

บทที่ 2

การตรวจเอกสาร

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

2.1 ชั้นกันซึมดินเหนียวบดอัด (Compacted clay liners) ในสถานที่ฝังกลบมูลฝอย

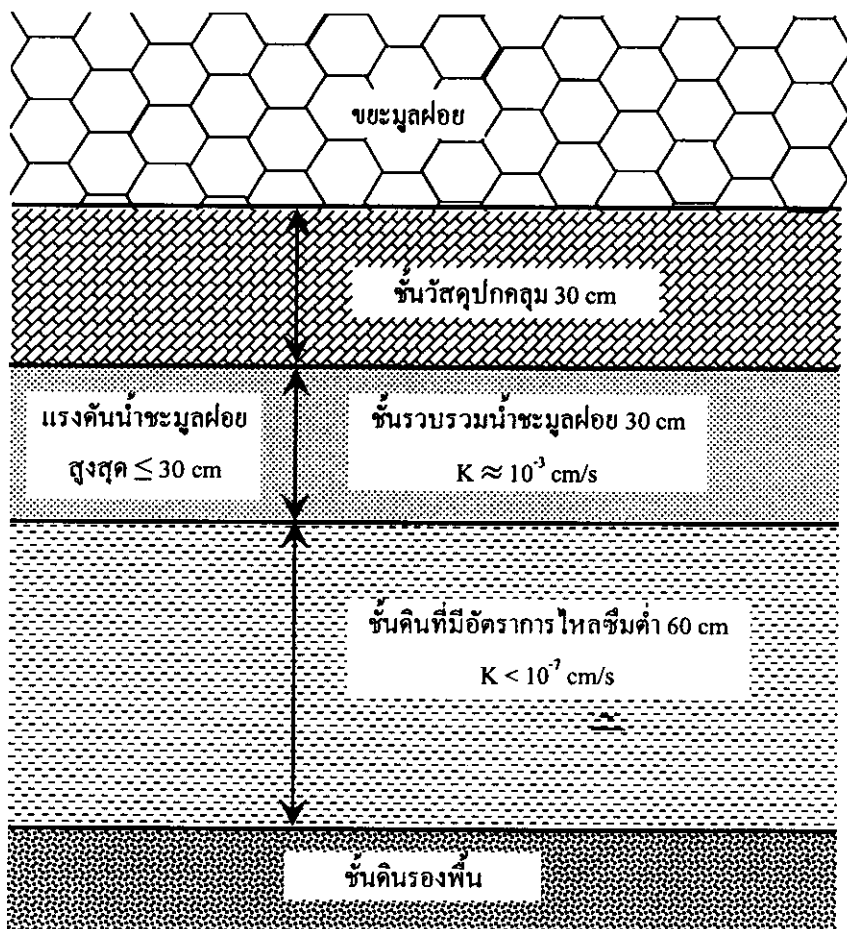
ชั้นกันซึมซึ่งจะอยู่ด้านล่างสุดของบ่อฝังกลบ ในสถานที่ฝังกลบมูลฝอย ทำหน้าที่ป้องกันการไหลซึมของน้ำชะมูลฝอยสู่น้ำใต้ดินหรือปล่อยให้ น้ำชะมูลฝอยไหลซึมผ่านได้ในอัตราที่ไม่ก่อให้เกิดการปนเปื้อนของน้ำใต้ดินจนเป็นอันตรายต่อมนุษย์ ดังนั้นดินที่มีส่วนผสมของดินเหนียวที่บดอัดอย่างเหมาะสมจะสามารถใช้เป็นชั้นกันซึมได้ โดยกระทรวงวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม (2542) ได้แบ่งประเภทของการปูวัสดุกันซึมที่ผนังและกั้นบ่อฝังกลบ 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 ซึ่งจะช่วยให้เม็ดดินอัดตัวกันแน่นขึ้น เมื่อดินมีความแน่นเพิ่มขึ้นแล้ว ก็จะสามารถรับน้ำหนักได้มากขึ้น การทรุดตัวของดินก็จะน้อยลง และยอมให้น้ำไหลซึมผ่านได้น้อยลง (มณเฑียร กังศศิเทียม, 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 มีความเหนียวและมีความเป็นพลาสติกสาเหตุที่ทำให้แร่ดินเหนียวมีประจุเป็นลบสามารถสรุปได้ดังนี้

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

- ประจุลบในแร่ดินเหนียวที่เกิดจากการสลายของแรงยึดเหนี่ยว (Broken bond) ที่ยึดแผ่นซิลิกาหรือแผ่นอะลูมินาไว้ด้วยกัน แต่ปรากฏการณ์แบบนี้จะให้ประจุลบไม่ถาวร เพราะแผ่นซิลิกาหรือแผ่นอะลูมินาอาจจะรวมตัวกันใหม่

=

ความสามารถของดินแต่ละชนิดในการดูด โลหะหนักมาติดที่ผิวมีความแตกต่างกันตามชนิดและปริมาณของแร่ดินเหนียวที่มีอยู่ในดิน โดยจากการรวบรวมข้อมูลของ Yong (2000) สามารถแยกลำดับการดูดซับ โลหะหนัก ตามช่วง pH ของน้ำตัวอย่าง ดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ลำดับการดูดซับ โลหะหนักตามชนิดของแร่ดินเหนียว (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 ความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวก (Cation exchange capacity)

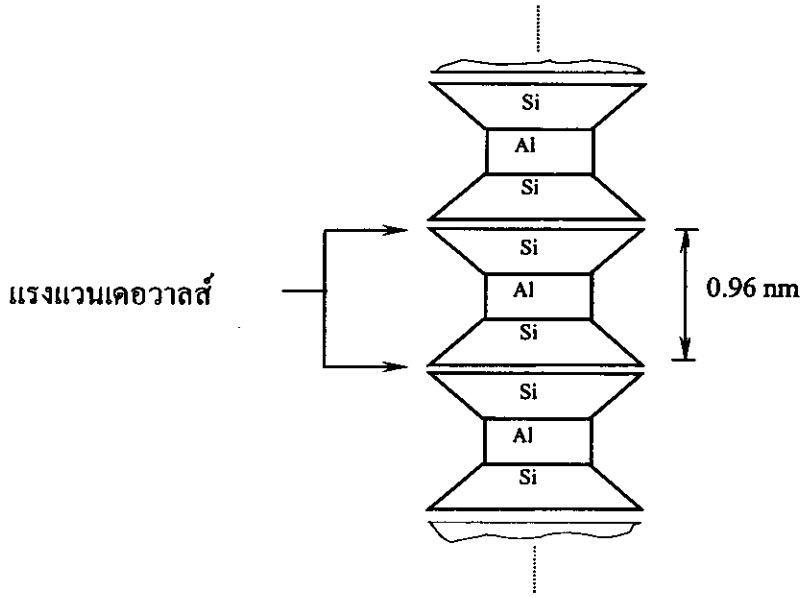
ค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวก (Cation exchange capacity, CEC) ของดินเหนียวขึ้นอยู่กับชนิดของแร่ดินเหนียวที่ประกอบเป็นดินเหนียวนั้นๆ ดินเหนียวที่มี CEC มากกว่าจะสามารถดึงประจุบวกมาเคลือบที่ผิวได้มากกว่า จึงทำให้ความหนาของฟิล์มของน้ำรอบอนุภาคของดินเหนียว (Diffuse double layer, DDL) มากกว่าและค่ามีค่าน้อยกว่า 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 ที่ผ่านกระบวนการเปลี่ยนแปลงตามธรรมชาติเป็นระยะเวลาอันยาวนาน จนเกิดเป็นดินที่มีคุณสมบัติการขยายตัวของตัวสูง ซึ่งมีองค์ประกอบของมอนต์มอริลโลไนต์ เป็นแร่ดินเหนียวหลัก รองลงมาได้แก่ ซิลิกาอนไดออกไซด์ 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 จำนวนหนึ่งชั้นเกิดจากการใช้ออกซิเจนร่วมกันแบบพันธะโควาเลนต์ของแผ่นซิลิกาและแผ่นอะลูมินา แต่ละชั้นมีความหนาประมาณ 0.96 นาโนเมตร แรงยึดเหนี่ยวระหว่างแผ่นซิลิกาชั้นบนและชั้นล่าง คือ แรงแวนเดอวาลส์ (Van de waals forces) ซึ่งเป็นแรงที่อ่อนมาก น้ำและไอออนสามารถเข้าไปแทรกระหว่างชั้นของโครงสร้าง 2 : 1 และแบ่งให้ขาดออกจากกันได้ มอนต์มอริลโลไนต์มีความสามารถในการดึงดูน้ำได้สูงมาก 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

- การนำไปดัดแปลงโดยทำปฏิกิริยากับกรดได้ออกติเวคเคลสต์ (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 ในอำเภอชัยบาดาล จังหวัดลพบุรี (สรินทร 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)

โดยค่าความเร็วของคาร์ซี 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) ที่ดินน้ำและท้ายน้ำ
	Δz	=	ความหนาของดิน (L)
	i	=	ความชันทางชลศาสตร์ (Hydraulic gradient) $= \frac{\Delta H}{\Delta z}$

เวลา (t) ของการเคลื่อนที่ในระยะทาง L แบบการพาของสารปนเปื้อนผ่านชั้นกันซึม สามารถคำนวณได้จาก

$$t = \frac{L}{v_s} = \frac{Ln}{Ki} \quad (2.3)$$

เมื่อ L = ความหนาของตัวอย่างดิน (L)

อัตราการเคลื่อนที่ของมวลของสารปนเปื้อนที่เคลื่อนที่แบบการพาผ่านชั้นกันซึมต่อหน่วยพื้นที่ (Advective mass flux, J_A) ซึ่งมีหน่วยเป็น M/L^2 สามารถหาได้จากความสัมพันธ์

$$J_A = CV_s = \frac{KiC}{n} \quad (2.4)$$

เมื่อ C = ความเข้มข้นของสารปนเปื้อน (M/L^3)

2.3.2 กระบวนการเคลื่อนที่แบบการแพร่ (Diffusion)

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

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

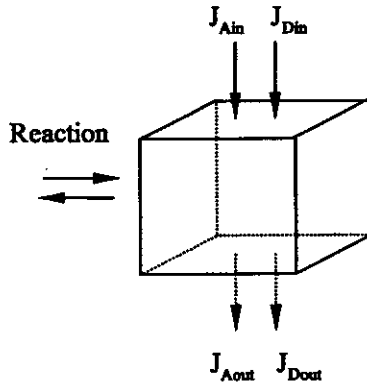
เมื่อ	J_D	=	อัตราการเคลื่อนที่ของมวลของสารปนเปื้อนที่เคลื่อนที่แบบการแพร่ผ่านชั้นกั้นซึมต่อหน่วยพื้นที่ (Diffusive mass flux, M/L^2t)
	D	=	สัมประสิทธิ์การแพร่ของตัวกลาง (Diffusion coefficient, L^2/t)
	$\frac{\partial c}{\partial z}$	=	อัตราส่วนการเปลี่ยนแปลงของความเข้มข้นต่อระยะทางในแนวการแพร่ (M/L^3L)

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 โดยอัตราการเพิ่มของมวลในหน่วยปริมาตรสามารถอธิบายได้โดยใช้สมการกฏทรงมวล ในสมการที่ 2.6



ภาพประกอบที่ 2.3 กฎทรงมวลของการเคลื่อนที่ของสารปนเปื้อนในหน่วยปริมาตร
(Shackelford, 1993)

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

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

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

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 สามารถหาได้จากการทำการทดสอบแบบแบทช์หรือแบบสแตมภ์

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

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

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

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

2.4 การทดสอบแบบสดมภ์ (Column Test)

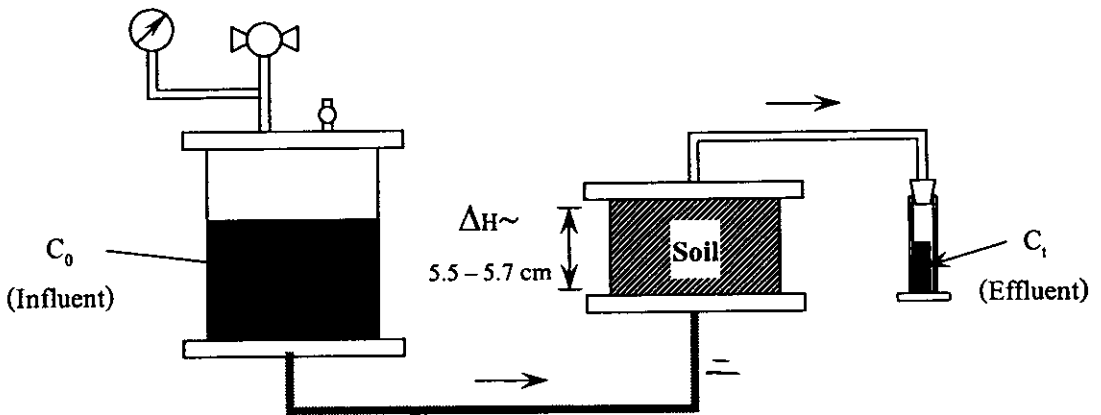
ค่าพารามิเตอร์การเคลื่อนที่สามารถหาได้จากการทดสอบแบบสดมภ์ โดยมีวิธีการหาค่าพารามิเตอร์การเคลื่อนที่ได้ 2 วิธี คือ Breakthrough curve และ Concentration profile ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

2.4.1 การหาค่าพารามิเตอร์การเคลื่อนที่จาก Breakthrough curve

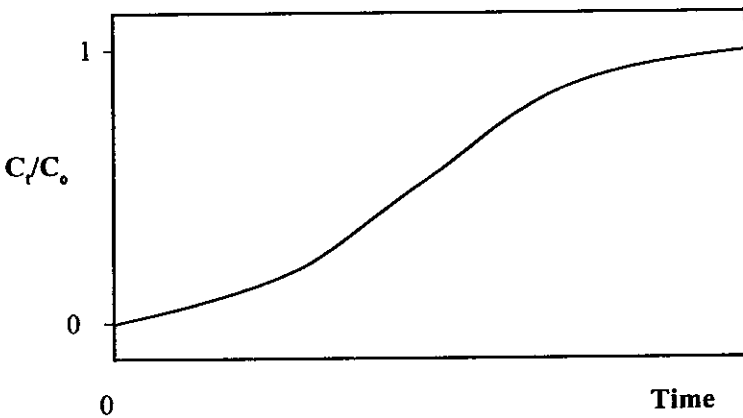
Shackelford (1994) แสดงการใช้การทดสอบแบบสดมภ์ หาค่าพารามิเตอร์ของการเคลื่อนที่ คือ ค่า R และ D ซึ่งจำเป็นต้องใช้ในสมการที่ 2.11 หรือ 2.12 เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างการเคลื่อนที่ของสารปนเปื้อนที่ละลายอยู่ในน้ำผ่านชั้นดินที่มีขนาดเม็ดดินเล็ก เช่น ดินเหนียว ที่มีอัตราการไหลซึมต่ำ โดยเป็นการจำลองการเคลื่อนที่ของสารปนเปื้อนในสนามมาไว้ในห้องปฏิบัติการ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

บดอัดแล้ว แล้วเก็บตัวอย่างน้ำที่ปลายอีกด้านหนึ่งของตัวอย่างดินเทียบกับเวลา จากนั้นจึงนำน้ำที่ได้ไปหาความเข้มข้นของสารปนเปื้อนเมื่อเวลาผ่านไป (C_t) แล้วนำไปหาความสัมพันธ์ของ C_t/C_0 กับเวลา

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



ภาพประกอบที่ 2.4 การทดสอบแบบสดมภ์พร้อมด้วยอุปกรณ์เพิ่มแรงดันคงที่



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_s 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

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

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) ต่อความเข้มข้นสูงสุดของโลหะหนักที่ถูกดูดติดผิว (C_{sm}) ของโลหะหนักในบริเวณดินชั้นแรก (ลึกประมาณ 0.7 cm) ที่ได้จากการทดสอบแบบสมดุล 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 การทดสอบแบบแบทช์ (Batch adsorption test)

กระบวนการดูดซับที่ผิว (Adsorption) คือกระบวนการที่ไอออนหรือโมเลกุลที่อยู่ ในสถานะหนึ่งพยายามที่จะรวมตัวกันแน่นและเข้มข้นที่บริเวณผิวของสารในอีกสถานะหนึ่ง โดยไม่มีการเปลี่ยนแปลงสถานะ ตัวอย่างเช่น การที่ไอออนลบของสารละลายอนินทรีย์ถูกดูดซับที่ ผิวของดินเหนียว โดยความสามารถในการดูดซับผิวของดินจะขึ้นอยู่กับชนิดของดินและชนิดของ สารละลาย 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) ต่อ น้ำหนักของดินที่ใช้ (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

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

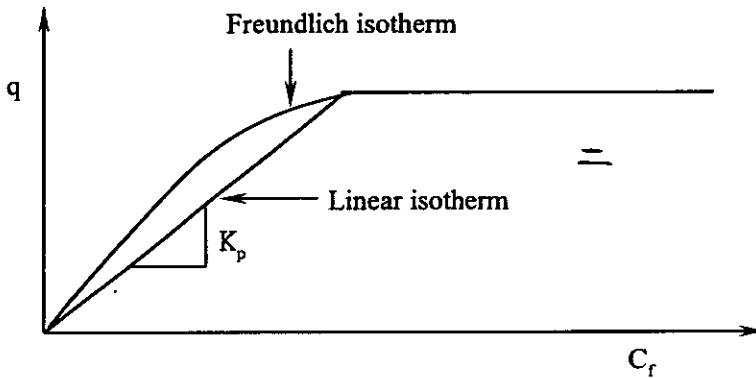
เมื่อ	K_F	=	สัมประสิทธิ์พาร์ทิชันของ Freundlich (L/kg)
-------	-------	---	--

$1/n$ = ค่าคงที่ที่แสดงถึงการขึ้นตรงกับความเข้มข้นของ
สารละลาย 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 แสดงว่าสารละลายถูกยึดติดที่ผิวของดินจนถึงค่าความสามารถการดูดติดที่ผิวของดินแล้วไม่สามารถดูดเพิ่มได้อีก 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 ซึ่งใช้วิธีทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของน้ำเกลือที่ผสมน้ำต้มกับเกลือสินเธาว์ 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 บ้านดอนหัน และบ้านโคกกลาง อำเภอเมือง จังหวัดขอนแก่น ตามลำดับ พบว่าได้ค่า 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 และ 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 พบว่า ดินเหนียวธรรมชาติ (ไม่ต้องบดอัด) ในชั้นดินเหนียวกรุงเทพฯ ที่มีความหนา 12 เมตร สามารถใช้เป็นชั้นกั้นซึมธรรมชาติได้เป็นอย่างดี โดยจะมีสารปนเปื้อนที่ไม่ทำปฏิกิริยาเคลื่อนที่ผ่านได้น้อยมาก

Gleason et al. (1997) ได้ศึกษาการใช้ทรายผสมเบนโทไนต์ เพื่อลดค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้ไหลซึม โดยใช้หลักที่ว่า 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 ที่เป็น โลหะหนัก 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 ผลการทดสอบที่ได้แสดงถึงแนวโน้มมีคุณสมบัติในการดูดซับโลหะหนักได้ดี

—

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 i 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 พบว่า มีค่า PI = 17%, ค่า LL = 33%, P200 = 83% และ CEC = 2.3 meq/100g ทำการบดอัดดินเพื่อทำการทดสอบแบบผสมกันโดยใช้ สารละลายโบรไมด์ (Br⁻) เคลื่อนที่ผ่าน Kirby Lake Till ที่บดอัดแล้ว จากนั้นทำการวัดค่าความเข้มข้นของสารละลาย Br⁻ ที่ทำน้ำเทียบกับเวลา แล้วหาค่าคำตอบของสมการที่ 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 (Luftkin clay) ซึ่งเป็นดินเหนียวท้องถิ่นเพื่อนำมาสร้างเป็นชั้นกันซึมในบ่อฝังกลบมูลฝอยในมลรัฐเท็กซัส, สหรัฐอเมริกา โดยศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพของดิน พบว่ามีค่า PI = 42%, ค่า LL = 56%, P200 = 82% และ CEC = 25 meq/100g และทำการทดสอบบดอัดดินด้วยวิธีการทดสอบแบบสดมภ์ เพื่อหาค่าพารามิเตอร์การเคลื่อนที่ การทดสอบทำได้โดยใช้น้ำชะมูลฝอยสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นของ คลอไรด์ (Cl⁻), โพแทสเซียม (K⁺), สังกะสี (Zn²⁺) และแคดเมียม (Cd²⁺) 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 3.0×10^{-6} cm²/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 $3.08 \times 10^{-7} - 103 \times 10^{-7}$ cm²/s มีค่า R ตั้งแต่ 1.82 - 16.30 ค่า n อยู่ในช่วง 0.6-0.7 โดยมีค่า K ประมาณ $4.80 \times 10^{-8} - 8.00 \times 10^{-8}$ cm/s

วัสสา กงนกร (2546) ได้ศึกษาลักษณะการเคลื่อนตัวของเบนซีนในชั้นน้ำใต้ดิน รวมถึงศึกษาความสามารถในการดูดซับเบนซีน โดยใช้ตัวอย่างดินในเขตพื้นที่นิคมอุตสาหกรรม มาบตาพุด จังหวัดระยอง ทำการทดสอบแบบกะ แบบคอลัมน์และวิเคราะห์โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์จำลองการเคลื่อนตัวของเบนซีนในชั้นน้ำใต้ดิน พบว่า ความสามารถในการดูดซับเบนซีนบนผิวดินที่สมดุลเป็นไอโซเทอมแบบเชิงเส้น มีค่าคงที่การดูดซับเป็น 0.5444 cm³/g ส่งผลให้ค่าคงที่ของการหน่วง (R) เป็น 5.43 สำหรับการทดสอบแบบคอลัมน์เพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์การกระจายตัว (D) ของดินด้วยสารละลายโบรไมด์ พบว่า ลักษณะการเคลื่อนที่เป็นแบบสมดุลมีค่า D อยู่ในช่วง 0.0088-0.0116 cm²/s และผลการจำลองการเคลื่อนตัวของเบนซีนด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ พบว่า มีความแตกต่างกับผลการทดสอบจริงแบบคอลัมน์ ซึ่งสามารถอธิบายด้วยการเคลื่อนที่แบบไม่สมดุล

Kim et al. (2001) ได้ศึกษาการเคลื่อนที่ของ Volatile organic compounds (VOCs) ผ่านชั้นดินเหนียวคอดัด โดยทำการทดสอบในระดับห้องปฏิบัติการด้วยการทดสอบแบบสควมภ์ 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 การเปลี่ยนแปลงของค่า K ไม่มีนัยสำคัญกับค่าสัมประสิทธิ์การแพร่เชิงกล สำหรับค่า D โดยส่วนใหญ่อยู่ในช่วง 10^{-6} cm²/s และจะลดลงเมื่อความสามารถในการละลายน้ำของสารแต่ละชนิดเพิ่มขึ้น อนึ่งการรักษาระดับความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลาย VOCs เป็นสิ่งที่สำคัญมากต่อการหาค่าพารามิเตอร์การเคลื่อนที่ เพราะต้องใช้ระยะเวลาในการทดสอบ ซึ่งทำให้ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลาย VOCs ลดลงได้