบถึงความหนาที่เหมาะสมของชั้นกันซึมทรายผสมเบนโทไนต์และดินเหนียว ในสถานที่ฝังกลบมูลฝอย

วิธีการวิจัย

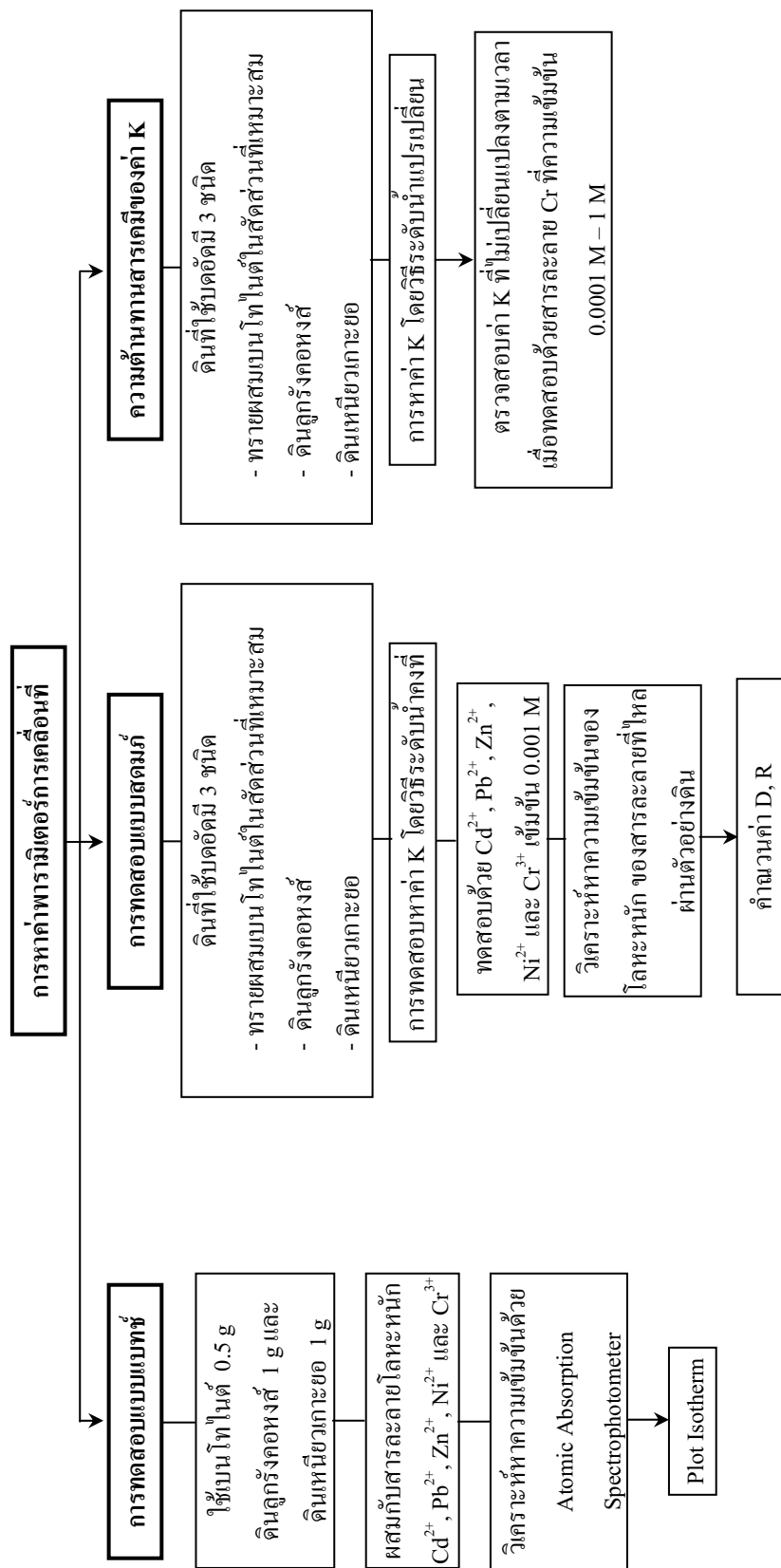
การศึกษาความเหมาะสมของดิน 3 ชนิด ประกอบด้วย ทรายผสมเบนโทไนต์ ดินลูกรังคอหงส์และดินเหนียวเกาะยอ ทำการทดสอบกับโลหะหนัก 5 ชนิด ได้แก่ เพื่อใช้เป็นชั้นกันซึมของสถานที่ฝังกลบมูลฝอย สามารถแบ่งวิธีดำเนินการศึกษาได้เป็น 5 ส่วนใหญ่ๆ ด้วยกัน (ภาพประกอบที่ 2) โดยขั้นตอนแรกเป็นการสร้างอุปกรณ์ทดลอง Column Test ขั้นตอนที่สองคือ การหาคุณสมบัติของดินทั้ง 3 ชนิด ซึ่งแบ่งเป็นคุณสมบัติทางกายภาพของดิน การแลกเปลี่ยนประจุในดินและแร่ธาตุในดิน ขั้นตอนที่สามเป็นการหาค่า K ทรายผสมเบนโทไนต์และดินเหนียว ขั้นตอนที่สี่เป็นการทดสอบเพื่อหาค่าพารามิเตอร์การเคลื่อนที่ โดยแบ่งการทดสอบออกเป็น 3 ส่วน (ภาพประกอบที่ 3) คือ การทดสอบแบบแบทช์ การทดสอบแบบสแตมภ์ เพื่อหาค่า K, R, D และ n และความต้านทานสารเคมีของค่า K ของดิน เมื่อทดสอบดินทั้ง 3 ชนิดกับโลหะหนักที่ความเข้มข้นต่างๆกันกับเวลา โดยวิธี Falling Head Test และ ขั้นตอนสุดท้ายเป็นการออกแบบความหนาของชั้นกันซึม โดยใช้พารามิเตอร์การเคลื่อนที่ได้จากการทดลองทั้ง 3 ส่วน ดังที่กล่าว และใช้ข้อมูลความเข้มข้นของสารปนเปื้อนของโลหะหนักในน้ำชะมูลฝอยจากประกาศคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ ฉบับที่ 20 พ.ศ.2543 และ USEPA (1986)

สรุปผลการวิจัย

ผลการศึกษาความเหมาะสมของการใช้ดิน 3 ชนิด เพื่อใช้เป็นชั้นกันซึมในสถานที่ฝังกลบมูลฝอย ประกอบด้วย ทรายผสมเบนโทไนต์ ดินลูกรังคอหงส์ และดินเหนียวเกาะยอ (ดินเหนียวมาริน) โดยมีโลหะหนักที่ศึกษา 5 ชนิด ได้แก่ Cd^{2+} , Pb^{2+} , Zn^{2+} , Ni^{2+} และ Cr^{3+} ผลการศึกษาสามารถสรุปได้ดังนี้



ภาพประกอบที่ 2 ขั้นตอนการวิจัย



ภาพประกอบที่ 3 ขั้นตอนการวิจัย

1) เบนโทไนด์ถูกจำแนกเป็นดินเหนียวที่มีความเป็นพลาสติกสูง (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 เบนโทไนด์, ดินเหนียวเกาะยอ และดินลูกรังคอหงส์ ตามลำดับ

3) การบดอัดทรายผสมเบนโทไนด์ พบว่า ทรายผสมเบนโทไนด์ จะต้องมีความปริมาณเบนโทไนด์ไม่น้อยกว่า 3% จึงจะให้ค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่าน ไม่มากกว่า 1×10^{-7} cm/s สำหรับปริมาณเบนโทไนด์ที่มากกว่า 5% ค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่าน ไม่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญในช่วง 10^{-9} cm/s

4) ค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่านของทรายผสมเบนโทไนด์ที่ 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 1×10^{-7} cm/s ถ้าความเข้มข้นของสารละลาย Cr^{3+} ไม่เกิน 0.001 M สำหรับทรายผสมเบนโทไนด์และดินลูกรังคอหงส์ และไม่เกิน 0.01 M สำหรับดินเหนียวเกาะยอ ตามลำดับ

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

7) ชนิดของโลหะหนักที่ถูกดูดติดผิวโดยดิน พิจารณาจากค่า Adsorption capacity เรียงจากมากไปน้อย ได้แก่ Cr^{3+} , Pb^{2+} , Cd^{2+} , Zn^{2+} และ Ni^{2+} สำหรับเบนโทไนด์, 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 ในขณะที่ไอโซเทอมของดินเหนียวเกาะยอและเบนโทไนด์ 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 การใช้ดินลูกรังคอหงส์หนา 60 cm สำหรับเป็นชั้นกันซึมตามมาตรฐานกระทรวงวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม (2542) เพียงอย่างเดียว ไม่สามารถป้องกันการปนเปื้อนของสารปนเปื้อนในน้ำชะมูลฝอยลงสู่ดินและน้ำใต้ดินในระยะเวลา 100 ปีได้ ความหนาที่เหมาะสมของดินลูกรังคอหงส์ อาจจะต้องหนาถึง 270 cm อย่างไรก็ตามชั้นกันซึมที่หนาเกินไปจะมีค่าค่อนข้างแพงและไม่เหมาะสมในทางปฏิบัติ ดังนั้นจึงแนะนำให้ใช้ HDPE ปูที่พื้นด้านล่างของชั้นกันซึมบดอัด

กิตติกรรมประกาศ

ผลงานวิจัยฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ด้วยความช่วยเหลือให้จากหลายฝ่ายจึงขอขอบคุณมา ณ.ที่นี้ ผู้วิจัยขอขอบคุณทบวงมหาวิทยาลัยและสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัยตามโครงการทุนพัฒนาศักยภาพในการทำงานวิจัยของอาจารย์รุ่นใหม่ สัญญาเลขที่ MRG 4680044

ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมโยธาและคณะกรรมการจัดการสิ่งแวดล้อมมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ สำหรับความเอื้อเฟื้อเครื่องมือและสถานที่ทำวิจัย ผู้วิจัยขอขอบพระคุณนักวิจัยที่ปรึกษา รศ.ดร.สุรพล อารีย์กุล ที่ได้กรุณาให้คำปรึกษา แนะนำ และแก้ไขข้อบกพร่อง ขอขอบคุณ รศ.ดร. อุดมผล พิชน์ไพบูลย์ หัวหน้าภาควิชาวิศวกรรมโยธา รศ.ดร. ชูศักดิ์ ลิ้มสกุล คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์ ผู้บังคับบัญชาของผู้วิจัยที่ให้การสนับสนุนการทำวิจัย

ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร. เพ็ญใจสมพงษ์ชัยกุล ผศ.ดร.ผกามาศ เจษฎ์พัฒนานนท์ และ ผศ.ดร.สุเมธ ไชยประพัทธ์ ที่ได้กรุณาให้คำปรึกษาในการทำวิจัย ขอขอบคุณคุณพลวัตร คงสม เจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการปฐพีกลศาสตร์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คุณทิตยา แซ่ฮึง เจ้าหน้าที่ห้องทดลองคณะกรรมการจัดการสิ่งแวดล้อม ที่ให้ความช่วยเหลือในการวิเคราะห์ตัวอย่าง

ขอขอบคุณคุณครอบครัวเฉลิมยานนท์ ครอบครัวจ่างทอง ดร. กุสุมาลย์ และเด็กหญิงสิรินทร์ เฉลิมยานนท์ สำหรับกำลังใจที่มีให้ผู้วิจัยมาโดยตลอด และสุดท้าย งานวิจัยชิ้นนี้จะสำเร็จไปไม่ได้ถ้าไม่ได้การทำงานหนักและอดทนของลูกศิษย์ของผู้วิจัย คุณนันทนิตย์ เจริญไรสง

ดร. ธนิต เฉลิมยานนท์

สารบัญ

(13)	1
(17)	1
(18)	3
(21)	3
	3
	4
	6
	6
	7
	7
	7
	8
	8
	9
	9
	9
	11
	11
	14
	14
(13)	

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 การสร้างอุปกรณ์การทดสอบแบบสดมภ์พร้อมระบบเพิ่มความดันแบบความดันคงที่	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 การคำนวณหาค่าพารามิเตอร์การเคลื่อนที่จากการหาค่า ความเข้มข้นของโลหะหนักของ Effluent เทียบกับเวลา	39
3.5.3.2 การคำนวณหาค่าพารามิเตอร์การเคลื่อนที่จากค่า ความเข้มข้นของโลหะหนักจากการสกัดโลหะหนักออกจาก ตัวอย่างดินที่แบ่งเป็นชั้นๆ 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 ผลการศึกษาคูสมบัติของดิน	46
4.2 ผลการศึกษาค่า K	48
4.2.1 ผลการศึกษาค่า K ของทรายผสมเบนโทไนต์เพื่อหาปริมาณ เบนโทไนต์ที่เหมาะสม	48
4.2.2 ผลการศึกษาค่า K ของทรายผสมเบนโทไนต์ ดินลูกรังคอหงส์ และดินเหนียวเกาะขอม	50
4.3 ผลการศึกษาความต้านทานของสารเคมีของค่า K	50
4.3.1 ความต้านทานสารเคมีของทรายผสมเบนโทไนต์	50
4.3.2 ความต้านทานสารเคมีของดินลูกรังคอหงส์	52
4.3.3 ความต้านทานสารเคมีของดินเหนียวเกาะขอม	54
4.4 คุณสมบัติการดูดซับ	54
4.4.1 ไอโซเทอมของการดูดซับ	60

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.5 ผลการศึกษาค่าพารามิเตอร์การเคลื่อนที่	63
4.5.1 ผลการศึกษาค่าพารามิเตอร์การเคลื่อนที่ของดินลูกรังคองหังส์จาก Breakthrough curves	63
4.5.1.1 ค่า K ของดินลูกรังคองหังส์เมื่อทดสอบด้วย Mixed solution	63
4.5.1.2 พารามิเตอร์การเคลื่อนที่ของดินลูกรังคองหังส์	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 การห้วงโลหะหนักของชั้นกันซึมดินเหนียวบดอัด	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 รายละเอียดความเข้มข้นของโลหะหนักที่ใช้ในการทดสอบแบบเบทซ์	42
3.7 ช่วงความยาวคลื่นที่ใช้ในการวัดโลหะหนักด้วยเครื่อง Flame atomic absorption spectrophotometer	44
4.1 คุณสมบัติบางประการของเบนโทไนต์ 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_L/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 ระยะเวลาที่ค่าความเข้มข้นที่ด้านล่างของชั้นกันซึมมากกว่าค่าความเข้มข้นมาตรฐานเมื่อกำหนดค่าความหนาของชั้นกันซึมให้เท่ากับ 60 cm	99
5.3 ค่าความหนาที่เหมาะสมของชั้นกันซึมเมื่อกำหนดเวลาในการใช้งานชั้นกันซึมเท่ากับ 100 ปี	100

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	=	ความเข้มข้นของโลหะหนักที่ถูกดูดซับในดินที่แบ่งเป็นชั้นๆ
C_{sm}	=	ความเข้มข้นสูงสุดของโลหะหนักที่ถูกดูดซับในดินที่แบ่งเป็นชั้นๆ
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	=	อัตราการเคลื่อนที่ของมวลของสารปนเปื้อนที่เคลื่อนที่แบบการแพร่ผ่านชั้นกันซึม ต่อหน่วยพื้นที่ (Diffusive mass flux) มีหน่วยเป็น M/L^2
K	=	ค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่าน (Hydraulic conductivity) มีหน่วยเป็น cm/s
K_F	=	สัมประสิทธิ์พาร์ทิชันของสมการแบบ Freundlich มีหน่วยเป็น L/kg
K_p	=	สัมประสิทธิ์พาร์ทิชัน (Partition coefficient) มีหน่วยเป็น L/kg
L	=	ความหนาของตัวอย่างดิน
LL	=	ค่าพิสัยความเหลวของดิน (Liquid limit) มีหน่วยเป็น %
M_q	=	มวลของสารละลายที่ถูกดูดซับ (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	=	พิกเลี่ยนัมเบอร์ (Peclet number)

ตัวย่อและสัญลักษณ์ (ต่อ)

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

รายการภาพประกอบ

ภาพประกอบ	หน้า
1.1 การเคลื่อนที่ของสารปนเปื้อนจากสถานที่ฝังกลบไปสู่ น้ำใต้ดิน	2
2.1 วัสดุกันซึมแบบดินที่มีอัตราการไหลซึมต่ำ (Low permeable soil liner)	5
2.2 โครงสร้างของมอดอร์ลิโกลินต์แบบ 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 การทดสอบแบบเบทซ์	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 ดินลูกรังคองหงส์ และดินเหนียวเกาะยอ	56
4.7 ไอโซเทอมการดูดติดผิวของ Pb^{2+} โดยเบนโทไนต์ ดินลูกรังคองหงส์ และดินเหนียวเกาะยอ	56
4.8 ไอโซเทอมการดูดติดผิวของ Zn^{2+} โดยเบนโทไนต์ ดินลูกรังคองหงส์ และดินเหนียวเกาะยอ	57
4.9 ไอโซเทอมการดูดติดผิวของ Cr^{3+} โดยเบนโทไนต์ ดินลูกรังคองหงส์ และดินเหนียวเกาะยอ	57
4.10 ไอโซเทอมการดูดติดผิวของ Ni^{2+} โดยเบนโทไนต์ ดินลูกรังคองหงส์ และดินเหนียวเกาะยอ	58
4.11 ไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบ Langmuir ของเบนโทไนต์	58
4.12 ไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบ Freundlich ของดินลูกรังคองหงส์	59
4.13 ไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบ Langmuir ของดินเหนียวเกาะยอ	59
4.14 ความสัมพันธ์ของค่า K กับเวลาของดินลูกรังคองหงส์เมื่อทดสอบกับ Mixed solution	64
4.15 ความเข้มข้นของสุดท้ายของ Effluents จากดินลูกรังคองหงส์เมื่อทดสอบด้วย Mixed solution	66
4.16 ผลการเปรียบเทียบ Breakthrough curve จากการหา C/C_0 จากการทดสอบ และการคำนวณของดินลูกรังคองหงส์เมื่อทดสอบด้วย Mixed solution	67
4.17 ความสัมพันธ์ของค่า K กับเวลาของทรายผสมเบนโทไนต์ที่ 5 %	70
4.18 ความสัมพันธ์ของค่า K กับเวลาของดินลูกรังคองหงส์	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

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) กับเวลาของชั้นกันซึมดินลูกรังคอกหงส์หนา 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+} ผ่านชั้นกันซึมดินลูกรังคอกหงส์หนา 60 cm	88
5.10 Breakthrough curves ของ Cd^{2+} ผ่านชั้นกันซึมดินลูกรังคอกหงส์หนา 60 cm	89
5.11 Breakthrough curves ของ Ni^{2+} ผ่านชั้นกันซึมดินลูกรังคอกหงส์หนา 60 cm	90
5.12 Breakthrough curves ของ Pb^{2+} ผ่านชั้นกันซึมดินลูกรังคอกหงส์หนา 60 cm	91
5.13 Breakthrough curves ของ Zn^{2+} ผ่านชั้นกันซึมดินลูกรังคอกหงส์หนา 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	=	ความเข้มข้นของโลหะหนักที่ถูกดูดซับในดินที่แบ่งเป็นชั้นๆ
C_{sm}	=	ความเข้มข้นสูงสุดของโลหะหนักที่ถูกดูดซับในดินที่แบ่งเป็นชั้นๆ
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	=	อัตราการเคลื่อนที่ของมวลของสารปนเปื้อนที่เคลื่อนที่แบบการแพร่ผ่านชั้นกันซึม ต่อหน่วยพื้นที่ (Diffusive mass flux) มีหน่วยเป็น M/L^2
K	=	ค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่าน (Hydraulic conductivity) มีหน่วยเป็น cm/s
K_F	=	สัมประสิทธิ์พาร์ทิชันของสมการแบบ Freundlich มีหน่วยเป็น L/kg
K_p	=	สัมประสิทธิ์พาร์ทิชัน (Partition coefficient) มีหน่วยเป็น L/kg
L	=	ความหนาของตัวอย่างดิน
LL	=	ค่าพิกัดความเหลวของดิน (Liquid limit) มีหน่วยเป็น %
M_q	=	มวลของสารละลายที่ถูกดูดซับ (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	=	พิกละย์นัมเบอร์ (Peclet number)

ตัวย่อและสัญลักษณ์ (ต่อ)

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

บทที่ 1

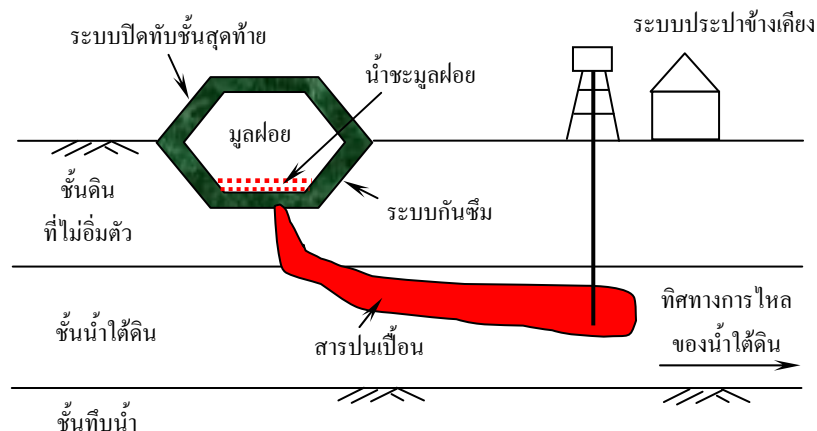
บทนำ

1.1 บทนำ

การขยายตัวของชุมชนเมือง และการกระจายความเจริญสู่ชนบท ทำให้ประชาชนในพื้นที่เหล่านั้นมีรายได้มากขึ้นความเป็นอยู่ที่ดีขึ้น รวมถึงมีความสามารถในการจับจ่ายใช้สอยมากขึ้นด้วย ผลพวงของสิ่งเหล่านี้คือ การเพิ่มขึ้นของจำนวนมูลฝอย ปัจจุบันจังหวัดสงขลามีมูลฝอยที่เกิดขึ้นในเขตเทศบาลเมืองสงขลาประมาณ 60-70 ตัน/วัน และนอกเขตเทศบาลกับอำเภอใกล้เคียงอีกประมาณ 30-40 ตัน/วันรวมทั้งสิ้นประมาณ 100 ตัน/วันและมีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ (นรพัทธ์ ทรงเดชะ, 2540) เช่นเดียวกับแนวโน้มปริมาณมูลฝอยของกรุงเทพมหานครที่เพิ่มขึ้น โดยกรุงเทพมหานครในปี พ.ศ. 2547 มีประมาณ 3,000 – 7,000 ตัน/วัน และในปี พ.ศ. 2548 มีมูลฝอยเกิดขึ้นประมาณ 5,000 – 10,000 ตัน/วัน (สำนักรักษาความสะอาด, 2549)

การเพิ่มขึ้นของมูลฝอยเหล่านี้จะต้องมีการดูแล และจัดการที่ดีเพื่อคงไว้ซึ่งสุขอนามัย และสิ่งแวดล้อมของชุมชนนั้นๆ เช่นการนำไปฝังกลบในบ่อฝังกลบ การก่อสร้างบ่อฝังกลบมูลฝอยที่ดีมีความจำเป็นที่จะต้องมียันกันซึมในตอนล่างของบ่อ เพื่อป้องกันการไหลซึมของน้ำชะมูลฝอยซึ่งเกิดจากการที่น้ำฝนได้ชะล้างและทำปฏิกิริยาทางเคมีกับสารหลากหลายชนิด ซึ่งบางชนิดก็เป็นสารพิษที่ปะปนอยู่ในมูลฝอย ถ้าสารพิษที่อยู่ในน้ำชะมูลฝอยไหลซึมลงไปปนเปื้อนน้ำใต้ดินเบื้องล่าง ก็จะมีก่อให้เกิดอันตรายต่อผู้บริโภคน้ำใต้ดินนั้นได้ Ou (1989) ได้ศึกษาคุณสมบัติของน้ำชะมูลฝอยที่บ่อฝังกลบมูลฝอยที่ถนน อ่อนนุช กรุงเทพมหานคร พบว่า มีโลหะหนักหลายชนิดมีค่าความเข้มข้นสูง โลหะหนักเหล่านี้ถ้าซึมลงไปปนเปื้อนน้ำใต้ดินจะทำให้ น้ำใต้ดินนั้นไม่สามารถนำมาบริโภคได้ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการศึกษาคุณสมบัติของดินที่เหมาะสมเพื่อนำมาทำเป็นชั้นกันซึม

การเคลื่อนที่ของสารปนเปื้อนที่รั่วจากสถานที่ฝังกลบไปสู่ระบบปะปาข้างอันอาจเกิดปัญหาต่อการบริโภคน้ำประปานั้นได้แสดงดังภาพประกอบที่ 1.1 กล่าวคือเมื่อระบบกันซึมไม่มีประสิทธิภาพ สารปนเปื้อนในน้ำชะมูลฝอยจะไหลลงไปตามน้ำใต้ดินทำให้น้ำใต้ดินปนเปื้อน เมื่อมีการสูบน้ำใต้ดินที่ปนเปื้อนไปใช้ จะทำให้เกิดปัญหากับผู้บริโภคน้ำประปานั้นได้



ภาพประกอบที่ 1.1 การเคลื่อนที่ของสารปนเปื้อนจากสถานที่ฝังกลบไปสู่ น้ำใต้ดิน

ดินที่ใช้ในการก่อสร้างชั้นกันซึมจำเป็นจะต้องมีคุณสมบัติหลายประการ เพื่อให้ค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่านน้อยกว่า 1×10^{-7} cm/s ซึ่งเป็นค่าที่เหมาะสมสำหรับชั้นกันซึมที่กำหนดโดยกรมควบคุมมลพิษ คุณสมบัติดังกล่าวประกอบด้วย ขนาดของเม็ดดิน, การคละกันของเม็ดดิน, ค่าความเป็นพลาสติกของดิน, ค่า Cation exchange capacity นอกจากนั้นวิธีบดอัด และปริมาณน้ำที่ใช้ในการบดอัด เพื่อให้ดินอยู่ในสถานะที่แน่นขึ้นก็ยังมีส่วนทำให้ดินนั้น มีค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่านตามต้องการอีกด้วย ดินเหนียวท้องถิ่นที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติก็สามารถนำมาใช้เป็นชั้นกันซึมตามธรรมชาติได้ (Amatya and Takemura, 2002) นอกจากค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่านแล้ว คุณสมบัติทางเคมีบางประการของดิน ยังสามารถหน่วง (Retard) และ ดูดซับ (Adsorb) สารปนเปื้อนในน้ำใต้ดินอีกด้วย คุณสมบัติดังกล่าวสามารถอธิบายได้โดยพารามิเตอร์การเคลื่อนที่ (Transport parameters) อันได้แก่ สัมประสิทธิ์การแพร่ (Diffusion coefficient) สัมประสิทธิ์การแบ่ง (Partition coefficient) และ แฟกเตอร์การหน่วง (Retardation factor)

การศึกษาค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่านและค่าพารามิเตอร์การเคลื่อนที่ของสารปนเปื้อนผ่านทรายผสมเบนโทไนต์และดินเหนียว ที่จะนำมาใช้เป็นวัสดุในชั้นกันซึมของสถานที่ฝังกลบมูลฝอย จะสามารถนำไปออกแบบชั้นกันซึมที่มีประสิทธิภาพเพื่อลดปัญหาการปนเปื้อนของน้ำใต้ดินได้

1.2 วัตถุประสงค์

การวิจัยครั้งนี้ ได้ศึกษาคุณสมบัติของดิน 3 ชนิด โดยศึกษาความสามารถในการดูดซับ ศึกษาพารามิเตอร์การเคลื่อนที่ ศึกษาค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่าน และศึกษาผลกระทบของความเข้มข้นของสารละลายโลหะหนักต่อค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่าน เพื่อนำไปประกอบการออกแบบความเหมาะสมและความหนาของการใช้ดินดังกล่าวสำหรับการใช้เป็นชั้นกันซึมสำหรับสารละลายโลหะหนัก

1.3 ขอบเขตการศึกษา

การศึกษการใช้ทรายผสมเบนโทไนต์และดินเหนียวสำหรับชั้นกันซึมของสถานที่ฝังกลบมูลฝอย ประกอบด้วยการศึกษาการเคลื่อนที่ของโลหะหนัก ผ่านชั้นทรายผสมเบนโทไนต์และดินเหนียว ในระดับห้องปฏิบัติการ ซึ่งกระทำโดยวิธีแบบสดมภ์ โดยโลหะหนักที่ศึกษาประกอบด้วย Cadmium (Cd^{2+}), Lead (Pb^{2+}), Zinc (Zn^{2+}), Nickel (Ni^{2+}) และ Chromium (Cr^{3+}) โดยทำการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่านด้วยวิธี Falling head test (ASTM D2434) ทำการวิเคราะห์ความเข้มข้นของโลหะหนัก ด้วยวิธี Atomic absorption และหาความสามารถในการดูดซับของดินด้วยวิธีแบบแบทช์

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.4.1 สามารถทราบถึงความเหมาะสมของทรายผสมเบนโทไนต์และดินเหนียว ในการใช้เป็นวัสดุกันซึมของสถานที่ฝังกลบมูลฝอย
- 1.4.2 สามารถทราบถึงพารามิเตอร์การเคลื่อนที่ของทรายผสมเบนโทไนต์และดินเหนียว
- 1.4.3 สามารถทราบถึงความหนาที่เหมาะสมของชั้นกันซึมทรายผสมเบนโทไนต์และดินเหนียวในสถานที่ฝังกลบมูลฝอย

บทที่ 2

การตรวจเอกสาร

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยนี้แบ่งออกเป็น 6 ส่วน คือ ชั้นกันซึมดินเหนียวบดอัด, เบนโทไนต์, ทฤษฎีการเคลื่อนที่ของสารปนเปื้อนในตัวกลางพรุน, การทดสอบแบบสดมภ์, การทดสอบแบบเบตซ์และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

2.1 ชั้นกันซึมดินเหนียวบดอัด (Compacted clay liners) ในสถานที่ฝังกลบมูลฝอย

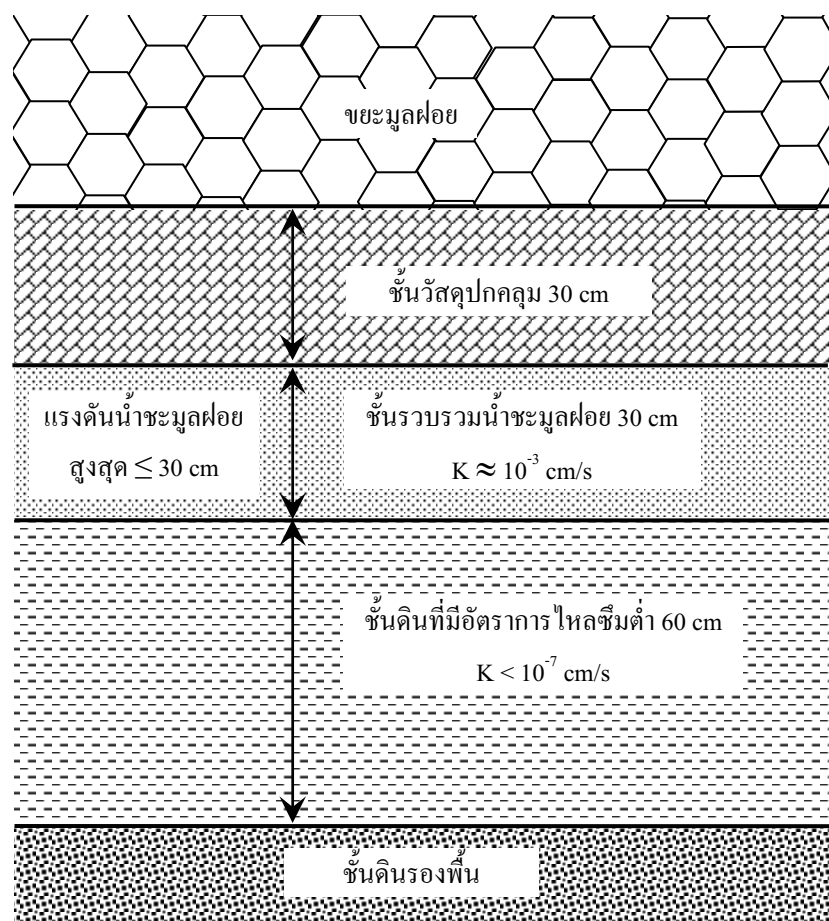
ชั้นกันซึมซึ่งจะอยู่ด้านล่างสุดของบ่อฝังกลบในสถานที่ฝังกลบมูลฝอยทำหน้าที่ป้องกันการไหลซึมของน้ำชะมูลฝอยสู่หน้าดินหรือปล่อยให้ น้ำชะมูลฝอยไหลซึมผ่านได้ ในอัตราที่ไม่ก่อให้เกิดการปนเปื้อนของน้ำใต้ดินจนเป็นอันตรายต่อมนุษย์ ดังนั้นดินที่มีส่วนผสมของดินเหนียวที่บดอัดอย่างเหมาะสมจะสามารถใช้เป็นชั้นกันซึมได้ โดยกระทรวงวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม (2542) ได้แบ่งประเภทของการปูวัสดุกันซึมที่ผนังและก้นบ่อฝังกลบ ออกเป็น 4 ประเภท ได้แก่

- การใช้ดินที่มีอัตราการไหลซึมต่ำ (Low permeable soil liner) (ภาพประกอบที่ 2.1) ที่ประกอบด้วยชั้นดินเหนียวบดอัดหนา 60 cm มีค่า K ต่ำกว่า 1×10^{-7} cm/s โดยที่แรงดันของน้ำชะมูลฝอย (Hydraulic head) ต้องไม่เกิน 30 cm

- การใช้แผ่นวัสดุสังเคราะห์ชั้นเดียวกับดินที่มีอัตราการไหลซึมต่ำ (Single geosynthetic liner with low permeable soil) โดยใช้แผ่นโพลีเอททิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE) หนา 1.5 mm ขึ้นไป และชั้นด้านล่างเป็นดินบดอัดหนา 60 cm มีค่า K ของน้ำที่อิ่มตัวต่ำกว่า 1×10^{-5} cm/s

- การใช้วัสดุกันซึมผสม (Composite liner) มีลักษณะคล้ายกับการใช้วัสดุสังเคราะห์ชั้นเดียว ต่างกันที่จะมีค่า K ของดินที่อยู่ชั้นล่างของวัสดุสังเคราะห์ต่ำกว่า 1×10^{-7} cm/s

การบดอัดดิน คือ กระบวนการที่ทำให้ดินแน่นด้วยเครื่องมือกล เพื่อไล่อากาศออกไปจากช่องว่างระหว่างเม็ดดิน ซึ่งจะทำให้เม็ดดินอัดตัวกันแน่นขึ้น เมื่อดินมีความแน่นเพิ่มขึ้นแล้ว ก็จะสามารถรับน้ำหนักได้มากขึ้น การทรุดตัวของดินก็จะน้อยลง และยอมให้น้ำไหลซึมผ่านได้น้อยลง (มณเฑียร กังสศิริเทียม, 2529)



ภาพประกอบที่ 2.1 วัสดุกันซึมแบบดินที่มีอัตราการไหลซึมต่ำ (Low permeable soil liner)
(กระทรวงวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม, 2542)

การใช้ดินเหนียวที่เหมาะสมมาบดอัดจะสามารถใช้เป็นชั้นกันซึมได้ โดยกำหนดว่าจะต้องมีค่า K ต่ำกว่า 1×10^{-7} cm/s ซึ่งอาจจะมีขนาดตั้งแต่ 60 cm - 120 cm โดยดินเหนียวจะถูกบดอัดเป็นชั้นๆ ชั้นละ 15 - 20 cm นอกจากดินเหนียวบดอัดจะยอมให้น้ำชะมูลฝอยไหลซึมผ่านได้ช้ามากแล้ว ยังมีความสามารถคงทนอยู่ได้ยาวนานและมีความสามารถในการหน่วง เนื่องจากในอนุภาคดินเหนียวจะมีประจุลบอยู่ ทำให้สามารถหน่วงประจุบวกของสารอนินทรีย์ ซึ่งเป็นสารปนเปื้อนในน้ำชะมูลฝอยได้

2.1.1 คุณสมบัติของดินเหนียว

2.1.1.1 ประจุลบของแร่ดินเหนียว (Negative charge of clay mineral)

แร่ดินเหนียวมีค่าประจุไฟฟ้าเป็นลบโดยธรรมชาติ ซึ่งประจุลบนี้สามารถดูดประจุบวกของโมเลกุลของน้ำ ทำให้ดินเหนียวมีน้ำเคลือบอยู่ที่ผิว มีความเหนียวและมีความเป็นพลาสติก สาเหตุที่ทำให้แร่ดินเหนียวมีประจุเป็นลบสามารถสรุปได้ดังนี้

- ประจุลบที่เกิดจากการที่แทนที่แบบไอโซมอร์ฟัส (Isomorphous substitution) ซึ่งเป็นการเกิดประจุลบที่สำคัญที่สุด การเกิดประจุลบแบบนี้ คือ การเข้าไปแทนที่อย่างถาวรของอะตอมที่มีขนาดใกล้เคียงกัน โดยอะตอมที่มีประจุบวกน้อยกว่าจะไปแทนที่อะตอมที่มีประจุบวกมากกว่า ในกระบวนการเกิดของแร่ดินเหนียว เช่น การแทนที่ของ Al^{3+} ใน Si^{4+} ทำให้ค่าประจุลัพท์ของแร่ดินเหนียวเป็นลบ

- ประจุลบในแร่ดินเหนียวที่เกิดจากการสลายของแรงยึดเหนี่ยว (Broken bond) ที่ยึดแผ่นซิลิกาหรือแผ่นอะลูมินาไว้ด้วยกัน แต่ปรากฏการณ์แบบนี้จะให้ประจุลบไม่ถาวร เพราะแผ่นซิลิกาหรือแผ่นอะลูมินาอาจจะรวมตัวกันใหม่

ความสามารถของดินแต่ละชนิดในการดูดโลหะหนักมาติดที่ผิวมีความแตกต่างกันตามชนิดและปริมาณของแร่ดินเหนียวที่มีอยู่ในดิน โดยจากการรวบรวมข้อมูลของ Yong (2000) สามารถแยกลำดับการดูดซับโลหะหนัก ตามช่วง pH ของน้ำตัวอย่าง ดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ลำดับการดูดซับโลหะหนักตามชนิดของแร่ดินเหนียว (Yong, 2000)

ชนิดของแร่ดินเหนียว	ลำดับของการดูดซับโลหะหนัก	แหล่งอ้างอิง
Montmorillonite Clay (pH 3.5-6)	$Ca > Pb > Cu > Mg > Cd > Zn$	Farrah and Pickering (1977)
Montmorillonite Clay (pH 5-7.5)	$Cd = Zn > Ni$	Plus and Bohn (1988)
Montmorillonite Clay (pH $\approx$ 4) (pH $\approx$ 5) (pH $\approx$ 6)	$Pb > Cu > Zn > Cd$ $Pb > Cu > Cd \approx Zn$ $Pb = Cu > Zn > Cd$	Yong and Phadungchewit (1993)
Illite Clay (pH 3.5-6)	$Pb > Cu > Zn > Ca > Cd > Mg$	Farrah and Pickering (1977)
Illite Clay (pH 4-6)	$Pb > Cu > Zn > Cd$	Yong and Phadungchewit (1993)
Kaolinite Clay (pH 3.5-6)	$Pb > Ca > Cu > Mg > Zn > Cd$	Farrah and Pickering (1977)
Kaolinite Clay (pH 5.5-7.5)	$Cd > Zn > Ni$	Plus and Bohn (1988)

2.1.1.2 ความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวก (Cation exchange capacity)

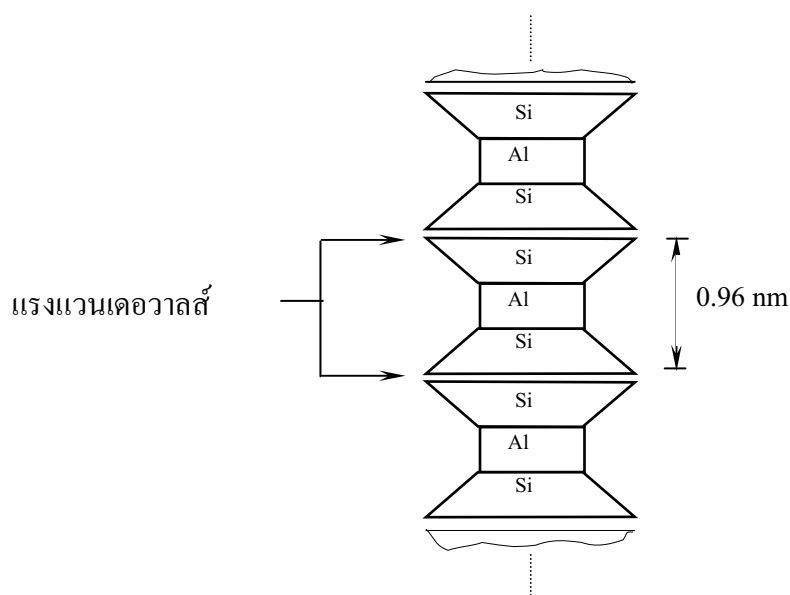
ค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวก (Cation exchange capacity, CEC) ของดินเหนียวขึ้นอยู่กับชนิดของแร่ดินเหนียวที่ประกอบเป็นดินเหนียวนั้นๆ ดินเหนียวที่มี CEC มากกว่าจะสามารถดึงประจุบวกมาเคลือบที่ผิวได้มากกว่า จึงทำให้ความหนาของฟิล์มของน้ำรอบอนุภาคของดินเหนียว (Diffuse double layer, DDL) มากกว่าและค่ามีค่าน้อยกว่า ซึ่ง DDL จะเกิดขึ้นเมื่อดินเหนียวซึ่งมีประจุเป็นลบสัมผัสกับน้ำ ก็จะมีการดึงประจุบวกของไฮโดรเจนในน้ำ และประจุบวกของโลหะที่ละลายอยู่ในน้ำเข้ามาเคลือบที่ผิวก่อให้เกิดเป็นฟิล์มรอบอนุภาคของดินเหนียว การหาค่า CEC ของดินเหนียว ทำได้โดยวัดประจุลบของแร่ดินเหนียวนั่นเอง ค่า CEC มีหน่วยเป็น meq/100g (milliequivalent ของประจุบวกต่อ 100 g ของดินเหนียว) โดยมอนต์มอริลโลไนต์ (Montmorillonite) มีค่า CEC ประมาณ 8-150 meq/100 g

2.2 เบนโทไนต์ (Bentonite)

เบนโทไนต์ เป็นดินที่เกิดจากเถ้าภูเขาไฟ ที่ผ่านกระบวนการเปลี่ยนแปลงตามธรรมชาติเป็นระยะเวลานาน จนเกิดเป็นดินที่มีคุณสมบัติการพองตัวสูง ซึ่งมีองค์ประกอบของมอนต์มอริลโลไนต์ เป็นแร่ดินเหนียวหลัก รองลงมาได้แก่ ซิลิกอนไดออกไซด์ เหล็กออกไซด์ และแคลเซียมออกไซด์ ทำให้เบนโทไนต์มีความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุได้ โดยมีรายละเอียดหลักดังนี้

2.2.1 โครงสร้างหลัก

โครงสร้างการจัดเรียงตัวของผลึกในแร่ดินเหนียว แบบมอนต์มอริลโลไนต์ ประกอบด้วยโครงสร้างหลัก 2 ชนิด คือ แผ่นซิลิกาหรือแผ่นเตตระฮีดรอล (Silica or Tetrahedral Sheet) และแผ่นอะลูมินาหรือแผ่นออกตะฮีดรอล (Alumina or Octahedral sheet) โดยมีการจัดเรียงตัวของโครงสร้างเป็นแบบ 2 : 1 (ภาพประกอบที่ 2.2) ประกอบด้วยแผ่นซิลิกา 2 แผ่น วางอยู่ด้านบนและด้านล่างของแผ่นอะลูมินา 1 แผ่น การวางเรียงตัวของโครงสร้าง 2 : 1 จำนวนหนึ่งชั้น เกิดจากการใช้ออกซิเจนร่วมกันแบบพันธะโควาเลนต์ของแผ่นซิลิกาและแผ่นอะลูมินา แต่ละชั้นมีความหนาประมาณ 0.96 นาโนเมตร แรงยึดเหนี่ยวระหว่างแผ่นซิลิกาชั้นบนและชั้นล่าง คือ แรงแวนเดอร์วาลส์ (Van de waals forces) ซึ่งเป็นแรงที่อ่อนมาก น้ำและไอออนสามารถเข้าไปแทรกระหว่างชั้นของโครงสร้าง 2 : 1 และแบ่งให้ขาดออกจากกันได้ มอนต์มอริลโลไนต์มีความสามารถในการดึงดูดน้ำได้สูงมาก ดังนั้นจึงมีแนวโน้มในการเกิดการพองตัว (Swelling) เมื่อเจอกับน้ำ มีค่า K ต่ำมาก ประมาณ 1×10^{-9} cm/s



ภาพประกอบที่ 2.2 โครงสร้างของมอนต์มอริลโลไนต์แบบ 2 : 1

2.2.2 ความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุของเบนโทไนต์

ความสามารถในการดูดซับและความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุของเบนโทไนต์ มีความแตกต่างกันไปตามองค์ประกอบทางเคมีของมอนต์มอริลโลไนต์ เช่น มอนต์มอริลโลไนต์ที่มีไอออนของโซเดียมแทนที่อยู่ในโครงสร้างเป็นปริมาณมาก จะมีความสามารถในการดูดซับน้ำและเกิดการแลกเปลี่ยนไอออนกับสารอื่นๆ ในสิ่งแวดล้อม ได้ดีกว่ามอนต์มอริลโลไนต์ที่มีไอออนของแคลเซียมหรือโพแทสเซียมแทนที่ สามารถแบ่งเบนโทไนต์ที่ใช้ในอุตสาหกรรมออกได้เป็น 3 กลุ่ม คือ โซเดียมเบนโทไนต์ แคลเซียมเบนโทไนต์และแคลเซียม-แมกนีเซียมเบนโทไนต์

2.2.3 การนำเบนโทไนต์ไปใช้ประโยชน์

เบนโทไนต์ถูกนำไปใช้ในงานหลายๆ ด้าน เช่น

- การใช้เป็นสารหล่อเย็นในการขุดเจาะสำหรับงานทางด้านวิศวกรรมโยธา, การใช้เป็นสารฟอกสีหรือสารดูดซึม เพื่อทำความสะอาดในอุตสาหกรรมกลั่นน้ำมัน, การใช้เป็นสารตัวเติม เพื่อเพิ่มปริมาณเนื้อสาร หรือใช้ในการปรับความหนืดสำหรับอุตสาหกรรมสีและหมึกพิมพ์, การใช้เป็นสารดูดซับกลิ่นของเสีย ที่เกิดจากการขับถ่ายของสัตว์เลี้ยง

- การนำไปดัดแปลงโดยทำปฏิกิริยากับกรดได้แอคติเวตเต็ดเคลย์ (Activated clays) สำหรับใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาหรือทำปฏิกิริยากับโซดาไฟ (NaOH) เปลี่ยนจากแคลเซียมเป็นโซเดียมเบนโทไนต์ เป็นต้น

2.2. 4 แหล่งเบนโทไนต์ที่สำคัญ

ปัจจุบัน เมืองไวโอมิง (Wyoming) ประเทศสหรัฐอเมริกา เป็นแหล่งเบนโทไนต์ที่สำคัญของโลก รองลงมาได้แก่ กลุ่มประเทศอิสระที่แยกตัวจากรัสเซียเดิม ประเทศกรีซ เยอรมัน ญี่ปุ่น และตุรกี ตามลำดับ สำหรับในประเทศไทย พบเบนโทไนต์ ชนิดแคลเซียมเบนโทไนต์อยู่มาก ในอำเภอยะบะคาล จังหวัดลพบุรี (สรินทร์ ลีนปนาท, 2549)

2.3 ทฤษฎีการเคลื่อนที่ของสารปนเปื้อนในตัวกลางพรุน

สารปนเปื้อนที่ไหลปนมากับน้ำชะมูลฝอย หากสามารถเคลื่อนที่ผ่านชั้นกันซึมไปสู่ชั้นน้ำใต้ดินก็จะทำให้น้ำใต้ดินมีการปนเปื้อนได้ ดังนั้นการศึกษาการเคลื่อนที่ของสารปนเปื้อนผ่านชั้นกันซึมจึงมีความสำคัญต่อการออกแบบชั้นกันซึมที่เหมาะสม โดยการเคลื่อนที่ของสารปนเปื้อนในตัวกลางพรุน (เช่น ชั้นกันซึม) ประกอบด้วย 2 กระบวนการหลัก คือ กระบวนการเคลื่อนที่แบบการพา (Advection) และกระบวนการเคลื่อนที่แบบการแพร่ (Diffusion) ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

2.3.1 กระบวนการเคลื่อนที่แบบการพา (Advection)

การเคลื่อนที่แบบการพา คือ กระบวนการที่สารปนเปื้อนเคลื่อนที่ไปกับการไหลซึมของน้ำในตัวกลางพรุน เนื่องจากความแตกต่างของความดันน้ำ (Water head) โดยสารปนเปื้อนในน้ำจะถูกพาจากบริเวณที่มีระดับน้ำสูงกว่าไปยังบริเวณที่มีระดับน้ำต่ำกว่า

สารปนเปื้อนที่เป็นสารละลายแบบนอนรีแอคทีฟ (Non-reactive solutes) ซึ่งไม่ทำปฏิกิริยากับประจุลบในดินเหนียว เช่น คลอไรด์ (Cl⁻) จะเคลื่อนที่แบบการพาไปในดินด้วยความเร็วเฉลี่ยเท่ากับความเร็วในการไหลซึมของน้ำในดิน (Seepage velocity : v_s) ซึ่งสามารถแสดงความสัมพันธ์ดังนี้

$$v_s = \frac{v}{n} \quad (2.1)$$

เมื่อ	v_s	=	ความเร็วในการไหลซึมของน้ำ (L/t)
	n	=	ความพรุนของดิน
	v	=	ความเร็วของดาร์ซี (Darcy velocity ; L/t)

โดยค่าความเร็วของดาร์ซี สามารถหาได้จาก

$$v = \frac{Q}{A} = -K \frac{\Delta H}{\Delta z} \quad (2.2)$$

เมื่อ	Q	=	อัตราการไหล (L ³ /t) ของน้ำในดิน
	A	=	พื้นที่หน้าตัดของดิน (L ²) ที่มีการไหลของน้ำ
	K	=	ค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่าน (L/t)
	ΔH	=	ค่าความแตกต่างของระดับของน้ำ(L) ที่ดินน้ำและทำให้น้ำ
	Δz	=	ความหนาของดิน (L)
	i	=	ความชันทางชลศาสตร์ (Hydraulic gradient) = $\frac{\Delta H}{\Delta z}$

เวลา (t) ของการเคลื่อนที่ในระยะทาง L แบบการพาของสารปนเปื้อนผ่านชั้นกันซึม สามารถคำนวณได้จาก

$$t = \frac{L}{v_s} = \frac{L n}{K i} \quad (2.3)$$

เมื่อ	L	=	ความหนาของตัวอย่างดิน (L)
-------	---	---	---------------------------

อัตราการเคลื่อนที่ของมวลของสารปนเปื้อนที่เคลื่อนที่แบบการพาผ่านชั้นกันซึมต่อหน่วยพื้นที่ (Advective mass flux, J_A) ซึ่งมีหน่วยเป็น M/L² สามารถหาได้จากความสัมพันธ์

$$J_A = C V_s = \frac{K i C}{n} \quad (2.4)$$

เมื่อ	C	=	ความเข้มข้นของสารปนเปื้อน (M/L ³)
-------	---	---	---

2.3.2 กระบวนการเคลื่อนที่แบบการแพร่ (Diffusion)

กระบวนการเคลื่อนที่แบบการแพร่เกิดจากความแตกต่างของความเข้มข้นของสารปนเปื้อนระหว่างจุดสองจุดในดิน ความแตกต่างของความเข้มข้นของสารปนเปื้อนต่อหน่วยระยะทาง (Concentration gradient) ก่อให้เกิดความต่างศักย์ทางเคมี ส่วนที่มีความเข้มข้นมากกว่าก็จะแพร่ไปยังส่วนที่มีความเข้มข้นน้อยกว่า โดยไม่จำเป็นต้องอาศัยการไหลของน้ำ กระบวนการแพร่จะดำเนินไปเรื่อยๆ จนกว่าความเข้มข้นของทั้งสองจุดจะเท่ากันจึงจะหยุดการแพร่ สมการพื้นฐานที่ใช้อธิบายการแพร่สำหรับการเคลื่อนที่ใน 1 มิติ เรียกว่า Fick's law ดังแสดงด้วยสมการต่อไปนี้

$$J_D = -Dn \frac{\partial C}{\partial z} \quad (2.5)$$

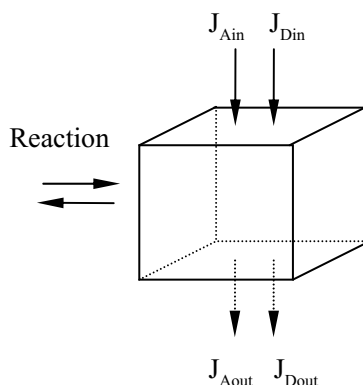
เมื่อ	J_D	=	อัตราการเคลื่อนที่ของมวลของสารปนเปื้อนที่เคลื่อนที่แบบการแพร่ผ่านชั้นกันซึมต่อหน่วยพื้นที่ (Diffusive mass flux, M/L^2t)
	D	=	สัมประสิทธิ์การแพร่ของตัวกลาง (Diffusion coefficient, L^2/t)
	$\frac{\partial C}{\partial z}$	=	อัตราส่วนการเปลี่ยนแปลงของความเข้มข้นต่อระยะทางในแนวการแพร่ ($M/L^3/L$)

2.3.3 สมการการเคลื่อนที่ของสารละลายในดินที่ขึ้นกับเวลา

Shackelford (1993) เสนอว่า การเคลื่อนที่ของมวลสารในดินที่ขึ้นกับเวลา (Transient) ในเรื่อง ทฤษฎีการเคลื่อนที่ของสารปนเปื้อน สามารถอธิบายได้จากกฎทรงมวล โดยมีสมมุติฐานดังต่อไปนี้

- 1) ดินเป็นวัสดุเนื้อเดียว (Homogeneous)
- 2) ค่า K มีค่าคงที่
- 3) ค่าความชันทางชลศาสตร์มีค่าคงที่
- 4) การไหลเป็นแบบหนึ่งมิติ

พิจารณาหน่วยปริมาตรในภาพประกอบที่ 2.3 โดยอัตราการเพิ่มของมวลในหน่วยปริมาตรสามารถอธิบายได้โดยใช้สมการกฎทรงมวล ในสมการที่ 2.6



ภาพประกอบที่ 2.3 กฎทรงมวลของการเคลื่อนที่ของสารปนเปื้อนในหน่วยปริมาตร
(Shackelford, 1993)

$$\begin{aligned} \text{อัตราการเพิ่มของมวล} &= \text{อัตราการเพิ่มของมวลเนื่องจากการพา } (\Delta J_A) + \\ \text{ในหน่วยปริมาตร} &\quad \text{อัตราการเพิ่มของมวลเนื่องจากการแพร่ } (\Delta J_D) + \\ &\quad \text{อัตราการเพิ่ม/ลดของมวลเนื่องจากการเกิดปฏิกิริยากับดิน (Reaction)} \end{aligned} \quad (2.6)$$

อัตราการเพิ่มของมวลเนื่องจากการพาสามารถแสดงได้โดยใช้ความสัมพันธ์จากสมการที่ 2.4 ดังนี้

$$\begin{aligned} \Delta J_A &= J_{Ain} - J_{Aout} \\ \Delta J_A &= -V_s n \frac{\partial c}{\partial z} \end{aligned} \quad (2.7)$$

อัตราการเพิ่มของมวลเนื่องจากการแพร่ สามารถแสดงโดยความสัมพันธ์จากสมการที่ 2.5 ดังนี้

$$\begin{aligned} \Delta J_D &= J_{Din} - J_{Dout} \\ \Delta J_D &= +D n \frac{\partial^2 c}{\partial z^2} \end{aligned} \quad (2.8)$$

ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้น (Reaction) เมื่อสารปนเปื้อนเคลื่อนที่ผ่านเข้าไปในดิน คือ การดูดซับ (Sorption) ซึ่งเกิดจากประจุบวกของสารละลายไปยึดติดกับประจุลบในดินเหนียว อัตราการลดลงของมวลเนื่องจากการดูดซับนี้สามารถเขียนได้ในรูปของความสัมพันธ์ดังนี้

$$\frac{\partial \left(\frac{M_q}{V_v} \right)}{\partial t} = - \frac{\rho_d K_p}{n} \frac{\partial (nC)}{\partial t} \quad (2.9)$$

เมื่อ M_q = มวลที่ถูกดูดซับ
 V_v = ปริมาตรของช่องว่างในดิน
 ρ_d = ความหนาแน่นแห้งของดิน
 K_p = สัมประสิทธิ์พาร์ทิชัน (Partitioning coefficient)

เมื่อแทนค่า สมการที่ 2.7, 2.8 และด้านขวามือของ สมการที่ 2.9 ลงในสมการที่ 2.6 แล้วจัดเรียงใหม่ สมการที่ได้จะแสดงความสัมพันธ์ของการเคลื่อนที่ของมวลของสารปนเปื้อนในดินกับเวลา เรียกว่า สมการการพาและการแพร่ (Advection-diffusion equation) ดังแสดงในสมการที่ 2.10 ดังนี้

$$\frac{D}{R} \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} - \frac{V_s}{R} \frac{\partial C}{\partial z} = \frac{\partial C}{\partial t} \quad (2.10)$$

เมื่อ R = แฟกเตอร์ความหน่วง (Retardation factor)
 $= 1 + \frac{\rho_d K_p}{n}$

โดยค่า R จะมีค่าเท่ากับ 1 สำหรับสารละลายที่ไม่ทำปฏิกิริยา เช่น Cl^- โดยที่ทั้งค่า R และ D ในสมการที่ 2.10 สามารถหาได้จากการทำการทดสอบแบบเบทซ์หรือแบบสมถ์

คำตอบแบบ analytical ของสมการที่ 2.10 ในรูปของความเข้มข้นที่ความลึก z และเวลา t , $C(z,t)$ และอัตราการเคลื่อนที่ผ่านดินของมวลในสารละลายต่อหน่วยพื้นที่ (Mass flux, $J(z,t)$) (Shackelford, 1990) ซึ่งใช้วิเคราะห์หาความเข้มข้นของสารและ Mass flux ที่เคลื่อนที่ผ่านชั้นดินที่เวลาใดๆ สามารถแสดงได้ดังนี้

$$\frac{C(z,t)}{C_0} = \frac{1}{2} \left\{ \operatorname{erfc} \left[\frac{1-T_R}{2\sqrt{\frac{T_R}{P_L}}} \right] + \exp(P_L) \operatorname{erfc} \left[\frac{1+T_R}{2\sqrt{\frac{T_R}{P_L}}} \right] \right\} \quad (2.11)$$

$$F_R = \frac{J(z,t)}{V_s \times n \times C_0} = \left\{ \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left[\frac{1-T_R}{2\sqrt{\frac{T_R}{P_L}}} \right] \right\} + \frac{\exp \left[-\frac{(1-T_R)}{4\frac{T_R}{P_L}} \right]}{\sqrt{\pi T_R P_L}} \quad (2.12)$$

$$\begin{aligned} \text{เมื่อ } T_R &= \text{เฟคเตอร์ของเวลา (Time factor)} \\ &= \frac{V_s t}{R z} \\ P_L &= \text{พิกเลี่ยนัมเบอร์ (Peclet number)} \\ &= \frac{V_s z}{D} \end{aligned}$$

2.4 การทดสอบแบบสดมภ์ (Column Test)

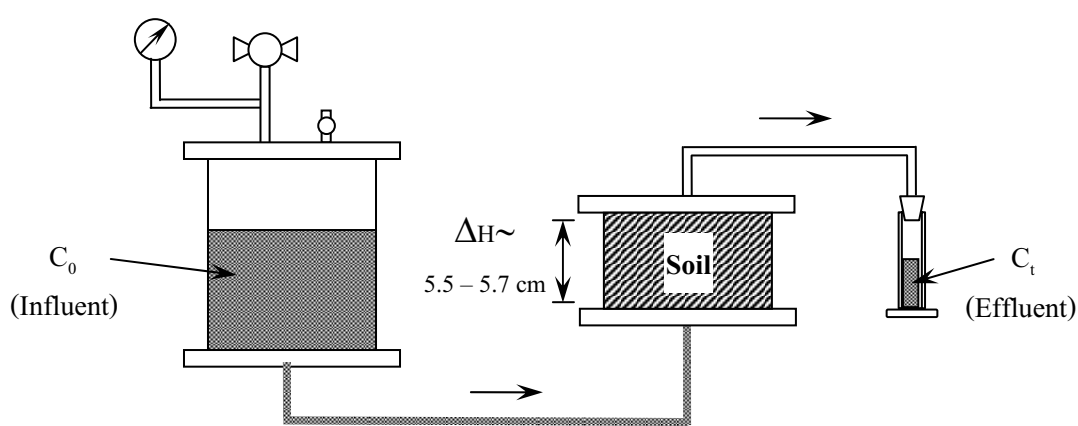
ค่าพารามิเตอร์การเคลื่อนที่สามารถหาได้จากการทดสอบแบบสดมภ์ โดยมีวิธีการหาค่าพารามิเตอร์การเคลื่อนที่ได้ 2 วิธี คือ Breakthrough curve และ Concentration profile ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

2.4.1 การหาค่าพารามิเตอร์การเคลื่อนที่จาก Breakthrough curve

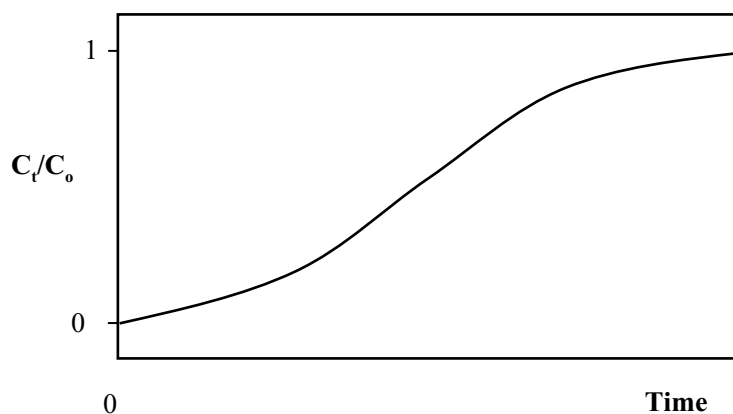
Shackelford (1994) แสดงการใช้การทดสอบแบบสดมภ์ หาค่าพารามิเตอร์ของการเคลื่อนที่ คือ ค่า R และ D ซึ่งจำเป็นต้องใช้ในสมการที่ 2.11 หรือ 2.12 เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างการเคลื่อนที่ของสารปนเปื้อนที่ละลายอยู่ในน้ำผ่านชั้นดินที่มีขนาดเม็ดดินเล็ก เช่น ดินเหนียว ที่มีอัตราการไหลซึมต่ำ โดยเป็นการจำลองการเคลื่อนที่ของสารปนเปื้อนในสนามมาไว้ในห้องปฏิบัติการ โดยการนำสารละลายที่ต้องการศึกษาที่มีความเข้มข้นเริ่มต้น C_0 มาไหลผ่านดินที่

บดอัดแล้ว แล้วเก็บตัวอย่างน้ำที่ปลายอีกด้านหนึ่งของตัวอย่างดินเทียบกับเวลา จากนั้นจึงนำน้ำที่ได้ไปหาความเข้มข้นของสารปนเปื้อนเมื่อเวลาผ่านไป (C_t) แล้วนำไปหาความสัมพันธ์ของ C_t/C_0 กับเวลา

การทำให้สารละลายไหลผ่านดิน อาจจะทำให้น้ำไหลผ่านดิน โดยอาศัยแรงโน้มถ่วงของโลกหรือใช้ระบบเพิ่มความดัน เพื่อเพิ่มแรงดันน้ำ รูปแสดงการทดสอบแบบสแตมภ์ได้แสดงไว้ในภาพประกอบที่ 2.4 ความสัมพันธ์ของ C_t/C_0 กับเวลา “Breakthrough curve” ดังภาพประกอบที่ 2.5



ภาพประกอบที่ 2.4 การทดสอบแบบสแตมภ์พร้อมด้วยอุปกรณ์เพิ่มแรงดันคงที่



ภาพประกอบที่ 2.5 Breakthrough curve

การคำนวณหาค่า R และ D ทำโดยใช้สมการที่ 2.11 โดยการลองผิดลองถูก (Trial and error) ซึ่งทำได้โดยเปลี่ยนค่า R และ D ไปเรื่อยๆ จนกว่า Breakthrough curve ที่ได้จากการทดสอบจะสอดคล้องกับ Breakthrough curve ของการคำนวณ โดยแสดงความต่างของ Breakthrough curves ทั้งสองในรูปของค่าเฉลี่ยของผลต่างยกกำลังสอง (Mean squared error, MSE)

2.4.2 การหาค่าพารามิเตอร์การเคลื่อนที่จาก Concentration profile

การหาค่าพารามิเตอร์การเคลื่อนที่ โดยใช้ Breakthrough curve ทำได้โดยเก็บตัวอย่างน้ำที่ปลายอีกด้านหนึ่งของตัวอย่างดิน แล้วนำน้ำที่ได้ไปหาความเข้มข้นของสารปนเปื้อนเมื่อเวลาผ่านไป C_t แต่ในทางปฏิบัติ วิธีการนี้ต้องใช้ระยะเวลาานานมากเพื่อให้สารละลาย Breakthrough ออกมาที่ท้ายน้ำ ดังนั้น Tanchuling et al. (2003) ได้เสนอวิธีการในการหาค่าพารามิเตอร์ตามสมการที่ 2.11 โดยใช้ Concentration profile โดยการให้สารละลายที่ทราบความเข้มข้นไหลผ่านตัวอย่างดิน แล้วตรวจวัดความเข้มข้นสุดท้ายของโลหะหนักจากการสกัดโลหะหนักออกจากตัวอย่างดินที่แบ่งเป็นชั้นๆ (C_s) โดยความเข้มข้นของโลหะหนักที่ตรวจวัดได้ ($C_{measured}$) สามารถนำไปคำนวณตามสมการที่ 2.13 ดังนี้

$$C_s = \frac{C_{measured} \times \text{Volume(liquid)}}{m_{soil}} \times \frac{1(L)}{10^3 (mL)} \quad (2.13)$$

เมื่อ C_s = ความเข้มข้นของโลหะหนักที่ถูกดูดติดผิวในดินที่แบ่งเป็นชั้นๆ (mg/g)

$C_{measured}$ = ความเข้มข้นของโลหะหนักที่ตรวจวัดได้จากเครื่อง Atomic absorption spectrophotometer (mg/L)

Volume (liquid) = ปริมาตรของสารละลายกรดทั้งหมดที่ใช้ (ใช้ 56 mL)

m_{soil} = น้ำหนักดินแห้งที่ใช้ในการย่อยด้วยกรด เท่ากับ 0.5 g

นำค่า C_s ที่ได้จากสมการที่ 2.13 ไปคำนวณอัตราส่วนระหว่างความเข้มข้นของโลหะหนักที่ถูกดูดติดผิวในดิน (C_s) ต่อกับความเข้มข้นสูงสุดของโลหะหนักที่ถูกดูดติดผิว (C_{sm}) ของโลหะหนักในบริเวณดินชั้นแรก (ลึกประมาณ 0.7 cm) ที่ได้จากการทดสอบแบบสดมภ์ ความสัมพันธ์ของ C_s/C_{sm} กับความลึกของตัวอย่างดิน เรียกว่า “Concentration profile”

การคำนวณหาค่า R, D และ n ทำได้โดยใช้ Concentration profile และสมการที่ 2.11 โดยการลองผิดลองถูก (Trial and error) ซึ่งทำได้โดยเปลี่ยนค่า R และ D ไปเรื่อยๆ จนกว่า Concentration profile ที่ได้จากการทดสอบจะสอดคล้องกับ Concentration profile จากการคำนวณ

2.5 การทดสอบแบบเบตช์ (Batch adsorption test)

กระบวนการดูดซับที่ผิว (Adsorption) คือกระบวนการที่ไอออนหรือโมเลกุลที่อยู่ในสถานะหนึ่งพยายามที่จะรวมตัวกันแน่นและเข้มข้นที่บริเวณผิวของสารในอีกสถานะหนึ่ง โดยไม่มีการเปลี่ยนแปลงสถานะ ตัวอย่างเช่น การที่ไอออนลบของสารละลายอนินทรีย์ถูกดูดซับที่ผิวของดินเหนียว โดยความสามารถในการดูดซับผิวของดินจะขึ้นอยู่กับชนิดของดินและชนิดของสารละลาย ซึ่งสามารถแสดงได้ในรูปของสัมประสิทธิ์พาร์ทิชัน

มวลของสารละลายที่ถูกดูดซับที่ผิว (Mass sorbed, M_q) สามารถคำนวณได้จาก

$$M_q = (C_i - C_f)V_1 \quad (2.14)$$

เมื่อ C_i = ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลาย (mg/L)
 C_f = ความเข้มข้นสุดท้ายของสารละลาย (mg/L)
 V_1 = ปริมาตรของสารละลายที่ใช้ (mL)

การคำนวณค่าอัตราส่วน (q) ระหว่างมวลของสารละลายที่ถูกดูดซับที่ผิว (M_q) ต่อน้ำหนักของดินที่ใช้ (M_s) สามารถคำนวณได้จาก

$$q = \frac{M_q}{M_s} \quad (2.15)$$

ความสัมพันธ์ระหว่างค่า q และ C_f สามารถหาได้ด้วยการนำค่า q และ C_f ไปพล็อตกราฟ โดยให้ q อยู่ในแกนตั้ง และ C_f อยู่ในแกนนอน เรียกกราฟความสัมพันธ์นี้ว่า “ไอโซเทอม (Isotherm)” ซึ่ง Freundlich ได้เสนอสมการไอโซเทอม (Freundlich isotherm) ดังนี้

$$q = K_F C_f^{1/n} \quad (2.16)$$

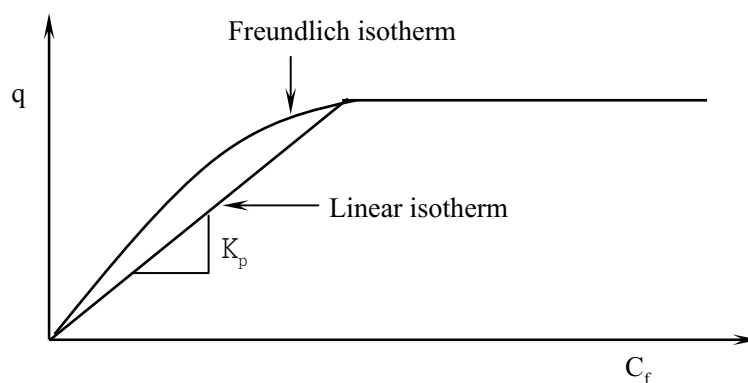
เมื่อ K_F = สัมประสิทธิ์พาร์ทิชันของ Freundlich (L/kg)

$$1/n = \text{ค่าคงที่ที่แสดงถึงการขึ้นตรงกับความเข้มข้นของสารละลาย Correction factor}$$

โดยทั่วไปสารละลายที่มีความเข้มข้นต่ำ ค่า n จะมีค่าเท่ากับ 1 และไอโซเทอมจะมีลักษณะเป็นเส้นตรง (สมการที่ 2.17) ซึ่งได้แสดงไว้ในภาพประกอบที่ 2.6

$$q = K_p C_f \quad (2.17)$$

เมื่อ K_p = สัมประสิทธิ์พาร์ทิชันของไอโซเทอมเส้นตรง (L/kg)



ภาพประกอบที่ 2.6 ไอโซเทอมแบบ Freundlich และเส้นตรง

เมื่อนำสมการที่ 2.15 มาจัดในรูปของสมการเส้นตรงบนกราฟ Log-Log จะได้

$$\log q = \left(\frac{1}{n} \right) \log C_f + \log K_F$$

กรณีที่ค่า q มีค่าคงที่ในขณะที่ค่า C_f สูงท้ายเพิ่มขึ้น แสดงว่าสารละลายถูกยึดติดที่ผิวของดินจนถึงค่าความสามารถดูดติดที่ผิวของดินแล้วไม่สามารถดูดเพิ่มได้อีก เรียกว่าความสามารถในการดูดติดผิวของดิน (Adsorption capacity of soil)

Langmuir ได้เสนอสมการไอโซเทอมที่อธิบายการดูดติดผิวแบบชั้นเดียว โดยมีสมมติฐานว่า โมเลกุลจะถูกดูดติดผิวบนพื้นที่ผิวที่จำกัดของการดูดติดผิว ซึ่งแต่ละพื้นที่ที่ถูกดูดติด

ผิวจะเกิดการดูดติดผิวเพียงชั้นเดียว โดยทุกพื้นผิวของตัวดูดติดผิวจะมีพลังงานในการดูดติดผิวคงที่ และโมเลกุลที่ถูกดูดมาติดที่พื้นผิวจะไม่สามารถเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระ เรียกว่า Langmuir isotherm มีสมการดังนี้

$$\frac{C_f}{q} = \left(\frac{1}{X_m} \right) C_f + \frac{1}{bX_m} \quad (2.18)$$

เมื่อ b = ค่าคงที่ของการดูดซับ (L/mg)
 X_m = ปริมาณสูงสุดของมวลโลหะหนักที่ถูกดูดติดผิวต่อ
 น้ำหนักของมวลดิน (mg/g)

2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

อาทิพย์ ฉลองจันทร์ (2545) ได้ศึกษาการหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่-การกระจาย และค่าตัวประกอบความหน่วงของการเคลื่อนที่ของสารละลายเกลือผ่านดิน โดยใช้สมการพื้นฐาน Advection-dispersion ซึ่งใช้วิธีทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของน้ำเกลือที่ผสมน้ำดื่มกับเกลือสินเธาว์ บริสุทธิ์มีค่าความเค็มประมาณ 180 mS/cm ขึ้นไปตามช่องว่างของดินในท่อ PVC ด้วยแรง Capillary โดยใช้ดินเค็มในจังหวัดขอนแก่นและจังหวัดมหาสารคามรวม 3 แห่ง ซึ่งมีเนื้อดินต่างกัน ได้แก่ ดินเนื้อหยาบ (Loamy sand) ปานกลาง (Sandy loam) และละเอียด (Clay loam) จากบ้านหนองเขื่อน อำเภอโกสุมพิสัย จังหวัดมหาสารคาม บ้านคอนหัน และบ้านโคกกลาง อำเภอเมือง จังหวัดขอนแก่น ตามลำดับ พบว่า ได้ค่า D เฉลี่ยเท่ากับ 0.0005 ± 26 , 0.0011 ± 109 และ 0.0003 ± 23 cm²/s ตามลำดับ สำหรับค่า R ได้ค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.195 ± 0.072 , 0.230 ± 0.149 และ 0.164 ± 0.125 ตามลำดับ

Amatya และ Takemura (2002) ได้ศึกษาการเคลื่อนที่ของสารปนเปื้อนที่ไม่ทำปฏิกิริยา (เช่น คลอไรด์) ในชั้นดินเหนียวกรุงเทพฯ โดยใช้วิธี Finite difference บนโปรแกรม Modflow และ MT3DMS โดยตั้งสมมติฐานว่า ค่า $D = 5 \times 10^{-6}$ cm²/s และ $R=1$ และ $K=1 \times 10^{-8}$ cm/s พบว่า ดินเหนียวธรรมชาติ (ไม่ต้องบดอัด) ในชั้นดินเหนียวกรุงเทพฯ ที่มีความหนา 12 เมตร สามารถใช้เป็นชั้นกั้นซึมธรรมชาติได้เป็นอย่างดี โดยจะมีสารปนเปื้อนที่ไม่ทำปฏิกิริยาเคลื่อนที่ผ่านได้น้อยมาก

Gleason et al. (1997) ได้ศึกษาการใช้ทรายผสมเบนโทไนต์ เพื่อลดค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้ไหลซึมโดยใช้หลักที่ว่า เบนโทไนต์ซึ่งประกอบด้วยแร่หลักคือ Montmorillonite

สามารถทำให้ ทรายผสมเบนโทไนต์ มีค่า K ลดลงอย่างมากเมื่อเทียบกับค่านี้ของทรายที่ไม่ได้ผสม เบนโทไนต์ คุณสมบัติของ Montmorillonite คือ 1) มีค่า Cation exchange capacity สูง 2) มีค่า Specific surface area สูง 3) มีความสามารถในการพองตัวสูง และ 4) มีค่า K ต่ำ จากผลการทดสอบ ของ Gleason et al. (1997) พบว่าทรายที่มีค่าสัมประสิทธิ์การยอมน้ำซึมผ่าน ประมาณ 1×10^{-5} cm/s เมื่อผสมกับเบนโทไนต์ไม่น้อยกว่า 5 % โดยน้ำหนัก แล้วบดอัดด้วยวิธี Standard proctor (ASTM D698) ด้วยความชื้นของทรายผสมเบนโทไนต์ประมาณ 15-19% จะมีค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้ไหลซึมน้อยกว่า 1×10^{-7} cm/s เหมาะสมต่อการทำเป็นชั้นกันซึม

Abollino et al. (2003) ได้ศึกษาการดูดซับโลหะหนักบน Na- Montmorillonite ที่เป็นผลกับ pH และ สารอนินทรีย์ ที่เป็นโลหะหนัก คือ Cd, Cr, Cu, Mn, Ni, Pb และ Zn โดยใช้ pH ที่ 5.5 และความเข้มข้นของโลหะหนักที่ 1×10^{-4} M จำนวน 25 ml พบว่า Na - Montmorillonite สามารถดูดซับโลหะหนัก เรียงตามลำดับ คือ $Mn \leq Pb \leq Cd \leq Zn < Ni < Cu < Cr$ โดยพิจารณาจาก Total sorption capacity คือ Cd, Cr, Cu, Mn, Ni, Pb และ Zn เท่ากับ 9.25, 29.6, 9.57, 11.7, 12.4, 9.25 และ 11.0 meq/100g ตามลำดับ ผลการทดสอบที่ได้แสดงถึงแร่ดินเหนียวมีคุณสมบัติในการดูดซับโลหะหนักได้ดี

Li และ Li (2001) ได้ศึกษาการดูดซับโลหะหนักของเบนโทไนต์ และดินในธรรมชาติ 2 ชนิด และศึกษาค่า K ของดินผสม 3 ชนิด คือ ทรายผสมเบนโทไนต์ ในอัตราส่วนทราย ต่อเบนโทไนต์ 100 : 8 โดยน้ำหนัก, ทรายต่อเบนโทไนต์กับ Forest soil ในอัตราส่วน 100 : 7: 1 โดยน้ำหนัก และทรายต่อเบนโทไนต์กับ Spruce bark ในอัตราส่วน 100 : 7: 1 โดยน้ำหนัก มีค่า α อยู่ ระหว่าง 65 – 88 โดยทดสอบกับ Pb, Cu และ Cd พบว่า ความสามารถในการดูดซับของ Forest soil > เบนโทไนต์ = Spruce bark โดยลำดับการดูดซับของดินทั้ง 3 ชนิดจะสามารถดูดซับ $Pb > Cu > Cd$ ตามลำดับ ค่า K ของทุกการทดสอบอยู่ที่ประมาณ 3.3×10^{-7} cm/s สำหรับชุดการทดสอบควบคุมจะใช้ $Ca(NO_3)_2$ เข้มข้น 0.01 mol เป็นสารละลายทดสอบ มีค่า K เมื่อเริ่มการทดสอบต่ำกว่า 4×10^{-9} cm/s ใช้ระยะเวลาในการทดสอบประมาณ 1 – 2 เดือน

Kim et al. (1997) ได้ศึกษาคุณสมบัติของ Kirby Lake Till ที่ได้จาก Outagamie county landfill เมือง Appleton มลรัฐ Wisconsin พบว่ามีค่า PI = 17%, ค่า LL = 33%, P200 = 83% และ CEC = 2.3 meq/100g ทำการบดอัดดินเพื่อทำการทดสอบแบบสดมภ์โดยให้ สารละลายโบรไมด์ (Br^-) เคลื่อนที่ผ่าน Kirby Lake Till ที่บดอัดแล้ว จากนั้นทำการวัดค่าความเข้มข้นของสารละลาย Br^- ที่ท้ายน้ำเทียบกับเวลา แล้วหาค่าค่าตอบของสมการที่ 2.10 เทียบกับค่าความเข้มข้นของสารละลาย Br^- จากการทดสอบ พบว่า ค่า D และ R ของสารละลาย Br^- ใน Kirby Lake Till มีค่าเท่ากับ 4.5×10^{-5} cm²/s และ 1.0 ตามลำดับ

Shackelford (1990) ได้ศึกษาความเหมาะสมของดินเหนียวลัฟกิน (Lufkin clay) ซึ่งเป็นดินเหนียวท้องถิ่นเพื่อนำมาสร้างเป็นชั้นกันซึมในบ่อฝังกลบมูลฝอยในมลรัฐเท็กซัส, สหรัฐอเมริกา โดยศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพของดิน พบว่า มีค่า $PI = 42\%$, ค่า $LL = 56\%$, $P_{200} = 82\%$ และ $CEC = 25 \text{ meq}/100\text{g}$ และทำการทดสอบบดอัดดินด้วยวิธีการทดสอบแบบสดมภ์ เพื่อหาค่าพารามิเตอร์การเคลื่อนที่ การทดสอบทำได้โดยใช้น้ำชะมูลฝอยสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นของ คลอไรด์ (Cl^-), โพแทสเซียม (K^+), สังกะสี (Zn^{2+}) และแคดเมียม (Cd^{2+}) เท่ากับ 529, 501, 18.8 และ 1.95 mg/L ตามลำดับ แล้วใช้สมการที่ 2.11 หาค่าพารามิเตอร์การเคลื่อนที่ พบว่า โลหะหนัก ทั้ง 4 ชนิด มีค่า D เท่ากับ 4.7×10^{-6} , 2.0×10^{-5} , 1.7×10^{-6} และ $3.0 \times 10^{-6} \text{ cm}^2/\text{s}$ ตามลำดับ มีค่า R เท่ากับ 1.0, 26.7, 92.7 และ 371 ตามลำดับ แล้ววิเคราะห์หาความหนาของชั้นดินบดอัดกันซึม โดยใช้หลักว่าชั้นกันซึมจะต้องมีประสิทธิภาพที่ดีในเวลา 40 ปี พบว่าชั้นกันซึมที่หนา 0.9 เมตร ก็เพียงพอต่อการป้องกันสารปนเปื้อนลงสู่ชั้นน้ำใต้ดิน

Tanchuling et al. (2003) ได้ศึกษาการหาค่า Partitioning coefficient และ Dispersion coefficient ด้วยวิธีการทดสอบแบบสดมภ์ โดยให้สารละลายที่มีความเข้มข้นของ Zn เท่ากับ 450 mg/L มาไหลผ่านดิน Illite clay ที่บดอัดแล้ว โดยกำหนดให้ค่า $i = 49 - 163$ ใช้ระยะเวลาทดสอบ 12 – 54 วัน จากนั้นทำการสกัดหาความเข้มข้นของโลหะหนักออกจากดินด้วยวิธีการย่อยด้วยกรดตามความลึกของชั้นดิน (C_L) ที่แบ่งเป็นชั้นๆ แล้วนำไปคำนวณเพื่อหาค่าพารามิเตอร์การเคลื่อนที่ตามสมการที่ 2.11 โดยผู้วิจัยได้อธิบายขั้นตอนการสกัดโลหะหนักออกจากดินด้วยกรดตามข้อ 3.5.5.2 และขั้นตอนการคำนวณหาค่าพารามิเตอร์การเคลื่อนที่ได้อธิบายไว้ในข้อ 3.5.6 โดยผลการคำนวณ พบว่า ค่า D มีค่าตั้งแต่ $3.08 \times 10^{-7} - 103 \times 10^{-7} \text{ cm}^2/\text{s}$ มีค่า R ตั้งแต่ 1.82 – 16.30 ค่า n อยู่ในช่วง 0.6-0.7 โดยมีค่า K ประมาณ $4.80 \times 10^{-8} - 8.00 \times 10^{-8} \text{ cm/s}$

วิสา คงนคร (2546) ได้ศึกษาลักษณะการเคลื่อนตัวของเบนซีนในชั้นน้ำใต้ดิน รวมถึงศึกษาความสามารถในการดูดซับเบนซีน โดยใช้ตัวอย่างดินในเขตพื้นที่นิคมอุตสาหกรรม มาบตาพุด จังหวัดระยอง ทำการทดสอบแบบกะ แบบคอลัมน์และวิเคราะห์โดยใช้โปรแกรม คอมพิวเตอร์จำลองการเคลื่อนตัวของเบนซีนในชั้นน้ำใต้ดิน พบว่า ความสามารถในการดูดซับเบนซีนบนผิวดินที่สมดุลเป็นไอโซเทอมแบบเชิงเส้น มีค่าคงที่การดูดซับเป็น $0.5444 \text{ cm}^3/\text{g}$ ส่งผลให้ค่าคงที่ของการหน่วง (R) เป็น 5.43 สำหรับการทดสอบแบบคอลัมน์เพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์การกระจายตัว (D) ของดินด้วยสารละลายโบรมีน พบว่า ลักษณะการเคลื่อนที่เป็นแบบสมดุลมีค่า D อยู่ในช่วง $0.0088-0.0116 \text{ cm}^2/\text{s}$ และผลการจำลองการเคลื่อนตัวของเบนซีนด้วยโปรแกรม คอมพิวเตอร์ พบว่า มีความแตกต่างกับผลการทดสอบจริงแบบคอลัมน์ ซึ่งสามารถอธิบายด้วยการเคลื่อนที่แบบไม่สมดุล

Kim et al. (2001) ได้ศึกษาการเคลื่อนที่ของ Volatile organic compounds (VOCs) ผ่านชั้นดินเหนียวบดอัด โดยทำการทดสอบในระดับห้องปฏิบัติการด้วยการทดสอบแบบสดมภ์ และ Tank Test โดยศึกษา VOCs ทั้งหมด 7 ชนิด ได้แก่ Chloroform (CF), Ethylbenzene (EB), Methylene chloride (MC), Toluene (TOL), 1,1,1-Trichloroethane (1,1,1-TCA), Trichloroethylene (TCE) and m-Xylene (m-XYL) ที่ระดับความเข้มข้นเริ่มต้น ประมาณ 20 mg/L พบว่า ความเข้มข้นเริ่มต้นของ Influent มีแนวโน้มลดลงเรื่อยๆ ตั้งแต่วันที่ 2 ของการทดสอบ ถึงวันที่ 116 ของการทดสอบ ค่าสัมประสิทธิ์พาร์ทิชันของดิน-สารละลาย VOCs ทั้ง 7 ชนิด มีความสัมพันธ์กันในเชิง Logarithm อย่างมากกับค่าสัมประสิทธิ์พาร์ทิชันของ Octanal-น้ำ การเปลี่ยนแปลงของ ค่า K ไม่มีนัยสำคัญกับค่าสัมประสิทธิ์การแพร่เชิงกล สำหรับค่า D โดยส่วนใหญ่อยู่ในช่วง $10^{-6} \text{ cm}^2/\text{s}$ และจะลดลงเมื่อความสามารถในการละลายน้ำของสารแต่ละชนิดเพิ่มขึ้น อนึ่งการรักษาความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลาย VOCs เป็นสิ่งที่สำคัญมากต่อการหาค่าพารามิเตอร์การเคลื่อนที่ เพราะต้องใช้ระยะเวลานานในการทดสอบ ซึ่งทำให้ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลาย VOCs ลดลงได้

บทที่ 3

วิธีการวิจัย

การศึกษาความเหมาะสมของดิน 3 ชนิด ประกอบด้วย ทรายผสมเบนโทไนต์ ดินลูกรังคอหงส์และดินเหนียวเกาะยอ เพื่อใช้เป็นชั้นกันซึมของสถานที่ฝังกลบมูลฝอย สามารถแบ่งวิธีดำเนินการศึกษาได้เป็น 5 ส่วนใหญ่ๆ ด้วยกัน (ภาพประกอบที่ 3.1) โดยขั้นตอนแรกเป็นการสร้างอุปกรณ์สำหรับการทดสอบแบบสดมภ์และอุปกรณ์ทดสอบหาค่า K ขั้นตอนที่สองคือ การหาคุณสมบัติของดินทั้ง 3 ชนิด ซึ่งแบ่งเป็นคุณสมบัติทางกายภาพของดิน การแลกเปลี่ยนประจุในดิน และแร่ธาตุในดิน ขั้นตอนที่สามเป็นการหาค่า K ทรายผสมเบนโทไนต์และดินเหนียว ขั้นตอนที่สี่เป็นการทดสอบเพื่อหาค่าพารามิเตอร์การเคลื่อนที่ โดยแบ่งการทดสอบออกเป็น 3 ส่วน (ภาพประกอบที่ 3.2) คือ การทดสอบแบบแบทช์ การทดสอบแบบสดมภ์ เพื่อหาค่า K, R และ D และการทดสอบความต้านทานสารเคมีของค่า K ของดิน เมื่อทดสอบดินทั้ง 3 ชนิดกับโลหะหนักที่ความเข้มข้นต่างๆ กัน โดยวิธี Falling head test และ ขั้นตอนสุดท้ายเป็นการออกแบบชั้นกันซึม โดยมีรายละเอียดของขั้นตอนการดำเนินการศึกษาทั้งหมดดังนี้

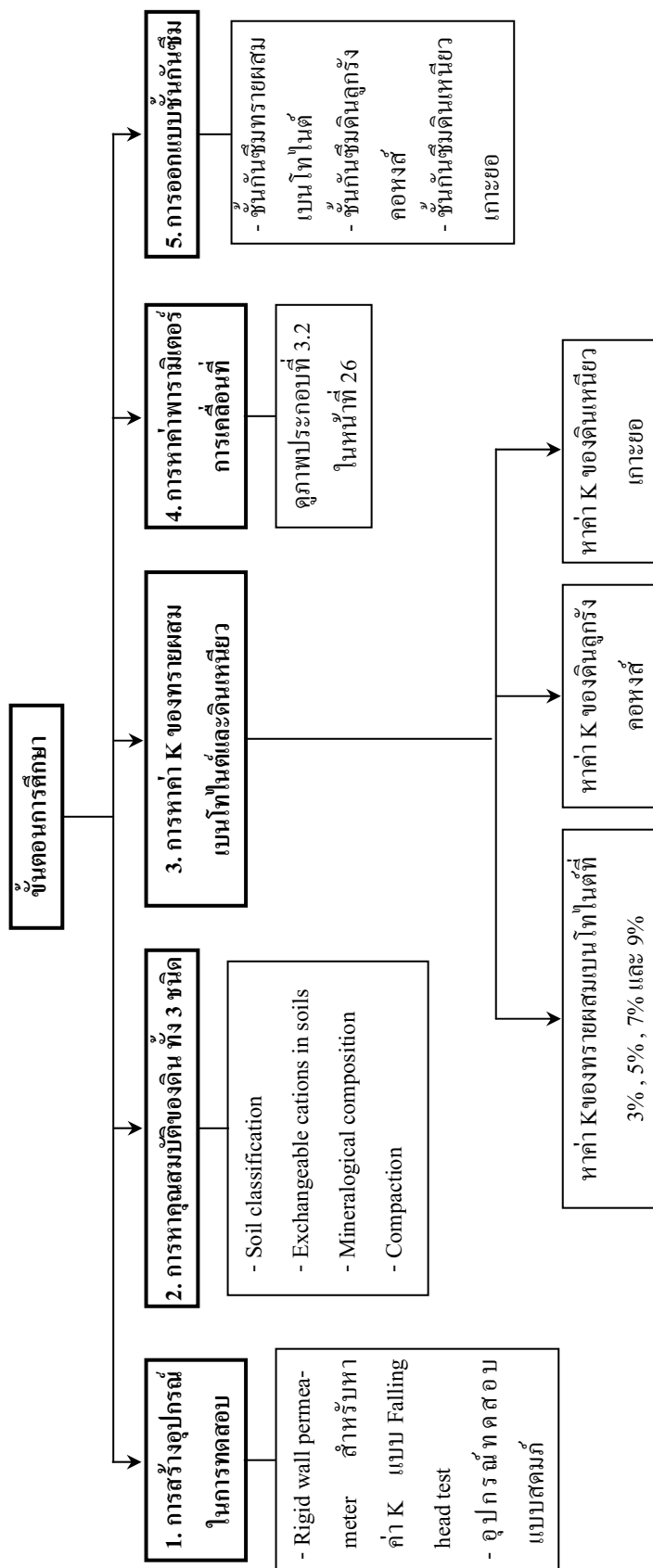
3.1 การสร้างอุปกรณ์สำหรับทดสอบ

การสร้างอุปกรณ์สำหรับการทดสอบ มี 2 ชุดอุปกรณ์ คือ Rigid wall permeameter สำหรับการทดลองหาค่า K และ อุปกรณ์ทดสอบสดมภ์สำหรับการทดสอบการเคลื่อนที่ของสารปนเปื้อน โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

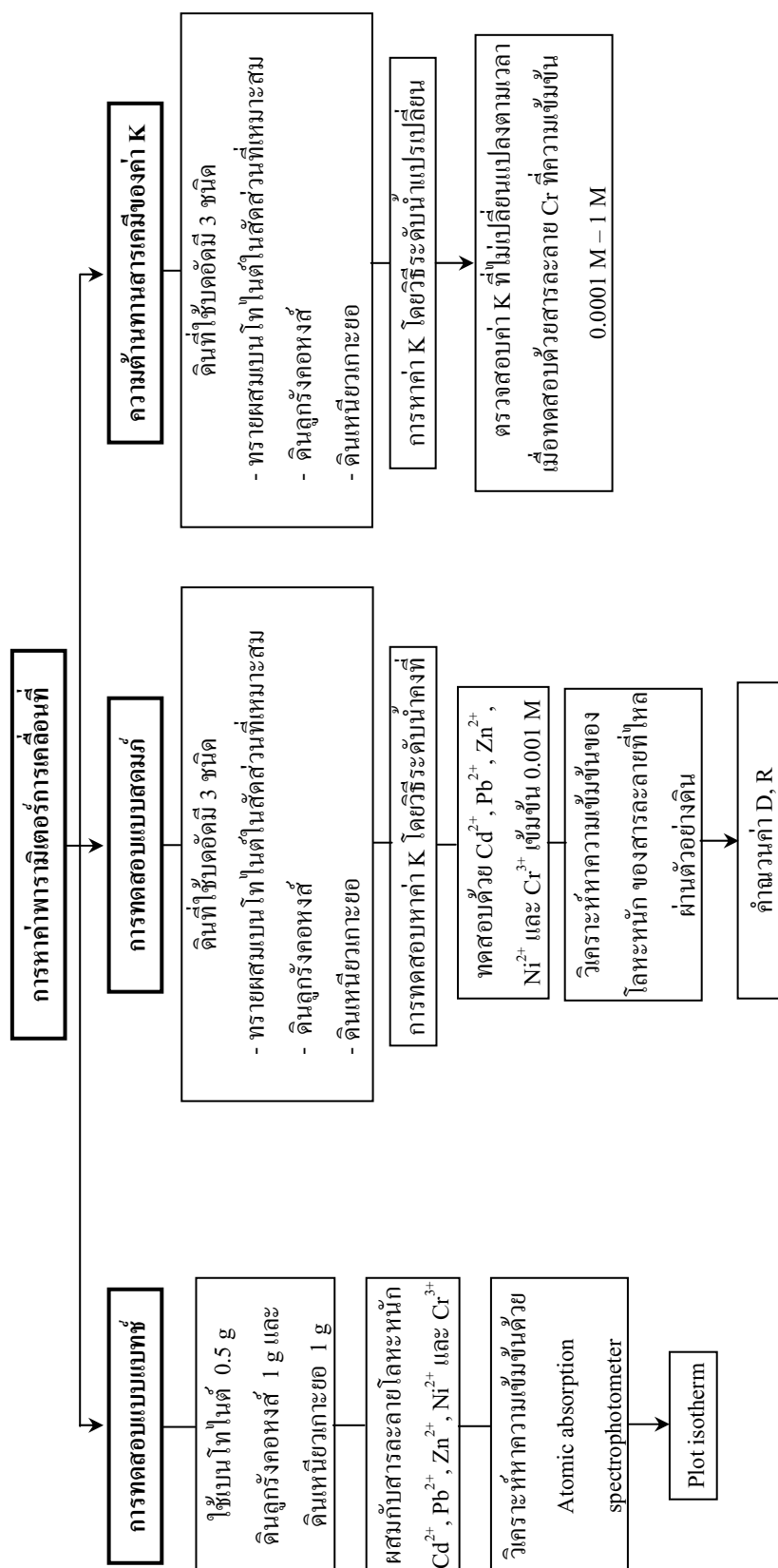
3.1.1 การสร้าง Rigid wall permeameter

(a) ส่วนประกอบของ Rigid wall permeameter

Rigid wall permeameter ประกอบด้วย Mold สแตนเลสขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 10.25 cm จำนวน 2 ชิ้น โดย ชิ้นแรก มีความสูงประมาณ 11.5 cm สำหรับใส่ดินที่บดอัดและ ชิ้นที่สองมีความสูงประมาณ 5.5-5.7 cm สำหรับใส่สารละลาย, O – ring จำนวน 2 อัน, วัสดุกรอง (Geotextile) 1 แผ่น, ฐานด้านล่างและบนของ Mold ทำจากแผ่นสแตนเลสที่เจาะรูทั้ง 4 มุม จำนวน 2 แผ่น โดยแผ่นที่อยู่ด้านล่างเจาะตรงกลางเพื่อใส่หางปลาทองเหลือง 1 ตัว เพื่อให้ น้ำเข้าหรือออก และแผ่นที่เป็นฐานด้านบนเจาะรู 2 รู สำหรับใส่หัววาล์วทองเหลืองและหางปลาทองเหลือง, แท่งเหล็กสำหรับยึด 4 อัน พร้อมน็อตยึด 8 ตัว, สายยางและท่อแก้ว Standpipe ขนาด 0.28 cm^2 ยาวประมาณ 220 cm



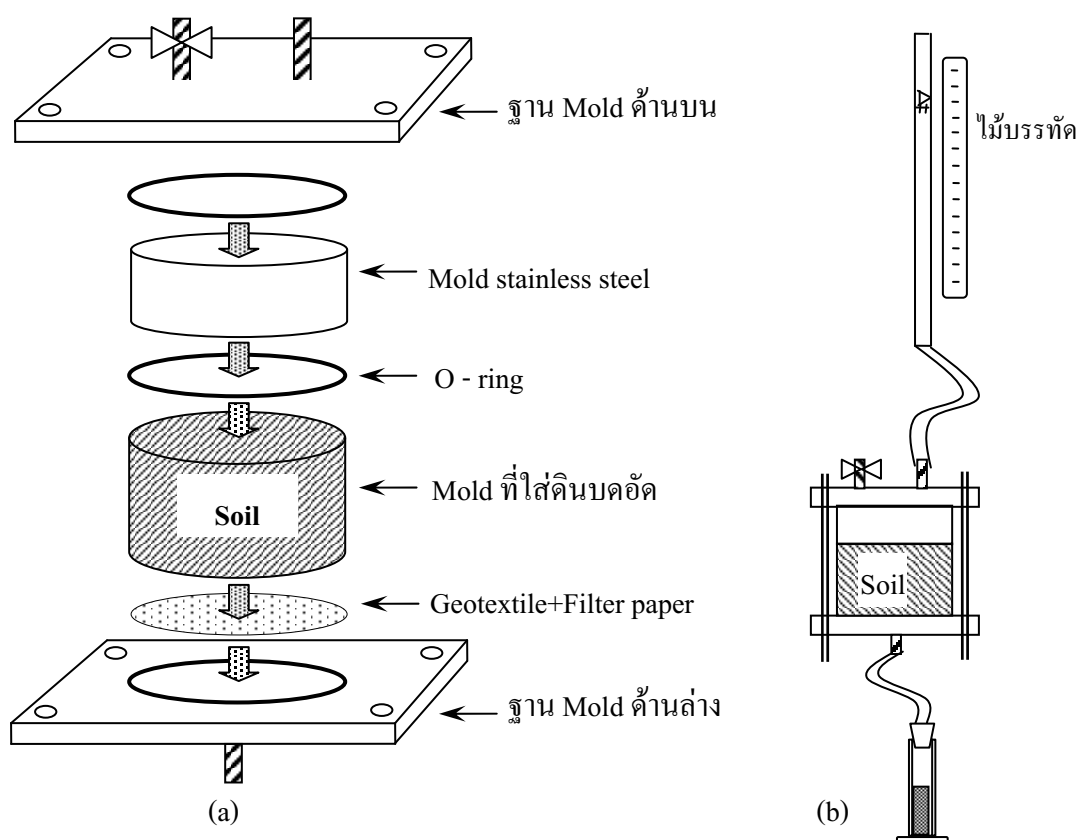
ภาพประกอบที่ 3.1 ขั้นตอนการศึกษา



ภาพประกอบที่ 3.2 ขั้นตอนการศึกษา (ต่อ)

(b) การประกอบ Rigid wall permeameter

การประกอบ (ภาพประกอบที่ 3.3) จะเริ่มประกอบจากด้านล่างโดยยึดฐานสแตนเลสกับเสาเหล็ก ทั้ง 4 มุม ด้วยน็อตยึด วาง O - ring 1 อัน บนฐานสแตนเลสที่กลึงแล้ว จากนั้นวาง Geotextile 1 แผ่น วาง Mold ขึ้นสำหรับใส่ดิน และวาง Mold เปล่าสำหรับใส่สารละลายไว้ด้านบน แล้วจึงวาง O - ring อีก 1 ชิ้นบนปาก Mold ด้านบน และวางฐานปิดด้านบนยึดด้วยน็อต 4 ตัว (ภาพประกอบที่ 3.3 a) ต่อปลายสายยาง Latex ด้านหนึ่งเข้ากับหางปลาทองเหลืองที่ฐานด้านบน และปลายสายยางอีกด้านเข้ากับท่อ Standpipe ด้านล่าง ตามลำดับ (ภาพประกอบที่ 3.3 b) จากนั้นต่อสายยาง Latex อีกเส้นหนึ่งจากฐาน Mold ด้านล่างสำหรับรองรับน้ำที่ไหลออกจากตัวอย่างดิน เข้าสู่ภาชนะรองรับ (กระบอกตวงหรือปิเกตอร์)



ภาพประกอบที่ 3.3 ลำดับการประกอบอุปกรณ์ Rigid wall permeameter สำหรับ Falling head test

3.1.2 การสร้างอุปกรณ์การทดสอบแบบสดมภ์พร้อมระบบเพิ่มความดันแบบความดันคงที่

(a) ส่วนประกอบของอุปกรณ์

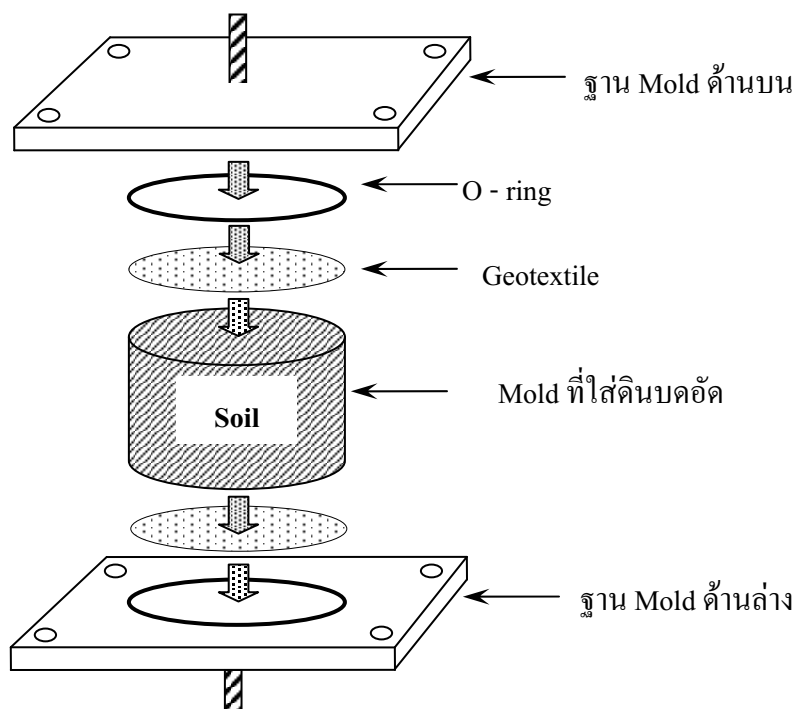
อุปกรณ์สำหรับการทดสอบแบบสดมภ์ ประกอบด้วย ชุด Mold สแตนเลส สำหรับใส่ดินบดอัด และชุด Mold สำหรับใส่สารละลาย Mold ใส่ดินบดอัดมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10.25 cm ความสูง 5.5-5.7 cm ส่วนฐานใส่ Mold เป็นแผ่นอะคลิลิกหนา 2 cm ขนาด 6 x 6 นิ้ว ทำการเจาะรูฐานทั้ง 4 มุม จำนวน 2 แผ่น แต่ละแผ่นเจาะรูตรงกลางเพื่อใส่หัวต่อสายยางแผ่นละ 1 ตัว, ชุด Mold สำหรับใส่สารละลาย ประกอบด้วย Mold และฐานที่ทำจากอะคลิลิก โดย Mold มีความหนา 0.5 cm มีความสูงประมาณ 13.5 cm ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 12 cm ส่วนฐานใส่ Mold ใช้แผ่นอะคลิลิกหนา 2 cm ขนาด 6 x 6 นิ้ว ทำการเจาะรูฐานทั้ง 4 มุม จำนวน 2 แผ่น โดยแผ่นที่อยู่ด้านล่าง จะเจาะรูตรงกลางเพื่อใส่หัวต่อสายยาง 1 รู ส่วนแผ่นที่อยู่ด้านบนเจาะรูตรงกลาง 2 รู เพื่อใส่หัวต่อสายยางจากปั๊มลม และวาล์วสำหรับเติมสารละลาย, O - ring 2 อัน, Geotextile 5 แผ่น, แท่งเหล็กสำหรับยึดฐานและ Mold เข้าไปด้วยกัน 4 อัน พร้อมน็อตยึด 8 ตัว

(b) การประกอบอุปกรณ์การทดสอบแบบสดมภ์ มีรายละเอียดดังนี้

การประกอบชุด Mold สแตนเลส สำหรับใส่ดินที่ถูกดอัด จะเริ่มประกอบจากด้านล่างโดยยึดฐานสแตนเลสกับเสาเหล็ก ทั้ง 4 มุม ด้วยน็อตยึด วาง O - ring 1 อัน บนฐานสแตนเลสที่กลิ้งแล้ว จากนั้นวาง Geotextile 1 แผ่น วาง Mold สำหรับใส่ดิน วางเยื่อกรองปิดทับอีก 4 แผ่น ใส่ O - ring แล้ววางฐานปิดด้านบนยึดด้วยน็อต 4 ตัว (ภาพประกอบที่ 3.4)

การประกอบชุด Mold อะคลิลิก สำหรับใส่สารละลาย จะเริ่มจากการยึดฐานด้านล่างกับแท่งเหล็ก จากนั้นวาง O - ring และ Mold อะคลิลิก ปิดทับด้วยฐานด้านบนที่มี O - ring อีกครั้ง แล้วยึดด้วยน็อต 4 ตัวให้แน่น

ชุด Mold ที่ถูกประกอบแล้วทั้ง 2 จะถูกเชื่อมต่อระหว่างกันที่ด้านล่างด้วยสายยาง 1 เส้น ทำการต่อปลายสายยางอีกเส้นหนึ่งที่ฐานด้านบนของ Mold สแตนเลส ส่วนปลายอีกด้านหนึ่งต่อเข้ากับกระบอกตวงเพื่อรองรับสารละลายที่ออกมาจากตัวอย่างดิน ดังแสดงในภาพประกอบที่ 3.4 สำหรับการต่อประกอบอุปกรณ์แบบสดมภ์กับปั๊มลม จะทำโดยต่อปลายสายยางด้านหนึ่งที่ปั๊มลม และต่อปลายสายยางอีกด้านที่ฐานด้านบนของชุด Mold อะคลิลิกที่ใส่สารละลาย โดยเมื่อทำการเปิดปั๊ม แรงดันลมจะไหลผ่านสายยางเข้าไปดันสารละลายที่อยู่ใน Mold อะคลิลิกให้ไหลเข้าสู่ตัวอย่างดินที่ถูกดอัดอยู่ใน Mold สแตนเลส



ภาพประกอบที่ 3.4 ลำดับการประกอบอุปกรณ์เพื่อทดสอบแบบสดมภ์

3.2 การทดสอบหาคุณสมบัติของเบนโทไนต์และดินเหนียว

ดินเหนียว ซึ่งประกอบด้วย ดินลูกรังคอหงส์และดินเหนียวเกาะยอ ถูกเก็บที่ความลึกจากผิวดินประมาณ 1.0 เมตร โดยดินลูกรังคอหงส์เป็นดินในบริเวณสวนสาธารณะเทศบาลนครหาดใหญ่ ต.คอหงส์ อ.หาดใหญ่ จ.สงขลา ส่วนดินเหนียวเกาะยอเป็นดินจากชายฝั่งทะเลบริเวณ ต.เกาะยอ อ.เมือง จ.สงขลา ดินทั้ง 2 ชนิดนี้ จะถูกนำไปอบที่อุณหภูมิประมาณ 105°C นาน 24 ชั่วโมงให้ดินแห้งแล้วเก็บไว้ทำการทดสอบในโถดูดความชื้น นำดินมาทำการหาค่าขีดความชื้นเหลวของดิน Atterberg limit ตามมาตรฐาน ASTM (D4318) ซึ่งได้แก่ ค่า LL และ PI และ Sieve analysis ตามมาตรฐาน ASTM (D422-63) เพื่อนำไปจำแนกประเภทของดิน (Soil classification), การหาค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดและปริมาณความชื้นที่เหมาะสมในการบดอัด โดยใช้การบดอัด Standard Proctor Compaction, ASTM (D698), การทดสอบหา Exchangeable cation โดยวิธี AOAC Official Method 990.08 , การหา pH , Cl^- และ SO_4^{2-} ซึ่งนอกจากนี้ยังวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีในดินด้วยวิธี X-ray fluorescence spectroscopy (XRF) และ X-ray diffraction (XRD) เบนโทไนต์ ดินลูกรังคอหงส์และดินเหนียวเกาะยอที่ใช้ในการทดสอบได้แสดงไว้ในภาพประกอบที่ 3.5



(ก)



(ข)



(ค)

ภาพประกอบที่ 3.5 ดินที่ใช้ในการทดสอบ (ก) เบนโทไนต์ (ข) ดินลูกรังคอหงส์ และ (ค) ดินเหนียวเกาะยอ

3.3 การหาค่า K ของทรายผสมเบนโทไนต์และดินเหนียว

3.3.1 การหาค่า K ของทรายผสมเบนโทไนต์ มีรายละเอียดดังนี้

(a) คุณสมบัติของทรายที่ใช้ผสมเบนโทไนต์นั้น จะใช้ทรายก่อสร้างที่มีอยู่ทั่วไป ซึ่งเป็นทรายในท้องถื่นจังหวัดสงขลา โดยทรายนี้มีเปอร์เซ็นต์ที่ผ่านตระแกรงเบอร์ 200 เท่ากับ 6.5 มีค่า Coefficient of uniformity และ Coefficient of curvature เท่ากับ 11.7 และ 1.0 ตามลำดับ และส่วนที่ผ่านตระแกรงเบอร์ 200 ไม่มีความเป็นพลาสติก ซึ่งสามารถจำแนกชนิดทรายโดยใช้ระบบ USCS ได้เป็น SW-SM

(b) การเตรียมตัวอย่าง ทำโดยนำทรายมาผสมกับเบนโทไนต์ โดยใช้เบนโทไนต์ในอัตราส่วน 3%, 5%, 7% และ 9% โดยน้ำหนัก จากนั้นเติมน้ำ โดยใช้ปริมาณน้ำที่ 2% ทางด้านเปียกของปริมาณน้ำที่เหมาะสมในการบดอัด ซึ่งได้จากการทดสอบในข้อ 3.2 (ตารางที่ 3.1, ภาพประกอบที่ 3.6 a) แล้วปล่อยให้ทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง เพื่อให้ความชื้นกระจายทั่วมวลดิน นำไปบดอัดใน Mold สแตนเลสสำหรับใส่ดินในข้อ 3.1.1 โดยใช้เครื่องบดอัดอัตโนมัติ (ELE automatic compactor) (ภาพประกอบที่ 3.6b) ตามวิธีมาตรฐาน Standard Proctor Compaction, ASTM (D698)

(c) นำ Mold สแตนเลสที่ใส่ดินที่บดอัดแล้ว (ภาพประกอบที่ 3.6 c) มาประกอบเป็นชุดการทดสอบแบบสดมภ์ ตามวิธีข้อ 3.1.1 (ภาพประกอบที่ 3.6 d) แล้วทดสอบกับน้ำกลั่น เพื่อหาค่า K ของทรายผสมเบนโทไนต์นี้ด้วยวิธี Falling head test method ASTM (D2434)

(d) อ่านค่าระดับความสูงของน้ำบน Standpipe (ภาพประกอบที่ 3.6 (e)) และปริมาณน้ำที่ไหลออกจากตัวอย่างดิน (ภาพประกอบที่ 3.6 (f)) แล้วนำข้อมูลไปคำนวณหาค่า K ด้วยวิธี Falling head test โดยใช้สมการที่ 3.1

$$K = \frac{aL}{A\Delta t} \ln \left(\frac{\Delta H_1}{\Delta H_2} \right) \quad (3.1)$$

เมื่อ a = พื้นที่หน้าตัดของ Standpipe (cm^2)
 L = ความสูงของตัวอย่างดิน (cm)
 A = พื้นที่หน้าตัดของตัวอย่างดิน (cm^2)
 Δt = ผลต่างของเวลาเมื่อ $t_2 - t_1$
 $\Delta H_1, \Delta H_2$ = ผลต่างของระดับน้ำที่ต้นน้ำและท้ายน้ำ ณ เวลา t_1 และ t_2 ตามลำดับ (cm)

(e) การบันทึกข้อมูลเพื่อหาค่า K กระทำทุกๆ 1 – 3 วัน โดยทำการทดสอบจนกระทั่งผลต่างระหว่างปริมาณน้ำที่เติมเข้าไปในตัวอย่างดินและปริมาณน้ำที่ไหลออกจากตัวอย่างมีค่าประมาณ $\pm 5\%$ และค่า K คงที่ จึงหยุดการทดสอบ

ตาราง 3.1 รายละเอียดความแตกต่างของอัตราส่วนทรายผสมเบนโทไนต์เพื่อหาค่า K

Bentonite content (%)	Maximum dry unit weight (kN/m^3)	Optimum water content (%)	Water content at 2% wet of optimum (%)
3	19.35	10.0	12.0
5	19.10	10.5	12.5
7	18.68	11.2	13.2
9	18.56	12.0	14.0

3.3.2 การหาค่า K ของดินเหนียว มีรายละเอียดดังนี้

(a) ดินลูกรังคอหงส์และดินเหนียวเกาะยอ ถูกเตรียมโดยผสมกับน้ำให้มีปริมาณความชื้นที่มากกว่าปริมาณความชื้นที่เหมาะสม 2 % หรือที่ 20 % และ 19% สำหรับดินลูกรังคอหงส์และดินเหนียวเกาะยอ ตามลำดับ ปล่อยทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง แล้วนำไปบดอัดใน Mold สแตนเลสสำหรับใส่ดินดังรายละเอียดในข้อ 3.1.1 โดยใช้เครื่องบดอัดอัตโนมัติ (ELE automatic compactor) ตามวิธีมาตรฐาน Standard Proctor Compaction, ASTM (D698)

(b) การประกอบ Mold จะกระทำตามวิธีข้อ 3.1.1 แล้วทำการทดสอบกับน้ำกลั่น และหาค่า K ด้วยวิธี Falling head test method

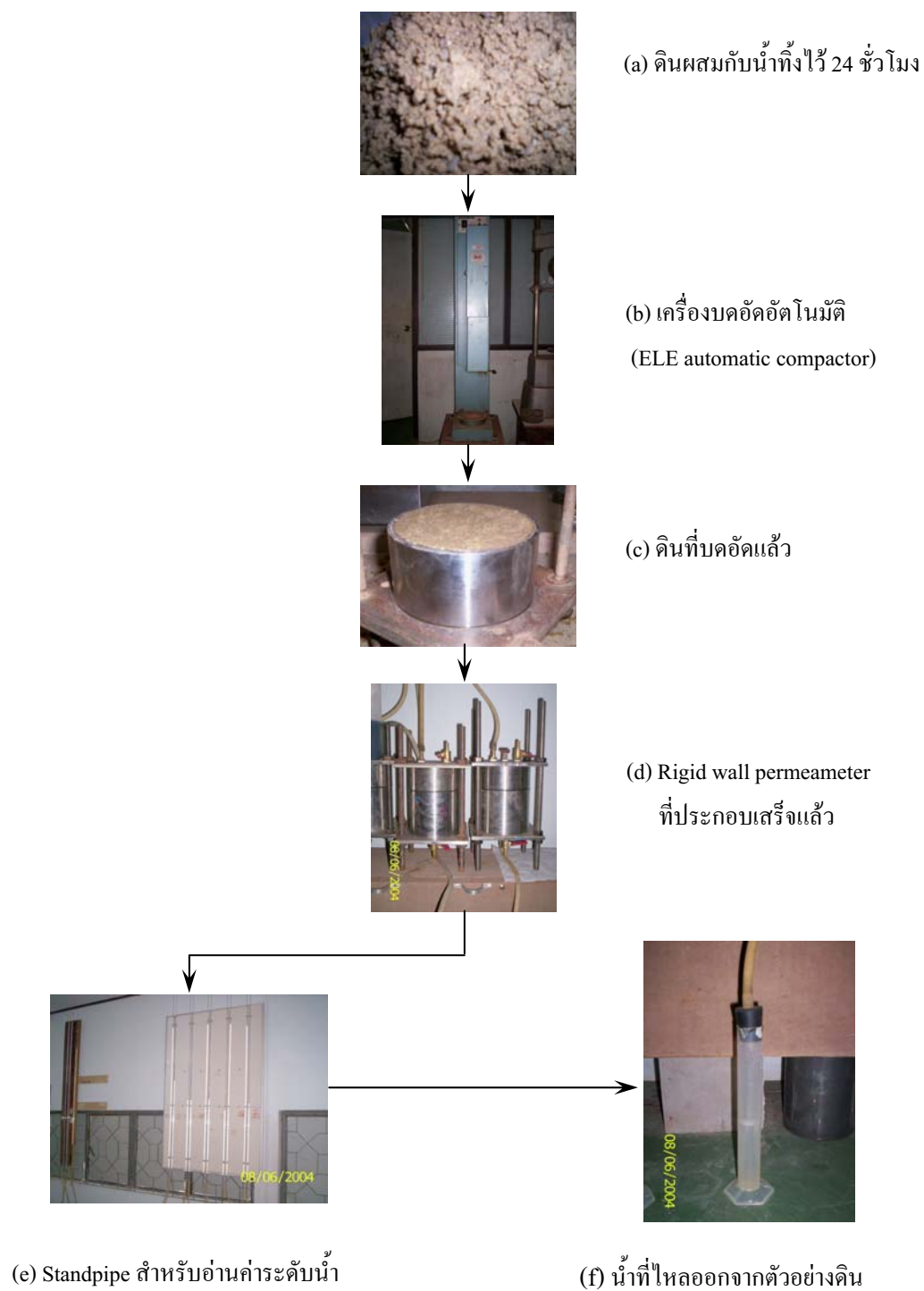
(c) การอ่านค่าระดับความสูงของน้ำบน Standpipe และค่าปริมาณน้ำที่ไหลออกจากตัวอย่างดิน รวมถึงเวลาที่หยุดทำการทดสอบจะกระทำเช่นเดียวกับข้อ 3.3.1

3.4 การทดสอบความต้านทานสารเคมีของค่า K

การทดสอบความต้านทานสารเคมีของค่า K เป็นการทดสอบความสามารถในการต้านทานสารละลายโลหะหนักที่ระดับความเข้มข้นต่างๆ ของดิน ซึ่งทำได้โดยตรวจสอบค่า K ที่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลา เมื่อมีสารละลายโลหะหนักไหลผ่าน โดยใช้ Cr^{3+} เป็นโลหะหนักทดสอบ การเลือก Cr^{3+} เป็นสารละลายที่ใช้ในการทดสอบ ก็เนื่องมาจาก Cr^{3+} มีประจุ 3+ ซึ่งจะทำให้ค่า K ของดินลดลงได้มากกว่าเมื่อเทียบกับสารละลายโลหะหนักที่มีประจุ 1+ หรือ 2+ ที่มีความเข้มข้นเท่ากัน โดยจะถือว่าค่า K สามารถต้านทานสารละลายโลหะหนักได้ถ้าค่า K ไม่มีการเพิ่มขึ้นจนมีค่ามากกว่า $1 \times 10^{-7} \text{ cm/s}$ ตลอดการทดสอบ ขั้นตอนการทำการทดสอบ มีดังต่อไปนี้

(a) นำทรายผสมเบนโทไนต์และดินเหนียว มาบดอัด ใน Mold ทำการประกอบ Mold สำหรับชุดทดสอบ Falling head test ดังข้อ 3.1.1 แล้วทำการทดสอบหาค่า K ด้วยวิธี Falling head test โดยใช้ น้ำกลั่น (Deionized water) เป็นสารทดสอบ พร้อมทั้งอ่านค่าระดับน้ำบน Standpipe และวัดปริมาณน้ำออกจากตัวอย่าง 1 – 3 วัน ต่อครั้ง จนกระทั่งผลต่างของปริมาณน้ำที่ไหลเข้าและปริมาณน้ำที่ไหลออกจากตัวอย่างจะต้องอยู่ในช่วง $\pm 5\%$ และค่า K คงที่

(b) เปลี่ยนน้ำกลั่นบน Standpipe มาใช้สารละลายโลหะหนัก $\text{CrCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ โดยทำการละลาย $\text{CrCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ด้วยน้ำกลั่น ที่มีความเข้มข้นของ Cr^{3+} ในระดับต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 3.2



ภาพประกอบที่ 3.6 การหาค่า K ด้วยวิธี Falling head test method ตามมาตรฐาน ASTM (D2434)

ตารางที่ 3.2 ระดับความเข้มข้นของ Cr^{3+} ที่ใช้ในการทดสอบความต้านทานสารเคมีของดินทั้ง 3 ชนิด

ความเข้มข้นของ Cr^{3+} (M)	ความเข้มข้นของ Cr^{3+} (mg/L)
0.0001	5.22
0.001	52.19
0.01	521.90
0.1	5,219.00
1	52,190.00

(c) อ่านค่าระดับความสูงของน้ำบน Standpipe, วัดปริมาณน้ำที่ไหลออกจากตัวอย่างดิน และคำนวณค่า K เช่นเดียวกับข้อ 3.3.1 (d) และ 3.3.1 (e) โดยระยะเวลาการทดสอบจะดำเนินไปเรื่อยๆ ประมาณ 1 – 3 ปี จึงหยุดการทดสอบ หรือจนกระทั่งค่า K ของชุดการทดสอบใดๆ จะมีค่ามากกว่า $1 \times 10^{-7} \text{ cm/s}$ จึงจะหยุดทำการทดสอบในชุดการทดสอบนั้นๆ

3.5 การหาค่าพารามิเตอร์การเคลื่อนที่ของทรายผสมเบนโทไนต์และดินเหนียวเมื่อทดสอบกับโลหะหนัก

การหาค่าพารามิเตอร์การเคลื่อนที่ของทรายผสมเบนโทไนต์และดินเหนียวโดยทำการทดสอบกับโลหะหนัก ทำได้โดยนำทรายผสมเบนโทไนต์และดินเหนียวที่ได้จากข้อ 3.3 มาทดสอบด้วยวิธีการทดสอบแบบสดมภ์ โดยมีหลักการว่า การเคลื่อนที่ของสารละลายในดินจะขึ้นอยู่กับ การพา การแพร่ และปฏิกิริยาที่เกิดขึ้น ซึ่งสามารถอธิบายได้ด้วยพารามิเตอร์การเคลื่อนที่ ได้แก่ ค่า K ค่า D และค่า R โดยมีรายละเอียดการทดลองดังนี้

(a) นำทรายผสมเบนโทไนต์ ดินลูกรังคองหงส์และดินเหนียวเกาะยอ ไปบดอัดใน Mold ด้วยวิธี Standard Proctor Compaction, ASTM (D698) (ภาพประกอบที่ 3.7 a) โดยใช้ความชื้นที่ได้จากข้อ 3.2 จากนั้นทำการทดสอบตามข้อ 3.1.2 (ภาพประกอบที่ 3.7 b) โดยเริ่มต้นการทดสอบด้วยการใช้น้ำกลั่นไหลผ่านดินตัวอย่าง (ภาพประกอบที่ 3.7 c)

(b) การปรับความดันของวิธีการทดสอบแบบระดับน้ำคงที่ ทำได้โดยเพิ่มความดันครั้งแรกที่ 0.1 ksc ทิ้งไว้ 24-48 ชั่วโมง เพื่อไล่อากาศและให้น้ำไหลเข้าไปในดินเพื่อให้ดินอิ่มตัว จากนั้นเพิ่มความดันครั้งละ 0.1 ksc ทิ้งไว้ 24-48 ชั่วโมง จนกระทั่งถึงความดันที่ต้องการ ทำการหา ค่า K ของดินทุกครั้งที่ปรับความดันโดยใช้สมการที่ 3.2 สำหรับทรายผสมเบนโทไนต์และ

ดินเหนียวเกาะยอใช้ความดันสูงสุดที่ 0.8 ksc โดยมีค่า i ประมาณ 140 ดินลูกรังคอหงส์ใช้ความดันสูงสุดที่ 0.5 ksc ถึง 0.6 ksc โดยมีค่า i ประมาณ 89 ถึง 104

(c) เมื่อค่า K ของดินตัวอย่างมีค่าคงที่แล้ว จึงเปลี่ยน Influent จากน้ำกลั่นเป็นสารละลายโลหะหนัก โดยความเข้มข้นของสารละลายโลหะหนักที่ใช้ ได้แสดงไว้ในตารางที่ 3.3 ทำการเก็บ Effluent และวัดปริมาตรของ Effluent เพื่อนำไปคำนวณหาความเข้มข้นของสารละลายโลหะหนักและค่า K

3.5.1 การหาค่า K โดยวิธีระดับน้ำคงที่

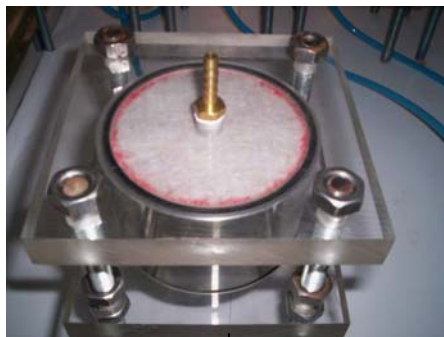
การคำนวณค่า K โดยใช้วิธีระดับน้ำคงที่, ASTM (D5084) จากการทดสอบแบบสดมภ์ มีสูตรคำนวณดังนี้

$$K = \frac{Q}{\left(\frac{\Delta H}{L}\right)^A} \quad (3.2)$$

เมื่อ	Q	=	อัตราการไหล = $\frac{V_w}{\Delta t}$ (cm ³ /sec)
	V_w	=	ปริมาตรน้ำที่ไหลผ่านดินในเวลา Δt
	ΔH	=	ความแตกต่างของความดันของน้ำที่ต้นน้ำและท้ายน้ำ (cm)
	Δt	=	เวลาที่ใช้ในการเก็บน้ำปริมาตร V_w (sec)



(a) ดินที่บีบอัดแล้ว



(b) การประกอบ Mold



Mold ใส่ น้ำหรือ
สารละลายโลหะหนัก
(Influent)

Mold ใส่ ตัวอย่างดิน

บีกเกอร์รับสารละลาย
ที่ไหลออกมา (Effluent)

(c) ชุดการทดสอบแบบสดมภ์

ภาพประกอบที่ 3.7 การทดสอบแบบสดมภ์

ตารางที่ 3.3 ความเข้มข้นของโลหะหนักที่ใช้ในการทดสอบหาค่าพารามิเตอร์การเคลื่อนที่

ชนิดของโลหะหนัก	สารตั้งต้น	ความเข้มข้น (mg/L)	ความเข้มข้น (M)
Chromium (Cr^{3+})	$\text{CrCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	52.19	0.001
Mixed Solution			
- Cadmium (Cd^{2+})	CdCl_2	112.42	0.001
- Lead (Pb^{2+})	PbCl_2	207.26	0.001
- Zinc (Zn^{2+})	ZnCl_2	65.39	0.001
- Nickel (Ni^{2+})	$\text{NiCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	58.87	0.001

3.5.2 การหาความเข้มข้นของสารละลายเพื่อคำนวณพารามิเตอร์การเคลื่อนที่

การทดสอบแบบสดมภ์ มีวิธีการในการหาค่าพารามิเตอร์การเคลื่อนที่ของดิน 2 แบบ คือ จากค่าความเข้มข้นสุดท้ายของโลหะหนักจาก Effluent ที่ไหลออกจากตัวอย่างดิน เมื่อเทียบกับ เวลาหรือ Breakthrough curve และ จากค่าความเข้มข้นสุดท้ายของโลหะหนักจากการสกัดโลหะหนักที่ถูกดูดซับออกจากตัวอย่างดินที่แบ่งเป็นชั้นๆ หรือ Concentration profile โดยมีรายละเอียดการทดสอบดังต่อไปนี้

3.5.2.1 การหาค่าความเข้มข้นของโลหะหนักใน Effluent เทียบกับเวลา มีขั้นตอนดังต่อไปนี้

(a) หาค่าความเข้มข้นสุดท้ายของ Effluent เทียบกับเวลา ทำได้โดยทำการเก็บตัวอย่างน้ำที่ไหลออกจากตัวอย่าง โดยมีปริมาณตัวอย่างน้ำที่เก็บเกิน 40 mL ต่อการเก็บแต่ละครั้ง ทำการเก็บน้ำโดยเทจากภาชนะที่รองรับน้ำที่ไหลออกจากตัวอย่างดินลงในขวดพลาสติกขนาดบรรจุ 60 mL ที่ผ่านการแช่ด้วยกรดไนตริก (HNO_3) 10 % เพื่อกำจัดประจุที่อาจปนเปื้อนในขวดพลาสติก แล้วทำการรักษาสภาพตัวอย่างน้ำด้วยการเติมกรดไนตริกเข้มข้น (Conc. HNO_3) ประมาณ 0.1 - 0.2 mL ให้มีระดับ pH < 2 และ > 1 เพื่อรักษาสภาพของสารละลายที่เก็บได้ จากนั้นนำไปแช่เย็นที่ 4 °C เพื่อรอนำไปวิเคราะห์หาค่าความเข้มข้นของโลหะหนักและวิเคราะห์หาความเข้มข้นของสารละลายคลอไรด์ (Cl^-) ที่อยู่ในตัวอย่างน้ำต่อไป การทดสอบจะดำเนินไปเรื่อยๆ จนกว่าความเข้มข้นของโลหะหนักที่ไหลออกจากตัวอย่างจะมีค่าเท่ากับความเข้มข้นของ Influent จึงหยุดการทดสอบ

(b) ความเข้มข้นของ Influent ที่ใช้ในการทดสอบหา Breakthrough curve ของดินทั้ง 3 ชนิด ได้แสดงไว้ในตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.4 ความเข้มข้นของ Influent ที่ใช้ในการทดสอบหา Breakthrough curve

ชนิดของดิน	โลหะหนัก ที่ใช้ทดสอบ	ความเข้มข้นของโลหะหนัก (M)
ทรายผสมเบนโทไนต์	- Cr^{3+}	0.001
	- Mixed solution	0.001*
ดินลูกรังคอหงส์	- Cr^{3+}	0.001
	- Mixed solution	0.001*
ดินเหนียวเกาะยอ	- Cr^{3+}	0.001
	- Mixed solution	0.001*

* Mixed solution มีค่าความเข้มข้นของโลหะหนักแต่ละตัวเท่ากับ 0.001 M ดังรายละเอียดในตารางที่ 3.3

3.5.2.2 การหาค่าความเข้มข้นสุดท้ายของโลหะหนักจากการสกัดโลหะหนักออกจากตัวอย่างดินด้วยวิธีการย่อยด้วยกรด

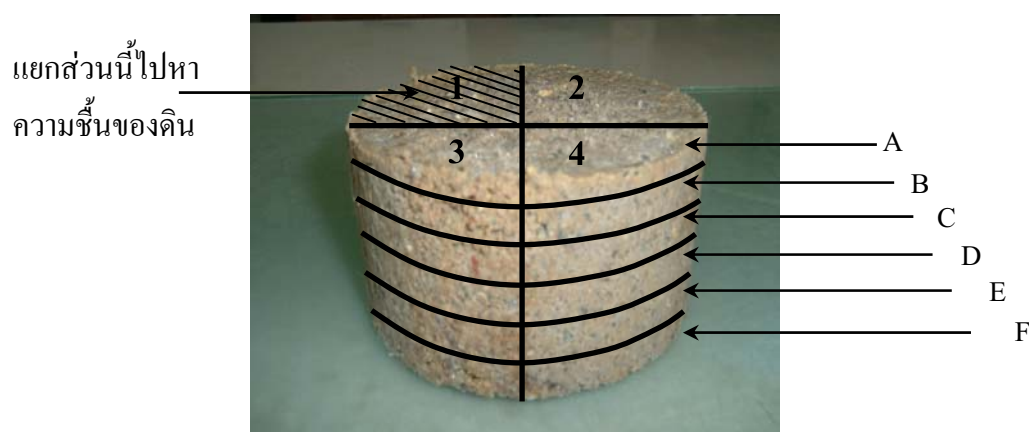
(a) การหาค่าความเข้มข้นของสารละลายโลหะหนักที่ถูกดูดติดกับดินจากการสกัดโลหะหนักออกจากตัวอย่างดินที่แบ่งเป็นชั้นๆ (C_s) ด้วยวิธีการย่อยด้วยกรด เมื่อปล่อยให้สารละลายโลหะหนัก เคลื่อนที่ผ่านดินเป็นเวลาพอควร โดยระยะเวลาที่เหมาะสมจะขึ้นอยู่กับค่า K ของดินแต่ละชนิดซึ่งจะกล่าวต่อไป รายละเอียดความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายโลหะหนักที่ใช้ในการทดสอบนี้ ได้แสดงไว้ในตารางที่ 3.5

(b) เมื่อปล่อยให้ Influent ไหลผ่านไปดินนานพอควร ทำการถอดตัวอย่างดินออกจาก Mold แล้วแบ่งดินออกเป็น 6 ชั้น (ภาพประกอบที่ 3.8) ตั้งแต่ชั้น A จนถึงชั้น F โดยแต่ละชั้น มีความหนาประมาณ 1 cm ดินแต่ละชั้นถูกแบ่งออกเป็น 4 ส่วน (ส่วนที่ 1 ถึงส่วนที่ 4) ดินส่วนที่ 1 จะถูกนำไปหาความชื้น สำหรับ 3 ส่วนที่เหลือ จะถูกนำไปหาปริมาณโลหะหนักที่ถูกดินดูดติดผิว

ตารางที่ 3.5 ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายโลหะหนักที่ใช้เป็น Influent

ชนิดของดิน	โลหะหนัก ที่ใช้ทดสอบ	ความเข้มข้นของโลหะหนัก (M)
ทรายผสมเบนโทไนต์	- Mixed solution	0.001*
ดินลูกรังคองหส์	- Cr ³⁺	0.001
	- Mixed solution	0.001*
ดินเหนียวเกาะยอ	- Cr ³⁺	0.001
	- Mixed solution	0.001*

* Mixed solution มีค่าความเข้มข้นของโลหะหนักแต่ละตัวเท่ากับ 0.001 M มีรายละเอียดในตารางที่ 3.3



ภาพประกอบที่ 3.8 การแบ่งดินที่ถอดออกจาก Mold เพื่อแบ่งดินไปหาความชื้นและแบ่งชั้นดินออกเป็น A – F

(c) การหาความเข้มข้นของโลหะหนักที่ถูกดูดติดผิว ทำได้โดยนำดินที่อบให้แห้งแล้วที่ 60°C นาน 24 ชั่วโมง ไปบดให้ละเอียด ในส่วนของทรายผสมเบนโทไนต์จะนำไปร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 200 (ขนาด 75 ไมครอน) เพื่อแยกเอาส่วนที่เป็นเบนโทไนต์ออกมาจากทราย แล้วนำดินที่ร่อนผ่านตะแกรงได้ ไปทำการสกัดเพื่อหาโลหะหนัก ส่วนดินลูกรังคองหส์และดินเหนียวเกาะยอ นำไปบดด้วย Agate mortar ให้เม็ดดินเป็นแป้ง แล้วนำไปสกัดหาโลหะหนักเช่นกัน

(d) การสกัดโลหะหนักออกจากดินด้วยวิธีการย่อยด้วยกรด (ภาพประกอบที่ 3.9) ทำโดยนำดินที่บดแล้ว 0.5 g ใส่ในบีกเกอร์ เติมกรด HNO_3 2 mL และกรด HCl 4 mL (ภาพประกอบที่ 3.9 a) เพื่อสกัดโลหะหนักออกจากดิน แล้วปิดด้วยกระจกนาฬิกา เพื่อป้องกันการระเหยแล้วนำไปวางไว้บน Hot plate ที่อุณหภูมิประมาณ 100°C นาน 2 ชั่วโมง (ภาพประกอบที่ 3.9 b) จากนั้นนำไปกรองด้วยกระดาษกรอง Whatman เบอร์ 42 (ภาพประกอบที่ 3.9 c) เจือจางด้วยกรด HNO_3 1 % แล้วปรับปริมาตรให้ได้ 50 mL (ภาพประกอบที่ 3.9 d) เพื่อเป็นการตรวจสอบความถูกต้องทำชุดทดสอบควบคุมโดยใช้ดินที่ไม่ผ่านการทดสอบกับสารละลายโลหะหนัก (Tanchuling et al., 2003) เก็บตัวอย่างในขวดพลาสติก (ภาพประกอบที่ 3.9 e) เพื่อนำไปวิเคราะห์หาความเข้มข้นของโลหะหนักต่อไป

3.5.3 การคำนวณหาค่าพารามิเตอร์การเคลื่อนที่

การคำนวณหาค่าพารามิเตอร์การเคลื่อนที่ D และ R แบ่งการคำนวณได้เป็น 2 แบบ คือ (1) คำนวณจาก Breakthrough curve ซึ่งก็คือการคำนวณหาค่าพารามิเตอร์การเคลื่อนที่จากการหาค่าความเข้มข้นของโลหะหนักของ Effluent เทียบกับเวลา (C_t) และ (2) คำนวณจาก Concentration profile ซึ่งก็คือการคำนวณหาค่าพารามิเตอร์การเคลื่อนที่จากค่าความเข้มข้นของโลหะหนักจากการสกัดโลหะหนักออกจากตัวอย่างดินที่แบ่งเป็นชั้นๆ (C_s) เมื่อปล่อยให้สารละลายไหลผ่านดิน มีรายละเอียดในการคำนวณดังนี้

3.5.3.1 การคำนวณหาค่าพารามิเตอร์การเคลื่อนที่จากการหาค่าความเข้มข้นของโลหะหนักของ Effluent เทียบกับเวลา (C_t) มีรายละเอียดดังนี้

(a) นำผลการวิเคราะห์หาค่าความเข้มข้นของโลหะหนักของ Effluent เทียบกับเวลา ($C_{t-\text{Lab}}$) มาหารด้วยค่าความเข้มข้นเริ่มต้น (C_0) ของสารละลายโลหะหนักที่ใช้ในการทดสอบ จะได้ $C_{t-\text{Lab}}/C_0$ แล้วนำค่าที่ได้ไปพล็อต Breakthrough curve

(b) พล็อต Breakthrough curve อีกรูป โดยใช้ค่าความเข้มข้นที่ได้จากสมการ 2.11 ($C_{t-\text{eq}}$) หารด้วยค่าความเข้มข้นเริ่มต้น (C_0) หรือ $C_{t-\text{eq}}/C_0$ โดยค่า $C_{t-\text{eq}}$ จะได้จากการหาค่า D และ R

(c) ความถูกต้องของค่า D และ R จากการหาค่า สามารถแสดงได้โดยเปรียบเทียบความแตกต่างของ Breakthrough Curve ทั้งสองในรูปของค่าเฉลี่ยของผลต่างยกกำลังสอง (Mean squared error, MSE) ดังสมการที่ 3.3

$$\text{MSE} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{C_{t-\text{eq}}}{C_0} - \frac{C_{t-\text{Lab}}}{C_0} \right)^2 \quad (3.3)$$



(a) ชั่งดิน 0.5 g เติมกรดแล้ว
ปิดด้วยกระดาษฟิวส์



(b) ตั้งบน Hot plate ที่
อุณหภูมิประมาณ 100 °C
นาน 2 ชั่วโมง



(c) กรองด้วยกระดาษกรอง
Whatman เบอร์ 42



(d) ปรับปริมาตรด้วย HNO_3 1%



(e) เก็บตัวอย่างในขวดพลาสติก
เพื่อการวิเคราะห์โลหะหนัก

ภาพประกอบที่ 3.9 การสกัดโลหะหนักออกจากดินด้วยวิธีการย่อยด้วยกรด

(d) ค่า D และ R ที่ให้ค่า MSE ที่น้อยที่สุด จะถือว่าเป็นค่า D และ R ที่สอดคล้องกับค่าจริงมากที่สุด

3.5.3.2 การคำนวณหาค่าพารามิเตอร์การเคลื่อนที่จากค่าความเข้มข้นของโลหะหนักจากการสกัดโลหะหนักออกจากตัวอย่างดินที่แบ่งเป็นชั้นๆ (C_s) ด้วยวิธีการย่อยด้วยกรด มีรายละเอียดดังนี้

(a) นำผลการวิเคราะห์หาค่าความเข้มข้นของโลหะหนักจากตัวอย่างดินที่แบ่งเป็นชั้น (C_{s-Lab}) มาหารด้วยค่าความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายโลหะหนัก (C_{sm}) ในดินชั้นบนสุดที่ถือว่ามีกรดติดผิวจนถึงสมดุลแล้ว ในรูปของ C_{s-Lab}/C_{sm} แล้วนำค่าที่ได้ไปพล็อต Concentration profile

(b) การสร้าง Concentration profile อีกรูป โดยใช้ค่าความเข้มข้นที่ได้จากสมการที่ 2.11 (C_{s-eq}) หารด้วยค่าความเข้มข้นเริ่มต้น (C_0) หรือ C_{s-eq}/C_0 โดยค่า C_{s-eq} จะได้จากการสุ่มค่า D และ R

(c) ความถูกต้องของค่า D และ R จากการสุ่ม สามารถแสดงได้โดยเปรียบเทียบความแตกต่างของ Breakthrough curve ทั้งสองในรูปของค่าเฉลี่ยของผลต่างยกกำลังสอง (Mean squared error, MSE) ดังสมการที่ 3.3

(d) ค่า D และ R ที่ให้ค่า MSE ที่น้อยที่สุด จะถือว่าเป็นค่า D และ R ที่สอดคล้องกับค่าจริงมากที่สุด

3.6 การทดสอบแบบแบทช์ (Batch adsorption test)

การหาค่าสัมประสิทธิ์พาร์ทิชัน (K_p) และความสามารถในดูดซับ (Adsorption capacity) ของเบนโทไนต์และดินเหนียว สามารถทำได้โดยวิธีการทดสอบแบบแบทช์ ซึ่งเป็นวิธีการทดสอบโดยใช้ดินที่มีน้ำหนักคงที่ ไปดูดสารละลายโลหะหนักที่มีความเข้มข้นแตกต่างกันหลายค่า สารละลายโลหะหนัก เมื่อถูกดูดซับผิวจนสมดุลแล้ว จะมีค่าความเข้มข้นแตกต่างกันขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของสารละลายและความสามารถในการดูดซับของดิน โดยทดสอบมีรายละเอียดดังนี้

(a) เตรียมดิน โดยใช้เบนโทไนต์ ดินลูกรังคอหงส์และดินเหนียวเกาะยอที่ผ่านตระแกรงเบอร์ 200 จำนวน 0.5 g, 1 g และ 1 g ตามลำดับ

(b) เตรียมสารละลายโลหะหนัก โดยละลายโลหะหนักแบบผงในน้ำกลั่น (Deionized water) จนมีปริมาตร 25 mL ใช้สารละลายที่มีความเข้มข้นที่แตกต่างกัน ประมาณ 12-18 ค่าความเข้มข้น และทำการทดสอบซ้ำในแต่ละความเข้มข้น 2 ซ้ำ โดยมีรายละเอียดความเข้มข้นและชนิดของสารละลายโลหะหนักที่ใช้ดังแสดงในตารางที่ 3.6

ตารางที่ 3.6 รายละเอียดความเข้มข้นของโลหะหนักที่ใช้ในการทดสอบแบบแบทช์

ชนิดของโลหะหนัก	สารตั้งต้น	ช่วงค่าความเข้มข้น (mg/L)	ระดับ pH ของสารละลาย
Cadmium (Cd^{2+})	CdCl_2	1–2,400	2.5 – 5.5
Lead (Pb^{2+})	PbCl_2	1–4,000	0.5 – 2.0
Zinc (Zn^{2+})	ZnCl_2	1–1,200	2.0 – 4.0
Chromium (Cr^{3+})	$\text{CrCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	1–800	2.5 – 4.0
Nickel (Ni^{2+})	$\text{NiCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	1–1,200	1.8 – 5.1

(c) ผสมดินกับสารละลายโลหะหนัก โดยนำดินมาใส่ในขวด Centrifuge ขนาด 30 mL (ภาพประกอบที่ 3.10 (a)) หลังจากนั้นนำสารละลายโลหะหนักที่ทราบความเข้มข้นเริ่มต้นมาผสมกับดิน นำไปเขย่าทันทีด้วยเครื่อง Heidolph promax 2020 ที่ความเร็วรอบ 300 rpm เป็นเวลา 24 ชั่วโมง (ภาพประกอบที่ 3.10 (b)) จากนั้นแยกชั้นของสารละลายโลหะหนักกับดินด้วยเครื่อง Centrifuge sorwall super T21, USA ที่ความเร็วรอบประมาณ 4,000–8,000 rpm เป็นเวลา 10 นาที (ภาพประกอบที่ 3.10 (c)) ที่อุณหภูมิ 20°C แล้วนำสารละลายโลหะหนักที่แยกออกจากชั้นดินไปหาความเข้มข้นสุดท้าย ดังภาพประกอบที่ 3.10

ในการทดสอบแบบแบทช์นี้ จะใช้ความเข้มข้นของสารละลายประมาณ 12 ค่า ต่อหนึ่งชนิดของดินและต่อหนึ่งชนิดของโลหะหนัก รวมทั้งชุดทดสอบควบคุม (Blank) ดังนั้นการทดสอบแบทช์ ทั้งหมดรวมเป็นจำนวน 180 ครั้ง จากนั้นนำผลความเข้มข้นที่วิเคราะห์ได้ไปฟิตกับสมการแบบ Freundlich , Linear และ Langmuir (สมการที่ 2.16, 2.17 และ 2.18 ตามลำดับ)



(a) นำดินผสมกับสารละลายโลหะหนัก
ที่ความเข้มข้นต่างๆ



(b) เหย้า 300 rpm ทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง



(c) นำไปแยกชั้นของดินกับสารละลาย
โลหะหนักด้วยเครื่อง Centrifuge



(d) นำสารละลายโลหะหนักที่แยกชั้น
อยู่ด้านบนไปตรวจวิเคราะห์หา
ความเข้มข้นสุดท้าย

ภาพประกอบที่ 3.10 การทดสอบแบบแบทช์

3.7 การวิเคราะห์ความเข้มข้นของสารละลายที่ศึกษา

การวิเคราะห์ความเข้มข้นของสารละลายที่ศึกษา ซึ่งประกอบด้วย สารละลายโลหะหนักและสารละลายคลอไรด์ มีรายละเอียดดังนี้

3.7.1 การวิเคราะห์หาความเข้มข้นของสารละลายโลหะหนัก มีรายละเอียดดังนี้

(a) นำน้ำตัวอย่างที่ต้องการวิเคราะห์หาค่าความเข้มข้นของโลหะหนัก ไปกรองตะกอนออก ด้วยกระดาษกรอง Whatman เบอร์ 42 แล้วนำน้ำตัวอย่างที่ไม่มีตะกอนปน ไปฉีดเข้าเครื่อง Atomic absorption spectrophotometer พร้อมกับ Standard ของโลหะหนักชนิดที่ต้องการวิเคราะห์

(b) วิเคราะห์หาความเข้มข้นของโลหะหนัก ด้วยเครื่อง Flame atomic absorption spectrophotometer ยี่ห้อ Varian รุ่น 220 A Australia โดยใช้ช่วงความยาวคลื่นในการวัดโลหะหนัก ดังตารางที่ 3.7

ตารางที่ 3.7 ช่วงความยาวคลื่นที่ใช้ในการวัดโลหะหนักด้วยเครื่อง Flame atomic absorption spectrophotometer

ชนิดของโลหะหนัก	Wave length (nm)	Slit (nm)	Optimum working range ($\mu\text{g/mL}$)
Cadmium (Cd^{2+})	228.8	0.5	0.02 – 3
Lead (Pb^{2+})	217.0	1.0	0.1 – 30
Zinc (Zn^{2+})	213.9	1.0	0.01 – 2
Chromium (Cr^{3+})	357.9	0.2	0.06 – 15
Nickel (Ni^{2+})	232.0	0.2	0.1 – 20

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

3.7.2.1 สารเคมีที่ใช้ในการวิเคราะห์ มีรายละเอียดและวิธีการเตรียม ดังนี้

(a) เตรียม K_2CrO_4 Indicator โดยชั่ง K_2CrO_4 50 g ละลายในน้ำกลั่นเล็กน้อย ใส่เกล็ด AgNO_3 ลงไปเล็กน้อย จนเป็นตะกอนสีแดงเกิดขึ้น ตั้งทิ้งไว้ 12 ชั่วโมง กรองด้วยกระดาษ Whatman เบอร์ 1 และปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นจนได้ปริมาตร 1 L

(b) สารละลายมาตรฐานเงินไนเตรต 0.0141 N เตรียมโดยชั่ง AgNO_3 2.395 g ละลายในน้ำกลั่นจนได้ปริมาตร 1 L โดยก่อนการทำการทดสอบทุกครั้งต้อง Standardize ด้วย

สารละลายมาตรฐานโซเดียมคลอไรด์ 0.0141 N (1 mL ของสารละลายมาตรฐานเงินไนเตรตจะสมมูลกับ 500 μg ของ Cl^-)

(c) สารละลายมาตรฐานโซเดียมคลอไรด์ 0.0141 N เตรียมโดยชั่ง NaCl ที่อบแห้งที่อุณหภูมิ 140°C จำนวน 824.1 mg ละลายในน้ำกลั่นจนได้ปริมาตรรวมเท่ากับ 1 L

3.7.2.2 ขั้นตอนการวิเคราะห์

(a) ปิเปตปริมาตรน้ำตัวอย่าง 10 mL แล้วปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นจนได้ 100 mL เทใส่ขวดรูปชมพู่ 250 mL โดยปรับ pH ของน้ำตัวอย่างที่ปรับปริมาตรแล้ว ให้อยู่ระหว่าง 7.0 – 10.0 ด้วย NaOH 0.1 N จากนั้นเติม K_2CrO_4 Indicator ลงไปจำนวน 1 mL น้ำตัวอย่างจะกลายเป็นสีเหลือง ทำการไตเตรตน้ำตัวอย่างด้วยสารละลายมาตรฐานเงินไนเตรต 0.0141 N จนกระทั่งถึงจุดยุติ เมื่อน้ำตัวอย่างเปลี่ยนสีจากสีเหลืองของ K_2CrO_4 Indicator เป็นสีเหลืองอมส้ม สำหรับในชุดการทดสอบควบคุม (Blank) จะใช้น้ำกลั่นจำนวน 100 mL มาเป็นน้ำตัวอย่าง โดยสามารถคำนวณหาความเข้มข้นของ Cl^- ได้ดังนี้

$$\text{Cl}^- (\text{mg/L}) = \left[\frac{35,450 \text{ N (A - B)}}{\text{mL of Sample}} \right] \times 100 \quad (3.4)$$

โดยที่ A = ปริมาตรของสารละลายมาตรฐานเงินไนเตรต 0.0141 N ที่ใช้ในการไตเตรตน้ำตัวอย่าง (mL)

B = ปริมาตรของสารละลายมาตรฐานเงินไนเตรต 0.0141 N ที่ใช้ในการไตเตรตน้ำกลั่น (mL)

N = Normality ของสารละลายมาตรฐานเงินไนเตรต 0.0141 N

(b) การทำ Standardize จะต้องทำทุกครั้งที่ทำการวิเคราะห์หาความเข้มข้นของ Cl^- โดยนำสารละลายมาตรฐานโซเดียมคลอไรด์ 0.0141 N จำนวน 20 mL มาใส่ในขวดรูปชมพู่แล้วเติม K_2CrO_4 Indicator ลงไปจำนวน 1 mL จากนั้นนำไปไตเตรตกับสารละลายมาตรฐานเงินไนเตรต 0.0141 N จนได้ตะกอนสีน้ำตาล โดยมีวิธีการคำนวณหา Normality ดังต่อไปนี้

$$N = \frac{20 \times 0.0141}{\text{mL of AgNO}_3} \quad (3.5)$$

บทที่ 4

ผลการศึกษา

ผลการศึกษาศักยภาพของการใช้ทรายผสมเบนโทไนต์และดินเหนียวเพื่อใช้เป็นชั้นกันซึม ในระดับห้องปฏิบัติการ ได้แบ่งผลการศึกษาเป็น 5 ส่วน ดังนี้ ผลการหาคุณสมบัติของดิน, ผลการหาค่า K ของทรายผสมเบนโทไนต์และดินเหนียว, ผลทดสอบความต้านทานสารเคมีของค่า K, ผลคุณสมบัติการดูดซับ และผลการหาค่าพารามิเตอร์การเคลื่อนที่ โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

4.1 ผลการศึกษาคุณสมบัติของดิน

ผลการศึกษาคุณสมบัติของเบนโทไนต์ ดินลูกรังคอหงส์ และดินเหนียวเกาะยอ ได้แสดงไว้ในตารางที่ 4.1 พบว่า เบนโทไนต์ มีค่า Atterberg limit (ค่า LL = 487 % และค่า PI = 450 %) สูงกว่าดินลูกรังคอหงส์ (ค่า LL = 43.00 % และค่า PI = 21.80 %) และดินเหนียวเกาะยอ (ค่า LL = 42.40 % และค่า PI = 23.20 %) ค่า PI ที่สูง แสดงให้เห็นว่าเบนโทไนต์มีความเหนียว (Plasticity) สูง และมีคุณสมบัติในการพองตัว (Swelling potential) สูง ส่วนดินลูกรังคอหงส์และดินเหนียวเกาะยอมีค่า Atterberg limit ใกล้เคียงกัน ซึ่งเมื่อนำค่า LL และ PI ของดินทั้ง 3 ชนิด ไปจำแนกประเภทของดินด้วยระบบ Unified soil classification system (USCS) พบว่า เบนโทไนต์จัดอยู่ในกลุ่ม High plasticity clay (CH) ส่วนดินลูกรังคอหงส์และดินเหนียวเกาะยอจัดอยู่ในกลุ่ม Low plasticity clay (CL)

ผลการทดสอบการบดอัดแบบมาตรฐาน (Standard Proctor) แสดงให้เห็นว่า ค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดและ (Maximum dry density, $\rho_{d_{max}}$) และค่าปริมาณความชื้นที่เหมาะสมในการบดอัด (Optimum water content, ω_{opt}) ของทรายผสมเบนโทไนต์ ($\rho_{d_{max}} = 1.95 \text{ g/cc}$, $\omega_{opt} = 10.50 \%$) แสดงให้เห็นถึงดินที่มีทรายเป็นองค์ประกอบหลัก เนื่องจากมีค่า $\rho_{d_{max}}$ สูง และมีค่า ω_{opt} ต่ำ ในทางตรงกันข้ามในส่วนของดินลูกรังคอหงส์ ($\rho_{d_{max}} = 1.70 \text{ g/cc}$, $\omega_{opt} = 18 \%$) และดินเหนียวเกาะยอ ($\rho_{d_{max}} = 1.70 \text{ g/cc}$, $\omega_{opt} = 17.11 \%$) แสดงให้เห็นว่าเป็นดินที่มีดินเหนียวเป็นส่วนประกอบหลัก

ตารางที่ 4.1 คุณลักษณะบางประการของเบนโทไนต์ ดินลูกรังคอหงส์ และดินเหนียวเกาะยอ

คุณลักษณะ	เบนโทไนต์	ดินลูกรังคอหงส์	ดินเหนียวเกาะยอ
Soils properties			
Liquid limit (LL) (%)	487.00	43.00	42.40
Plasticity index (PI) (%)	450.00	21.80	23.20
P200 (%)	65.00	56.00	77.00
Color	เทาอ่อน	น้ำตาลแกมแดง	เทาเข้ม
Maximum dry density (g/cc)	1.95*	1.70	1.70
Optimum water content (%)	10.50*	18.00	17.11
ประเภทของดินในระบบ Unified	CH	CL	CL
pH	8.58	5.52	7.27
Organic content (%w/w)	1.65	4.92	5.50
SO ₄ ²⁻ (mg/kg)	3,807.11	822.82	9,604.26
Cl ⁻ (mg/kg)	280.12	100.75	10,545.10
Exchangeable cations in soils			
Na ⁺ (meq/100g)	22.64	0.87	16.54
K ⁺ (meq/100g)	1.53	0.26	2.30
Ca ²⁺ (meq/100g)	24.45	3.49	6.49
Mg ²⁺ (meq/100g)	2.52	1.00	10.70
Mineralogical composition			
SiO ₂ (%)	63.97	45.37	50.84
Al ₂ O ₃ (%)	15.66	28.69	15.54
Fe ₂ O ₃ (%)	7.74	17.32	11.87
K ₂ O (%)	0.75	6.46	5.50
SO ₃ (%)	0.75	0.18	5.04
CaO (%)	2.62	0.36	1.42

หมายเหตุ * ทราบผสมเบนโทไนต์ที่ 5%

ค่าองค์ประกอบของสารอินทรีย์ (Organic content) ของเบนโทไนต์ ดินลูกรัง คอหงส์และดินเหนียวเกาะยอ มีค่าเท่ากับ 1.65, 4.92 และ 5.50 %w/w ตามลำดับ โดยดินลูกรัง คอหงส์และดินเหนียวเกาะยอ ซึ่งเก็บมาจากดินในสภาพธรรมชาติที่มีความลึกประมาณ 1.0 เมตร จึงมีสารอินทรีย์ปนอยู่ในปริมาณที่มากกว่าเบนโทไนต์ ซึ่งเกิดจากเถ้าภูเขาไฟและขุมนมาจากเหมือง ที่มีความลึกจากผิวดินมาก

ดินเหนียวเกาะยอมีปริมาณ SO_4^{2-} และ Cl^- ที่สูงมาก เมื่อเทียบกับเบนโทไนต์และ ดินลูกรังคอหงส์ ทั้งนี้เนื่องจากดินเหนียวเกาะยอเป็นดินเหนียวทะเล (Marine clay) ที่เก็บจาก ชายฝั่งทะเลบริเวณเกาะยอ อ.เมือง จ.สงขลา ค่าประจุบวกที่สามารถแลกเปลี่ยนได้ (Exchangeable cations) เป็นค่าที่แสดงถึงจำนวนประจุลบของแร่ดินเหนียว ซึ่งสามารถบอถึงความเหนียวของดิน และ Swelling potential ของดิน โดยความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวกของดินในภาพรวม เรียงจากมากไปน้อย ได้แก่ เบนโทไนต์, ดินเหนียวเกาะยอ และดินลูกรังคอหงส์ ตามลำดับ

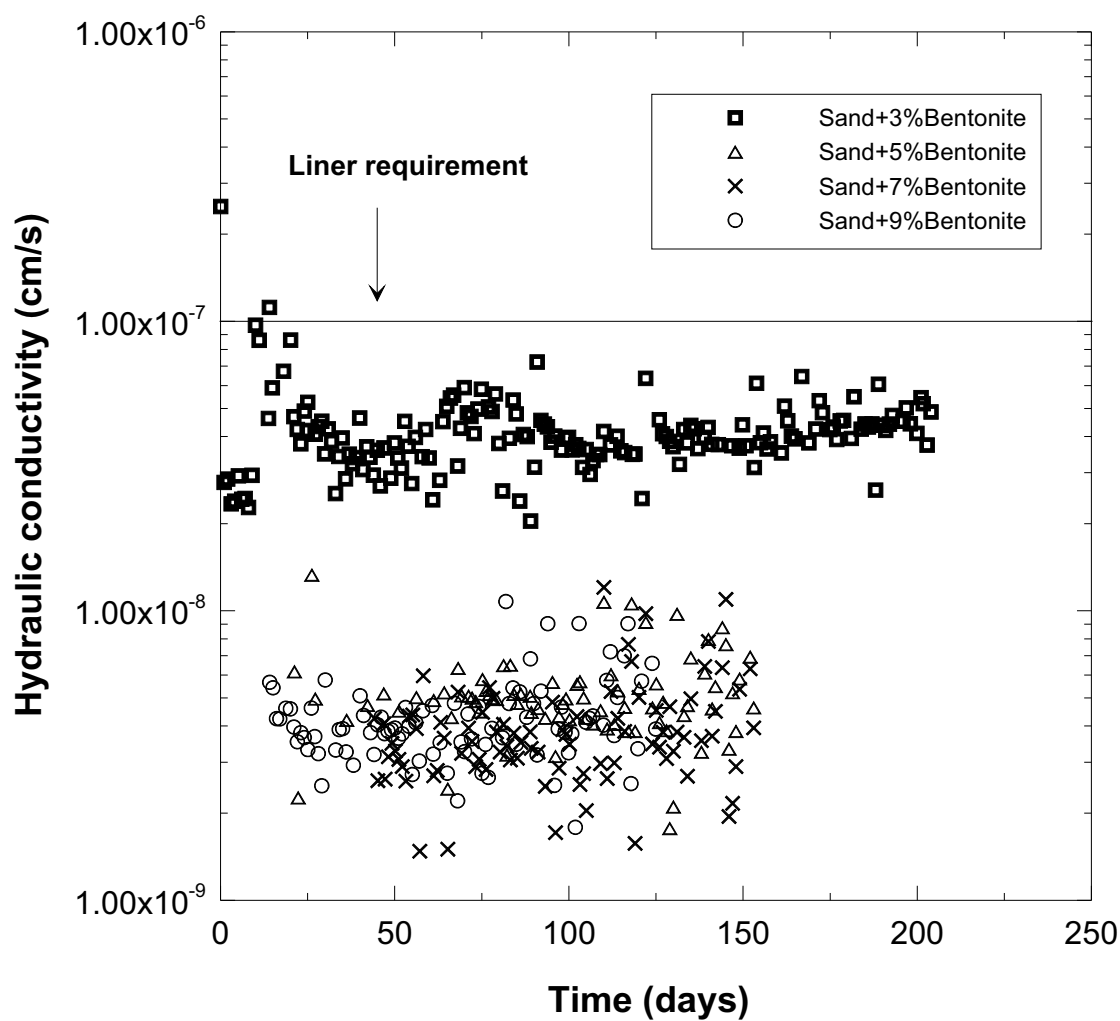
ผลการหาส่วนประกอบแร่ธาตุ (Mineralogical Composition) พบว่า ดินทั้ง 3 ชนิด ประกอบด้วย Silica และ Alumina เป็นหลัก โดยดินลูกรังคอหงส์ มีหลักเป็นธาตุประกอบอยู่ใน ส่วนผสมในปริมาณที่สูงกว่าดินอีก 2 ชนิด ซึ่งเกิดจากกระบวนการเปลี่ยนแปลงทางเคมีและฟิสิกส์ ของหินจนกลายเป็นดินลูกรัง และจากการที่มีหลักในปริมาณสูงนี้เอง ทำให้ดินลูกรังมีสีน้ำตาลแดง

4.2 ผลการศึกษาค่า K

4.2.1 ผลการศึกษาค่า K ของทรายผสมเบนโทไนต์เพื่อหาปริมาณเบนโทไนต์ที่เหมาะสม

ค่า K ของทรายผสมเบนโทไนต์ที่ 3%, 5%, 7% และ 9% ถูกหาด้วยวิธี Falling head test และคำนวณค่า K โดยใช้สมการที่ 3.1 ผลความสัมพันธ์ของค่า K กับเวลาของ ทรายผสมเบนโทไนต์ ที่ 3%, 5%, 7% และ 9% ซึ่งได้ทำการทดสอบนานประมาณ 150 – 200 วัน ดังแสดงไว้ในภาพประกอบที่ 4.1 พบว่าค่า K ของทรายผสมเบนโทไนต์ที่ 3% มีค่าคงที่ประมาณ 4.00×10^{-8} cm/s เมื่อทดสอบผ่านไปประมาณ 25 วัน จนถึงประมาณ 210 วัน ในขณะที่ทรายผสม เบนโทไนต์ที่ 5%, 7% และ 9% มีค่าใกล้เคียงกันตั้งแต่เริ่มทดสอบที่ประมาณ $4.00 - 5.00 \times 10^{-9}$ cm/s ตลอดระยะเวลา 150 วันในการทดสอบ ค่า K เฉลี่ยสำหรับทรายผสมเบนโทไนต์ ได้แสดงไว้ใน ตารางที่ 4.2 โดย K มีค่าประมาณ 4.14×10^{-8} , 5.15×10^{-9} , 4.89×10^{-9} และ 4.13×10^{-9} cm/s สำหรับ ส่วนผสมเบนโทไนต์ที่ 3%, 5%, 7% และ 9% ตามลำดับ ค่า K ของทรายผสมเบนโทไนต์ ที่ 0% เท่ากับ 3.6×10^{-5} cm/s ซึ่งจากผลการทดสอบ แสดงให้เห็นว่า ค่า K ของทรายผสมเบนโทไนต์จะ ลดลงเมื่อมีปริมาณเบนโทไนต์ที่มากขึ้น โดยค่า K จะไม่มีความแตกต่างกันมากนักเมื่อมี ปริมาณเบนโทไนต์มากกว่า 5%

การทดสอบในขั้นตอนนี้ถูกกระทำขึ้นเพื่อหาอัตราส่วนระหว่างทรายผสมเบนโทไนต์ที่เหมาะสมสำหรับการทดสอบในขั้นตอนต่อไป โดยจากผลการทดสอบในขั้นตอนนี้พบว่า อัตราส่วนของทรายผสมเบนโทไนต์ที่ 3% - 5% เป็นอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมสำหรับใช้ในการทดสอบ เนื่องจากมีค่า K ที่ไม่มากกว่า 1×10^{-7} cm/s ตามเกณฑ์มาตรฐานชั้นกันซึม



ภาพประกอบที่ 4.1 ค่า K ของทรายผสมเบนโทไนต์

ตารางที่ 4.2 ผลการหาค่า K ของทรายผสมเบนโทไนต์

% เบนโทไนต์	ค่า K โดยเฉลี่ย (cm/s)
0	3.60×10^{-5}
3	4.14×10^{-8}
5	5.15×10^{-9}
7	4.89×10^{-9}
9	4.13×10^{-9}

4.2.2 ผลการศึกษาค่า K ของทรายผสมเบนโทไนต์ ดินลูกรังคองหงส์และดินเหนียวเกาะยอ

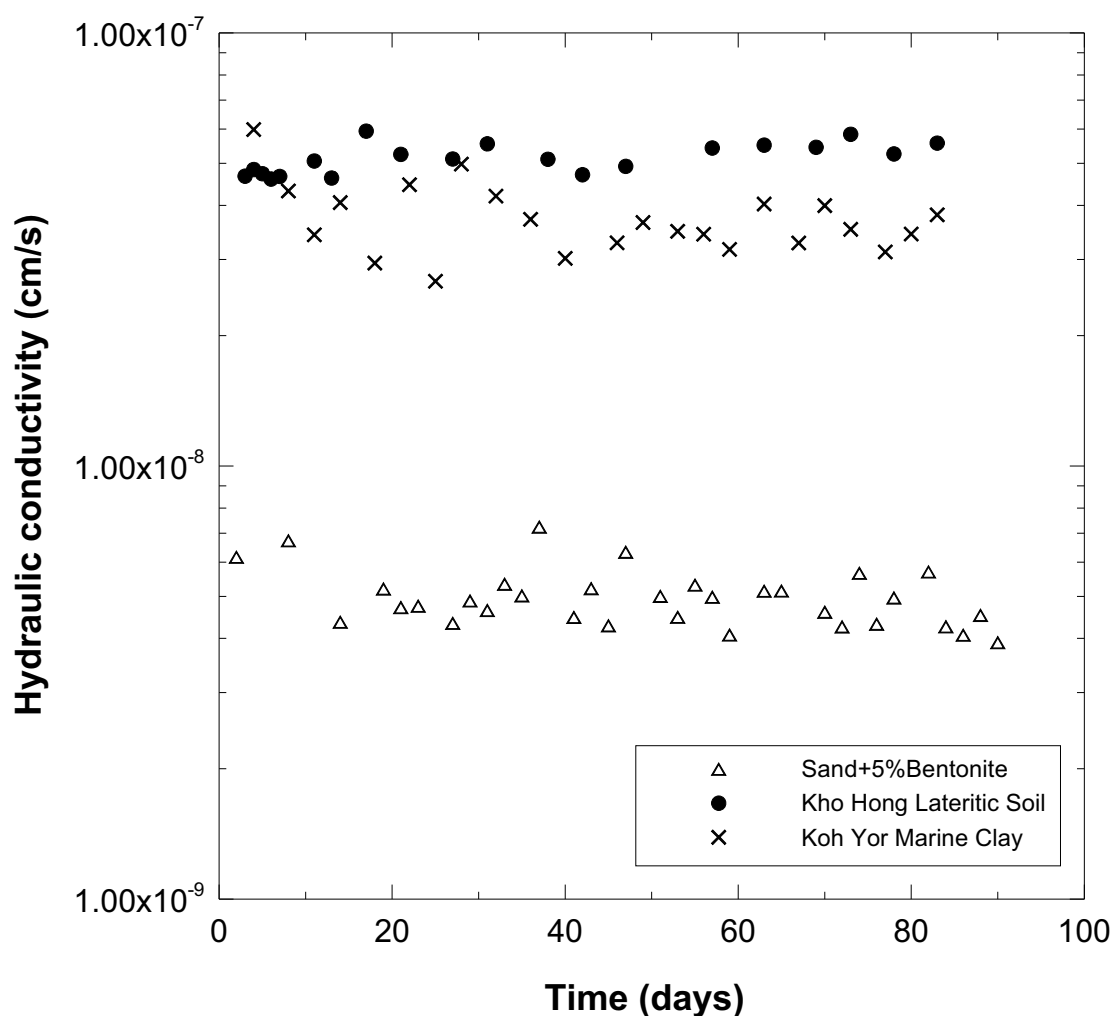
ผลการทดสอบหาค่า K ของทรายผสมเบนโทไนต์และดินเหนียวทั้ง 2 ชนิด ซึ่งแสดงในรูปของความสัมพันธ์ของค่า K ที่คำนวณได้ โดยใช้สมการที่ 3.1 กับเวลา (ภาพประกอบที่ 4.2) พบว่า ค่า K ของดินทั้งหมดที่ทำการทดสอบมีค่าแปรเปลี่ยนเล็กน้อยตามเวลา จึงมีการกำหนดเงื่อนไขในการเลือกค่า K ที่สามารถยอมรับเป็นผลการทดสอบได้ โดยมีเงื่อนไขว่าค่า K จากการทดสอบจะใช้ได้เมื่อผลต่างของอัตราการไหลเข้าของ Influent (Q_{in}) และอัตราการไหลออกของ Effluent (Q_{out}) อยู่ในช่วง $\pm 5\%$ และมีช่วงของค่า K คงที่ตามเวลา โดยจากผลการทดสอบในภาพประกอบที่ 4.2 พบว่า ค่า K ของดินทั้ง 3 ชนิด อยู่ในช่วงที่ยอมรับได้ เมื่อเข้าสู่สัปดาห์ที่ 3 ของการทดสอบ โดยค่า K เฉลี่ยของทรายผสมเบนโทไนต์ที่ 5 % ต่ำกว่าดินเหนียวเกาะยอและดินลูกรังคองหงส์ ตามลำดับ โดยมีค่า K เฉลี่ยเท่ากับ 5.15×10^{-9} , 3.39×10^{-8} และ 5.67×10^{-8} cm/s ตามลำดับ ค่า K ของดินทั้งหมดที่ได้จากการทดสอบต่ำกว่า 1×10^{-7} cm/s ตามเกณฑ์มาตรฐานของชั้นกั้นซึม

4.3 ผลการศึกษาความต้านทานสารเคมีของค่า K

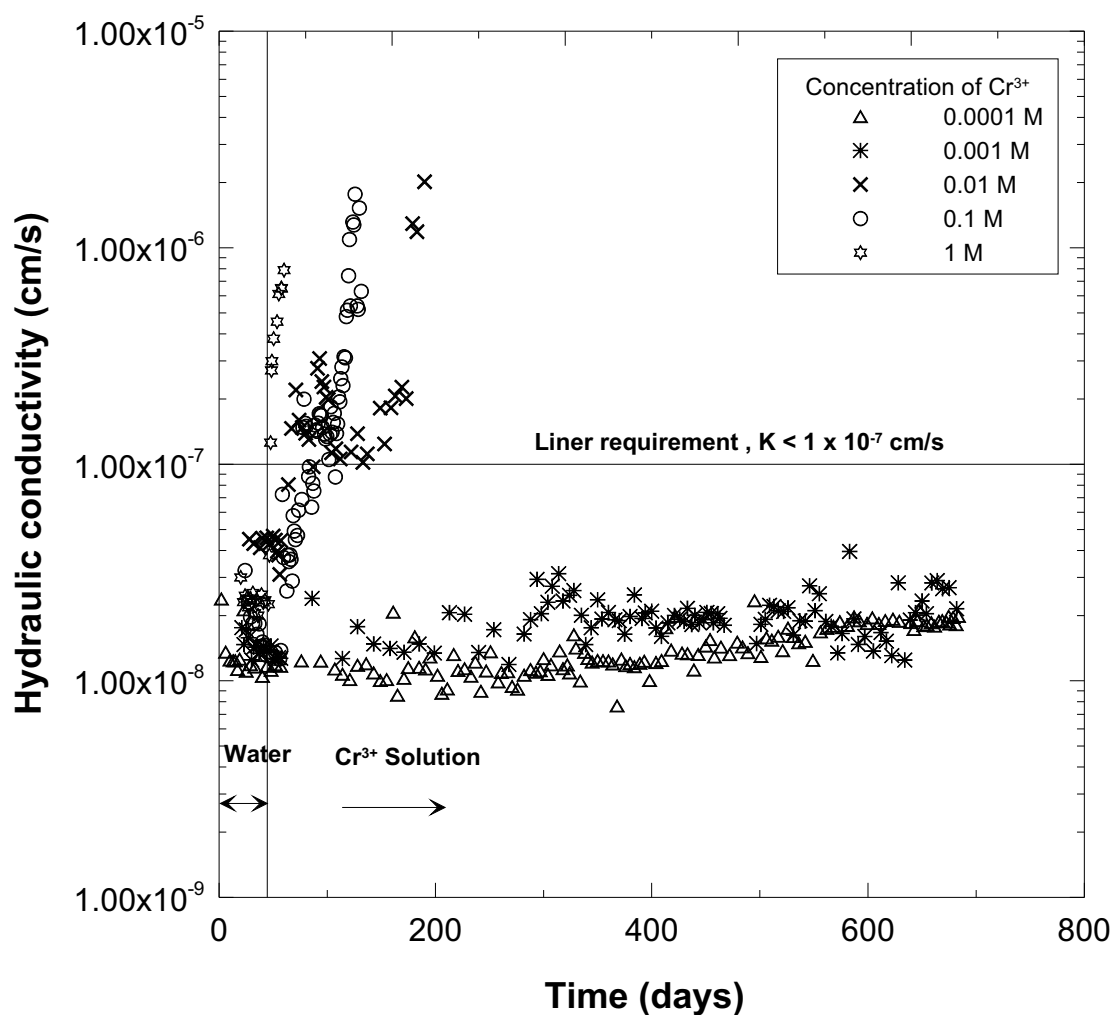
4.3.1 ความต้านทานสารเคมีของทรายผสมเบนโทไนต์

การทดสอบความต้านทานสารเคมีของทรายผสมเบนโทไนต์ที่ 3% ซึ่งทำการทดสอบด้วยการเตรียมดินผสมเบนโทไนต์ 5 ตัวอย่าง แล้วปล่อยให้สารละลายโลหะหนัก Cr^{3+} ที่มีความเข้มข้นเท่ากับ 0.0001, 0.001, 0.01, 0.1 และ 1 M ไหลผ่าน โดยใช้ระยะเวลาในการทดสอบสูงสุด ประมาณ 700 วัน ความสัมพันธ์ของค่า K กับเวลาจากการทดสอบได้แสดงในภาพประกอบที่ 4.3 พบว่า ทรายผสมเบนโทไนต์ที่ 3 % ทั้ง 5 ตัวอย่าง เมื่อทดสอบกับน้ำกลั่น พบว่ามีค่า K อยู่ระหว่าง 1.00×10^{-8} – 5.00×10^{-8} cm/s ซึ่งหลังจากมีการเปลี่ยนมาทดสอบกับสารละลาย Cr^{3+} ในวันที่ 57 ของการทดสอบ ค่า K เริ่มมีการเปลี่ยนแปลง โดยเฉพาะในตัวอย่างดินที่ทดสอบกับสารละลาย Cr^{3+} ที่มีความเข้มข้นสูง โดยค่า K ของตัวอย่างดินเมื่อใช้สารละลาย Cr^{3+} ที่ความเข้มข้น

0.0001 และ 0.001 M มีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อยตลอดระยะเวลาการทดสอบประมาณ 700 วัน และยังคงมีค่าต่ำกว่า 1.00×10^{-7} cm/s ดังนั้นทรายผสมเบนโทไนต์ สามารถต้านทานสารละลาย Cr^{3+} ที่ความเข้มข้น 0.0001 และ 0.001 M ได้ สำหรับทรายผสมเบนโทไนต์ที่ทดสอบกับสารละลาย Cr^{3+} ที่ความเข้มข้น 0.01, 0.1 และ 1 M พบว่า ค่า K สูงขึ้นมากกว่า 1.00×10^{-7} cm/s หลังวันที่ 70, 77 และ 59 ของการทดสอบ ตามลำดับ ดังนั้นทรายผสมเบนโทไนต์ 3% จึงไม่สามารถต้านทานสารละลาย Cr^{3+} ที่ความเข้มข้นระดับที่สูง 0.01 M ได้



ภาพประกอบที่ 4.2 ผลการศึกษาค่า K ของทรายผสมเบนโทไนต์ที่ 5% ดินลูกรังคอหงส์และดินเหนียวเกาะยอ

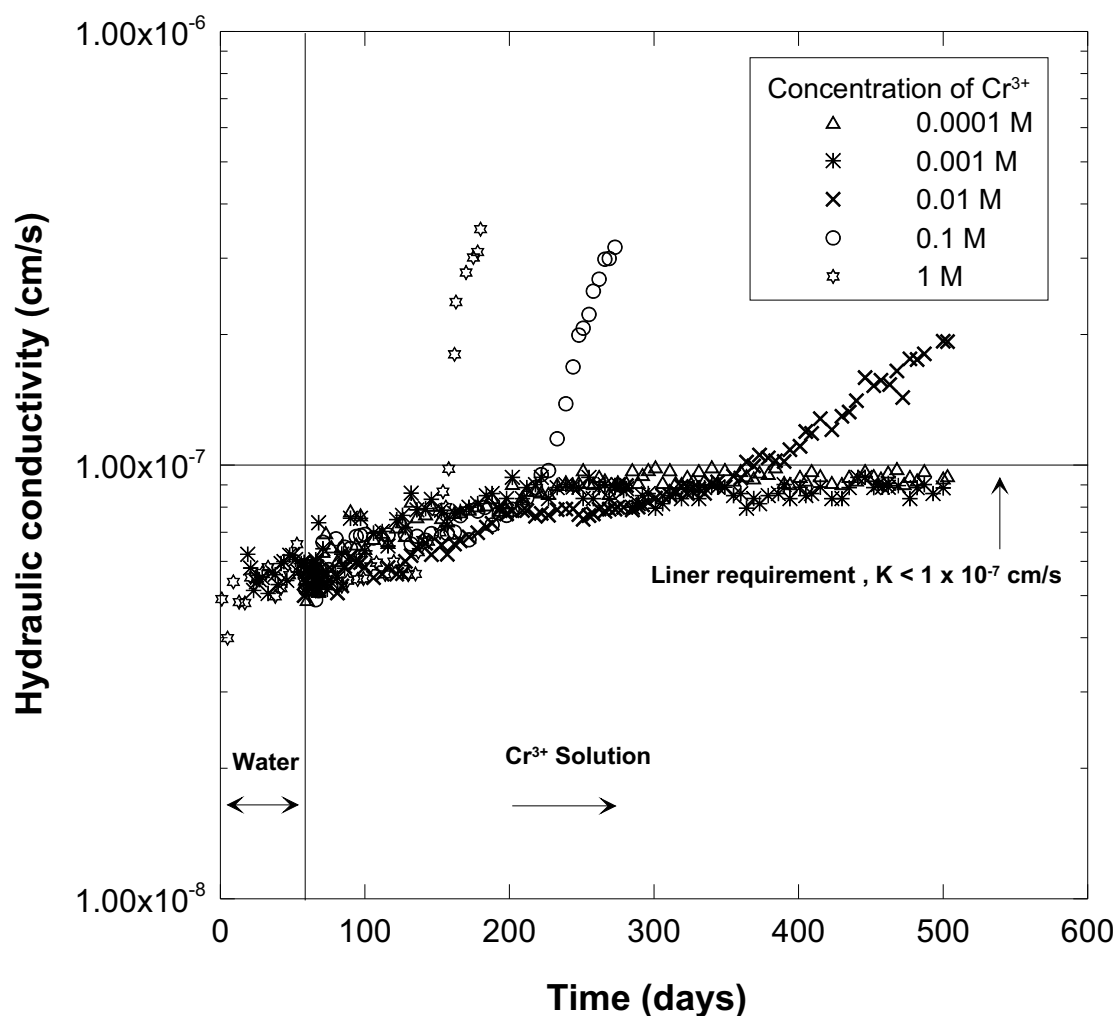


ภาพประกอบที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า K กับเวลาของทรายผสมเบนโทไนต์ที่ทดสอบด้วยสารละลายโลหะหนัก Cr^{3+}

4.3.2 ความต้านทานสารเคมีของดินลูกรังคองหงส์

ความสัมพันธ์ของค่า K กับเวลาของดินลูกรังคองหงส์ที่ได้จากการทดสอบด้วยสารละลายโลหะหนัก Cr^{3+} ที่มีความเข้มข้นเท่ากับ 0.0001, 0.001, 0.01, 0.1 และ 1 M สำหรับระยะเวลาในการทดสอบประมาณ 500 วัน ได้แสดงในภาพประกอบที่ 4.4 โดยค่า K เริ่มต้นของดินลูกรังคองหงส์ ขณะทำการทดสอบกับน้ำกลั่นในทุกชุดการทดสอบ มีค่าอยู่ระหว่าง $5.00 \times 10^{-8} - 6.00 \times 10^{-8} \text{ cm/s}$ โดยหลังจากมีการเปลี่ยนมาทดสอบกับสารละลาย Cr^{3+} ในวันที่ 70 ของการทดสอบ พบว่า ค่า K เริ่มมีการเปลี่ยนแปลง โดยเฉพาะในตัวอย่างดินที่ทดสอบกับสารละลาย Cr^{3+} ที่มีความเข้มข้นสูง กล่าวคือ ค่า K ของตัวอย่างดินลูกรังคองหงส์ เมื่อทดสอบด้วยสารละลาย Cr^{3+} ที่มีความเข้มข้น 0.01, 0.1 และ 1 M มีค่า K สูงขึ้นมากกว่า $1.00 \times 10^{-7} \text{ cm/s}$ หลังจาก

วันที่ 400, 233 และ 162 ของการทดสอบ ตามลำดับ จึงกล่าวได้ว่า ดินลูกรังคอหงส์ ไม่สามารถต้านทานสารละลาย Cr^{3+} ที่ความเข้มข้นมากกว่า 0.01 M ได้ ในขณะที่ค่า K ของตัวอย่างดินเมื่อใช้สารละลาย Cr^{3+} ที่ความเข้มข้น 0.0001 และ 0.001 M มีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อยตลอดระยะเวลาการทดสอบประมาณ 500 วัน โดยมีค่า K คงที่อยู๋ภายในช่วง $7.00 \times 10^{-8} - 9.00 \times 10^{-8} \text{ cm/s}$ ซึ่งยังคงมีค่าต่ำกว่า $1.00 \times 10^{-7} \text{ cm/s}$ จึงสามารถต้านทานสารเคมีที่มีความเข้มข้นระดับที่ต่ำกว่า 0.001 M ได้



ภาพประกอบที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า K กับเวลาของดินลูกรังคอหงส์ที่ทดสอบด้วยสารละลายโลหะหนัก Cr^{3+}

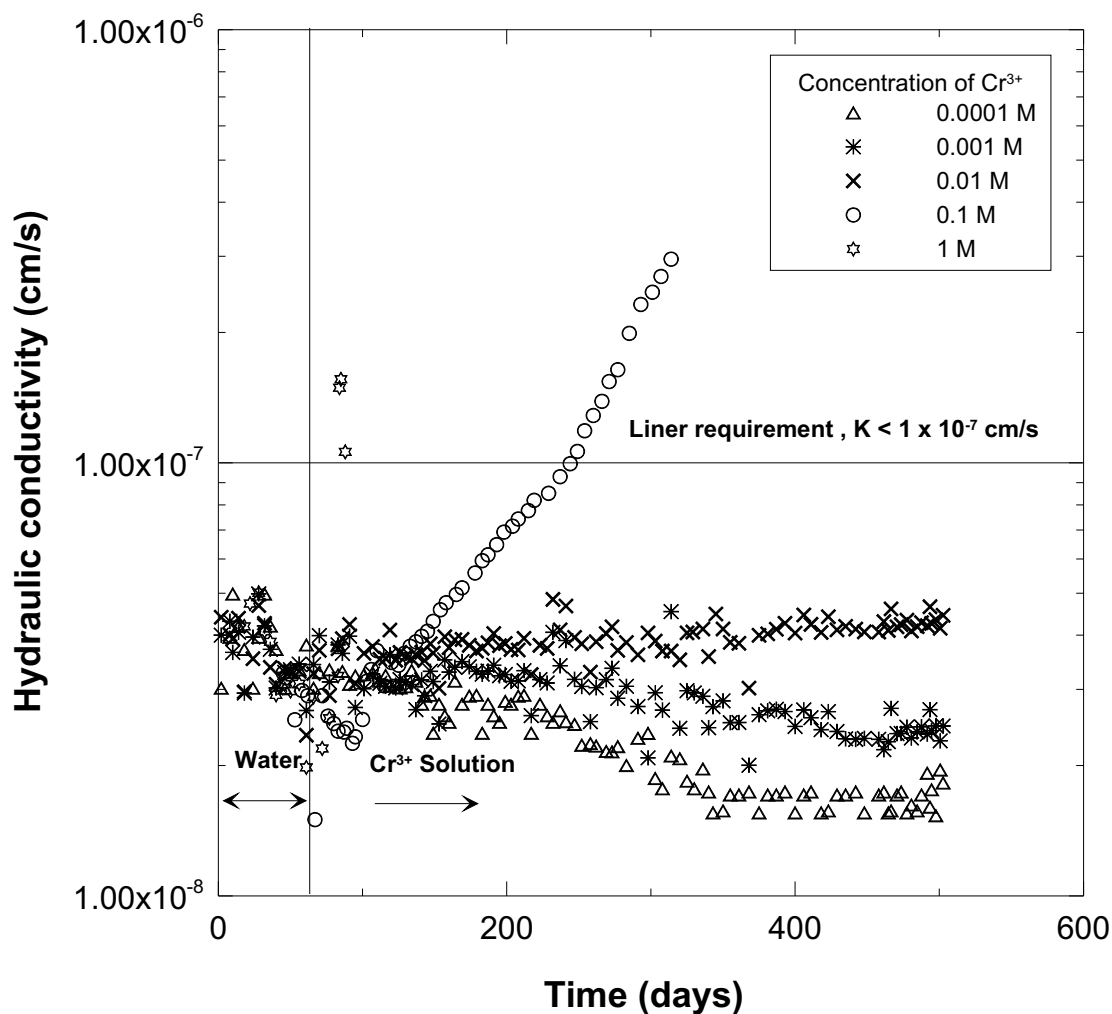
4.3.3 ความต้านทานสารเคมีของดินเหนียวเกาะยอ

ความสัมพันธ์ระหว่างค่า K กับเวลา ของดินเหนียวเกาะยอที่ได้จากทดสอบด้วยสารละลายโลหะหนัก Cr^{3+} ที่มีความเข้มข้นเท่ากับ 0.0001, 0.001, 0.01, 0.1 และ 1 M ใช้ระยะเวลาในการทดสอบสูงสุด ประมาณ 500 วัน ได้แสดงในภาพประกอบที่ 4.5 โดยดินเหนียวเกาะยอมีค่า K เริ่มต้นขณะทำการทดสอบกับน้ำกลั่นในทุกชุดการทดสอบ อยู่ระหว่าง $3.00 \times 10^{-8} - 5.00 \times 10^{-8} \text{ cm/s}$ และหลังจากมีการเปลี่ยนมาทดสอบกับสารละลาย Cr^{3+} ในวันที่ 83 ของการทดสอบ พบว่า ค่า K เริ่มมีการเปลี่ยนแปลง โดยเฉพาะในตัวอย่างดินที่ทดสอบกับสารละลาย Cr^{3+} ที่มีความเข้มข้นสูง ค่า K ของตัวอย่างดินเมื่อใช้สารละลาย Cr^{3+} ที่ความเข้มข้น 0.0001, 0.001 และ 0.01 M มีค่าเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยตลอดระยะเวลาการทดสอบประมาณ 500 วัน โดยมีค่า K ของทั้ง 3 ระดับความเข้มข้น ประมาณ 1.70×10^{-8} , 2.40×10^{-8} และ $4.50 \times 10^{-8} \text{ cm/s}$ ตามลำดับ ซึ่งค่า K ของความเข้มข้นทั้ง 3 ระดับนี้ ยังมีค่าต่ำกว่า $1.00 \times 10^{-7} \text{ cm/s}$ ดังนั้นดินเหนียวเกาะยอจึงมีความต้านทานสารละลาย Cr^{3+} ที่ความเข้มข้น 0.0001, 0.001 และ 0.01 M ได้ ค่า K ของตัวอย่างดินเหนียวเกาะยอไม่สามารถต้านทานสารละลาย Cr^{3+} ที่ความเข้มข้น 0.1 และ 1 M ได้ เนื่องจากค่า K สูงขึ้นมากกว่า $1.00 \times 10^{-7} \text{ cm/s}$ โดยพบว่าหลังจากการเติมสารละลาย Cr^{3+} ที่ความเข้มข้น 0.1 M ค่า K ค่อยๆ เพิ่มขึ้น จนกระทั่งมีค่ามากกว่า $1.00 \times 10^{-7} \text{ cm/s}$ ในวันที่ 250 ของการทดสอบ สำหรับสารละลาย Cr^{3+} ที่ความเข้มข้น 1 M พบว่า หลังจากเติมสารละลาย Cr^{3+} แล้ว ค่า K สูงขึ้นอย่างรวดเร็วภายใน 1 วัน

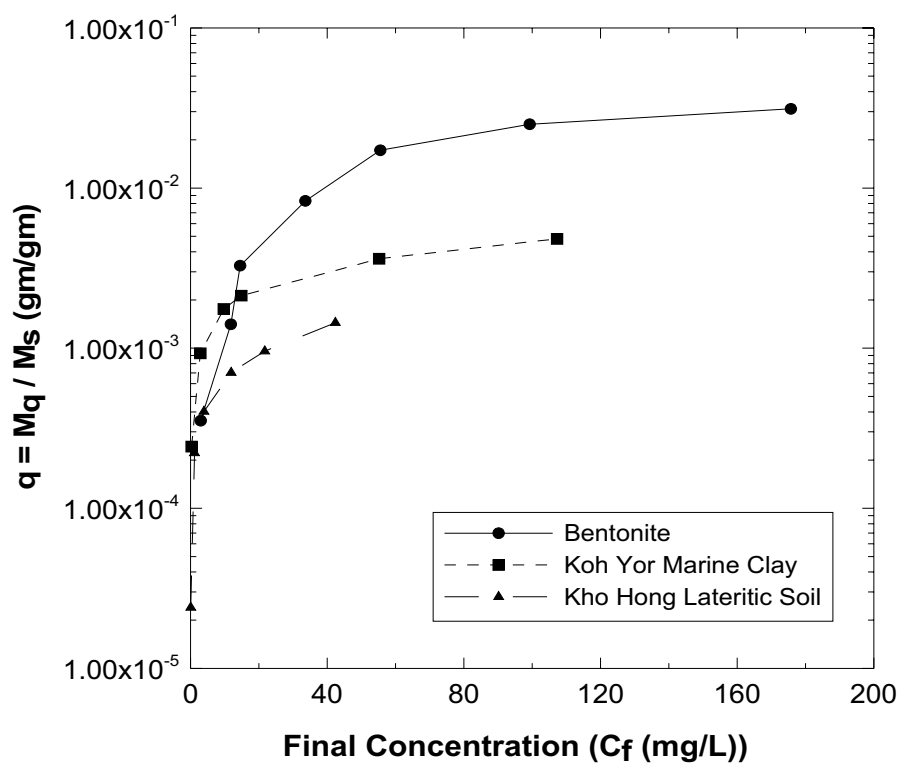
4.4 คุณสมบัติการดูดติดผิว

ผลการทดสอบแบบแบทช์ ในการศึกษาคุณสมบัติการดูดติดผิวของเบนโทไนต์, ดินลูกรังคอหงส์ และดินเหนียวเกาะยอ กับโลหะหนัก 5 ชนิด อันได้แก่ Cd^{2+} , Pb^{2+} , Zn^{2+} , Ni^{2+} และ Cr^{3+} ได้แสดงไว้ในรูปของความสัมพันธ์ระหว่าง อัตราส่วนของมวลโลหะหนักที่ถูกดูดติดผิวต่อมวลของดินที่ดูดสารนั้น (q) (สมการที่ 2.14) และความเข้มข้นสุดท้ายของสารละลายโลหะหนัก (C_p) เมื่อกระบวนการดูดติดผิวสมดุลแล้ว หรือที่เรียกว่า “ไอโซเทอม” ดังแสดงในภาพประกอบที่ 4.6 – 4.13 ซึ่งจะเห็นได้ว่าสำหรับทุกโลหะหนักที่ศึกษา ความสามารถในการดูดติดผิวของดินทั้ง 3 ชนิด พิจารณาจากค่า q_{max} จากมากไปหาน้อย ได้แก่ เบนโทไนต์, ดินเหนียวเกาะยอและดินลูกรังคอหงส์ ตามลำดับ ความสามารถในการดูดติดผิวของดินจะขึ้นอยู่กับองค์ประกอบทางเคมีของดินในส่วนที่เป็นดินเม็ดละเอียด ซึ่งมีประจุลบอยู่โดยธรรมชาติ ดินเม็ดละเอียดที่มีประจุลบมากกว่าหรือมี CEC มากกว่า ก็จะดูดสารละลายประจุบวกมาเกาะติดผิวได้มากกว่า ดังนั้นสำหรับชีวิตจำนวนประจุลบอย่างง่าย คือ ค่า Plasticity index (PI) ดินที่มีประจุบวกมาก (หรือมี CEC มาก) ก็จะมีค่า PI สูง

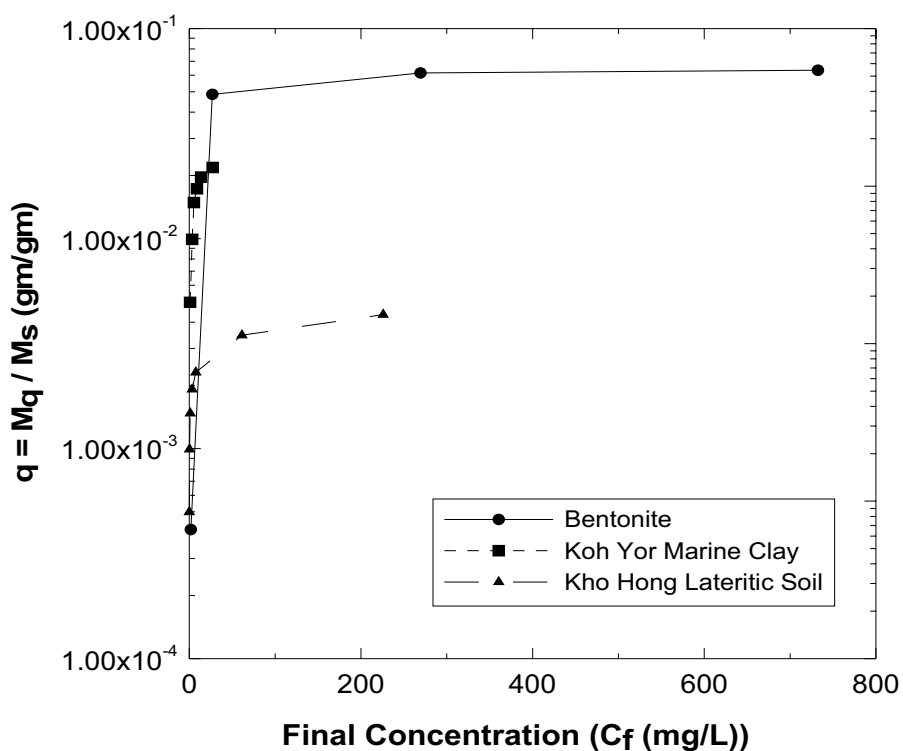
ค่า PI ของดินในตารางที่ 4.1 แสดงให้เห็นว่า เบนโทไนต์มี PI มากกว่าดินเหนียวเกาะยอและดินลูกรังคอหงส์ ตามลำดับ ด้วยเหตุนี้จึงทำให้ความสามารถในการดูดซับของเบนโทไนต์สูงกว่าดินเหนียวเกาะยอและดินลูกรังคอหงส์



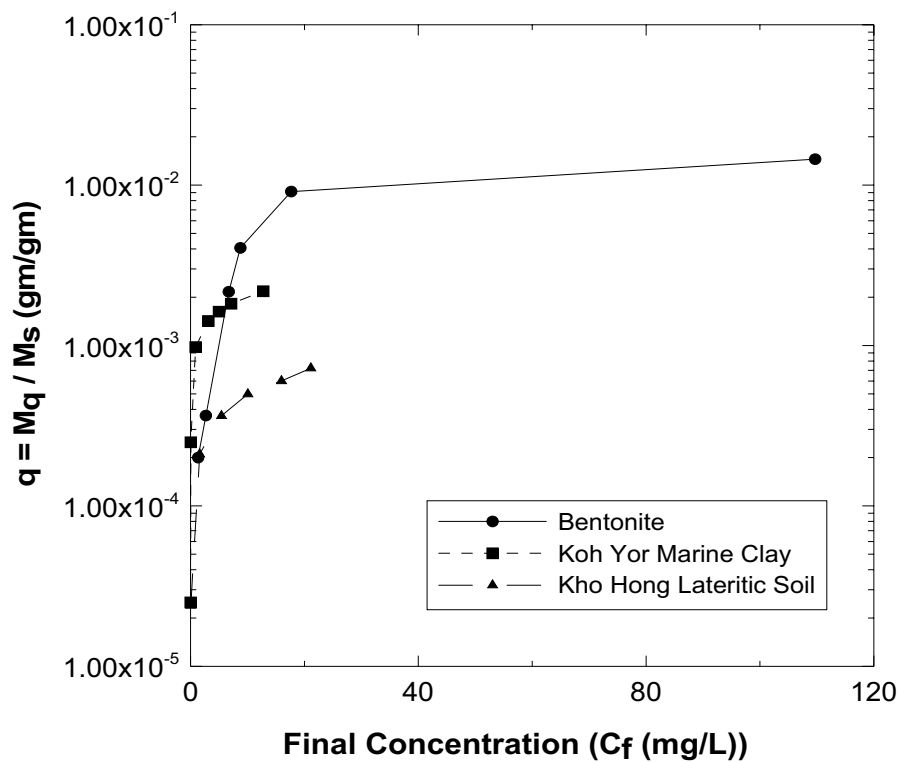
ภาพประกอบที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า K กับเวลาของดินเหนียวเกาะยอที่ทดสอบด้วยสารละลายโลหะหนัก Cr^{3+}



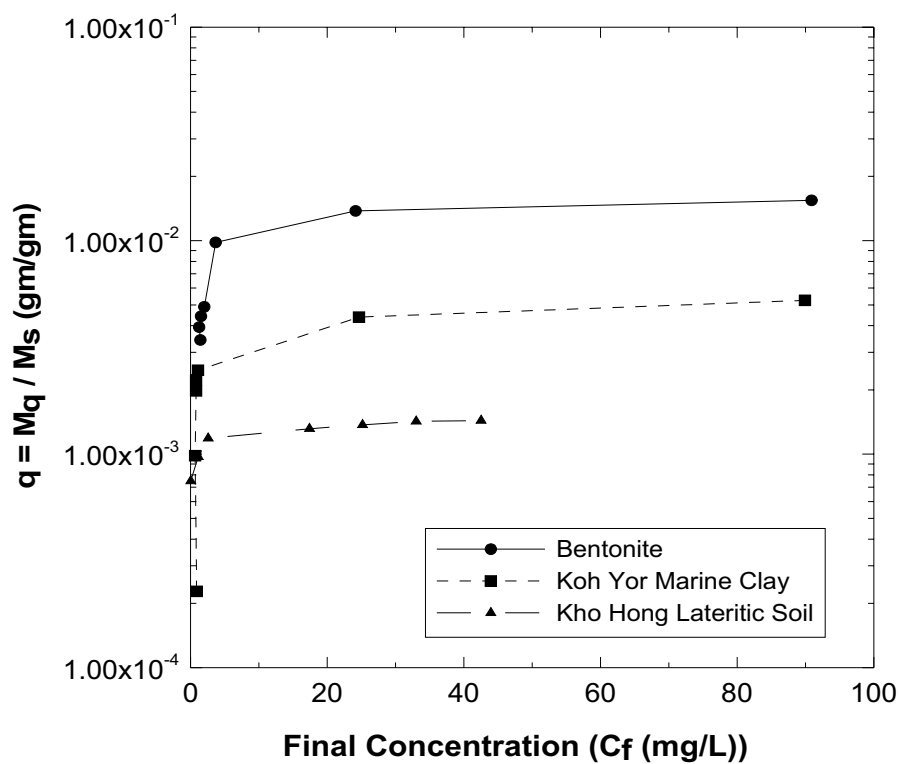
ภาพประกอบที่ 4.6 ไอโซเทอมแสดงการดูดติดผิวของ Cd^{2+} โดยเบนโทไนต์ ดินลูกรังคอหงส์ และดินเหนียวเกาะยอ



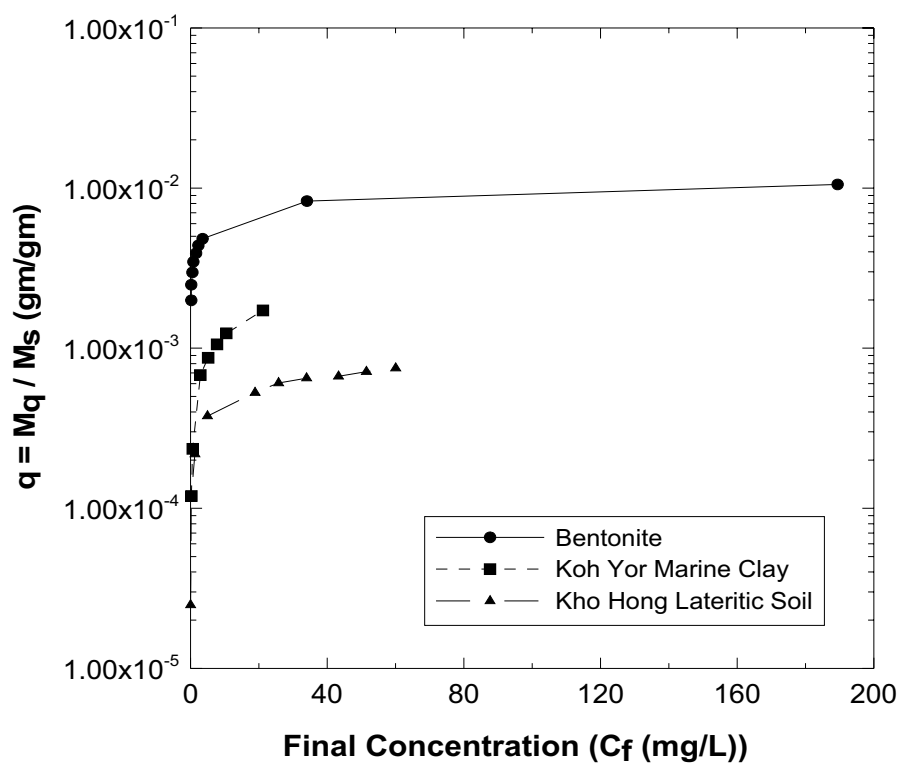
ภาพประกอบที่ 4.7 ไอโซเทอมแสดงการดูดติดผิวของ Pb^{2+} โดยเบนโทไนต์ ดินลูกรังคอหงส์ และดินเหนียวเกาะยอ



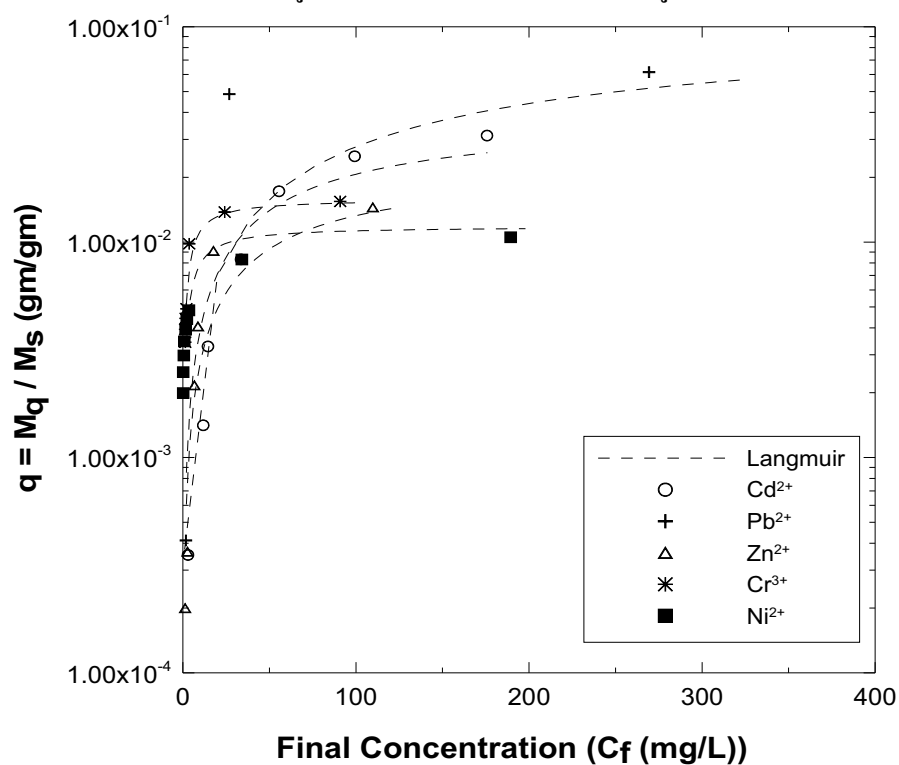
ภาพประกอบที่ 4.8 ไอโซเทอมแสดงการดูดซับของ Zn^{2+} โดยเบนโทไนต์ ดินลูกรังคอหงส์ และดินเหนียวเกาะยอ



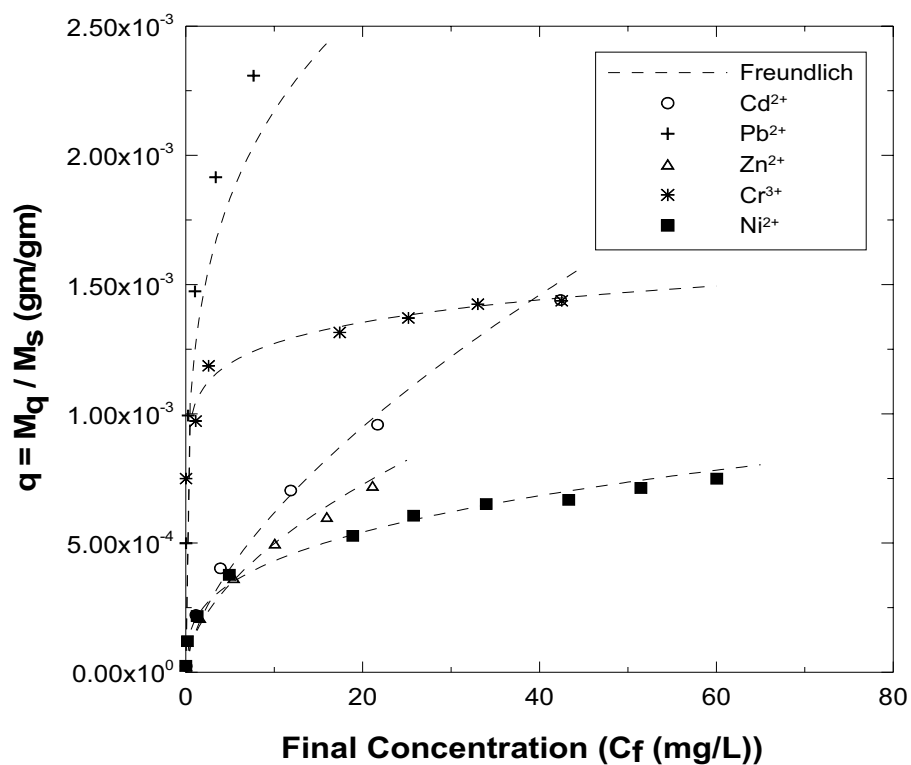
ภาพประกอบที่ 4.9 ไอโซเทอมแสดงการดูดซับของ Cr^{3+} โดยเบนโทไนต์ ดินลูกรังคอหงส์และดินเหนียวเกาะยอ



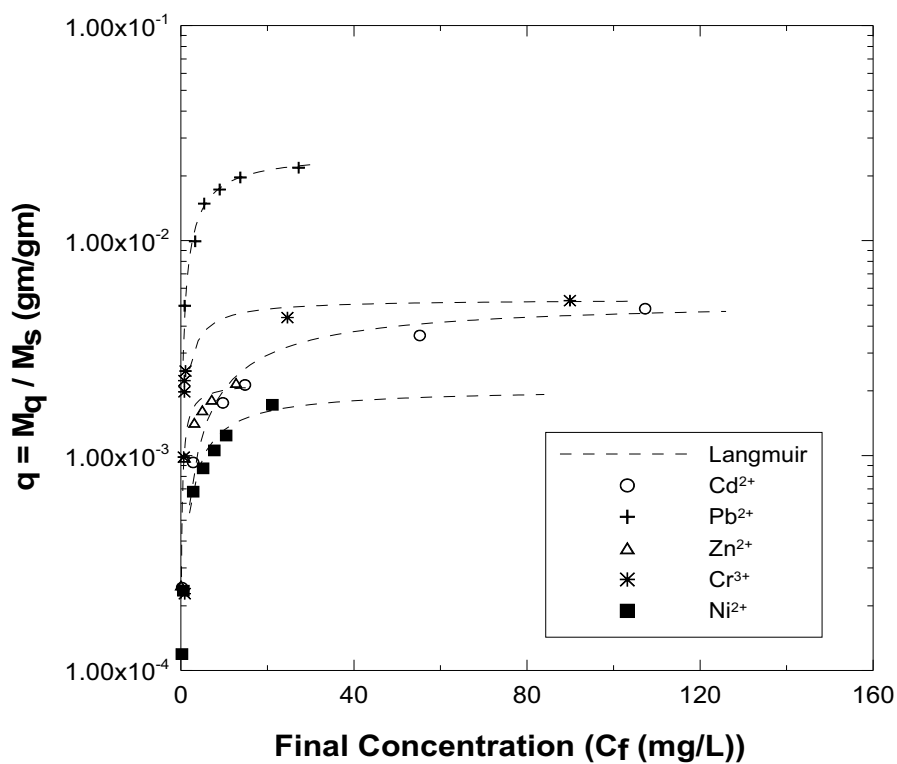
ภาพประกอบที่ 4.10 ไอโซเทอมแสดงการดูดซับของ Ni^{2+} โดยเบนโทไนต์ ดินลูกรังคอหงส์และดินเหนียวเกาะยอ



ภาพประกอบที่ 4.11 ไอโซเทอมแสดงการดูดซับแบบ Langmuir ของเบนโทไนต์



ภาพประกอบที่ 4.12 ไอโซเทอมแสดงการดูดติดผิวแบบ Freundlich ของดินลูกรังคอกหงส์



ภาพประกอบที่ 4.13 ไอโซเทอมแสดงการดูดติดผิวแบบ Langmuir ของดินเหนียวเกาะยอ

4.4.1 ไอโซเทอมของการดูดติดผิว

ไอโซเทอมการดูดโลหะหนักติดผิวของดินทั้ง 3 ชนิด แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า q กับ ค่าความเข้มข้นของสารละลาย เมื่อการดูดติดผิวสมดุลแล้ว (C_f) ความสัมพันธ์ดังกล่าวสามารถพิตได้โดยสมการแบบ Freundlich Isotherm (สมการที่ 2.16) หรือสมการแบบเส้นตรง (สมการที่ 2.17) หรือสมการแบบ Langmuir (สมการที่ 2.18) การพิตผลการทดสอบกับสมการแบบ Freundlich ได้แสดงไว้ในตารางที่ 4.3 โดยจากหลักเกณฑ์ว่า ดินจะดูดติดผิวได้ดีกว่า ถ้าค่า K_F และ $1/n$ สูงกว่า พบว่า เบนโทไนต์มีความสามารถดูดโลหะหนักทุกชนิดมาติดผิวได้ดีกว่าดินเหนียวเกาะยอและดินลูกรังคอหงส์ ตามลำดับ

การพิตไอโซเทอมกับสมการของ Langmuir ได้แสดงไว้ในตารางที่ 4.5 พบว่า เบนโทไนต์มีความสามารถในการดูดซับโลหะหนักทุกชนิดมาติดผิวได้ดีกว่าดินเหนียวเกาะยอและดินลูกรังคอหงส์ ตามลำดับ โดยไอโซเทอมการดูดติดผิวของเบนโทไนต์และดินเหนียวเกาะยอสามารถพิตเข้ากับสมการแบบ Langmuir ได้ดีที่สุด โดยค่า R^2 ของเบนโทไนต์เท่ากับ 0.933, 0.955, 0.804, 0.999, และ 0.995 สำหรับ Cd^{2+} , Pb^{2+} , Zn^{2+} , Cr^{3+} และ Ni^{2+} ตามลำดับ ส่วนค่า R^2 ของดินเหนียวเกาะยอ เท่ากับ 0.970, 0.997, 0.974, 0.998 และ 0.960 สำหรับ Cd^{2+} , Pb^{2+} , Zn^{2+} , Cr^{3+} และ Ni^{2+} ตามลำดับ ในขณะที่ไอโซเทอมการดูดติดผิวของดินลูกรังคอหงส์ สามารถพิตเข้ากับสมการแบบ Freundlich ได้ดีที่สุด โดยมีค่า R^2 เท่ากับ 0.985, 0.967, 0.996, 0.979 และ 0.998 สำหรับ Cd^{2+} , Pb^{2+} , Zn^{2+} , Cr^{3+} และ Ni^{2+} ตามลำดับ

โดยทั่วไปในน้ำชะมูลฝอยจะมีความเข้มข้นของโลหะหนักที่ไม่สูงมากนัก ซึ่งที่ความเข้มข้นของโลหะหนักต่ำๆ นี้ เมื่อนำไปพิตไอโซเทอม จะมีค่าความชัน (Slope) ที่มีลักษณะเป็นเส้นตรงหรือ Linear โดยเรียกค่า Slope นี้ว่า ค่าสัมประสิทธิ์พาร์ทิชัน (K_p) โดยค่า K_p และ Adsorption capacity ซึ่งได้คำนวณมาจากค่า q_{max} (q_{max} คือ มวลโลหะหนักที่ถูกดูดติดผิวสูงสุดต่อมวลของดินที่ดูดสารนั้นๆ) ได้แสดงไว้ในตารางที่ 4.4 พบว่า เบนโทไนต์มีความสามารถในการดูดซับดีกว่าดินเหนียวเกาะยอและดินลูกรังคอหงส์ ตามลำดับ โดยค่า K_p ของเบนโทไนต์ มีค่าอยู่ระหว่าง 200 – 2,700 L/kg ดินลูกรังคอหงส์ มีค่าอยู่ระหว่าง 70 – 600 L/kg ส่วนดินเหนียวเกาะยอ มีค่าอยู่ระหว่าง 200 – 2,800 L/kg

การเปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับโลหะหนักของดินทั้ง 3 ชนิด พิจารณาจาก Adsorption capacity แบ่งตามชนิดของการดูดซับ ได้แสดงไว้ในตารางที่ 4.6 โดยพบว่า เบนโทไนต์สามารถดูดโลหะหนักทั้ง 5 ชนิด อันได้แก่ Cd^{2+} , Pb^{2+} , Zn^{2+} , Cr^{3+}

และ Ni^{2+} มาติดที่ผิว ได้ดีกว่าดินเหนียวเกาะยอและดินลูกรังคอหงส์ ตามลำดับ โดยเมื่อพิจารณาลำดับการดูดซับโลหะหนักของดินทั้ง 3 ชนิด จากสมการที่ฟิตกับดิน ทั้ง 3 ชนิด ได้ดีที่สุด ดังภาพประกอบที่ 4.11 – 4.13 (ตารางที่ 4.6) พบว่า เบนโทไนต์สามารถดูด Cr^{3+} มาติดที่ผิว ได้ดีกว่า Pb^{2+} , Cd^{2+} , Zn^{2+} และ Ni^{2+} ตามลำดับ สำหรับดินลูกรังคอหงส์ สามารถดูด Cr^{3+} มาติดที่ผิว ได้ดีกว่า Pb^{2+} , Ni^{2+} , Zn^{2+} , และ Cd^{2+} ตามลำดับ และดินเหนียวเกาะยอ สามารถดูด Cr^{3+} มาติดที่ผิว ได้ดีกว่า Pb^{2+} , Cd^{2+} , Ni^{2+} และ Zn^{2+} ตามลำดับ

ตารางที่ 4.3 ค่าคงที่ของไอโซเทอมแบบ Freundlich

โลหะหนัก	เบนโทไนต์			ดินลูกรังคอหงส์			ดินเหนียวเกาะยอ		
	K_F (L/kg)	1/n	R^2	K_F (L/kg)	1/n	R^2	K_F (L/kg)	1/n	R^2
Cd^{2+}	2,230.158	0.456	0.692	147.707	0.621	0.985	510.270	0.501	0.992
Pb^{2+}	890.369	0.680	0.773	1,238.511	0.244	0.967	5,891.149	0.448	0.948
Zn^{2+}	471.931	0.739	0.790	141.938	0.545	0.996	840.040	0.438	0.989
Cr^{3+}	4,366.164	0.246	0.821	1,033.951	0.090	0.979	1,887.122	0.245	0.760
Ni^{2+}	3,451.437	0.233	0.981	199.986	0.333	0.998	314.087	0.593	0.991

ตารางที่ 4.4 ค่า K_p และ Adsorption capacity จากไอโซเทอมแบบเส้นตรง

โลหะหนัก	เบนโทไนต์		ดินลูกรังคอหงส์		ดินเหนียวเกาะยอ	
	K_p (L/kg)	Adsorption capacity (meq/100g)	K_p (L/kg)	Adsorption capacity (meq/100g)	K_p (L/kg)	Adsorption capacity (meq/100g)
Cd^{2+}	82.848	55.473	59.279	1.251	65.553	6.439
Pb^{2+}	64.596	81.591	19.264	4.200	801.962	21.055
Zn^{2+}	69.320	53.308	49.517	1.524	288.133	5.572
Cr^{3+}	170.039	88.841	43.134	8.188	58.408	30.190
Ni^{2+}	55.592	35.772	19.154	2.211	81.341	5.847

ตารางที่ 4.5 ค่าปริมาณสูงสุดของมวลโลหะหนักที่ถูกดูดซับต่อน้ำหนักของมวลดิน (X_m) และ Adsorption capacity จากไอโซเทอมแบบ Langmuir

โลหะหนัก	เบนโทไนต์			ดินลูกรังคอหงส์			ดินเหนียวเกาะยอ		
	X_m (mg/g)	Adsorption capacity (meq/100g)	R^2	X_m (mg/g)	Adsorption capacity (meq/100g)	R^2	X_m (mg/g)	Adsorption capacity (meq/100g)	R^2
Cd^{2+}	39.370	70.041	0.933	1.035	1.842	0.978	5.274	9.383	0.970
Pb^{2+}	106.383	102.657	0.955	4.305	4.154	0.999	25.126	24.246	0.997
Zn^{2+}	23.148	70.800	0.804	0.797	2.437	0.942	2.195	6.715	0.974
Cr^{3+}	15.848	91.097	0.999	1.661	9.549	0.996	5.333	30.657	0.998
Ni^{2+}	11.834	40.205	0.995	0.748	2.540	0.986	2.050	6.966	0.960

ตารางที่ 4.6 การเปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับโลหะหนักของเบนโทไนต์, ดินลูกรังคอหงส์ และดินเหนียวเกาะยอ

ชนิดของการดูดซับ	ลำดับของการดูดซับ
ความสามารถในการดูดซับ Cd^{2+}	เบนโทไนต์ > ดินเหนียวเกาะยอ > ดินลูกรังคอหงส์
ความสามารถในการดูดซับ Pb^{2+}	เบนโทไนต์ > ดินเหนียวเกาะยอ > ดินลูกรังคอหงส์
ความสามารถในการดูดซับ Zn^{2+}	เบนโทไนต์ > ดินเหนียวเกาะยอ > ดินลูกรังคอหงส์
ความสามารถในการดูดซับ Cr^{3+}	เบนโทไนต์ > ดินเหนียวเกาะยอ > ดินลูกรังคอหงส์
ความสามารถในการดูดซับ Ni^{2+}	เบนโทไนต์ > ดินเหนียวเกาะยอ > ดินลูกรังคอหงส์
การดูดซับของเบนโทไนต์	$Cr^{3+} > Pb^{2+} > Cd^{2+} > Zn^{2+} > Ni^{2+}$
การดูดซับของดินลูกรังคอหงส์	$Cr^{3+} > Pb^{2+} > Ni^{2+} > Zn^{2+} > Cd^{2+}$
การดูดซับของดินเหนียวเกาะยอ	$Cr^{3+} > Pb^{2+} > Cd^{2+} > Ni^{2+} > Zn^{2+}$

4.5 ผลการหาค่าพารามิเตอร์การเคลื่อนที่

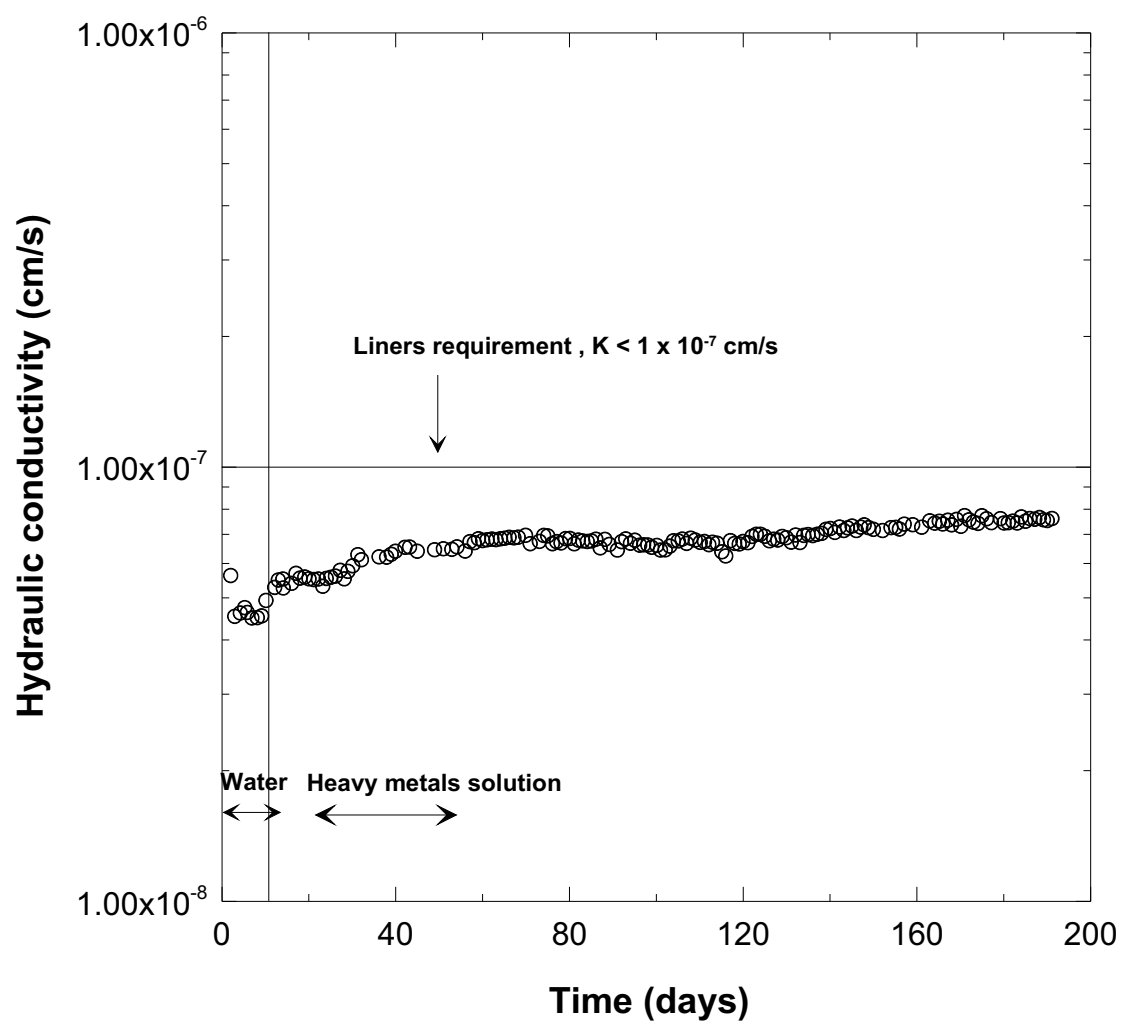
4.5.1 ผลการหาค่าพารามิเตอร์การเคลื่อนที่ของดินลูกรังคองหังจาก Breakthrough curves

การทดสอบหาค่าพารามิเตอร์การเคลื่อนที่จาก Breakthrough curves ซึ่งทำได้โดยนำค่าความเข้มข้นของสารละลายโลหะหนักของ Effluent เทียบกับเวลา ไปพิดกับสมการที่ 2.11 ผลการทดสอบ พบว่า การทดสอบโดยวิธีนี้สามารถทำได้กับดินลูกรังคองหังเท่านั้น การทดสอบกับทรายผสมเบนโทไนต์และดินเหนียวเกาะยอ ไม่ประสบผลสำเร็จ ทั้งนี้เนื่องจากไม่พบ Breakthrough curves ของสารละลายโลหะหนักทุกชนิด หลังจากเวลาในการทดสอบผ่านไปประมาณ 380 วัน การที่ไม่พบ Breakthrough curves ของโลหะหนักในการทดสอบกับทรายผสมเบนโทไนต์และดินเหนียวเกาะยอนี้ เนื่องจากดินทั้ง 2 ชนิดนี้มีค่า K ที่ต่ำ (ดังแสดงให้เห็นในหัวข้อต่อไป) ทำให้ไม่สามารถเห็น Breakthrough curves ตลอดเวลาในการทดสอบ การทดสอบหาค่าพารามิเตอร์การเคลื่อนที่ของทรายผสมเบนโทไนต์และดินเหนียวเกาะยอ จึงเปลี่ยนไปทำโดยการหา Concentration profile ในดินโดยวิธีการสกัดหาความเข้มข้นในดินด้วยวิธีการย่อยด้วยกรด ดังแสดงในหัวข้อ 4.5.2

ผลการทดสอบแบบสดมภ์ สามารถแสดงได้เป็น 2 ส่วน คือ 1) ค่า K ของดินลูกรังคองหังเทียบกับเวลา และ 2) ค่าพารามิเตอร์การเคลื่อนที่ที่หาจากการพิด Breakthrough curves ดังมีรายละเอียดดังนี้

4.5.1.1 ค่า K ของดินลูกรังคองหังเมื่อทดสอบด้วย Mixed solution

ความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า K กับเวลาดินลูกรังคองหังเมื่อทดสอบด้วย Mixed solution ได้แสดงไว้ในภาพประกอบที่ 4.14 การทดสอบเริ่มต้นด้วยการทดสอบดินลูกรังคองหังกับน้ำกลั่น ใช้ความดันสูงสุดเท่ากับ 0.5 ksc ($i = 88.65$) แล้วจึงเปลี่ยนมาใช้สารละลาย Mixed solution โดยใช้เวลาในการทดสอบทั้งหมดประมาณ 191 วัน พบว่า ค่า K เริ่มต้นเมื่อทดสอบด้วยน้ำกลั่นมีค่าอยู่ในช่วง $4.30 - 5.0 \times 10^{-8}$ cm/s หลังจากเปลี่ยนมาทดสอบกับสารละลาย Mixed solution ในวันที่ 14 ของการทดสอบ พบว่า ค่า K เพิ่มขึ้นเล็กน้อย ตลอดการทดสอบประมาณ 191 วัน โดยมีค่า K เฉลี่ยเท่ากับ 7.581×10^{-8} cm/s ซึ่งยังต่ำกว่า 1×10^{-7} cm/s จนจบการทดสอบ



ภาพประกอบที่ 4.14 ความสัมพันธ์ของค่า K กับเวลาของดินลูกรังคองหังส์
เมื่อทดสอบกับ Mixed solution

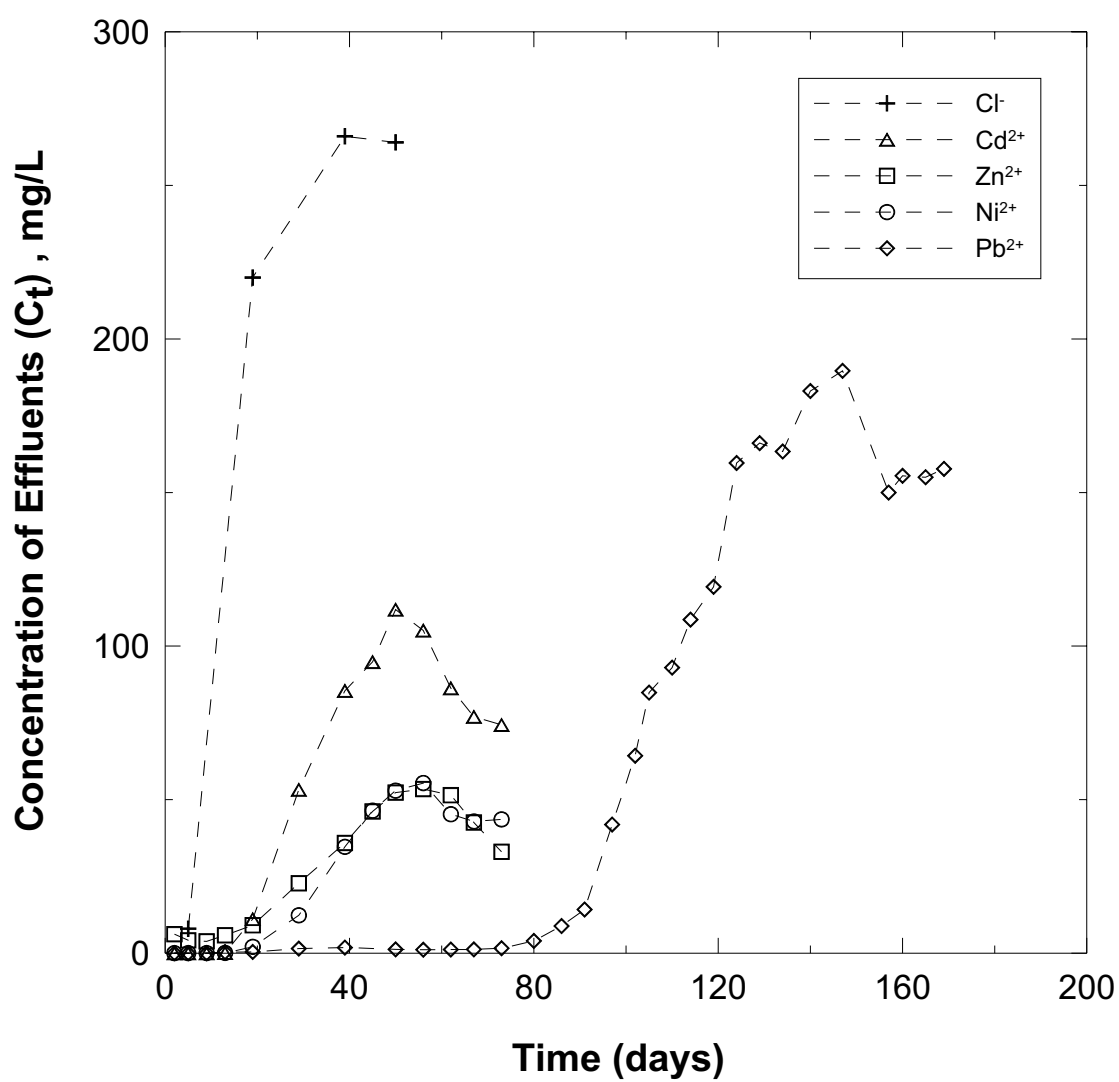
4.5.1.2 พารามิเตอร์การเคลื่อนที่ของดินลูกรังคองหงส์

Breakthrough curves ของดินลูกรังคองหงส์ที่มี Influent เป็นสารละลาย Mixed solution ที่ประกอบด้วย Cd^{2+} ($C_0 = 0.001 \text{ M}$ หรือ 112.42 mg/L), Pb^{2+} ($C_0 = 0.001 \text{ M}$ หรือ 207.26 mg/L), Zn^{2+} ($C_0 = 0.001 \text{ M}$ หรือ 65.39 mg/L), Ni^{2+} ($C_0 = 0.001 \text{ M}$ หรือ 58.87 mg/L) และ Cl^- ($C_0 = 283.33 \text{ mg/L}$) ได้แสดงไว้ในภาพประกอบที่ 4.15 จะเห็นได้ว่า Cl^- ซึ่งเป็นสารประเภท Non – Reactive ($R = 1$) จะมี Breakthrough ก่อน ตามด้วย Zn^{2+} , Cd^{2+} , Ni^{2+} และ Pb^{2+} ตามลำดับ ซึ่งสารละลายโลหะหนักทั้ง 4 ชนิดนี้ มีประจุเป็นบวก (Reactive) จะมีค่า $R > 1$ ดังนั้นจึง Breakthrough ออกมาหลัง Cl^-

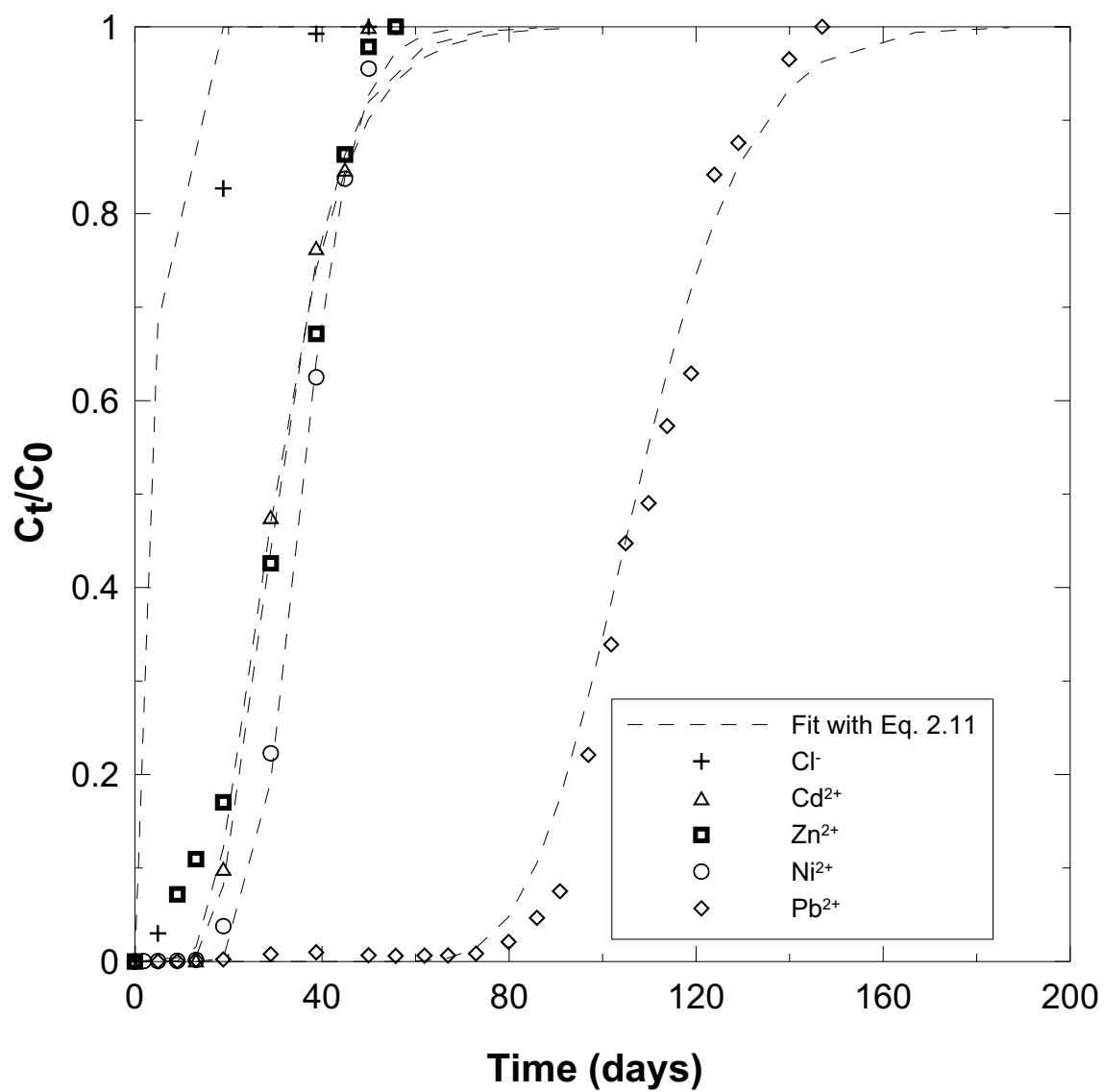
พารามิเตอร์การเคลื่อนที่ (D และ R) ของดินลูกรังคองหงส์ ถูกหาจากการ拟合 สมการที่ 2.11 กับผลการทดสอบในรูปของอัตราส่วนความเข้มข้นของ Effluent ต่อความเข้มข้นเริ่มต้น (C/C_0) เทียบกับเวลา ดังแสดงในภาพประกอบที่ 4.16 โดยการ Trial and error ค่า D และ R ไปจนกว่าค่า C/C_0 ที่ได้จากสมการที่ 2.11 สอดคล้องกับค่า C/C_0 จากผลการทดสอบ ความสอดคล้องดังกล่าวแสดงไว้ในรูปของค่า MSE ค่าพารามิเตอร์การเคลื่อนที่ D และ R ที่ได้ถูกแสดงไว้ในตารางที่ 4.7

ค่า R ที่แสดงไว้ในตารางที่ 4.7 สอดคล้องกับ Breakthrough curves ในภาพประกอบ 4.15 กล่าวคือ Cl^- ซึ่ง Breakthrough ออกมาก่อน มีค่าน้อยที่สุด ($R = 1$) สำหรับสารละลายโลหะหนักที่ Breakthrough ออกมาทีหลัง ก็มีค่า R เพิ่มขึ้น Zn^{2+} ($R = 6.55$), Cd^{2+} ($R = 7.00$), Ni^{2+} ($R = 7.60$) และ Pb^{2+} ($R = 36.00$) ตามลำดับ

ค่า D ของสารละลายโลหะหนักทั้ง 4 ชนิด มีค่าใกล้เคียงกันในช่วง $2.00 \times 10^{-6} - 6.00 \times 10^{-6} \text{ cm}^2/\text{s}$ สำหรับการทดสอบกับดินลูกรังคองหงส์ ส่วนดินชนิดอื่นๆ ค่า D ก็อาจจะเปลี่ยนแปลงไปได้ เช่น ค่า D ของดินเหนียวกรุงเทพฯ เท่ากับ $5.00 \times 10^{-6} \text{ cm}^2/\text{s}$ (Amatya and Takemura, 2002), ค่า D ของ Kirby Lake Till เท่ากับ $4.5 \times 10^{-5} \text{ cm}^2/\text{s}$ (Kim et al., 1997), ค่า D ของดินเหนียวลัฟกิน (Lufkin clay) เท่ากับ $1.7 \times 10^{-6} - 4.7 \times 10^{-6} \text{ cm}^2/\text{s}$ (Shackelford, 1990) และ ค่า D ของ Illite clay เท่ากับ $3.08 \times 10^{-7} - 103 \times 10^{-7} \text{ cm}^2/\text{s}$ (Tanchuling et al., 2003)



ภาพประกอบที่ 4.15 ความเข้มข้นของสุดท้ายของ Effluents จากดินลูกรังคอหงส์
เมื่อทดสอบด้วย Mixed solution



ภาพประกอบที่ 4.16 ผลการเปรียบเทียบ Breakthrough curve จากการหา C_t/C_0 จากการทดสอบ และการคำนวณของดินลูกรังคองหส์เมื่อทดสอบด้วย Mixed solution

ตารางที่ 4.7 ผลค่า D, R และ n จาก Breakthrough curve (C/C_0) ของดินลูกรังคองหังส์เมื่อทดสอบด้วย Mixed solution

โลหะหนัก	D (cm ² /s)	R	n	MSE
Cl ⁻	1.00×10^{-5}	1.00	0.34	0.113814
Zn ²⁺	6.64×10^{-6}	6.55	0.34	0.003962
Cd ²⁺	5.01×10^{-6}	7.00	0.34	0.001423
Ni ²⁺	2.16×10^{-6}	7.60	0.34	0.000392
Pb ²⁺	1.94×10^{-5}	36.00	0.34	0.001712

4.5.2 ค่าพารามิเตอร์การเคลื่อนที่จาก Concentration Profile

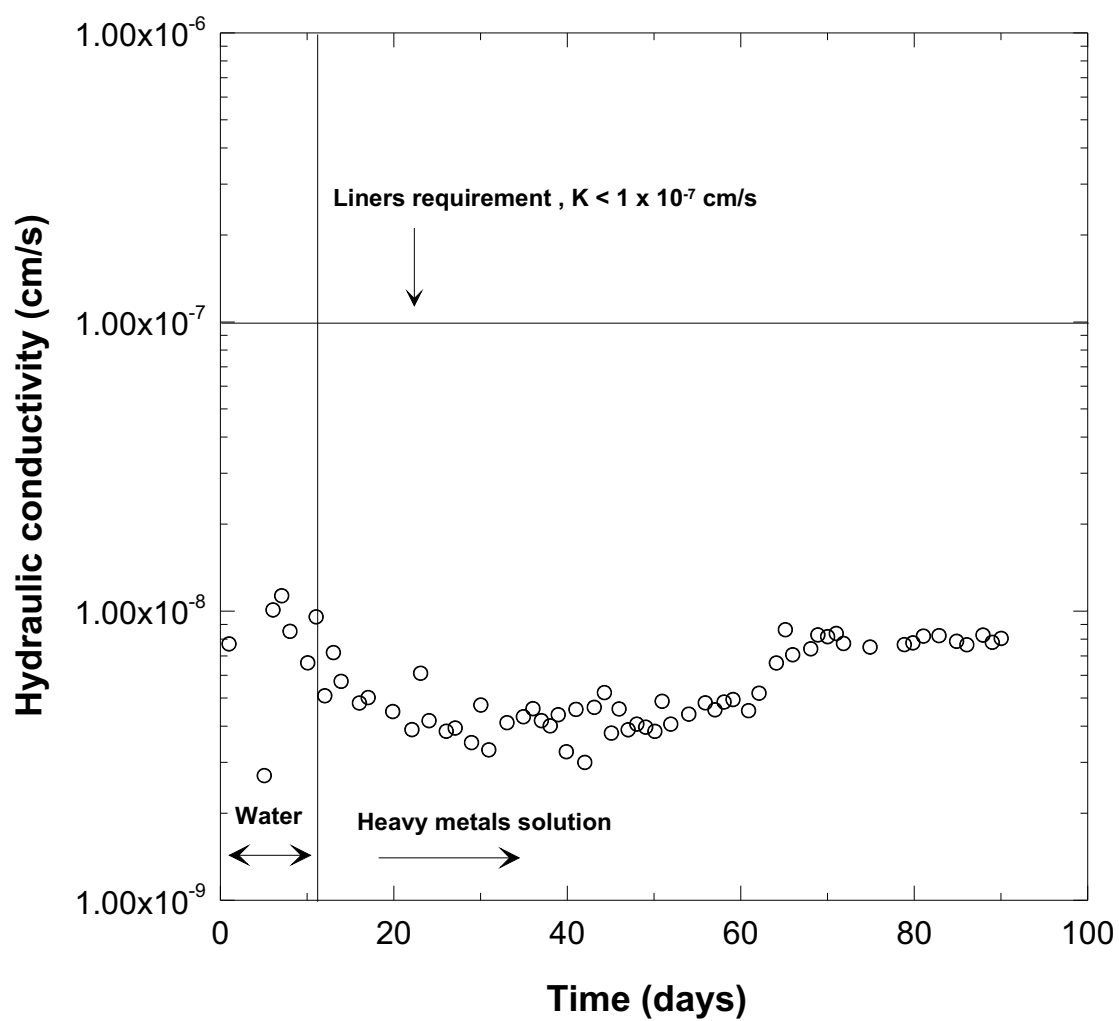
ผลการทดสอบแบบสดมภ์ในวิธีนี้ สามารถแบ่งได้เป็น 2 ส่วน คือ 1) ค่า K ของดินเทียบกับเวลา เมื่อมีสารละลายโลหะหนักไหลผ่าน และ 2) ค่าพารามิเตอร์การเคลื่อนที่ที่คำนวณได้จาก Concentration profile ของโลหะหนักที่ถูกดูดติดผิวโดยดินที่ระดับความลึกแตกต่างกัน มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

4.5.2.1 ค่า K ของดินตัวอย่าง

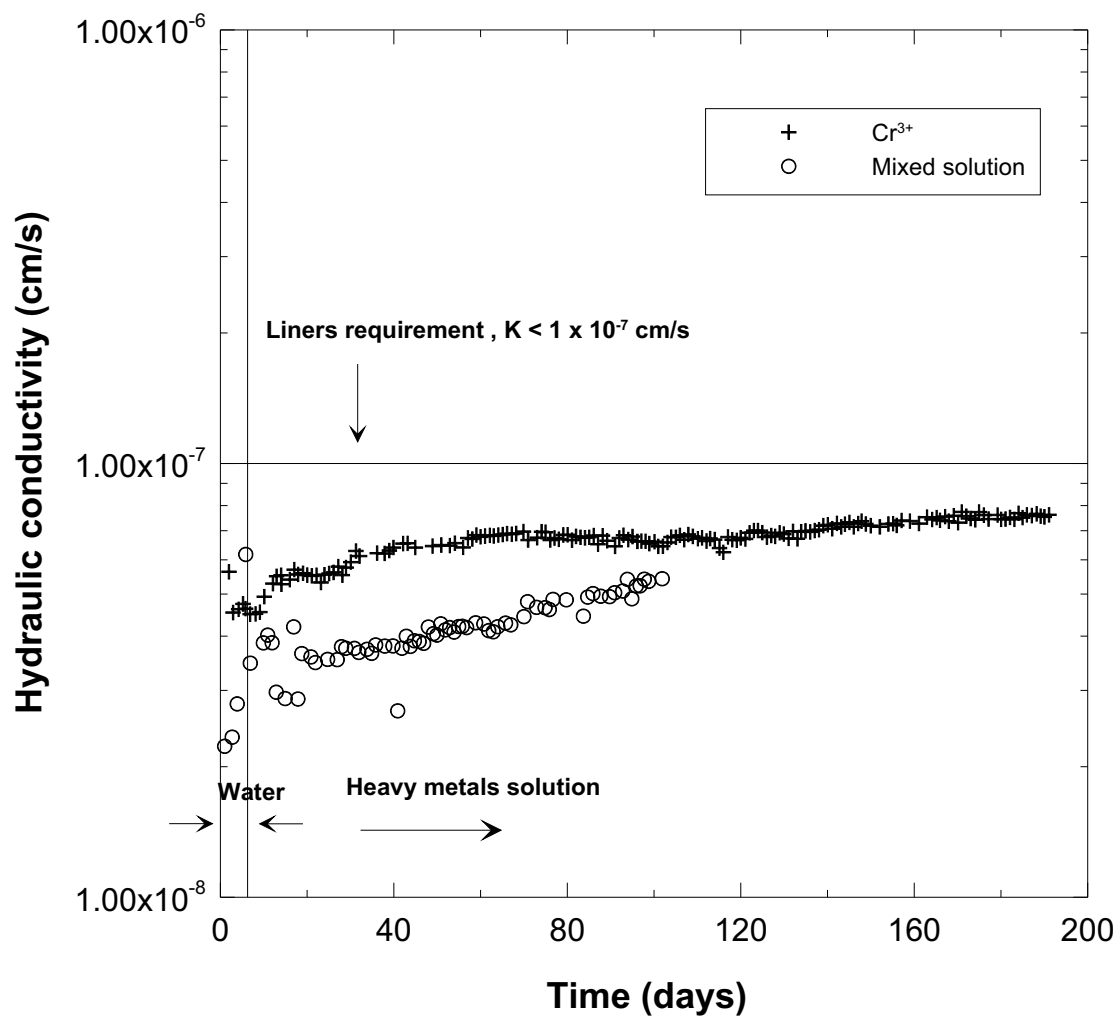
ความสัมพันธ์ของค่า K กับเวลาของทรายผสมเบนโทไนต์ที่ 5 % เมื่อทดสอบด้วยสารละลายโลหะหนัก Mixed solution ได้แสดงไว้ในภาพประกอบที่ 4.17 โดยเมื่อเริ่มต้นการทดสอบ ค่า K เฉลี่ยของทรายผสมเบนโทไนต์เมื่อทดสอบกับน้ำกลั่น มีค่าประมาณ 7.00×10^{-9} cm/s และหลังจากเปลี่ยนมาทดสอบด้วยสารละลายโลหะหนัก Mixed solution ในวันที่ 12 ของการทดสอบ พบว่า K มีค่าอยู่ในช่วง 5.00×10^{-9} - 9.00×10^{-9} cm/s จนถึงวันที่ 65 ของการทดสอบ โดยหลังจากวันที่ 65 พบว่า Effluent ในภาชนะเก็บน้ำ มีสีขุ่น โดยพบว่ามีเบนโทไนต์รั่วจากทรายผสมเบนโทไนต์ ผ่านวัสดุกรองหรือผ่านรอยต่อระหว่างดินตัวอย่างกับวัสดุกันซึมในระบบในส่วนที่ไม่สมบูรณ์ไหลออกมา หลังจากนั้นอีก 2 – 3 วัน พบว่า Effluent มีลักษณะใสเหมือนเดิม ผลการรั่วของเบนโทไนต์นี้ แสดงให้เห็นว่า ทรายผสมเบนโทไนต์ มีคุณสมบัติที่เรียกว่า “Self – healing” ทำให้เมื่อทรายผสมตัวอย่างรั่วแล้วสามารถปรับปรุงตัวเองให้มีค่า K คงที่อีกครั้งหนึ่ง โดยสามารถอธิบายในทางกายภาพได้ว่า มีเบนโทไนต์บางส่วนไปอุดรูรั่วของเบนโทไนต์ที่ไหลไปกับ Effluent จึงทำให้ค่า K กลับมาคงที่อีกครั้งหนึ่ง

ความสัมพันธ์ระหว่างค่า K กับเวลา ของดินลูกรังคอหงส์ เมื่อทดสอบด้วยสารละลาย Cr^{3+} เข้มข้น 0.001 M กับสารละลาย Mixed solution ได้แสดงไว้ในภาพประกอบ 4.18 โดยเมื่อเริ่มต้นการทดสอบ ค่า K เฉลี่ยของดินลูกรังคอหงส์ เมื่อทดสอบกับน้ำกลั่น มีค่าอยู่ในช่วง $4.00 \times 10^{-8} - 5.00 \times 10^{-8} \text{ cm/s}$ และหลังจากเปลี่ยนมาทดสอบด้วยสารละลาย Cr^{3+} เข้มข้น 0.001 M ในวันที่ 15 ของการทดสอบ พบว่า K มีค่าแปรเปลี่ยนเล็กน้อยตลอดการทดสอบ โดยค่า K มีค่าเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องจนถึงวันที่ 116 ของการทดสอบ พบว่า K มีค่าอยู่ที่ประมาณ $7.00 \times 10^{-8} \text{ cm/s}$ จนกระทั่งจบการทดสอบประมาณ 450 วัน สำหรับการเปลี่ยนมาทดสอบด้วยสารละลาย Mixed solution ของดินลูกรังคอหงส์ (ภาพประกอบที่ 4.18) พบว่า มีค่าประมาณ $5.00 \times 10^{-8} \text{ cm/s}$ ตลอดระยะเวลาการทดสอบประมาณ 100 วัน

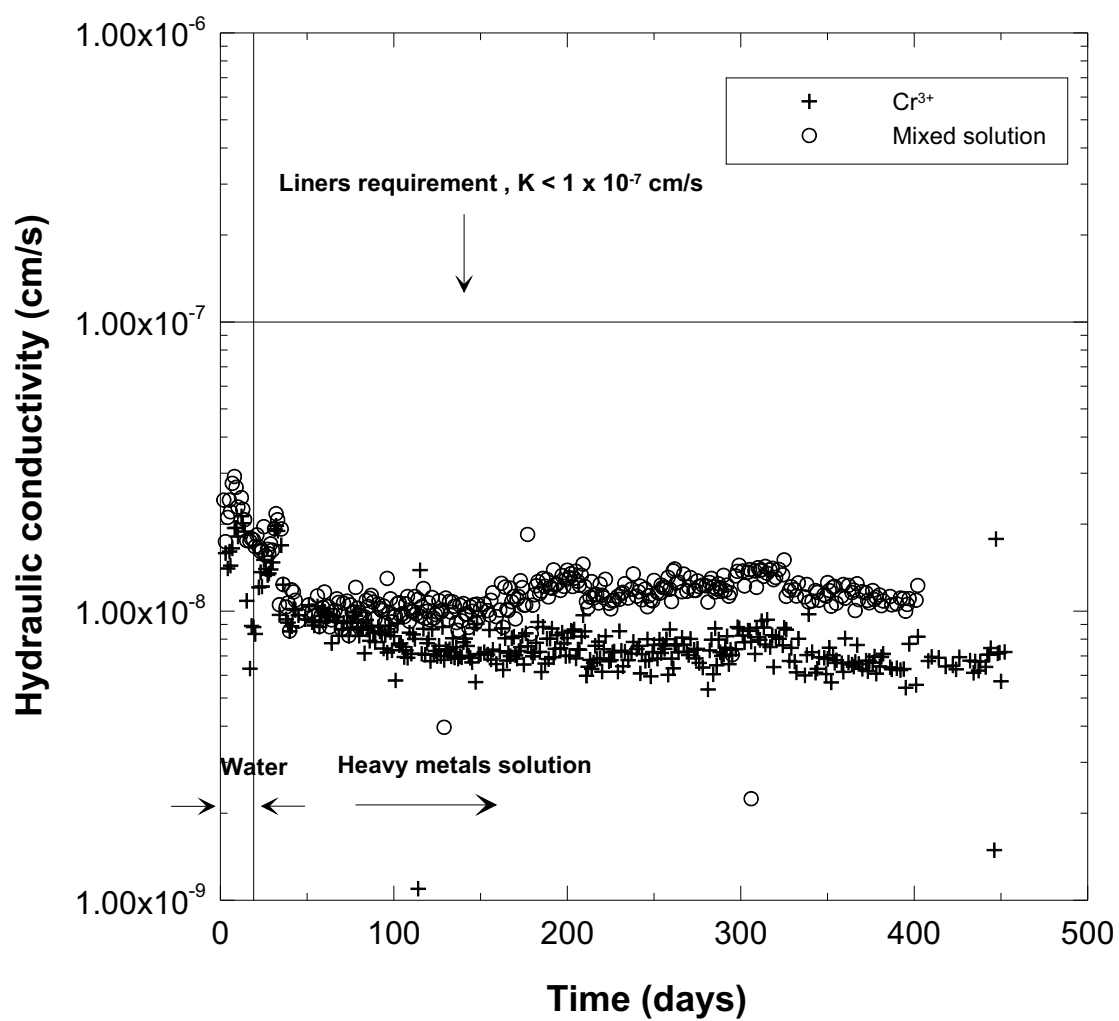
ความสัมพันธ์ระหว่างค่า K กับเวลา ของดินเหนียวเกาะยอ เมื่อทดสอบด้วยสารละลาย Cr^{3+} เข้มข้น 0.001 M กับสารละลาย Mixed solution ได้แสดงไว้ในภาพประกอบที่ 4.19 โดยเมื่อเริ่มต้นการทดสอบ ค่า K เฉลี่ยของดินเหนียวเกาะยอเมื่อทดสอบด้วยน้ำกลั่น มีค่าอยู่ในช่วง $1.50 \times 10^{-8} - 3.00 \times 10^{-8} \text{ cm/s}$ และหลังจากเปลี่ยนมาทดสอบกับสารละลาย Cr^{3+} เข้มข้น 0.001 M และสารละลาย Mixed solution ในวันที่ 14 ของการทดสอบ พบว่า K ของดินเหนียวเกาะยอ เมื่อทดสอบด้วยสารละลาย Cr^{3+} เข้มข้น 0.001 M มีค่าอยู่ในช่วง $6.00 \times 10^{-9} - 8.00 \times 10^{-9} \text{ cm/s}$ ตลอดการทดสอบประมาณ 450 วัน ส่วน K ของดินเหนียวเกาะยอเมื่อทดสอบด้วยสารละลาย Mixed solution มีค่าคงที่อยู่ที่ประมาณ $1 \times 10^{-8} \text{ cm/s}$ ตลอดการทดสอบ 400 วัน ทั้งนี้ค่า K ของดินทั้ง 3 ชนิดในทุกชุดการทดสอบมีค่าต่ำกว่า $1 \times 10^{-7} \text{ cm/s}$ ซึ่งจัดอยู่ในขอบเขตมาตรฐานของชั้นกั้นซึม



ภาพประกอบที่ 4.17 ความสัมพันธ์ของค่า K กับเวลาของทรายผสมเบนโทไนต์ที่ 5 %



ภาพประกอบที่ 4.18 ความสัมพันธ์ของค่า K กับเวลาของดินลูกรังคอหงส์



ภาพประกอบที่ 4.19 ความสัมพันธ์ของค่า K กับเวลาของดินเหนียวเกาะยอ

4.5.2.2 พารามิเตอร์การเคลื่อนที่จาก Concentration profile

Concentration profile ในรูปของอัตราส่วนระหว่างความเข้มข้นของโลหะหนักที่ถูกดูดซับในดิน (C_s) ต่อความเข้มข้นสูงสุดของโลหะหนักที่ถูกดูดซับในดิน (C_{sm}) ของโลหะหนักในทรายผสมเบนโทไนต์ที่ 5% และดินเหนียวเกาะยอ ได้แสดงไว้ในภาพประกอบที่ 4.20 และ 4.21 ตามลำดับ พบว่า ค่า C_s/C_{sm} มีค่าเท่ากับ 1.0 บริเวณดินชั้นแรก (ลึกประมาณ 0.7 cm) กล่าวคือ ดินนี้ได้ดูดซับโลหะหนักมาติดผิวสูงสุด ตามความสามารถของดินแล้ว (สูงสุดตามค่า Cation exchange capacity) สำหรับดินที่ลึกลงไป ค่า C_s/C_{sm} จะลดลงเรื่อยๆ เนื่องจากดินยังดูดซับโลหะหนักที่เคลื่อนที่ผ่านมาได้ไม่เต็มประสิทธิภาพ กล่าวคือ ดินในความลึกดังกล่าวนี้ยังสามารถห้วงสารละลายได้อีก สำหรับดินชั้นล่างสุด คือ ดินชั้นที่ 6 (ความลึก 5.7 cm) มี C_s/C_{sm} เท่ากับ 0 แสดงให้เห็นว่ายังไม่มีสารละลายโลหะหนักชนิดใด เคลื่อนที่มาถึงความลึกนี้เลย ในช่วงของการทดสอบ

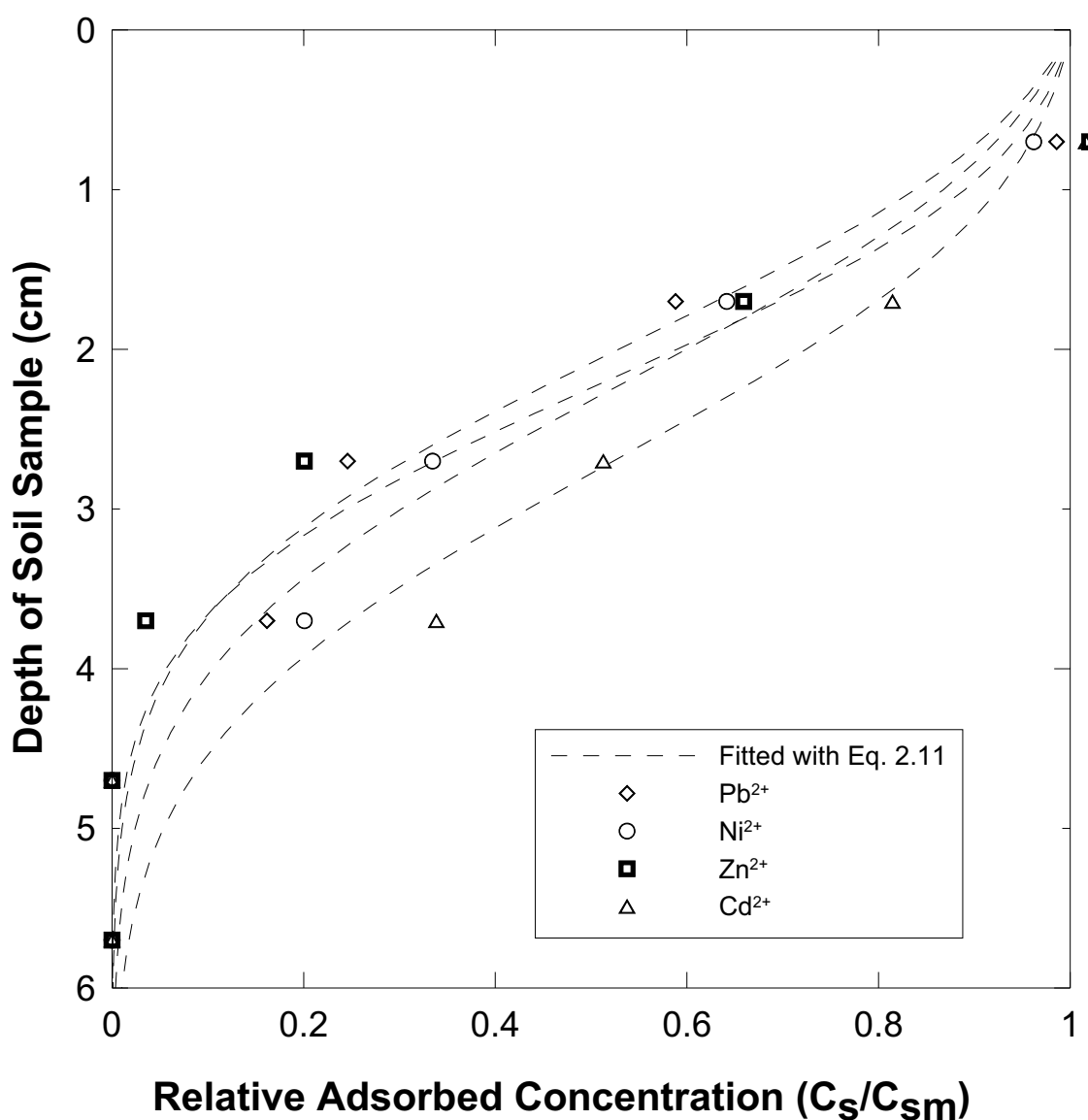
Concentration profile ในภาพประกอบที่ 4.20 และ 4.21 สามารถบอกถึงความสามารถในการห้วงสารละลายที่เคลื่อนที่ผ่านทรายผสมเบนโทไนต์และดินเหนียวเกาะยอ โดยมีหลักการว่า สำหรับที่เวลาในการเคลื่อนที่เท่ากัน สารละลายที่มี Front (C_s/C_{sm} สูง) ที่ระดับลึกกว่า จะถูกห้วงโดยดินน้อยกว่า ลำดับการห้วงสารละลายโลหะหนักของทรายผสมเบนโทไนต์จากน้อยไปมาก ได้แก่ Cd^{2+} , Zn^{2+} , Ni^{2+} , และ Pb^{2+} สำหรับลำดับการห้วงสารละลายโลหะหนักของดินเหนียวเกาะยอจากน้อยไปมาก ได้แก่ Cd^{2+} , Zn^{2+} , Ni^{2+} , Pb^{2+} และ Cr^{3+}

ค่าพารามิเตอร์การเคลื่อนที่ของสารละลายโลหะหนัก (R และ D) เมื่อเคลื่อนที่ผ่านทรายผสมเบนโทไนต์และดินเหนียวเกาะยอ ซึ่งคำนวณโดยพล็อต Concentration profile ในภาพประกอบที่ 4.20 และ 4.21 กับสมการที่ 2.11 โดยวิธี Trial and error ตามรายละเอียดที่แสดงไว้ในหัวข้อที่ 3.5.3 ค่าพารามิเตอร์ที่ได้ ได้แสดงไว้ในตารางที่ 4.8 โดย Concentration profile ได้จากการ plot โดยใช้ค่าพารามิเตอร์การเคลื่อนที่ในตารางที่ 4.8 และสมการที่ 2.11 ได้แสดงไว้เป็นเส้นประควบคู่กับ Concentration profile จากผลการทดสอบในภาพประกอบที่ 4.20 และ 4.21

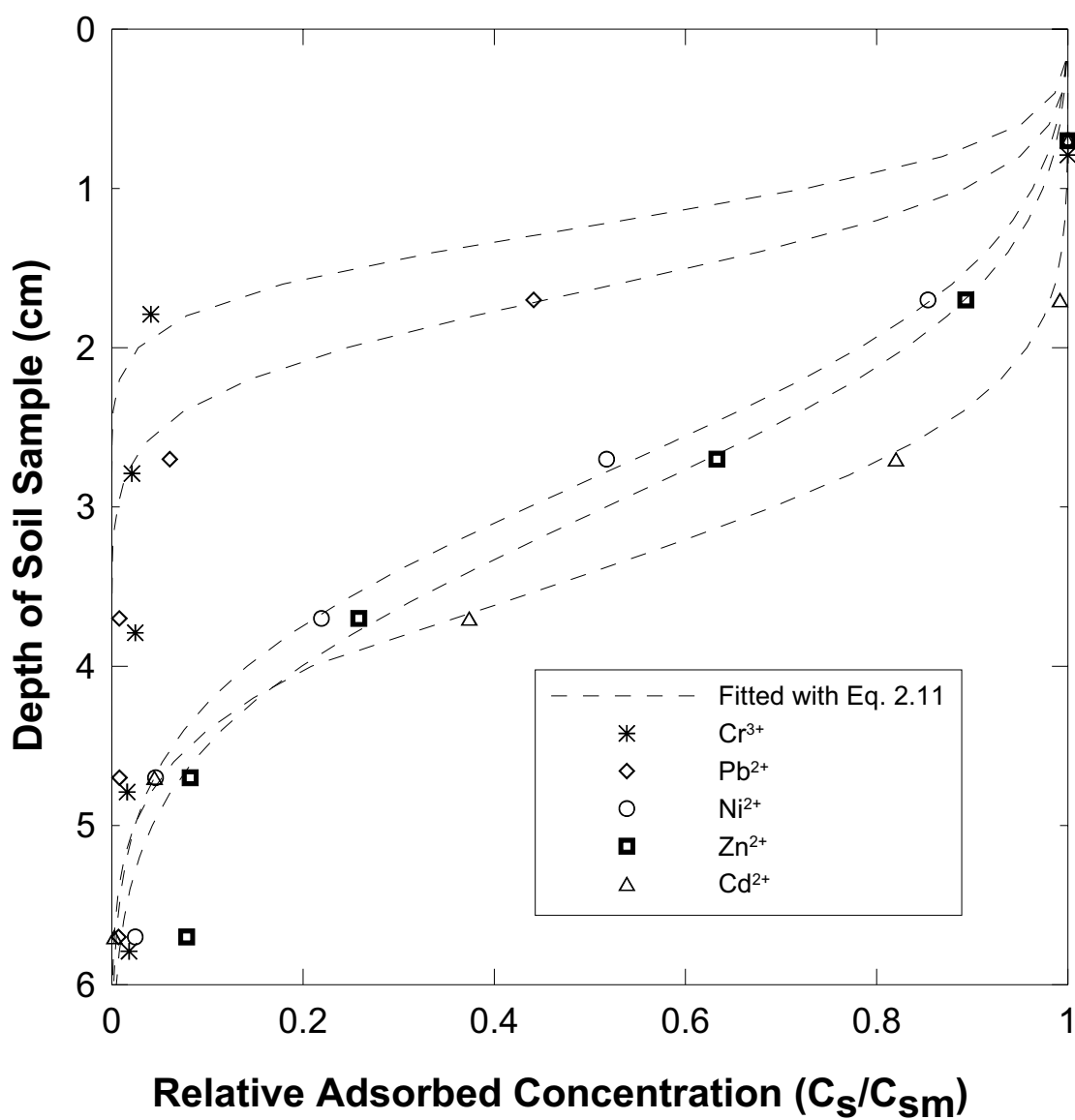
ความสามารถในการห้วงโลหะหนักของทรายผสมเบนโทไนต์ สามารถแสดงได้ในรูปของค่า R ในตารางที่ 4.8 โดยลำดับการถูกห้วงจากน้อย (ค่า R น้อย) ไปมาก (ค่า R มาก) ได้แก่ Cd^{2+} , Zn^{2+} , Ni^{2+} , และ Pb^{2+} ตามลำดับ ส่วนของดินเหนียวเกาะยอ มีลำดับการห้วงจากน้อยไปมาก ได้แก่ Cd^{2+} , Zn^{2+} , Ni^{2+} , Pb^{2+} และ Cr^{3+} ตามลำดับ ซึ่งผลของค่า R ที่ได้ ก็สอดคล้องกับ Adsorption capacity (ตารางที่ 4.4 และ 4.5) ซึ่งได้จากการทดสอบแบบแบทช์ ซึ่งจะเห็นได้ว่า เบนโทไนต์ ดินลูกรังคอหงส์และดินเหนียวเกาะยอ มี Adsorption capacity ของ Cr^{3+} มากกว่า Pb^{2+} ดินทั้ง 3 ชนิดจึงสามารถห้วง Cr^{3+} ไว้ได้นานกว่า Pb^{2+} ลำดับการถูกห้วงของ Cr^{3+} จึงมีมากกว่า

Pb^{2+} ดังนั้นสำหรับดินที่มีค่า Sorption capacity ของโลหะหนักที่มากกว่า จะหน่วงโลหะหนักชนิดนั้นไว้ได้นานกว่า สำหรับ Sorption capacity ของ Cd^{2+} , Zn^{2+} และ Ni^{2+} ในดินทั้ง 3 ชนิดก็จัดว่ามีค่าใกล้เคียงกัน ลำดับการถูกหน่วงของโลหะหนักจึงใกล้เคียงกันด้วย

ค่า D ของทรายผสมเบนโทไนต์และดินเหนียวเกาะยอ มีค่าอยู่ในช่วง $10^{-5} \text{ cm}^2/\text{s}$ และ $10^{-7} \text{ cm}^2/\text{s}$ ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าการเคลื่อนที่ของโลหะหนัก โดยการแพร่กระจายในระดับโมเลกุลของทรายผสมเบนโทไนต์มากกว่าในดินเหนียวเกาะยอ



ภาพประกอบที่ 4.20 Concentration profile ของสารละลายโลหะหนักในทรายผสมเบนโทไนต์ที่ 5 % ที่เวลา 80 วัน



ภาพประกอบที่ 4.21 Concentration profile ของสารละลายโลหะหนักในดินเหนียวเกาะยอที่เวลา 440 วันสำหรับทดสอบ Cr^{3+} และ 388 วันสำหรับทดสอบ Cd^{2+} , Ni^{2+} , Pb^{2+} และ Zn^{2+}

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	สำนักงานสิ่งแวดล้อม 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 อ้างอิงใน ไพฑูรย์ พรหมเทศ, 2545)								
	เทศบาลนครนครราชสีมาใหญ่ 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

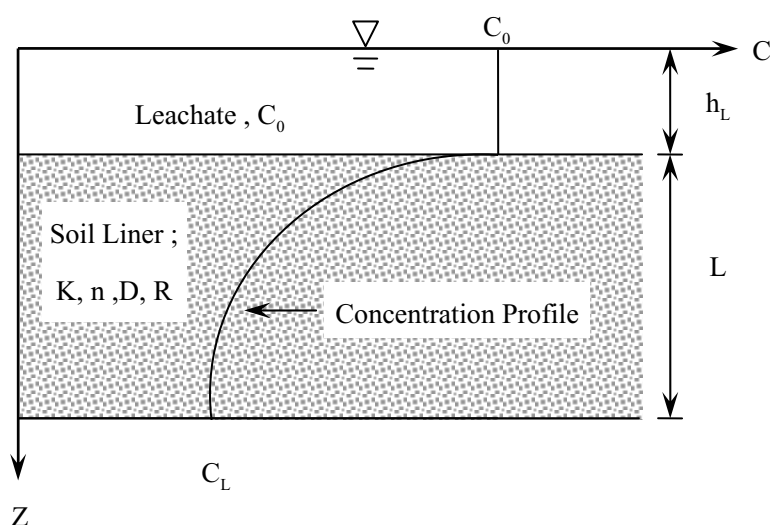
เมื่อค่า D และ R เป็นพารามิเตอร์การเคลื่อนที่ของสารละลายโลหะหนักในดินที่ได้จากบทที่ 4 , v_s คือ ความเร็วของการไหลซึม มีค่าเท่ากับ $\frac{Ki}{n}$, i คือ ความชันทางชลศาสตร์ มีค่าเท่ากับ $\frac{h_L}{(h_L + L)}$ โดย h_L คือ ความสูงของน้ำชะมูลฝอยหรือสารละลายโลหะหนักเหนือชั้นกันซึมในที่นี้ให้ใช้ค่าเท่ากับ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



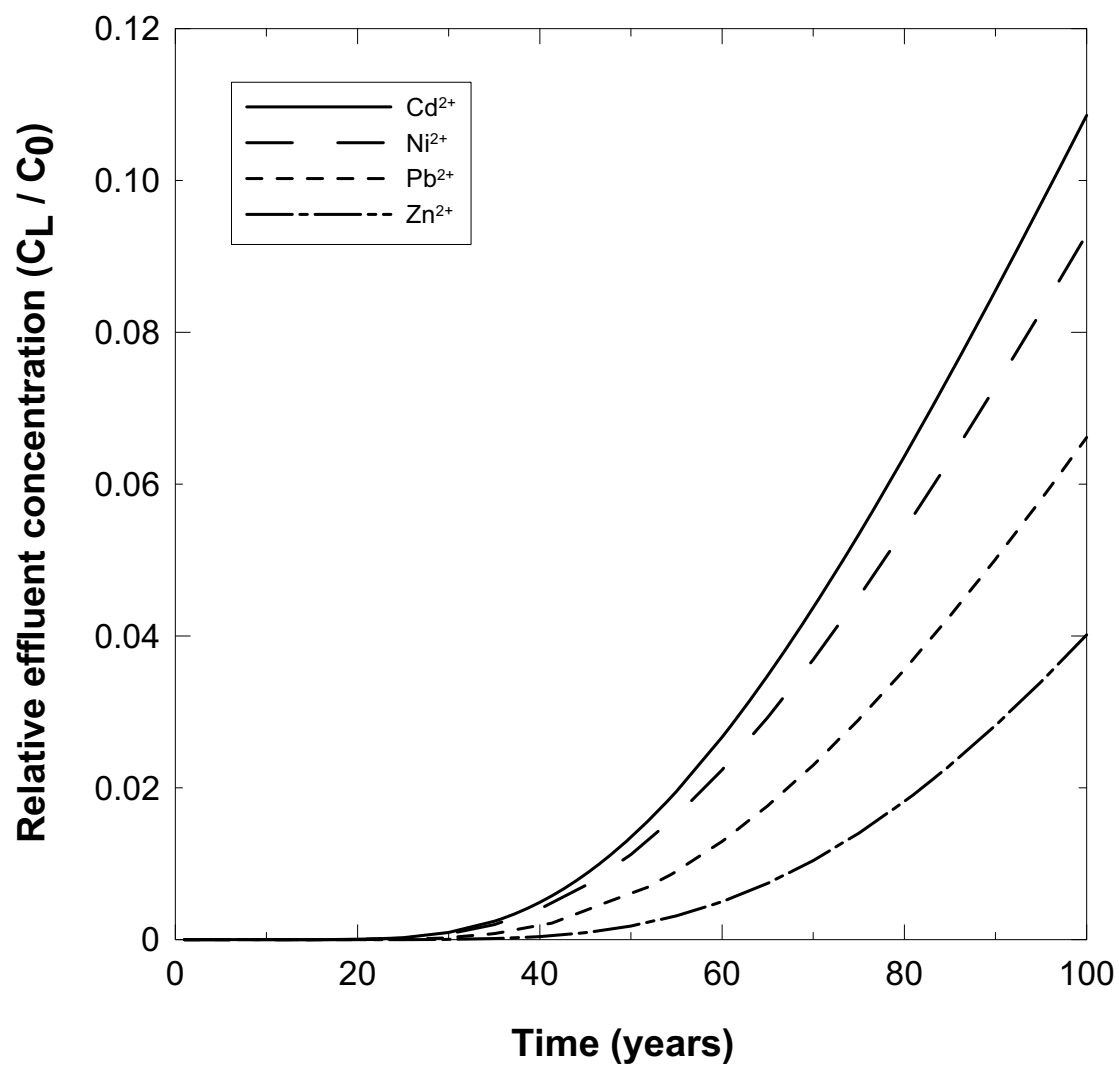
ภาพประกอบที่ 5.1 ชั้นกันซึม

5.2.2 ผลการวิเคราะห์ความหนาของชั้นกันซึม

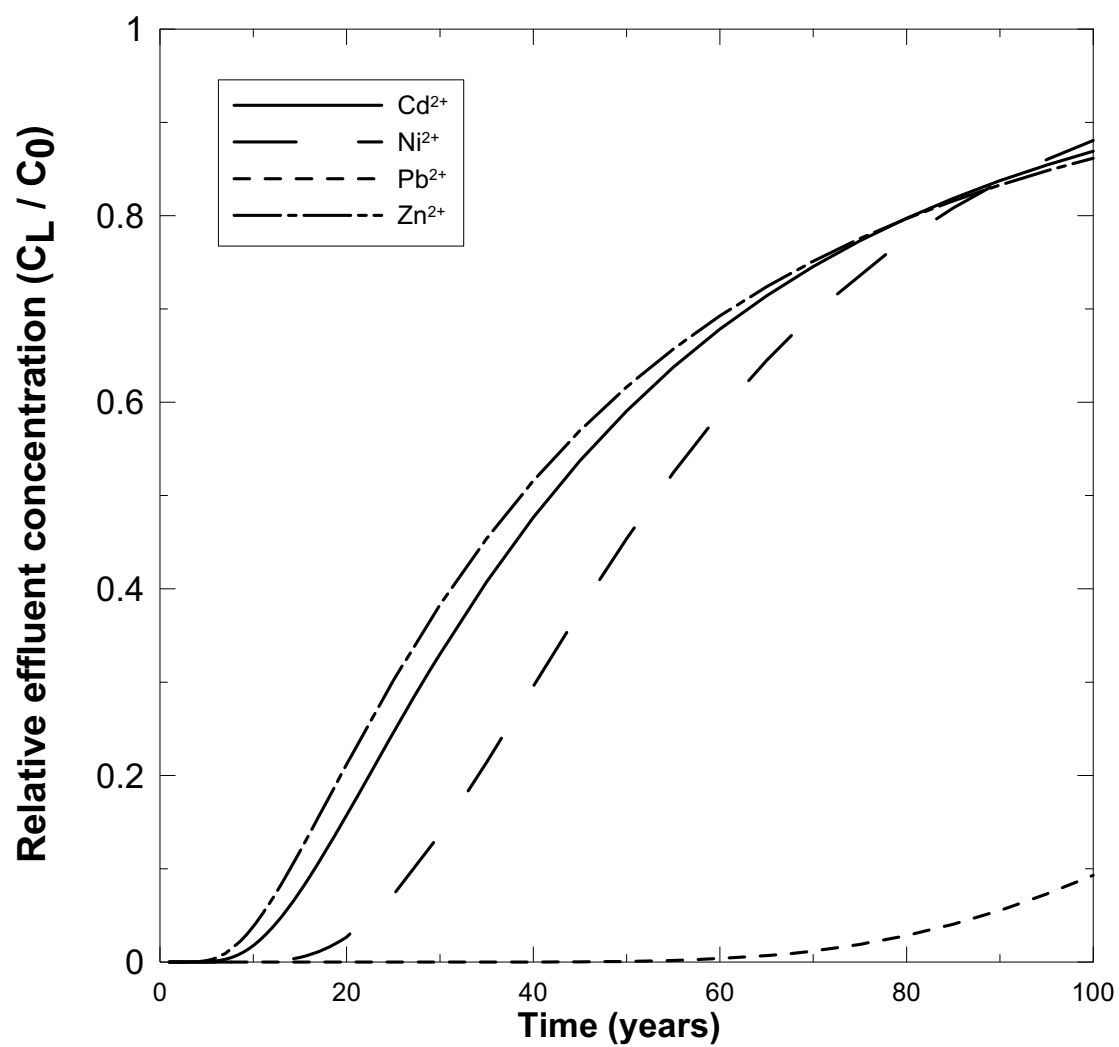
ความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า C_L/C_0 ของโลหะหนักกับเวลาของดินทั้ง 3 ชนิด อันได้แก่ ทรายผสมเบนโทไนต์ที่ 5% ดินลูกรังคองหงส์และดินเหนียวเกาะยอกับสารละลายลายโลหะหนักทั้ง 5 ชนิด ได้แสดงในภาพประกอบที่ 5.2, 5.3 และ 5.4 ตามลำดับ

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

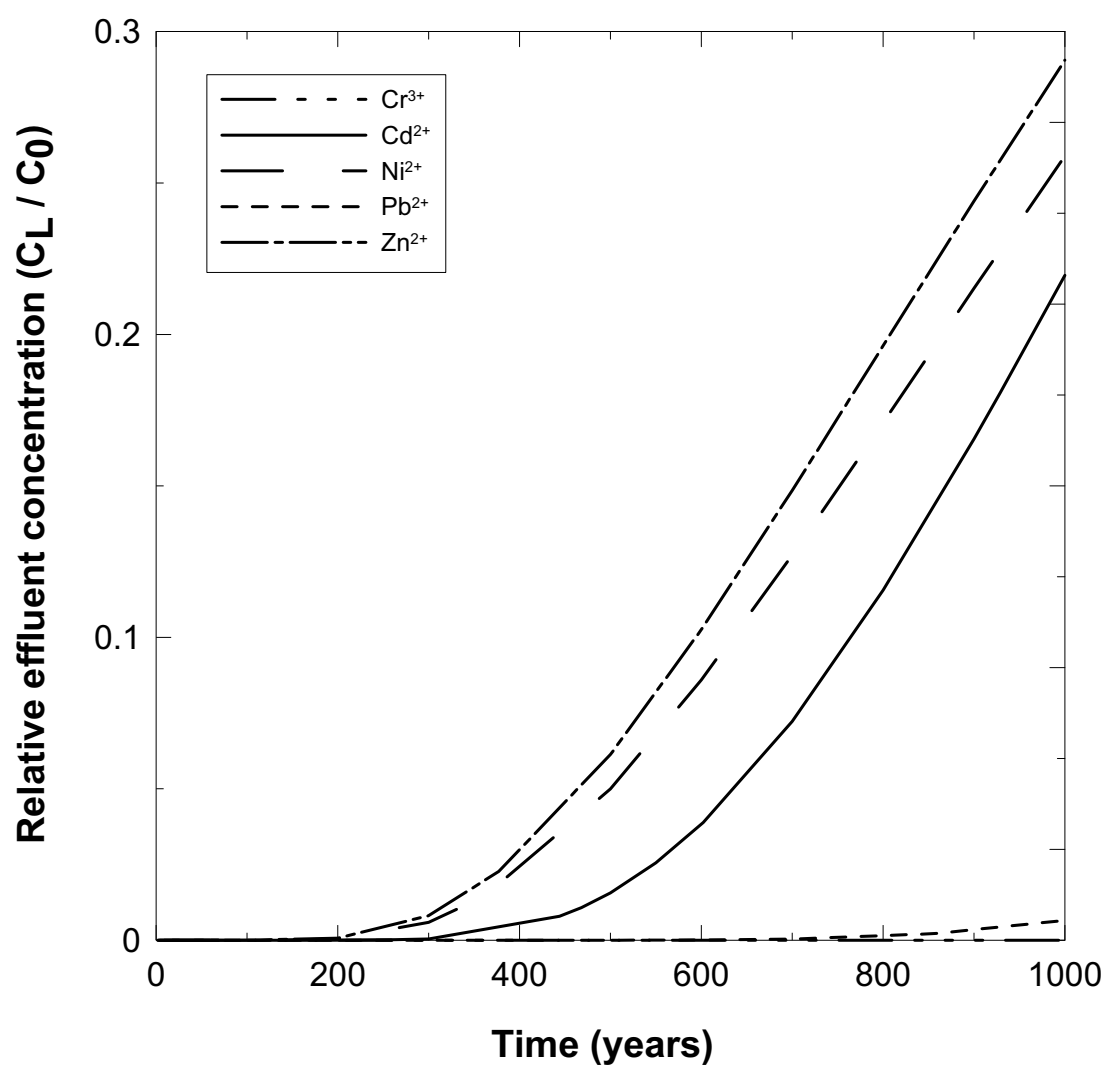
ค่า C_L ที่คำนวณได้จากการใช้ค่าความเข้มข้นเริ่มต้น 3 ค่า อันได้แก่ ค่าความเข้มข้นสูงสุดในน้ำชะมูลฝอยในประเทศไทย ($C_{0\max}$), ค่าความเข้มข้นเฉลี่ยในน้ำชะมูลฝอยในประเทศไทย ($C_{0\text{avg}}$) และค่าความเข้มข้นสูงสุดของ USEPA ของสารละลายโลหะหนัก 5 ชนิด (Cr^{3+} , Cd^{2+} , Ni^{2+} , Pb^{2+} และ Zn^{2+}) และดิน 3 ชนิด (ทรายผสมเบนโทไนต์, ดินลูกรังคองหงส์และดินเหนียวเกาะยอ) 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



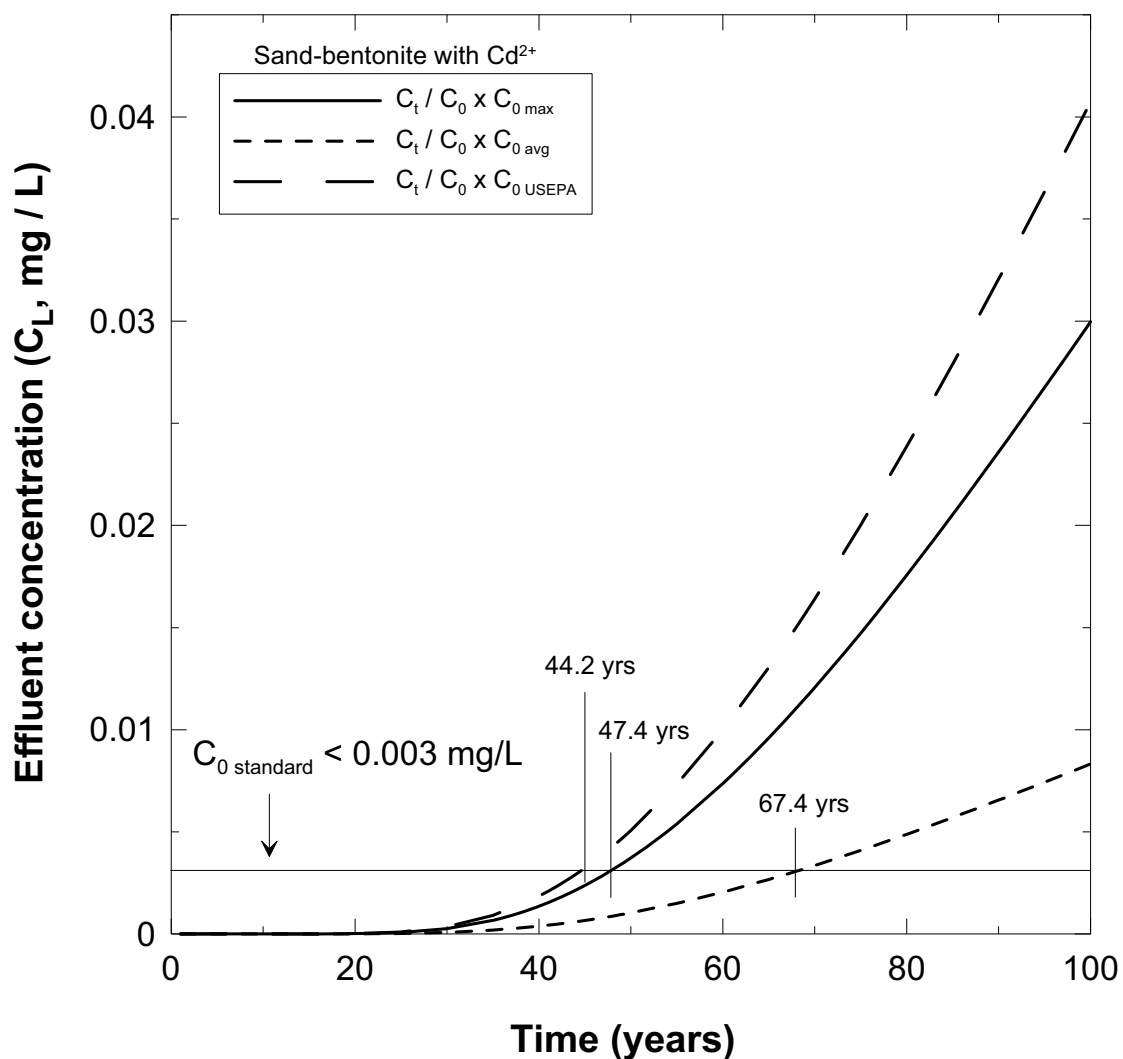
ภาพประกอบที่ 5.2 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Relative effluent concentration (C_L / C_0)
กับเวลาของชั้นกั้นซึมทรายผสมเบนโทไนต์ที่ 5% หนา 60 cm



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



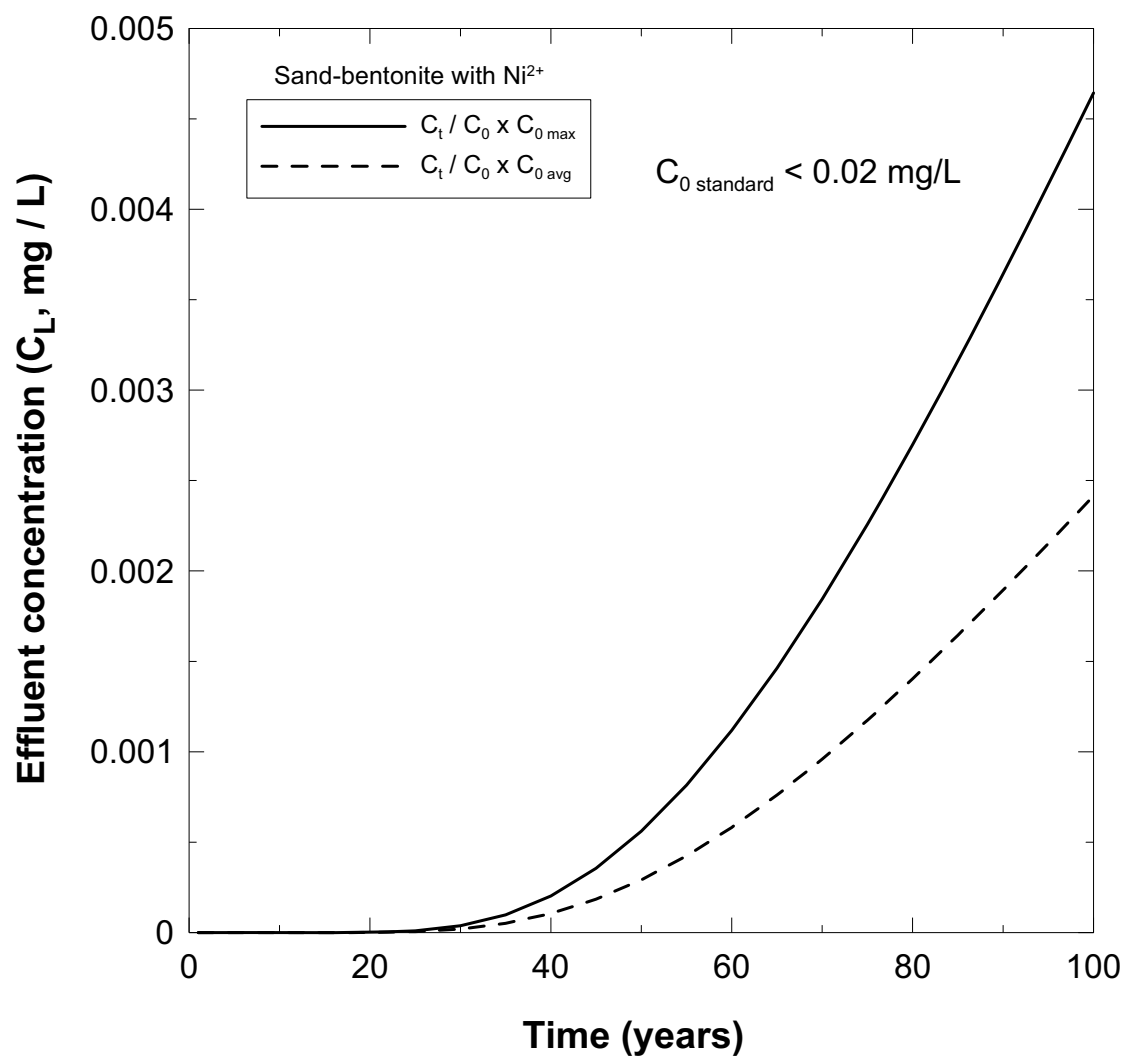
ภาพประกอบที่ 5.4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Relative effluent concentration (C_L / C_0)
กับเวลาของชั้นกั้นซึมดินเหนียวเกาะยอหนา 60 cm



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)

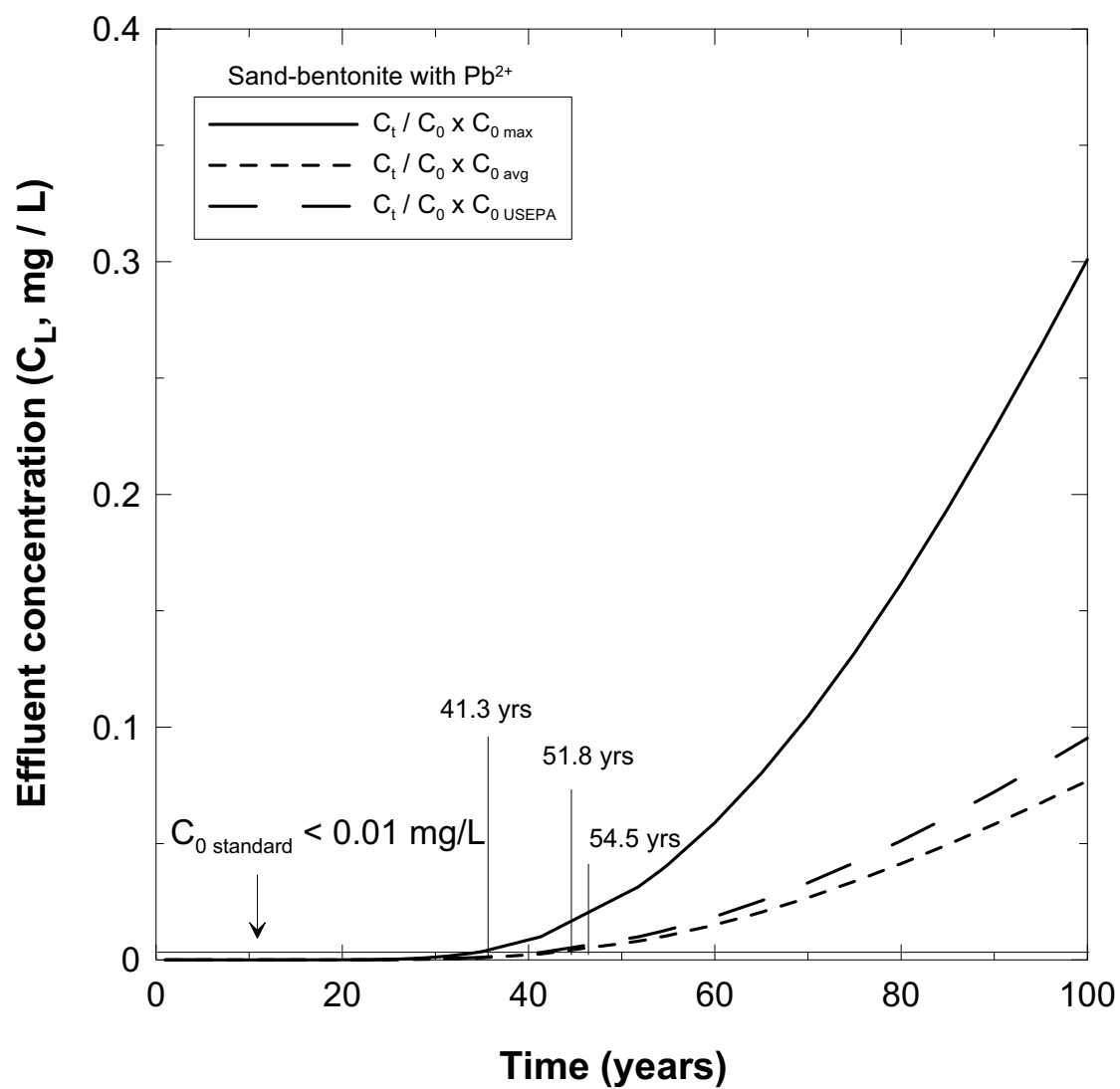
ภาพประกอบที่ 5.5 Breakthrough curves ของ Cd²⁺ ผ่านชั้นกั้นซึมทรายผสมเบนโทไนต์ที่ 5%

หน้า 60 cm

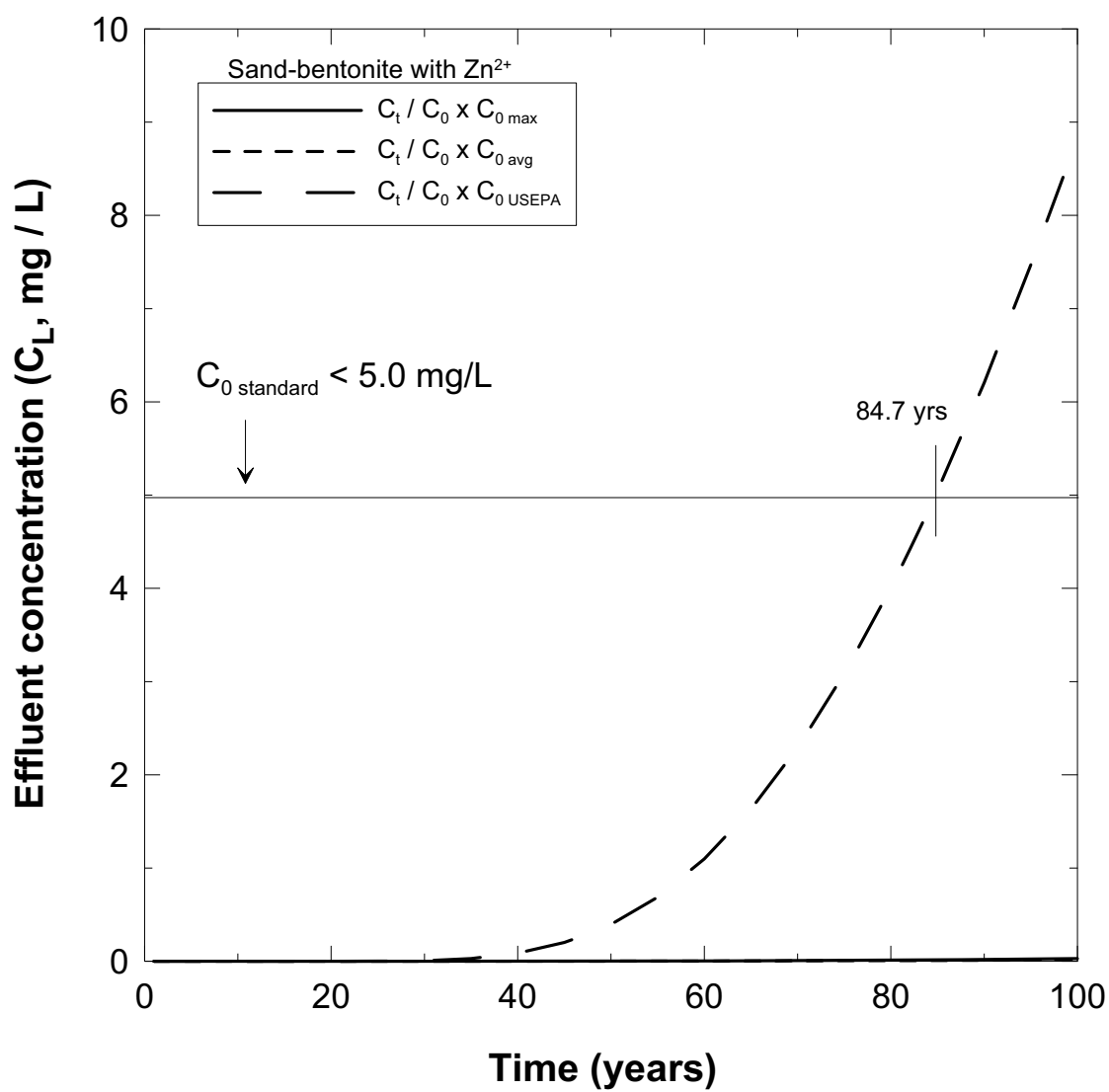


ภาพประกอบที่ 5.6 Breakthrough curves ของ Ni^{2+} ผ่านชั้นกั้นซึมทรายผสมเบนโทไนต์ที่ 5%

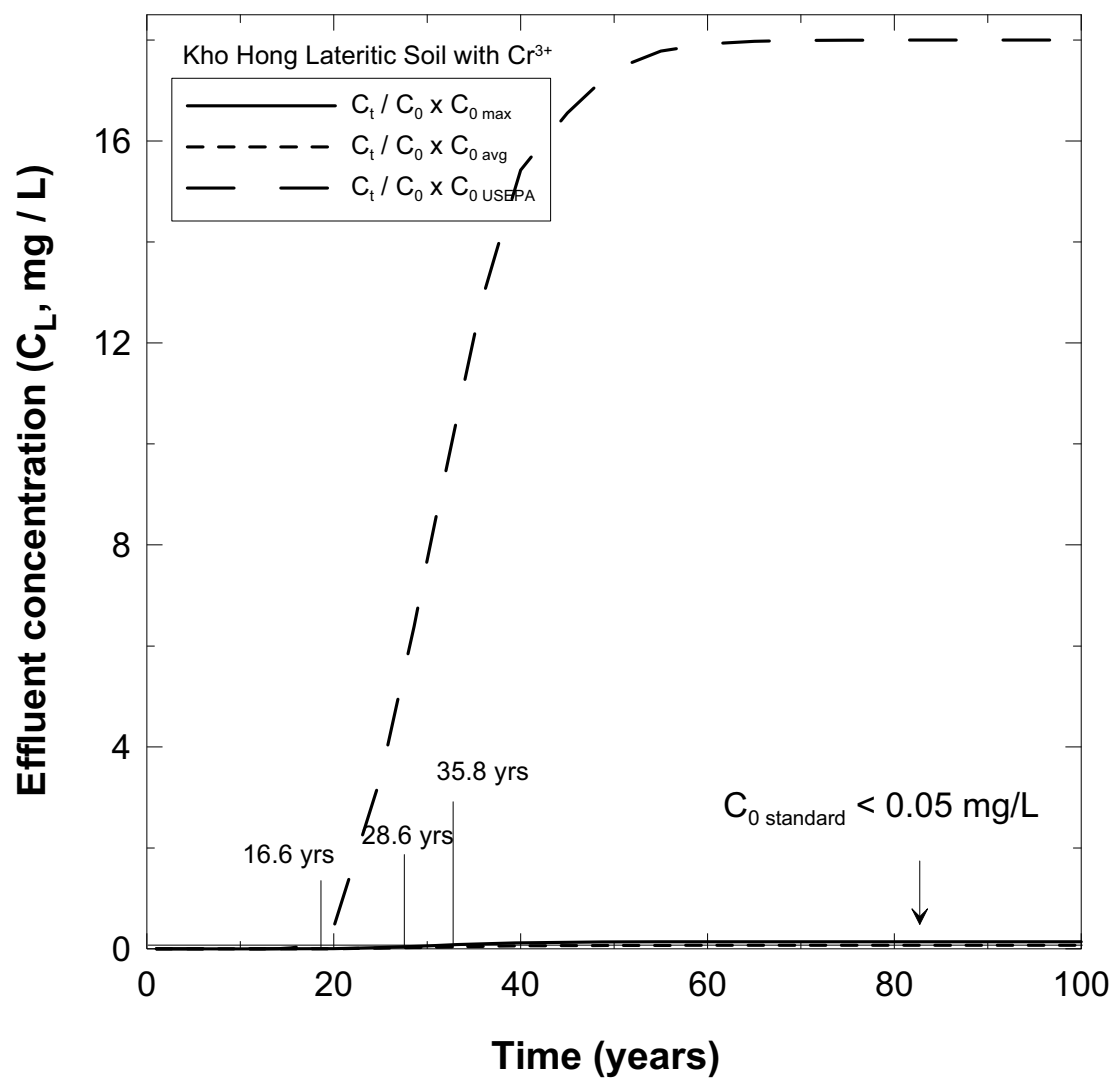
หนา 60 cm



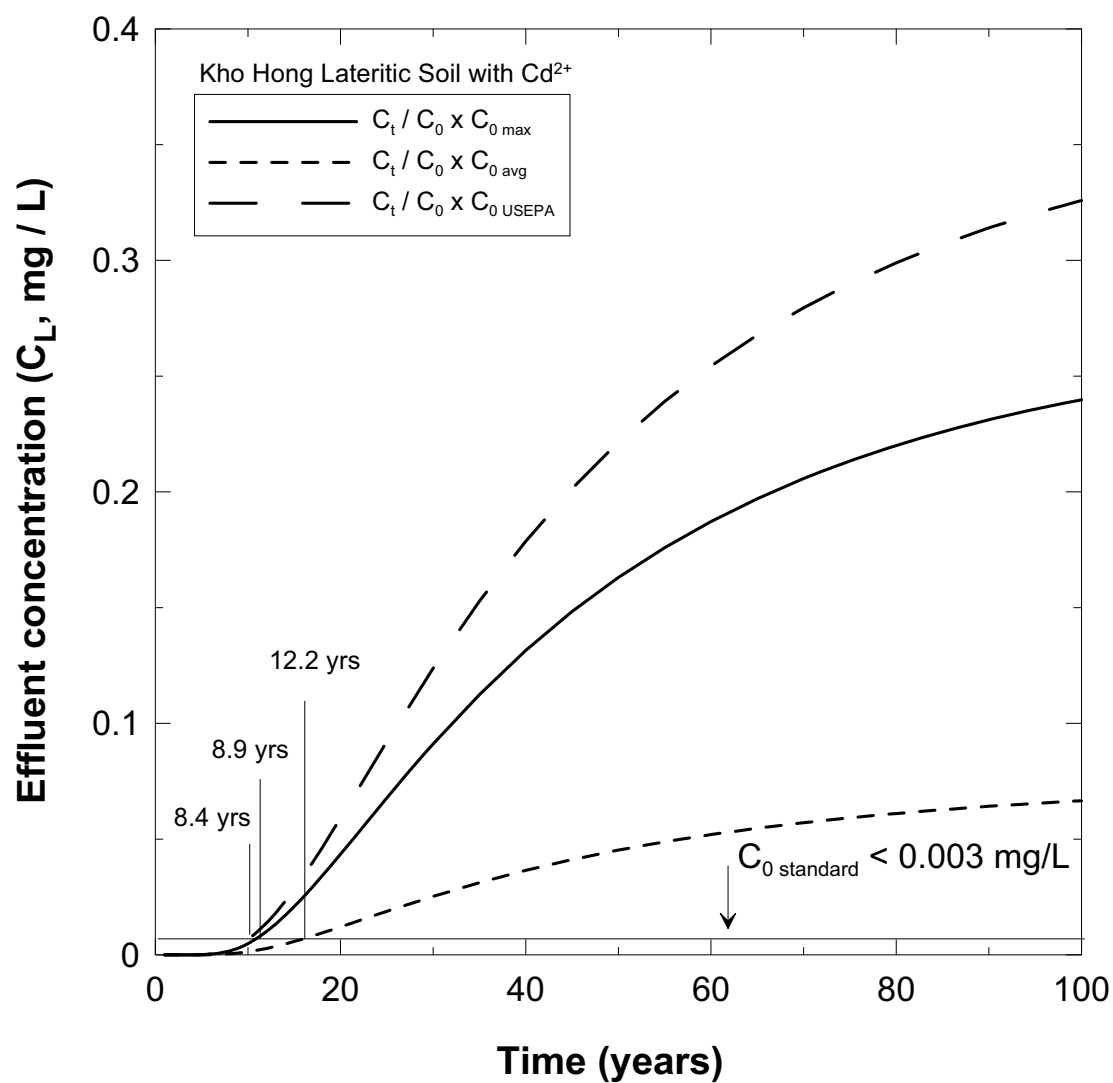
ภาพประกอบที่ 5.7 Breakthrough curves ของ Pb²⁺ ผ่านชั้นกั้นซึมทรายผสมเบนโทไนต์ที่ 5%
หน้า 60 cm



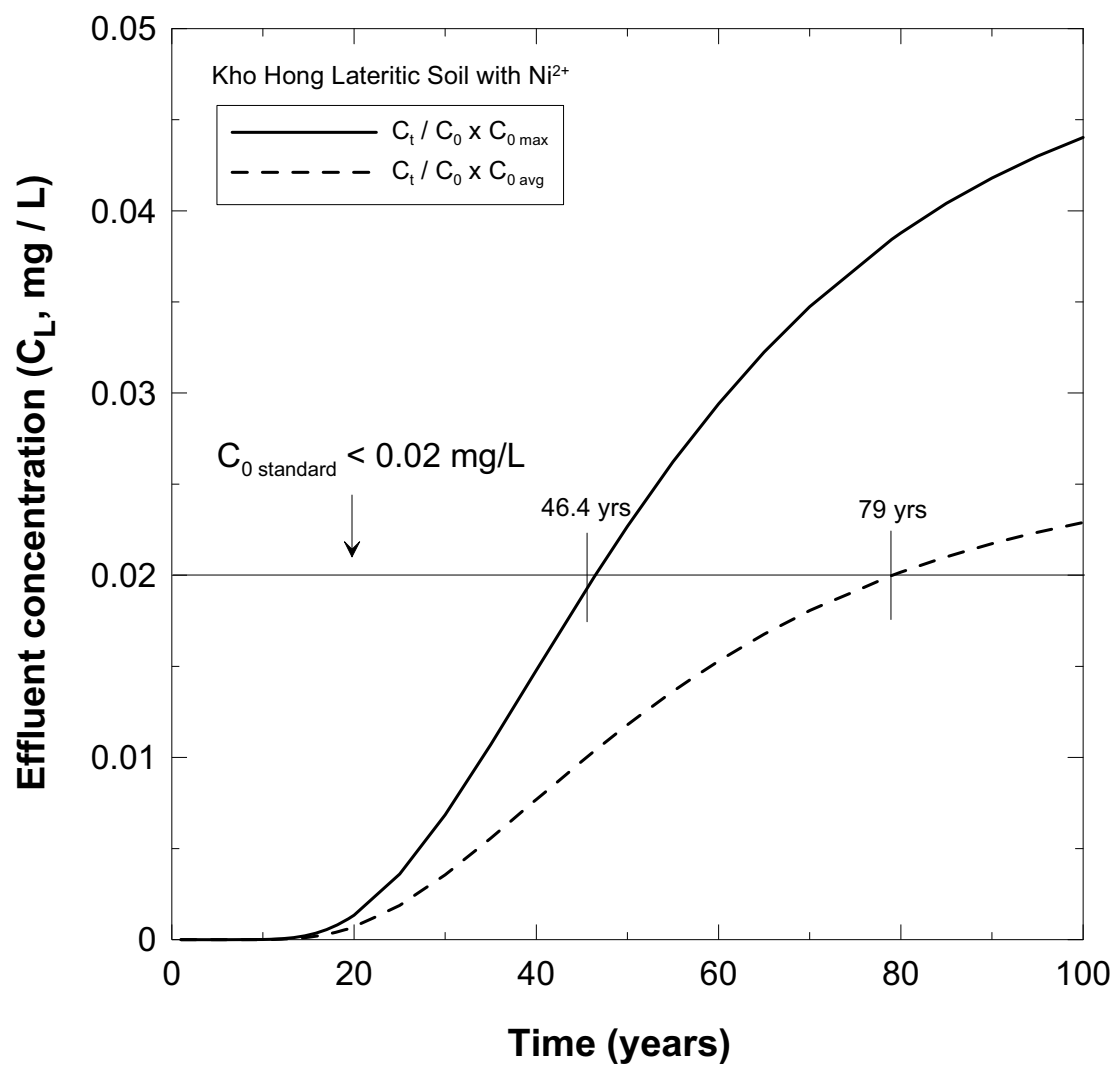
ภาพประกอบที่ 5.8 Breakthrough curves ของ Zn^{2+} ผ่านชั้นกั้นซึมทรายผสมเบนโทไนต์ที่ 5%
หนา 60 cm



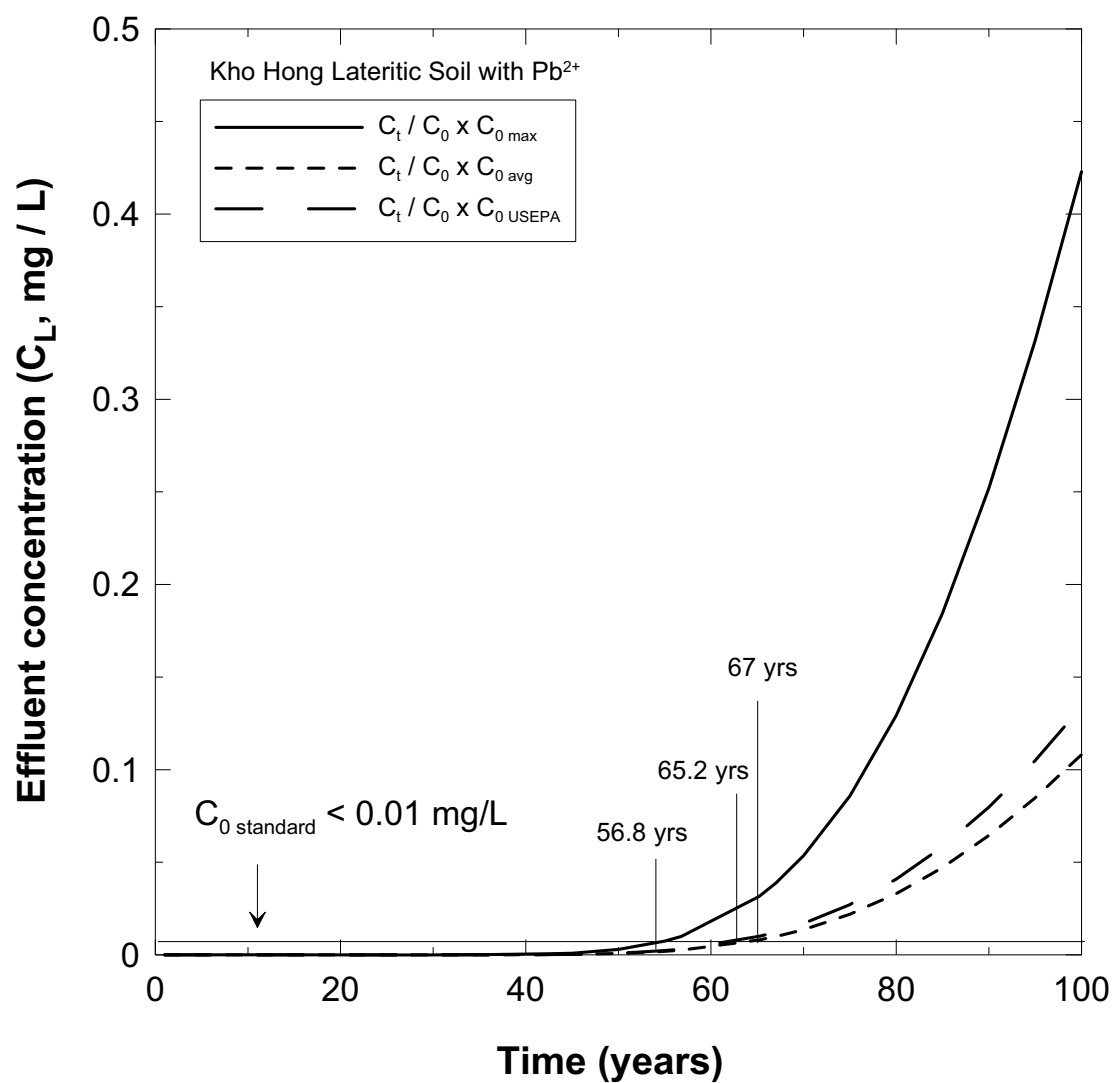
ภาพประกอบที่ 5.9 Breakthrough curves ของ Cr^{3+} ผ่านชั้นกั้นซึมดินลูกรังคอหงส์หนา 60 cm



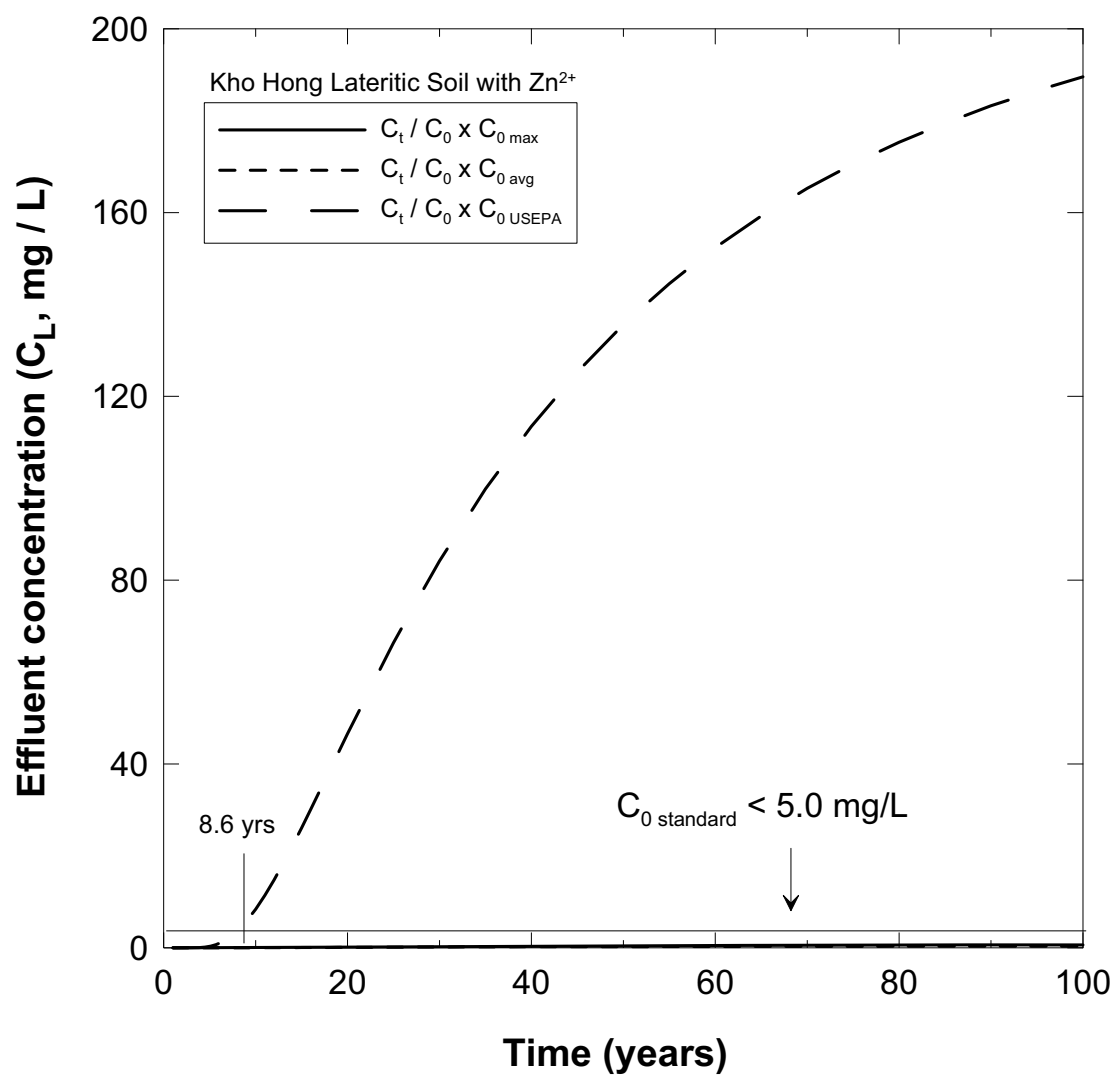
ภาพประกอบที่ 5.10 Breakthrough curves ของ Cd^{2+} ผ่านชั้นกั้นซึมดินลูกรังคอหงส์หนา 60 cm



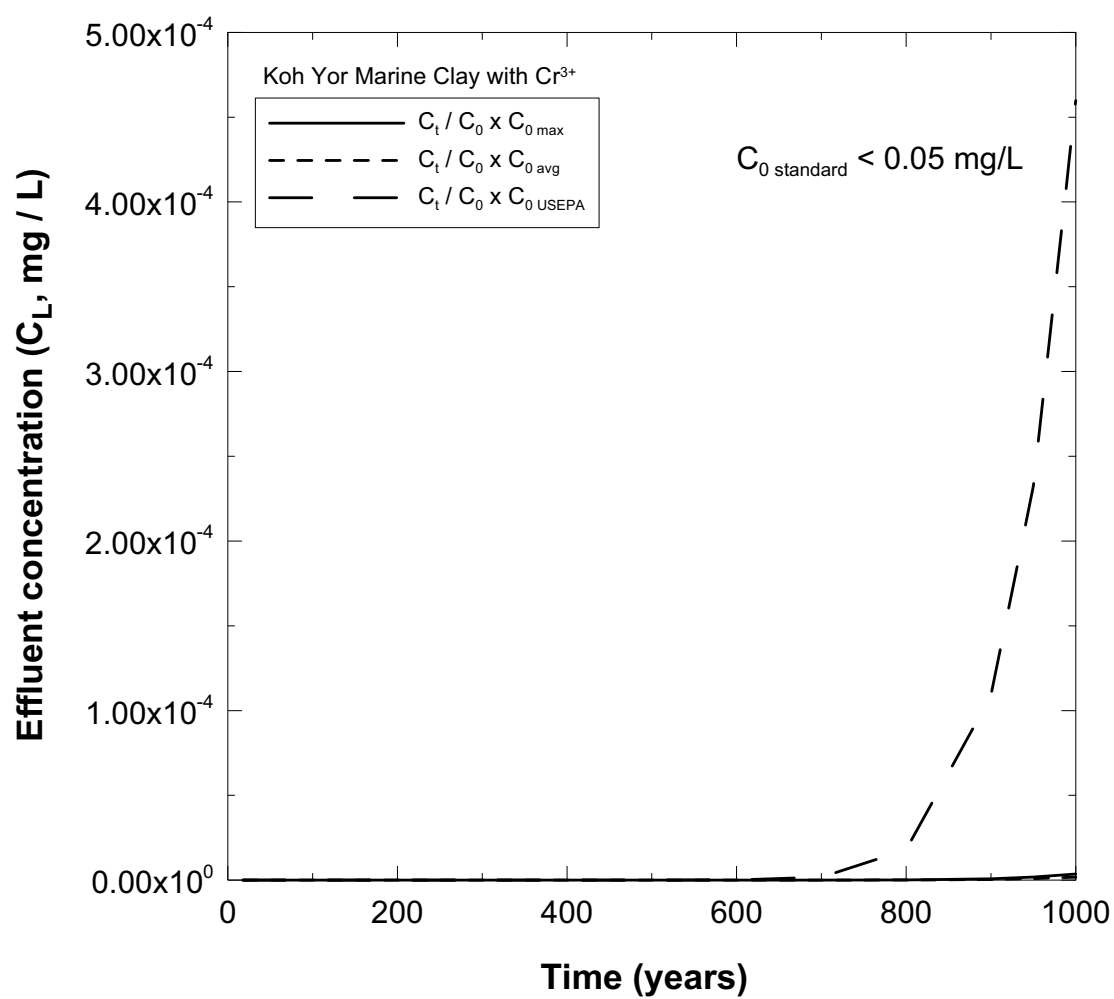
ภาพประกอบที่ 5.11 Breakthrough curves ของ Ni^{2+} ผ่านชั้นกั้นซึมดินลูกรังคอหงส์หนา 60 cm



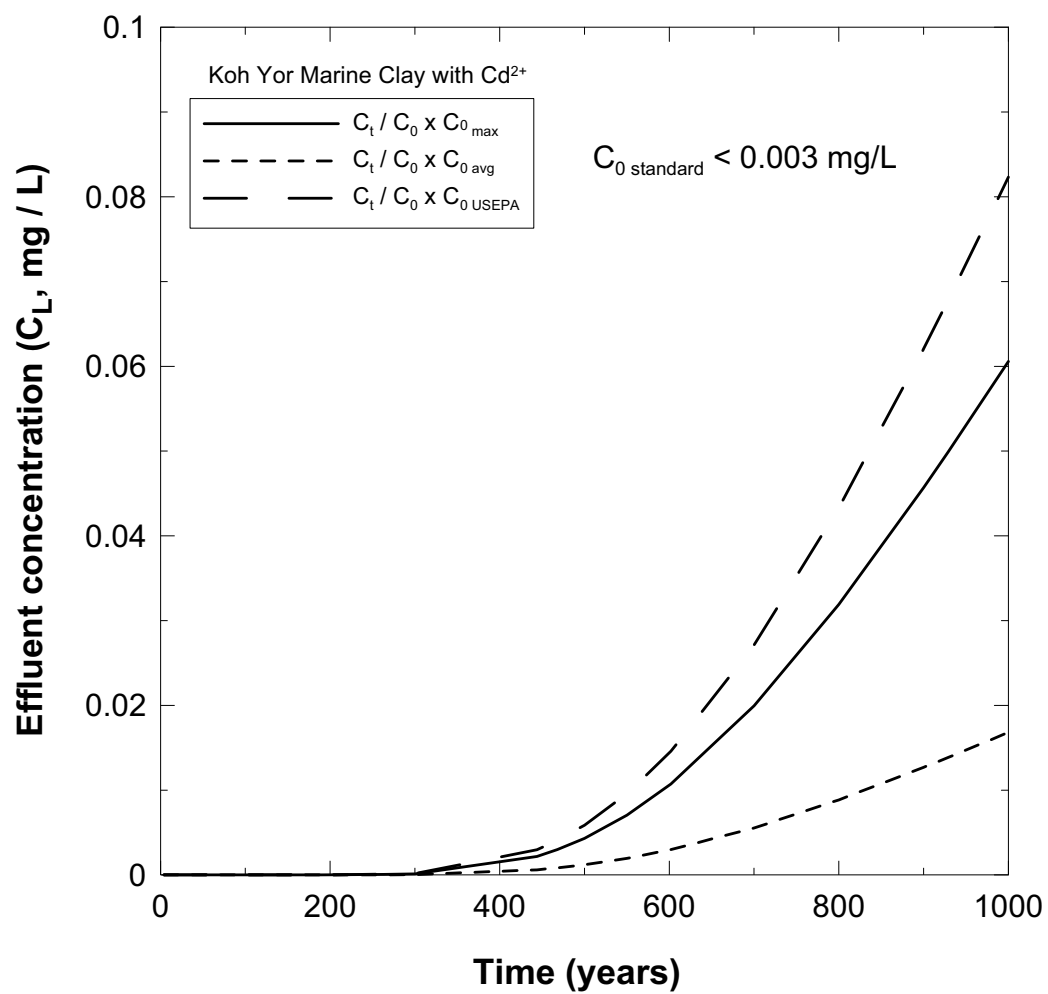
ภาพประกอบที่ 5.12 Breakthrough curves ของ Pb^{2+} ผ่านชั้นกั้นซึมดินลูกรังคอหงส์หนา 60 cm



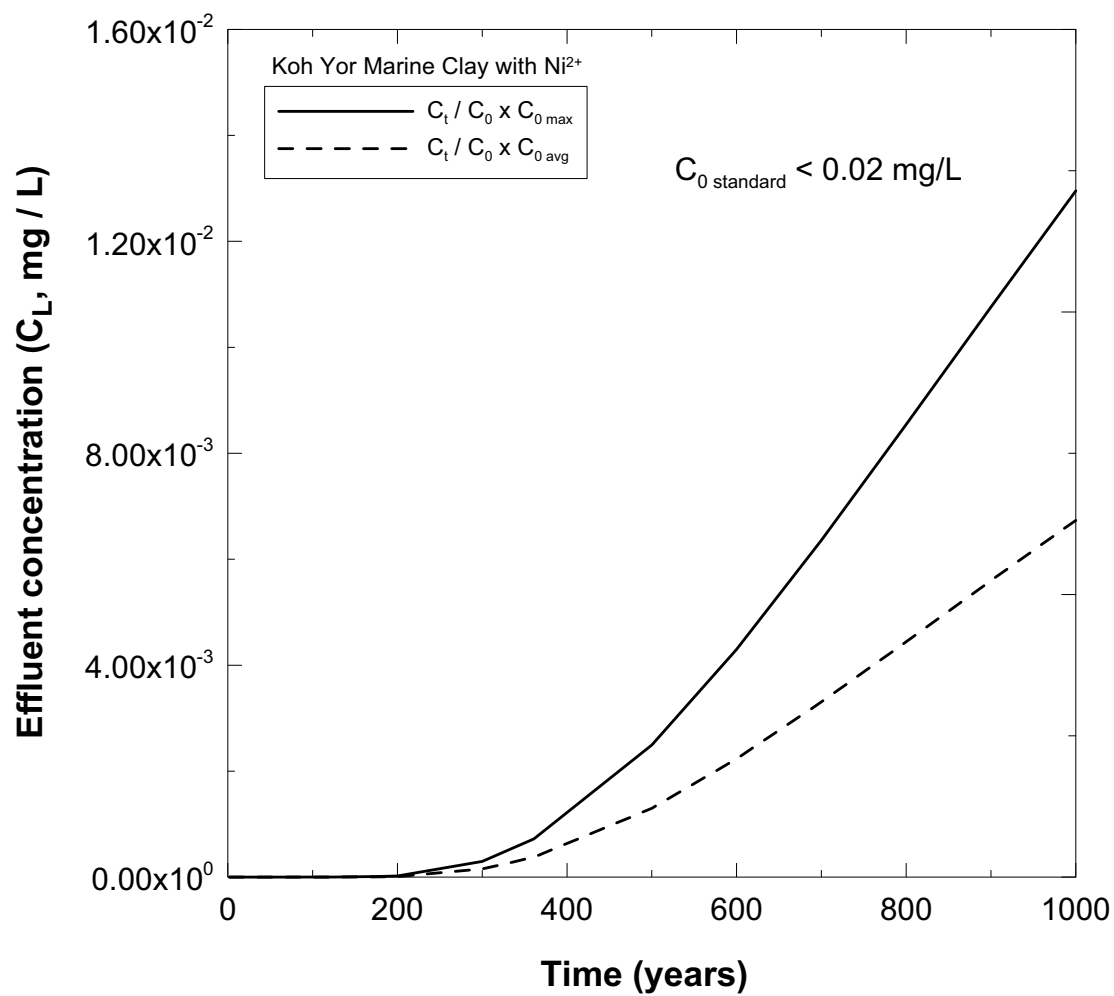
ภาพประกอบที่ 5.13 Breakthrough curves ของ Zn^{2+} ผ่านชั้นกั้นซึมดินลูกรังคอหงส์หนา 60 cm



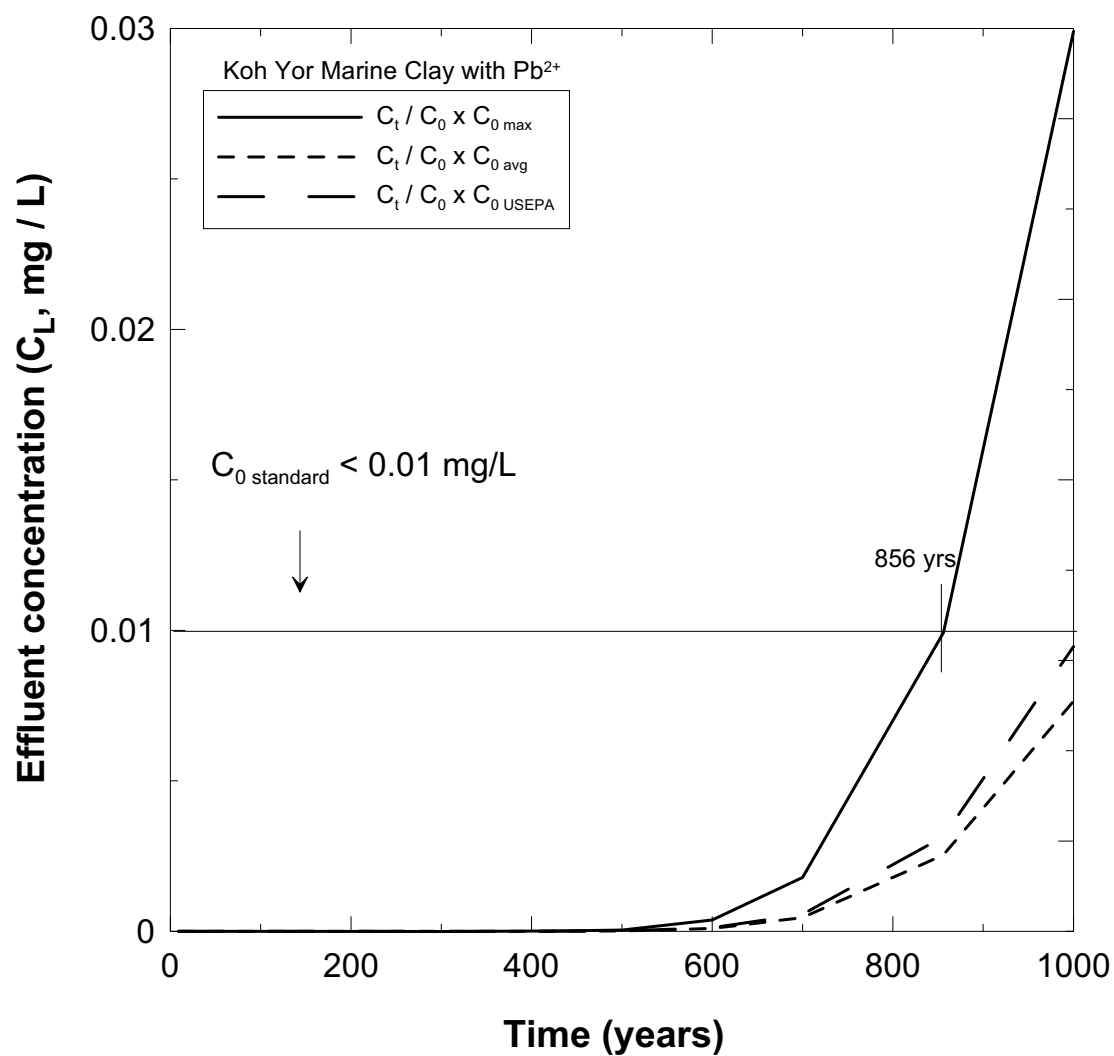
ภาพประกอบที่ 5.14 Breakthrough curves ของ Cr^{3+} ผ่านชั้นกั้นซึมดินเหนียวเกาะยอหนา 60 cm



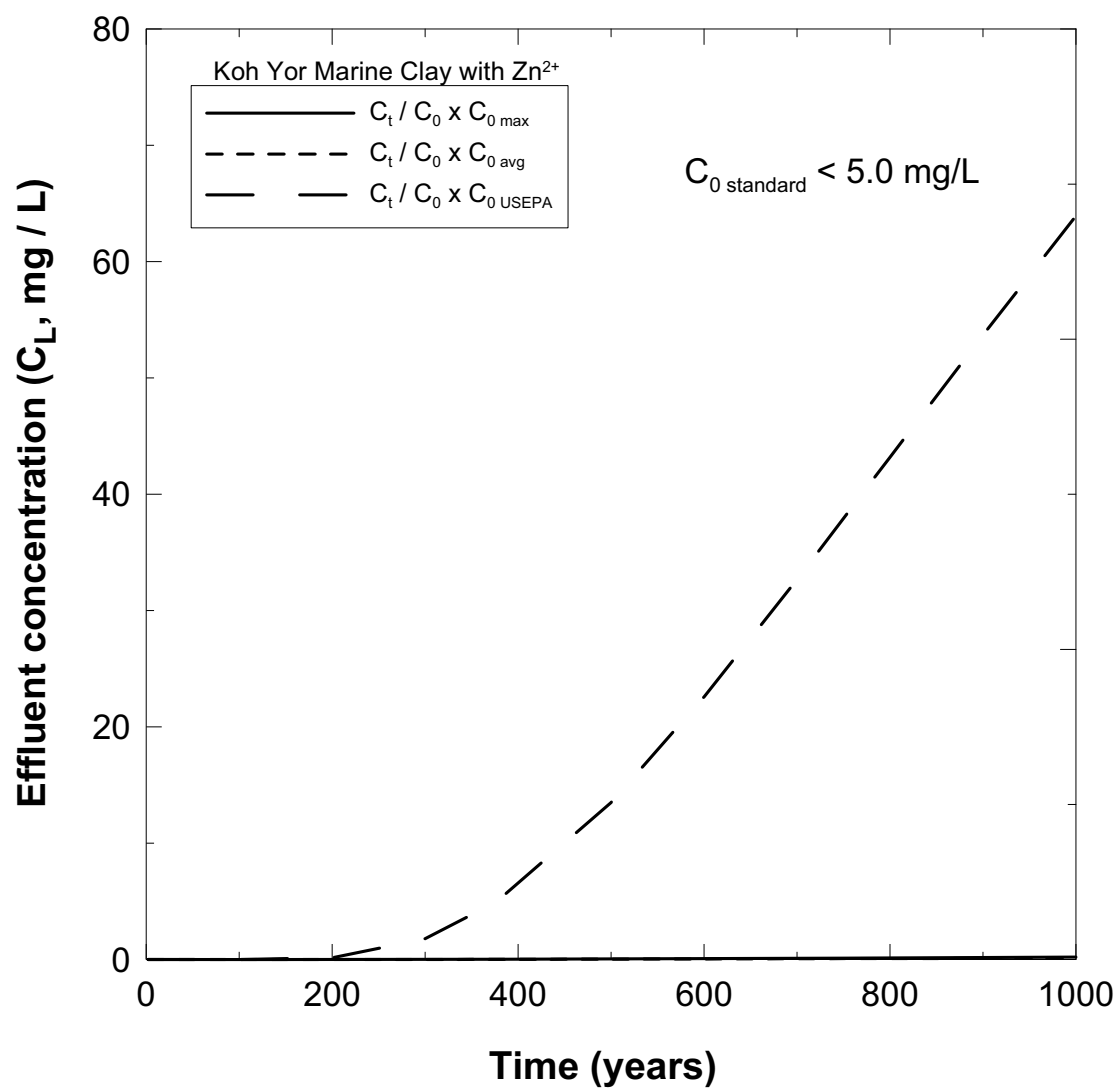
ภาพประกอบที่ 5.15 Breakthrough curves ของ Cd^{2+} ผ่านชั้นกั้นซึมดินเหนียวเกาะยอหนา 60 cm



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 ดินลูกรังคองหงส์ 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 ผลการศึกษสามารถสรุปได้ดังนี้

- 1) เบนโทไนต์ถูกจำแนกเป็นดินเหนียวที่มีความเป็นพลาสติกสูง (High plasticity clay, CH) ดินลูกรังคองหงส์และดินเหนียวเกาะยอ ถูกจำแนกเป็นดินเหนียวที่มีความเป็นพลาสติกต่ำ (Low plasticity clay, CL) ตามวิธีการจำแนกแบบ Unified Soil Classification System (USCS)
- 2) ดินเหนียวเกาะยอ มีปริมาณ SO_4^{2-} และ Cl^- มาก เนื่องจากเป็นดินเหนียวมารีน (Marine clay) ในขณะที่ดินลูกรังคองหงส์ มีปริมาณเหล็กมาก ความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวกจากมากไปน้อย ได้แก่ เบนโทไนต์, ดินเหนียวเกาะยอ และดินลูกรังคองหงส์ ตามลำดับ
- 3) การบดอัดทราศผสมเบนโทไนต์ พบว่า ทราศผสมเบนโทไนต์ จะต้องมียปริมาณเบนโทไนต์ไม่น้อยกว่า 3% จึงจะให้ค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่าน ไม่มากกว่า $1 \times 10^{-7} \text{ cm/s}$ สำหรับปริมาณเบนโทไนต์ที่มากกว่า 5% ค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่าน ไม่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญในช่วง 10^{-9} cm/s
- 4) ค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่านของทราศผสมเบนโทไนต์ที่ 5% , ดินเหนียวเกาะยอ และดินลูกรังคองหงส์ 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 ด้วยสารโพลีเมอร์ฟอรัลคัลเฟต” , 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 ดิพิมพ์ในราชกิจจานุเบกษา 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

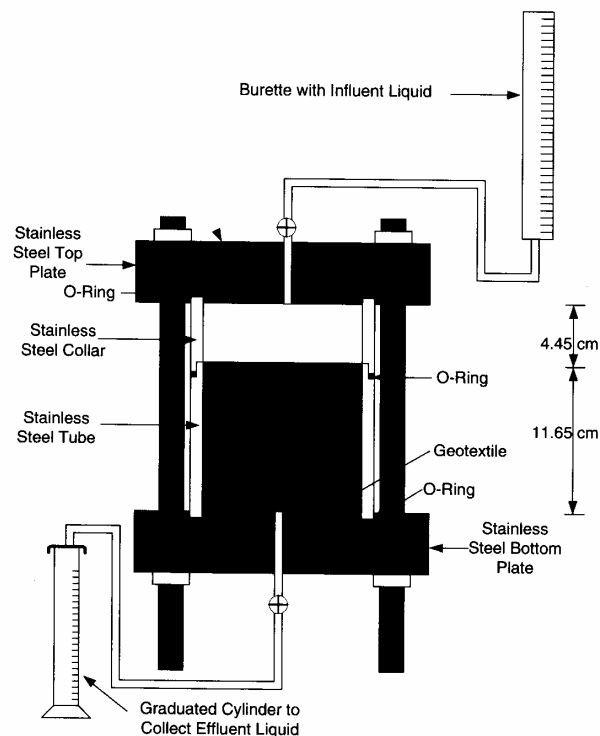


Figure 1. Rigid wall permeameter.

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

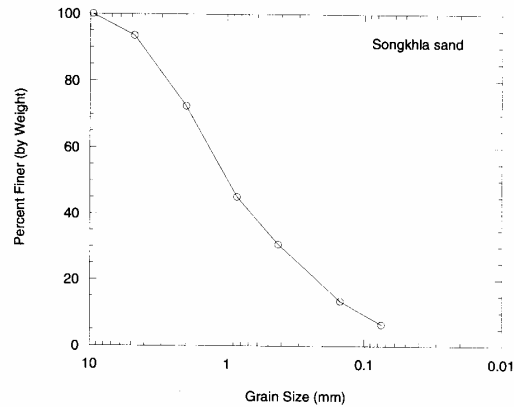


Figure 2. Grain size distribution of Songkhla sand.

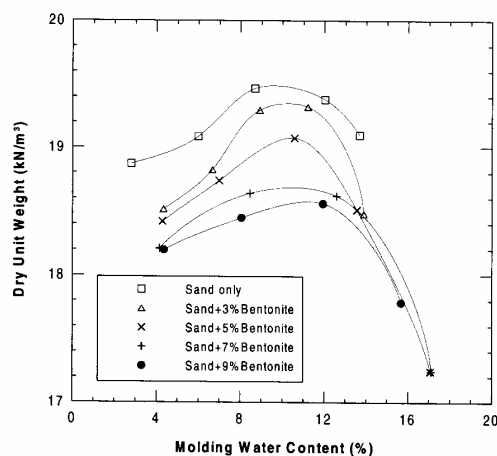


Figure 3. Compaction curves of sand-bentonite mixtures.

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

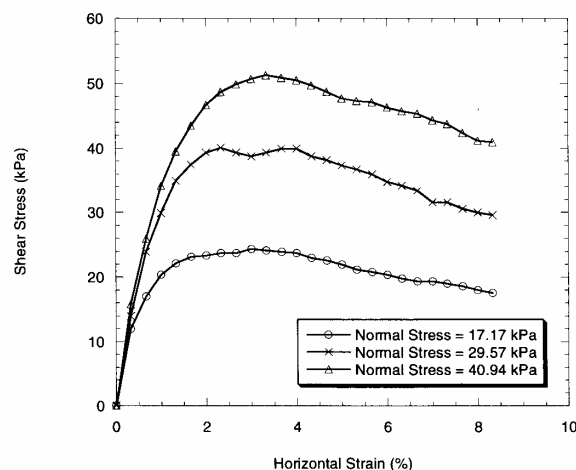


Figure 4. Stress-strain behavior of sand with 3% bentonite mixture obtained from direct shear test.

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

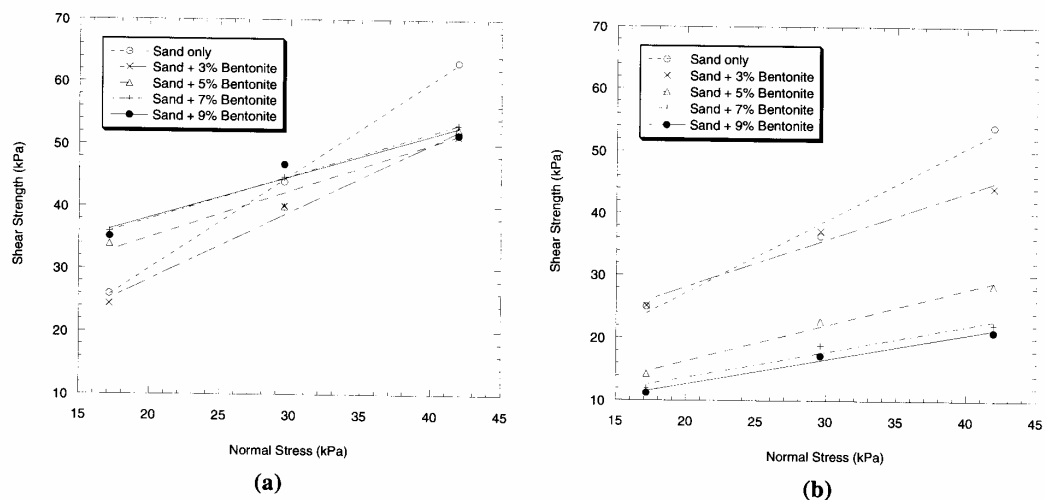


Figure 5. Mohr-Coulomb failure envelopes obtained from direct shear tests: a) as molded specimens, and b) inundated specimens.

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-

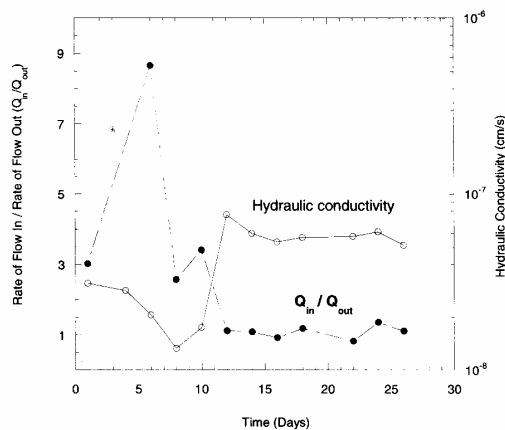


Figure 6. Ratio of inflow to outflow and hydraulic conductivity vs. time of sand with 3% bentonite mixture.

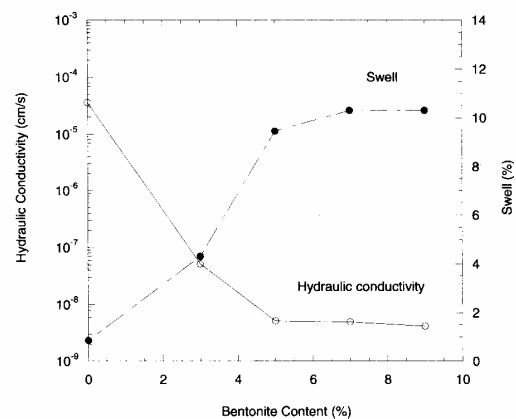


Figure 7. Hydraulic conductivity and swell vs. bentonite content of sand-bentonite mixtures.

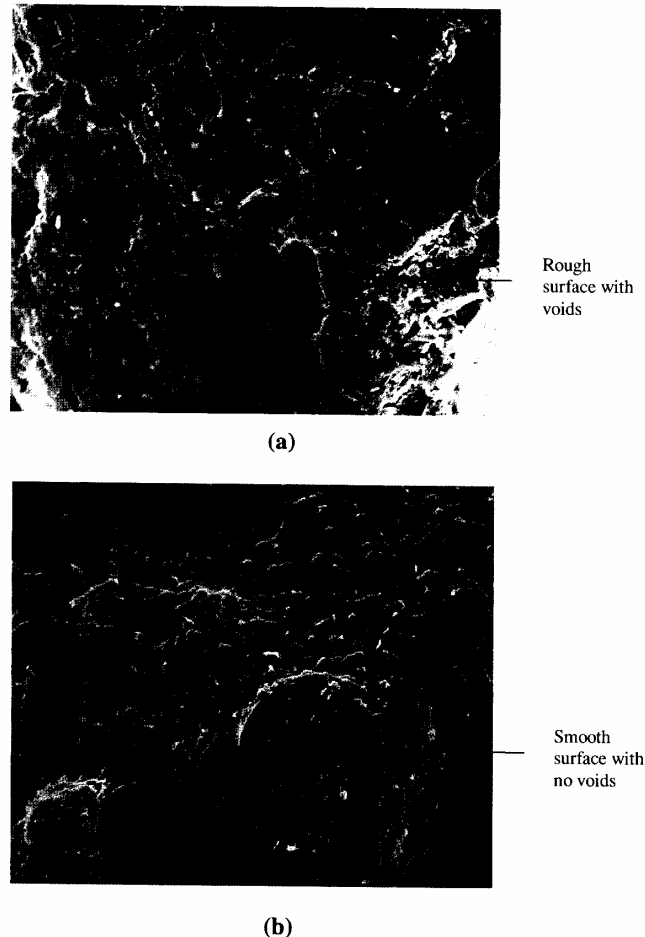


Figure 8. Scanning electron microscopy pictures with 1500 times magnification: (a) sand surface (b) sand surface with bentonite.

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 ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่และแฟคเตอร์ความหน่วงถูกคำนวณโดยการฟิต Breakthrough curves กับสมการการเคลื่อนที่ของสารละลายในดิน และสามารถนำไปใช้ในการออกแบบความหนาของชั้นกันซึมในสถานที่ฝังกลบขยะมูลฝอยได้

คำสำคัญ : โลหะหนัก, สัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่าน, แฟคเตอร์ความหน่วง, 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 โดยทำการทดลองแบบแบทช์เพื่อศึกษาความสามารถในการดูดซับโลหะหนัก ทำการทดลองแบบสแตมภ์เพื่อศึกษาพารามิเตอร์การเคลื่อนที่ และ ทำการทดลองหาผลกระทบของความเข้มข้นของสารละลายโลหะหนักต่อค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่าน เพื่อนำไปประกอบการศึกษาความเหมาะสมของการใช้ดินลูกรังบดอัดเป็นชั้นกันซึมสำหรับสารละลายโลหะหนัก

การเคลื่อนที่ของสารละลายในดิน

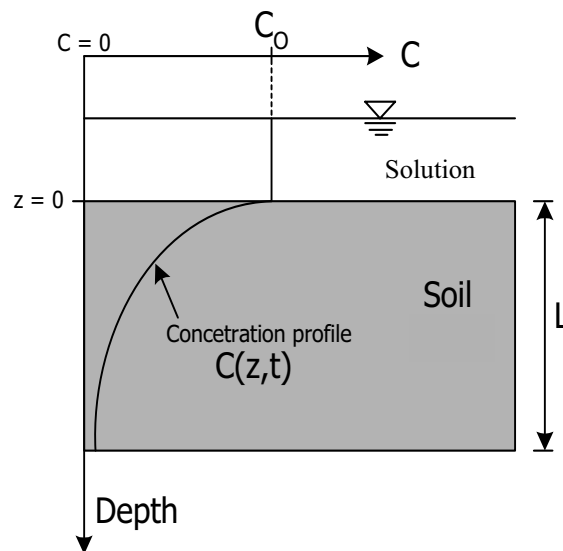
การเคลื่อนที่ของสารละลายอนินทรีย์ในดินขึ้นอยู่กับเคลื่อนที่แบบการพา (Advective transport) การเคลื่อนที่แบบการแพร่ (Diffusive transport) และปฏิกิริยาทางเคมีระหว่างดินกับสารละลาย เช่น การดูดซับ (Adsorption) เป็นต้น โพรไฟล์ของความเข้มข้น (รูปที่ 1) แสดงความเข้มข้นของสารละลาย (C) ที่ความลึก (z) และเวลา (t)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

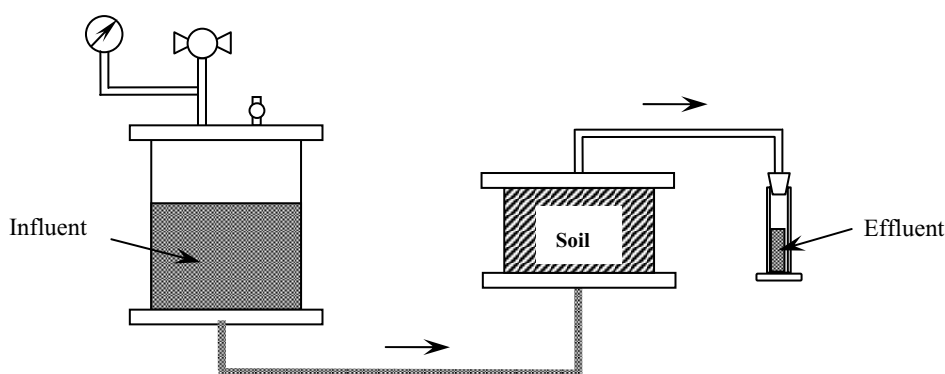
การทดสอบแบบแบทช์

การทดสอบการดูดซับโลหะหนักแบบแบทช์ (Batch adsorption test) ถูกนำมาใช้หาคุณสมบัติการดูดซับโลหะหนักของดินลูกรังคองหงส์กับสารละลายโลหะหนัก 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 เท่า ดังนั้นการศึกษาค้างนี้ได้ทำการทดลองแบบแบทช์ทั้งหมดรวม 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 สำหรับการทดสอบสดมภ์ในการศึกษาค้างนี้มีการทดลองด้วยน้ำ 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

คุณสมบัติของดินลูกรังคอหงส์

ผลการทดสอบหาคุณสมบัติของดินลูกรังคอหงส์ได้แสดงไว้ในตารางที่ 1 ดินลูกรังคอหงส์มีสีน้ำตาลแดง มีค่าพิกัดความเหลวและดัชนีความเหลวเท่ากับ 43.0% และ 21.8% ตามลำดับ ปริมาณดินที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 200 เท่ากับ 56 % ดังนั้นดินลูกรังคอหงส์สามารถจำแนกได้เป็น 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 คุณสมบัติของดินลูกรังคอหงส์

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

คุณสมบัติการดูดซับโลหะหนัก

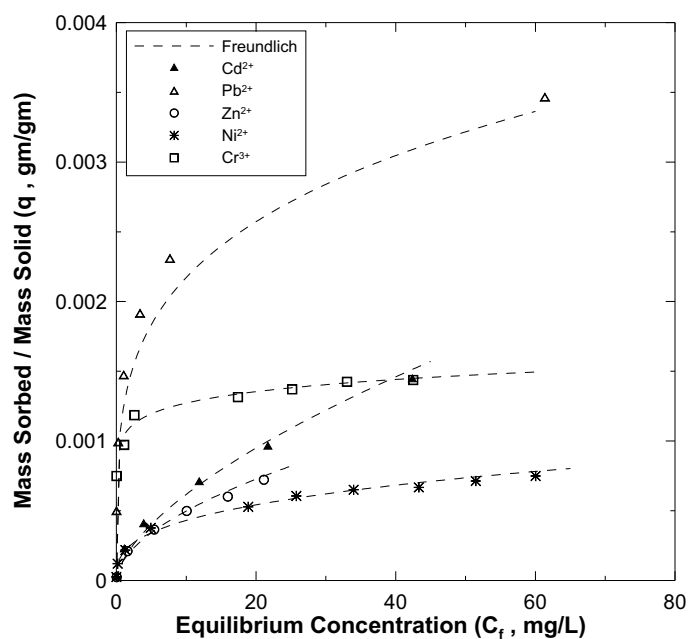
ผลการทดลองจากการทดลองแบบแบทช์ เพื่อศึกษาคุณสมบัติการดูดซับโลหะหนักของดินลูกรัง (รูปที่ 3) ได้แสดงไว้ในรูปของไอโซเทอม ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของมวลโลหะหนักที่ถูกดูดซับต่อมวลของดินลูกรังที่ใช้ในการทดสอบ (q) และความเข้มข้นสุดท้ายของสารละลายโลหะหนักเมื่อกระบวนการดูดซับสมดุลแล้ว (Equilibrium 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 สอดคล้องอย่างดีมากกับสมการของ 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

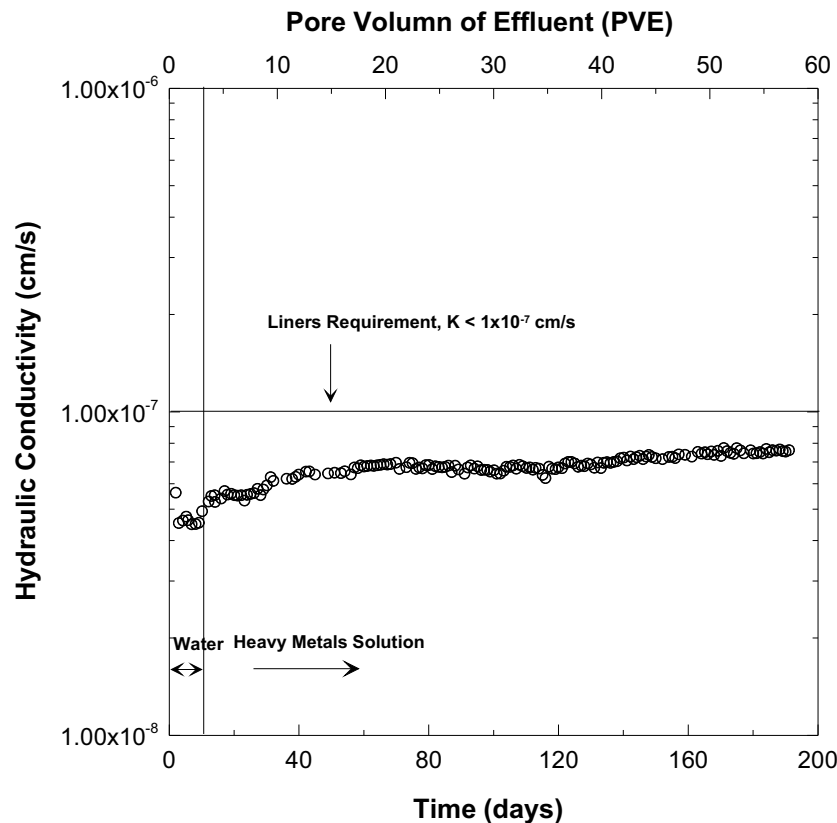
Heavy Metal Solution	Adsorption Isotherm				Adsorption Capacity (meq/100 g)
	Freundlich			Linear	
	K_F (L/kg)	$1/n$	R^2	K_p (L/kg)	
Cr^{3+}	1,033.95	0.09	0.9791	43.14	8.18
Cd^{2+}	147.70	0.62	0.9854	59.27	1.25
Pb^{2+}	1,238.51	0.24	0.9666	19.26	4.20
Zn^{2+}	141.93	0.55	0.9963	49.51	1.52
Ni^{2+}	199.99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

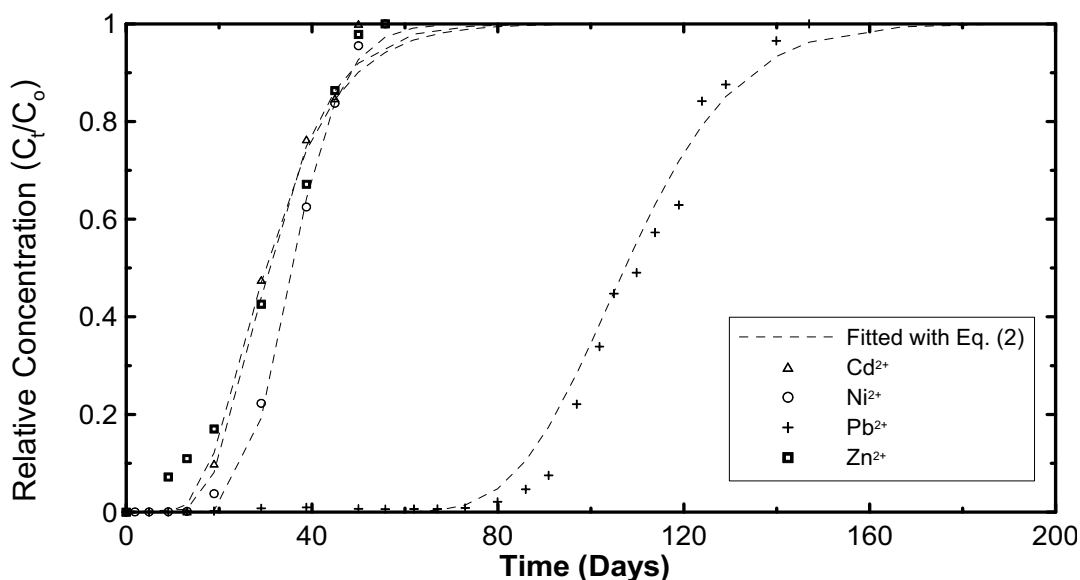


รูปที่ 4 สมบัติการยอมให้น้ำซึมผ่านของดินลูกรังคองหส์

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

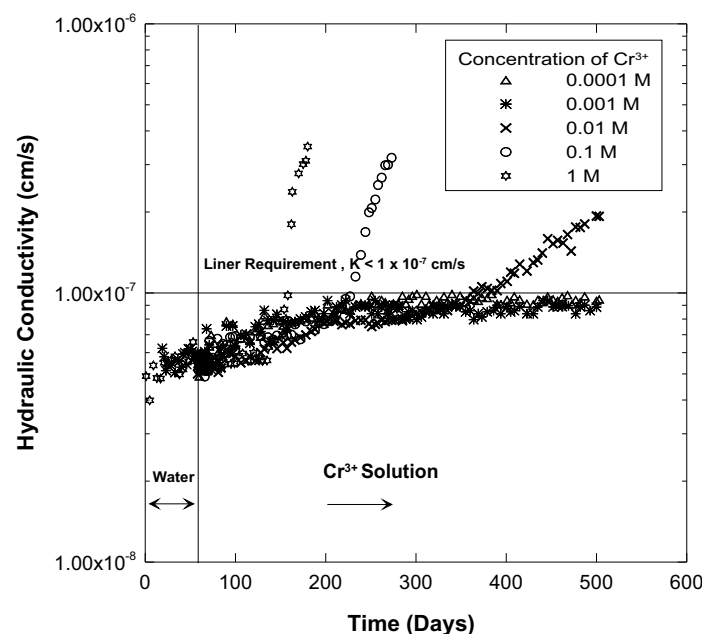
ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ (D) ซึ่งแสดงการแพร่กระจายในระดับโมเลกุลของสารละลายโลหะหนักในดินลูกรัง พบว่ามีค่าในช่วง 10^{-5} ถึง 10^{-6} cm²/s แสดงให้เห็นถึง การเคลื่อนที่แบบการแพร่ของสารละลายโลหะหนักทั้ง 4 ชนิด ซึ่งสอดคล้องกับรูปร่างของ Breakthrough curves ทั้ง 4 เส้น เมื่อพิจารณาค่า D อย่างละเอียดพบว่า ค่า 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
การนำวงโลหะหนักของชั้นก้นขี้มดินเหนียวบดอัด



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 การหาค่าแฟกเตอร์การหน่วงโดยคำนวณจากสัมประสิทธิ์การแบ่งที่ได้จากการทำการทดสอบแบบแบตช์ และการหาค่าแฟกเตอร์การหน่วงโดยตรงจากการทดสอบแบบสดมภ์ ดินเหนียว 2 ชนิดถูกใช้ในการทดสอบอันได้แก่ดินลูกรังและดินเหนียวมาริน โดยใช้สารละลายโลหะหนัก 3 ชนิด ได้แก่ ตะกั่ว สังกะสี และ แคดเมียม ผลการทดสอบพบว่า ดินเหนียวมารินมีความสามารถในการหน่วงมากกว่าดินลูกรัง ลำดับการหน่วงจากมากไปน้อยของดินทั้งสองชนิดต่อสารละลายโลหะหนักสอดคล้องกันและสามารถเรียงจากมากไปน้อยดังนี้ ตะกั่ว สังกะสี และ แคดเมียม นอกจากนี้ยังพบว่า ค่าแฟกเตอร์การหน่วงที่ได้จากการทดสอบแบบสดมภ์มีค่าที่ต่ำกว่าและถูกต้องมากกว่าค่าที่ได้จากการทดสอบแบบแบตช์

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

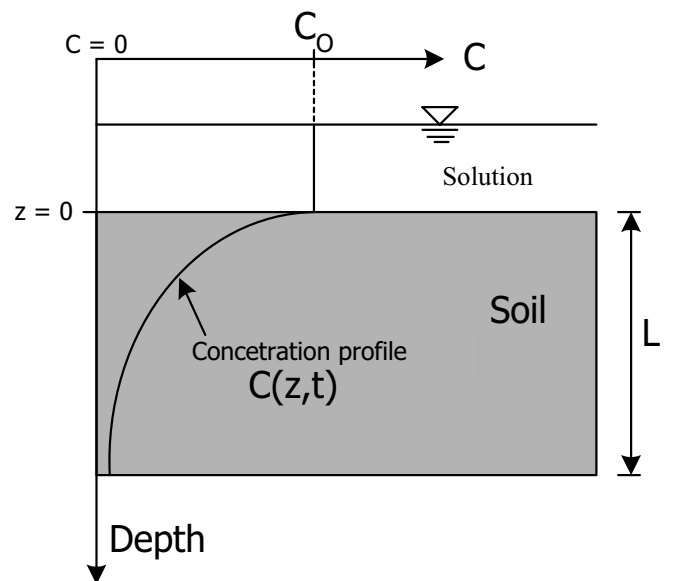
2.1 การเคลื่อนที่ของสารปนเปื้อนในดิน

การเคลื่อนที่ของสารปนเปื้อนที่เป็นสารที่มีประจุบวกในดินประกอบด้วย 2 กลไกหลัก ได้แก่ การเคลื่อนที่แบบการพา (Advection) และ การเคลื่อนที่แบบการแพร่ (Diffusion) นอกจากนั้นถ้าในดินมีประจุลบ ดินชนิดนี้ก็สามารถหน่วง (Retardation) การเคลื่อนที่ของสารปนเปื้อนเหล่านี้ได้ด้วย 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) = $\frac{V_s z}{D}$

ผลการทดสอบแบบสดมภ์สามารถนำไปคำนวณหาค่า 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 $4,000-8,000 \text{ rpm}$ 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 การทดสอบแบบสดมภ์ (Column Test)

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

เมื่อค่า K คงที่แล้ว จากนั้นทำการเปลี่ยนสารละลายที่ใช้ทดลองผ่านดินจากน้ำ DI มาเป็นสารละลายโลหะหนักผสม (Mixed Solution) ซึ่งมีความเข้มข้นของโลหะหนักแต่ละชนิดเท่ากับ 0.001 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 แล้วปิดด้วยกระจกนํ้าพิกา 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

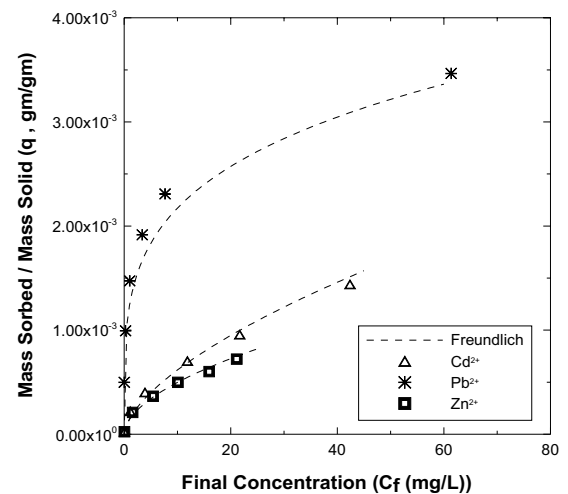
4. ผลการศึกษา

4.1 ผลการทดสอบแบบแบทช์

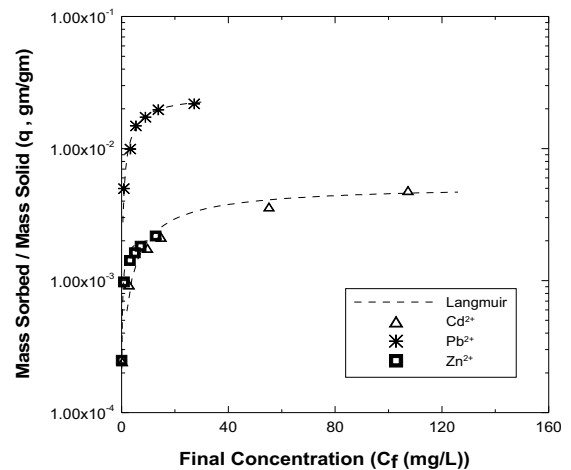
ผลการทดสอบแบบแบทช์ในรูปของไอโซเทอมแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของมวลโลหะหนักที่ถูกดูดซับต่อมวลของดินลูกรังที่ใช้ในการทดสอบ (q) และความเข้มข้นสุดท้ายของสารละลายโลหะหนักเมื่อกระบวนการดูดซับสมดุลแล้ว (Equilibrium concentration, C_f) ผลการทดลองพบว่าสมการไอโซเทอมของ Freundlich และ Langmuir สอดคล้องกับดินลูกรังและดินเหนียวตามลำดับ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

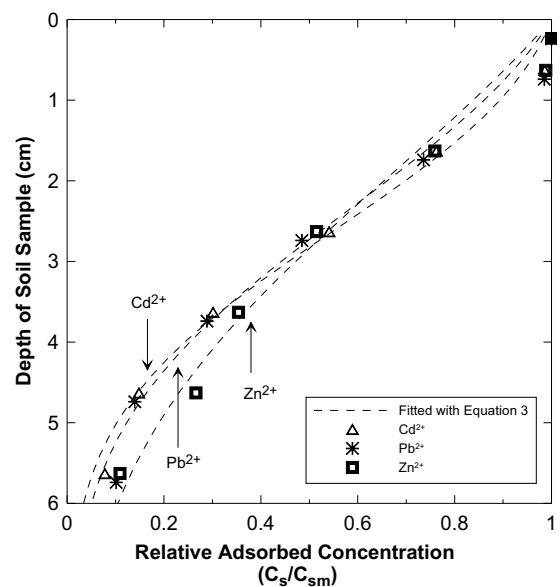
เมื่อพิต Relative adsorbed concentration profile โดยการ Trial and error ค่าพารามิเตอร์การเคลื่อนที่ R จน Relative adsorbed concentration profile ที่พิตโดยแทนค่า R ลงในสมการที่ 3 ให้ผลสอดคล้องกับ Relative adsorbed concentration profile จากผลการทดลองแบบสดมภ์ เส้นประในรูปที่ 4 และ 5 แสดง Relative adsorbed 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

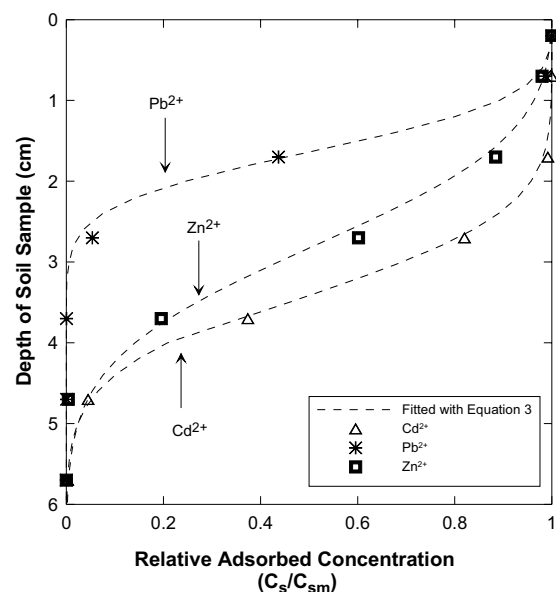
ค่า R ของดินลูกรังและดินเหนียวมาริน คำนวณจากผลการทดสอบแบบแบทช์และผลการทดสอบแบบสดมภ์โดยใช้สมการที่ 2 และ 3 ตามลำดับได้แสดงไว้ในตารางที่ 2 เมื่อเปรียบเทียบค่า R ที่คำนวณจากการทดสอบแบบแบทช์และการทดสอบแบบสดมภ์พบว่า ค่า R ที่คำนวณได้จากการทดสอบแบบสดมภ์มีค่าน้อยกว่าอย่างมากและเป็นค่าที่น่าเชื่อถือมากกว่าเพราะว่าคำนวณจากผลการทดลองการเคลื่อนที่และการดูดซับจริงของสารละลายโลหะหนักในดินบดอัด 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	Loess
	แบทช์	สดมภ์	แบทช์	สดมภ์	clay*	loam**
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 สำหรับความช่วยเหลือในการทำการทดลอง

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.