

บทที่ 2

การตรวจเอกสาร

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยนี้แบ่งออกเป็น 6 ส่วน คือ ชั้นกันซึมดินเหนียวบดอัด, Bentonite, ทฤษฎีการเคลื่อนที่ของสารปนเปื้อนในตัวกลางพรุน, การทดลองแบบสดมภ์, การทดลองแบบแบทช์และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

2.1 ชั้นกันซึมดินเหนียวบดอัด (Compacted Clay Liners) ในสถานที่ฝังกลบมูลฝอย

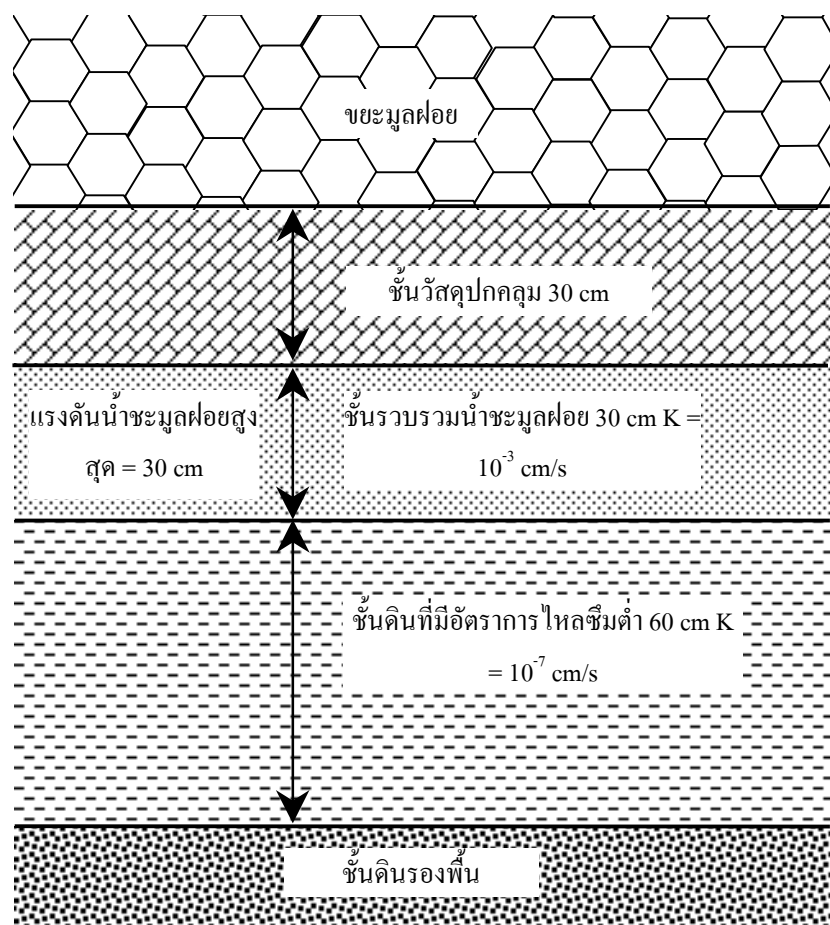
ชั้นกันซึม ซึ่งจะอยู่ด้านล่างสุดของบ่อฝังกลบในสถานที่ฝังกลบมูลฝอย ทำหน้าที่ป้องกันการไหลซึมของน้ำชะมูลฝอยสู่หน้าดินหรือปล่อยให้ น้ำชะมูลฝอยไหลซึมผ่านได้ในอัตราที่ไม่ก่อให้เกิดการปนเปื้อนของน้ำใต้ดิน จนเป็นอันตรายต่อมนุษย์ ดังนั้น ดินที่มีส่วนผสมของดินเหนียวที่บดอัดอย่างเหมาะสมจะสามารถใช้เป็นชั้นกันซึมได้ โดยกระทรวงวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม (2542) ได้แบ่งประเภทของการปูวัสดุกันซึมที่ผืน และกันบ่อฝังกลบ 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) โดยใช้แผ่นโพลีเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE) หนา 1.5 mm ขึ้นไป และชั้นด้านล่างเป็นดินบดอัดหนา 60 cm มีค่า K ของน้ำที่อิ่มตัว ต่ำกว่า 1×10^{-5} cm/s

- การใช้วัสดุกันซึมผสม (Composite Liner) มีลักษณะคล้ายกับการใช้วัสดุสังเคราะห์ชั้นเดียว ต่างกันที่จะมีค่า K ของดินที่อยู่ชั้นล่างของวัสดุสังเคราะห์ ต่ำกว่า 1×10^{-7} cm/s

การบดอัดดินคือกระบวนการที่ทำให้ดินแน่น ด้วยเครื่องมือกล เพื่อไล่อากาศออกไปจากช่องว่างระหว่างเม็ดดิน ซึ่งจะทำให้เม็ดดินอัดตัวกันแน่นขึ้น เมื่อดินมีความแน่นเพิ่มขึ้นแล้ว ก็จะสามารถรับน้ำหนักได้มากขึ้น การทรุดตัวของดินก็จะน้อยลง และยอมให้น้ำไหลซึมผ่านได้น้อยลง (มณเฑียร กังศศิเทียม, 2529)



ภาพประกอบที่ 2.1 วัสดุกันซึมแบบดินที่มีอัตราการไหลซึมต่ำ (Low Permeable Soil Liner)
(กระทรวงวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม, 2542)

การใช้ดินเหนียวที่เหมาะสมมาบดอัดจะสามารถใช้เป็น ชั้นกันซึมได้ 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

- ประจุลบที่เกิดจากการที่แทนที่แบบไอโซมอร์ฟิซ (Isomorphous Substitution) ซึ่งเป็นการเกิดประจุลบที่สำคัญที่สุด การเกิดประจุลบแบบนี้ คือ การเข้าไปแทนที่อย่างถาวรของอะตอมที่มีขนาดใกล้เคียงกัน โดยอะตอมที่มีประจุบวกน้อยกว่าจะไปแทนที่อะตอมที่มีประจุบวกมากกว่า ในกระบวนการเกิดของแร่ดินเหนียว 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 ≈ 4)	Pb > Cu > Zn > Cd	Yong and Phadungchewit (1993)
(pH ≈ 5)	Pb > Cu > Cd ≈ Zn	
(pH ≈ 6)	Pb = Cu > Zn > Cd	
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 CEC

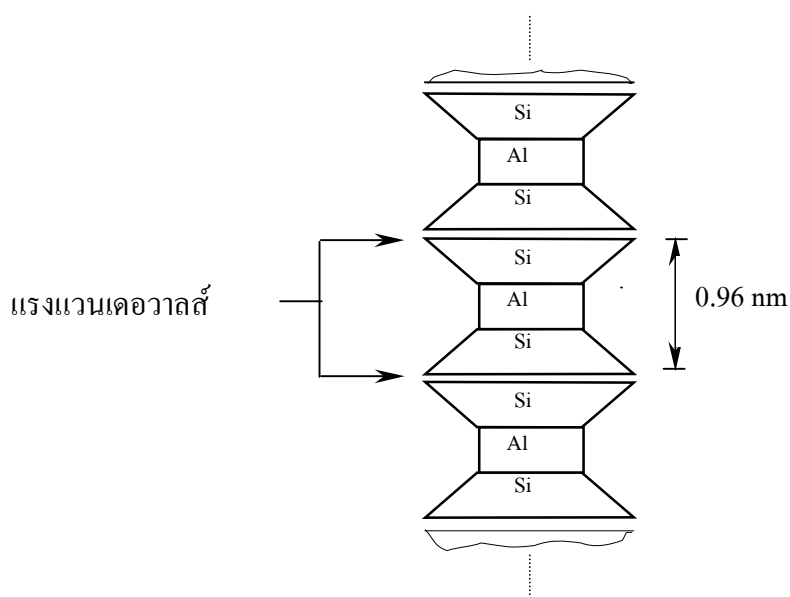
ค่า CEC ของดินเหนียวขึ้นอยู่กับชนิดของแร่ดินเหนียวที่ประกอบเป็นดินเหนียวนั้นๆ ดินเหนียวที่มี CEC มากกว่าจะสามารถดึงประจุบวกมาเคลือบที่ผิวได้มากกว่า จึงทำให้ความหนาของฟิล์มของน้ำรอบอนุภาคของดินเหนียว (Diffuse Double Layer, DDL) มากกว่าและค่ามีค่าน้อยกว่า ซึ่ง DDL จะเกิดขึ้นเมื่อดินเหนียวซึ่งมีประจุเป็นลบสัมผัสกับน้ำ ก็จะมีการดึงประจุบวกของไฮโดรเจนในน้ำและประจุบวกของโลหะที่ละลายอยู่ในน้ำเข้ามาเคลือบที่ผิวก่อให้เกิดเป็นฟิล์มรอบอนุภาคของดินเหนียว 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 ที่ผ่านกระบวนการเปลี่ยนแปลงตามธรรมชาติเป็นระยะเวลาอันยาวนาน 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) ประกอบด้วย แผ่นซิลิกา 2 แผ่น วางอยู่ด้านบนและด้านล่างของแผ่นอะลูมินา 1 แผ่น การวางเรียงตัวของโครงสร้าง 2 : 1 จำนวนหนึ่งชั้น เกิดจากการใช้ออกซิเจนร่วมกันแบบพันธะโควาเลนต์ของแผ่นซิลิกาและแผ่นอะลูมินา แต่ละชั้นมีความหนาประมาณ 0.96 นาโนเมตร แรงยึดเหนี่ยวระหว่างแผ่นซิลิกาชั้นบนและชั้นล่าง คือ แรงแวนเดอวาลส์ (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 แสดงโครงสร้างของมอนต์มอริลโลไนต์แบบ 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 ที่เกิดจากการขบถายของสัตว์เลี้ยง

- การนำไปดัดแปลงโดยทำปฏิกิริยากับกรดได้แอคทีเวตเคลย์ (Activated Clays) สำหรับใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา หรือทำปฏิกิริยากับโซดาไฟ (NaOH) เปลี่ยนจากแคลเซียมเป็นโซเดียมเบนโทไนต์ เป็นต้น

2.2. 4 แหล่งเบนโทไนต์ที่สำคัญ

ปัจจุบัน เมืองไวโอมิง (Wyoming) ประเทศสหรัฐอเมริกา เป็นแหล่งเบนโทไนต์ที่สำคัญของโลก รองลงมาได้แก่ กลุ่มประเทศอิสระที่แยกตัวจากรัสเซียเดิม (The Commonwealth of Independent States, CIS) ประเทศกรีซ เยอรมัน ญี่ปุ่น และตุรกี ตามลำดับ โดยคิดเป็นร้อยละ 84 ของกำลังการผลิตในปี 1995 สำหรับในประเทศไทย พบเบนโทไนต์ ชนิดแคลเซียมเบนโทไนต์อยู่มาก ในอำเภอชัยบาดาล จังหวัดลพบุรี (สรินทร ถิ่นปนาท, 2549)

2.3 ทฤษฎีการเคลื่อนที่ของสารปนเปื้อนในตัวกลางพรุน

สารปนเปื้อนที่ไหลปนมากับน้ำจะมุดฝอย หากสามารถเคลื่อนที่ผ่านชั้นกันซึมไปสู่ชั้นน้ำใต้ดินก็จะทำให้น้ำใต้ดินมีการปนเปื้อนได้ ดังนั้นการศึกษาการเคลื่อนที่ของสารปนเปื้อนผ่านชั้นกันซึมจึงมีความสำคัญต่อการออกแบบชั้นกันซึมที่เหมาะสม โดยการเคลื่อนที่ของสารปนเปื้อนในตัวกลางพรุน 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) ที่ต้นน้ำและท้ายน้ำ
	Δz	=	ความหนาของดิน (L)
	i	=	ความชันทางชลศาสตร์ (Hydraulic Gradient) = $\frac{\Delta H}{\Delta z}$

เวลา (t) ของการเคลื่อนที่แบบการพา ของสารปนเปื้อนผ่านชั้นกั้นซึม สามารถคำนวณได้จาก

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

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

อัตราการเคลื่อนที่ของมวลของสารปนเปื้อนที่เคลื่อนที่แบบการพา ผ่านชั้นกั้นซึมต่อหน่วยพื้นที่ (Advective Mass Flux, J_A) ซึ่งมีหน่วยเป็น M/L²t สามารถหาได้จากความสัมพันธ์

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

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

$$J_D = -D \times n \frac{\partial C}{\partial z} \quad (2.5)$$

เมื่อ J_D = อัตราการเคลื่อนที่ของมวลของสารปนเปื้อนที่เคลื่อนที่แบบการแพร่ผ่านชั้นกันซึมต่อหน่วยพื้นที่
(Diffusive Mass Flux, M/L^2t)

D = สัมประสิทธิ์การแพร่ของตัวกลาง
(Diffusion Coefficient, L^2/t)

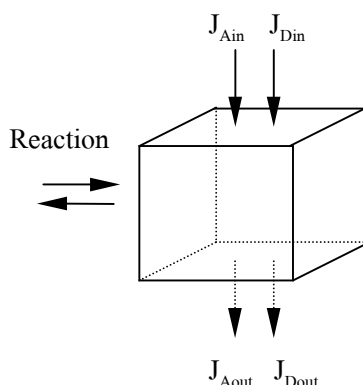
$\frac{\partial C}{\partial z}$ = อัตราส่วนการเปลี่ยนแปลงของความเข้มข้นต่อระยะทางในแนวการแพร่ (M/L^3-L)

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)

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

อัตราการเพิ่มของมวลเนื่องจากการพาสามารถแสดงได้โดยใช้ความสัมพันธ์จากสมการที่ 2.4 ดังนี้

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

อัตราการเพิ่มของมวลเนื่องจากการแพร่ สามารถแสดงโดยความสัมพันธ์จากสมการที่ 2.5 ดังนี้

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

ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้น (Reaction) เมื่อสารปนเปื้อนเคลื่อนที่ผ่านเข้าไปในดิน คือ การถูกดูดซับ (Sorption) ซึ่งเกิดจากประจุบวกของสารละลายไปยึดติดกับประจุลบในดินเหนียว อัตราการลดลงของมวลเนื่องจากการถูกดูดซับนี้สามารถเขียนได้ในรูปของความสัมพันธ์ดังนี้

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

เมื่อ M_q = มวลที่ถูกดูดซับ
 V_v = ปริมาตรของช่องว่างในดิน
 ρ_d = ความหนาแน่นแห้งของดิน
 K_p = สัมประสิทธิ์พาร์ทิชัน (Partition 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

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

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

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

ค่าคำตอบแบบ analytical ของสมการที่ 2.10 ในรูปของ $C(z,t)$ และอัตราการเคลื่อนที่ผ่านดินของมวลในสารละลายต่อหน่วยพื้นที่ (mass flux, $J(z,t)$) (Shackelford, 1990) ซึ่งใช้วิเคราะห์หาความเข้มข้นของสาร และ mass flux ที่เคลื่อนที่ผ่านชั้นดินที่เวลาใดๆ สามารถแสดงได้ดังนี้

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

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

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

2.4 การทดลองแบบสดมภ์ (Column Test)

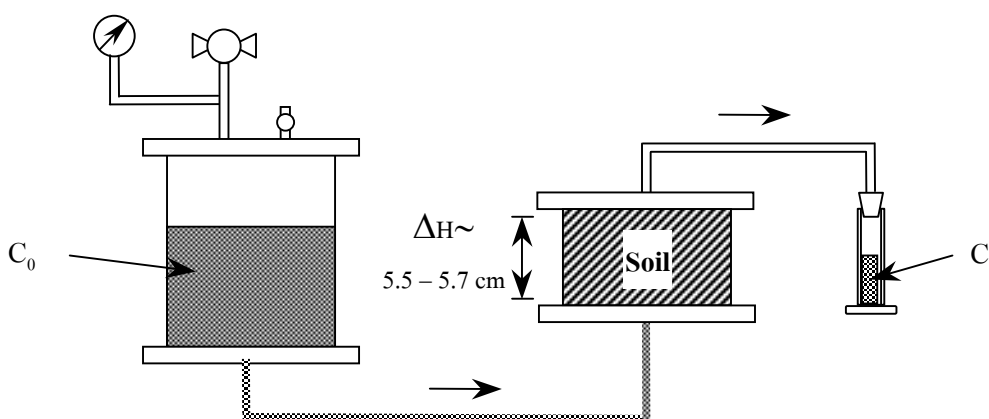
ค่าพารามิเตอร์การเคลื่อนที่สามารถหาได้จากการทดลองแบบสดมภ์ โดยมีวิธีการหาค่าพารามิเตอร์การเคลื่อนที่ได้ 2 วิธี คือ Breakthrough Curve และ Concentration Profile ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

2.4.1 การหาค่าพารามิเตอร์การเคลื่อนที่จาก Breakthrough Curve

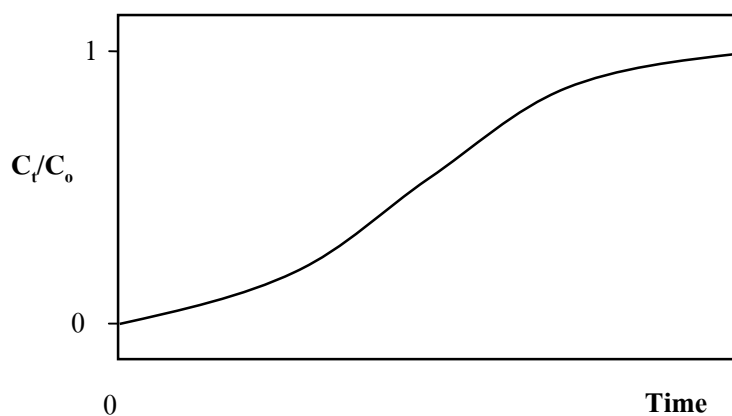
Shackelford (1994) แสดงการใช้การทดลองแบบสดมภ์ หาค่าพารามิเตอร์ของการเคลื่อนที่ คือ ค่า R, D และ n ซึ่งจำเป็นต้องใช้ในสมการที่ 2.11 หรือ 2.12 เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างการเคลื่อนที่ของสารปนเปื้อนที่ละลายอยู่ในน้ำผ่านชั้นดินที่มีขนาดเม็ดดินเล็ก เช่น ดินเหนียว ที่มีอัตราการไหลซึมต่ำ โดยเป็นการจำลองการเคลื่อนที่ของสารปนเปื้อนในสนามมาไว้ในห้องปฏิบัติการ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

บดอัดแล้ว แล้วเก็บตัวอย่างน้ำที่ปลายอีกด้านหนึ่งของตัวอย่างดิน จากนั้นจึงนำน้ำที่ได้ไปหาความเข้มข้นของสารปนเปื้อนเมื่อเวลาผ่านไป C_t แล้วนำไปหาความสัมพันธ์ของ C_t/C_0 กับเวลา

การทำให้สารละลายไหลผ่านดิน อาจจะทำให้น้ำไหลผ่านดิน โดยอาศัยแรงโน้มถ่วงของโลกหรือใช้ระบบเพิ่มความดัน เพื่อเพิ่มแรงดันน้ำ รูปแสดงการทดลองแบบสดมภ์ได้แสดงไว้ในภาพประกอบที่ 2.4 ความสัมพันธ์ของ C_t/C_0 กับเวลา “Breakthrough Curve” ดังภาพประกอบที่ 2.5



ภาพประกอบที่ 2.4 การทดลองแบบสดมภ์พร้อมด้วยอุปกรณ์เพิ่มความดันคงที่



ภาพประกอบที่ 2.5 Breakthrough Curve

การคำนวณหาค่า R , D และ n ทำโดยใช้สมการที่ 2.11 โดยการลองผิดลองถูก (Trial and Error) ซึ่งทำได้โดยเปลี่ยนค่า R , D และ n ไปเรื่อยๆ จนกว่า Breakthrough Curve ที่ได้จากการทดลองจะสอดคล้องกับ 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 วิธีการนี้ต้องใช้เวลานานมากเพื่อให้สารละลาย Breakthrough ออกมาที่ท้ายน้ำ ดังนั้น Tanchuling et al. (2003) ได้เสนอวิธีการในการหาค่าพารามิเตอร์ตามสมการที่ 2.11 โดยใช้ Concentration Profile โดยการให้สารละลายที่ทราบความเข้มข้นไหลผ่านตัวอย่างดิน แล้วตรวจวัดความเข้มข้นสุดท้ายของโลหะหนักจากการสกัดโลหะหนักออกจากตัวอย่างดินที่แบ่งเป็นชั้นๆ (C_s) โดยความเข้มข้นของโลหะหนักที่ตรวจวัดได้ (C_{measured}) สามารถนำไปคำนวณตามสมการที่ 2.13 ดังนี้

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

เมื่อ	C_s	=	ความเข้มข้นของโลหะหนักที่ถูกดูดซับในดินที่แบ่งเป็นชั้นๆ (mg/g)
	C_{measured}	=	ความเข้มข้นของโลหะหนักที่ตรวจวัดได้จากเครื่อง Atomic Absorption Spectrophotometer (mg/L)
	Volume (liquid)	=	ปริมาตรของสารละลายกรดทั้งหมดที่ใช้ เท่ากับ 56 mL
	m_{soil}	=	น้ำหนักดินแห้งที่ใช้ในการย่อยด้วยกรด เท่ากับ 0.5 g

นำค่า C_s ที่ได้จากสมการที่ 2.13 ไปคำนวณอัตราส่วนระหว่างความเข้มข้นของโลหะหนักที่ถูกดูดซับในดิน (C_s) ต่อความเข้มข้นสูงสุดของโลหะหนักที่ถูกดูดซับ (C_{sm}) ของโลหะหนักในบริเวณดินชั้นแรก (ลึกประมาณ 0.7 cm) ที่ได้จากการทดลองแบบสดมภ์ 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, D และ n ไปเรื่อยๆ จนกว่า Concentration Profile ที่ได้จากการทดลองจะสอดคล้องกับ Concentration Profile จากการคำนวณ

2.5 การทดลองแบบแบทช์ (Batch Adsorption Test)

กระบวนการดูดซับที่ผิว (Adsorption) คือกระบวนการที่ไอออนหรือโมเลกุลที่อยู่ในสถานะหนึ่งพยายามที่จะรวมตัวกันแน่นและเข้มข้นที่บริเวณผิวของสารในอีกสถานะหนึ่ง โดยไม่มีการเปลี่ยนแปลงสถานะ ตัวอย่างเช่น การที่ไอออนลบของสารละลายอนินทรีย์ถูกดูดซับที่ผิวของดินเหนียว โดยความสามารถในการดูดซับผิวของดินจะขึ้นอยู่กับชนิดของดินและชนิดของสารละลาย ซึ่งสามารถแสดงได้ในรูปของสัมประสิทธิ์พาร์ทิชัน

มวลของสารละลายที่ถูกดูดซับผิว (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) ระหว่างมวลของสารละลายที่ถูกดูดซับผิว (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

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

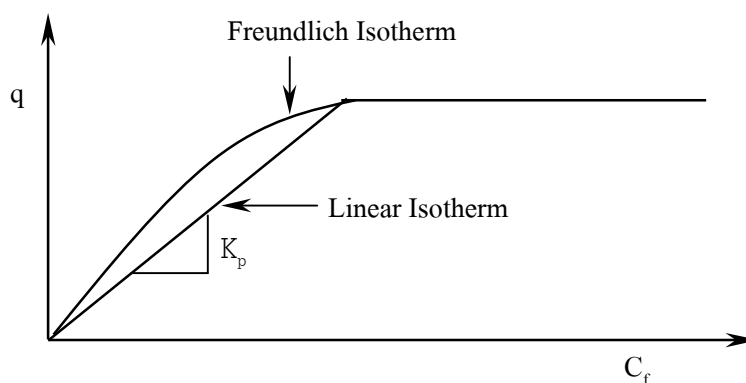
เมื่อ K_F = สัมประสิทธิ์พาร์ทิชันของ Freundlich Isotherm (L/kg)

$1/n$ = ค่าคงที่ที่แสดงถึงการขึ้นตรงกับความเข้มข้นของ
สารละลาย Correction Factor

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

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

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 แสดงว่าสารละลายถูกยึดติดที่ผิวของดินจนถึงค่าความสามารถการดูดติดที่ผิวของดินแล้วไม่สามารถดูดเพิ่มได้อีก เรียกว่า ความสามารถในการดูดติดผิวของดิน (Sorption Capacity of Soil)

Langmuir ได้เสนอสมการไอโซเทอมที่อธิบายการดูดติดผิวแบบชั้นเดียว โดยมีสมมติฐานว่า โมเลกุลจะถูกดูดติดผิวบนพื้นที่ผิวที่จำกัดของการดูดติดผิว ซึ่งแต่ละพื้นที่ที่ถูกดูดติด

ผิวจะเกิดการดูดติดผิวเพียงชั้นเดียว โดยทุกพื้นผิวของตัวดูดติดผิวจะมีพลังงานในการดูดติดผิวคงที่ และโมเลกุลที่ถูกดูดมาติดที่พื้นผิวจะไม่สามารถเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระ เรียกว่า Langmuir Isotherm มีสมการดังนี้

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

จากสมการที่ 2.18 นำมาจัดสมการในรูปแบบสมการเส้นตรงจะได้

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

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

2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

อาทิพย์ ฉลองจันทร์ (2545) ได้ศึกษาการหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่-การกระจาย และค่าตัวประกอบความหน่วงของการเคลื่อนที่ของสารละลายเกลือผ่านดิน โดยใช้สมการพื้นฐาน advection-dispersion ซึ่งใช้วิธีทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของน้ำเกลือที่ผสมน้ำดัมกับเกลือสินเธาว์ บริสุทธิ์มีค่าความเค็มประมาณ 180 mS/cm ขึ้นไปตามช่องว่างของดินในท่อ PVC ด้วยแรง capillary โดยใช้ดินเค็มในจังหวัดขอนแก่นและจังหวัดมหาสารคามรวม 3 แห่ง ซึ่งมีเนื้อดินต่างกัน ได้แก่ ดินเนื้อหยาบ (loamy sand) ปานกลาง (sandy loam) และละเอียด (clay loam) จากบ้านหนองเขื่อน อำเภอกุสุมาลย์ จังหวัดมหาสารคาม บ้านดอนหัน และบ้านโคกกลาง อำเภอมือทอง จังหวัดขอนแก่น ตามลำดับ พบว่า ได้ค่า D เฉลี่ยเท่ากับ 0.0005 ± 26 , 0.0011 ± 109 และ 0.0003 ± 23 cm^2/s ตามลำดับ สำหรับค่า R ได้ค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.195 ± 0.072 , 0.230 ± 0.149 และ 0.164 ± 0.125 ตามลำดับ

Amatya and Takemura (2002) ได้ศึกษาการเคลื่อนที่ของสารปนเปื้อนที่ไม่ทำปฏิกิริยา (เช่น คลอไรด์) ในชั้นดินเหนียวกรุงเทพฯ โดยใช้วิธี Finite difference บนโปรแกรม Modflow และ MT3DMS โดยตั้งสมมติฐานว่า ค่า $D = 5 \times 10^{-6}$ cm^2/s และ $R=1$, และ $K=1 \times 10^{-8}$ cm/s พบว่าดิน

เหนียวธรรมชาติ (ไม่ต้องบดอัด) ในชั้นดินเหนียวกรุงเทพฯ ที่มีความหนา 12 เมตร สามารถใช้เป็นชั้นกันซึมธรรมชาติได้เป็นอย่างดี โดยจะมีสารปนเปื้อนที่ไม่ทำปฏิกิริยากลิ่่นที่ผ่านได้น้อยมาก

Gleason et al. (1997) ได้ศึกษาการใช้ทรายผสมเบนโทไนด์ เพื่อลดค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้ไหลซึมโดยใช้หลักที่ว่า เบนโทไนด์ซึ่งประกอบด้วยแร่หลักคือ montmorillonite สามารถทำให้ ทรายผสมเบนโทไนด์ มีค่า K ลดลงอย่างมากเมื่อเทียบกับค่านี้ของทรายที่ไม่ได้ผสมเบนโทไนด์ คุณสมบัติของ montmorillonite คือ 1) มีค่า cation exchange capacity สูง 2) มีค่า specific surface area สูง 3) มีความสามารถในการพองตัวสูง และ 4) มีค่า K ต่ำ จากผลการทดลองของ Gleason et al. (1997) พบว่าทรายที่มีค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่าน ประมาณ 1×10^{-5} cm/s เมื่อผสมกับเบนโทไนด์ไม่น้อยกว่า 5 % โดยน้ำหนัก แล้วบดอัดด้วยวิธี Standard Proctor (ASTM D698) ด้วยความชื้นของทรายผสมเบนโทไนด์ประมาณ 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 ผลการทดลองที่ได้แสดงถึงแร่ดินเหนียวมีคุณสมบัติในการดูดซับโลหะหนักได้ดี

Li and Li (2001) ได้ศึกษาการดูดซับโลหะหนักของเบนโทไนด์ และดินในธรรมชาติ 2 ชนิด และศึกษาค่า K ของดินผสม 3 ชนิด คือ ทรายผสมเบนโทไนด์ ในอัตราส่วนทรายต่อเบนโทไนด์ 100 : 8 โดยน้ำหนัก, ทรายต่อเบนโทไนด์กับ forest soil ในอัตราส่วน 100 : 7: 1 โดยน้ำหนัก และทรายต่อเบนโทไนด์กับ spruce bark ในอัตราส่วน 100 : 7: 1 โดยน้ำหนัก มีค่า i อยู่ระหว่าง 65 - 88 โดยทดสอบกับ Pb, Cu และ Cd พบว่า ความสามารถในการดูดซับของ forest soil > เบนโทไนด์ = spruce bark โดยลำดับการดูดซับของดินทั้ง 3 ชนิดจะสามารถดูดซับ $Pb > Cu > Cd$ ตามลำดับ ค่า K ของทุกการทดลองอยู่ที่ประมาณ 3.3×10^{-7} cm/s สำหรับชุดการทดลองควบคุมจะใช้ $Ca(NO_3)_2$ เข้มข้น 0.01 mol เป็นสารละลายทดลอง มีค่า K เมื่อเริ่มการทดลองต่ำกว่า 4×10^{-9} cm/s ใช้ระยะเวลาในการทดลองประมาณ 1 - 2 เดือน

Kim et al. (1997) ได้ศึกษาคุณสมบัติของ Kirby Lake Till ที่ได้จาก Outagamie County Landfill เมือง Appleton มลรัฐ Wisconsin พบว่า มีค่า PI = 17%, ค่า LL = 33%, P200 = 83% และ CEC = 2.3 meq/100g ทำการบดอัดดินเพื่อทำการทดลองแบบสดมภ์โดยให้สาร

ละลายโบรมไนด์ (Br^-) เคลื่อนที่ผ่าน Kirby Lake Till ที่บดอัดแล้ว จากนั้นทำการวัดค่าความเข้มข้นของสารละลาย Br^- ที่ท้ายน้ำเทียบกับเวลา แล้วหาค่าคำตอบของสมการที่ 2.10 เทียบกับค่าความเข้มข้นของสารละลาย Br^- จากการทดลอง พบว่า ค่า D และ R ของสารละลาย Br^- ใน Kirby Lake Till มีค่าเท่ากับ $4.5 \times 10^{-5} \text{ cm}^2/\text{s}$ และ 1.0 ตามลำดับ

Shackelford (1990) ได้ศึกษาความเหมาะสมของดินเหนียวลัฟกิน (Lufkin Clay) ซึ่งเป็นดินเหนียวท้องถิ่นเพื่อนำมาสร้างเป็นชั้นกันซึมในบ่อฝังกลบมูลฝอยในมลรัฐเท็กซัส, สหรัฐอเมริกา โดยศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพของดิน พบว่า มีค่า $\text{PI} = 42\%$, ค่า $\text{LL} = 56\%$, $\text{P200} = 82\%$ และ $\text{CEC} = 25 \text{ meq}/100\text{g}$ และทำการทดลองบดอัดดินด้วยวิธีการทดลองแบบสดมภ์เพื่อหาค่าพารามิเตอร์การเคลื่อนที่ การทดลองทำได้โดยใช้น้ำชะมูลฝอยสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นของ 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 โลหะหนักทั้ง 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 ด้วยวิธีการทดลองแบบสดมภ์ โดยให้สารละลายที่มีความเข้มข้นของ Zn เท่ากับ 450 mg/L มาไหลผ่านดิน Illite Clay ที่บดอัดแล้ว โดยกำหนดค่าให้ค่า $i = 49 - 163$ ใช้ระยะเวลาทดลอง 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 $4.80 \times 10^{-8} - 8.00 \times 10^{-8} \text{ cm/s}$

วิศวา คงนคร (2546) ได้ศึกษาลักษณะการเคลื่อนตัวของเบนซีนในชั้นน้ำใต้ดิน รวมถึงศึกษาความสามารถในการดูดซับเบนซีน โดยใช้ตัวอย่างดินในเขตพื้นที่นิคมอุตสาหกรรมมาบตาพุด จังหวัดระยอง ทำการทดลองแบบกะ แบบคอลัมน์และวิเคราะห์โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์จำลองการเคลื่อนตัวของเบนซีนในชั้นน้ำใต้ดิน พบว่า ความสามารถในการดูดซับเบนซีนบนผิวดินที่สมดุลเป็นไอโซเทอมแบบเชิงเส้น มีค่าคงที่การดูดซับเป็น $0.5444 \text{ cm}^3/\text{g}$ ส่งผลให้ค่าคงที่ของการหน่วง (R) เป็น 5.43 สำหรับการทดลองแบบคอลัมน์เพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์การกระจาย

ตัว (D) ของดินด้วยสารละลายโบรไมด์ พบว่า ลักษณะการเคลื่อนที่เป็นแบบสมมูลมีค่า D อยู่ใน ช่วง 0.0088-0.0116 cm^2/s และผลการจำลองการเคลื่อนตัวของเบนซีนด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ พบว่า มีความแตกต่างกับผลการทดลองจริงแบบคอลัมน์ ซึ่งสามารถอธิบายด้วยการเคลื่อนที่แบบ ไม่สมมูล

Kim et al. (2001) ได้ศึกษาการเคลื่อนที่ของ Volatile Organic Compounds (VOCs) ผ่านชั้นดินเหนียวบดอัด โดยทำการทดลองในระดับห้องปฏิบัติการด้วยการทดลองแบบ สดมภ์และ 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 ของการทดลอง ถึงวันที่ 116 ของการทดลอง ค่าสัมประสิทธิ์พาร์ทิชันของดิน-สารละลาย VOCs ทั้ง 7 ชนิด มีความสัมพันธ์ กันในเชิง logarithm อย่างมากกับค่าสัมประสิทธิ์พาร์ทิชันของ Octanal-น้ำ การเปลี่ยนแปลงของ ค่า K ไม่มีนัยสำคัญกับค่าสัมประสิทธิ์การแพร่เชิงกล สำหรับค่า D โดยส่วนใหญ่อยู่ในช่วง $10^{-6} \text{ cm}^2/\text{s}$ และจะลดลงเมื่อความสามารถในการละลายน้ำของสารแต่ละชนิดเพิ่มขึ้น อนึ่งการ รักษาความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลาย VOCs เป็นสิ่งที่สำคัญมากต่อการหาค่าพารามิเตอร์ การเคลื่อนที่ เพราะต้องใช้ระยะเวลาในการทดลอง ซึ่งทำให้ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลาย VOCs ลดลงได้