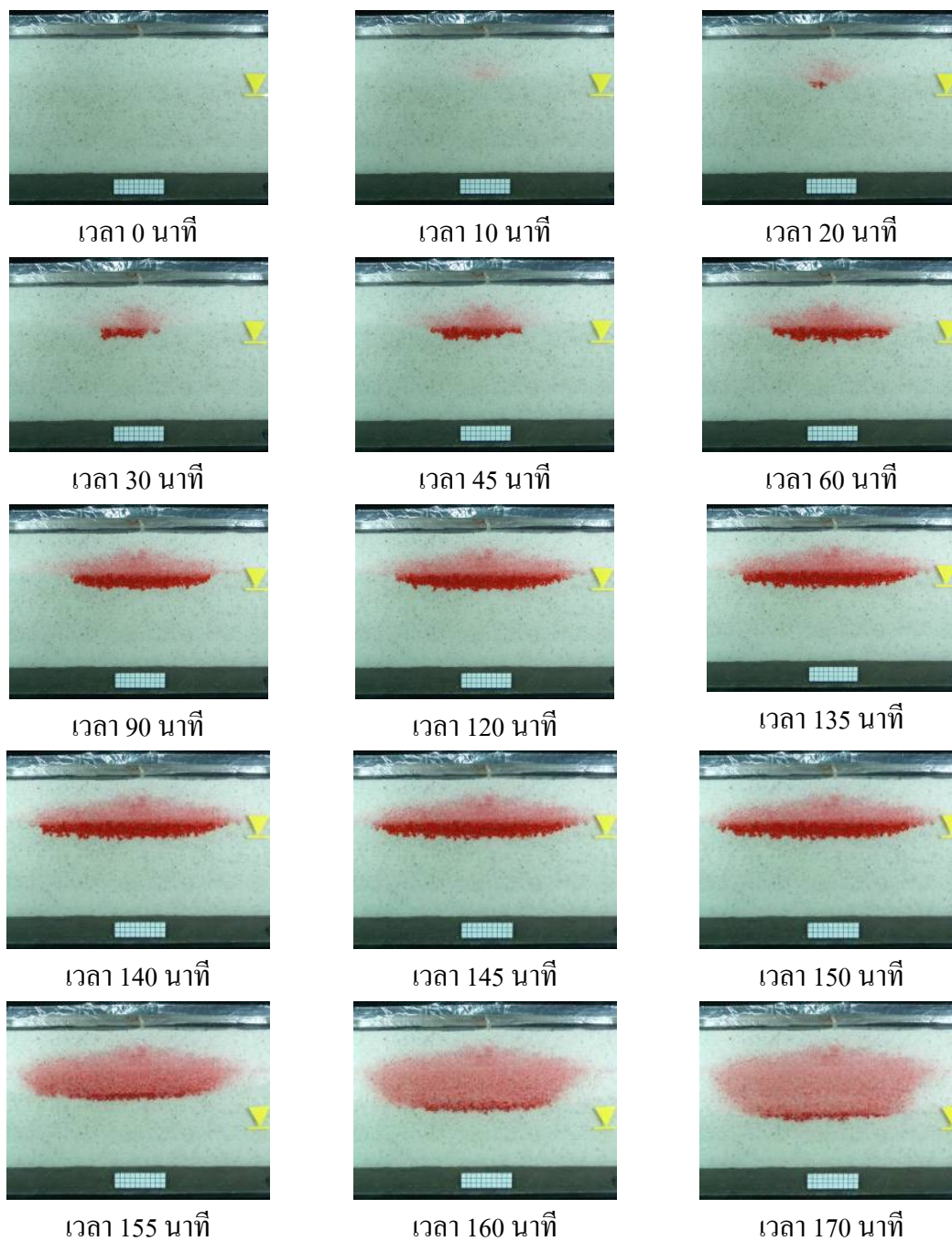


ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

ผลการทดลองการปนเปื้อนของน้ำมันเชื้อเพลิง

ผลการเคลื่อนที่ของ LNAPL ในแต่ละช่วงเวลา



ภาพผนวกที่ ก1 การเคลื่อนที่ของ LNAPL ณ เวลาต่างๆ



เวลา 180 นาที



เวลา 195 นาที



เวลา 200 นาที



เวลา 205 นาที



เวลา 210 นาที



เวลา 215 นาที



เวลา 220 นาที



เวลา 230 นาที



เวลา 240 นาที



เวลา 250 นาที



เวลา 255 นาที



เวลา 260 นาที



เวลา 265 นาที



เวลา 270 นาที



เวลา 275 นาที

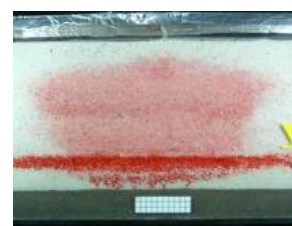
ภาพผนวกที่ ก1 (ต่อ) ผลการเคลื่อนที่ของ LNAPL ณ เวลาต่างๆ



เวลา 285 นาที



เวลา 300 นาที



เวลา 340 นาที



เวลา 360 นาที



เวลา 390 นาที



เวลา 420 นาที



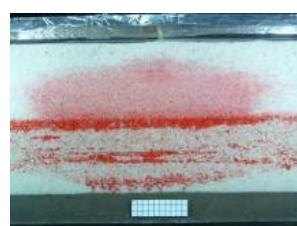
เวลา 465 นาที



เวลา 470 นาที



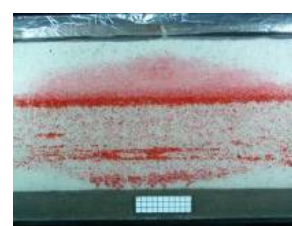
เวลา 480 นาที



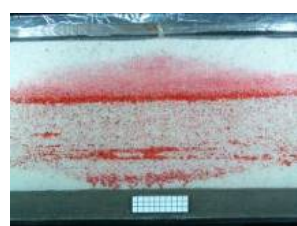
เวลา 495 นาที



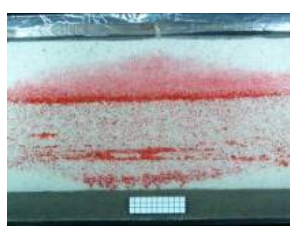
เวลา 525 นาที



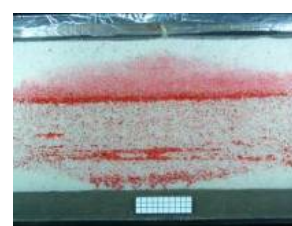
เวลา 555 นาที



เวลา 585 นาที



เวลา 595 นาที



เวลา 600 นาที

ภาพผนวกที่ ก1 (ต่อ) ผลการเคลื่อนที่ของ LNAPL ณ เวลาต่างๆ

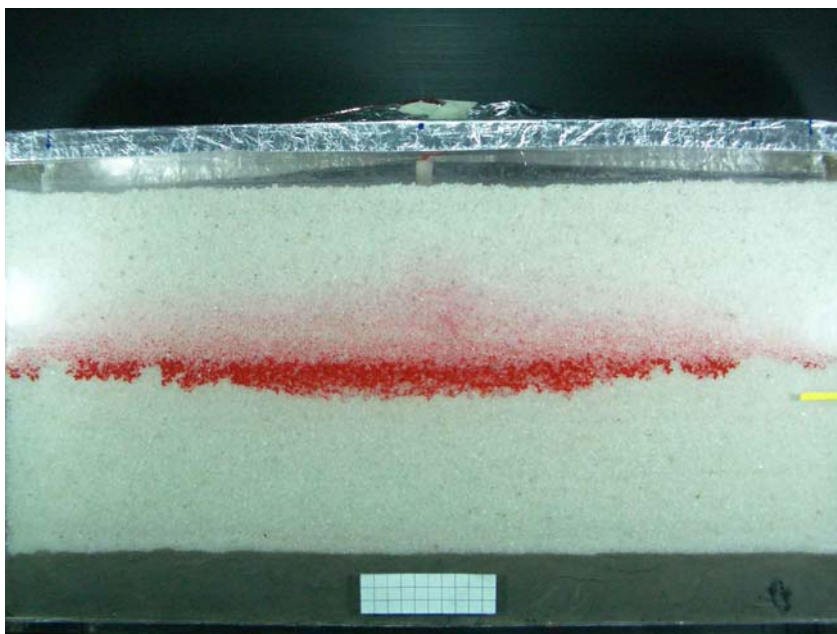
ภาคผนวก ข
การใช้งานโปรแกรม Matlab v.7

การใช้งานโปรแกรม Matlab v.7

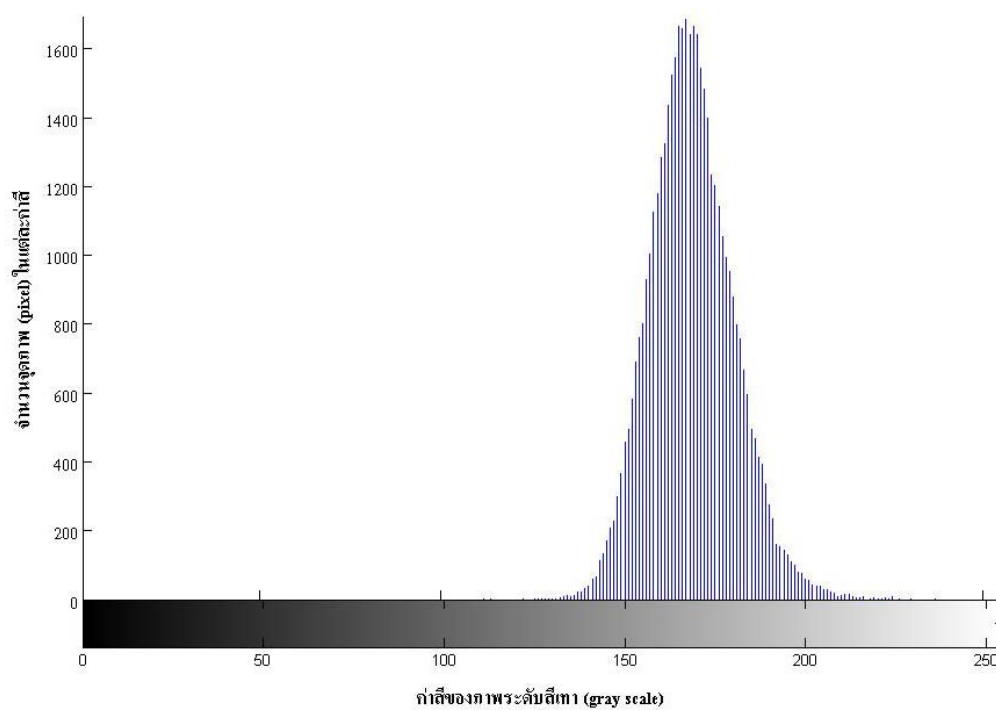
1. ตัวอย่างการวัดขนาดพื้นที่ปนเปื้อนและเส้นรอบรูป ณ เวลา 4,440 นาที จากผลเรื่องการปนเปื้อน

- เริ่มจากเปิดโปรแกรม Matlab v.7 จากนั้นทำการเลือก m-file ที่เขียนไว้สำหรับงานนี้
- กดปุ่ม Run เพื่อเริ่มประมวลผล หลังจากนั้นจะปรากฏคำสั่ง input เพื่อใช้ในการเลือกเปิดไฟล์ภาพที่ต้องการแล้วกดปุ่ม Enter ซึ่งแสดงดังภาพผนวกที่ ข1
- คลิกเลือกจุดที่ต้องการทราบขนาดพื้นที่ โดยเลือกประมาณ 4 จุด เพื่อจะได้หาค่าเฉลี่ยช่วงสีที่ต้องการทราบพื้นที่
- หลังจากนั้นโปรแกรมจะทำการแปลงภาพต้นฉบับเป็นฮิสโทแกรม (histogram) โดยฮิสโทแกรมนี้จะแสดงจำนวนจุดภาพ (pixel) ของแต่ละค่าสีที่กระจายอยู่ในรูปภาพ ซึ่งในงานนี้ค่าฮิสโทแกรมจะใช้อธิบายว่าบริเวณที่ปนเปื้อนมีค่า intensity ของช่วงสีแดงเข้มทั้งหมดเท่าไร จากนั้นโปรแกรมจะทำการคำนวณและแสดงผลออกมาว่ามีพื้นที่ที่ปนเปื้อนน้ำมันทั้งหมดกี่ pixel ดังแสดงในภาพผนวกที่ ข2
- จากนั้นโปรแกรมจะปรากฏภาพเส้นรอบรูปของพื้นที่ปนเปื้อนที่เลือกไว้ข้างต้น ดังแสดงในภาพผนวกที่ ข3 ซึ่งโปรแกรมจะคำนวณและแสดงผลเส้นรอบรูปนี้ออกมาเป็นจำนวน pixel
- สุดท้ายโปรแกรมจะทำการแปลงภาพต้นฉบับเป็นภาพระดับสีเทา (grayscale) ซึ่งเป็นภาพบริเวณพื้นที่ปนเปื้อนน้ำมันที่ต้องการทราบ ดังแสดงในภาพผนวกที่ ข4

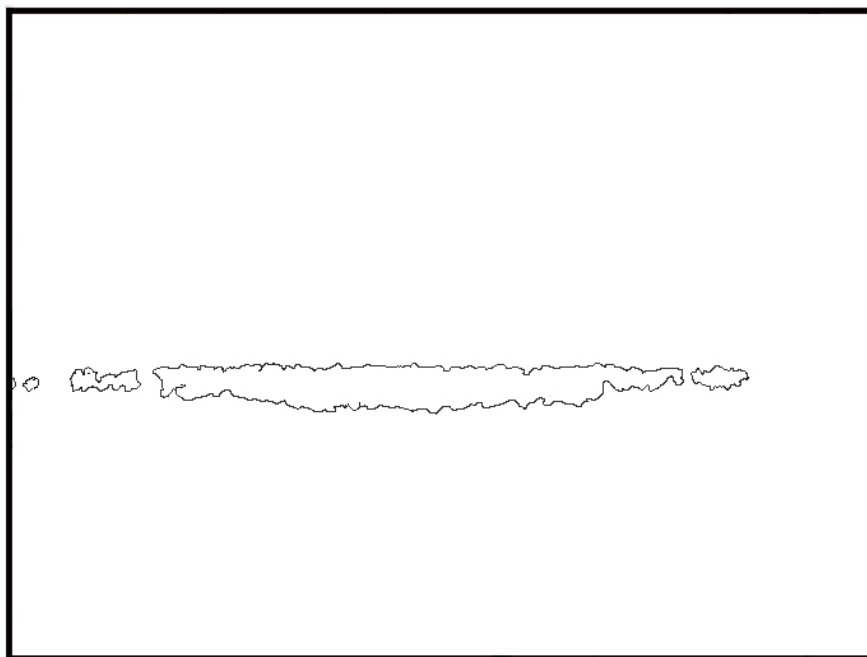
โดยในตัวอย่างนี้ ได้ทำการเลือกจุดพื้นที่ปนเปื้อนบริเวณ free phase (บริเวณสีแดงเข้ม) ซึ่งผลจากการประมวลผลการปนเปื้อนน้ำมัน ณ เวลา 4,400 นาที พบว่า เส้นรอบรูปบริเวณพื้นที่ปนเปื้อน มีขนาด 3,072 pixel และมีพื้นที่ปนเปื้อนทั้งหมด 39,503 pixel



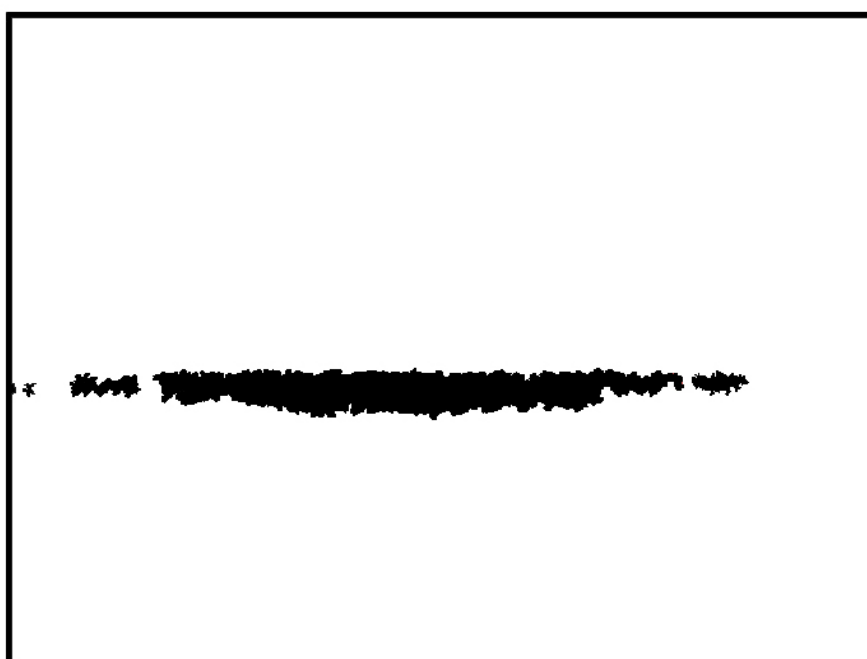
ภาพผนวกที่ ข1 การปนเปื้อนของน้ำมันเบนซิน ณ เวลา 4,440 นาที



ภาพผนวกที่ ข2 ฮิสโทแกรมของการปนเปื้อนน้ำมัน ณ เวลา 4,440 นาที



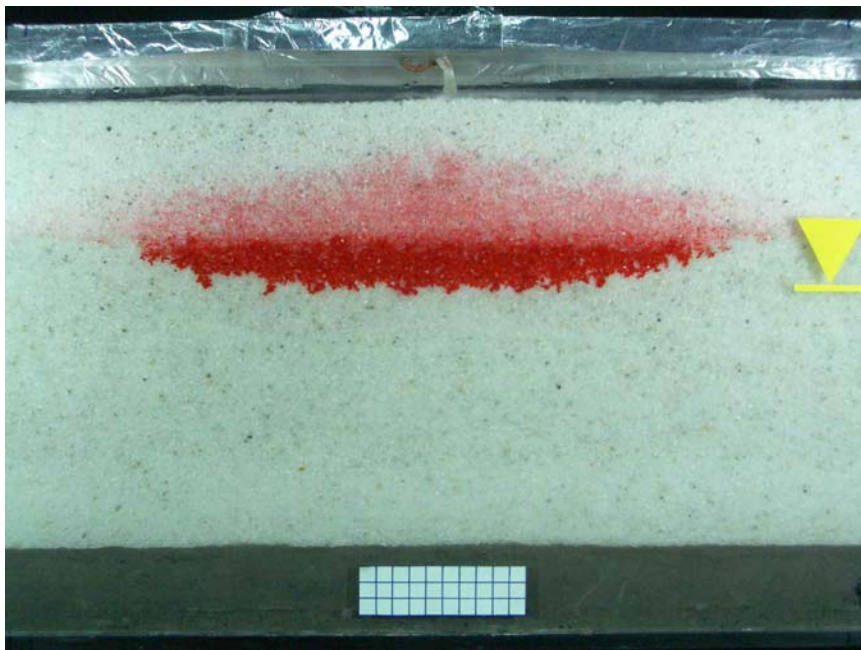
ภาพผนวกที่ ข3 เส้นรอบรูปของบริเวณพื้นที่ปนเปื้อน ณ เวลา 4,440 นาที



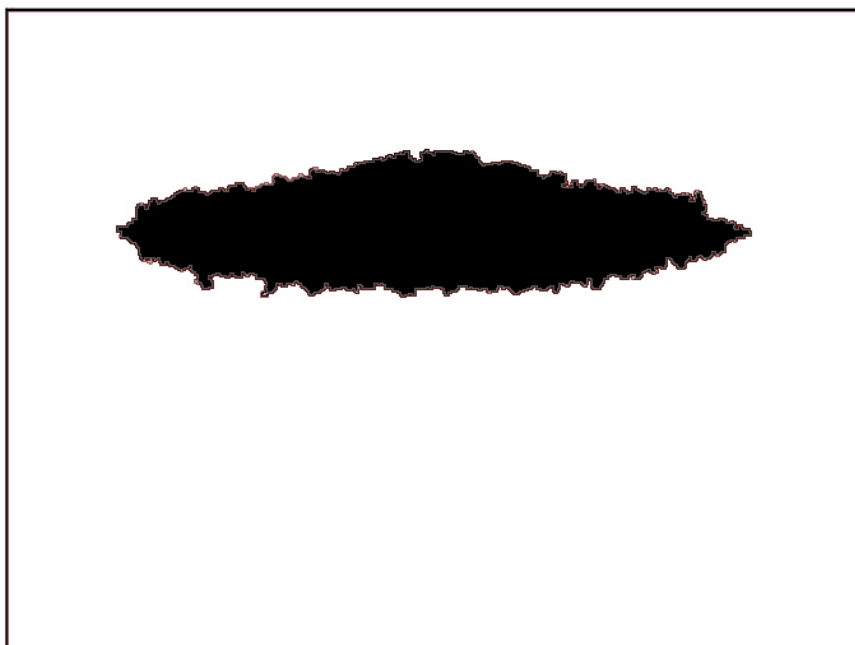
ภาพผนวกที่ ข4 พื้นที่ปนเปื้อน ณ เวลา 4,440 นาที

2. ตัวอย่างการสร้างเส้นรอบขอบ (contour) ณ เวลา 90 นาที โดยใช้โปรแกรม Matlab v.7

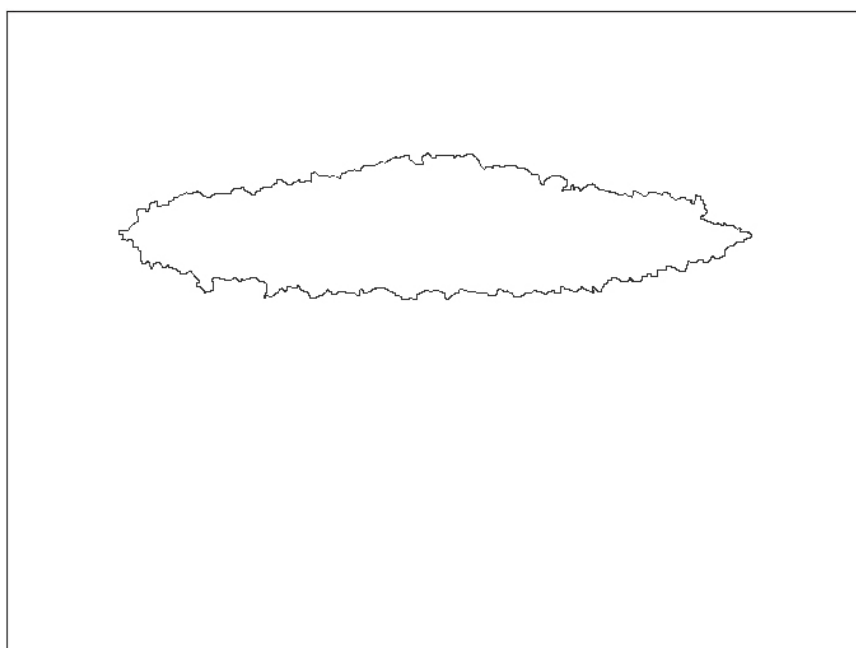
- เริ่มจากเปิดโปรแกรม Matlab v.7 จากนั้นทำการเลือก m-file ที่เขียนไว้สำหรับงานนี้
- กดปุ่ม Run เพื่อเริ่มประมวลผล หลังจากนั้นจะปรากฏคำสั่ง input เพื่อใช้ในการเลือกเปิดไฟล์ภาพที่ต้องการแล้วกดปุ่ม Enter ซึ่งแสดงดังภาพผนวกที่ ข5
- คลิกเลือกจุดที่ต้องการสร้าง contour โดยเลือกประมาณ 4 จุด เพื่อจะได้หาค่าเฉลี่ยช่วงสีที่ต้องการสร้าง
- จากนั้นโปรแกรมจะแสดงผลภาพเส้นรอบขอบของที่บริเวณที่เลือกไว้ข้างต้น ดังแสดงในภาพผนวกที่ 6 ซึ่งโปรแกรมจะคำนวณและแสดงผล contour นี้ออกมา
- โปรแกรมจะทำการแปลงภาพต้นฉบับเป็นภาพระดับสีเทา (grayscale) ซึ่งเป็นภาพบริเวณที่ต้องการสร้าง contour ดังแสดงในภาพผนวกที่ ข7
- จากนั้นพิมพ์ m-file ที่เขียนไว้สำหรับสร้างเส้น contour ใน Matlab
- สุดท้ายโปรแกรมจะแสดงเส้น contour ณ เวลาต่าง เทียบกับระยะทางในแกน X ตามที่เรากำหนด ดังแสดงในภาพผนวกที่ ข8



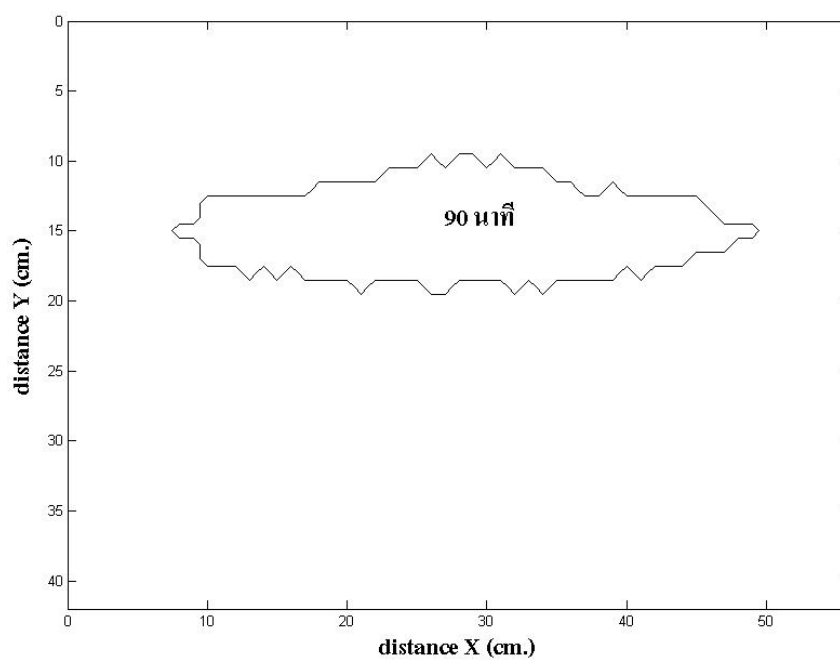
ภาพผนวกที่ ข5 การเคลื่อนที่ของ plume น้ำมัน ณ เวลา 90 นาที



ภาพผนวกที่ ข6 พื้นที่ปนเปื้อนที่ต้องการ ณ เวลา 90 นาที



ภาพผนวกที่ ข7 เส้นรอบรูปที่ต้องการนำไปสร้างเส้นรอบขอบ ณ เวลา 90 นาที



ภาพผนวกที่ ข8 เส้นรอบขอบของน้ำมันที่ปนเปื้อน ณ เวลา 90 นาที

ภาคผนวก ค
ตัวอย่างการคำนวณ

ตัวอย่างการคำนวณ

ตารางผนวกที่ ค1 ผลการทำงานของโปรแกรม Matlab v.7 เพื่อวัดพื้นที่และเส้นรอบรูปของ
น้ำมันที่ปนเปื้อนในชั้น Unsaturated ณ เวลา 4,440 นาที

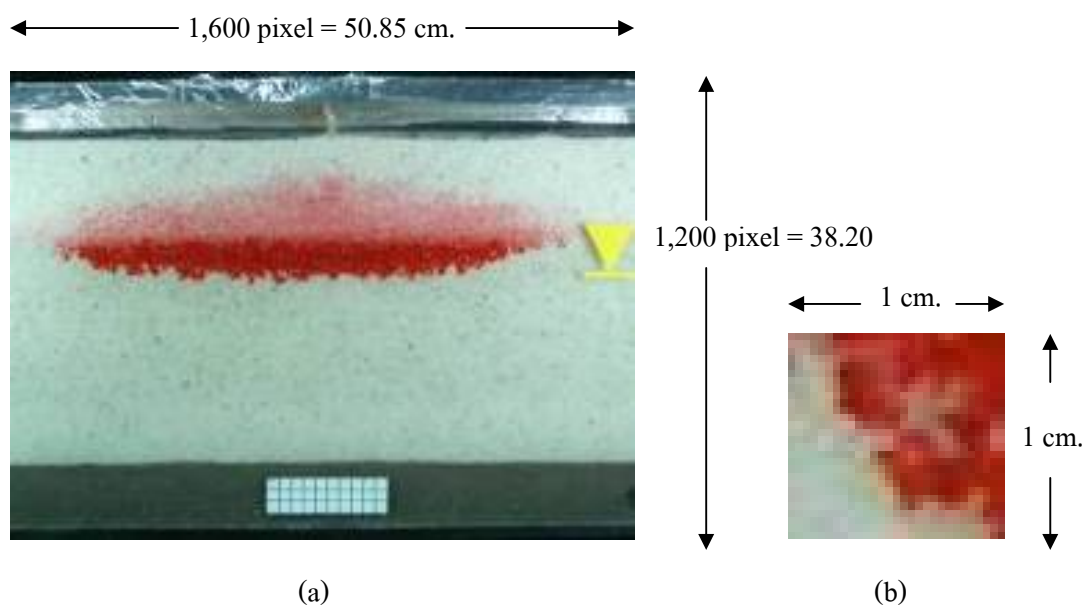
เวลาทดลอง (min)	พื้นที่ปนเปื้อน		ปริมาตร	เส้นรอบรูป		พื้นที่ส่วนเชื่อมต่อ
	บริเวณ bottom					
	zone					
	(pixel)	(cm ²)		(cm.)	(pixel)	
4,440	39,503	39.97	304.54	3,072	122.88	936.35

จากข้อมูลในตารางภาพที่ 27 ใช้เป็นตัวแทนเพื่อแสดงการคำนวณค่าพื้นที่ปนเปื้อน
ปริมาตรการปนเปื้อน เส้นรอบรูปและพื้นที่ส่วนเชื่อมต่อ ในส่วน bottom zone ณ เวลา 4,440 นาที
ดังต่อไปนี้

1. ตัวอย่างการคำนวณหาพื้นที่ปนเปื้อน (area)

โดยการแปลงหน่วยจากจุดภาพเป็นตารางเซนติเมตร (Conversion pixel $\rightarrow$ cm²)

ถ่ายภาพลักษณะการเคลื่อนที่และการปนเปื้อนของน้ำมันเชื้อเพลิงในชั้นดินไม่อิ่มตัวด้วย
น้ำพร้อมสเกลที่เป็นแถบกระดาษด้วยกล้องดิจิทัล ซึ่งสเกลบนแถบกระดาษใช้ในการปรับเทียบ
ระหว่างสเกลของกล้องที่เป็นหน่วยจุดภาพ (pixel) กับสเกลจริงในหน่วยเซนติเมตร เพื่อว่าการวัด
ขนาดพื้นปนเปื้อนที่จะไม่ขึ้นกับระยะห่างระหว่างกล้องกับบริเวณที่ปนเปื้อนน้ำมัน โดยทำการตัด
ภาพให้มีขนาด 1 ตารางเซนติเมตร ดังแสดงในภาพผนวกที่ ค1



ภาพผนวกที่ ๑1 a) น้ำมันปนเปื้อนในทรายอิมตัวที่ถ่ายจากกล้องดิจิทัล และ b) รูปตัดขนาด 1 cm²

เพื่อนำไปใช้ในการคำนวณว่าในภาพขนาด 1 ตารางเซนติเมตรมีทั้งหมดกี่จุดภาพ โดยมีการคำนวณดังนี้

เริ่มจากการแปลงหน่วยจุดภาพเป็นตารางเซนติเมตร (conversion pixel $\rightarrow$ cm²)

$$\text{สเกลของกล้อง} = 1600 \times 1200 \text{ pixel} = 1.92 \times 10^6 \text{ pixel}$$

$$\text{สเกลจริง} = 50.85 \times 38.20 \text{ cm} = 1,942.47 \text{ cm}^2$$

$$\text{สเกลของกล้อง/สเกลจริง} = 1.92 \times 10^6 \text{ pixel} / 1,942.47 \text{ cm}^2$$

$$= 988.43 \text{ pixel / cm}^2$$

$$\text{พื้นที่ปนเปื้อนที่ bottom zone} = 39,503 \text{ pixel} / 988.43 \text{ pixel / cm}^2 = 39.97 \text{ cm}^2$$

2. ตัวอย่างการคำนวณหาปริมาตรปนเปื้อน (volume)

โดยการแปลงหน่วยจากพื้นที่เป็นปริมาตร (conversion cm² $\rightarrow$ cm³)

$$\text{เนื่องจาก กว้าง: สูง: ลึก} = 64.5: 36.8: 7.62$$

$$= 1: 0.57: 0.12$$

จากค่าข้างต้นนี้ พบว่าสัดส่วนความลึกมีค่าน้อยมาก เมื่อเทียบกับความกว้างและความสูง ดังนั้นตู้ทดลองที่ใช้ในการศึกษานี้จึงสามารถพิจารณาเป็น 2 มิติได้ โดยสมมติฐานให้ LNAPL กระจายตัวอย่าง uniform ตลอดความลึกของตู้ทดลอง

$$\begin{aligned}
 \text{Volume} &= \text{area} \times \text{depth} \\
 &= 39.97 \text{ cm}^2 \times 7.62 \text{ cm.} \\
 &= 304.54 \text{ cm}^3
 \end{aligned}$$

3. ตัวอย่างการคำนวณหาขนาดเส้นรอบรูป (perimeter)

โดยการแปลงหน่วยจากจุดภาพเป็นเซนติเมตร (Conversion pixel $\rightarrow$ cm)

$$\begin{aligned}
 \text{สเกลของกล้อง/สเกลจริง} &= 1.92 \times 10^6 \text{ pixel} / 1,942.47 \text{ cm}^2 \\
 &= 988.43 \text{ pixel} / \text{cm}^2 \\
 988.43 \text{ pixel} &= 1 \text{ cm}^2 \\
 1 \text{ pixel} &= 1.01 \times 10^{-3} \text{ cm}^2 \\
 1 \text{ pixel} &= (3X) \times (4X) \\
 (3X) \times (4X) &= 1.63 \times 10^{-3} \text{ cm}^2 \\
 X^2 &= 8.42 \times 10^{-5} \text{ cm}^2 \\
 X &= 0.01 \text{ cm.} \\
 \text{ด้านกว้าง} &= (3X) = 3 \times 0.01 = 0.03 \text{ cm.} \\
 \text{ด้านยาว} &= (4X) = 4 \times 0.01 = 0.04 \text{ cm.} \\
 \text{เส้นรอบรูป} &= \text{ผลรวมของด้านยาว} = \sum(4X) \\
 \text{ถ้าเส้นรอบรูปมีขนาด} &= 3,072 \text{ pixel} \\
 \text{เส้นรอบรูป} &= \sum(4X) = 3,072 \text{ pixel} \times 0.04 \text{ cm.} \\
 &= 122.88 \text{ cm.}
 \end{aligned}$$

4. ตัวอย่างการคำนวณหาพื้นที่ส่วนเชื่อมต่อ (interface area)

โดยการแปลงหน่วยจากเส้นรอบรูปเป็นพื้นที่ส่วนเชื่อมต่อ (Conversion pixel $\rightarrow$ cm²)

$$\begin{aligned}\text{Interface area} &= \text{เส้นรอบรูป} \times \text{ความหนา} \\ &= 122.88 \text{ cm.} \times 7.62 \text{ cm.} \\ &= 936.35 \text{ cm}^2\end{aligned}$$

ตารางผนวกที่ ค2 พารามิเตอร์ที่ได้จากการคำนวณ ที่แต่ละระดับน้ำ

ที่ระดับน้ำ	Reynolds number [-]	Capillary number [-]	พื้นที่หน้าตัด [cm ²]		อัตราการไหล [cm ³ /min]
			ทราย	ดิน	
ระดับน้ำ 17 cm.	38.10	3.03×10^{-6}	91.44	38.10	16.82

จากข้อมูลในตารางผนวกที่ ค2 ใช้เป็นตัวแทนเพื่อแสดงการคำนวณค่า Reynolds number, Capillary number, พื้นที่หน้าตัดและอัตราการไหล ดังต่อไปนี้

1. ตัวอย่างการคำนวณที่ระดับน้ำ 17 cm. จากด้านล่างผู้ทดลอง

จากการทดลองการปนเปื้อนของ LNAPL ในชั้นดินไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ ทำการหาค่า Reynolds number ค่า Capillary number และค่าอัตราการไหลของน้ำใต้ดินที่ระดับน้ำ 17 cm. โดยใช้พารามิเตอร์ดังแสดงในตารางผนวกที่ ค3

ตารางผนวกที่ ค3 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการคำนวณ ที่ระดับน้ำ 17 cm. จากด้านล่างตู้ทดลอง

พารามิเตอร์	คำย่อ	ค่า	ที่มา
ความเร็ว seepage [cm/min]	v_a	0.40	
เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของเม็ดดิน [cm.]	d	0.18	- จากการวิเคราะห์ใน
ค่าการซึมผ่านชั้นทราย [cm/s]	k_s	1.41×10^{-5}	ห้องปฏิบัติการ
ค่าการซึมผ่านชั้นดินเหนียว [cm/s]	k_c	3.98×10^{-9}	ปฐพีกลศาสตร์
Kinematics viscosity at 20 °C [cm ² /s]	ν_w	1.01×10^{-2}	
Viscosity of water at 20 °C [g/cm-s]	μ_w	1.01×10^{-2}	
Interfacial tension [g/s ²]	σ_{nw}	22.20	
ความหนา [cm]	t	7.62	
ความลึกในชั้นทราย [cm]	d_s	12	
ความลึกในชั้นดินเหนียว [cm]	d_c	5	
พื้นที่หน้าตัดในชั้นทราย [cm ²]	A_s	-	
พื้นที่หน้าตัดในชั้นดินเหนียว [cm ²]	A_c	-	
อัตราการไหล [cm ³ /min]	Q_w	-	
Reynolds number [-]	R_e	-	
Capillary number [-]	N_c	-	

วิธีทำ

1. การหาค่า Reynolds Number (R_e)

$$\begin{aligned}
 R_e &= \frac{v_a \times d}{\nu} \\
 &= 0.40 \text{ cm/min} \times 0.177 \text{ cm} / (0.01 \text{ cm}^2/\text{s}) \\
 &= 0.12 \text{ (} R_e < 10 \text{ เป็นการไหลแบบราบเรียบ)}
 \end{aligned}$$

2. การหาค่า Capillary Number (N_c)

$$\begin{aligned}
 N_c &= \frac{V_a \mu_w}{\sigma_{NW}} \\
 &= (0.40 \text{ cm/min} \times (1.0087/100 \text{ g/cm-s})) / ((22.2 \text{ g/s}^2) \times (1 \text{ min}/60 \text{ s})) \\
 &= 3.03 \times 10^{-6}
 \end{aligned}$$

3. การหาพื้นที่หน้าตัดผ่านชั้นดินเหนียว (A_c) และชั้นทราย (A_s)

$$\begin{aligned}
 A_c &= \text{หน้าตัด} \times \text{ลึก} = t \times d_c \\
 &= 7.62 \text{ cm} \times 5 \text{ cm} \\
 &= 38.1 \text{ cm}^2 \\
 A_s &= \text{หน้าตัด} \times \text{ลึก} = t \times d_s \\
 &= 7.62 \text{ cm} \times 12 \text{ cm} \\
 &= 91.44 \text{ cm}^2
 \end{aligned}$$

4. การหาอัตราการไหลที่แต่ละความสูงของระดับน้ำ

- ที่ระดับน้ำ 17 cm. (จากด้านล่างตู้ทดลอง)

$$\begin{aligned}
 Q_w &= \frac{(v_a n_s) \times (A_{s1} k_s + A_{c1} k_c)}{k_s} \\
 &= ((0.40 \text{ cm/min} \times 0.46) \times ((91.44 \times 1.41 \times 10^{-5}) + (38.1 \text{ cm}^2 \times 3.98 \times 10^{-9} \text{ cm/s}))) / (1.41 \times 10^{-5} \text{ cm/s}) \\
 &= 16.82 \text{ cm}^3 / \text{min}
 \end{aligned}$$

ตารางผนวกที่ ค4 ตัวอย่างการถ่ายเทมวลของสารเบนซีนใน Gasoline ในแต่ละ phase ณ เวลา 4,400 นาที

เวลาทดลอง (min)	มวลน้ำมันในน้ำ (mg.)	มวลน้ำมันใน อากาศ (mg.)	มวลน้ำมันในดิน (mg.)	มวลน้ำมันทั้งระบบ (mg.)
4,440	490.52	1.42	0.10	492.04

จากข้อมูลในตารางผนวกที่ ค4 ใช้เป็นตัวแทนเพื่อแสดงการคำนวณค่ามวลน้ำมันของสารเบนซีนที่เกิดการละลาย, การระเหย, การดูดซับและทั้งระบบ ดังต่อไปนี้

1. ตัวอย่างการคำนวณค่ามวลของสารเบนซินที่ปนเปื้อนในแต่ละ phase ที่เวลา 4,440 นาที

จากการทดลองการปนเปื้อนของ LNAPL ในชั้นดินไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ LNAPL ปริมาตร 45 ml. ถูกปล่อยเข้าสู่ระบบ โดยการหาค่ามวลของสารเบนซินในแต่ละสถานะ ที่อุณหภูมิ 25°C ณ สถานะสมดุล โดยใช้พารามิเตอร์ในตารางผนวกที่ ค5

ตารางผนวกที่ ค5 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการคำนวณค่ามวลของสารเบนซินในแต่ละสถานะ

พารามิเตอร์	คำย่อ	ค่า	ที่มา
น้ำหนักโมเลกุลของสารเบนซิน C_6H_6 [g/mol]	$MW_{benzene}$	78	- Christensen and Elton (1996)
ความหนาแน่นของน้ำมันสารเบนซิน [kg/l]	$\rho_{benzene}$	0.8787	
ค่าคงที่เฮนรีของสารเบนซิน ที่ 25 °C [atm · m ³ /mol]	$H_{benzene}$	0.00566	
Solubility of BTEX [mg/l]	$C_{S, benzene}$	1,700	
Organic carbon partition coefficient [ml/g]	$K_{OC, benzene}$	83	
ค่าเศษส่วนของปริมาณสารอินทรีย์คาร์บอนในทราย [%]	f_{OC}	0.01	
ค่าคงที่ R ของสารเบนซิน ที่ 25 °C [atm · m ³ /mol · K]	$R_{benzene}$	8.2×10^{-5}	
ค่าความหนาแน่นแห้งของทราย [g/cm ³]	γ_d	1.67	-จากการวิเคราะห์
ความพรุน [-]	n	0.46	ในห้องปฏิบัติการ
ความหนาแน่นของ Gasoline [g/ml]	$\rho_{gasoline}$	0.729	- API. (1996)
อัตราการไหลน้ำใต้ดิน [cm ³ /min]	Q_w	16.82	- จากการคำนวณ

ตารางผนวกที่ ๕ (ต่อ) พารามิเตอร์ที่ใช้ในการคำนวณค่ามวลของน้ำมันที่ปนเปื้อน

พารามิเตอร์	คำย่อ	ค่า	ที่มา
สารเคมีส่วนผสมในน้ำมัน ได้แก่ Benzene, Toluene, Exthylbenzene และ Xylene	i	-	-
มวลสารปนเปื้อนทั้งระบบ [mg]	M_{total}	-	-
มวลสาร BTEX ที่ระเหย [mg]	$M_{v,i}$	-	-
มวลสาร BTEX ที่ละลาย [mg]	$M_{w,i}$	-	-
มวลสาร BTEX ที่ถูกดูดซับ [mg]	$M_{ad,i}$	-	-
ความเข้มข้นของสารเบนซินใน Gasoline [mg/l]	$C_{NAPL, benzene}$	-	-
ความเข้มข้นของสาร BTEX ที่เหลืออยู่ในสารละลาย, [mg/l]	$C_{w, i}$	-	-
ค่าสัดส่วนของสาร BTEX ใน Gasoline [%]	X_i	-	-
ปริมาตรของสารปนเปื้อนก่อนหน้า [cm^3]	V_1	-	-
ปริมาตรของสารปนเปื้อนที่ปัจจุบัน [cm^3]	V_2	-	-
เวลาก่อนหน้า [min]	t_1	-	-
เวลาที่ปัจจุบัน [min]	t_2	-	-
ค่าความสามารถในการละลายน้ำสูงสุดของสาร BTEX [mg/l]	$C_{s, i}$	-	-
ปริมาตรของน้ำใต้ดิน[l]	V_{water}	-	-
ค่าคงที่ของเฮนรี [-] ของสาร BTEX	H'	-	-
ปริมาตร LNAPL ที่ปนเปื้อนในอากาศที่แทรกอยู่ระหว่างเม็ดทราย [cm^3]	V_{void}	-	-
Soil distribution coefficient [ml/g]	K_d	-	-
มวลของทรายที่ใช้ดูดซับ [g]	M_{soil}	-	-
มวลของสารปนเปื้อนที่ถูกดูดซับของตัวดูดซับ [g/g]	S	-	-
ปริมาตรการปนเปื้อนรวมจากภาพ [cm^3]	$V_{image, Total}$	-	-
ปริมาตรการปนเปื้อนในส่วนบนจากภาพ [cm^3]	$V_{image, Top}$	-	-
ปริมาตรการปนเปื้อนในส่วนล่างจากภาพ [cm^3]	$V_{image, Bottom}$	-	-

วิธีทำ

การหาปริมาตรการปนเปื้อนจากภาพ $V_{image,total} = V_{image,top} + V_{image,bottom}$

Mass Balance: $M_{total} = M_{v,i} + M_{w,i} + M_{ad,i}$

1. หาค่าปริมาณของสารเบนซินใน Gasoline

เมื่อ X_i = ใน Gasoline มีสาร BTEX 18% และใน BTEX มี Benzene 11 % by weight

$$\begin{aligned} C_{NAPL,benzene} &= (X_i/100) \times \rho_{gasoline} \\ &= (0.11 \times 0.18 \times 0.729 \text{ g/ml}) \times (1,000 \text{ mg/g}) \times (1,000 \text{ ml/l}) \\ &= 14,434.2 \text{ mg/l} \end{aligned}$$

2. คำนวณหามวลของสารเบนซินที่เกิดการละลาย ที่เวลา 4,440 นาที

$$\begin{aligned} C_{w,benzene} &= \left(\frac{\rho_i X_i \times \Delta V_{image,bottom} \times n}{Q_w \times (\Delta t)} \right) \\ &= ((0.11 \times 0.18 \times 0.8787 \text{ kg/l} \times (365.83 - 304.54 \text{ cm}^3) \times 0.46) / (16.82 \\ &\quad \text{cm}^3/\text{min} \times (4,440 - 1,560 \text{ min})) \times (1,000) \\ &= 10.13 \text{ mg/l} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} V_{water} &= Q_w \times (t_2 - t_1) \\ &= (16.82 \text{ ml/min} \times (4,440 - 1,560 \text{ min})) \times (1 \text{ liter}/1,000 \text{ ml}) \\ &= 48.44 \text{ liter} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} M_{w,benzene} &= C_{w,benzene} \times V_{water} \\ &= 10.13 \text{ mg/l} \times 48.44 \text{ liter} \\ &= 788.32 \text{ mg.} \end{aligned}$$

3. คำนวณหามวลของสารเบนซินที่เกิดการระเหย ที่เวลา 4,440 นาที

$$\begin{aligned} H'_{benzene} &= H_{benzene} / RT \\ &= (0.00566 \text{ atm} \times \text{m}^3/\text{mol}) / ((8.2 \times 10^{-5} \text{ atm} \times \text{m}^3/\text{mol} \times \text{K}) \times (25 + 273 \text{ K})) \\ &= 0.23 \end{aligned}$$

$$V_{void} = V_{image,top} \times n$$

$$\begin{aligned}
&= 1,324.46 \text{ cm}^3 \times 0.46 \\
&= 609.25 \text{ cm}^3 = 609.25 \text{ ml} \\
M_{v,benzene} &= C_g \times V_{void} = (H'_{benzene} \times C_{water}) \times V_{void} \\
&= 0.23 \times 10.13 \text{ mg/l} \times 609.25 \text{ ml} \times (1 \text{ litre}/1,000 \text{ ml}) \\
&= 1.42 \text{ mg.}
\end{aligned}$$

4. คำนวณหามวลของสารเบนซินที่เกิดการดูดซับ ที่เวลา 4,440 นาที

$$\begin{aligned}
M_{soil} &= V_{image,total} \times (1-n) \times \gamma_d \\
&= (1,324.46) \text{ cm}^3 \times (1-0.46) \times 1.67 \text{ g/cm}^3 \\
&= 1,194.40 \text{ g.} \\
K_d &= K_{oc} \times f_{oc} \\
&= 83 \times 0.0001 \\
&= 0.0083 \text{ ml/g} \\
S &= M_{ad,benzene} / M_{soil} = K_d \times C_{w,benzene} \\
M_{ad,benzene} &= K_d \times C_{w,benzene} \times M_{soil} \\
&= 0.0083 \text{ ml/g} \times 10.13 \text{ mg/l} \times 1,194.40 \text{ g.} \times (1 / 1,000 \text{ ml}) \\
&= 0.10 \text{ mg.}
\end{aligned}$$

5. มวลของสารเบนซินที่ปนเปื้อนทั้งระบบ

$$\begin{aligned}
M_{total,benzene} &= M_{v,benzene} + M_{w,benzene} + M_{ad,benzene} \\
&= 1.42 \text{ mg.} + 490.52 \text{ mg.} + 0.10 \text{ mg.} \\
&= 492.04 \text{ mg.}
\end{aligned}$$

ภาคผนวก ง
ตารางผลการทดลอง

ตารางผนวกที่ 1 พารามิเตอร์ที่ได้จากการคำนวณ ที่แต่ละระดับน้ำ

พารามิเตอร์	ระดับน้ำ 5 cm.	ระดับน้ำ 13 cm.	ระดับน้ำ 17 cm.	ระดับน้ำ 21 cm.
ความเร็ว seepage (v_a), [cm/min]	0.40	0.40	0.40	0.40
ความหนา [cm]	7.62	7.62	7.62	7.62
ความลึกในชั้นทราย [cm]	0	8	12	16
ความลึกในชั้นดินเหนียว [cm]	5	5	5	5
พื้นที่หน้าตัดในชั้นทราย (A_s), [cm ²]	0	60.96	91.44	121.92
พื้นที่หน้าตัดในชั้นดินเหนียว (A_c), [cm ²]	38.10	38.10	38.10	38.10
ค่าการซึมผ่านชั้นทราย (k_s), [cm/s]	1.41×10^{-5}	1.41×10^{-5}	1.41×10^{-5}	1.41×10^{-5}
ค่าการซึมผ่านชั้นดินเหนียว (k_c), [cm/s]	3.98×10^{-9}	3.98×10^{-9}	3.98×10^{-9}	3.98×10^{-9}
อัตราการไหล (Q_w), [cm ³ /min]	6.4	11.22	16.82	22.43
เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของเม็ดดิน (d), [cm.]	0.18	0.18	0.18	0.18
Kinematics viscosity at 20 °C (ν_w), [cm ² /s]	0.01	0.01	0.01	0.01
Reynolds number (R_c), [-]	0.12	0.12	0.12	0.12
Viscosity of water at 20 °C (μ_w), [g/cm-s]	1.01×10^{-2}	1.01×10^{-2}	1.01×10^{-2}	1.01×10^{-2}
Interfacial tension (σ_{nw}), [g/s ²]	22.20	22.20	22.20	22.20
Capillary number, [-]	3.03×10^{-6}	3.03×10^{-6}	3.03×10^{-6}	3.03×10^{-6}

ตารางผนวกที่ ๖2 พื้นที่และปริมาตรของน้ำมันที่ปนเปื้อน

รูป ที่	เวลา (hr:min)	พื้นที่ pixel			พื้นที่ (cm ²)			ปริมาตร (cm ³)		
		top	bottom	total	top	bottom	total	top	bottom	total
1	0:00									
2	0:30									
3	0:40									
4	0:45									
5	1:00									
6	2:00									
7	7:30									
8	8:00									
เริ่มต้นการคำนวณสมมูลมวลภายในระบบ										
9	26:00	186,870	47,454	234,324	189.06	48.01	237.07	1440.61	365.83	1806.45
10	50:00	150,700	41,732	192,432	152.46	42.22	194.68	1161.77	321.72	1483.49
11	74:00	132,300	39,503	171,803	133.85	39.97	173.81	1019.92	304.54	1324.46
12	98:00	115,300	34,828	150,128	116.65	35.24	151.88	888.87	268.50	1157.36
13	122:00	112,410	32,123	144,533	113.73	32.50	146.22	866.59	247.64	1114.23
14	146:00	106,710	28,100	134,810	107.96	28.43	136.39	822.65	216.63	1039.27
15	170:00	85,716	26,425	112,141	86.72	26.73	113.45	660.80	203.72	864.51
16	194:00	78,688	22,648	101,336	79.61	22.91	102.52	606.62	174.60	781.22
17	218:00	77,228	21,456	98,684	78.13	21.71	99.84	595.36	165.41	760.77

ตารางผนวกที่ 3 เส้นรอบรูปและพื้นที่ส่วนเชื่อมต่อของน้ำมันที่ปนเปื้อน

รูป ที่	เวลา (hr : min)	เส้นรอบรูป		เส้นรอบรูป		Interface area	
		bottom pixel	top pixel	bottom (cm.)	top (cm.)	bottom (cm ²)	top (cm ²)
1	0:00						
2	0:30						
3	0:40						
4	0:45						
5	1:00						
6	2:00						
7	7:30						
8	8:00						
เริ่มต้นการคำนวณสมมูลมวลภายในระบบ							
9	26:00	3,442	23,460	160.25	1,092.23	1,221.11	8,322.82
10	50:00	3,309	20,950	154.06	975.38	1,173.92	7,432.36
11	74:00	3,072	18,389	143.02	856.14	1,089.84	6,523.80
12	98:00	2,992	13,975	139.30	650.64	1,061.46	4,957.86
13	122:00	2,870	17,254	133.62	803.30	1,018.18	6,121.14
14	146:00	2,685	12,796	125.01	595.75	952.55	4,539.59
15	170:00	2,646	14,284	123.19	665.02	938.71	5,067.48
16	194:00	2,622	15,032	122.07	699.85	930.20	5,332.85
17	218:00	2,245	10,948	104.52	509.71	796.45	3,883.98

ตารางผนวกที่ 44 ความเข้มข้นของ LNAPL ที่ปนเปื้อนในน้ำใต้ดิน

รูปที่	เวลา (hr : min)	ความเข้มข้นของ LNAPL (mg/l)			
		Benzene	Toluene	Ethylbenzene	Xylene
1	0:00				
2	0:30				
3	0:40				
4	0:45	ระยะเวลาก่อนเกิด Plume ของน้ำมันลงที่			
5	1:00				
6	2:00				
7	7:30				
8	8:00				
เริ่มต้นการคำนวณสมมูลมวลภายในระบบ					
9	26:00	0.00	0.00	0.00	0.00
10	74:00	10.13	23.49	9.98	47.39
12	122:00	9.40	21.80	9.26	44.00
14	170:00	7.26	16.83	7.15	33.96
16	218:00	6.33	14.68	6.24	29.62

ตารางผนวกที่ 5 มวลสาร BTEX ที่เกิดการระเหย

รูปที่	เวลา (hr:min)	Benzene (mg.)	Toluene (mg.)	Ethylbenzene (mg.)	Xylene (mg.)
1	0:00				
2	0:30				
3	0:40				
4	0:45	ระยะเวลา ก่อนเกิด Plume ของน้ำมันคงที่			
5	1:00				
6	2:00				
7	7:30				
8	8:00				
เริ่มต้นการคำนวณสมดุลมวลภายในระบบ					
9	26:00	0.00	0.00	0.00	0.00
10	74:00	1.42	1.54	1.46	3.02
12	122:00	1.11	1.20	1.14	2.36
14	170:00	0.66	0.72	0.68	1.41
16	218:00	0.51	0.55	0.52	1.08

ตารางผนวกที่ 6 มวลสาร BTEX ที่เกิดการละลายน้ำ

รูปที่	เวลา (hr:min)	Benzene (mg.)	Toluene (mg.)	Ethylbenzene (mg.)	Xylene (mg.)
1	0:00				
2	0:30				
3	0:40				
4	0:45	ระยะเวลาก่อนเกิด Plume ของน้ำมันคงที่			
5	1:00				
6	2:00				
7	7:30				
8	8:00				
เริ่มต้นการคำนวณสมดุลมวลภายในระบบ					
9	26:00	0.00	0.00	0.00	0.00
10	74:00	490.52	1,137.76	483.43	2,295.84
12	122:00	455.38	1,056.27	448.80	2,131.40
14	170:00	351.50	815.31	346.42	1,645.19
16	218:00	306.60	711.17	302.17	1,435.04

ตารางผนวกที่ ๗ มวลสาร BTEX ที่เกิดการดูดซับ

รูปที่	เวลา (hr:min)	Benzene (mg.)	Toluene (mg.)	Ethylbenzene (mg.)	Xylene (mg.)
1	0:00				
2	0:30				
3	0:40				
4	0:45	ระยะเวลาก่อนเกิด Plume ของน้ำมันคงที่			
5	1:00				
6	2:00				
7	7:30				
8	8:00				
เริ่มต้นการคำนวณสมดุลมวลภายในระบบ					
9	26:00	0.00	0.00	0.00	0.00
10	74:00	0.10	0.84	1.31×10^{-3}	1.36
12	122:00	0.08	0.66	1.02×10^{-3}	1.06
14	170:00	0.05	0.39	6.13×10^{-4}	0.64
16	218:00	0.04	0.30	4.71×10^{-4}	0.49

ตารางผนวกที่ 8 มวลสาร BTEX ที่ปนเปื้อนในระบบ

รูปที่	เวลา (hr:min)	Benzene (mg.)	Toluene (mg.)	Ethylbenzene (mg.)	Xylene (mg.)
1	0:00				
2	0:30				
3	0:40				
4	0:45	ระยะเวลาก่อนเกิด Plume ของน้ำมันคงที่			
5	1:00				
6	2:00				
7	7:30				
8	8:00				
เริ่มต้นการคำนวณสมดุลมวลภายในระบบ					
9	26:00	0.00	0.00	0.00	0.00
10	74:00	492.04	1,140.15	484.89	2,300.22
12	122:00	456.57	1,058.13	449.94	2,134.82
14	170:00	352.21	816.43	347.10	1,647.23
16	218:00	307.15	712.03	302.70	1,436.62

ตารางผนวกที่ ๑๑ มวลสาร BTEX ที่สภาวะต่างๆ

รูปที่	เวลา (hr:min)	Mass volatilization (mg.)	Mass dissolution (mg.)	Mass adsorption (mg.)
1	0:00			
2	0:30			
3	0:40			
4	0:45	ระยะเวลาก่อนเกิด Plume ของน้ำมันคงที่		
5	1:00			
6	2:00			
7	7:30			
8	8:00			
เริ่มต้นการคำนวณสมดุลมวลภายในระบบ				
9	26:00	0.00	0.00	0.00
10	74:00	7.44	4,407.55	2.30
12	122:00	5.81	4,091.85	1.80
14	170:00	3.48	3,158.42	1.08
16	218:00	2.67	2,754.99	0.83

ตารางผนวกที่ 10 การเคลื่อนที่ของ LNAPL ณ เวลาต่างๆ

รูปที่	เวลา (min)	ระยะทาง			ระดับ น้ำ (cm.)	V_x (cm/min)	V_y (cm/min)	หมายเหตุ
		X (cm.)	Y (cm.)	X/Y				
1	0	0.0	0.0	0.0	21.0	0.00	0.00	ก่อนการทดลอง
2	10	0.0	0.0	0.0	21.0	0.00	0.00	ระดับน้ำที่ 21 cm.
3	20	10.0	6.0	1.7	21.0	0.40	0.30	เริ่มเห็นสี 10 นาที
4	30	13.0	7.5	1.7	21.0	0.45	0.25	
5	45	15.0	8.0	1.9	21.0	0.43	0.18	
6	60	26.0	9.5	2.7	21.0	0.43	0.16	
7	90	34.5	11.0	3.1	21.0	0.38	0.12	
8	120	45.0	10.0	4.5	21.0	0.38	0.08	
9	135	46.0	10.0	4.6	21.0	0.34	0.07	หยุด feed น้ำมัน
10	140	46.0	10.0	4.6	21.0	0.33	0.07	
11	145	46.0	10.0	4.6	21.0	0.32	0.07	
12	150	46.5	10.0	4.7	21.0	0.31	0.07	ชะลอการเคลื่อนที่
13	155	47.0	10.5	4.5	21.0	0.25	0.07	ลดระดับน้ำ 13 cm.
14	160	47.0	12.5	3.8	21.0	0.21	0.08	
15	170	47.0	15.0	3.1	16.6	0.19	0.09	
16	180	47.0	17.0	2.8	14.8	0.17	0.09	
17	195	51.0	18.0	2.8	13.0	0.14	0.09	
18	200	47.0	18.0	2.6	13.0	0.13	0.09	
19	205	47.0	17.5	2.7	13.0	0.13	0.09	
20	210	50.0	18.0	2.8	13.0	0.13	0.09	ชะลอการเคลื่อนที่
21	215	49.0	22.0	2.2	13.0	0.12	0.10	ลดระดับน้ำ 5 cm.
22	220	48.0	23.5	2.0	13.0	0.11	0.11	
23	230	47.0	24.5	1.9	11.5	0.10	0.11	

ตารางผนวกที่ 10 (ต่อ) การเคลื่อนที่ของ LNAPL ณ เวลาต่างๆ

รูปที่	เวลา (min)	ระยะทาง			ระดับ น้ำ (cm.)	V_x (cm/min)	V_y (cm/min)	หมายเหตุ
		X (cm.)	Y (cm.)	X/Y				
24	240	47.0	26.0	1.8	9.5	0.10	0.11	
25	250	48.0	27.0	1.8	8.3	0.09	0.11	
26	255	47.5	27.0	1.8	7.7	0.09	0.11	
27	260	48.0	27.0	1.8	5.0	0.08	0.10	
28	265	46.5	27.0	1.7	5.0	0.08	0.10	ชะลอการเคลื่อนที่ เพิ่มระดับน้ำ
29	270	-	-	-	6.0	-	-	
30	275	-	-	-	6.5	-	-	
31	285	-	-	-	7.5	-	-	
32	300	-	-	-	9.0	-	-	
33	340	-	-	-	10.5	-	-	
34	360	-	-	-	12.0	-	-	
35	390	-	-	-	13.0	-	-	ชะลอการเคลื่อนที่ เพิ่มระดับน้ำ
36	420	-	-	-	16.0	-	-	
37	465	-	-	-	16.0	-	-	
38	470	-	-	-	18.0	-	-	
39	480	-	-	-	18.0	-	-	
40	495	-	-	-	18.0	-	-	
41	525	-	-	-	18.5	-	-	
42	555	-	-	-	18.5	-	-	
43	585	-	-	-	20.5	-	-	
44	595	-	-	-	21.0	-	-	ชะลอการเคลื่อนที่ ระดับน้ำที่ 21 cm.
45	600	-	-	-	21.0	-	-	

ภาคผนวก จ

ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติของทรายและดินเหนียว

ผลการทดสอบคุณสมบัติของทราย

Sample	ทรายหยาบ
Soil Description	สีขาว
Diameter	1 mm. – 3 mm.

ความถ่วงจำเพาะของทราย (Specific Gravity) = 2.76

Method ASTM C 127 – 81

ความหนาแน่นแห้ง (γ_d) = 1.67 g/cm³

Optimum Water Content = 8.60 %

Method ASTM D 698 – 70

ความซึมน้ำ (Permeability) = 1.41×10^{-5} cm/s

Method ASTM D 2434 – 68

ความพรุน = 46.16 %

ปริมาณสารอินทรีย์ (Organic Impurities) = เบอร์ 1 หรือ มีปริมาณสารอินทรีย์เล็กน้อย

Method ASTM C 40 – 79

Test by นายอภิชาติ พึ่งอยู่

Approved by นายเฉลิมชัย ตระกูลผุดผ่อง
 ห้องปฏิบัติการปฐพีกลศาสตร์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา
 คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ผลการทดสอบคุณสมบัติของดินเหนียว

Sample ดินเหนียวอ่อน
Soil Description สีเทา
Depth 3 เมตร

ความซึมน้ำ (Permeability) = 3.98×10^{-9} cm/s

Method ASTM D 2434 – 68

ความถ่วงจำเพาะของดิน (Specific Gravity) = 2.61

Method ASTM D 854 – 58

ความหนาแน่นแห้ง (γ_d) = 1.52 g/cm³

Optimum Water Content = 24 %

Method ASTM D 698 – 70

อัตราส่วนช่องว่าง (e) = 0.717

ความพรุน (n) = 41.76 %

Test by นายอภิชาติ ฟิ่งอยู่

Approved by นายเฉลิมชัย ตระกูลสุดฟ่อง
 ห้องปฏิบัติการปฐพีกลศาสตร์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา
 คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์