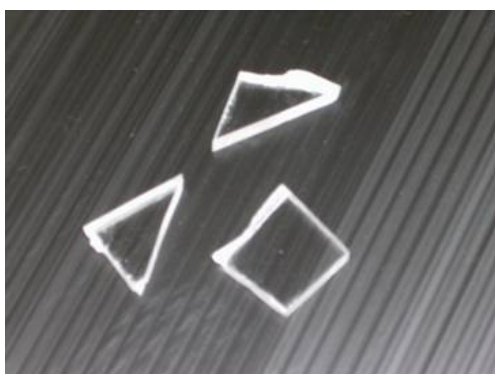


ผลและวิจารณ์

1. การทดลองเบื้องต้น

1.1 การทดสอบอะคริลิก

การทดสอบอะคริลิก เพื่อทดสอบหาวัสดุที่เหมาะสมต่อการสร้างตู้ทดลอง โดยใช้ อะคริลิกใสที่มีความหนา 1 cm. ดังแสดงในภาพที่ 17 มาทำการทดสอบ โดยทำการวัดขนาดและ จดบันทึก จากนั้นนำไปแช่ในน้ำมันเบนซิน 91 เป็นเวลา 5 วัน โดยการใช้การแช่อะคริลิกในน้ำกลั่น (blank) เป็นชุดควบคุม



(a)



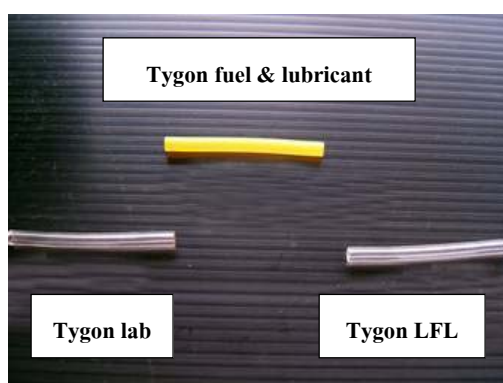
(b)

ภาพที่ 17 ลักษณะและวิธีการทดสอบ a) อะคริลิกก่อนการทดสอบและ b) บีกเกอร์ใส่น้ำมันเบนซิน 91 และน้ำกลั่น

ผลจากการทดสอบ พบว่า เมื่อเวลาผ่านไป 5 วัน นำอะคริลิกที่แช่ในน้ำมันเบนซิน 91 มาเปรียบเทียบกับอะคริลิกที่แช่ในน้ำกลั่น พบว่าสี ขนาดและรูปร่างของอะคริลิกไม่มีการเปลี่ยนแปลง ดังนั้นจึงนำอะคริลิกที่ใช้ทดสอบนี้มาสร้างตู้ทดลอง

1.2 การทดสอบสายซิลิโคน (Silicon)

การทดสอบหาสายซิลิโคน เพื่อนำมาใช้กับน้ำมันเบนซิน 91 โดยการนำสายซิลิโคน ชนิด Tygon lab, Tygon fuel & lubricant และ Tygon LFL ดังแสดงในภาพที่ 18 ซึ่งมีคุณสมบัติ ดังแสดงในตารางที่ 12 มาทำการทดสอบ โดยแบ่งสายซิลิโคนชนิดละ 2 เส้น ทำการชั่งน้ำหนักและวัดความยาว นำสายซิลิโคนมาใส่บีกเกอร์ โดยในแต่ละบีกเกอร์จะใส่น้ำมันเบนซิน 91 และน้ำกลั่นตามลำดับ จากนั้นทำการทดสอบโดยการแช่สายซิลิโคนในน้ำมันเบนซิน 91 และน้ำกลั่นเป็นเวลา 48 ชั่วโมง วิธีการทดสอบนี้มาจากเอกสารแนะนำโดย บริษัท Cole-Parmer Instrument Company



ภาพที่ 18 ตัวอย่างสายซิลิโคนแต่ละชนิดที่นำมาใช้ทดสอบ

ตารางที่ 12 คุณสมบัติของสายซิลิโคนแต่ละชนิดที่ใช้ในการทดสอบ

ชนิดของสายซิลิโคน	คุณสมบัติ
Tygon lab	- อายุการใช้งานนาน ไม่เกิดการ oxidize ใช้กับสารอินทรีย์ได้ ก๊าซซึมออกมาได้ต่ำ ใช้ได้ดีกับของเหลวที่มีความหนืด มีความเป็นฉนวนสูง
Tygon LFL	- มีความยืดหยุ่นสูง มีอายุการใช้งานนานเมื่อใช้กับปั๊ม peristaltic ใช้งานได้หลากหลายทั้งกับ อาหาร เครื่องดื่ม ยา
Tygon fuel & lubricant	- ใช้กับผลิตภัณฑ์ไฮโดรคาร์บอนและสารที่กลั่นออกมาเหมาะกับ gasoline, kerosene, heat oil ก๊าซซึมออกมาได้ต่ำ มีความเป็นฉนวนสูง

ผลจากการทดสอบเมื่อเวลาผ่านไป 48 ชั่วโมง พบว่าสายซิลิโคนชนิด Tygon fuel & lubricant ไม่มีการเปลี่ยนแปลงทั้งรูปร่าง น้ำหนักและความยาว ส่วนสายชนิดอื่นนั้นไม่สามารถทนต่อการกัดกร่อนของน้ำมันเบนซิน 91 ได้ โดยสายซิลิโคนจะเกิดการหลอมละลาย ทำให้ลักษณะรูปร่างของสายบิดเบี้ยว

1.3 การข้อมสีน้ำมันเบนซิน 91

เนื่องจากน้ำมันเบนซิน 91 ปกติจะมีสีใส แต่เมื่อสัมผัสกับน้ำแล้วสีใสของน้ำมันจะจางลงมากทำให้ยากต่อการสังเกตสีของน้ำมัน ดังแสดงในภาพที่ 19a ดังนั้นจึงต้องทำการข้อมสีของน้ำมันเบนซิน 91 ให้มีสีเข้มขึ้น โดยเลือกสาร Sudan IV มาใช้เป็นสีข้อม เนื่องจากสาร Sudan IV นี้เป็นสารเฉื่อย (inert) ซึ่งไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของน้ำมันและไม่ละลายน้ำ (Smith and Zhang, 2001)

ผลจากการทดสอบ พบว่า สามารถสังเกตสีของน้ำมันเบนซิน 91 ที่ผสมสาร Sudan IV ได้ชัดเจนที่สุดที่ 0.1 % โดยน้ำหนัก ดังแสดงในภาพที่ 19b จึงเลือกใช้การข้อมสีที่ความเข้มข้นนี้ในการทดลอง



(a)



(b)

ภาพที่ 19 การข้อมสี a) น้ำมันเบนซิน 91 ก่อนการข้อมสี และ b) น้ำมันเบนซิน 91 หลังจากข้อมด้วย Sudan IV 0.1 % by weight

1.4 การทดสอบหาทรายที่มีขนาดเหมาะสม

ในการทดสอบเลือกใช้ทรายขาว เพื่อให้ง่ายในการสังเกตสีน้ำมันที่ปนเปื้อน โดยนำทรายที่ล้างและอบเสร็จแล้วมาใส่ตะแกรง โดยเรียงจากเบอร์ 8, 16 และถาดรอง แล้วนำไปเข้าเครื่องเขย่าแยกเอาทรายเฉพาะที่ค้างอยู่ระหว่างตะแกรงเบอร์ 8 และเบอร์ 16 ซึ่งมีขนาดตั้งแต่ 1.18 – 2.36 mm. มาใช้ทำการทดลอง ซึ่งเป็นขนาดที่ใกล้เคียงกับขนาดทรายขี้เป็ดที่ใช้ในการฝังกลบถังเก็บน้ำมันใต้ดินในพื้นที่จริง (กองควบคุมน้ำมันเชื้อเพลิงและก๊าซ, 2538)

2. การเคลื่อนที่ของน้ำมันเชื้อเพลิงในชั้นดินไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ

2.1 การจำลองการรั่วไหลของ LNAPL จากถังกักเก็บใต้ดิน

ในการจำลองการรั่วไหลของ LNAPL จากถังกักเก็บใต้ดินในชั้นดินไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ โดย LNAPL ที่เกิดการรั่วนี้จะมีสาร BTEX เป็นสารประกอบ (คุณสมบัติดังตารางที่ 3) ซึ่งสาร BTEX เป็นสารที่สำคัญที่ทำให้เกิดอันตรายต่อสิ่งแวดล้อม โดยตลอดการทดลองได้สมมติให้แหล่งกำเนิดไม่มีการเปลี่ยนแปลงระหว่างการปล่อย LNAPL แบบต่อเนื่องเป็นเวลา 135 นาที ส่วนพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับกลไกที่อธิบายการจำลองการเคลื่อนที่ของ LNAPL สามารถประมวลได้ดังแสดงในตารางที่ 13

ตารางที่ 13 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้อธิบายการจำลองการเคลื่อนที่ของ LNAPL

พารามิเตอร์	คำย่อ	ค่า	หมายเหตุ
ปริมาตรของน้ำมันที่เกิดการปนเปื้อน	V_o	45 ml.	
อัตราการไหลจากแหล่งกำเนิด	Q_o	1 cm ³ /min	
ความพรุนของทราย	n_s	0.46	-จากการ
ความพรุนของดินเหนียว	n_c	0.42	วิเคราะห์ใน
ความซึมของทราย	k_s	1.41*10 ⁻⁵ cm/s	ห้องปฏิบัติการ
ความซึมของดินเหนียว	k_c	3.98*10 ⁻⁹ cm/s	ดังแสดงใน
ความหนาแน่นแห้งของทราย	γ_d	1.6 g/cm ³	ภาคผนวก จ

ตารางที่ 13 (ต่อ) ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้อธิบายการจำลองการเคลื่อนที่ของ LNAPL

พารามิเตอร์	คำย่อ	ค่า	หมายเหตุ
ความเร็ว seepage พื้นที่หน้าตัดตั้งฉากกับทิศทางการไหลของน้ำ เมื่อระดับน้ำสูง (จากด้านล่าง) เท่ากับ	v	0.4 cm/min	
- 5 cm. (ในชั้นทราย)	A_{S1}	0 cm^2	- จากการ
- 13 cm. (ในชั้นทราย)	A_{S2}	60.96 cm^2	คำนวณดัง
- 21 cm. (ในชั้นทราย)	A_{S3}	121.92 cm^2	แสดงใน
- 5 cm. (ในชั้นดินเหนียว)	A_C	38.1 cm^2	สมการที่ (5)
อัตราการไหลของน้ำใต้ดิน ที่ระดับน้ำ 5 cm.	Q_1	$6.4 \text{ cm}^3/\text{min}$	และ (6)
อัตราการไหลของน้ำใต้ดิน ที่ระดับน้ำ 13 cm.	Q_2	$11.22 \text{ cm}^3/\text{min}$	
อัตราการไหลของน้ำใต้ดิน ที่ระดับน้ำ 21 cm.	Q_3	$22.43 \text{ cm}^3/\text{min}$	

2.2 ลักษณะการทดลอง

ในการทดลองเป็นการใช้น้ำใต้ดินสังเคราะห์ปั๊มเข้าด้วยอัตราการไหล 22.43, 11.2 และ $6.4 \text{ cm}^3/\text{min}$ (การคำนวณดังแสดงในตารางผนวกที่ ค2) ตามการเปลี่ยนแปลงของระดับน้ำที่ 21, 13 และ 5 cm. จากด้านล่างตู้ทดลอง ตามลำดับ น้ำใต้ดินสังเคราะห์จะถูกปั๊มเข้าไปใน clear well ก่อน เพื่อให้ความเร็วของน้ำใต้ดินไหลเข้าสู่ตู้ทดลองเท่ากันตลอดพื้นที่หน้าตัด โดยการทดลองนี้มีความเร็ว seepage ที่ $0.40 \text{ cm}/\text{min}$ คิดเป็นค่า Reynolds number ($R_e = V_d/V_w$) เท่ากับ 0.12 (ดังแสดงในตารางผนวกที่ ง1) ซึ่งค่าของ Reynolds ที่ได้ในงานนี้มีค่าน้อยกว่า 10 ดังนั้นการทดลองนี้จัดเป็นการไหลแบบ laminar flow (Freeze and Cherry, 1979) จากนั้นน้ำใต้ดินจะไหลไปเข้าสู่ตู้ทดลอง ซึ่งภายในมีการเรียงตัวของดินเหนียวในด้านล่างและทรายขาวในด้านบน (heterogeneous soil) ตามภาพที่ 12 เมื่อทั้งดินเหนียวและทรายขาวอิ่มตัวดีแล้วจึงปั๊มน้ำมันเข้าสู่ตู้ทดลองด้วยอัตราการไหล $1 \text{ ml}/\text{min}$ จนกระทั่งได้ลักษณะ plume น้ำมันที่ค่อนข้างคงที่จึงหยุดปล่อยน้ำมัน โดยเวลาในการหยุดปั๊มน้ำมันของการทดลองนี้คือ 135 นาที จากนั้นทำการบันทึกภาพการเคลื่อนที่ของ LNAPL ตามเวลาที่กำหนด ดังแสดงในภาพผนวกที่ 10 โดยการทดลองนี้ใช้เวลาทั้งหมด 600 นาที

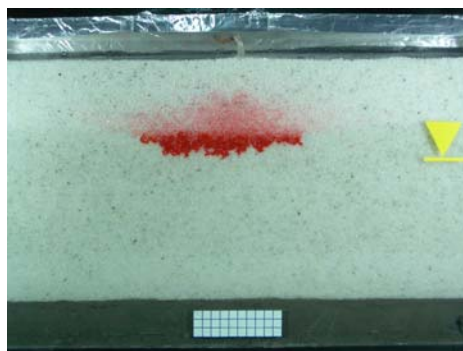
ในการทดลองนี้แสดงให้เห็นผลของแรงที่ควบคุมการเคลื่อนที่ของ LNAPL โดยมี พารามิเตอร์ที่ใช้ควบคุมการเคลื่อนที่คือ 1) แรง capillary สามารถหาได้จากค่า capillary number (N_c) ดังแสดงในสมการที่ 9 ซึ่งจะใช้ออกถึงการเคลื่อนที่ของ LNAPL 2) แรง buoyancy หรือ แรงหนืด (viscosity force) สามารถหาได้จากค่า bond number (ในสมการที่ 10) ซึ่งใช้อธิบายการดักติดอยู่กับที่ของ LNAPL 3) แรงโน้มถ่วง (gravity force) ทำหน้าที่คล้ายแรงหนืด 4) แรงตึงผิว (interfacial tension) ระหว่างน้ำมันกับน้ำ และ 5) คุณสมบัติของตัวกลาง ได้แก่ ความพรุน ค่าความซึมผ่านและขนาดของทราย

2.3 การเคลื่อนที่ของ LNAPL ตามการเปลี่ยนแปลงของระดับน้ำ

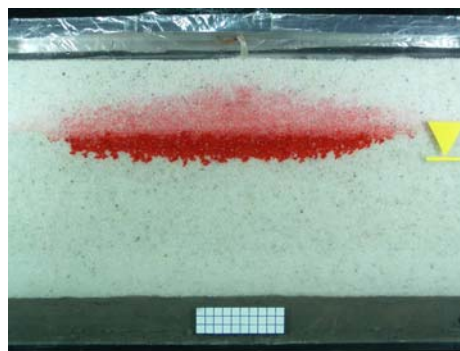
เนื่องจากระดับน้ำใต้ดินในธรรมชาติ มีการเปลี่ยนแปลงระดับน้ำใต้ดินขึ้น – ลง (fluctuation) เสมอ ดังนั้นเพื่อให้เข้าใจถึงพฤติกรรมของน้ำมันหลังเกิดการรั่วไหลจากถังกักเก็บใต้ดินเข้าสู่ น้ำใต้ดิน จึงได้ทำการทดลองลดและเพิ่มระดับน้ำ เพื่อที่จะได้ศึกษาถึงพฤติกรรม การเคลื่อนที่ของ LNAPL เมื่อระดับน้ำเกิดการเปลี่ยนแปลง โดยได้แบ่งการทดลองนี้เป็น 2 ส่วน ดังนี้

1. การเคลื่อนที่ลงของ LNAPL ตามการลดของระดับน้ำ ดังแสดงในภาพที่ 20
2. การเคลื่อนที่ขึ้นของ LNAPL ตามการเพิ่มของระดับน้ำ

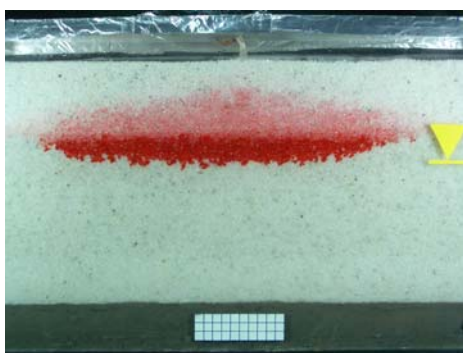
ซึ่งจากการนำภาพที่ 20 ที่ได้จากการทดลองมาแปลงเป็นผลในรูปของเส้นรอบขอบ (contour) ในแต่ละช่วงเวลา โดยใช้โปรแกรม Matlab v.7 และ ใช้โปรแกรม Adobe Photoshop CS ช่วยในการแต่งภาพจะได้ผลดังแสดงในภาพที่ 21 โดยแสดงผลให้อยู่ในรูปของเส้น contour เพื่อให้ง่ายต่อการอธิบายผลการเคลื่อนที่ของ LNAPL



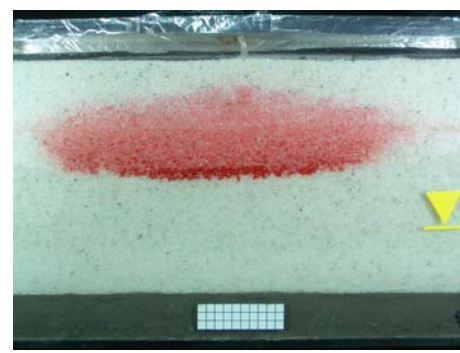
a. เวลา 45 นาที



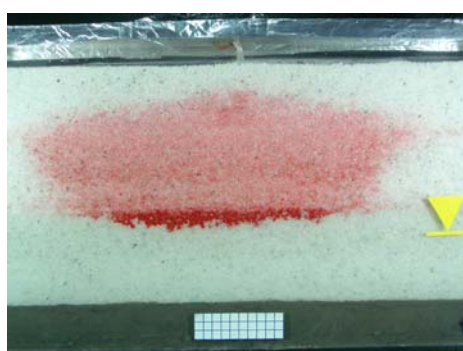
b. เวลา 135 นาที



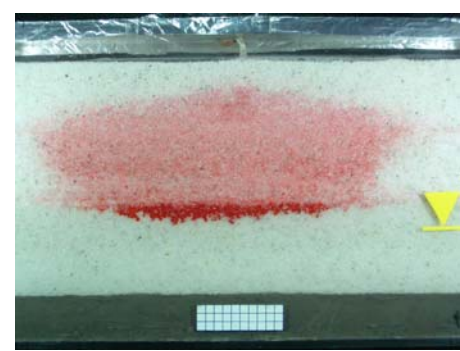
c. เวลา 150 นาที



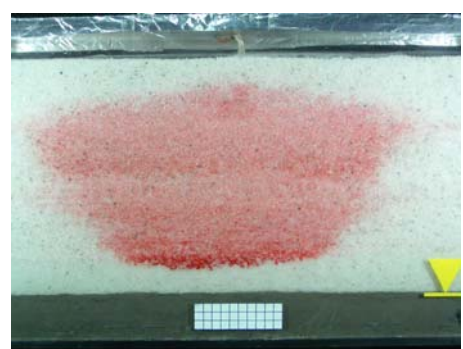
d. เวลา 155 นาที



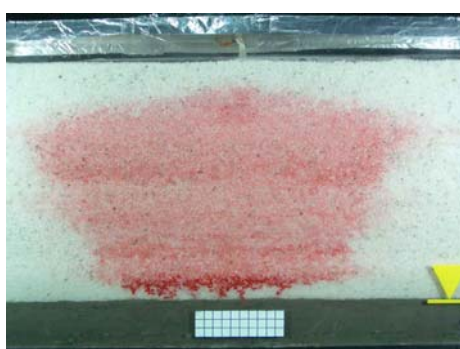
e. เวลา 180 นาที



f. เวลา 210 นาที

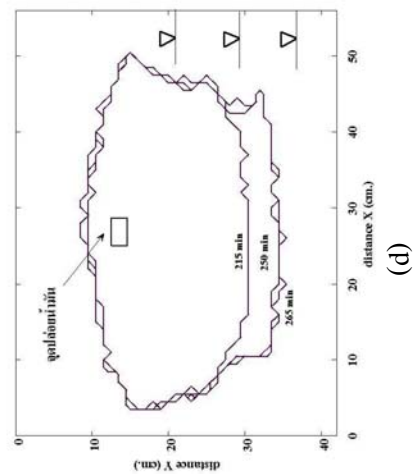
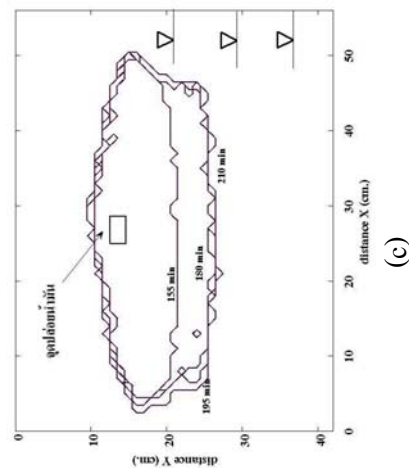
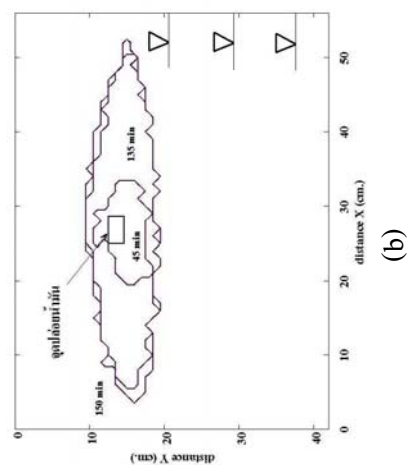
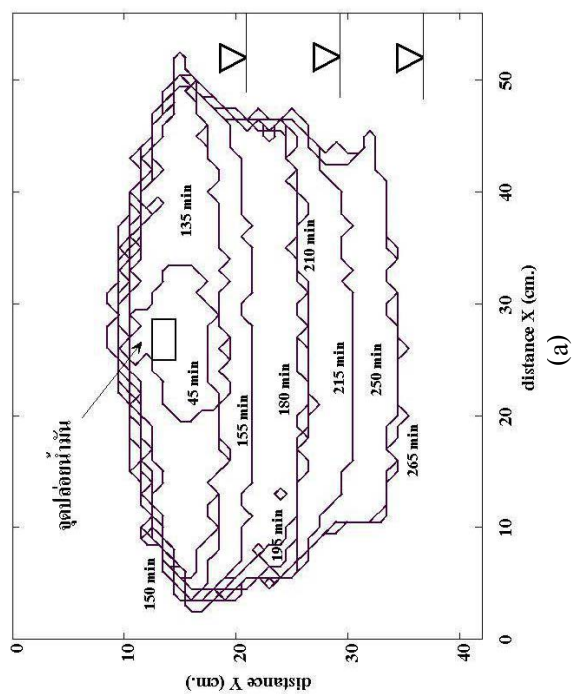


g. เวลา 215 นาที



h. เวลา 265 นาที

ภาพที่ 20 การเคลื่อนที่ลงของ LNAPL ตามระดับน้ำที่ลดลง ณ เวลาต่างๆ



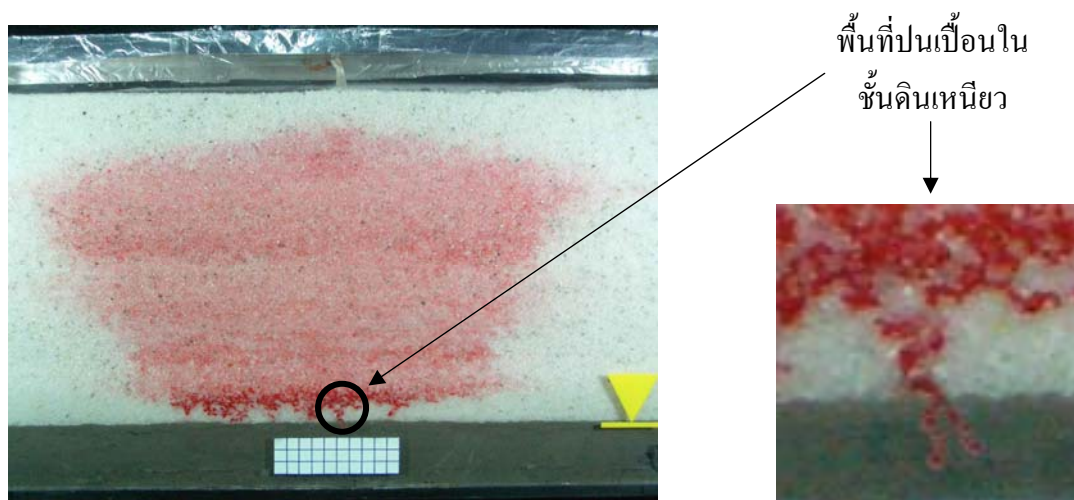
ภาพที่ 21 การเคลื่อนที่ลงของ LNAPL a) ที่ 3 ระดับ b) ที่ระดับน้ำ 21 cm. c) ที่ระดับน้ำ 13 cm. และ d) ที่ระดับน้ำ 5 cm.

จากภาพที่ 21 เป็นเส้น contour แสดงการเคลื่อนที่ลงของ LNAPL ตามการลดลงของระดับน้ำโดยในภาพที่ 21a จะเป็นภาพรวมของการเคลื่อนที่ลงของ LNAPL ตามระดับน้ำที่ลดลง เพื่อให้ง่ายต่อการทำความเข้าใจ จึงทำการแบ่งภาพการเคลื่อนที่เป็น 3 ช่วง ตามการลดลงของระดับน้ำคือ

- ที่ระดับน้ำ 21 cm. (ภาพที่ 21b) ที่เวลา 45 นาที จะพบว่า LNAPL หลังการรั่วไหลจะรวมตัวมีรูปร่างคล้ายแอ่งน้ำหรือเรียกอีกอย่างว่า plume น้ำมัน ที่เวลา 135 นาที ทำการหยุดปล่อย LNAPL เนื่องจาก plume น้ำมันเริ่มไม่เกิดการเปลี่ยนแปลง ที่เวลา 140 - 150 นาที เมื่อ plume เคลื่อนที่มาถึงช่วง capillary zone (ซึ่งเป็นบริเวณที่มีน้ำใต้ดินแทรกขึ้นมาตามช่องว่างระหว่างเม็ดทรายด้วยแรง capillary) การเคลื่อนที่ของ plume จะค่อยๆ ชะลอ เนื่องจากมีแรง capillary มาต้านการเคลื่อนที่ ซึ่งในการทดลองนี้น้ำถูกดึงขึ้นมาจนมีความสูงเหนือระดับน้ำ 4 เซนติเมตร ชั้นน้ำนี้จะถูกเรียกว่า capillary fringe โดยถ้าช่องว่างของเม็ดทรายยิ่งแคบมาก น้ำก็จะถูกดึงขึ้นไปได้สูงขึ้น

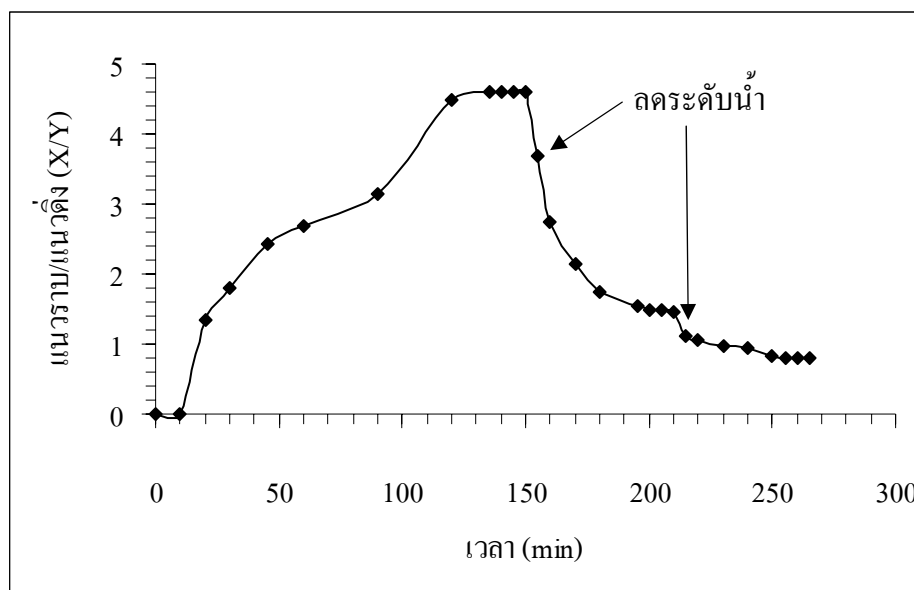
- เมื่อลดระดับน้ำเหลือ 13 cm. ดังภาพที่ 21c พบว่า เมื่อทำการลดระดับน้ำ plume จะเคลื่อนที่ลงในแนวดิ่งตามแรงโน้มถ่วงหรือแรงหนืดอย่างรวดเร็ว เป็นผลมาจากการที่ระดับน้ำลดลง ทำให้น้ำที่อยู่ตามช่องว่างของเม็ดทรายลดลงด้วย ส่งผลให้แรง capillary ของน้ำที่ต้านการเคลื่อนที่ของ plume ลดลง ที่เวลา 180 - 210 การเคลื่อนที่ของ plume ในแนวดิ่งจะเริ่มชะลอ เนื่องจากเป็นช่วงที่ plume เคลื่อนที่มาถึงบริเวณ capillary fringe ซึ่งมีแรง capillary ต้านการเคลื่อนที่ ดังนั้น plume จะเริ่มเคลื่อนที่ออกจากแนวราบแทน จนกระทั่งทรายอึดตัวไปด้วยน้ำมัน หลังจากนั้น plume จะเริ่มหยุดการเคลื่อนที่ โดยในช่วงนี้ พบว่ามีความหนาของชั้น capillary fringe ลดลงคือมีความหนาเหลือเพียง 1 cm. เนื่องจากมีการสะสมของ plume ในปริมาณที่มากพอที่จะมีแรงกดให้ชั้น capillary fringe ลดลง ส่งผลให้ความหนาของชั้น capillary fringe ลดลง (Fetter, 1992) ทำให้ plume มีพื้นที่สัมผัสกับน้ำใต้ดินมากขึ้นนอกจากนี้ Miller and Mayer (1993) ได้อธิบายว่าระหว่างที่ plume เข้าแทนที่น้ำด้วยอัตราคงที่ จะทำให้ plume น้ำมันติดอยู่กับที่ เนื่องจากในการทดลองนี้ต้องการสังเกตการเคลื่อนที่ของ plume น้ำมัน ดังนั้นจึงได้ทำการคำนวณให้ plume น้ำมันอยู่ในช่วงที่ไม่เกิดการเคลื่อนที่ไหลออกไปกับน้ำใต้ดิน โดยใช้ค่า capillary number (N_c) ในการควบคุม โดย Wilson and Conrad (1984) ได้กล่าวไว้ว่าถ้าค่า N_c มีค่าอยู่ในช่วง $2 \times 10^{-4} - 1.3 \times 10^{-3}$ จะเกิดการเคลื่อนที่ตามทิศทางการไหลของน้ำใต้ดิน ซึ่งค่า N_c ที่ได้จากการคำนวณในงานนี้คือ 1.89×10^{-6} ซึ่งแสดงว่าความเร็วของน้ำใต้ดินในการทดลองไม่อยู่ในช่วงที่จะทำให้ plume น้ำมันเกิดการเคลื่อนที่ (immobilization) ส่งผลให้ LNAPL จับตัวเป็น plume นิ่งอยู่เหนือระดับน้ำ หลังจากนั้นทำการลดระดับน้ำ

- เมื่อลดระดับน้ำเหลือ 5 cm. ซึ่งที่ระดับน้ำนี้จะอยู่ในชั้นดินเหนียวดังภาพที่ 21d พบว่า plume จะเคลื่อนที่ลงในแนวดิ่งตามการลดของระดับน้ำเหมือนที่เวลา 155 นาที และจะมี LNAPL บางส่วนที่เหลือค้างและเกิดการอิมตัวอยู่ในพื้นที่การปนเปื้อนที่ผ่านมา เรียกส่วนนี้ว่า residual saturation และในส่วนที่เกิดการเคลื่อนที่ เรียกว่า น้ำมันอิสระ หรือ free phase ส่วนที่เวลา 250-265 นาที พบว่า plume น้ำมันเคลื่อนที่ผ่านชั้นทรายมาจนถึงบริเวณเหนือระดับน้ำและเริ่มชะลอการเคลื่อนที่ เนื่องจากมีแรง capillary มาต้าน นอกจากนี้ยังพบว่า LNAPL บางส่วนสามารถเคลื่อนที่เข้าสู่ชั้นดินเหนียวที่อิมตัวด้วยน้ำ ดังแสดงในภาพที่ 22 โดยสามารถเคลื่อนที่เข้าไปอยู่ต่ำกว่าช่วงต่อระหว่างชั้นทรายและชั้นดินเหนียวประมาณ 1 cm. ได้ ทำให้เห็นว่าการเคลื่อนตัวของ LNAPL เข้าสู่ชั้นดินเหนียวมีความเป็นไปได้และอาจใช้เวลาสั้นกว่าที่ระบุไว้ในงานวิจัยอื่นๆ



ภาพที่ 22 การเคลื่อนที่ของ LNAPL เข้าสู่ชั้นดินเหนียว

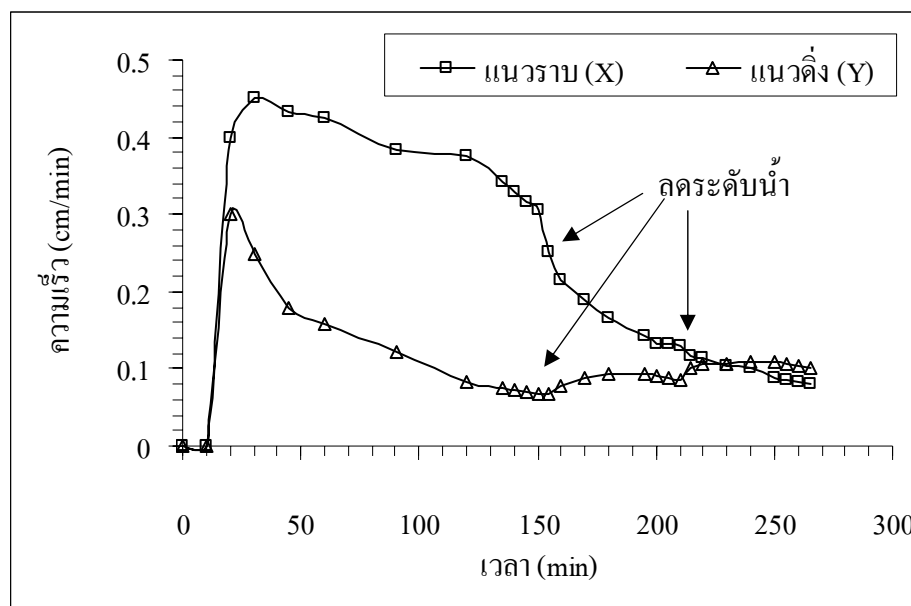
นอกจากนี้ยังนำภาพที่ได้จากการทดลองไปสร้างกราฟระหว่างระยะทางในการเคลื่อนที่ในแนวนอน (horizontal movement) ต่อการเคลื่อนที่ในแนวดิ่ง (vertical movement) ของ LNAPL เทียบกับที่เวลาต่างๆ ดังแสดงในภาพที่ 23



ภาพที่ 23 อัตราส่วนการเคลื่อนที่ในแนวราบ (X) และแนวตั้ง (Y) ของ LNAPL

จากภาพที่ 23 แสดงการเคลื่อนที่ลงของ LNAPL ตามการลดของระดับน้ำ โดยแสดงระยะทางในการเคลื่อนที่ในแนวราบต่อการเคลื่อนที่ในแนวตั้งของ plume เทียบกับที่เวลาต่างๆ พบว่า ที่เวลา 0 – 120 นาที การเคลื่อนที่ของ plume จะเคลื่อนที่ในแนวราบมากกว่าแนวตั้ง เนื่องจากเมื่อเกิดการรั่ว plume จะเคลื่อนที่ไปในบริเวณที่สามารถเคลื่อนที่ไปได้ง่ายก่อน ในที่นี้ก็คือแนวราบ ส่วนในแนวตั้งนั้นมีน้ำที่ซึมขึ้นมาตามช่องว่างของเม็ดทราย ทำให้ขวางการเคลื่อนที่ของ LNAPL ที่เวลา 135 – 150 นาที และ 195 -210 นาที พบว่า การเคลื่อนที่ของ plume จะเริ่มชะลอ สังเกตจากกราฟจะค่อนข้างคงที่ เป็นผลมาจากที่ plume เคลื่อนที่มาถึงบริเวณ capillary fringe ซึ่งมีแรง capillary มาต้านการเคลื่อนที่ ทำให้ plume ชะลอการเคลื่อนที่ ส่วนที่เวลา 155 นาที และ 215 นาที พบว่า plume จะเคลื่อนที่ลงในแนวตั้งอย่างรวดเร็ว ซึ่งเป็นผลมาจากระดับน้ำถูกทำให้ลดลง ทำให้น้ำที่อยู่ในช่องว่างทรายลดลง ส่งผลให้แรงต้านของน้ำน้อยลงด้วย ดังนั้น plume จึงสามารถเคลื่อนที่ลงในแนวตั้งมากขึ้น

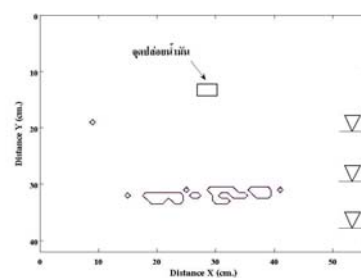
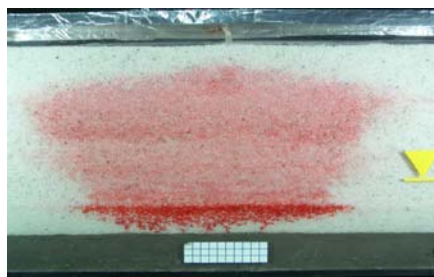
เมื่อนำภาพที่ได้จากการทดลองไปสร้างกราฟระหว่างความเร็วในการเคลื่อนที่ทั้งในแนวราบและในแนวตั้งของ plume เทียบกับที่เวลาต่างๆ เพื่อใช้อธิบายทิศทางการเคลื่อนที่ของ LNAPL ว่าเป็นไปในทิศทางใด ดังแสดงในภาพที่ 24



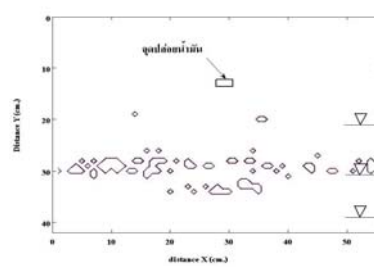
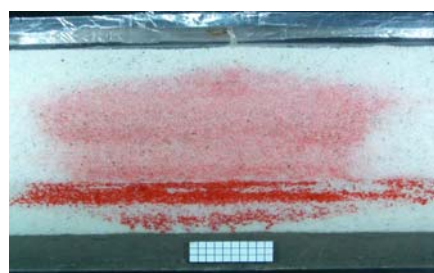
ภาพที่ 24 ความเร็วในการเคลื่อนที่ในแนวราบ (X) และแนวตั้ง (Y) ของ LNAPL

จากภาพที่ 24 พบว่า ที่เวลา 0- 20 นาที ความเร็วในการเคลื่อนที่ทั้งในแนวระนาบและแนวตั้งจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว เนื่องจากในช่วงนี้ตัวกลางทรายแห้ง ทำให้ LNAPL สามารถเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระ ที่เวลา 30 นาที พบว่า จะมีความเร็วในแนวราบมากที่สุด คือ 0.45 cm/min ต่อมาที่เวลา 135 – 150 นาที และที่เวลา 195 – 210 นาที พบว่า ความเร็วในแนวตั้งและแนวราบจะเริ่มคงที่ เนื่องจากเป็นช่วงที่ LNAPL เคลื่อนที่มาถึงบริเวณ capillary fringe ซึ่งมีแรง capillary ทำการต้านการเคลื่อนที่ ส่งผลให้ LNAPL เลือกที่จะเคลื่อนที่ในแนวราบแทน แต่เมื่อทำการลดระดับน้ำ ความเร็วในแนวตั้งจะเพิ่มมากขึ้น เนื่องจาก LNAPL เคลื่อนที่ลงในแนวตั้งได้มากขึ้น ส่วนความเร็วในแนวราบจะเริ่มลดลง เนื่องจากทรายเริ่มอิ่มตัวไปด้วยน้ำมันจึงทำให้การเคลื่อนที่ของ LNAPL ในแนวราบค่อยๆ ลดลง เมื่อเปรียบเทียบเส้นกราฟ จะเห็นว่า ในช่วงแรกมีความเร็วในแนวราบมากกว่าในแนวตั้ง จนกระทั่งที่เวลา 230 นาที ความเร็วในแนวตั้งจะมีมากกว่าในแนวราบ เนื่องจากการเคลื่อนที่ในแนวราบทรายเริ่มอิ่มตัวไปด้วยน้ำมัน จึงทำให้เกิดการสะสมของ plume จนมีปริมาณมากพอที่จะกดให้ชั้น capillary fringe ลดลง ทำให้ plume เกิดการสัมผัสกับน้ำใต้ดินมากขึ้น

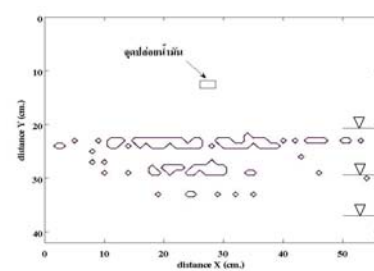
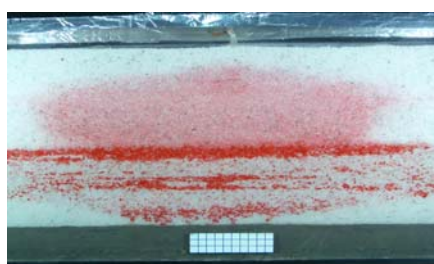
เมื่อ LNAPL เคลื่อนที่ลง ตามระดับน้ำที่ลดลงจนกระทั่งมาถึงที่ระดับน้ำ 5 cm. จากด้านล่างตู้ทดลอง หลังจากนั้นทำการทดลองโดยทำการเพิ่มระดับน้ำเป็น 13 cm. และ 21 cm. ตามลำดับ (ดังภาพที่ 25) จากนั้นนำภาพที่ได้ขึ้นมาแปลงเป็นเส้น contour ดังแสดงในภาพที่ 26



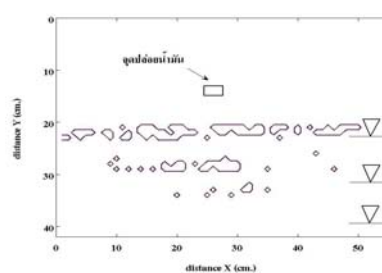
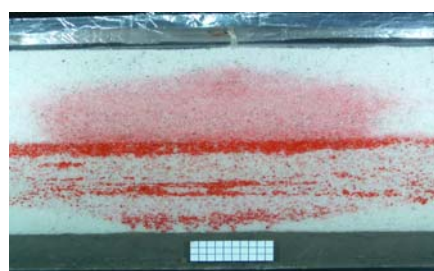
a. เวลา 270 นาที



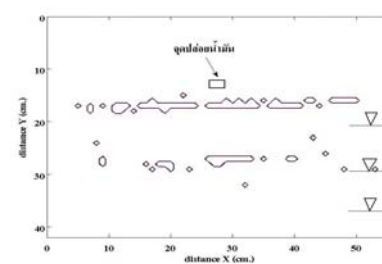
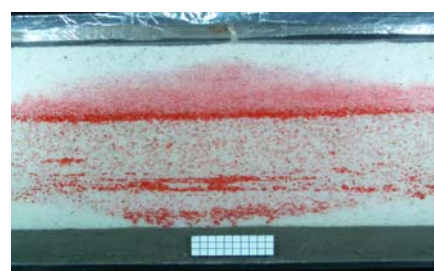
b. เวลา 390 นาที



c. เวลา 470 นาที

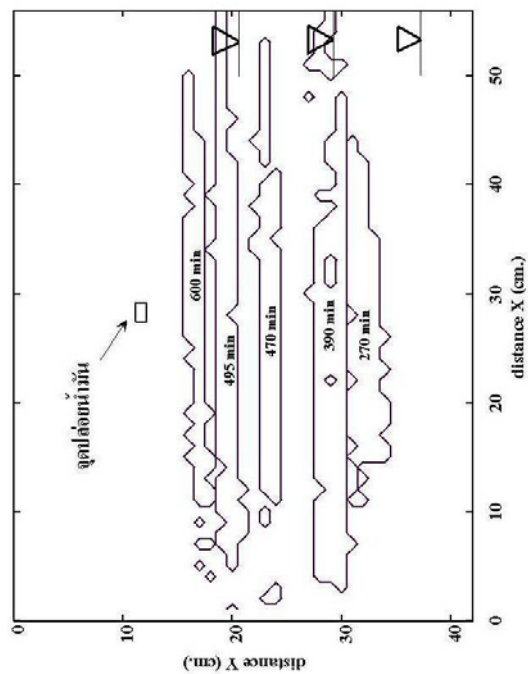


d. เวลา 495 นาที

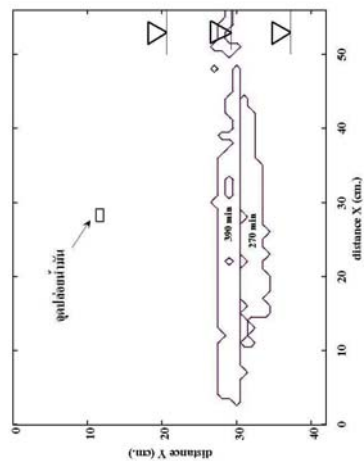


e. เวลา 600 นาที

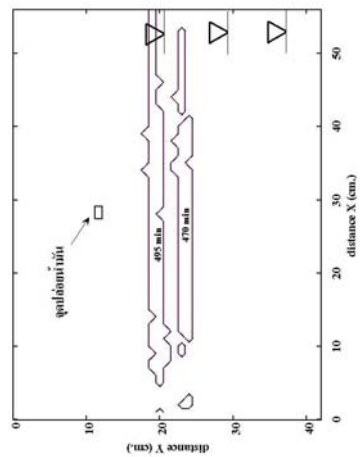
ภาพที่ 25 การเคลื่อนที่ของ LNAPL ตามการเพิ่มของระดับน้ำ



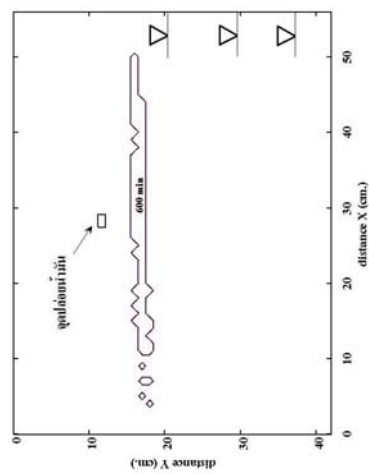
(a)



(b)



(c)



(d)

ภาพที่ 26 การเคลื่อนที่ขึ้นของ LNAPL a) ทั้ง 3 ระดับ b) ที่ระดับน้ำ 5 cm. c) ที่ระดับน้ำ 13 cm. และ d) ที่ระดับน้ำ 21 cm.

ในภาพที่ 26a เป็นการแสดงการเคลื่อนที่ขึ้นเฉพาะ plume ในส่วนของ free phase ที่อยู่เหนือระดับน้ำ ตามการเพิ่มของระดับน้ำ ส่วน LNAPL ที่เหลือค้าง (residual) ต่ำกว่าระดับน้ำไม่ได้นำมาแสดงเป็นเส้น contour เนื่องจากจะทำให้เส้น contour คูดับสนและยากต่อการอธิบาย โดยจากการทดลองพบว่า ลักษณะ plume ของน้ำมันจะเคลื่อนที่ขึ้น ตามการเพิ่มของระดับน้ำ โดยจะลอยอยู่เหนือระดับน้ำ ซึ่งแสดงให้เห็นว่า LNAPL ที่ใช้ในการทดลองนี้เป็นน้ำมันที่มีความหนาแน่นน้อยกว่าน้ำ โดยการอธิบายจะแบ่งภาพตามการเพิ่มของระดับน้ำเป็น 3 ช่วงคือ

จากภาพที่ 26b ที่เวลา 270 นาที่ เมื่อทำการเปลี่ยนระดับน้ำจาก 5 cm. เป็น 13 cm. พบว่า plume น้ำมันที่เป็น free phase จะเคลื่อนที่ขึ้นไปตามระดับน้ำอย่างช้าๆ เนื่องจากน้ำที่เหลือค้างในบริเวณช่องว่างของทรายมาด้านการเคลื่อนที่ นอกจากนี้ยังพบว่า หลังการเพิ่มระดับน้ำจะเกิด LNAPL เหลือค้าง (residual) ต่ำกว่าระดับน้ำ (ดังแสดงในภาพที่ 25) ซึ่งเป็นผลมาจากการที่แรงดันของน้ำใต้ดินไม่มากพอที่จะดัน LNAPL ให้ผ่านช่องว่างระหว่างเม็ดทรายออกไปได้จึงเกิดเป็นสารเหลือค้างซึ่งน้ำที่เหลือค้างในช่องว่างเม็ดทรายนี้จะต้านการเคลื่อนที่ขึ้นของ LNAPL ดังนั้น plume น้ำมันจะเคลื่อนที่ออกในแนวราบมากกว่าที่จะเคลื่อนที่ขึ้นในแนวตั้ง เนื่องจากมีแรงต้านน้อยกว่า ส่งผลให้เพิ่มการถ่ายเทมวลการละลาย (dissolution) เข้าสู่ น้ำใต้ดิน (Kim and Corapcioglu, 2003) ที่เวลา 390 นาที่ LNAPL เคลื่อนที่ถึงชั้น capillary fringe ที่อยู่เหนือระดับน้ำที่ 13 cm. แล้ว plume น้ำมันจะเริ่มคงที่ จากนั้นทำการเพิ่มระดับน้ำเป็น 21 cm.

จากภาพที่ 26c ที่เวลา 470 นาที่ เมื่อทำการเปลี่ยนระดับน้ำจาก 13 cm. เป็น 21 cm. จะเห็นว่าการเปลี่ยนแปลงระดับน้ำนี้ส่งผลให้ plume น้ำมันขยายไปจนกระทั่งไหลล้นออกนอกตู้ทดลอง ตามการไหลของน้ำใต้ดิน (advection) นอกจากนี้ยังเกิด LNAPL ที่เหลือค้างในทรายเป็นจำนวนมาก ซึ่งสิ่งนี้ถือเป็นอันตรายอย่างมากต่อผู้ที่นำน้ำใต้ดินไปใช้อุปโภคและบริโภค

จากภาพที่ 26d ที่เวลา 600 นาที่ พบว่า การเคลื่อนที่ของ plume น้ำมันจะเริ่มหยุดนิ่งเหนือระดับน้ำ ซึ่งจะกลับไปมีลักษณะเหมือนในช่วงเริ่มต้นการทดลองคือ plume น้ำมันจะอยู่เหนือบริเวณระดับน้ำ 21 cm. จากด้านล่างตู้ทดลอง ซึ่งถือว่าเป็นการเสร็จสิ้นการทดลอง โดย LNAPL ที่เหลือค้างต่ำกว่าระดับน้ำในช่วงเวลานี้จะลดลงมากเมื่อเทียบกับที่เวลาอื่นๆ เนื่องจาก LNAPL ไหลออกไปตามน้ำใต้ดินเป็นจำนวนมาก

จากการทดลองนี้ พบว่า ระยะเวลาที่ใช้ในการเคลื่อนที่ขึ้น-ลงแตกต่างกัน โดย LNAPL ใช้ระยะเวลาในการเคลื่อนที่ลงตามการลดของระดับน้ำจาก 21 cm. มาถึง 5 cm. จากด้านล่างตู้ 265 นาที ซึ่งน้อยกว่าระยะเวลาในการเคลื่อนที่ขึ้นจากระดับน้ำ 5 cm. ถึง 21 cm. ที่ใช้เวลาถึง 330 นาที ซึ่งมีค่าต่างกันถึง 65 นาที เป็นผลมาจากช่วงที่มีการเพิ่มระดับน้ำ ในช่องว่างของทรายยังมีน้ำเหลือค้างเป็นจำนวนมาก ทำให้น้ำด้านการเคลื่อนที่ขึ้นของ LNAPL ดังนั้น LNAPL จึงเคลื่อนที่ขึ้นได้ช้ากว่าการเคลื่อนที่ลง จากการทดลองนี้แสดงให้เห็นว่าเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงระดับน้ำใต้ดิน LNAPL สามารถปนเปื้อนเข้าสู่ น้ำใต้ดินได้ จาก LNAPL ที่เหลือค้างต่ำกว่าระดับน้ำ

3. ผลการปนเปื้อนของ LNAPL ในชั้นดินไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ

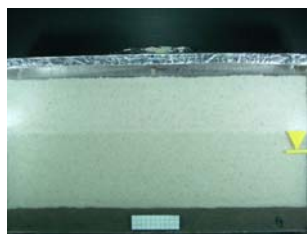
เมื่อปล่อย LNAPL เข้าไปในตู้จำลอง การเคลื่อนที่ของ LNAPL ในชั้นใต้ดิน จะถูกแบ่งเป็น 4 สถานะ คือ NAPL น้ำ อากาศและทราย ทำให้เกิดการถ่ายเทมวลระหว่างสถานะ โดยการทดลองนี้มีน้ำใต้ดินไหลผ่านพื้นที่ปนเปื้อนอย่างต่อเนื่องในปริมาณที่เท่ากัน และมีค่าความเร็วและระดับน้ำคงที่ ดังนั้นจึงเป็นการทดลองแบบ steady state โดยการทดลองการปนเปื้อนใช้เวลาทั้งสิ้น 218 ชั่วโมง ดังแสดงในภาพที่ 27

3.1 การจำลองการปนเปื้อนของน้ำมันเชื้อเพลิงจากถังกักเก็บใต้ดิน

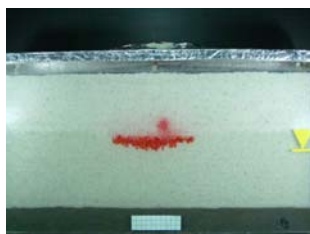
ในการจำลองการปนเปื้อนของ LNAPL จากถังกักเก็บใต้ดินในชั้นดินไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ จะคล้ายกับการจำลองการเคลื่อนที่ของน้ำมันเชื้อเพลิง มีเพียงพารามิเตอร์ที่อธิบายถึงการปนเปื้อนบางค่าที่แตกต่างกัน ดังแสดงในตารางที่ 14

3.2 ลักษณะการทดลองการปนเปื้อนของน้ำมันเชื้อเพลิง

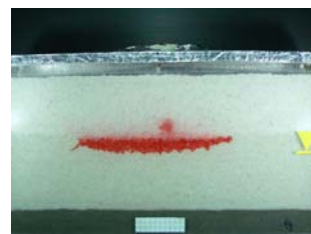
โดยการทดลองนี้เน้นสังเกตการปนเปื้อนของ plume น้ำมันใน unsaturated zone เพื่อให้ง่ายต่อการสังเกต ดังนั้น plume น้ำมันต้องหยุดนิ่ง (Kim and Corapcioglu., 2003) โดยกำหนดค่า capillary number (N_c) ที่ใช้ในการทดลองนี้ให้อยู่ในช่วงที่ไม่ทำให้เกิดการเคลื่อน โดยรายละเอียดดังแสดงในผลการทดลองเรื่องการเคลื่อนที่ข้างต้น การทดลองนี้ใช้เวลาถึง 26 ชั่วโมงกว่า plume น้ำมันจะเริ่มคงที่ ซึ่งถือเป็นค่าเริ่มต้นของงานทดลองนี้ จากนั้นทำการบันทึกภาพทุก 24 ชั่วโมง เป็นเวลา 10 วัน



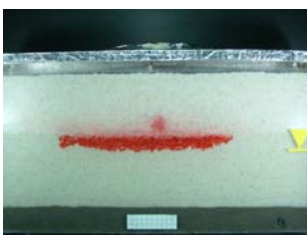
เวลา 0 นาที



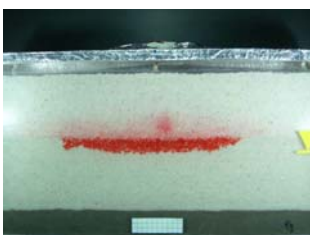
เวลา 30 นาที



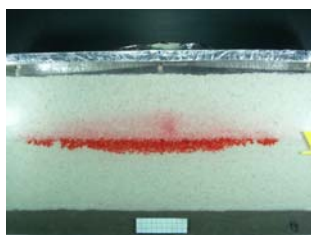
เวลา 45 นาที



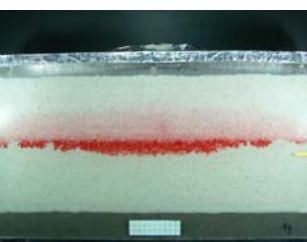
เวลา 60 นาที



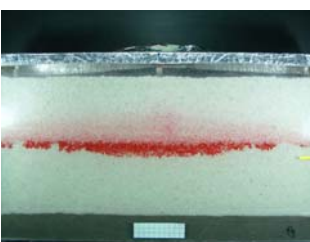
เวลา 120 นาที



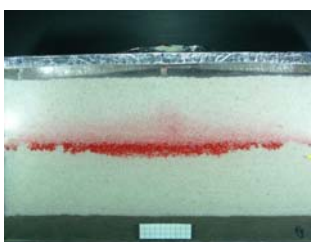
เวลา 480 นาที



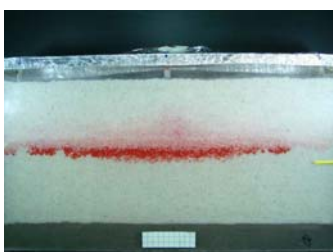
เวลา 1,560 นาที



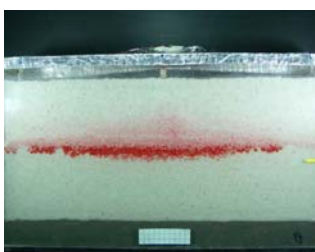
เวลา 3,000 นาที



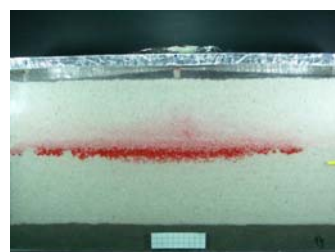
เวลา 4,400 นาที



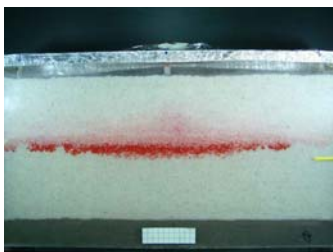
เวลา 5,580 นาที



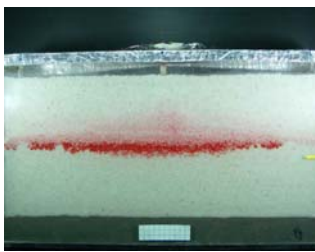
เวลา 7,320 นาที



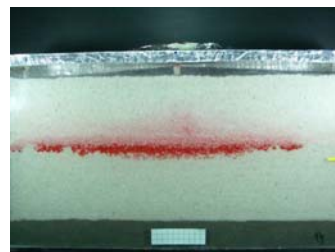
เวลา 8,760 นาที



เวลา 10,200 นาที



เวลา 11,640 นาที



เวลา 13,080 นาที

ภาพที่ 27 การปนเปื้อนของ LNAPL ณ เวลาต่างๆ

ตารางที่ 14 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการอธิบายการจำลองการถ่ายเทมวลของสาร BTEX

พารามิเตอร์	คำย่อ	ค่า	หมายเหตุ
อัตราการไหลจากแหล่งกำเนิด	Q_0	$1 \text{ cm}^3/\text{min}$	
ปริมาตรของน้ำมันที่เกิดการรั่ว	V_0	45 ml.	
ความพรุนของทราย	n_s	0.46	- จากการวิเคราะห์ในห้องปฏิบัติการปฐพีกลศาสตร์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา ดังแสดงในภาคผนวก จ
ความพรุนของดินเหนียว	n_c	0.42	
ความซึมของทราย	k_s	$1.41 \cdot 10^{-5} \text{ cm/s}$	
ความซึมของดินเหนียว	k_c	$3.98 \cdot 10^{-9} \text{ cm/s}$	
ความหนาแน่นแห้งของทราย	γ_d	1.67 g/cm^3	
อัตราการไหลของน้ำใต้ดินที่ระดับน้ำ 17 cm.	Q_w	16.82 cm/min	- จากผลการคำนวณดังแสดงในตารางผนวก ง1
ความเร็วในการรั่วซึม	v	0.4 cm/min	
พื้นที่ของชั้นดินไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ	A_{un}	9.44 cm^2	
พื้นที่ของชั้นดินอิ่มตัวด้วยน้ำ	A_{sat}	129.54 cm^2	

3.4 ลักษณะการวิเคราะห์การปนเปื้อนของ LNAPL

การวิเคราะห์เชิงปริมาณโดยการถ่ายภาพมีสมมุติฐาน ดังนี้

- สารหลักที่ทำการวิเคราะห์ คือ เบนซีน โทลูอิน เอทิลเบนซีน และไซลีน โดยน้ำมันที่ใช้ในการศึกษามีปริมาณ BTEX 18% และมีปริมาณ เบนซีน 11% โทลูอิน 26% เอทิลเบนซีน 26% และไซลีน 52% โดยน้ำหนักของน้ำมันที่ทำการทดลอง

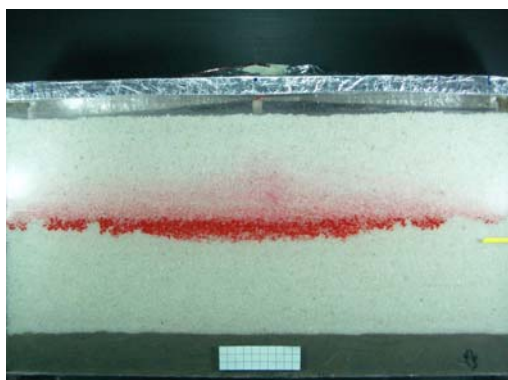
- การถ่ายเทมวลของสาร BTEX ระหว่างสถานะในชั้นดินไม่อิ่มตัวด้วยน้ำนี้ จะสมมติให้เกิดการถ่ายเทมวล ณ สภาวะสมดุล โดยการถ่ายเทมวลของ LNAPL มีดังนี้ 1) LNAPL-น้ำ จะเกิดการถ่ายเทมวลแบบการละลาย (การถ่ายเทมวลสู่น้ำ) 2) LNAPL-อากาศ จะเกิดการถ่ายเทมวลแบบการระเหย (การถ่ายเทมวลสู่ช่องว่างอากาศ) และ 3) LNAPL-ทราย จะเกิดการถ่ายเทมวลแบบการดูดซับ (การถ่ายเทมวลสู่ solids phase)

โดยผลการปนเปื้อนในแต่ละ phase จะใช้การวิเคราะห์ในเชิงปริมาณ โดยมีสมมติฐานว่าปริมาณที่ลดลงในเวลาก่อนหน้า-ปริมาณที่เวลาปัจจุบัน (t_1-t_2) เกิดจากการถ่ายเทมวล คือ

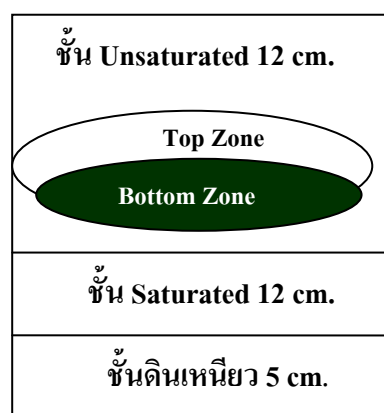
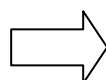
$$M_{\text{free phase}, t1} - M_{\text{free phase}, t2} = M_{v,i} + M_{w,i} + M_{ad,i} \quad (28)$$

- การหาพื้นที่และปริมาตรการปนเปื้อนของ LNAPL ที่เวลาต่างๆ โดยใช้โปรแกรม Matlab v.7 ทำการวิเคราะห์ผลจากภาพถ่ายและใช้โปรแกรม Adobe Photoshop CS ช่วยในการปรับปรุงภาพให้มีความชัดเจนขึ้น

- การอธิบายส่วนต่างๆ ของ plume น้ำมันในชั้นดินไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ โดยแบ่ง plume น้ำมันจากภาพร่างเป็น 2 ส่วน ดังแสดงในภาพที่ 28 คือ 1) ส่วนที่มีสีจาง (top zone) 2) ส่วนที่มีสีแดงเข้ม (bottom zone) เป็นส่วนที่ plume สามารถเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระ ที่ด้านล่างสุดของ plume นี้จะเป็นส่วนที่สัมผัสกับน้ำใต้ดินทำให้มีบางส่วนของ plume เกิดการละลาย



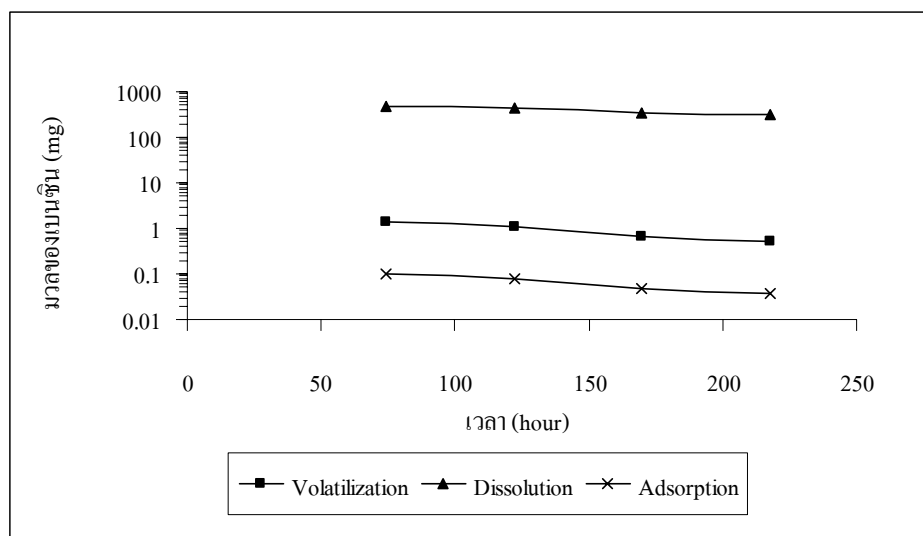
(a)



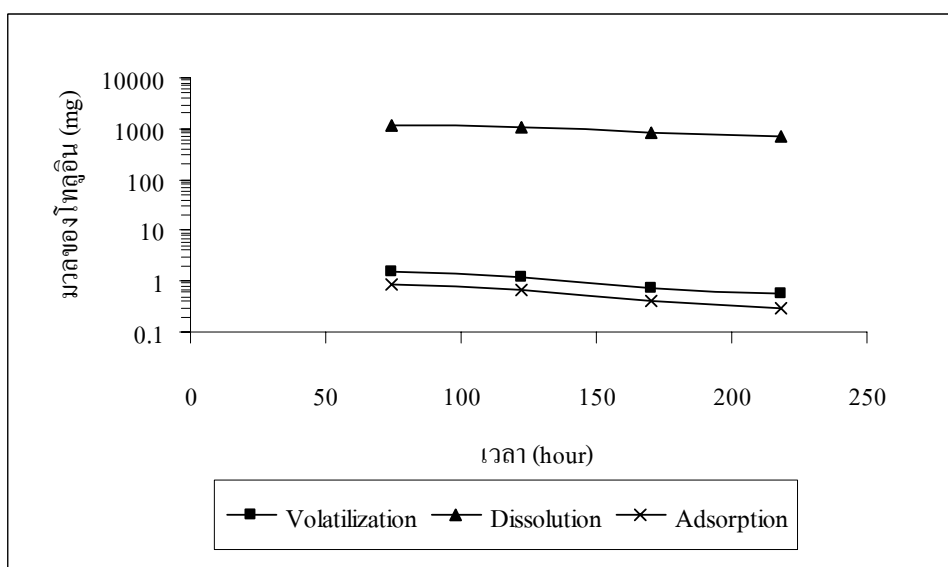
(b)

ภาพที่ 28 การอธิบายส่วนต่างๆ ของ plume น้ำมัน

จากนั้นนำผลที่ได้จากการประมวลผล โดยใช้โปรแกรม Matlab v.7 ไปคำนวณหาค่าการถ่ายเทมวลแบบการระเหย การดูดซับและการละลายของสาร BTEX โดยใช้สมการที่ 18, 23 และ 26 ตามลำดับ ตัวอย่างในการคำนวณ (ตารางผนวกที่ ค4) และผลจากการคำนวณ (ตารางผนวกที่ ง5, ง6 และ ง7 ตามลำดับ) จากนั้นนำผลที่ได้จากการคำนวณมาแสดงเป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างการถ่ายเทมวลในแต่ละสถานะของสาร BTEX กับเวลา ดังแสดงในภาพที่ 29

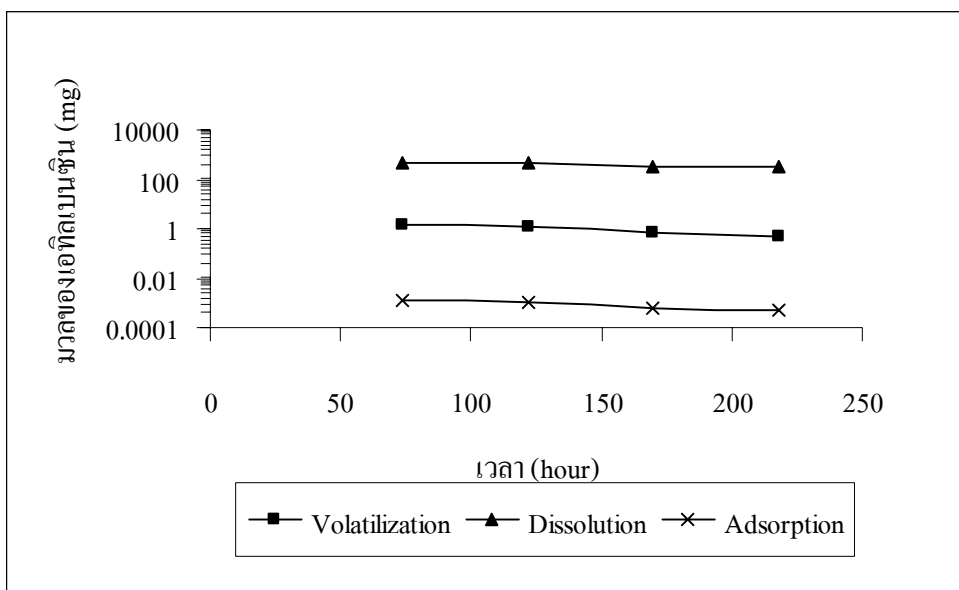


(a)

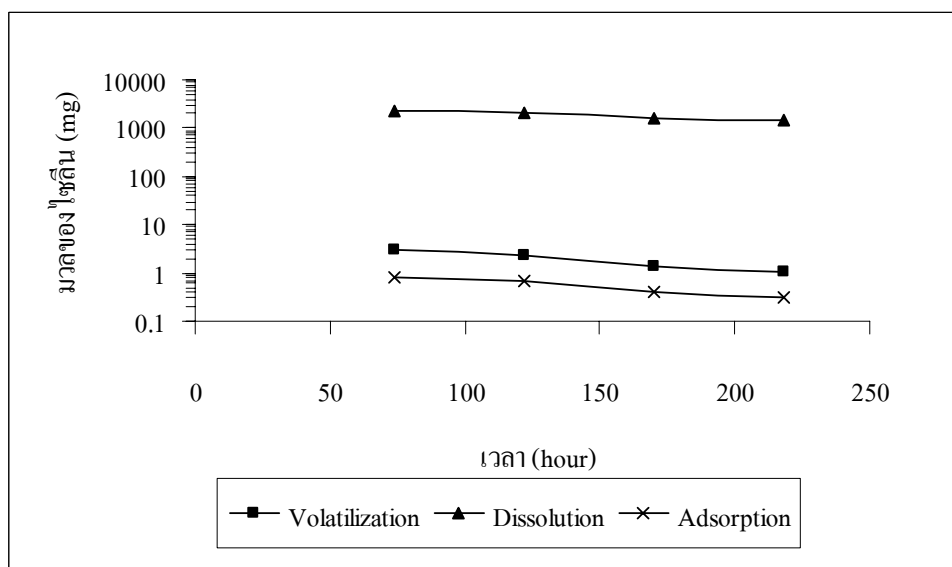


(b)

ภาพที่ 29 การถ่ายเทมวลของสาร BTEX ในแต่ละสถานะ a) มวลสารเบนซีน b) มวลสารโทลูอิน
c) มวลสารเอทิลเบนซีน d) มวลสารไซลีน และ e) มวลรวมของสาร BTEX

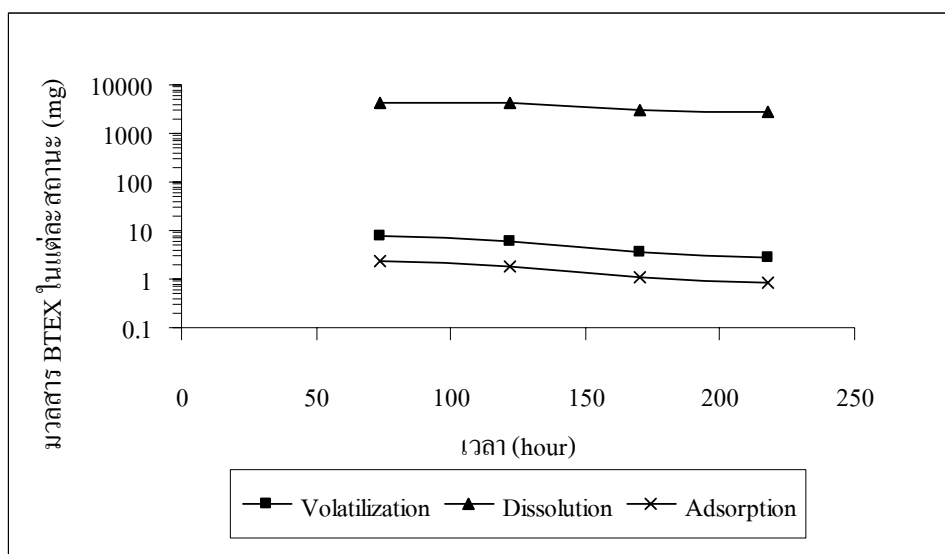


(c)



(d)

ภาพที่ 29 (ต่อ) การถ่ายเทมวลของสาร BTEX ในแต่ละสถานะ a) มวลสารเบนซีน b) มวลสารโทลูอีน c) มวลสารเอทิลเบนซีน d) มวลสารไซลีน และ e) มวลรวมของสาร BTEX



(e)

ภาพที่ 29 (ต่อ) การถ่ายเทมวลของสาร BTEX ในแต่ละสถานะ a) มวลสารเบนซีน b) มวลสารโทลูอิน c) มวลสารเอทิลเบนซีน d) มวลสารไซลีน และ e) มวลรวมของสาร BTEX

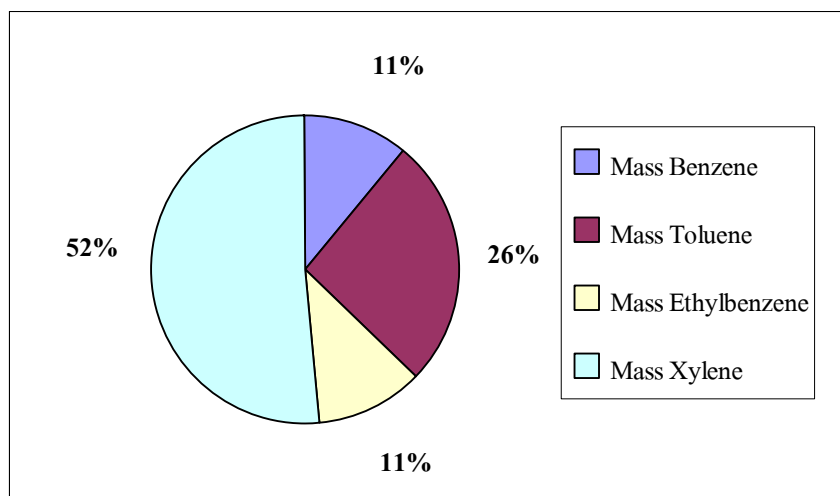
จากภาพที่ 29 พบว่า แนวโน้มของกราฟจะมีลักษณะเหมือนกัน มีเพียงมวลในการถ่ายเทในแต่ละสถานะเท่านั้นที่แตกต่างกัน จากกราฟจะเห็นว่าการถ่ายเทมวลของสาร BTEX แบบการละลายมากที่สุด เนื่องจากการละลายจะเกิดขึ้นเฉพาะในช่วงที่ LNAPL มีพื้นที่สัมผัสกับน้ำ ในที่นี้คือบริเวณ capillary fringe ที่อยู่ในชั้นดินไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ จากภาพที่ 28 ปริมาตรการปนเปื้อนของ LNAPL หากจากพื้นที่สีแดงเข้มด้านล่างของ plume ที่ลดลงที่เวลา t_1 - t_2 ตัวอย่างการคำนวณหาพื้นที่ปนเปื้อนดังแสดงในตารางผนวกที่ ค1 ในการทดลองนี้มีน้ำใต้ดินไหลผ่านพื้นที่ปนเปื้อนอย่างต่อเนื่อง ซึ่งน้ำที่ไหลเข้าระบบจะมีความเข้มข้นเป็นศูนย์ ดังนั้นเมื่อน้ำไหลเข้าระบบจะทำให้น้ำมันที่มีความเข้มข้นมากกว่าไหลมาที่น้ำใต้ดินซึ่งมีความเข้มข้นน้อยกว่า ดังนั้นเมื่อมีความแตกต่างของความเข้มข้นระหว่างสาร BTEX กับน้ำใต้ดินมาก ก็จะทำให้เกิดการถ่ายเทมวลแบบการละลายมากตามไปด้วย

รองลงมาเป็นการถ่ายเทมวลแบบการระเหย เนื่องจากการปนเปื้อนอยู่ในชั้นไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ โดยการระเหยเกิดในบริเวณช่องว่างอากาศระหว่างเม็ดทราย การระเหยจะขึ้นอยู่กับความเข้มข้น solubility limit ตามกฎของเฮนรีและอุณหภูมิ เมื่อสาร BTEX สัมผัสกับอากาศและน้ำ โมเลกุลของสาร BTEX จะระเหยออกจากรูปของไอ โดยเมื่ออยู่ในสภาวะสมดุล อัตราของโมเลกุลที่ออกจากน้ำจะเท่ากับอัตราของโมเลกุลที่ละลายในน้ำ ทั้งนี้การเคลื่อนที่ของสารปนเปื้อนระหว่างสถานะในชั้นใต้ดินนี้ จะเคลื่อนตัวเพื่อเข้าสู่สภาวะสมดุล (equilibrium condition) โดยการเคลื่อนตัวของสาร BTEX จากสถานะก๊าซผ่านอนุภาคดินนั้นจะมีกระบวนการที่เกี่ยวข้อง กระบวนการ diffusion เป็นการเคลื่อนที่ของโมเลกุลของสาร BTEX ผ่านอนุภาคของทรายหรือดินที่มีความพรุนต่ำโดยอาศัยความแตกต่างระหว่างความเข้มข้นของสาร BTEX

ในส่วนของการถ่ายเทมวลแบบดูดซับพบว่ามีค่าน้อยที่สุด เนื่องจากการดูดซับของสาร BTEX จะถูกดูดซับโดยสารอินทรีย์คาร์บอนที่มีอยู่ในทรายเป็นส่วนใหญ่ ซึ่งทรายที่ใช้ในการทดลองนี้มีค่าสารอินทรีย์คาร์บอนเท่ากับ 0.01 % โดยน้ำหนัก ซึ่งจะเห็นได้ว่ามีค่าต่ำมาก นอกจากนี้การดูดซับยังขึ้นอยู่กับค่าสัมประสิทธิ์การกระจายในดินด้วย จากการคำนวณดังแสดงในตารางผนวกที่ ค5 จะเห็นว่าค่าสัมประสิทธิ์การกระจายในดินไม่สูงนัก ดังนั้นทำให้เกิดการถ่ายเทมวลแบบการดูดซับน้อยตามไปด้วย

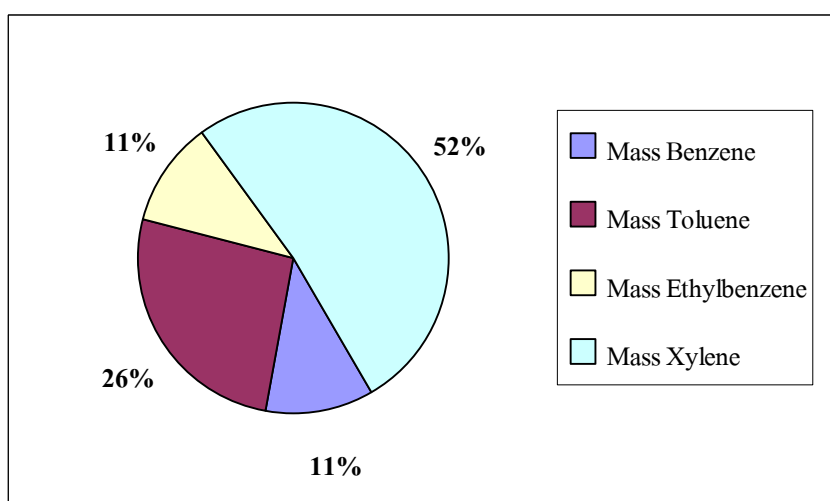
3.4 ปริมาณการปนเปื้อนของสาร BTEX ในแต่ละสถานะ

การจำลองการรั่วไหลของ LNAPL ในงานทดลองนี้เป็นการจำลองการรั่วไหลจากถังกักเก็บน้ำมันใต้ดินในชั้นดินไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ ซึ่งในชั้นดินนี้จะประกอบไปด้วย 3 ส่วน คือ อนุภาคของดิน (สถานะของแข็ง) น้ำซึ่งอยู่ในช่องว่างระหว่างดินในบริเวณ capillary fringe (สถานะของเหลว) และก๊าซซึ่งอยู่ในช่องว่างระหว่างดิน (สถานะก๊าซ) ดังนั้นเมื่อเกิดการรั่วของน้ำมันจะมีสาร BTEX ซึ่งเป็นสารประกอบของน้ำมันเบนซินไหลออกมาด้วย โดยสาร BTEX แต่ละชนิดก็มีคุณสมบัติแตกต่างกัน (ดูตารางที่ 3) ทำให้เกิดการปนเปื้อนในแต่ละส่วนแตกต่างกันไป ดังแสดงในภาพที่ 30-33



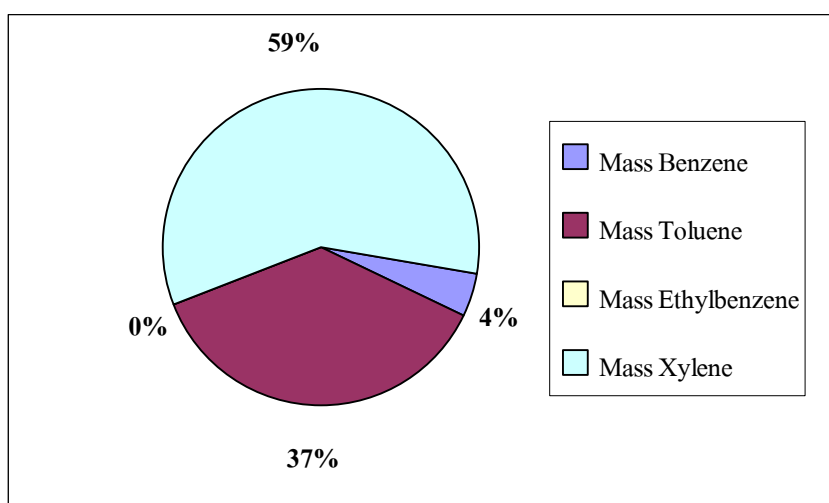
ภาพที่ 30 ค่าร้อยละของมวลสาร BTEX ทั้งระบบ

จากภาพที่ 30 แสดงค่าปริมาณการปนเปื้อนของสาร BTEX ทั้งระบบ จากภาพพบว่า มวลสารของไซลีนมีเปอร์เซ็นต์มากที่สุด คือ 52 % รองลงมาคือโทลูอีน 26% เบนซีนและเอทิลเบนซีนเท่ากัน คือ 11% เนื่องจากค่าที่ใช้ควบคุมปริมาณมวลสาร BTEX เหล่านี้คือค่าความเข้มข้นของสารปนเปื้อนในน้ำใต้ดิน ซึ่งในไซลีนจะมีค่าความเข้มข้นในการปนเปื้อนมากที่สุด เนื่องจากน้ำมันเบนซิน 91 ที่ใช้ในการศึกษามีปริมาณสาร BTEX 18% และมีปริมาณไซลีนมากที่สุด คือ 52% โดยน้ำหนักของน้ำมันที่ทำการทดลอง ซึ่งสาร BTEX เหล่านี้เป็นสารอันตราย เมื่อเกิดการรั่วไหลสามารถเคลื่อนที่เข้าสู่ดินและน้ำใต้ดินได้ ทำให้เกิดปัญหาร้ายแรงและส่งผลกระทบต่อในระยะยาว



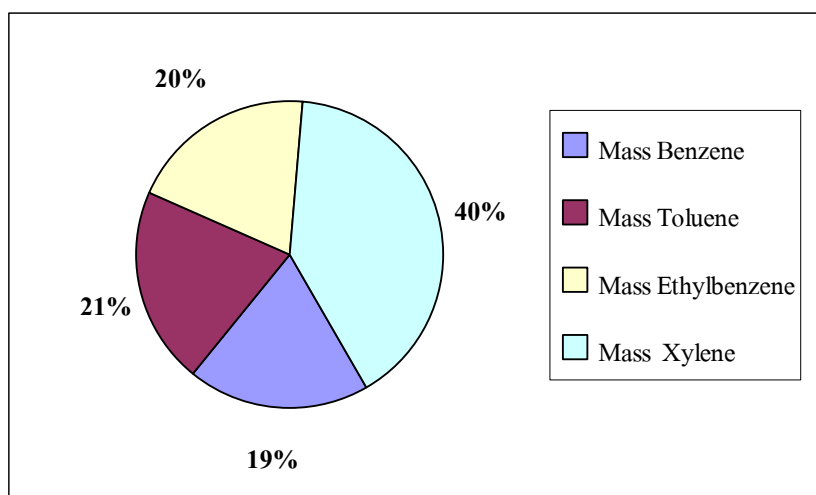
ภาพที่ 31 ค่าร้อยละของมวลสาร BTEX ในน้ำ

จากภาพที่ 31 พบว่า การพิจารณาความสามารถในการละลายน้ำของสาร BTEX จะใช้ค่าการละลายน้ำเป็นตัวชี้วัด โดยสารเบนซิน โทลูอิน เอทิลเบนซิน และไซลีน มีค่าการละลายน้ำเท่ากับ 1780, 515, 152 และ 198 mg/l ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าเมื่อพิจารณาจากค่าการละลายน้ำพบว่า สารเบนซินจะเกิดการละลายน้ำมากที่สุด เนื่องจากมีค่าการละลายน้ำมากที่สุด รองลงมาได้แก่ สารโทลูอิน ไซลีน และเอทิลเบนซิน ตามลำดับ แต่จากการคำนวณในการทดลองนี้พบว่า มีสารไซลีนมากที่สุดถึง 52% รองลงมาได้แก่ สารโทลูอิน 26% เอทิลเบนซิน 11% และเบนซิน 11% ตามลำดับ โดยที่ปริมาณของสารที่คำนวณได้ไม่เป็นไปตามค่าการละลายน้ำที่ระบุไว้ข้างต้น เนื่องจากการทดลองใช้น้ำมันเบนซิน 91 ที่มีสาร BTEX เป็นองค์ประกอบประมาณ 18% โดยน้ำหนัก และในสาร BTEX มีสารเบนซิน 11% โทลูอิน 26% เอทิลเบนซิน 11% และไซลีน 52% โดยน้ำหนัก ซึ่งเมื่อพิจารณาสัดส่วนของสาร BTEX แต่ละตัว ทำให้เมื่อคำนวณจึงพบว่ามีความเข้มข้นของสารไซลีนที่ปนเปื้อนในน้ำได้ดินมากที่สุด ส่วนในกรณีของสารโทลูอินที่มีค่าการละลายน้ำน้อยกว่าเบนซิน แต่กลับมีปริมาณของสารมากกว่าสารเบนซิน และเอทิลเบนซิน ทั้งนี้เนื่องมาจากสัดส่วนของสารโทลูอินที่มีอยู่ในสาร BTEX ซึ่งมีมากกว่าสารเบนซิน และเอทิลเบนซิน



ภาพที่ 32 ค่าร้อยละของมวลสาร BTEX ในดิน

จากภาพที่ 32 พบว่า การพิจารณาการดูดซับของสาร BTEX จะใช้ค่าสัมประสิทธิ์การแบ่งแยกสารอินทรีย์คาร์บอน (K_{oc}) เป็นตัวชี้วัด โดยสารเบนซีน โทลูอิน เอทิลเบนซีน และไซลีน มีค่า K_{oc} เท่ากับ 83, 300, 1.1, และ 240mg/l ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าเมื่อพิจารณาจากค่า K_{oc} พบว่า สารโทลูอินจะเกิดการดูดซับมากที่สุด เนื่องจากมีค่า K_{oc} มากที่สุด รองลงมาได้แก่ สารไซลีน เบนซีน และเอทิลเบนซีน ตามลำดับ แต่จากการคำนวณในการทดลองนี้พบว่า มีสารไซลีนมากที่สุดถึง 59% รองลงมาได้แก่ สารโทลูอิน 37% เบนซีน 4% และเอทิลเบนซีน 0% ตามลำดับ โดยที่ปริมาณของสารที่คำนวณได้ไม่เป็นไปตามค่า K_{oc} ที่ระบุไว้ข้างต้น เนื่องจากการทดลองใช้น้ำมันเบนซีน 91 ที่มีสาร BTEX เป็นองค์ประกอบประมาณ 18% โดยน้ำหนัก และในสาร BTEX มีสารเบนซีน 11% โทลูอิน 26% เอทิลเบนซีน 11% และไซลีน 52% โดยน้ำหนัก ซึ่งเมื่อพิจารณาสัดส่วนของสาร BTEX แต่ละตัว ทำให้เมื่อคำนวณจึงพบปริมาณของสารไซลีนมากที่สุดทั้งที่มีค่า K_{oc} น้อยกว่าสาร โทลูอิน ส่วนในกรณีของสารโทลูอินที่มีค่า K_{oc} มากกว่าสารไซลีน แต่กลับมีปริมาณของสารน้อยกว่า ทั้งนี้เนื่องมาจากสัดส่วนของสารโทลูอินที่มีอยู่ในสาร BTEX ที่มีอยู่น้อยกว่าสารไซลีนส่วนในกรณีของสารเบนซีนและเอทิลเบนซีนที่มีปริมาณการดูดซับน้อยมาก เนื่องจากมีค่า K_{oc} และสัดส่วนของสารที่มีอยู่ในสาร BTEX มีปริมาณน้อยที่สุด



ภาพที่ 33 ค่าร้อยละของมวลสาร BTEX ในอากาศ

จากภาพที่ 33 พบว่า การพิจารณาความสามารถในการระเหยของสาร BTEX จะใช้ค่าคงที่ของเฮนรีเป็นตัวชี้วัด โดยสารเบนซิน โทลูอิน เอทิลเบนซิน และไซลีน มีค่าคงที่ของเฮนรีเท่ากับ 0.23, 0.11, 0.24 และ 0.10 ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าเมื่อพิจารณาจากค่าคงที่ของเฮนรีพบว่า สารเอทิลเบนซินเกิดการระเหยมากที่สุด เนื่องจากมีค่าคงที่ของเฮนรีมากที่สุด รองลงมาได้แก่ สารเบนซิน โทลูอิน และไซลีน ตามลำดับ แต่จากการคำนวณในการทดลองนี้พบว่า มีสารไซลีนมากที่สุดถึง 40% รองลงมาได้แก่ สารโทลูอิน 21% เอทิลเบนซิน 20% และเบนซิน 19% ตามลำดับ โดยที่ปริมาณของสารที่คำนวณได้ไม่เป็นไปตามกฎของเฮนรีที่ระบุไว้ข้างต้น เป็นผลมาจากสัดส่วนของสารประกอบ BTEX ในน้ำมันเบนซิน 91 ซึ่งเมื่อพิจารณาสัดส่วนของสาร BTEX แต่ละตัวพบว่ามีสารไซลีนมากที่สุด ดังนั้นจึงส่งผลให้เมื่อคำนวณหาค่าการระเหยพบว่ามีปริมาณของสารไซลีนมากที่สุดด้วยทั้งที่มีค่าคงที่ของเฮนรีน้อยที่สุด ส่วนในกรณีของสารโทลูอินที่มีค่าคงที่ของเฮนรีใกล้เคียงกับสารไซลีน แต่กลับมีปริมาณการระเหยใกล้เคียงกับสารเบนซินและเอทิลเบนซิน ทั้งนี้เนื่องมาจากสัดส่วนของสารโทลูอินที่มีอยู่ในสาร BTEX มีค่ามากกว่าสารเบนซินและเอทิลเบนซิน

โดย Kim and Corapcioglu, (2001) ได้กล่าวว่า การทดลองเรื่องการปนเปื้อนของ LNAPL ในทุกกรณีเกิดค่าการระเหยมากที่สุด แต่เนื่องจากการทดลองนี้เป็นการประมวลผลจากภาพถ่ายทำให้ค่าการระเหยของสาร BTEX ที่ออกมาได้นั้นน้อยกว่าความเป็นจริงได้

จากการคำนวณ พบว่า ปริมาณการปนเปื้อนของสาร BTEX ในแต่ละสถานะจะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของน้ำมันที่นำมาใช้ในการทดลอง ได้แก่ สัดส่วนของสาร BTEX ที่เป็นสารประกอบของน้ำมันเบนซิน 91 ค่าการละลายน้ำ (solubility, C_s) ค่าสัมประสิทธิ์การแบ่งแยกสารอินทรีย์คาร์บอน (Organic carbon partition coefficient, K_{oc}) ค่าสัมประสิทธิ์การกระจายในดิน (soil distribution coefficient, K_d) และค่าคงที่ของเฮนรี (Henry's constant, H) โดยถ้าสารใดมีสัดส่วนในน้ำมันยิ่งมาก ก็จะทำให้เกิดมวลในการปนเปื้อนมากตาม

นอกจากนี้ปริมาณการปนเปื้อนของสาร BTEX ยังขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของตัวกลางอย่างทรายขาวและดินเหนียวด้วย ได้แก่ สัดส่วนของสารอินทรีย์คาร์บอนในทรายขาวและดินเหนียว เพื่อใช้ในการพิจารณาการดูดซับ เนื่องจากดินจะมีสารอินทรีย์คาร์บอนเป็นส่วนมากที่ทำหน้าที่ดูดซับสารเคมีปนเปื้อน