

## สรุปผลการทดลอง

### 1. การทดสอบเบื้องต้น

จากการทดสอบเบื้องต้นพบว่าสีและรูปร่างของอะคริลิกไม่มีการเปลี่ยนแปลง ดังนั้นสามารถนำอะคริลิกมาใช้สร้างตู้ทดลอง ส่วนสายซิลิโคนที่นำมาใช้กับน้ำมันคือ Tygon fuel & lubricant โดยน้ำมันที่ใช้คือน้ำมันเบนซิน 91 ที่ทำการย้อมสีด้วยสาร Sudan IV 0.01% โดยน้ำหนัก ส่วนทรายขาวที่ใช้ในงานนี้มีขนาด 1.18-2.36 mm.

### 2. การเคลื่อนที่ของน้ำมันเชื้อเพลิงในชั้นดินไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ

เมื่อเกิดการรั่วไหลของน้ำมันเบนซิน 91 (LNAPL) จากถังกักเก็บใต้ดิน พบว่า ในช่วงแรก LNAPL จะเคลื่อนที่ในแนวดิ่งและแนวระนาบ เท่าๆ กัน เนื่องจากในบริเวณนี้ยังไม่มีแรงต้านใดๆ โดย LNAPL ที่ปนเปื้อนจะรวมตัวจนมีรูปร่างคล้ายแอ่งน้ำหรือเรียกว่า plume น้ำมัน ในเวลาต่อมา เมื่อ LNAPL เคลื่อนที่ถึง capillary fringe (อยู่เหนือระดับน้ำ) ซึ่งเป็นบริเวณที่น้ำใต้ดินซึมขึ้นมาตามช่องว่างระหว่างเม็ดทรายด้วยแรง capillary โดยความหนาของชั้น capillary fringe นี้จะขึ้นอยู่กับแรงตึงผิวระหว่างแรงดันน้ำกับ LNAPL (interfacial tension) และช่องว่างระหว่างเม็ดทราย ถ้ามีแรง capillary มากกว่าแรงโน้มถ่วงและแรงหนืด จะทำให้ LNAPL ไม่เคลื่อนที่ในแนวดิ่ง แต่จะเกิดการเคลื่อนที่ในแนวระนาบแทน และเมื่อเวลาผ่านไประยะหนึ่งการเคลื่อนที่ของ LNAPL ทั้งในแนวดิ่งและแนวระนาบจะหยุดการเคลื่อนที่ (immobilization) เนื่องจากทรายอิ่มตัวไปด้วยน้ำมัน โดยการเคลื่อนที่นี้จะขึ้นอยู่กับค่า capillary number ( $N_c$ ) โดย Wilson and Conrad (1984) ได้กล่าวไว้ว่าถ้าค่า capillary number ( $N_c$ ) มีค่าอยู่ในช่วง  $2 \times 10^{-4}$  -  $1.3 \times 10^{-3}$  น้ำมันเชื้อเพลิงจะเกิดการเคลื่อนที่ โดยในงานทดลองนี้  $N_c = 1.89 \times 10^{-6}$  ดังนั้น LNAPL จะไม่เกิดการเคลื่อนที่ เนื่องจากความเร็วของน้ำใต้ดินในการทดลองไม่ทำให้ LNAPL เกิดการเคลื่อนที่ได้

หลังจากนั้นเมื่อมีการลดระดับน้ำลง พบว่า LNAPL จะเคลื่อนที่ลงในแนวดิ่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วง ซึ่งเป็นผลมาจากการที่ระดับน้ำลดลงทำให้น้ำในช่องว่างลดลง ช่องว่างของทรายเพิ่มขึ้น ทำให้ LNAPL สามารถเคลื่อนที่ได้ดีขึ้น และจะมี LNAPL บางส่วนที่เหลือค้างและเกิดการอิ่มตัวอยู่ในพื้นที่การปนเปื้อนที่ผ่านมา เรียกส่วนนี้ว่า residual saturation และในส่วนที่เกิดการเคลื่อนที่เรียกว่า น้ำมันอิสระ หรือ free phase นอกจากนี้ยังพบว่า plume น้ำมัน เมื่อเคลื่อนที่ผ่านชั้นทรายมา

จนถึงที่ระดับน้ำ 5 cm. ซึ่งที่ระดับน้ำนี้จะอยู่ในชั้นดินเหนียว พบว่า มี LNAPL บางส่วนสามารถเคลื่อนที่เข้าสู่ชั้นดินเหนียวที่อิ่มตัวด้วยน้ำ โดยสามารถเคลื่อนที่เข้าไปอยู่ต่ำกว่าช่วงต่อระหว่างชั้นทรายและชั้นดินเหนียวประมาณ 1 cm. ได้ ทำให้เห็นว่าการเคลื่อนตัวของ LNAPL เข้าสู่ชั้นดินเหนียวมีความเป็นไปได้และอาจใช้เวลาสั้นกว่าที่ระบุไว้ในงานวิจัยอื่นๆ

แต่เมื่อเปลี่ยนการทดลองโดยเพิ่มระดับน้ำ พบว่า LNAPL ในส่วนของ free phase จะเคลื่อนที่ขึ้นตามการเพิ่มของระดับน้ำ เนื่องจาก LNAPL มีความหนาแน่นน้อยกว่าน้ำ ดังนั้นจะต้องลอยอยู่เหนือผิวน้ำเสมอ โดย plume ของ LNAPL จะขยายตัวออกในแนวระนาบมากขึ้นและมีส่วนไหลออกไปตามน้ำใต้ดิน นอกจากนี้ยังพบว่า มี LNAPL ที่เหลือติดค้างอยู่ในชั้นทราย หลังจากการเพิ่มระดับน้ำ เป็นผลมาจากการที่แรงดันของน้ำใต้ดินไม่มากพอที่จะดัน LNAPL ผ่านช่องว่างของเม็ดทรายออกไปได้จึงเกิดเป็นสารเหลือค้าง

เมื่อเปรียบเทียบระยะเวลาในการเคลื่อนที่ พบว่า LNAPL ใช้ระยะเวลาในการเคลื่อนที่ลงตามการลดของระดับน้ำจาก 21 cm. ถึง 5 cm. จากด้านล่างตู้ 265 นาที ซึ่งน้อยกว่าระยะเวลาในการเคลื่อนที่ขึ้นจากระดับน้ำ 5 cm. ถึง 21 cm. ที่ใช้เวลา 330 นาที

### 3. การปนเปื้อนของน้ำมันเชื้อเพลิงในชั้นดินไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ

สารหลักที่ทำนำมาใช้ในการวิเคราะห์การปนเปื้อน คือ เบนซิน โทลูอิน เอทิลเบนซิน และไซลีน โดยน้ำมันที่ใช้ในการศึกษามีปริมาณ BTEX 18% และมีปริมาณ เบนซิน 11% โทลูอิน 26% เอทิลเบนซิน 11% และไซลีน 52% โดยน้ำหนักของน้ำมันที่ทำการทดลอง โดยจากการนำผลที่ได้จากการถ่ายภาพมาคำนวณหาพื้นที่และปริมาตรปนเปื้อนของ LNAPL ที่เวลาต่างๆ โดยใช้โปรแกรม Matlab v.7 และใช้โปรแกรม Adobe Photoshop CS ช่วยในการปรับปรุงภาพให้มีความชัดเจนขึ้น

การถ่ายเทมวลของสาร BTEX ระหว่างสถานะในชั้นดินไม่อิ่มตัวด้วยน้ำนี้จะประกอบไปด้วย 4 phase คือ LNAPL น้ำ อากาศและทราย ทั้งนี้การเคลื่อนที่ของสารปนเปื้อนระหว่างสถานะในชั้นใต้ดินนี้ จะเคลื่อนตัวเพื่อเข้าสู่สภาวะสมดุล (equilibrium condition) โดยจะเกิดการถ่ายเทมวลของ LNAPL ในแต่ละสถานะ คือ adsorption (การถ่ายเทมวลสู่ solids phase), dissolution (การถ่ายเทมวลสู่น้ำ) และ volatilization (การถ่ายเทมวลสู่ช่องว่างอากาศ) ดังนั้นในการวิเคราะห์เชิงปริมาณจึงมีสมมุติฐานว่าปริมาตรที่ลดลงในเวลา  $t_2-t_1$  เกิดจากการถ่ายเทมวลระหว่างสถานะ ดังนี้

จากการทดลอง พบว่า การถ่ายเทมวลแบบการละลายจะมีมากที่สุด เนื่องจากการละลายจะเกิดขึ้นเฉพาะในช่วงที่ LNAPL มีพื้นที่สัมผัสกับน้ำ ในที่นี้คือ capillary fringe ที่อยู่ในชั้นดินไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ โดยในส่วนของพื้นที่และปริมาตรการละลายจะเกิดจากการที่ plume น้ำมันในส่วน free phase ลดลงที่เวลา  $t_2-t_1$  นอกจากนั้นยังมีน้ำใต้ดินไหลผ่านพื้นที่ปนเปื้อนอย่างต่อเนื่องในปริมาณที่เท่ากันและมีค่าความเร็วและระดับน้ำคงที่ จัดเป็นการทดลองแบบ steady state ซึ่งน้ำที่ไหลเข้าระบบจะมีความเข้มข้นเป็นศูนย์ ดังนั้นเมื่อน้ำไหลเข้าระบบจะทำให้น้ำมันที่ความเข้มข้นมากกว่าจะไหลเข้าหาน้ำใต้ดินซึ่งมีความเข้มข้นน้อยกว่า ดังนั้นเมื่อมีความแตกต่างของความเข้มข้นระหว่างสาร BTEX กับน้ำใต้ดินมาก ก็จะทำให้เกิดการถ่ายเทมวลแบบการละลายมากตามไปด้วย

รองลงมาเป็นการถ่ายเทมวลแบบการระเหย โดยการระเหยจะเกิดในบริเวณช่องว่างของอากาศระหว่างเม็ดทรายและด้วยความเข้มข้น solubility limit ตามกฎของเฮนรี ซึ่งจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ เมื่อสาร BTEX สัมผัสกับอากาศและน้ำ โมเลกุลของสาร BTEX จะระเหยออกจากน้ำในรูปของไอ โดยเมื่ออยู่ในสภาวะสมดุล อัตราของโมเลกุลที่ออกจากน้ำจะเท่ากับอัตราของโมเลกุลที่ละลายในน้ำ ทั้งนี้การเคลื่อนที่ของสารปนเปื้อนระหว่างสถานะในชั้นใต้ดินนี้ จะเคลื่อนตัวเพื่อเข้าสู่สภาวะสมดุล (equilibrium condition) ซึ่งการเคลื่อนตัวของสาร BTEX จากสภาวะก๊าซผ่านอนุภาคดินนั้นจะมีกระบวนการที่เกี่ยวข้อง กระบวนการ diffusion เป็นการเคลื่อนที่ของโมเลกุลของสาร BTEX ผ่านอนุภาคของทรายหรือดินที่มีความพรุนต่ำโดยอาศัยความแตกต่างระหว่างความเข้มข้นของสาร BTEX

สุดท้ายการถ่ายเทมวลแบบดูดซับจะมีค่าน้อยที่สุด เนื่องจากการทรายที่ใช้ในการดูดซับมีค่าสารอินทรีย์คาร์บอนเท่ากับ 0.01% โดยน้ำหนัก ซึ่งจะเห็นได้ว่ามีค่าต่ำมาก นอกจากนี้ ยังมีค่าสัมประสิทธิ์การกระจายในดินไม่สูงนัก จึงทำให้เกิดการถ่ายเทมวลแบบการดูดซับน้อยที่สุด

#### 4. ปริมาณการปนเปื้อนของสาร BTEX ในแต่ละสถานะ

การทดลองนี้ทำการจำลองการรั่วไหลจากถังกักเก็บน้ำมันใต้ดินในชั้นดินไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ ซึ่งในชั้นดินจะประกอบไปด้วย 3 ส่วน คือ อนุภาคของดิน (สถานะของแข็ง) น้ำซึ่งอยู่ในช่องว่างระหว่างดินในบริเวณ capillary fringe (สถานะของเหลว) และก๊าซซึ่งอยู่ในช่องว่างระหว่างดิน (สถานะก๊าซ) ดังนั้นเมื่อเกิดการรั่วของ LNAPL จะมีสาร BTEX ซึ่งเป็นสารประกอบของน้ำมันเบนซินไหลออกมาด้วย

ผลจากการคำนวณหาค่าการปนเปื้อนของสาร BTEX พบว่า ของทั้งระบบมีสารไฮโดรคาร์บอนมากที่สุด คือ 52 % รองลงมาคือโทลูอีน 26% เบนซินและเอทิลเบนซิน เท่ากัน คือ 11% ส่วนการปนเปื้อนในอากาศ พบว่า มีสารไฮโดรคาร์บอนมากที่สุดถึง 40% รองลงมาได้แก่ สารโทลูอีน 21% เอทิลเบนซิน 20% และเบนซิน 19% ตามลำดับ การปนเปื้อนของสาร BTEX ในน้ำใต้ดิน พบว่า มีสารไฮโดรคาร์บอนมากที่สุดถึง 52% รองลงมาได้แก่ สารโทลูอีน 26% เอทิลเบนซิน 11% และเบนซิน 11% ตามลำดับ และสุดท้ายการปนเปื้อนของสาร BTEX ในดิน พบว่า มีสารไฮโดรคาร์บอนมากที่สุดถึง 59% รองลงมาได้แก่ สารโทลูอีน 37% เบนซิน 4% และเอทิลเบนซิน 0% ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นได้ว่าในแต่ละสถานะมีสารไฮโดรคาร์บอนปนเปื้อนมากที่สุด เป็นผลมาจากการทดลองนี้ใช้น้ำมันเบนซิน 91 ซึ่งมีสาร BTEX เป็นองค์ประกอบประมาณ 18% โดยน้ำหนัก และในสาร BTEX นี้ประกอบไปด้วยสารเบนซิน 11% โทลูอีน 26% เอทิลเบนซิน 11% และไฮโดรคาร์บอน 52% โดยน้ำหนัก ซึ่งเมื่อพิจารณาสัดส่วนของสาร BTEX แต่ละตัว พบว่ามีปริมาณของสารไฮโดรคาร์บอนมากที่สุด ดังนั้นจึงส่งผลให้มีมวลของสารไฮโดรคาร์บอนปนเปื้อนมากตามไปด้วย ทั้งที่มีค่าคงที่ของเฮนรี ค่าการละลายน้ำและค่า  $K_{oc}$  น้อยกว่าบางสาร โดยจากการทดลองในงานนี้พบว่าปริมาณการปนเปื้อนของสาร 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

### ข้อเสนอแนะ

1. ผู้ที่ใช้ทดลองต้องมีความใส เพื่อที่สามารถมองเห็นการเปลี่ยนแปลงภายในตัวได้ตลอดเวลา นอกจากนี้ควรมีการสร้างโครงเหล็กล้อมรอบตัวทดลอง เพื่อป้องกันการขยายตัวของตัวเมื่อทำการบรรจุทรายและดินเหนียว
2. ในการทดลองแต่ละครั้ง ควรตั้งกล้องที่จะใช้บันทึกภาพในการทดลองและจัดวางตัวทดลองที่ตำแหน่งเดิมทุกครั้ง เพื่อจะได้เปรียบเทียบผลการเคลื่อนที่ของน้ำมันในแต่ละเวลาได้ดี
3. ในการบันทึกภาพ ควรทำในห้องมืดเพื่อไม่เกิดการรบกวนของแสง และจะได้ควบคุมตำแหน่งของแสงให้เหมาะสมตามการใช้งานได้
4. ในการใช้โปรแกรม Matlab v.7 หาค่าช่วงสีที่ต้องการควรเลือกจุดที่ต้องการหาค่าเฉลี่ยสีหลายๆ ช่วงสี โดยเลือกจุดให้ถี่ๆ เพื่อจะได้ผลที่ใกล้เคียงที่สุด