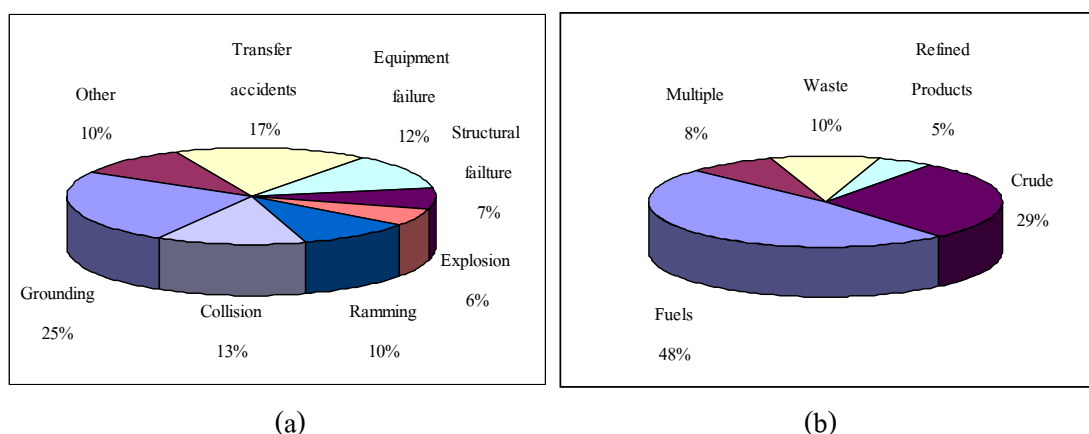


การตรวจเอกสาร

การศึกษาพฤติกรรมการปนเปื้อนของน้ำมันเชื้อเพลิงในชั้นดินไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ จำเป็นต้องมีความรู้และความเข้าใจถึงสาเหตุที่ทำให้เกิดการปนเปื้อน ลักษณะพื้นที่ที่เกิดการปนเปื้อน ชนิดและคุณสมบัติทางธรณีวิทยาของแหล่งกำเนิด การไหลของน้ำใต้ดิน ชนิดและคุณสมบัติของสารปนเปื้อน โดยมีรายละเอียดดังนี้

สาเหตุที่ทำให้เกิดการปนเปื้อนของน้ำมันเชื้อเพลิง

ในงานวิจัยนี้เน้นศึกษาสาเหตุที่ทำให้เกิดการปนเปื้อนจากการรั่วของถังกักเก็บน้ำมันใต้ดิน โดยมีสาเหตุให้ถังเกิดการรั่วมากมาย ดังแสดงในภาพที่ 1a ซึ่งพบว่าหนึ่งในสาเหตุเหล่านั้น เกิดจากการที่ถังเกิดการผุกร่อน 13% และจากโครงสร้างถังล้มเหลว 7% ทำให้ถังเกิดการรั่วไหล จากภาพที่ 1b จะเห็นว่ามีของเหลวที่บรรจุอยู่ภายในถังมากมายได้แก่ น้ำมันเชื้อเพลิง ของเสียอันตรายและสารพิษต่างๆ โดยพบว่ามีปริมาณน้ำมันเชื้อเพลิงมากที่สุด (Cheremisinooff *et al.*, 1983)



ภาพที่ 1 การปนเปื้อนของน้ำมันเชื้อเพลิง a) สาเหตุที่เกิดการปนเปื้อน b) ของเหลวที่อยู่ภายในถังกักเก็บใต้ดิน

ที่มา: Lehr *et al.* (2001)

1. ถังเก็บน้ำมันเชื้อเพลิงใต้พื้นดิน

ถังเก็บน้ำมันเชื้อเพลิงใต้พื้นดิน (underground storage tank) มีหลายประเภทได้แก่ ถังเก็บน้ำมันเชื้อเพลิงตามแนวนอน แนวตั้งและถังทรงกลมที่ฝังอยู่ใต้พื้นดิน โดยตามสถานบริการน้ำมันส่วนมากมักวางถังเก็บน้ำมันไว้ใต้ดินเพื่อประหยัดพื้นที่ โดยถังที่ใช้ทั่วไปมีขนาดไม่เกิน 15,000 30,000 45,000 และ 60,000 ลิตร ขึ้นอยู่กับขนาดของสถานบริการน้ำมัน ถังใต้ดินสำหรับเก็บน้ำมันเชื้อเพลิงทุกชนิด ต้องอยู่ภายใต้ข้อกำหนดของกรมโยธาธิการดังนี้

2. ข้อกำหนดของถังเก็บน้ำมันใต้ดินในประเทศไทย

กองควบคุมน้ำมันเชื้อเพลิงและก๊าซ (2538) ได้ออกประกาศมาตรฐานความปลอดภัยของสถานบริการน้ำมันเชื้อเพลิง ไว้ดังนี้

- ถังต้องทำด้วยเหล็กที่มีความเค้นคราก (yield stress) ไม่น้อยกว่า 2 เท่าของความเค้น
- ผิวภายนอกของถังต้องมีการป้องกันการผุกร่อน เช่น ทาด้วย ฟลีน โกล์ท
- โดยจากแบบถัง ดังแสดงในภาพที่ 2 ถังจะถูกละวางต่ำกว่าพื้นดินประมาณ 3 - 4 เมตร
- ส่วนบนของผนังถังใต้พื้นดินต้องต่ำกว่าระดับพื้นดิน ไม่น้อยกว่า 50 cm.
- ถังใต้พื้นดินต้องวางห่างกันไม่น้อยกว่า 1 เมตร (ระหว่างผนังถัง) ดังแสดงในภาพที่ 3
- ถ้าดินในพื้นที่ก่อสร้างมีสภาพอ่อนมาก ต้องเทคอนกรีตหยาบหนา 10 cm. แล้วจึงรอง

ด้วยทรายสะอาดและหมอนตามแบบ

- ต้องมีท่อระบายไอน้ำมันติดไว้ทุกถัง มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางไม่น้อยกว่า 40 mm.
- เมื่อก่อสร้างและติดตั้งถังใต้ดินแล้ว ก่อนทำการกลบด้วยทรายต้องทำการทดสอบว่าถัง

และข้อต่อไม่มีรอยรั่วซึม โดยวิธีเติมน้ำลงในถังทิ้งไว้ไม่น้อยกว่า 60 นาที

- การบดอัดทรายขึ้นเปิด ซึ่งเป็นทรายสะอาดรอบถัง ให้บดอัดด้วยเครื่อง plate vibrator โดยบดอัดแต่ละชั้นหนาไม่เกิน 20 ซม. เมื่อถมทรายได้ระดับเดียวกับบริเวณโดยรอบแล้ว ให้บดอัดด้วยเครื่อง Plate vibration อีกครั้ง

- ให้มีการทดสอบถังใต้พื้นดินและระบบท่อน้ำมันเชื้อเพลิงทุกๆ 10 ปี



ภาพที่ 3 การวางถังน้ำมันใต้ดินในพื้นที่จริง

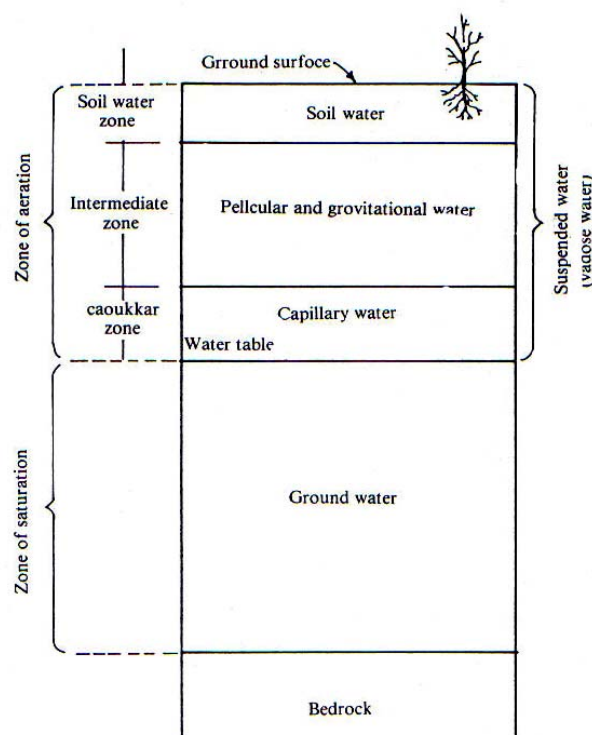
ที่มา: Malkin *et al.* (1997)

3. ผลกระทบจากการรั่วของถังเก็บน้ำมันใต้ดิน

Dowd (1984) กล่าวว่า มีจำนวนรวมของถังเก็บน้ำมันใต้ดินในสหรัฐอเมริกามากกว่า 3 ล้านถัง ซึ่งคาดว่าจะมี 10 เปอร์เซ็นต์หรือมากกว่าของถังเหล่านี้ที่เกิดการรั่ว ดังนั้นจะมีถังที่รั่วเป็นจำนวนมากถึง 3 แสนถัง ส่วน Feliciano (1984) ได้ระบุว่าถังเก็บใต้ดินประมาณ 1.4 ล้านถังเป็นน้ำมันเชื้อเพลิง ซึ่ง 85 เปอร์เซ็นต์ทำจากเหล็กและไม่มีการป้องกันการผุกร่อน โดยส่วนมากจะถูกฝังใต้ดินมากกว่า 20 ปีแล้ว ส่วน Lerh *et al.* (2001) ได้ประมาณว่ามากกว่า 75,000 ของถังเก็บน้ำมันใต้ดิน มีการปล่อยน้ำมันเชื้อเพลิงลงสู่ชั้นใต้ดิน 11 ล้านแกลลอนภายในหนึ่งปี นอกจากนี้ยังมีผู้เชี่ยวชาญด้านปิโตรเลียมบางคนได้คาดประมาณว่ามีถังจำนวน 75,000-100,000 ถังซึ่งอาจจะเกิดการรั่วเข้าสู่ใต้ดิน จากการข้อมูลเหล่านี้ทำให้ทราบว่าถังเก็บน้ำมันใต้ดินเกิดการรั่วมากมายทุกแห่ง ถึงที่ยังคงอยู่อาจจะไม่เกิดการรั่วในทันที แต่คาดว่าจะเกิดการรั่วตามกาลเวลา ส่วน Snow (1985) ได้ทำการบันทึกว่าจากแหล่งกำเนิดที่ทำให้เกิดการปนเปื้อนในน้ำใต้ดินทั้งหมด การรั่วจากถังเก็บน้ำมันใต้ดินจะส่งผลกระทบต่อสุขภาพมนุษย์มากที่สุดดังนั้นควรมีการศึกษาถึงเรื่องนี้อย่างจริงจังเพื่อใช้เป็นข้อมูลในการปกป้องน้ำใต้ดินจากแหล่งกำเนิดมลพิษนี้

ลักษณะพื้นที่ที่เกิดการปนเปื้อนของน้ำมันเชื้อเพลิง

เนื่องจากถังกักเก็บน้ำมันใต้ดินถูกวางในชั้นใต้ดิน ดังนั้นเมื่อเกิดการรั่วไหลจะส่งผลให้น้ำมันใต้ดินเกิดการปนเปื้อน ซึ่งเมื่อพิจารณาองค์ประกอบของชั้นใต้ดิน ดังแสดงในภาพที่ 4 สามารถแบ่งชั้นใต้ดินออกเป็น 2 เขต คือ ชั้นบนซึ่งเป็นเขตที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำเพราะมีอากาศแทรกอยู่ระหว่างเม็ดดิน (unsaturated zone) หรือเรียกว่า vadose zone และชั้นล่างซึ่งเป็นเขตที่อิ่มตัวด้วยน้ำ (saturated zone) ช่องว่างระหว่างเม็ดทรายจะเต็มไปด้วยน้ำ โดยเส้นที่แบ่งเขตทั้งสองนี้คือระดับน้ำใต้ดิน (water table) ซึ่งมีความดันเท่ากับความดันบรรยากาศ



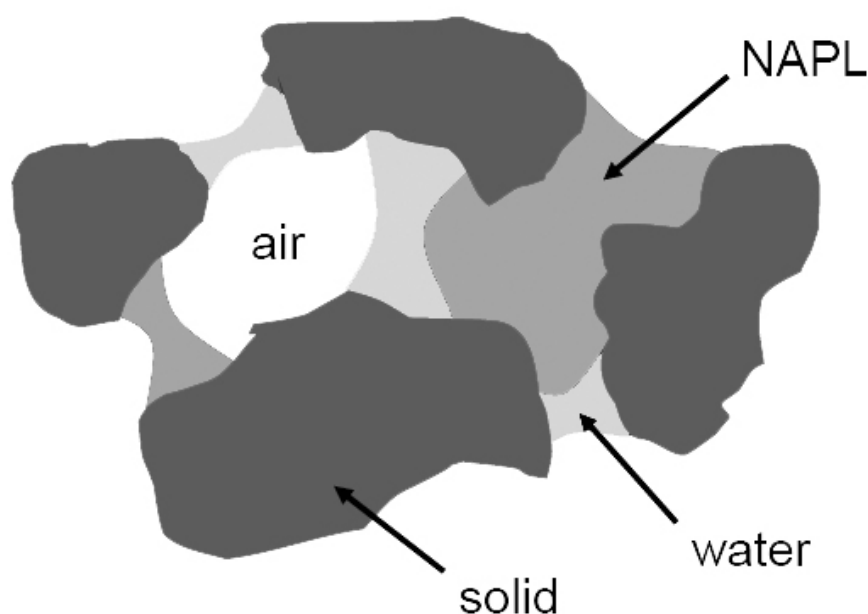
ภาพที่ 4 การแบ่งชั้นดินตามลักษณะของน้ำใต้ผิวดิน

ที่มา: Domenico (1990)

ซึ่งภายในบริเวณชั้นดินไม่อิ่มตัวนี้ ยังสามารถแบ่งออกเป็น 3 ชั้นย่อย คือ

- ชั้นผิวดิน (soil water zone) ชั้นผิวดินจะเป็นชั้นที่น้ำซึมผ่านลงสู่ใต้ดิน โดยในชั้นนี้จะมีอากาศแทรกอยู่ระหว่างเม็ดดิน
- ชั้นดินช่วงกลาง (intermediate vadose zone) อาจจะไม่เกิดขึ้นในบริเวณที่มีฝนตกชุก
- ชั้นดินชุ่มน้ำ (capillary zone) หรือเรียกอีกอย่างว่า capillary fringe เกิดจากการที่น้ำใต้ดินซึมขึ้นมาในช่องว่างระหว่างเม็ดดินด้วยแรงตึงผิว (surface tension) ของน้ำใต้ดิน ซึ่งความหนาของชั้น capillary fringe นี้จะขึ้นอยู่กับขนาดของเม็ดดินและการเรียงตัวของเม็ดดินตลอดจนความหนาแน่นของน้ำใต้ดิน

เนื่องจากถังกักเก็บน้ำมันใต้ดินถูกวางในบริเวณชั้นดินไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ ดังนั้นเมื่อเกิดการรั่วไหลของน้ำมันในชั้นดินนี้ จะประกอบด้วยอนุภาคดิน(สถานะของแข็ง) และความชื้นในทรายซึ่งอยู่ในช่องว่างระหว่างดิน (สถานะของเหลว) และก๊าซในดินซึ่งอยู่ในช่องว่างระหว่างดิน (สถานะก๊าซ) ดังแสดงในภาพที่ 5 หลังจากเกิดการรั่วไหลของ LNAPL ทำให้เกิดการกระจายตัวโดยทั่วทั้ง 3 สถานะ โดยการกระจายตัวจะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของ LNAPL และ คุณสมบัติของทรายและดิน



ภาพที่ 5 ลักษณะการปนเปื้อนในชั้นดินไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ

ที่มา: Pankow and Cherry (1996)

1. คุณสมบัติทางธรณีวิทยาของทรายและดินเหนียว

1.1 ความพรุนของดิน (soil porosity) หมายถึง จำนวนช่องว่างที่มีอยู่ในดินทั้งหมด โดยคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ของปริมาตรทั้งหมดของดิน เนื่องจากน้ำได้ดินเป็นน้ำที่ถูกกักเก็บหรือแทรกตัวอยู่ในช่องว่างของดินในส่วนที่อิ่มตัวด้วยน้ำ ดังนั้นความพรุนของดินจะเป็นตัวบ่งชี้ถึงปริมาตรช่องว่างภายในชั้นดิน ยิ่งมีความพรุนมากก็จะมีช่องว่างภายในชั้นดินมากขึ้นด้วย ดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ความพรุนของดินกลุ่มต่างๆ

ชื่อ	Arithmetic mean	ความพรุน (porosity) (% void space)
กรวด (Gravel) - หยาบ	0.28	0.24-0.36
- ละเอียด	0.34	0.25-0.38
ทราย (Sand) - หยาบ	0.46	0.31-0.46
- ละเอียด	0.43	0.26-0.53
ดินเหนียว (Clay)	0.42	0.34-0.57

ที่มา: Morris and Johnson (1967)

1.2 ความสามารถในการซึมได้ (permeability) หมายถึง ความสามารถของชั้นหินอุ้มน้ำที่จะยอมให้น้ำภายใต้ความกดดันไหลผ่านไปได้ ดังนั้นพวกที่มีค่าความซึมน้ำต่ำจึงเป็นชั้นหินอุ้มน้ำที่เลว กล่าวคือจะยอมปล่อยให้ส่วนน้อยที่ตัวมันเองกักเก็บอยู่ออกมาใช้ประโยชน์ ความซึมผ่านของน้ำในดินจะบ่งบอกอัตราที่น้ำนั้นเคลื่อนที่ผ่านชั้นดินและชั้นหินไปได้ รวมไปถึงคุณภาพของน้ำในดินและน้ำใต้ดินด้วย

1.3 ความหนาแน่นของดิน (density) หมายถึง สัดส่วนระหว่างมวล (mass) ของดินกับปริมาตร (volume) ของดิน โดยแบ่งเป็น 2 ประเภท คือความหนาแน่นรวม (bulk density) หมายถึง สัดส่วนระหว่างมวลของดินขณะที่ดินแห้งสนิทกับปริมาตรทั้งหมด และความหนาแน่นอนุภาค (particle หรือ true หรือ solid phase density) หมายถึง สัดส่วนระหว่างมวลของดิน ขณะที่ดินแห้งสนิทกับปริมาตรของอนุภาคของดิน

1.4 ปริมาณน้ำในดินเชิงปริมาตร ค่านี้เป็นค่าที่แสดงถึงปริมาณน้ำในดิน ถ้าดินที่อยู่ในระบบน้ำใต้ดินจะเกิดการอิ่มตัวด้วยน้ำ ซึ่งจะทำให้มีค่าเท่ากับ 100% พบว่าโดยทั่วไปค่านี้จะมีค่าอยู่ระหว่าง 5 – 50% สำหรับดินบนพื้นดิน

1.5 สารอินทรีย์ในดิน (organic matter) สารอินทรีย์ที่อยู่ในดินจะมีอิทธิพลต่อสารประกอบอันตราย โดยสารอินทรีย์คาร์บอนจะมีความสามารถในการดูดซับสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ที่เป็นของเสียอันตราย ดังนั้นดินควรมีสารอินทรีย์ โดยเฉพาะสารอินทรีย์คาร์บอนประกอบอยู่ด้วย โดยปกติดินจะมีสารอินทรีย์ประมาณ 2–3%

การไหลของน้ำใต้ดิน

โดยการไหลของน้ำใต้ดินจะแบ่งออกเป็น 2 ชนิด ตามลักษณะการเคลื่อนที่ของอนุภาค กล่าวคือ การไหลแบบราบเรียบ (laminar Flow) อนุภาคของน้ำเคลื่อนที่ในลักษณะตามกันไปเป็นแผ่นหรือชั้นเรียบๆ โดยที่แผ่นหนึ่งเคลื่อนทับอีกแผ่นหนึ่ง ส่วนการไหลแบบปั่นป่วน (turbulent flow) อนุภาคของน้ำเคลื่อนที่ในทิศทางไม่แน่นอน โดยสามารถนำหลักการของ Darcy's law มาประยุกต์ใช้ ซึ่งเป็นกฎที่มีความสำคัญมากต่อการคำนวณการวิเคราะห์เกี่ยวกับการโยกย้ายสารปนเปื้อน ซึ่งใช้กันมากในงานน้ำใต้ดิน

$$q = -K\left(\frac{dh}{dl}\right) \quad (1)$$

เมื่อ	q	=	อัตราการไหลจำเพาะ [$\text{m}^2/\text{s.m}$]
	K	=	สภาพน้ำเชิงชลศาสตร์ (Hydraulic conductivity) [m/s] (ดังแสดงในตารางที่ 2)
	$-\frac{dh}{dl}$	=	ความลาดชันเชิงชลศาสตร์ [m/m]

ตารางที่ 2 ค่าสภาพนำเชิงพลศาสตร์ของดินประเภทต่างๆ

Material	Hydraulic conductivity (m/s)	Material	Hydraulic conductivity (m/s)
Gravel	$3 \times 10^{-4} - 3 \times 10^{-2}$	Till	$1 \times 10^{-12} - 2 \times 10^{-6}$
Coarse sand	$9 \times 10^{-7} - 6 \times 10^{-3}$	Clay	$1 \times 10^{-11} - 4.7 \times 10^{-9}$
Median sand	$9 \times 10^{-7} - 5 \times 10^{-4}$	Silt, loess	$1 \times 10^{-9} - 2 \times 10^{-5}$

ที่มา: Domenico (1990)

ถ้าตัวกลางพรุนมีค่า K สูง แสดงว่าอัตราการไหลผ่านของน้ำจะสูงและการไหลของน้ำก็จะสะดวก ซึ่งสมการของดาร์ซีนี้จะใช้ได้ถูกต้องเฉพาะการไหลแบบ laminar flow เท่านั้น สิ่งที่จะกำหนดว่าสภาพการไหลเป็นแบบ laminar flow หรือ turbulent flow คือค่า Reynolds Number (R_e) ที่สามารถเขียนอยู่ในรูปของ

$$R_e = \frac{v \times d}{\nu} \quad (2)$$

เมื่อ	R_e	=	Reynolds number [-]
	v	=	ความเร็วของน้ำไหลตามผิวของเม็ดดิน [m/s]
	d	=	ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเฉลี่ยของเม็ดดิน [cm]
	ν_w	=	ความหนืดจลน์ของน้ำ (kinematics viscosity), [cm ² /s]

ซึ่งส่วนมากสภาพการไหลของน้ำใต้ดินจะเปลี่ยนจากแบบราบเรียบไปเป็นการไหลแบบปั่นป่วนจะมีค่า R_e อยู่ในช่วง 1-12 แต่ Harr (1962) ได้กำหนดไว้ว่าจะใช้กฎของดาร์ซีได้จะต้องมีค่า R_e น้อยกว่าหรือเท่ากับ 0.1 จึงจะได้ผลการคำนวณที่ถูกต้องและแม่นยำ

ความเร็วของการไหลนี้ไม่ใช่ค่าความเร็วการไหลซึมผ่านระหว่างชั้นอุ้มน้ำที่แท้จริงในการคำนวณหาความเร็วที่แท้จริงจะต้องใช้ความเร็วในการรั่วซึม (seepage velocity) ซึ่งเป็นค่าความเร็วที่แท้จริงของน้ำไหลผ่านช่องว่างระหว่างเม็ดดิน นั่นคือ

$$V_{a,s} = \frac{Q_s}{A_s n_s} \quad (3)$$

$$V_{a,c} = \frac{Q_c}{A_c n_c} \quad (4)$$

เมื่อ $V_{a,s}, V_{a,c}$ = ความเร็วที่แท้จริงที่ไหลซึมผ่านชั้นทรายและดินเหนียว [cm/min]
 Q_s, Q_c = อัตราการไหลผ่านชั้นทรายและดินเหนียว [cm³/min]
 n_s, n_c = ค่าความพรุนของชั้นทรายและดินเหนียว [-]
 A_s, A_c = พื้นที่หน้าตัดของชั้นทรายและดินเหนียว (ในแนวตั้งฉากกับการไหล) [cm²]

ค่า $V_{a,s}$ และ $V_{a,c}$ ในช่วงที่เกิดการละลายจะสรุปได้จากค่าอัตราการไหลเวียนทั้งหมด และค่าการซึมผ่านในพื้นที่ที่แตกต่างกัน ตามที่ Power *et al.* (1998) บอกไว้ว่าค่าของ $V_{a,s}$ และ $V_{a,c}$ จะถูกคำนวณที่แต่ละช่วงเวลา โดยใช้กฎของดาร์ซีและความสมดุลของอัตราการไหลดังสมการ

$$\text{ที่} \quad Q_s = Q_w \frac{A_s k_s}{A_s k_s + A_c k_c} \quad (5)$$

$$Q_c = Q_w \frac{A_c k_c}{A_s k_s + A_c k_c} \quad (6)$$

$$\text{แทนสมการ (11) ในสมการ (13): } \frac{V_a n_s}{k_s} = \frac{Q_w}{A_s k_s + A_c k_c} \quad (7)$$

$$\text{แทนสมการ (12) ในสมการ (14): } \frac{V_a n_c}{k_c} = \frac{Q_w}{A_s k_s + A_c k_c} \quad (8)$$

เมื่อ k_s, k_c = ค่าความซึมผ่านชั้นทรายและดิน (permeability), [cm²]
 Q_w = อัตราการไหลของน้ำใต้ดินที่แต่ละความสูงของระดับน้ำ [cm³/min]

น้ำมันเชื้อเพลิง

1. ข้อมูลทั่วไปของน้ำมันเชื้อเพลิง

น้ำมันดิบ (crude oil) คือ ปิโตรเลียมที่อยู่ในลักษณะของเหลวตามธรรมชาติ ซึ่งมี ส่วนประกอบของสารประกอบไฮโดรคาร์บอนมีมากมายหลายประเภทตามลักษณะของสูตรทางเคมีและโครงสร้างโมเลกุล แต่มีเพียง 3 ประเภทเท่านั้น ที่มีความสำคัญเกี่ยวข้องกับปิโตรเลียม (สำนักความปลอดภัยธุรกิจน้ำมันเชื้อเพลิง, 2546) คือ 1) ประเภทพาราฟิน (paraffin) ซึ่งเป็นพวก alkane สูตร C_nH_{2n+2} 2) ประเภทแนพทีน (naphthene) ซึ่งเป็นพวก alkane สูตร C_nH_{2n-6} 3) ประเภทอโรแมติก (aromatic) ซึ่งเป็นพวก cycloalkane สูตร C_nH_{2n-6}

โดยปกติน้ำมันดิบที่สูบขึ้นมา เมื่อผ่านกระบวนการกลั่นแล้วจะได้เป็นผลผลิตปิโตรเลียม (petroleum product) ที่หลากหลาย ซึ่งผลผลิตปิโตรเลียมที่ได้จากการกลั่นที่อุณหภูมิต่างๆ จะได้ น้ำมันเชื้อเพลิงแต่ละชนิด เช่น น้ำมันเบนซิน น้ำมันดีเซล เป็นต้น ดังแสดงในตารางที่ 3 ซึ่งแต่ละชนิดสามารถนำไปใช้ประโยชน์ในเชิงพาณิชย์หลายด้านไม่ว่าจะด้านอุตสาหกรรม คมนาคมหรือแม้กระทั่งใช้ประโยชน์ในชีวิตประจำวัน เช่น ให้แสงสว่าง ความร้อน เป็นต้น

ตารางที่ 3 ลักษณะของผลผลิตของสารปิโตรเลียม

ผลผลิต	ขนาดของไฮโดรคาร์บอน	ช่วงอุณหภูมิกลั่นตัว (°C)	องค์ประกอบ
1. น้ำมันเบนซิน	$C_5 - C_{10}$	40 - 205	Alkanes, isoalkanes, cycloalkenes, romatics, BTEX ^a
2. น้ำมันดีเซล	$C_{15} - C_{25}$	200 - 400	Alkanes, isoalkanes, cycloalkenes, PAHs
3. น้ำมันเชื้อเพลิง	$C_{10} - C_{25}$	140 - 400	Alkanes, isoalkanes, cycloalkenes, BTEX, PAHs ^b
4. น้ำมันหล่อลื่น	$C_{20} - C_{70}$	ส่วนที่เหลือจากการเผาไหม้	Alkanes, PAHs

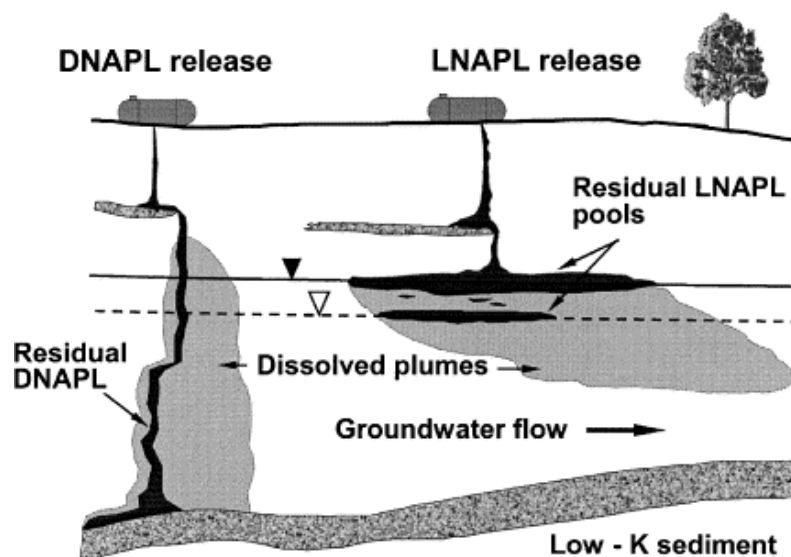
หมายเหตุ ^a BTEX = benzene toluene ethylbenzene และ xylene

^b PAHs = polycyclic aromatic hydrocarbons

ที่มา: เกรียงศักดิ์ (2546)

เนื่องจากน้ำมันเชื้อเพลิงเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนซึ่งแยกตัวจากน้ำ โดยเรียกตามลักษณะของสารประกอบนี้ว่า non-aqueous phase liquid (NAPL) โดยมีการแบ่งชนิดของ NAPL ตามความหนาแน่นเป็น 2 ชนิด ดังแสดงในภาพที่ 6 ได้แก่

1. Light non-aqueous phase liquid (LNAPL) เป็นของเหลวชนิดที่มีน้ำหนักเบา คือมีความหนาแน่นน้อยกว่าน้ำโดยทั่วไปจะลอยอยู่บนผิวน้ำ เช่น น้ำมันเชื้อเพลิงและผลิตภัณฑ์ปิโตรเลียม
2. Dense non-aqueous phase liquid (DNAPL) เป็นของเหลวชนิดที่มีความหนาแน่นมากกว่าน้ำ โดยทั่วไปจะจมอยู่ใต้น้ำ เช่น chlorinated solvent



ภาพที่ 6 ลักษณะการรั่วไหลของสาร DNAPL และ LNAPL

ที่มา: Molson *et al.* (2002)

2. ชนิด โครงสร้าง และคุณสมบัติของน้ำมันเบนซินหรือน้ำมันแก๊สโซลีน (Gasoline)

น้ำมันเบนซินเป็นน้ำมันที่ได้จากการกลั่นโดยตรงและอาจได้จากการแยกก๊าซธรรมชาติเหลวหรือแก๊สโซลีนธรรมชาติ น้ำมันเบนซินจะผสมสารเพิ่มคุณภาพเพื่อให้เหมาะกับการใช้งาน เช่น สารเพิ่มค่าออกเทน สำหรับประเทศไทยในปัจจุบันได้กำหนดชนิดของน้ำมันเบนซินเป็น 2 ชนิด (สำนักความปลอดภัยธุรกิจน้ำมันเชื้อเพลิง, 2546) โดยมีคุณสมบัติ ดังแสดงในตารางที่ 4

1. น้ำมันเบนซินธรรมดา (regular gasoline) ซึ่งมีค่าออกเทน 91 ปริมาณสารตะกั่ว ไม่เกิน 0.15 กรัมต่อลิตร ใช้สำหรับเครื่องยนต์ที่มีอัตราส่วนการอัดต่ำ

2. เบนซินพิเศษ (premium gasoline) ซึ่งมีค่าออกเทน 95 ปริมาณตะกั่วไม่เกิน 0.15 กรัมต่อลิตร เหมาะกับเครื่องยนต์ที่มีอัตราส่วนการอัดสูง

ตารางที่ 4 ข้อกำหนดคุณภาพน้ำมันเบนซินชนิดธรรมดาและชนิดพิเศษ

คุณสมบัติ	น้ำมันเบนซิน (91)	น้ำมันเบนซิน (95)	วิธีทดสอบ
	ขีดจำกัด	ขีดจำกัด	
1. ค่าออกเทน (F – 1)	ต่ำสุด 82.6	ต่ำสุด 94.6	ASTM D2699
2. ปริมาณตะกั่ว (g/l)	สูงสุด 0.40	สูงสุด 0.40	ASTM D3341
3. แรงดันไอน้ำมัน @ 37.8 °C (kPa)	สูงสุด 62	สูงสุด 62	ASTM D328
หรือ @ 100°F (lb)	สูงสุด 9.0	สูงสุด 9.0	
4. กราบเหนียว (g/100ml)	สูงสุด 0.005	สูงสุด 0.005	ASTM D381
หรือ (mg/100ml)	สูงสุด 5	สูงสุด 5	
5. ปริมาณกำมะถัน (% โดยน้ำหนัก)	สูงสุด 0.20	สูงสุด 0.20	ASTM D1266
6. การกัดกร่อนแผ่นทองแดงที่ 50°C ในเวลา 3 ชั่วโมง	สูงสุด No. 1	สูงสุด No. 1	ASTM D130
7. การกลั่น 10% ของการระเหยตัว (°C, °F)	สูงสุด 75	สูงสุด 75	ASTM D86
50% ของการระเหยตัว (°C, °F)	ต่ำสุด 75	ต่ำสุด 75	
	สูงสุด 125	สูงสุด 125	
90% ของการระเหยตัว (°C, °F)	สูงสุด 190	สูงสุด 190	
อุณหภูมิจุดสุดท้าย (°C, °F)	สูงสุด 215	สูงสุด 215	
ที่เหลือ (% โดยปริมาตร)	สูงสุด 2.0	สูงสุด 2.0	
8. สีที่มองเห็นด้วยตาเปล่า	สีแดง	สีเหลืองอ่อน	ตามที่กำหนด

ที่มา: กระทรวงพาณิชย์ (2533)

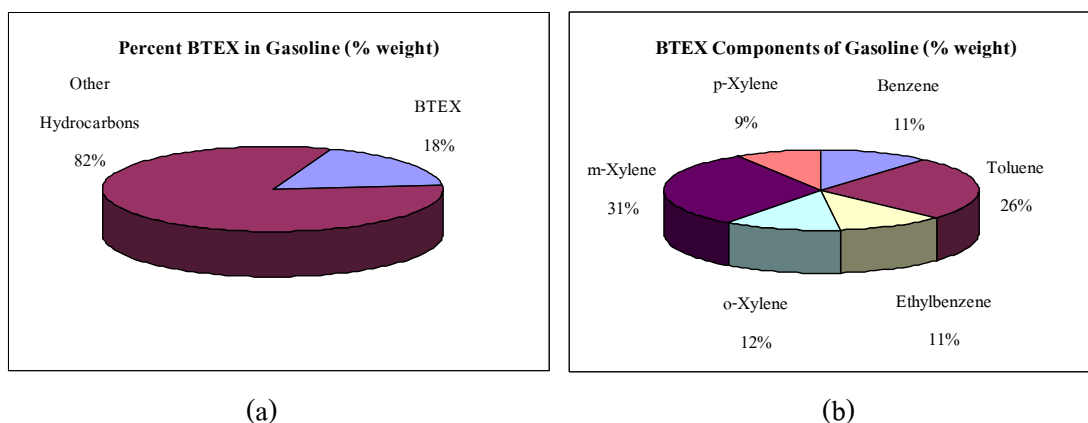
สารประกอบไฮโดรคาร์บอนในน้ำมันเบนซิน สามารถแบ่งเป็น 2 กลุ่ม ได้แก่

1. Aromatics hydrocarbon ได้แก่พวก C_5 ไปถึง C_{12} ของพวก alkanes เช่น n-hexane

2. Aliphatic hydrocarbons ได้แก่ สาร BTEX โดยมากใช้เป็นสารประกอบของน้ำมันเบนซินนอกจากนี้สารไซลีนและเอทิลเบนซินยังใช้เป็นสารทำลายสำหรับการล้างทำความสะอาดและใช้เป็นสารสังเคราะห์โพลิเมอร์ต่างๆ ซึ่งสาร BTEX เหล่านี้จัดเป็นสารอันตรายและส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมอย่างมาก ดังนั้นจึงเลือกใช้น้ำมันเบนซิน 91 (gasoline) เป็นตัวแทนของน้ำมันเชื้อเพลิงในการศึกษาครั้งนี้

3. รายละเอียดเกี่ยวกับ BTEX

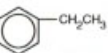
โดยปกติน้ำมันเบนซิน (gasoline) จะประกอบด้วย BTEX 18% โดยน้ำหนัก ซึ่งสาร BTEX เหล่านี้จะมี benzene 11%, toluene 26%, m-xylene 31%, o-xylene 12%, p-xylene 9% และ ethylbenzene 11% โดยน้ำหนัก ดังแสดงในภาพที่ 7 (Christensen and Elton, 1996) โดยมีคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของสาร BTEX ดังแสดงในตารางที่ 5



ภาพที่ 7 น้ำมันเบนซินมี a) เปอร์เซ็นต์ BTEX ในน้ำมันเบนซิน และ b) เปอร์เซ็นต์สารประกอบต่างๆ ใน BTEX

ที่มา: Christensen and Elton (1996)

ตารางที่ 5 คุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของสาร BTEX

	Benzene	Toluene	m-Xylene	o-Xylene	p-Xylene	Ethyl benzene
โครงสร้างเคมี						
สูตรเคมี	C_6H_6	C_7H_8	C_8H_{10}	C_8H_{10}	C_8H_{10}	C_8H_{10}
น้ำหนักโมเลกุล, [g/mol]	78	92	106	106	106	106
อุณหภูมิ, [$^{\circ}C$]	25	20	20	20	20	20
การละลายน้ำ, [mg/l]	1780	515	175	130	198	152
ความดันไอ, [mmHg]	95.2	22	10	10	10	7
ความหนาแน่นจำเพาะ, [kg/l]	0.8787	0.8669	0.8642	0.8802	0.8610	0.8670
ค่าสัมประสิทธิ์การแบ่งแยกน้ำกับออกตา	2.12	2.69	3.20	2.77	3.15	3.15
นอล [$\log K_{ow}$]						
ค่าคงที่ของกฎเฮนรี, [$atm \cdot m^3/mol$]	5.5×10^{-3}	5.18×10^{-3}	7.98×10^{-3}	0.011	7.05×10^{-3}	8.73×10^{-3}
ค่าสัมประสิทธิ์การแบ่งแยกสารอินทรีย์	83	300	240	240	240	1.1
คาร์บอน, K_{oc} [ml/g]						
มาตรฐานคุณภาพน้ำใต้ดิน, [mg/l]	0.005	1	10	10	10	0.7

ที่มา: Christensen and Elton (1996); LaGrega *et al.* (2001)

ถึงแม้ว่าน้ำมันเบนซินจะเป็นสารที่ไม่ผสมกับน้ำ (immiscible) แต่เนื่องจากมีสาร BTEX เป็นสารประกอบ ซึ่งสาร BTEX นี้สามารถละลายน้ำได้เล็กน้อย ดังนั้นเมื่อเกิดการรั่วไหลจากถังเก็บน้ำมันใต้ดินจะสามารถแทรกซึมเข้าสู่ดินและน้ำใต้ดินได้ ทำให้เกิดปัญหามลภาวะรุนแรงในน้ำใต้ดิน โดยจะก่อให้เกิดอันตรายต่อสุขภาพและสิ่งแวดล้อม

4. อันตรายของสาร BTEX

สารประกอบไฮโดรคาร์บอนส่วนมากถูกพบในน้ำใต้ดิน รวมถึงสารประกอบของน้ำมันเบนซิน ซึ่งก็คือสาร BTEX มักถูกปล่อยสู่สิ่งแวดล้อม เนื่องจากสาเหตุต่างๆ อาทิ การรั่วไหลจากถังเก็บน้ำมันใต้ดิน อุศาสหกรรมรถยนต์ เป็นต้น โดยลักษณะและอันตรายของสาร BTEX มีดังต่อไปนี้

เบนซิน (benzene) เป็นสารระเหยง่าย ทำให้เกิดการเคลื่อนที่ออกจากแหล่งกำเนิดเป็นจำนวนมาก แต่มันยังเป็นสารที่เคลื่อนที่ได้สูงในดิน ทำให้มันอาจจะเคลื่อนที่มาถึงน้ำใต้ดินได้ สารประกอบนี้เป็นที่รู้กันว่าเป็นสารก่อมะเร็งและสารนี้ยังเป็นสาเหตุของการเป็นลิวคีเมีย (leukemia) หรือมะเร็งเม็ดเลือดขาว นอกจากนี้เมื่อสารเบนซินเข้าสู่กระแสเลือด สารนี้สามารถไปยังเนื้อเยื่อไขมันต่างๆ โดยสามารถทำปฏิกิริยาและกลายเป็นสารฟีนอล (phenol) ซึ่งกลายเป็นสารก่อมะเร็งที่ร้ายแรงกว่าเบนซิน (Christensen and Elton, 1996) เมทตาโบไลต์ของเบนซินสามารถรวมตัวกับโปรตีนและ DNA ในตับ ม้าม ไชกระดูกและเลือดของสัตว์ได้ ซึ่งการรวมตัวกันนี้มีผลต่อการทำงานและการเจริญเติบโตของเซลล์ โดยเฉพาะอย่างยิ่งที่ไขกระดูกและม้าม (Snyder *et al.*, 1978; Sun *et al.*, 1990; Longacre *et al.*, 1981) เมื่อสัมผัสเบนซินทำให้เกิดอาการระคายเคืองต่อผิวหนังและตา อาการทางผิวหนังที่พบคือ บวมแดง แสบร้อน ในกรณีที่รุนแรงผิวหนังจะบวม น้ำและเป็นเม็ดตุ่มพอง (Wolf *et al.*, 1956) ส่วนโทลูอิน (toluene) และ ไซลีน (xylene) การหายใจเอาสารทั้งคู่นี้ในความเข้มข้น 0.4 mg/l. จะทำให้มีอาการปวดหัว วิงเวียนศีรษะ หน้ามืดและระคายเคืองต่อเนื้อเยื่อต่างๆ ถ้าได้รับปริมาณความเข้มข้นสูงๆ จะมีอาการร้ายแรงขึ้น ส่งผลต่อระบบประสาทส่วนกลางและถ้าได้รับเป็นระยะเวลานานก็จะทำลายสมอง แต่ไม่พบว่าเป็นสารก่อมะเร็ง (เกรียงศักดิ์, 2546; Christensen and Elton, 1996) ส่วนเอทิลเบนซิน (ethylbenzene) สามารถเข้าสู่ผิวหนังโดยการสัมผัส ผลในระยะสั้นก่อให้เกิดการระคายเคืองตาและคอ ส่วนผลในระยะยาวเป็นสาเหตุให้การเคลื่อนไหวลดลงและวิงเวียนศีรษะ

ดังนั้น ถ้าร่างกายได้รับสาร BTEX เหล่านี้ในปริมาณที่มากกว่าค่า median lethal dose 50 (LD₅₀) คือ ปริมาณสารเคมีที่คำนวณได้ที่จะมีผลทำให้เกิดการตาย 50% ของประชากรที่ใช้ทดสอบ และ ค่า threshold limit value (TLV) คือค่าความเข้มข้นของสารที่ฆ่าประชากรที่ใช้ทดสอบตาย 50% หลังจากได้รับเป็นระยะเวลารวม 96 ชั่วโมง (ดังแสดงในตารางที่ 6) ก็จะก่อให้เกิดอันตรายอาจถึงชีวิตได้

ตารางที่ 6 ค่า LD₅₀ และค่า TLV ของ BTEX

สาร	LD ₅₀ ^a (mg/kg)	TLV ^b (ppm)
Benzene	3,306	10
Toluene	5,000	100
Ethyl benzene	3,500	100
Xylene	5,000	100

หมายเหตุ^a LD₅₀ = Median lethal dose 50

^b TLV = Threshold limit value

ที่มา: เกียรติกู้ (2546)

กลไกการเคลื่อนที่ของ LNAPL ในชั้นดินไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ

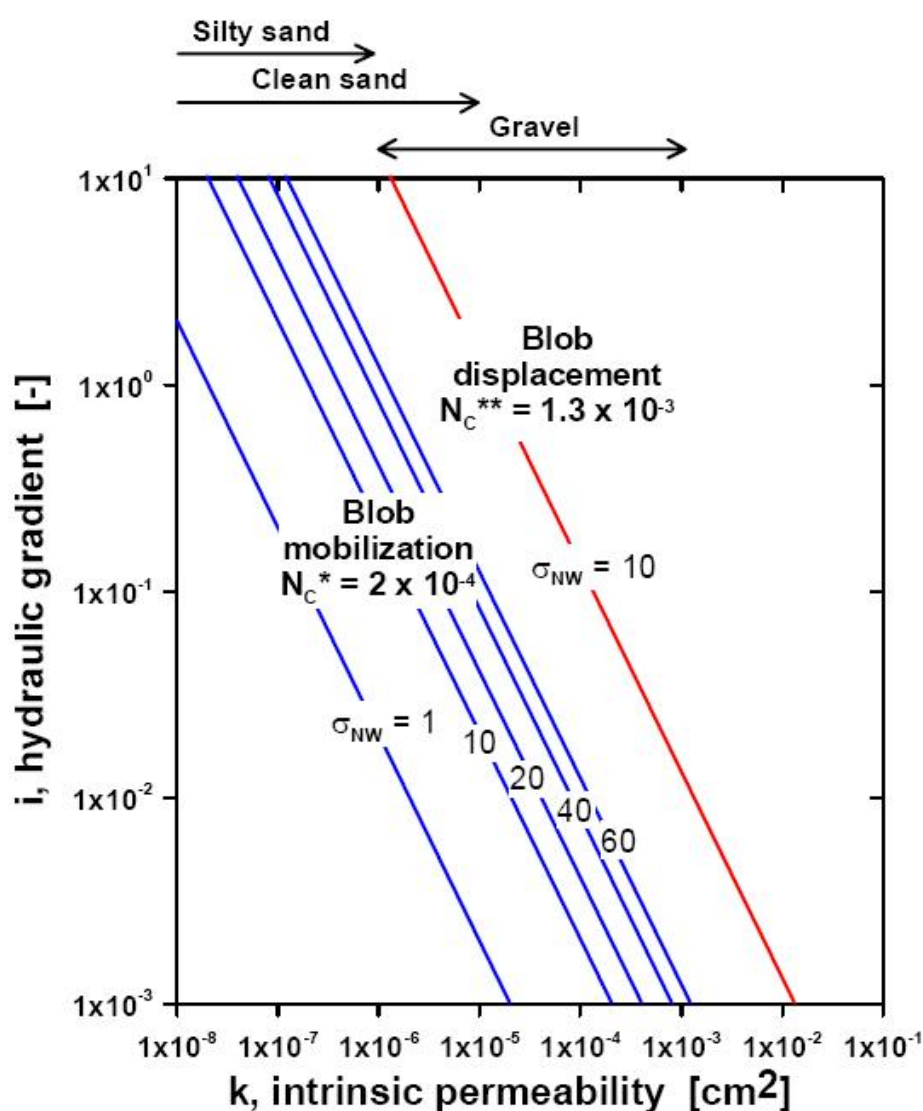
เมื่อ LNAPL เกิดการเคลื่อนที่ในชั้นดินไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ โดยแรงที่เป็นตัวควบคุมการเคลื่อนที่ คือ 1) แรงตึงผิว (interfacial tension) 2) แรง capillary (Capillary force) 3) แรง buoyancy หรือ แรงหนืด (viscosity force) และ 4) แรงโน้มถ่วง (gravity force) ซึ่งมีความสัมพันธ์กันดังนี้

การที่ LNAPL กับน้ำใต้ดินสามารถอยู่ร่วมกันได้ในดินเป็นผลมาจากความแตกต่างของแรงตึงผิวระหว่าง LNAPL กับน้ำใต้ดิน โดยแรงตึงผิวนี้นี้จะขึ้นอยู่กับแรง capillary ซึ่งเป็นตัวกำหนดทิศทางการเคลื่อนที่ของ LNAPL โดยแรง capillary นี้สามารถหาได้จากค่า capillary number (N_c) โดยมีสมการดังนี้

$$N_c = \frac{V_d \mu_w}{\sigma_{NW}} = \frac{\text{viscous force}}{\text{capillary force}} \quad (9)$$

เมื่อ N_c = capillary number [-]
 μ_w = ความหนืดสัมบูรณ์ของน้ำ (viscosity of water at 20°C), [g/cm.s]
 σ_{NW} = แรงตึงผิวระหว่างน้ำใต้ดินกับน้ำมัน (interfacial tension), [g/s²]

โดย Wilson and Conrad (1984) ได้รายงานว่า น้ำมันเชื้อเพลิงที่ตกค้างจะเริ่มเคลื่อนที่ที่ค่า N_c ประมาณ 2×10^{-4} และน้ำมันเชื้อเพลิงที่ตกค้างทั้งหมดจะถูกแทนที่ด้วยน้ำที่ค่า N_c ประมาณ 1.3×10^{-3} ดังแสดงในภาพที่ 8 นอกจากนี้ Morrow *et al.* (1988) ได้กล่าวว่าถ้าค่า N_c มีค่าน้อยกว่า 10^{-3} น้ำมันเชื้อเพลิงจะไม่เกิดการเคลื่อนที่ ดังนั้นเพื่อให้ น้ำมันเชื้อเพลิงไม่ไหลออกไปกับน้ำใต้ดินและจับตัวเป็น plume หนึ่งอยู่กับที่ ต้องให้ค่าการไหลของน้ำมันน้อยกว่าการไหลของน้ำเสมอ



ภาพที่ 8 การเคลื่อนที่ของ LNAPL โดยใช้ค่า capillary number เป็นตัวควบคุม

ที่มา: Wilson and Conrad (1984)

นอกจากนี้ค่า capillary ยังสามารถหาได้จากค่า Bond number (B_o) โดยมีสมการดังนี้

$$B_o = \frac{(\rho_{NAPL} - \rho_w)gR^2}{\sigma_{NW}} = \frac{\text{gravity force}}{\text{capillary force}} \quad (10)$$

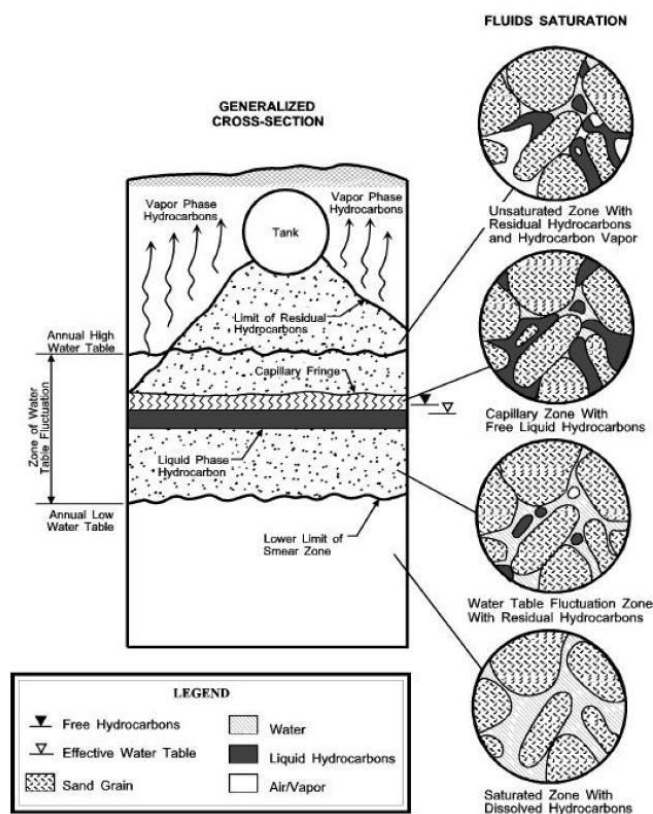
เมื่อ	ρ_{NAPL}	=	ความหนาแน่นของน้ำมัน [g/l]
	ρ_w	=	ความหนาแน่นของน้ำใต้ดิน [g/l]
	g	=	gravitational acceleration [cm/s ²]
	R	=	grain size radius [cm.]

จากสมการที่ 17 และ 18 จะเห็นว่าการเคลื่อนที่ของ LNAPL จะมีแรง capillary แรงโน้มถ่วงและแรงหนืดมาเกี่ยวข้อง จากสมการนี้สามารถอธิบายการเคลื่อนที่ได้ดังนี้ ถ้ามีแรง capillary มากกว่าแรงหนืดหรือแรงโน้มถ่วง LNAPL จะไม่เกิดการเคลื่อนที่ ทำให้ LNAPL เกิดการติดค้างอยู่กับที่

นอกจากแรงต่างๆ ที่ทำให้เกิดการเคลื่อนที่แล้ว การเคลื่อนที่ก็ยังขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของตัวกลาง ได้แก่ ความพรุน ความชื้นน้ำและขนาดของดินและทรายอีกด้วย

กระบวนการถ่ายเทมวลของสาร BTEX ในแต่ละสถานะ

การปนเปื้อนของ LNAPL สามารถแบ่งได้จากการเคลื่อนที่ระหว่างสถานะในชั้นใต้ดินได้ 4 สถานะ คือ LNAPL อากาศ น้ำและดิน เมื่อเกิดการปนเปื้อนของ LNAPL ระหว่างสถานะในชั้นใต้ดินนี้ LNAPL จะเคลื่อนที่เพื่อเข้าสู่สภาวะสมดุล (equilibrium condition) โดยสามารถแบ่งตามการถ่ายเทมวลระหว่างสถานะในชั้นใต้ดินได้ดังนี้ 1) LNAPL-น้ำ จะเกิดการถ่ายเทมวลแบบการละลาย (dissolution) เป็นการถ่ายเทมวลสู่น้ำ 2) LNAPL-อากาศ จะเกิดการถ่ายเทมวลแบบการระเหย (volatilization) เป็นการถ่ายเทมวลสู่ช่องว่างอากาศ และ 3) LNAPL-ทราย จะเกิดการถ่ายเทมวลแบบการดูดซับ (adsorption) เป็นการถ่ายเทมวลสู่ solids phase ซึ่งกระบวนการถ่ายเทมวลในแต่ละสถานะสามารถแบ่งตามการกระจายของ LNAPL หลังจากเกิดการรั่วไหลของถังเก็บน้ำมันใต้ดิน ดังแสดงในภาพที่ 9



ภาพที่ 9 การกระจายของ LNAPL ในแต่ละสภาวะ (phase) ในชั้นใต้ดิน
ที่มา: EPA. (2005)

1. การถ่ายเทมวลระหว่าง LNAPL-อากาศ

การเคลื่อนที่ของ LNAPL จากสภาวะก๊าซผ่านอนุภาคของดินนั้นจะมีกระบวนการที่เกี่ยวข้อง ได้แก่ การแพร่ (diffusion) โดยที่ diffusion คือการเคลื่อนที่ของสารปนเปื้อนผ่านอนุภาคของดิน โดยอาศัยความแตกต่างระหว่างความเข้มข้นของสารปนเปื้อน ดังนั้น diffusion จะเป็นกระบวนการที่ควบคุมการเคลื่อนที่ของสารปนเปื้อนสำหรับดินที่มีความพรุนต่ำ การเคลื่อนตัวของสารปนเปื้อนระหว่างสถานะนั้นจะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติทางกายภาพ เคมีและสิ่งแวดล้อม ดังแสดงในตารางที่ 7 ซึ่งสามารถวิเคราะห์การระเหยตามการแพร่ของ LNAPL ได้ดังนี้ 1) การแพร่ผ่านผิวดินกับอากาศ จะเกิดการแพร่แบบ liquid phase diffusion และ 2) การแพร่ผ่านผิวดินกับน้ำ liquid phase diffusion โดยทั่วไปการแพร่แบบ liquid phase diffusion จะมีการแพร่น้อยกว่า gas phase diffusion

ตารางที่ 7 คุณสมบัติทางกายภาพ เคมีและสิ่งแวดล้อม

คุณสมบัติทางกายภาพ	คุณสมบัติทางเคมี	คุณสมบัติทางสิ่งแวดล้อม
- ความชื้นภายในดิน	- ความสามารถในการระเหย	- อุณหภูมิ
- ปริมาณสารอินทรีย์ในดิน	- ลักษณะความเป็นขั้วระหว่าง	- การไหลของน้ำใต้ดิน
- การกระจายตัวของขนาดดิน	สารปนเปื้อนและดิน	
- ความพรุนของดิน	- ความหนาแน่นและความ	
	หนืดของสารปนเปื้อน	

ที่มา: LaGrega *et al.* (2001)

เมื่อ LNAPL เกิดการรั่วจะเริ่มดันระเหยทันทีที่รั่วไหลออกจากถังกักเก็บใต้ดิน โดย LNAPLจะมีอัตราการระเหยของน้ำมันในช่วงแรกมาก เนื่องจากสารระเหย (volatile) จะระเหยออกจากมวลน้ำมันจนเหลือสารที่ไม่ระเหย (non-volatile) โดย Ventakesh (1979) ได้อธิบายว่าน้ำมันที่ลอยในน้ำจะมีอัตราการระเหยสูงหรือต่ำขึ้นอยู่กับขนาดพื้นที่ของน้ำมัน ชนิดของน้ำมัน (type of oil) และอุณหภูมิของน้ำมัน (oil temperature) ซึ่งในอากาศสภาพปกติที่อุณหภูมิ 20°C น้ำมันเบนซินจะระเหยประมาณร้อยละ 50 ของปริมาณน้ำมันที่หกทั้งหมดภายในระยะเวลา 7-8 นาที

ซึ่งค่าการระเหยมีความสัมพันธ์กับค่าความสามารถในการละลายน้ำตามกฎของเฮนรีโดยค่าคงที่ของเฮนรี (Henry's law constant) ใช้อธิบายถึงความสามารถในการละลายของก๊าซลงในของเหลว เมื่อสารเคมีระเหยได้ละลายลงในน้ำจะมีสารเคมีบางส่วนลอยอยู่เหนือผิวน้ำ ดังนั้นค่าคงที่ของเฮนรีสามารถบ่งบอกได้ถึงความสามารถระเหยออกของสารเคมีอันตรายต่างๆ

โดย Henry's law กล่าวว่าที่สมดุลความเข้มข้นของสารเคมีในน้ำเป็นปฏิภาคโดยตรงกับความดันย่อย (partial pressure) ของสารเคมีนั้นในอากาศ (headspace)

$$P = H \times C_{w,i} \quad (11)$$

เมื่อ P = ความดันย่อยของสมการ [atm]

H = Henry's law constant [atm.m³/mole]

- i = สารประกอบในน้ำมันเบนซิน ได้แก่ BTEX
 $C_{w,i}$ = ความเข้มข้นของสาร BTEX ที่อยู่ในน้ำใต้ดิน [mole/m³]

สำหรับค่าคงที่ของเฮนรีที่ไม่มีหน่วย (H') สามารถหาได้ด้วยสมการ

$$H' = \frac{H}{RT} \quad (12)$$

- เมื่อ H' = Henry's law constant [-]
 R = ค่าคงที่ของสารเบนซิน [atm · m³/mol · K]
 T = อุณหภูมิ [°C]

ถ้าต้องการคำนวณหา H จากข้อมูลความดันไอและค่าการละลายน้ำได้ด้วยสมการ

$$H = \frac{V_P}{C_s} \quad (13)$$

- เมื่อ H = Henry's law constant [atm.m³/mole]
 V_P = ความดันไอของสาร [atm]
 $C_{s,i}$ = ค่าความสามารถละลายน้ำสูงสุดของสาร BTEX แต่ละตัว [mole/m³]

ณ จุดสมดุล ค่าความเข้มข้นของความดันไอ (C_g) ของสาร BTEX แต่ละตัวสามารถหาได้จากสมการของ Raoult's law ดังนี้

$$C_g = X_i \frac{P}{RT} \quad (14)$$

- เมื่อ i = สารเคมีส่วนผสมในน้ำมันเบนซิน ได้แก่ benzene, toluene, ethylbenzene และ xylene

$$X_i = \text{mole fraction of BTEX in gasoline [\%]}$$

หาค่ามวลในการระเหยออกของสาร BTEX แต่ละตัว ($M_{v,i}$) ด้วยสมการ

$$M_{v,i} = X_i \times C_g \times V_{void} \quad (15)$$

แทนค่าสมการที่ (10) และ (11) ลงในสมการที่ (13) จะได้ค่า C_g ดังนี้

$$C_g = H' \times C_{w,I} \quad (16)$$

แทนค่า C_g ที่ได้จากสมการที่ 15 ลงในสมการที่ 14 จะได้

$$M_{v,i} = X_i \times H' \times C_{w,i} \times V_{void} \quad (17)$$

เมื่อ V_{void} = ปริมาตร LNAPL ที่ปนเปื้อนในอากาศที่แทรกอยู่ระหว่างเม็ดทราย [cm^3]

สารที่ละลายน้ำได้ดีและมีค่าความดันไอต่ำ มีแนวโน้มจะระเหยกลายเป็นไอจากน้ำได้น้อย โดยทั่วไปสารมีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับ $10^{-7} \text{ atm.m}^3/\text{mole}$ ถือว่าไม่มีการระเหยออกจากสารละลาย มีผลทำให้ความเข้มข้นในสารละลายเพิ่มขึ้นเนื่องจากการระเหยของน้ำออกจากสารละลาย สำหรับสารที่มีค่าคงที่ของเฮนรีมากกว่า $10^{-7} \text{ atm.m}^3/\text{mole}$ การระเหยกลายเป็นไอน้ำมีนัยสำคัญและอาจเป็นการสูญเสียสารออกจากน้ำอีกทางหนึ่ง (กองจัดการสารอันตรายและกากของเสีย, 2543)

2. การถ่ายเทมวลระหว่าง LNAPL-ดิน

เมื่อ LNAPL เกิดการปนเปื้อนในดิน LNAPL จะเกิดการซับ (sorption) ซึ่งเป็นขบวนการเคลื่อนที่จากสถานะหนึ่งไปสู่สถานะหนึ่ง โดยผ่านเส้นแบ่งสภาวะ (boundary) โดยที่การดูดซับ (adsorption) เป็นขบวนการที่เกิดขึ้นที่พื้นผิวของตัวดูดซับ โดยการซับจะเกิดจากการเคลื่อนที่ของโมเลกุลสารอินทรีย์สู่ผิวของตัวซับ โดยปกติแล้วการส่งผ่านในชั้นฟิล์มและการแพร่ผ่านในรูพรุนเป็นขั้นตอนที่เกิดขึ้นช้าสุด ดังนั้นจึงเป็นขั้นตอนที่ควบคุมการดูดซับ (rate limiting step) เมื่อใดที่การแพร่ในรูพรุนเป็นกระบวนการที่ควบคุมการดูดซับ อัตราการแพร่ผ่านจะลดลง เมื่อสารนั้นมีน้ำหนักโมเลกุลที่เพิ่มขึ้นและขนาดของรูพรุนมีขนาดเล็กลง โดยมีแรงต่างๆที่ควบคุมการดูดซับ ได้แก่ แรงดึงดูดระหว่างขั้ว แรง van der waal

2.1 กลไกการจับ

การจับเป็นปรากฏการณ์ที่เกิดจากสารประกอบที่ไม่ชอบน้ำ (hydrophobic) ถูกดูดซับไว้กับดิน โดยทั่วไปการจับจะมีอยู่ 2 ชนิดที่ควรทราบได้แก่ 1) การดูดซับ (adsorption) เป็นการแยกสารปนเปื้อนออกจากสารละลายแล้วเกาะติดบนของแข็ง และ 2) การไม่ดูดซับ (desorption) เป็นการหลุดออกของสารปนเปื้อนออกจากผิวของแข็ง

2.2 การจับด้วยดิน

ดินเป็นตัวดูดซับที่มีความสำคัญตัวหนึ่ง โดยจะทำการดูดซับสารปนเปื้อน ที่มีคุณสมบัติละลายน้ำได้น้อย หรือเป็นพวกไม่ชอบน้ำ จะทำให้ดินดูดซับสารปนเปื้อนได้มาก ทั้งนี้ปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อความจุของการดูดซับของดิน ได้แก่ ค่าการละลาย โครงสร้างโมเลกุล น้ำหนักโมเลกุล ขั้วของสารปนเปื้อน ค่าการอิ่มตัวของ LNAPL

2.3 การวิเคราะห์การจับ

เพื่อให้เกิดความชัดเจนเกี่ยวกับการจับมากขึ้น จึงมีการนำค่าสัมประสิทธิ์การจับต่างๆ มาใช้ วิเคราะห์หาความสามารถในการดูดซับสารปนเปื้อนของดินและสารอินทรีย์คาร์บอนในดิน ซึ่งนำไปสู่การเคลื่อนที่ของสารปนเปื้อน โดยเปรียบเทียบระหว่างความเร็วในการไหลของน้ำใต้ดิน และความเร็วของสารปนเปื้อนที่เคลื่อนที่ในชั้นใต้ดิน ซึ่งอธิบายถึงค่าสัมประสิทธิ์ต่างๆ ดังนี้

- ค่าสัมประสิทธิ์การแบ่งแยกน้ำกับออกทานอล (octanol-water partition coefficient, K_{ow}) คำนี้อธิบายว่าสารประกอบอินทรีย์จะแบ่งแยกระหว่างข้างน้ำกับข้างอินทรีย์มากน้อยขนาดไหน ดังสมการที่ 5 โดยค่านี้จะได้มาจากการทดลอง ซึ่งถ้าค่า K_{ow} มีความสัมพันธ์โดยตรงกับค่าความสามารถละลายน้ำได้ (S) คือเมื่อสารปนเปื้อนมีค่า K_{ow} มากจะเป็นพวกไม่ชอบน้ำ ทำให้เกิดการละลายน้ำได้น้อยลง ดังนั้นดินจะดูดซับสารปนเปื้อนนี้ได้มาก

$$K_{ow} = \frac{C_{octanol}}{C_w} \quad (18)$$

เมื่อ $C_{octanal}$ = ความเข้มข้นของสารปนเปื้อนในสารออกทานอล, [mg/l]

- ค่าสัมประสิทธิ์การกระจายดิน (soil distribution coefficient, K_d) คำนี้อธิบายถึงแนวโน้มของสารเคมีปนเปื้อนถูกดูดซับด้วยดินได้มากหรือน้อย ดังสมการ 6

$$K_d = \frac{C_s}{C_w} \quad (19)$$

เมื่อ C_s = มวลของสารปนเปื้อนที่ถูกจับต่อมวลตัวจับ, [mg/g]

- ค่าสัมประสิทธิ์การแบ่งแยกสารอินทรีย์คาร์บอน (Organic carbon partition coefficient, K_{oc}) เนื่องจากดินจะมีสารอินทรีย์คาร์บอนเป็นส่วนใหญ่ที่ทำหน้าที่ดูดซับสารเคมีปนเปื้อน จึงนิยมใช้ค่า K_{oc} มาคำนวณ ดังสมการ 7

$$K_{oc} = \frac{C_c}{C_w} \quad (20)$$

เมื่อ C_c = มวลของสารปนเปื้อนในอินทรีย์คาร์บอน, [mg/g]

- เมื่อทราบค่า K_{oc} แล้ว สามารถคำนวณหาค่า K_d ได้จากสมการที่ 8 ดังนี้

$$K_d = K_{oc} \times f_{oc} \quad (21)$$

เมื่อ f_{oc} = ค่าเศษส่วนของปริมาณสารอินทรีย์คาร์บอนในดิน

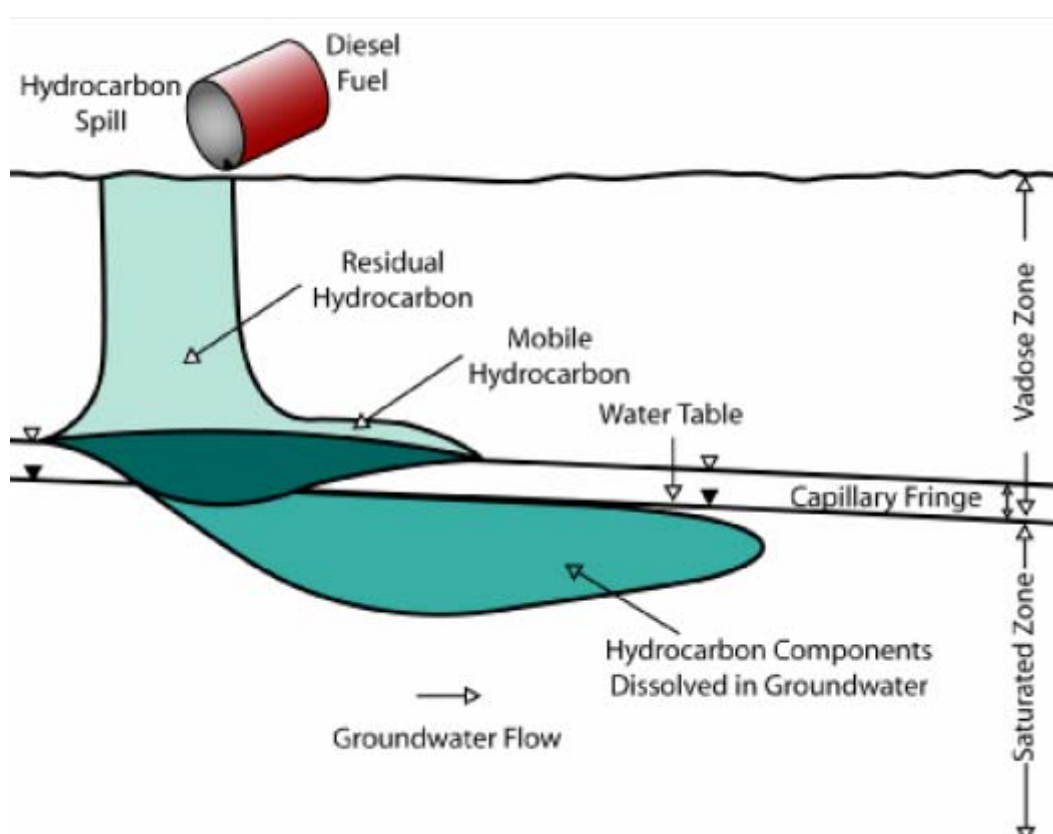
- สามารถหาค่ามวลในการดูดซับของสารBTEX แต่ละตัว ($M_{ad,i}$) โดยใช้สมการที่ 15 และ 16 ดังนี้

$$M_{ad,i} = K_{oc} \times K_d \times M_{soil} \times C_{w,i} \quad (22)$$

เมื่อ M_{soil} = มวลของทรายที่ใช้ดูดซับ [g]

3. การถ่ายเทมวลระหว่าง LNAPL-น้ำใต้ดิน

เมื่อ LNAPL เคลื่อนที่ถึงชั้น capillary fringe ซึ่งเป็นบริเวณที่มีน้ำใต้ดินแทรกซึมมาตามช่องว่างของเม็ดทราย ทำให้เกิดพื้นที่สัมผัสระหว่างน้ำมันและน้ำใต้ดิน ซึ่งน้ำมันส่วนที่สัมผัสกับน้ำใต้ดินนี้สามารถเกิดการละลายและเคลื่อนที่ไปกับน้ำใต้ดินได้ ดังแสดงในภาพที่ 10 ซึ่งอัตราการละลายของ LNAPL ในชั้นใต้ดินนี้จะขึ้นอยู่กับค่าการละลาย (solubility) และการแพร่ของโมเลกุลของสารประกอบ LNAPL ซึ่งก็คือ สาร BTEX โดยความเข้มข้นของสาร BTEX ที่ปนเปื้อนในน้ำใต้ดินจะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติต่างๆ ของสาร BTEX และสัดส่วนของสารประกอบ BTEX ในน้ำมันเบนซิน⁹¹



ภาพที่ 10 การละลายของ LNAPL เมื่อสัมผัสกับน้ำ

ที่มา: Fetter (1992)

อัตราการถ่ายเทมวล (rate of mass transfer) จาก LNAPL เข้าสู่ น้ำใต้ดิน ถูกแสดงโดย ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวล (mass transfer coefficient) ความเข้มข้นที่แตกต่างกัน (concentration difference) และพื้นที่ส่วนสัมผัส (contact area) โดยมีสมการดังนี้

$$\begin{array}{ccccccc} \text{อัตราการ} & & \text{สัมประสิทธิ์} & & \text{ความเข้มข้น} & & \text{พื้นที่} \\ \text{ถ่ายเทมวล} & = & \text{การถ่ายเทมวล} & \times & \text{ที่แตกต่าง} & \times & \text{ส่วนสัมผัส} \\ (M/T) & & (L/T) & & (M/L^3) & & (L^2) \end{array} \quad (23)$$

การละลายของ LNAPL จะเกิดที่สถานะสมดุล ซึ่งสาร BTEX ที่เป็นสารประกอบของ LNAPL นี้มีแนวโน้มที่จะไม่ละลายน้ำหรือมีค่าการละลายน้ำต่ำ โดยพื้นฐานเหล่านี้ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติเฉพาะของสาร BTEX แต่ละตัว โดยการละลายนี้จะขึ้นอยู่กับความเข้มข้นที่แตกต่างกันของสาร BTEX กับน้ำใต้ดินที่เข้าระบบ (Uchirin and Slater, 1985)

- เมื่อมาพิจารณาถึงค่าในการละลายของสาร LNAPL โดยหาจากค่าความเข้มข้นของสาร BTEX ที่ปนเปื้อนในน้ำใต้ดินจะใช้สมการดังนี้ (Chomsurin, 2003)

$$C_{w,i} = \left(\frac{\rho_i \times X_i \times \Delta V_{\text{image,bottom}} \times n}{Q_w \times (\Delta t)} \right) \quad (24)$$

เมื่อ $C_{w,i}$ = ความเข้มข้นของสาร BTEX ที่อยู่ในน้ำใต้ดิน ณ สถานะสมดุล, [mg/l]
 $V_{\text{image,middle1,2}}$ = ปริมาตรของสารปนเปื้อนที่เวลาก่อนหน้าและเวลาปัจจุบัน, [cm³]
 t_1, t_2 = เวลาในการปนเปื้อนที่เวลาก่อนหน้าและเวลาปัจจุบัน, (min)
 $C_{s,i}$ = ค่าความสามารถละลายน้ำสูงสุดของสาร BTEX แต่ละตัว, (mg/l)

- โดยสามารถหาค่ามวลในการละลายของสาร BTEX แต่ละตัว ($M_{w,i}$) ได้จากสมการที่ 21

$$M_{w,i} = C_{w,i} \times V_{\text{water}} \quad (25)$$

เมื่อ V_{water} = ปริมาตรของน้ำใต้ดิน [litre]

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1. การสร้าง Reactor

งานวิจัยหลายงานได้ทำการศึกษาแบบจำลองแบบ 2 มิติ ซึ่งสรุปแล้วว่าการนำกระจกมาสร้างเป็น Reactor นั้นเป็นวิธีที่ดีที่สุด โดย Whelan *et al.* (1994) ได้ให้เหตุผลว่ากระจกเป็นพวกชอบน้ำ (hydrophilic) ที่ป้องกันการเปียกเป็นพิเศษและสามารถแพร่กระจายสารซึ่งเป็นพวกชอบน้ำ (Hydrophobic) ได้ดี อีกทั้งกระจกยังสามารถสังเกตเห็นการเปลี่ยนแปลงหรือการกระจายตัวของน้ำมันในน้ำได้ดี แต่เนื่องจากกระจกมีราคาแพงและยากต่อการเจาะรูเพื่อต่อท่อ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงนำอะคริลิกซึ่งมีคุณสมบัติใกล้เคียงกระจกมาใช้แทน โดยอะคริลิกที่นำมาใช้นี้จะต้องมีความหนาพอ เพื่อให้ทนต่อการรับกำลังบดอัดทรายและดินเหนียว อีกทั้งทนการกัดกร่อนของน้ำมันได้

โดยข้อดีของการศึกษาแบบ 2 มิติ มีดังนี้

1. ทำให้สังเกตเห็นผิวน้ำอิสระ ทิศทางการไหลของน้ำมันเชื้อเพลิง ทั้งลักษณะการไหลคงตัวและการไหลไม่คงตัวในสภาพ 2 มิติ ทั้งในแนวกว้างและยาว (Kim and Corapcioglu, 2003)
2. สามารถตรวจจุดสมดุลของตำแหน่ง Plume ของน้ำมันเชื้อเพลิง เหนือระดับน้ำตัวกลางเปียกได้ (Schroth *et al.*, 1995)
3. สามารถลอกเลียนแบบการเคลื่อนที่ของของเหลวที่ไม่สามารถละลายผสมกันได้ (Schroth *et al.*, 1995, 1998)
4. ค่าเฉลี่ยในแนวตั้งของแบบจำลอง 2 มิติ สามารถพัฒนาเพื่อใช้อธิบายถึงพื้นที่ในการแพร่และการเคลื่อนที่ของ LNAPLs ที่หกหรือรั่วจากถังเก็บน้ำมันใต้ดิน (Kim and Corapcioglu, 2003)
5. Smith and Zhang (2001) ได้ประยุกต์ใช้วิธี 2 มิติ ในการประเมินการทดลองชนิด macroscopic และ microscopic แทนวิธีการคาดคะเนของ (Chang *et al.*, 1994)

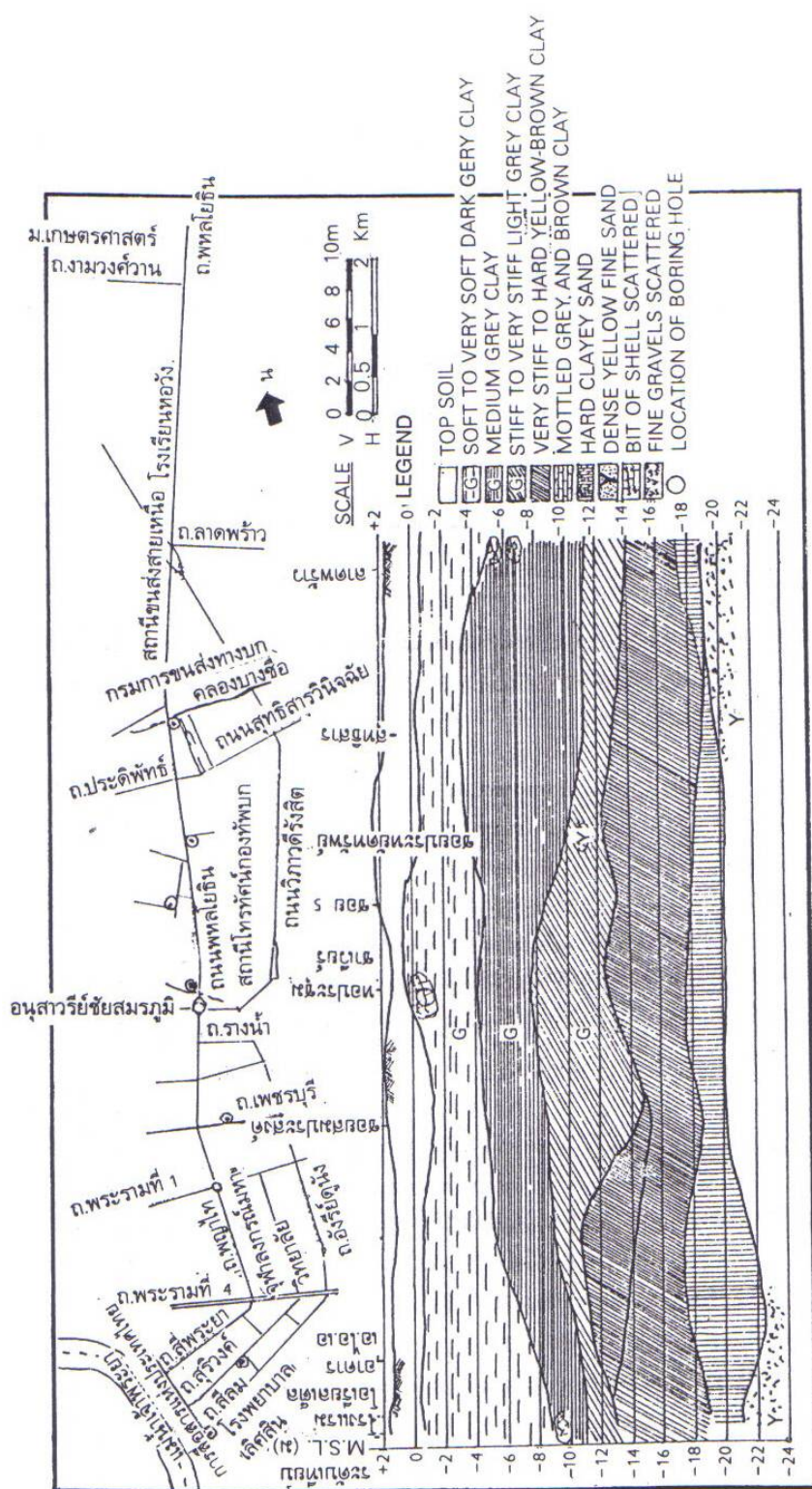
ส่วนข้อเสียในการทดลองแบบ 2 มิติ ก็คือ ยากต่อการควบคุมพารามิเตอร์ต่างๆ เช่นการระเหยของน้ำมันเชื้อเพลิง เนื่องจากการทดลองแบบนี้ Reactor จะมีขนาดใหญ่กว่าการทดลองแบบ column มาก ทำให้มีปัจจัยที่ต้องควบคุมเป็นจำนวนมาก ในการทดลองควรต้องระวังในขั้นตอนการสร้างแบบจำลอง เพราะอัตราการไหลจะเปลี่ยนแปลงตามขนาดความกว้างของแบบจำลอง

2. การเตรียมดิน

สภาพธรรมชาติของดินจะไม่เป็นเนื้อเดียวกัน (heterogeneous) ถึงแม้จะดูลักษณะแล้วเป็นเนื้อเดียวกัน (homogeneous) แต่ก็อาจมีชั้นบางๆ ซึ่งมีค่าความชื้นต่างกันไปเสมออยู่ ในงานทดลองนี้เป็นการจำลองเหตุการณ์ถึงกักเก็บน้ำมันใต้ดินเกิดการรั่วไหล ซึ่งถึงถูกวางอยู่ใต้ดินลึกประมาณ 2-3 เมตร จากพื้นดิน ดังนั้นเพื่อให้การจำลองมีลักษณะเหมือนจริงจึงนำดินที่ความลึก 2-3 เมตร ในบริเวณกรุงเทพฯ มาใช้ในการทดลอง ซึ่งชั้นดินนี้มีลักษณะเป็นดินชั้นบนสุด (top soil) สีเทาอ่อน ร่วนและมียูอินทรีย์หรือนินทรีย์วัตถุปน (สง่า, 2541) ดังแสดงในภาพที่ 11

3. การเตรียมทราย

Schroth *et al.*, (1995,1998) กล่าวถึงการเตรียมและการบรรจุทรายไว้ดังนี้ ทรายที่นำมาใช้ในการทดลองต้องล้างด้วยน้ำสะอาด เพื่อแยกฝุ่นที่เกิดจากการขนส่งออก หลังจากนั้นนำทรายมาอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส จากนั้นนำทรายที่แยกขนาดและอบแล้วมาเทลง reactor อย่างต่อเนื่องผ่านกรวยให้เต็มพอดีกับขนาดความกว้างของตู้ทดลอง โดยต้องป้องกันการเปลี่ยนแปลงขนาดของอนุภาค เนื่องจากการใช้ทรายหลายขนาด แต่ถ้าใช้เพียงขนาดเดียวจะไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงมากนักและต้องไม่ให้เกิดฟองก๊าซเวลาบรรจุทรายด้วย ส่วน Whelan *et al.* (1994) ได้อธิบายถึงการบรรจุทรายไว้ว่า ต้องเททรายทีละชั้น ชั้นละไม่เกิน 5 ซม. แล้วเทน้ำให้เหนือกว่าชั้นทรายเล็กน้อย เพื่อป้องกันการเกิดฟองอากาศและลดการแบ่งชั้นของทราย โดยน้ำจะต้องเหนือกว่าชั้นทรายเสมอ นอกจากนี้ชั้นบนสุดของทรายต้องมีการคลุมด้วยอูมิเนียมฟอสเฟต เพื่อป้องกันการระเหยของน้ำมันออกสู่ภายนอก โดยการทดลองของนักวิจัยข้างต้นนี้ ใช้ทรายขาว (silica sand) ในการทดลองเพราะทำให้เห็นการเปลี่ยนแปลงและการเคลื่อนที่ของน้ำมันเชื้อเพลิงได้อย่างชัดเจน



ภาพที่ 11 รายละเอียดลักษณะชนวน

ที่มา: สจ. (2541)

4. การเตรียมน้ำใต้ดินสังเคราะห์ (synthetic groundwater)

Whelan *et al.* (1994) แนะนำให้ผสมน้ำสะอาดกับสารโซเดียมเอไซด์ (sodium azide, NaN_3) ที่ความเข้มข้น 200 มก./ล. เพื่อลดกิจกรรมทางชีวภาพของแบคทีเรียในตัวอย่างทราย โดยน้ำที่จะนำมาใช้ต้องมีอุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิห้อง ก่อนที่จะนำไปสู่ชั้นดินและทรายอุ้มน้ำ แต่ยังมีนักวิจัยอีกหลายท่าน เช่น Smith and Zhang (2001) และ Miller *et al.* (2004) แนะนำให้ใช้น้ำ degassed deionized distilled (DDD) ส่วน Schroth *et al.* (1995, 1998) แนะนำให้ใช้น้ำกลั่น แต่สำหรับการทดลองนี้ต้องใช้น้ำเป็นจำนวนมาก ดังนั้นจึงเลือกใช้น้ำกรองผสม sodium azide เพื่อความเหมาะสมกับงานนี้

5. พารามิเตอร์ที่ใช้วัดคุณสมบัติของทรายและดิน

Schroth *et al.* (1998) เลือกใช้ทรายที่เป็นเนื้อเดียวกัน (homogeneous) โดยมีการวัดพารามิเตอร์ต่างๆ ดังนี้ ค่าเฉลี่ยความพรุน (average porosity), สารอินทรีย์คาร์บอน (organic carbon), สภาพนำเชิงชลศาสตร์ (hydraulic conductivity), effective particle diameter (D_{50}) และ uniformity coefficient (D_{60}/D_{10}) ส่วน Smith and Zhang (2001) มีการวัด ค่ากลางของขนาดดิน (mean particle size), สภาพนำเชิงชลศาสตร์ และ ค่าการซึมผ่านน้ำ นอกจากนี้ยังมี Kim and Corapcioglu (2003) ได้ทำการวัดความพรุนและขนาดเม็ดดิน และสุดท้าย Miller *et al.* (2004) ได้ทำการวัดความหนาแน่นทั้งก้อน (bulk density) และขนาดอนุภาคของดิน

6. การย้อมสีน้ำมันเชื้อเพลิง

Schroth *et al.* (1995, 1998) ได้ทำการวิเคราะห์ภาพระหว่างน้ำกับน้ำมัน Soltrol 220 ซึ่งมีคุณสมบัติคล้ายน้ำมันเชื้อเพลิงของประเทศไทย โดยการส่องผ่านแสง ซึ่งน้ำมัน Soltrol 220 ที่ใช้นี้ จะถูกนำมาย้อมสีด้วย Sudan III ที่ความเข้มข้น 0.01% by weight โดยที่คุณสมบัติของ Sudan III นี้ เป็นพวกไม่ชอบน้ำ จึงไม่เกิดการละลายในน้ำ นอกจากนี้ยังมีสีแดงสว่าง ส่วน Miller *et al.* (2004) ใช้ Sudan IV ในการย้อมสี Soltrol 220 ที่ความเข้มข้น 0.5 % by weight นอกจากนี้ยังมี Smith and Zhang (2001) ใช้ Sudan IV ในการย้อมสี PCE ที่ความเข้มข้น 80 มก./ล. โดยที่คุณสมบัติของ Sudan IV เหมือนกับ Sudan III เพียงแต่ Sudan IV จะมีสีแดงที่เข้มมากกว่าช่วยให้สามารถสังเกตเห็นเส้นทางการไหลของน้ำมันเชื้อเพลิงได้ชัดเจนยิ่งขึ้น นอกจากนี้ยังสามารถใช้ในงาน Microscopy ได้ด้วย ซึ่งคุณสมบัตินี้สอดคล้องเหมาะสมกับงานวิจัยนี้

7. การบันทึกภาพ

Smith and Zhang (2000) ได้แนะนำถึงรูปแบบการจัดแสง โดยให้มีการนำหลอดไฟ 50 วัตต์ และนำกระดานสีขาวมาวางไว้ด้านหลังตู้ทดลอง เพื่อให้กล้องสามารถบันทึกภาพได้อย่างชัดเจนและในการทดลองนี้ควรทำในที่มืดเท่านั้น เพื่อป้องกันการรบกวนของแสงและป้องกันการเกิดการผิดพลาดของภาพ ดังนั้นในงานทดลองนี้จึงได้มีการจัดฉากให้มีระหว่างทำการทดลอง

กระบวนการทดลองถูกบันทึกภาพโดยใช้ กล้องถ่ายภาพดิจิทัลยี่ห้อ Casio รุ่น EX-Z40 ความละเอียด 4 mega pixels x 3 optical zoom ส่วนรูปภาพที่ได้จะถูกนำไปประมวลผลเป็นตัวเลขเชิงปริมาณ โปรแกรม Matlab เวอร์ชัน 7.0 ถูกนำมาใช้เป็นเครื่องมือจาก image processing toolbox ซึ่งรูปจะถูกแปลงเป็นภาพแบบ gray scale ที่มี 256 โทนสี เพื่อใช้หาค่า histogram ต่อไป โดย Chomsurin and Werth (2003) ได้ทำการหาค่าพื้นที่เส้นรอบรูปและปริมาตรที่ปนเปื้อนของน้ำมันแบบ 2 มิติ ดังนี้

$$A_{pt} = \sum_{j=1}^m A_{p,j} \quad (26)$$

$$V_t = \sum_{j=1}^m V_j \quad (27)$$

เมื่อ	A_p	=	พื้นที่รอบรูปของน้ำมันเชื้อเพลิง [cm^2]
	V_t	=	ปริมาตรน้ำมันรวมที่ปนเปื้อน [cm^3]
	m	=	จำนวนรอยเปื้อนในระบบ [-]