บทที่ 2

หลักการและทฤษฎีที่ใช้ในการศึกษา

การศึกษาลักษณะการเคลื่อนตัวของสารปนเปื้อนในตัวกลางรูพรุนภายใต้สภาวะอิ่มตัวด้วยน้ำ จำเป็นต้องศึกษาองค์ความรู้ที่เกี่ยวข้องกับสมการการไหลของน้ำใต้ดิน สมการการเคลื่อนตัวของสารละลาย (Solute) ในน้ำใต้ดิน ค่าพารามิเตอร์ทางชลศาสตร์และอุทกธรณีวิทยาต่างๆ รวมทั้งคุณสมบัติสารจำพวกสารประกอบคาร์บอนที่ไม่ละลายน้ำ (NAPL) ดังนี้

2.1 สมการการไหลของน้ำใต้ดิน (Groundwater Flow Equation)

ในปี ค.ศ.1856 Henry Darcy ได้ทำการศึกษาพฤติกรรมการไหลของน้ำผ่านวัสดุที่มีรูพรุน (Porous Media) โดยทำการทดลองในชั้นทราย และได้รายงานผลการศึกษาว่าอัตราการไหลของน้ำผ่านวัสดุที่มีรูพรุน จะแปรผันตรงกับความลาดชลศาสตร์ (Hydraulic Gradient) ปริมาณการไหลของน้ำจะขึ้นอยู่กับค่าสัมประสิทธิ์ของการซึมได้ (Hydraulic Conductivity, K) ของวัสดุนั้น

$$V = -K\frac{\Delta h}{\Delta l} \qquad (2\text{-}1)$$

โดยที่

V เป็นความเร็วของการไหลของน้ำใต้ดิน (LT^{-1})

K เป็นค่าสัมประสิทธิ์ความซึมผ่าน (Hydraulic Conductivity) (LT^{-1})

Δh เป็นความแตกต่างของระดับน้ำ หรือ Piezometric Head (L)

Δl เป็นระยะทางวัดตามทิศทางความเร็วเฉลี่ยการไหล (L)

จากสมการของดาร์ซี พบว่า การไหลของน้ำใต้ดินที่มีความหนาแน่นคงที่ ผ่านตัวกลางรูพรุนที่ไม่เป็นเนื้อเดียวกัน (Heterogeneous Porous Media) ภายใต้สภาวะการไหลแบบไม่คงตัว (Unsteady Flow) และเป็นการไหลที่ขึ้นกับทิศทาง (Anisotropy) สามารถอธิบายด้วยสมการพาเชียลดิฟเฟเรนท์ดังนี้

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(K_{xx}\frac{\partial h}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(K_{yy}\frac{\partial h}{\partial y}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(K_{zz}\frac{\partial h}{\partial z}\right)-W=S_s\frac{\partial h}{\partial t} \qquad (2\text{-}2)$$

โดยที่

K_{xx} , K_{yy} , K_{zz} เป็นค่าของ Hydraulic Conductivity ตามแนวแกน X, Y และZ ซึ่งถูกสมมุติให้ขนานกับแกนหลักของ Hydraulic Conductivity (LT^{-1})

h เป็นค่า ความสูงระดับน้ำใต้ดิน (Potentiometric Head)(LT^{-1})

W เป็นค่า Volumetric Flux ต่อหน่วยปริมาตรทั้งจุดให้น้ำและสูบน้ำ (T^{-1})

S_s เป็นค่า Specific Storage ของวัสดุรูพรุน (L^{-1})

t เป็นค่า เวลา (T)

2.2 สมการการเคลื่อนตัวของสารปนเปื้อน (Mass Transport in Saturated Media)

การศึกษาการเคลื่อนตัวของสารปนเปื้อนผ่านตัวกลางรูพรุนภายใต้สภาวะอิ่มตัวด้วยน้ำ ต้องอาศัยองค์ความรู้ที่เกี่ยวข้องกับทฤษฎีการเคลื่อนตัวของสารปนเปื้อน ได้แก่ กระบวนการเคลื่อนตัวโดยอาศัยผลต่างของความเข้มข้น (Transport by Concentration Gradient) กระบวนการพัดพา (Transport by Advection) กระบวนการแพร่เชิงกล (Mechanical Dispersion) และกระบวนการแพร่เชิงอุทกพลศาสตร์ (Hydrodynamic Dispersion)

2.2.1 กระบวนการเคลื่อนตัวโดยอาศัยผลต่างของความเข้มข้น (Transport by Concentration Gradient)

กระบวนการเคลื่อนตัวโดยอาศัยผลต่างของความเข้มข้น (Transport by Concentration Gradient หรือ Molecular Diffusion) หมายถึงกระบวนการเคลื่อนไหวของโมเลกุลของสารละลายจากบริเวณที่มีความเข้มข้นมากกว่าไปสู่สารละลายในบริเวณที่มีความเข้มข้นน้อยกว่า โดยกระบวนการนี้ไม่จำเป็นต้องอาศัยการพัดพาของสาร ดังแสดงในรูปที่ 2-1 และสามารถอธิบายได้ด้วยสมการ Fick's First Law ในระนาบ 1 มิติ ดังนี้

$$F = -D_d\left(dC / dx\right) \qquad (2\text{-}3)$$

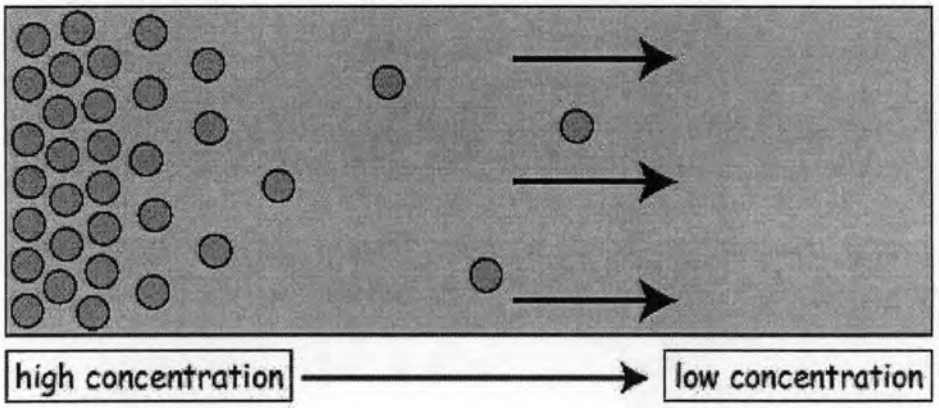
โดยที่

F คือมวลของสารต่อพื้นที่ต่อหน่วยเวลา ($M/L^2/T$)

D_d คือค่าสัมประสิทธิ์การเคลื่อนตัวด้วยโมเลกุล (L^2/T)

C คือความเข้มข้นสาร (M/L^3)

dC/dx คือ Concentration Gradient ($M/L^3/L$)



รูปที่ 2-1 กระบวนการเคลื่อนตัวโดยอาศัยผลต่างของความเข้มข้น

ที่มา : London Health Sciences Centre (2007)

2.2.2 กระบวนการพัดพา (Transport by Advection)

กระบวนการพัดพาหมายถึงกระบวนการเคลื่อนที่ของสารละลายใดๆในน้ำใต้ดินไปพร้อมกับการไหลของน้ำใต้ดินผ่านตัวกลางรูพรุนส่งผลให้เกิดการกระจายตัวของสารละลาย (Dissolve) ซึ่งทิศทางและความเร็วของการเคลื่อนที่ของสารละลายจะเป็นไปในทิศทางเดียวกับการไหลของน้ำใต้ดิน เนื่องจากการไหลของน้ำขึ้นอยู่กับระดับน้ำใต้ดินและลักษณะทางธรณีวิทยาของชั้นน้ำของหินอุ้มน้ำ จากสมการการไหลของดาร์ซี อธิบายกระบวนการพัดพาได้ดังนี้

$$V_x = \frac{K}{n_e}\frac{dh}{dx} \qquad (2\text{-}4)$$

โดยที่

V_x คือความเร็วเฉลี่ยเชิงเส้น (Average Linear Velocity)(LT^{-1})

K คือค่าสัมประสิทธิ์ความซึมผ่านได้ (LT^{-1})

n_e คือเป็นความพรุนใช้การ (Effective Porosity)

$\frac{dh}{dx}$ คือเป็นความลาดชันทางชลศาสตร์

2.2.3 กระบวนการแพร่เชิงกล (Mechanical Dispersion)

กระบวนการแพร่เชิงกล หมายถึงกระบวนการผสมของสารละลายกับน้ำใต้ดินขณะที่ไหลผ่านตัวกลางรูพรุน การผสมนี้จะเกิดขึ้นตามแนวเส้นทางการไหลของน้ำใต้ดิน ซึ่งมีความสัมพันธ์กันกับความสามารถในการแพร่และการพัดพา ดังแสดงในรูปที่ 2-2 และมีสมการดังนี้

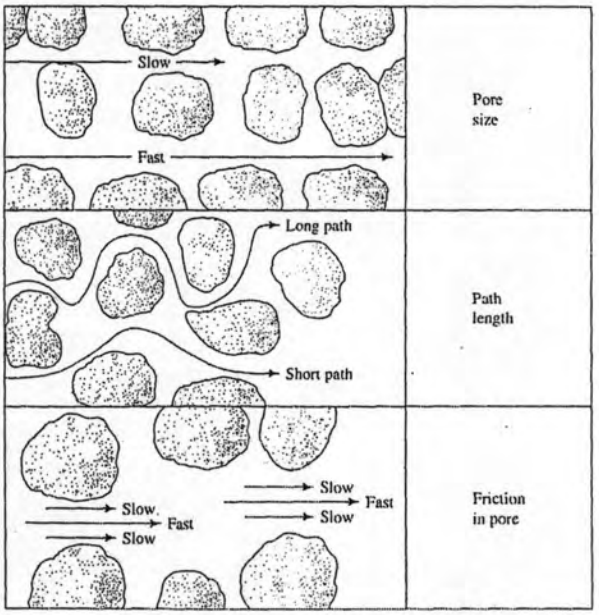
$$D = \alpha_L V_x \qquad (2\text{-}5)$$

โดยที่

D คือสัมประสิทธิ์การแพร่เชิงกล (L^2/T)

α_L คือความสามารถในการแพร่ตามแนวการไหลของน้ำใต้ดิน (L)

V_x คือความเร็วเฉลี่ยเชิงเส้น (LT^{-1})



รูปที่ 2-2 กระบวนการแพร่เชิงกล

ที่มา : Fetter (1999)

2.2.4 **กระบวนการแพร่เชิงอุทกพลศาสตร์** (Hydrodynamic Dispersion)

กระบวนการแพร่เชิงอุทกพลศาสตร์ผ่านตัวกลางรูพรุนประกอบด้วยกระบวนการย่อย 2 ส่วนคือ กระบวนการแพร่เชิงกล (Mechanical Dispersion) และกระบวนการเคลื่อนตัวโดยอาศัยผลต่างความเข้มข้น (Transport by Concentration Gradient หรือ Molecular Diffusion) แสดงดังรูปที่ 2-3 และอธิบายสมการได้ดังนี้

$$D_L = \alpha_L v_i + D^* \qquad (2\text{-}6)$$

โดยที่

D_L คือสัมประสิทธิ์การแพร่เชิงอุทกพลศาสตร์ (L^2/T)

α_L คือความสามารถในการแพร่ตามแนวการไหลของน้ำใต้ดิน (L)

V_i คือความเร็วเฉลี่ยเชิงเส้น (LT^{-1})

D^* คือสัมประสิทธิ์กระบวนการเคลื่อนตัวโดยอาศัยผลต่างความเข้มข้น

(L^2/T)

การแพร่ (Dispersivity) สามารถคำนวณได้จากผลการทดลองในห้องปฏิบัติการโดยใช้เส้นโค้งแสดงความเข้มข้นสัมพัทธ์ของการถ่ายเทมวลในระหว่างการดูดซับ (Normalized Breakthrough Curve) ที่ความเข้มข้นขาออกต่อความเข้มข้นขาเข้า (C/C_0) ของสารปนเปื้อน อธิบายสมการได้ดังนี้

$$D = \left(\frac{V \cdot L}{8}\right)\left(J_{0.84} - J_{0.16}\right)^2 \qquad (2\text{-}7)$$

โดยที่

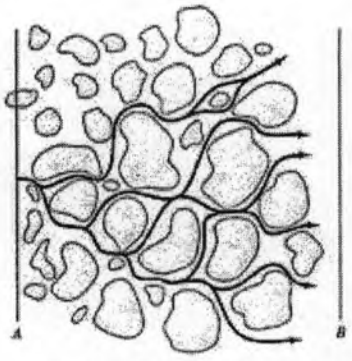
D คือสัมประสิทธิ์การแพร่เชิงกล (L^2/T)

V คือความเร็วเฉลี่ยการไหล (L/T)

L คือความยาวเฉลี่ยของตัวกลางรูพรุน (L)

$J_{0.84}$ คือเวลาที่ C/C_0 มีค่า 0.84 (T)

$J_{0.16}$ คือเวลาที่ C/C_0 มีค่า 0.16 (T)



รูปที่ 2-3 กระบวนการแพร่เชิงอุทกพลศาสตร์

ที่มา : Fetter (1999)

2.3 ค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญต่อการเคลื่อนที่ของสารปนเปื้อนในน้ำใต้ดิน

2.3.1 ค่าสัมประสิทธิ์ความซึมได้ (Hydraulic Conductivity, *K*)

ค่าสัมประสิทธิ์ความซึมได้เป็นคุณสมบัติเฉพาะตัวของตัวกลางรูพรุนหรือชั้นให้น้ำซึ่งขึ้นอยู่กับลักษณะของตัวกลางรูพรุน เช่น ขนาดของเม็ดดินและจำนวนช่องว่างระหว่างเม็ดดินของตัวกลางรูพรุนนั้นๆ นอกจากนี้ค่าสัมประสิทธิ์ความซึมได้จะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของของไหล เช่น ความหนาแน่นและความหนืดสัมบูรณ์ของของไหลด้วยเช่นกัน แสดงในสมการต่อไปนี้

$$K = \frac{T}{b} \tag{2-8}$$

โดยที่

T คือค่าสัมประสิทธิ์ความซึมผ่าน (Transmissibility: T, L^2T^{-1})

b คือความหนาของชั้นน้ำแบบปิด (L)

หรือหาได้จากสมการคาร์เมน-โคเซนีย์ (Carmen-Kozeny) แสดงในสมการต่อไปนี้

$$K = \frac{\rho_w g}{\mu_w}\left[\frac{d_m{}^2}{180}\frac{\phi^3}{(1-\phi)^2}\right] \tag{2-9}$$

โดยที่

ρ_w คือความหนาแน่นของน้ำ (Density: MV^{-1})

g คือแรงโน้มถ่วงของโลก (Gravity Force: LT^{-2})

μ_w คือความหนืดของน้ำ (Viscosity: cp)

d_m คือขนาดคละเฉลี่ยของตัวกลางรูพรุน (L)

ϕ คือความพรุนของตัวกลางรูพรุน

จากการศึกษาวิจัยในอดีตที่ผ่านมาพบว่าดินแต่ละประเภทจะมีค่าสัมประสิทธิ์ความซึมได้ไม่เท่ากัน ดังแสดงในตารางที่ 2-1

2.3.2 ค่าสัมประสิทธิ์ความซึมผ่าน (Transmissivity, *T*)

ค่าสัมประสิทธิ์ความซึมผ่านเป็นค่าพารามิเตอร์ที่นิยมใช้มากในชลศาสตร์น้ำบาดาล หมายถึงปริมาตรน้ำที่ไหลผ่านหนึ่งหน่วยความกว้างของชั้นหินอุ้มน้ำที่มีค่าความลาดชันชลศาสตร์หนึ่งหน่วยต่อเวลา อธิบายได้ดังสมการ 2-8

2.3.3 ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้ (Permeability, *k*)

ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้คือคุณสมบัติเฉพาะของหินหรือดินที่แสดงถึงความสามารถส่งผ่านของเหลวผ่านวัตถุพรุนนั้นๆ สามารถอธิบายสมการดังนี้

$$k = \frac{\mu K}{\rho g} \tag{2-10}$$

โดยที่

k คือสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้ (Permeability: L^2)

μ คือความหนืดของเหลว (Viscosity: cp)

ρ คือความหนาแน่นของเหลว (Density: MV^{-1})

g คือแรงโน้มถ่วงของโลก (Gravity Force: LT^{-2})

K คือสัมประสิทธิ์ความซึมได้ (Hydraulic conductivity: LT^{-1})

การประมาณค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้ของชั้นหินอุ้มน้ำสามารถกระทำได้หลายวิธี เช่น การประมาณของสมการการไหล การทดลองในห้องปฏิบัติการ การใช้สารเทรเซอร์ (Tracer) การทดสอบในภาคสนามโดยสลักเทสท์ (Slug Test) และการสูบทดสอบจากบ่อเจาะ สำหรับในการศึกษานี้จะประมาณค่าค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้โดยดำเนินการทดลองในห้องปฏิบัติการ

2.3.3.1 การดำเนินทดลองในห้องปฏิบัติการเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้ (Laboratory Permeability Test)

การดำเนินการทดลองในห้องปฏิบัติการ โดยการใช้เครื่องมือทดสอบเพื่อประมาณค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้แบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท คือ 1. การทดลองภายใต้สภาวะระดับน้ำคงที่ (Constant Head) และ 2. การทดลองภายใต้สภาวะระดับน้ำเปลี่ยนแปลง (Falling Head) ซึ่งมีหลักการในการทดสอบดังนี้

1. การทดลองภายใต้สภาวะระดับน้ำคงที่ เป็นวิธีที่ใช้ทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้ตัวกลางรูพรุนประเภทดิน กรวด ทรายหยาบ ที่อาจมีดินตะกอนปนเล็กน้อยหรือไม่มีปนเลย มีค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านปานกลางถึงสูง

วิธีดำเนินการทดสอบ เริ่มต้นจากการออกแบบการทดลองให้น้ำสามารถไหลผ่านตัวอย่างดินที่บรรจุอย่างดีในกระบอกบรรจุตัวอย่างโดยควบคุมระดับน้ำเข้าและออกจากตัวอย่างดิน ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้คำนวณจากปริมาณน้ำที่ไหลและค่าความต่างระดับน้ำในหลอดมาโนมิเตอร์ที่ลดลงในระยะตัวอย่างที่กำหนด อธิบายได้ดังรูปที่ 2-4 และสมการดังนี้

ตารางที่ 2-1 ค่าสัมประสิทธิ์ความซึมผ่านในดินแต่ละชนิด

Material	Hydraulic Conductivity (m/s)
SEDIMENTARY	
Gravel	4×10^{-4} - 3×10^{-2}
Coarse sand	9×10^{-7} - 6×10^{-3}
Medium dand	9×10^{-7} - 5×10^{-4}
Fine sand	2×10^{-7} - 2×10^{-4}
Silt, loess	1×10^{-9} - 2×10^{-5}
Till	1×10^{-12} - 2×10^{-6}
Clay	1×10^{-11} - 4.7×10^{-9}
Unweathered marine clay	8×10^{-3} - 2×10^{-9}
SEDIMENTARY ROCKS	
Karst and reef limestone	1×10^{-6} - 2×10^{-2}
Limestone, dolomite	1×10^{-9} - 6×10^{-6}
Sandstone	3×10^{-10} - 6×10^{-6}
Siltstone	1×10^{-11} - 1.4×10^{-8}
Salt	1×10^{-12} - 1×10^{-10}
Anhydrite	4×10^{-13} - 2×10^{-8}
Shale	1×10^{-13} - 2×10^{-9}
CRYSTALLINE ROCKS	
Permeable basalt	4×10^{-7} - 2×10^{-2}
Fractured igneous and metamorphic rock	8×10^{-9} - 3×10^{-4}
Weathered granite	3.3×10^{-6} - 5.2×10^{-5}
Weathered gabbro	5.5×10^{-7} - 3.8×10^{-6}
Basalt	2×10^{-11} - 4.2×10^{-7}
Unfractured igneous and metamorphic rock	3×10^{-14} - 2×10^{-10}

ที่มา : Domenico and Schwartz (1990)

$$K_t = \frac{Q \times L_c \times 60}{t \times h \times A} \qquad (2\text{-}11)$$

โดยที่

Q คือปริมาณน้ำที่วัดระหว่างการทดสอบ (L^3), ซม^3

L_c คือระยะระหว่างหลอดมาโนมิเตอร์วัดระดับน้ำ (L), ซม

t คือระยะเวลาที่ทดสอบ (T), นาที

h คือผลต่างระดับน้ำในหลอดมาโนมิเตอร์ (L), ซม

h_2-h_1

A คือพื้นที่หน้าตัดกระบอกตัวอย่างดิน (L^2), ซม^2

2. การทดลองภายใต้สภาวะระดับน้ำเปลี่ยนแปลง เป็นวิธีทดสอบเพื่อประมาณค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้ที่เหมาะสมกับตัวอย่างที่มีค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้ปานกลางถึงต่ำเป็นตัวอย่างดินจำพวกทรายละเอียดและดินตะกอน วิธีการดำเนินการทดสอบเริ่มต้นจากการต่อเชื่อมท่อเข้ากับตัวอย่างดินที่บรรจุลงในกระบอกบรรจุตัวอย่างจากนั้นปล่อยให้น้ำไหลผ่านตัวกลางรูพรุนโดยมีการเปลี่ยนแปลงหัวความดันของน้ำเข้าสู่ตัวอย่างดินอย่างต่อเนื่องโดยที่ระดับน้ำที่เปลี่ยนแปลงไปมีความสัมพันธ์กับอัตราการไหลของน้ำออกจากระบบ อธิบายดังสมการดังนี้

$$K_t = \frac{2.3a \times L}{60A(\Delta t)} \log \frac{h_0}{h_1} \qquad (2\text{-}12)$$

โดยที่

a คือพื้นที่หน้าตัดหลอดวัดน้ำ (L^2), ซม^2

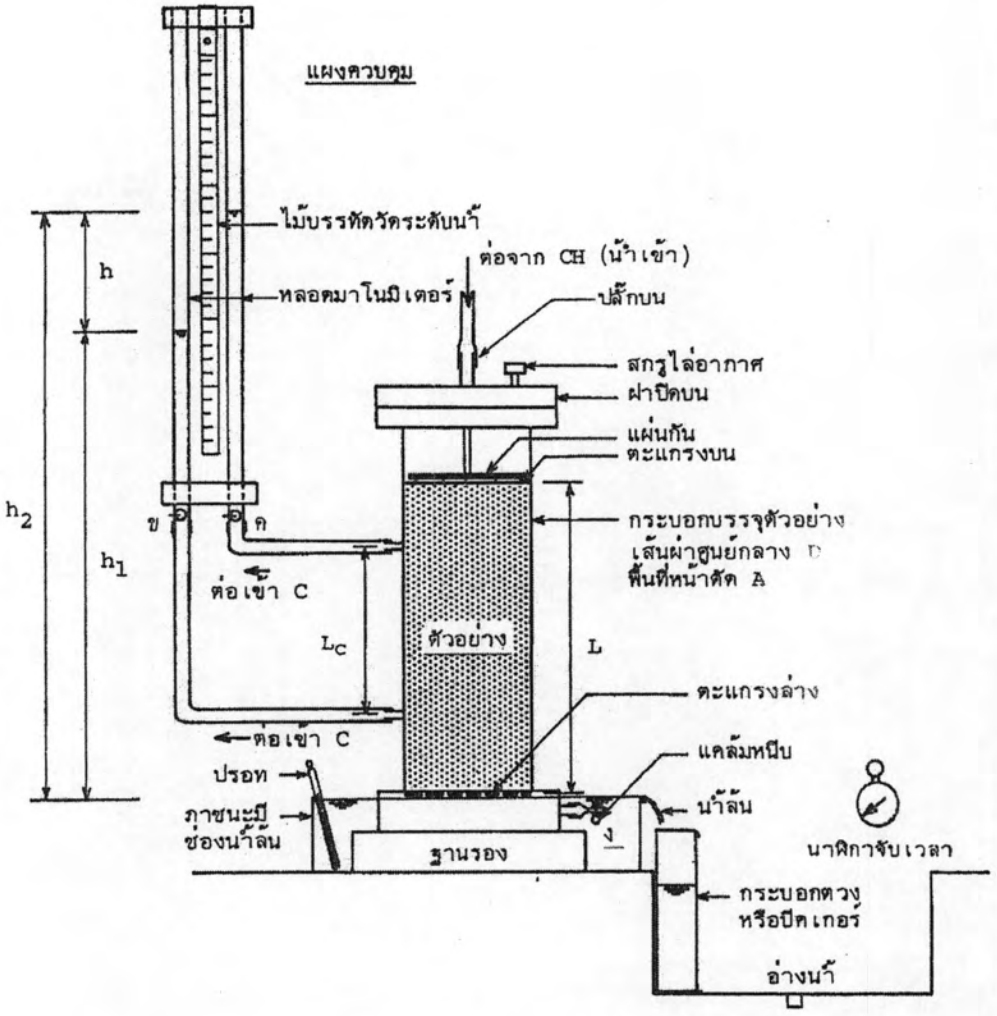
L คือความยาวของตัวอย่างดินในกระบอก (L), ซม

A คือพื้นที่หน้าตัดของกระบอกตัวอย่างดิน (L^2), ซม^2

Δt คือเวลาที่ทำการทดลองปล่อยระดับน้ำจาก h_0 ถึง h_1 (T), นาที

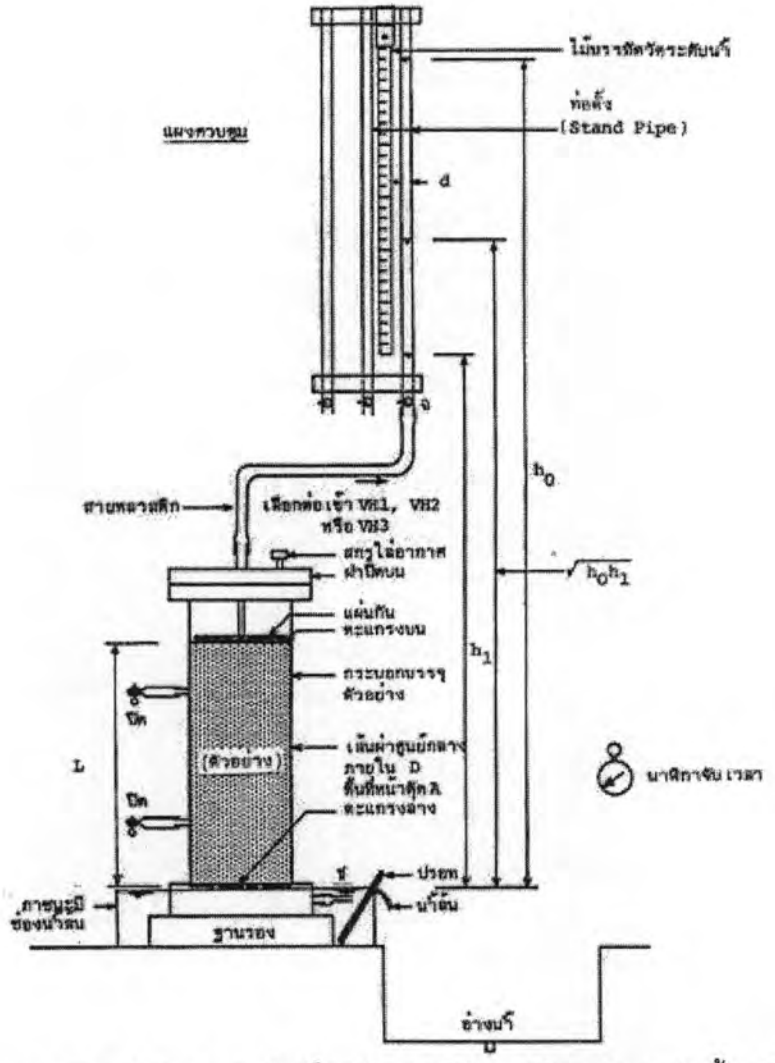
h_0 คือระยะจากผิวน้ำท้ายน้ำข้างล่างถึงระดับเริ่มทดลอง (L), ซม

h_1 คือระยะจากผิวน้ำท้ายน้ำข้างล่างถึงระดับเสร็จทดลอง (L), ซม



รูปที่ 2-4 การทดลองวัดค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้ภายใต้สภาวะคงที่

ที่มา : สถาพร (1998)



รูปที่ 2-5 การทดลองวัดค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้ภายใต้สภาวะระดับน้ำเปลี่ยนแปลง

ที่มา : สถาพร (1998)

2.3.4 ค่าสัมประสิทธิ์การกักเก็บ (Storage Coefficient หรือ Storativity, *S*)

ค่าสัมประสิทธิ์การกักเก็บหมายถึงปริมาตรของน้ำที่ชั้นหินอุ้มน้ำสามารถปล่อยออกมาจากการกักเก็บต่อหน่วยพื้นที่ของชั้นน้ำใต้ดินต่อหนึ่งหน่วยของการเปลี่ยนแปลงระดับหัวความดันตั้งฉากกับผิวชั้นน้ำใต้ดิน ค่าสัมประสิทธิ์การกักเก็บนี้ไม่มีหน่วยเพราะคิดจากปริมาตรของน้ำต่อปริมาตรของชั้นหินอุ้มน้ำ ชั้นหินอุ้มน้ำปิดส่วนมากจะมีค่าสัมประสิทธิ์การกักเก็บอยู่ระหว่าง 0.00005 และ 0.005 ซึ่งมีค่าค่อนข้างต่ำแสดงว่าในการได้น้ำจากชั้นหินอุ้มน้ำปิดเพียงพอ จะต้องมีการเปลี่ยนแปลงความดันมาก

ค่าสัมประสิทธิ์การกักเก็บสามารถหาได้โดยดำเนินการสูบทดสอบหรือวัดการเปลี่ยนแปลงระดับน้ำใต้ดินสัมพันธ์กับการเปลี่ยนแปลงความดันบรรยากาศ สำหรับในกรณีที่

ต้องการประมาณค่าสัมประสิทธิ์การเก็บกักสามารถใช้สมการได้ 2 วิธีกล่าวคือ สมการของทีส (Theis) และ สมการของคูเปอร์-จาคอบ (Cooper-Jacob)

1.การสูบทดสอบโดยใช้สมการของทีสใช้สมการดังนี้

$$s = h_0 - h = \frac{Q}{4\pi T} W(u) \qquad (2\text{-}13)$$

โดยที่

$W(u)$ คือWell Function

s คือระดับน้ำลด (L)

h_0 คือระดับความดันชั้นน้ำที่เริ่มต้นของชั้นน้ำใต้ดินก่อนการสูบทดสอบ (L)

h คือระดับความดันชั้นน้ำบ่อสังเกตการณ์ เมื่อเวลาการปั๊มผ่านไป t (L)

$$u = \frac{Sr^2}{4Tt} \qquad (2\text{-}14)$$

โดยที่

S คือ ค่าสัมประสิทธิ์การกักเก็บ

R คือรัศมีระยะระหว่างจุดศูนย์กลางบ่อสูบน้ำถึงจุดศูนย์กลางบ่อสังเกตการณ์ (L)

T คือเป็นค่าสัมประสิทธิ์ความซึมผ่าน (L^2/T)

จากสมการ 2-13 จัดเรียงใหม่ได้เป็น

$$\frac{u(4T)}{S} = \frac{r^2}{t} \qquad (2\text{-}15)$$

ในการทดลองหาค่า S และ T จะเริ่มจากการนำค่า $W(u)$ และ u ในตารางที่ 2-2 มาพล็อตในกระดาษกราฟ ล็อค-ล็อค เพื่อสร้างเส้นโค้งไทพ์ (Type Curve) ดังแสดงในรูปที่ 2-6 จากนั้นนำผลการทดสอบแสดงค่าระดับน้ำลด (Drawdown) จากบ่อสังเกตการณ์ที่เวลาต่างๆกัน และค่าที่จดบันทึก r^2/t มาสร้างความสัมพันธ์ในกระดาษกราฟ ล็อค-ล็อค ที่ขนาดเดียวกันกับ เส้นโค้งไทพ์ จากนั้นนำเส้นโค้งที่สร้างแล้วมาซ้อนทับกัน โดยให้แนวเส้นโค้งทั้งสองกราฟซ้อนทับกันได้มากที่สุด โดยที่แกนทั้งสองแกนจะต้องขนานกันดังรูปที่ 2-6 จากนั้นทำการอ่านค่า $W(u)$,u,s และ r^2/t สุดท้ายนำค่าที่ได้ไปแทนค่าในสมการที่ 2-14 และ 2-15 เพื่อหาค่า S และ T ต่อไป

2. การสูบทดสอบด้วยวิธี คูเปอร์-จาคอบ พบว่าเมื่อดำเนินการทำสูบทดสอบโดยใช้ระยะเวลาการสูบน้ำมากๆ ค่าของ u จะมีค่าน้อยลง สามารถแสดงในสมการดังนี้

$$s = h_0 - h = \frac{2.30Q}{4\pi T}\log\frac{2.25Tt}{r^2S} \qquad (2\text{-}16)$$

เมื่อนำค่าระดับน้ำลด h_0-h และ ค่า t มาสร้างความสัมพันธ์ในกระดาษกราฟเซมิ-ล็อค จะได้ความสัมพันธ์เชิงเส้นโดยที่สามารถหาค่า S และ T นอกจากนี้กราฟเส้นตรงนี้ที่ $S = 0$ จะตัดแกน t ที่ $t = t_0$ ดังนี้

$$S = 2.25\frac{Tt_0}{r^2} \qquad (2\text{-}17)$$

ซึ่งค่าของ T สามารถหาได้โดย ถ้าค่าของ t/t_0 = 10 ดังนั้น log t/t_0 = 1 เพราะฉะนั้น ถ้าเราแทนค่า s ด้วย Δs ซึ่งเป็นระดับน้ำลดต่อล็อคไซเคิล (log cycle) ของ t ดังนั้นสมการจึงได้

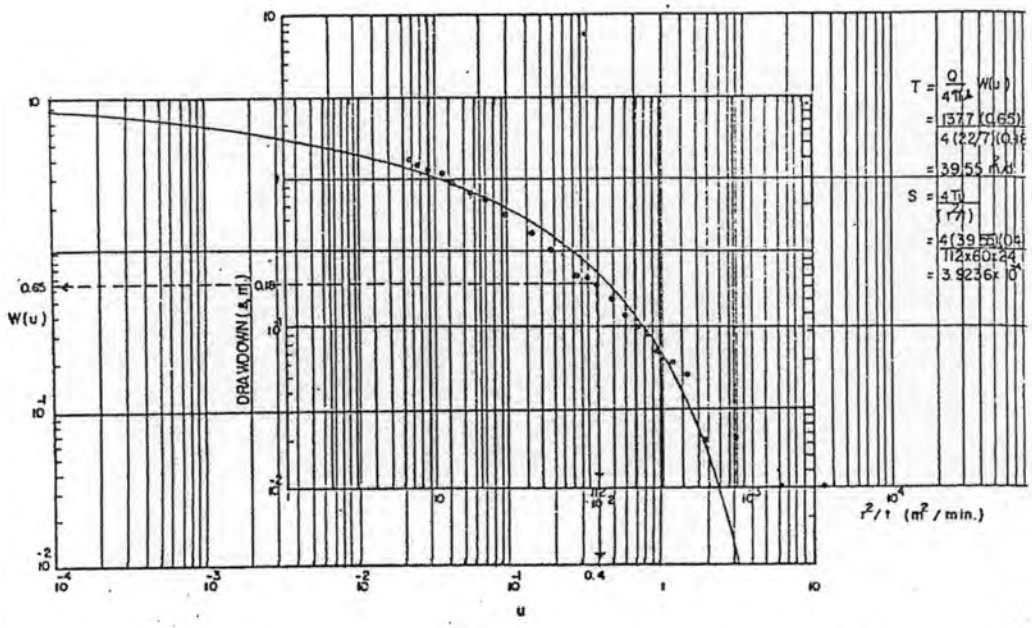
$$T = \frac{2.30Q}{4\pi\Delta s} \qquad (2\text{-}18)$$

ในการประมาณค่า T และ S ด้วยวิธีของ คูเปอร์-จาคอบ จำเป็นต้องดำเนินการสูบน้ำเป็นเวลานาน หลังจากหยุดการสูบน้ำสามารถนำค่าระดับน้ำลดมาสร้างความสัมพันธ์ในกระดาษกราฟเซมิ-ล็อคโดยให้ค่า t อยู่แกนล็อค แล้วลากผ่านกราฟเส้นตรงให้ผ่านจุดข้อมูลมากที่สุด จุดที่เส้นตรงตัดแกน t หมายถึงค่า t_0 จากนั้นนำค่า t และ Δs ที่ได้ไปแทนค่า Q และ Δs ในสมการ 2-17 จะได้ค่า T เสร็จแล้วนำค่า T,r และ t $_0$ ไปแทนค่าในสมการที่ 2-18 เพื่อหาค่า S สำหรับการประมาณค่าโดยวิธีของคูเปอร์-จาคอบ นี้จะใช้ได้ผลดีเมื่อค่าของ u จะต้องน้อยกว่า 0.01

ตารางที่ 2-2 ค่าของ *W(u)* ที่ค่าต่างๆของ *u*

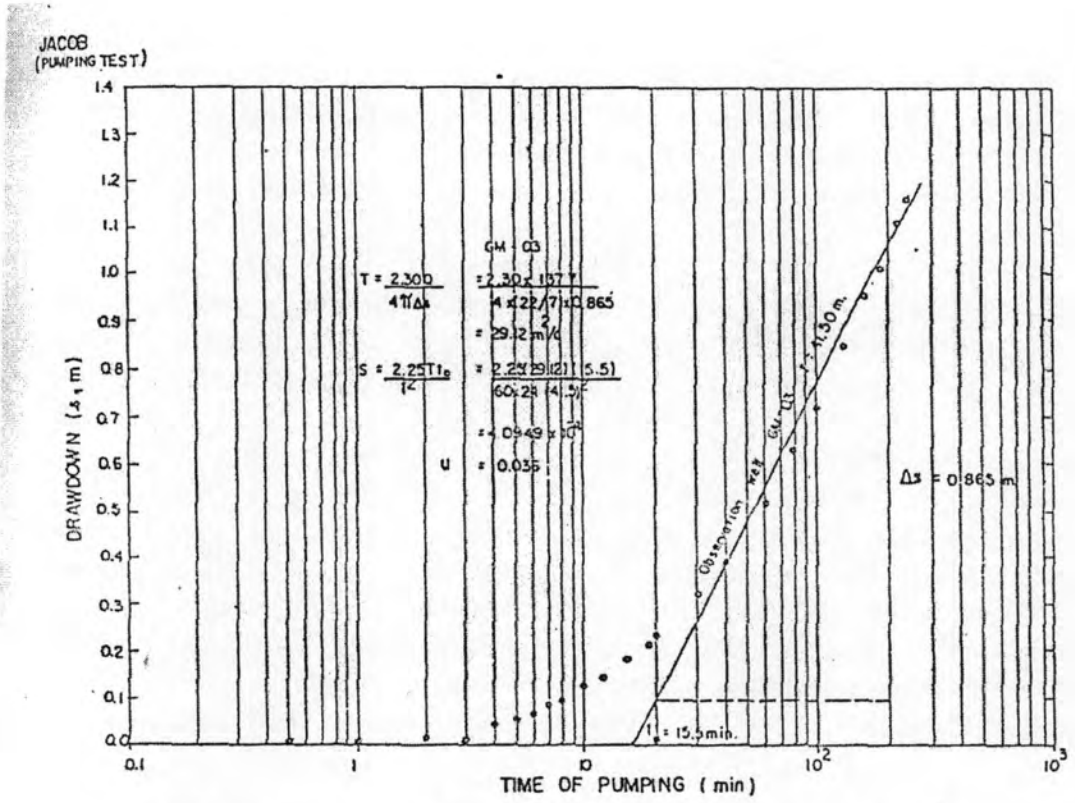
u	1.0	2.0	3.0	4.0	5.0	6.0	7.0	8.0	9.0
x 1	0.219	0.049	0.013	0.0038	0.0011	0.00036	0.00012	0.000038	0.0
x 10^{-1}	1.82	1.22	0.91	0.70	0.56	0.45	0.37	0.31	0.2
x 10^{-2}	4.04	3.35	2.96	2.68	2.47	2.30	2.15	2.03	1.9
x 10^{-3}	6.33	5.64	5.23	4.95	4.73	4.54	4.39	4.26	4.1
x 10^{-4}	8.63	7.94	7.53	7.25	7.02	6.84	6.69	6.55	6.4
x 10^{-5}	10.94	10.24	9.84	9.55	9.33	9.14	8.99	8.86	8.7
x 10^{-6}	13.24	12.55	12.14	11.85	11.63	11.45	11.29	11.16	11.0
x 10^{-7}	15.54	14.85	14.44	14.15	13.93	13.75	13.60	13.46	13.3
x 10^{-8}	17.84	17.15	16.74	16.46	16.23	16.05	15.90	15.76	15.6
x 10^{-9}	20.15	19.45	19.05	18.76	18.54	18.35	18.20	18.07	17.9
x 10^{-10}	22.45	21.76	21.35	21.06	20.84	20.66	20.50	20.37	20.2
x 10^{-11}	24.75	24.06	23.65	23.36	23.14	22.96	22.81	22.67	22.5
x 10^{-12}	27.05	26.36	25.96	25.67	25.44	25.26	25.11	24.97	24.8
x 10^{-13}	29.36	28.66	28.26	27.79	27.75	27.56	27.41	27.28	27.1
x 10^{-14}	31.66	30.97	30.56	30.27	30.05	29.87	29.71	29.58	29.4
x 10^{-15}	33.96	33.27	32.86	32.58	32.35	32.17	32.02	31.88	31.7

ที่มา : Todd (1980)



รูปที่ 2-6 ตัวอย่างผลการวิเคราะห์บ่อสูบน้ำ ด้วยวิธีของทีส

ที่มา : Todd (1980)



รูปที่ 2-7 ตัวอย่างผลการวิเคราะห์บ่อสูบน้ำด้วยวิธีของคูเปอร์-จาคอบ

ที่มา : Todd (1980)

2.3.5 **ความพรุน** (Porosity)

ความพรุน หมายถึงอัตราส่วนระหว่างช่องว่างของตัวกลางรูพรุนต่อปริมาตรทั้งหมดของตัวอย่างดิน ความพรุนเป็นดัชนีบอกถึงความเชื่อมต่อกันของตัวกลางของแข็ง และมีผลโดยตรงต่อค่าความสามารถในการซึมผ่านได้ดังสมการนี้

$$n = \frac{V_V}{V_T} \tag{2-19}$$

โดยที่

n คือความพรุน

V_v คือปริมาตรของช่องว่างในตัวกลางรูพรุน

V_t คือปริมาตรรวมของตัวกลางรูพรุน

ดินแต่ละประเภทมีค่าความพรุนไม่เท่ากัน ดังแสดงในตารางที่ 2-3

ตารางที่ 2-3 ความพรุนของดินแต่ละชนิด

Material	Porosity (%)
SEDIMENTARY	
Gravel, coarse	24 - 36
Gravel, fine	25 - 38
Sand, coarse	31 - 46
Sand, fine	26 - 53
Siltstone	34 - 61
Clay	34 - 60
SEDIMENTARY ROCKS	
Limestone, dolomite	0 - 20
Sandstone	5 - 30
Siltstone	21 - 41
Karst limestone	5 - 50
Shale	0 - 10
CRYSTALLINE ROCKS	
Fractured crystalline rocks	0 - 10
Dense crystalline rocks	0 - 5
Weathered granite	34 - 57
Weathered gabbro	42 - 45
Baslat	3 - 35

ที่มา : Domenico and Schwartz (1990)

2.3.6 ค่าตัวประกอบความหน่วง (Retardation Factor)

สารปนเปื้อนในน้ำใต้ดินสามารถถูกดูดซับโดยกระบวนการดูดซับติดผิว (Sorption) โดยเม็ดของดินที่ประกอบในชั้นน้ำใต้ดิน ส่งผลให้การเคลื่อนตัวของสารปนเปื้อนเป็นไปได้ช้าลงเมื่อเทียบกับอัตราการไหลของน้ำใต้ดิน อธิบายได้ดังสมการแบบ 1 มิติ ดังนี้

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D_L \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - v_x \frac{\partial C}{\partial x} - \frac{B_d}{\theta}\frac{\partial C^*}{\partial t} - \left(\frac{\partial C}{\partial t}\right)_{rxn} \quad (2\text{-}20)$$

(Dispersion) (Advection) (Sorption) (Reaction)

โดยที่

C คือความเข้มข้นของสารปนเปื้อนในสถานะของสารละลาย (ML^{-1})

t คือเวลา (T)

D_L คือสัมประสิทธิ์การแพร่เชิงอุทกพลศาสตร์ (L^2/T)

v_x คือความเร็วการไหลเฉลี่ย (L/T^{-1})

B_d คือความหนาแน่นรวม

θ คือความพรุนของตัวกลางอิ่มตัว

C^* คือความเข้มข้นที่ถูกดูดซับต่อน้ำหนักตัวกลางรูพรุน

rxn คือปฏิกริยาอื่นๆ เช่น ปฏิกริยาชีวรูป ปฏิกริยาเคมี เป็นต้น

การศึกษาผลของกระบวนการดูดซับติดผิวต่อการเคลื่อนที่ของสารปนเปื้อนในชั้นน้ำใต้ดิน สามารถดำเนินการศึกษาโดยการประมาณค่าความเข้มข้นของสารปนเปื้อนถูกดูดซับโดยตัวกลางที่เป็นรูพรุน ความสามารถของตัวกลางที่จะดูดซับสารปนเปื้อนสามารถแสดงความสัมพันธ์ของไอโซเทอร์มซึ่งจะแสดงค่าความสัมพันธ์ของความเข้มข้นของสารปนเปื้อนในเฟสสารละลาย (Aqueous Concentration) และสารปนเปื้อนที่ถูกดูดซับบนผิวของตัวกลางรูพรุน (Sorbed Concentration) ถ้ากระบวนการการดูดซับ (Sorption Process) เกิดขึ้นอย่างรวดเร็วในขณะที่มีการไหล สารละลายจะอยู่ในสภาวะสมดุล (Equilibrium) เรียกว่า ความสมดุลของการดูดซับ (Equilibrium Sorption Isotherm)

การอธิบายพฤติกรรมการดูดซับของสารปนเปื้อนบนผิวของตัวกลางรูพรุนสามารถอธิบายได้ 3 ฟังค์ชันที่เป็นที่นิยมมากที่สุด คือ ไอโซเทอร์มเชิงเส้น (Linear Isotherm), ไอโซเทอร์มของฟรุนดริก (Freundlich Isotherm) และไอโซเทอร์มของแลงเมียร์ (Langmuir Isotherm) สำหรับการศึกษานี้จะใช้ฟังค์ชันไอโซเทอร์มเชิงเส้นในการอธิบายการดูดซับของสารปนเปื้อนบนผิวของตัวกลางรูพรุน ดังแสดงในรูปที่ 2-8 ดังสมการต่อไปนี้

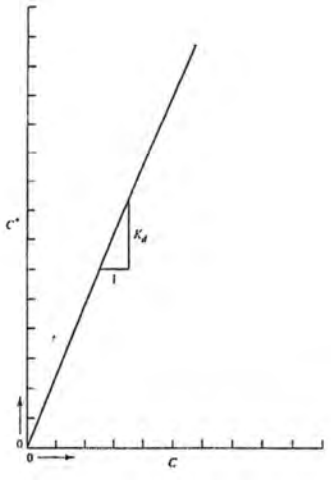
$$C^* = K_d C \qquad (2\text{-}21)$$

โดยที่

C^* คือความเข้มข้นของสารปนเปื้อนที่ถูกดูดซับบนตัวผิวของตัวกลางรูพรุนต่อหน่วยน้ำหนักแห้งของตัวกลาง (M/M^{-1}), mg/kg

C คือความเข้มข้นของสารปนเปื้อนในการละลายที่สมดุลที่ผ่านการดูดซับจากตัวกลางแล้ว (ML^{-1})

K_d คือสัมประสิทธิ์การดูดซับ (Sorption Coefficient)



รูปที่ 2-8 ไอโซเทอร์มเชิงเส้น

ที่มา : Fetter (1999)

เมื่อนำค่าในสมการ 2-21 มาใส่ในสมการ 2-20 จะมีรูปสมการดังนี้

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D_L \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - v_x \frac{\partial C}{\partial x} - \frac{B_d}{\theta} \frac{\partial (K_d C)}{\partial t} \qquad (2\text{-}22)$$

ทำการปรับรูปสมการข้างต้นใหม่จะมีรูปสมการดังนี้

$$\frac{\partial C}{\partial t}\left(1 + \frac{B_d}{\theta} K_d\right) = D_L \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - v_x \frac{\partial C}{\partial x} \qquad (2\text{-}23)$$

เมื่อปรับรูปสมการให้อยู่ในความสัมพันธ์ของค่าตัวประกอบความหน่วงดังสมการ

$$1 + \frac{B_d}{\theta} K_d = R \qquad (2\text{-}24)$$

ถ้าความเร็วเฉลี่ยการไหลของน้ำใต้ดินคือ v_x และค่าเฉลี่ยความเร็วของสารปนเปื้อนคือ v_c จะสามารถหาค่าตัวประกอบความหน่วงได้ดังสมการ

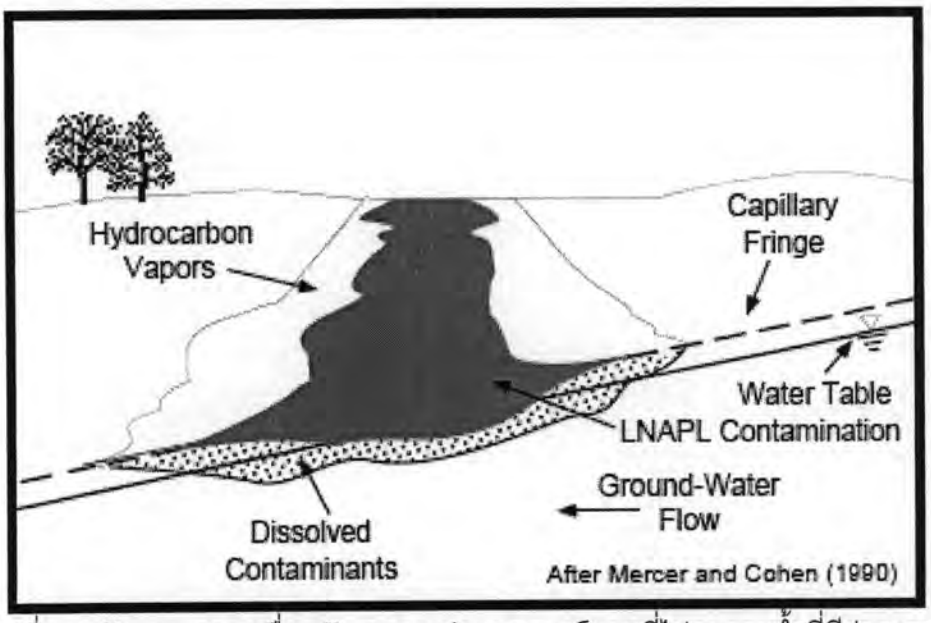
$$v_c = \frac{v_x}{R} \qquad (2\text{-}24)$$

2.4 คุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของสารปนเปื้อนจำพวกสารประกอบคาร์บอนที่ไม่ละลายน้ำ

สารอินทรีย์ประเภท Nonaqueous Phase Liquid (NAPL) หมายถึงสารประกอบคาร์บอนที่มีคุณสมบัติไม่ละลายน้ำหรือมีความสามารถในการละลายน้ำต่ำ เป็นสารปนเปื้อนที่พบได้บ่อยครั้งในแหล่งน้ำบาดาลทั่วโลกรวมทั้งประเทศไทย สารอินทรีย์เหล่านี้แบ่งออกได้ 2 จำพวกใหญ่ๆตามความหนาแน่นของตัวสารคือ 1) สารประกอบคาร์บอนที่ไม่ละลายน้ำที่มีค่าความ

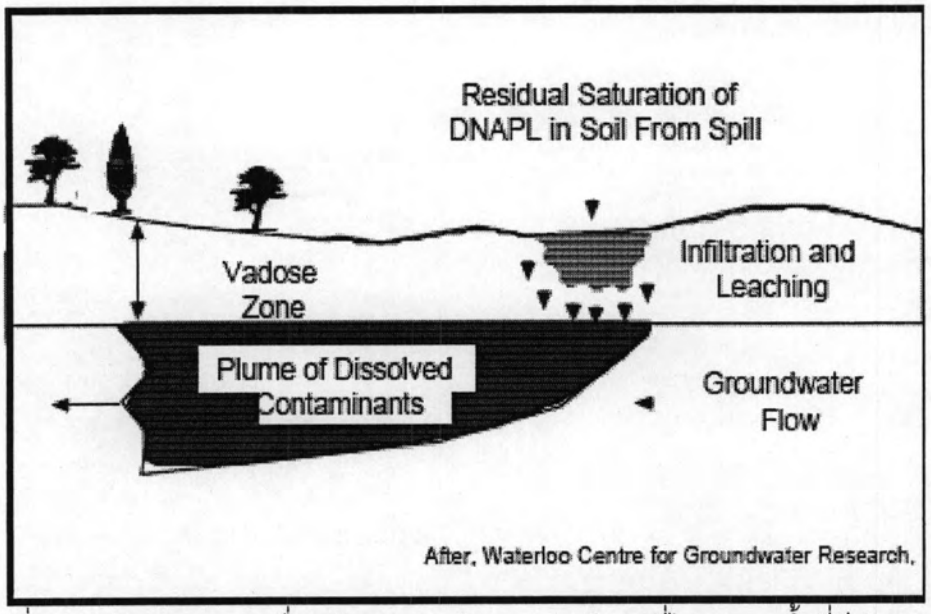
ถ่วงจำเพาะต่ำกว่าน้ำ (Light Nonaqueous Phase Liquid (LNAPL)) ได้แก่ สารเบนซีน, สารโทลูอีนและสารไซลีนเป็นต้น และ 2) สารประกอบคาร์บอนที่ไม่ละลายน้ำที่มีค่าความถ่วงจำเพาะสูงกว่าน้ำ (Dense Nonaqueous Phase Liquid (DNAPL)) ได้แก่ สารไตรคลอโรเอธิลีนและสารเตตระคลอโรเอธิลีน เป็น

เมื่อสารประกอบคาร์บอนที่ไม่ละลายน้ำเคลื่อนตัวลงสู่ใต้ดินภายใต้แรงโน้มถ่วงของโลก (Gravity Force) หากสารมีปริมาณไม่มากนักและเคลื่อนตัวผ่านชั้นน้ำไม่อิ่มตัว (Unsaturated Zone) สารไฮโดรคาร์บอนส่วนหนึ่งจะตกค้างในช่องว่างของดินเนื่องมาจากผลของแรงตึงผิว (Capillary Force) หากสารประกอบคาร์บอนที่ไม่ละลายน้ำมีปริมาณมากพอจะสามารถเคลื่อนตัวผ่านชั้นน้ำไม่อิ่มตัวลงสู่ชั้นน้ำอิ่มตัว (Saturated Zone) สารประกอบคาร์บอนที่ไม่ละลายน้ำที่มีค่าความถ่วงจำเพาะต่ำกว่าน้ำจะมีการเคลื่อนตัวในแนวราบอันเนื่องมาจากผลของแรงตึงผิวที่บริเวณระดับผิวน้ำ ดังแสดงในรูปที่ 2-9 ในทางกลับกันสารประกอบคาร์บอนที่ไม่ละลายน้ำที่มีค่าความถ่วงจำเพาะสูงกว่าน้ำจะเคลื่อนตัวตามแนวดิ่งลงสู่ชั้นน้ำด้านล่างต่อไปและจะหยุดเคลื่อนตัวเมื่อเจอกับชั้นหิน (Bed Rock) หรือชั้นดินที่มีค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านต่ำดังแสดงในรูปที่ 2-10



รูปที่ 2-9 ลักษณะการเคลื่อนตัวของสารประกอบคาร์บอนที่ไม่ละลายน้ำที่มีค่าความถ่วงจำเพาะต่ำกว่าน้ำในชั้นน้ำบาดาล

ที่มา : Scott and Jame (1991)



รูปที่ 2-10 ลักษณะการเคลื่อนตัวของสารประกอบคาร์บอนที่ไม่ละลายน้ำที่มีค่าความถ่วงจำเพาะสูงกว่าน้ำในชั้นน้ำบาดาล

ที่มา : Newell, Acree and Ross (1991)