



## รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

การปนเปื้อนของน้ำมันในชั้นทรายเนื้อเดียวที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำภายใต้  
สภาวะระดับน้ำใต้ดินขึ้นลง

Contamination of LNAPL in unsaturated homogeneous  
sand under groundwater table fluctuation

สยาม ยิ้มศิริ

โครงการวิจัยประเภทงบประมาณเงินรายได้จากเงินอุดหนุนรัฐบาล  
(งบประมาณแผ่นดิน) ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2558

มหาวิทยาลัยบูรพา

รหัสโครงการ 2558A10802033

สัญญาเลขที่ 102/2558

## รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

การปนเปื้อนของน้ำมันในชั้นทรายเนื้อเดียวที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำภายใต้  
สภาวะระดับน้ำใต้ดินขึ้นลง

Contamination of LNAPL in unsaturated homogeneous  
sand under groundwater table fluctuation

สยาม ยิ้มศิริ

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มิถุนายน 2558

## กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจากงบประมาณเงินรายได้จากเงินอุดหนุนรัฐบาล (งบประมาณแผ่นดิน) ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2558 มหาวิทยาลัยบูรพา ผ่านสำนักงานคณะกรรมการการวิจัยแห่งชาติ เลขที่สัญญา 102/2558 ขอขอบพระคุณ ดร. สิทธิภัทร์ เอื้ออภิวัชร์ ที่เป็นส่วนสำคัญในการร่วมงานวิจัยนี้

## บทคัดย่อ

วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัยนี้คือการศึกษาพฤติกรรมการปนเปื้อนของน้ำมันดีเซลผ่านทรายเนื้อเดียวที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ โครงการวิจัยนี้มีแผนการทดสอบในห้องปฏิบัติการโดยการศึกษาการไหลซึมแบบหนึ่งมิติและสองมิติ โดยพิจารณาถึงผลกระทบของปัจจัยต่อไปนี้ คือ ขนาดคละของทราย, อัตราการไหลของน้ำใต้ดินในแนวนอน, และการขึ้นลงของระดับน้ำใต้ดิน การวิเคราะห์การไหลซึมจะทำการวิเคราะห์ด้วยภาพถ่าย (image analysis) ประโยชน์สำคัญที่จะได้จากผลการวิจัยนี้คือความเข้าใจผลกระทบของการขึ้นลงของน้ำใต้ดินต่อพฤติกรรมการปนเปื้อนของน้ำมันดีเซลผ่านชั้นทรายไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ เพื่อจะได้สามารถคำนวณการเคลื่อนตัวของมันได้อย่างถูกต้องในสถานการณ์ในสนาม และเพื่อช่วยในการออกแบบระบบ remediation

## ABSTRACT

The objective of this research is to study the behavior of diesel contamination in unsaturated homogeneous sand under groundwater table fluctuation. The study is performed in laboratory in one- and two-dimensional experiments. The influential factors considered are particle size of sand, lateral groundwater flow, and groundwater fluctuation. The distribution of various phases in sand is analyzed by image analysis. The outcome of this research will improve an understanding of effects of groundwater table fluctuation on diesel distribution in unsaturated homogeneous sand. This will, in turn, help prediction of diesel contamination at a real site and assist a design of remediation strategy.



## สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	i
บทคัดย่อ	ii
สารบัญ	iii
<b>บทที่ 1 บทนำ</b>	
1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหาที่ทำการวิจัย	1-1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย	1-2
1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย	1-2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	1-3
<b>บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง</b>	
2.1 Light Non-Aqueous Phase Liquid (LNAPL)	2-1
2.2 การปนเปื้อนของ LNAPL ในดิน	2-3
2.3 การแบ่งชั้นดินตามลักษณะของน้ำใต้ดิน	2-4
2.3.1 ชั้นไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ (unsaturation zone)	2-5
2.3.2 ชั้นอิ่มตัวด้วยน้ำ (saturation zone)	2-6
2.4 เส้นโค้งลักษณะเฉพาะดินกับน้ำ (Soil water characteristic curve)	2-7
2.5 Soil-water characteristic curve (SWCC) modeling parameters	2-8
2.5.1 สมการของ Book and Corey (BC), 1964	2-9
2.5.2 สมการ Van Genuchten (VG), 1980	2-9
2.5.3 สมการของ Kosugi (LN), 1996	2-9
2.6 วิธีการวิเคราะห์ภาพถ่าย (Image Analysis Method)	2-10
2.6.1 การวิเคราะห์ภาพถ่ายเชิงซ้อน (MIAM)	2-10
2.6.2 การวิเคราะห์ภาพถ่ายอย่างง่าย (SIAM)	2-12
2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	2-14
<b>บทที่ 3 เส้นโค้งลักษณะเฉพาะของดินกับของเหลว</b>	
3.1 วัสดุที่ใช้ในการทดลอง	3-1
3.1.1 ทราย	3-1
3.1.2 ของเหลว	3-2
3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง	3-3

3.3	วิธีการทดลอง	3-4
3.4	แผนการทดลอง	3-4
3.5	ผลการทดลอง	3-5
3.5.1	ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำกับอากาศ	3-5
3.5.2	ความสัมพันธ์ระหว่าง แก๊สโซฮอล์ E20 กับ อากาศ	3-9
3.5.3	ผลการทดลองความสัมพันธ์ระหว่าง แก๊สโซฮอล์ E85 กับ อากาศ	3-12
3.5.4	ความสัมพันธ์ระหว่าง น้ำมันเบนซิน 95 กับ อากาศ	3-16
3.6	วิเคราะห์ผลการทดลอง	3-19
3.6.1	เปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่าง น้ำ กับ อากาศ ที่ความหนาแน่นของทรายแตกต่างกัน	3-19
3.6.2	เปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่าง แก๊สโซฮอล์ E20 กับ อากาศ ที่ความหนาแน่นของทรายแตกต่างกัน	3-21
3.6.3	เปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่าง แก๊สโซฮอล์ E85 กับ อากาศ ที่ความหนาแน่นของทรายแตกต่างกัน	3-22
3.6.4	เปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างน้ำมันเบนซิน 95 กับ อากาศ ที่ความหนาแน่นของทรายแตกต่างกัน	3-24
3.6.5	เปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างของเหลวทั้ง 4 ชนิด กับ อากาศ ที่ความหนาแน่นของทรายเท่ากับ $1.50 \text{ g/cm}^3$	3-26
3.6.6	เปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างของเหลวทั้ง 4 ชนิด กับ อากาศ ที่ความหนาแน่นของทรายเท่ากับ $1.56 \text{ g/cm}^3$	3-27

#### **บทที่ 4 ผลกระทบของการขึ้นลงของระดับน้ำใต้ดินต่อการปนเปื้อนของน้ำมัน**

4.1	วัสดุที่ใช้ในการทดลอง	4-1
4.2	อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง	4-2
4.2.1	การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นเชิงแสงเฉลี่ยและระดับความอิ่มตัวของของเหลวในทราย	4-2
4.2.2	การศึกษาการไหลซึมของน้ำมันดีเซลผ่านทรายที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำภายใต้สภาวะน้ำขึ้น-น้ำลง	4-3
4.3	วิธีการทดลอง	4-5
4.3.1	การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นเชิงแสงเฉลี่ยและระดับความอิ่มตัวของของเหลวในทราย	4-5
4.3.2	การศึกษาการไหลซึมของน้ำมันดีเซลผ่านทรายที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำภายใต้สภาวะน้ำขึ้น-น้ำลง	4-5
4.4	แผนการทดลอง	4-6
4.5	ผลการทดลอง	4-9

---

4.5.1	ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นเชิงแสงเฉลี่ยและระดับความอิ่มตัวของของเหลวในทราย	4-9
4.5.2	ผลกระทบของการไหลของน้ำใต้ดินและสภาวะน้ำขึ้นน้ำลงต่อการไหลซึมของน้ำมันดีเซลผ่านทรายที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ	4-12
4.6	วิเคราะห์ผลการทดลอง	4-24

## บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง

เอกสารอ้างอิง	R-1
ผลผลิต	
ประวัตินักวิจัย	

## บทที่ 1 บทนำ

### 1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหาที่ทำการวิจัย

แหล่งพลังงานที่สำคัญในปัจจุบันของประเทศไทยโดยส่วนใหญ่แล้วจะมาจากน้ำมันเป็นหลักซึ่งนอกจากใช้เป็นเชื้อเพลิงก่อให้เกิดพลังงานแล้วยังเป็นวัตถุดิบและสารตั้งต้นที่สำคัญ ทั้งในภาคภาคอุตสาหกรรมและทางด้านคมนาคมขนส่งมีการใช้ที่เพิ่มมากขึ้นเป็นอย่างมากและอาจเกิดโอกาสในการปนเปื้อนของน้ำมันเชื้อเพลิงลงสู่สิ่งแวดล้อมเพิ่มสูงขึ้นตามไปด้วย โดยหนึ่งในปัญหาที่เกิดขึ้นนี้คือปัญหาการรั่วไหลของน้ำมันเชื้อเพลิงจากถังเก็บน้ำมันใต้ดิน (Underground Storage Tank) ถังน้ำมันใต้ดินหากขาดการบำรุงรักษาและขาดระบบป้องกันการรั่วไหลของน้ำมันออกจากถังเก็บน้ำมันใต้ดินอันเป็นสาเหตุหลักของการปนเปื้อนของน้ำมันลงสู่ชั้นดินและแหล่งน้ำ น้ำมันเชื้อเพลิงเหล่านี้จัดว่าเป็นของเหลวที่ไม่ผสมกับน้ำและไม่ละลายน้ำ (Non-Aqueous Phase Liquids, NAPLs)

สถานีจัดเก็บและให้บริการน้ำมันในประเทศไทยนั้นส่วนใหญ่จะสร้างแท็งก์กักเก็บน้ำมันอยู่ใต้ดินและเกือบจะทั้งหมดของโครงสร้างแท็งก์น้ำมันที่ใช้กันอยู่นั้นไม่มีระบบป้องกันการรั่วซึมของน้ำมันที่อาจจะไปปนเปื้อนกับดินหรือชั้นน้ำใต้ดิน โดยปัจจุบันประเทศไทยมีสถานีให้บริการน้ำมันน้ำมันขึ้นทะเบียนทั้งหมด 14,000 แห่ง หากประเมินว่า 10 เปอร์เซ็นต์ของถังกักเก็บทั่วประเทศมีการรั่วไหลเนื่องจากไม่มีการออกแบบเพื่อป้องกันการรั่วไหลที่ดีจะมีการปนเปื้อนของดินกว่า 1,500,000 ลูกบาศก์เมตร (จุฑารัตน์, 2548)

ดินที่ปนเปื้อนน้ำมันเชื้อเพลิงเป็นอันตรายต่อระบบนิเวศวิทยาและจะต้องนำไปเข้ากระบวนการบำบัดทางทั้งเคมี, ทางกายภาพ, และทางชีวภาพก่อนจึงจะนำไปใช้ในการเพาะปลูกหรือเลี้ยงสัตว์ได้ สำหรับเรื่องความอันตรายของน้ำมันเชื้อเพลิงต่อสุขภาพนั้นเนื่องจากน้ำมันเชื้อเพลิงมีอัตราการระเหยน้ำต่ำก่อให้เกิดปัญหาการปนเปื้อนของน้ำใต้ดินเป็นเวลานานส่งผลให้เกิดปัญหาด้านสุขภาพในระยะยาวนอกจากนี้ยังก่อให้เกิดมลพิษอย่างเฉียบพลันจากไอระเหยของสารไฮโดรคาร์บอนขึ้นมาจากผิวดิน ดังนั้นการปนเปื้อนของดินและน้ำใต้ดินก่อให้เกิดความเสี่ยงสูงต่อสุขภาพของประชากรในด้านระบบทางเดินหายใจระบบประสาท, ความเสี่ยงในการเปลี่ยนแปลงทางพันธุกรรม, และการเกิดมะเร็ง ดังนั้นจึงควรมีการศึกษาพฤติกรรมของการไหลซึมผ่านของน้ำมันเชื้อเพลิงในดินทรายเพื่อที่จะสามารถทำนายพฤติกรรมของการไหลซึมผ่านของน้ำมันเชื้อเพลิงหากเกิดการรั่วไหลและเพื่อหาแนวทางป้องกันที่เหมาะสม

ส่วนใหญ่แล้วนักวิจัยจะทำการศึกษาพฤติกรรมของการปนเปื้อนของ LNAPLs ในชั้นดินโดยคอลัมน์ 1 มิติ และแท่ง 2 มิติ และวิธีที่ใช้ในการประมาณค่าระดับการอิ่มตัวของน้ำและน้ำมันในดินที่เป็นที่นิยมได้แก่ การใช้รังสีแกมมา (Gamma Radiation Method, GRM) (Ferrand et al., 1998) การใช้รังสีเอกซ์ (X-Ray Attenuation Method, X-RAM) (Rimmer et al., 1998) และ การใช้การส่องผ่านของแสง (Light Transmission Method, LTM) (Darnault et al., 1998) เป็นต้น ซึ่งวิธีการต่างๆเหล่านี้ซึ่งใช้ประมาณในการศึกษาวิจัยค่อนข้างสูงและอาจเป็นอันตรายต่อผู้ที่ทำการวิจัยได้ การศึกษาวิจัยนี้ใช้วิธีการวิเคราะห์ภาพถ่ายเชิงซ้อน (Multispectral Image Analysis Method, MIAM) (Kechavarzi et al., 2000) เพื่อศึกษาหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าระดับการอิ่มตัวของของเหลวและค่าความหนาแน่นเชิงแสงเฉลี่ย (Average Optical

Density, AOD) เมื่อพิสูจน์ได้ว่าความสัมพันธ์ของค่าระดับการอิ่มตัวของของเหลวและค่าความหนาแน่นเชิงแสงเฉลี่ยเป็นแบบเส้นตรง (Linear relationship) จะใช้วิธีการวิเคราะห์ภาพถ่ายอย่างง่าย (Simplified Image Analysis Method) (Flores *et al.*, 2011) ซึ่งเป็นวิธีการทดสอบแบบไม่ทำลาย, ปลอดภัย, และสามารถใช้ในการประเมินค่าระดับการอิ่มตัวของของเหลวได้ภายใต้สภาพแวดล้อมที่ใช้ในการประมาณค่าระดับการอิ่มตัวของของเหลวในการศึกษาผลของการเปลี่ยนแปลงระดับการไหลของน้ำใต้ดินในแนวนอนที่มีการซึมผ่านของน้ำมันเชื้อเพลิงในตัวกลางที่เป็นเนื้อเดียวกัน

## 1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

- เพื่อศึกษาพฤติกรรมของน้ำมันเชื้อเพลิงที่ไหลซึมผ่านทรายที่สภาวะความดันต่างๆ
- เพื่อศึกษาผลกระทบจากความหนาแน่นของดินทรายและระดับความลึกของดินทรายที่มีต่อคุณสมบัติด้านการไหลซึมผ่านของน้ำมันเชื้อเพลิง
- เพื่อศึกษาการไหลซึมผ่านจากเส้นโค้งลักษณะเฉพาะดินกับน้ำ (Soil water characteristic curve)
- เพื่อศึกษาปริมาณการตกค้างของน้ำมันเชื้อเพลิงหลังการไหลซึมผ่านเสร็จสิ้น จากเส้นโค้งลักษณะเฉพาะดินกับน้ำ (Soil water characteristic curve)
- เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นเชิงแสงเฉลี่ยและระดับการอิ่มตัวของของเหลวในทราย โดยการวิเคราะห์ภาพถ่ายเชิงซ้อน (Multispectral Image Analysis Method, MIAM)
- เพื่อศึกษาการไหลซึมของน้ำมันเชื้อเพลิงผ่านทรายที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำภายใต้สภาวะน้ำขึ้น-น้ำลง โดยใช้เทคนิคการวิเคราะห์ภาพถ่ายอย่างง่าย (Simplified Image Analysis Method, SIAM)

## 1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย

งานวิจัยนี้แบ่งเป็น 3 ส่วน ดังนี้

- ส่วนที่ 1 จะศึกษาการไหลซึมผ่านของน้ำมันเชื้อเพลิงผ่านทรายจากสภาวะที่ทรายอิ่มตัว (Saturated) จนเป็นสภาวะที่ทรายไม่อิ่มตัว (Unsaturated) โดยเครื่องมือที่ใช้ในการทดลองคือกระบอกทรงสูงหนึ่งมิติ (One Dimensional Column) ตัวอย่างทรายที่ใช้ในการทดลองทำการเก็บตัวอย่างที่ระดับความลึก 40 เซนติเมตร และ 70 เซนติเมตร โดยทำการควบคุมความหนาแน่นของตัวอย่างทรายที่ใช้ในการทดลอง 2 ค่า คือ ที่ความหนาแน่นที่ 1.50 และ 1.56  $\text{g/cm}^3$  ของเหลวที่ใช้ในการทดลองประกอบด้วยน้ำกลั่น, น้ำมันเบนซินออกเทน 95, น้ำมันแก๊สโซฮอล์ E20, และน้ำมันแก๊สโซฮอล์ E85 หลังจากการทดลองจะนำข้อมูลที่ได้อามาวิเคราะห์เส้นโค้งลักษณะเฉพาะดินกับน้ำ (Soil water characteristic curve) เพื่อศึกษาลักษณะการไหลซึมผ่านและปริมาณการตกค้างของน้ำมันเบนซินและน้ำมันแก๊สโซฮอล์ เปรียบเทียบกับการไหลซึมผ่านและปริมาณการตกค้างของน้ำกลั่น
- ส่วนที่ 2 ศึกษาค่าความหนาแน่นเชิงแสงเฉลี่ย (Average Optical Density, AOD) และระดับการอิ่มตัวของของเหลวในทรายมาทำการทดลองโดยการผสมดินทรายออตตาวาเบอร์ 3820 (Ottawa #3820), ดินทราย

ออตตาวาเบอร์ 3821 (Ottawa #3821), และดินทรายชลบุรี (Chonburi Sand) กับของเหลว โดยของเหลวที่ใช้ในการทดลองคือน้ำและน้ำมันดีเซล ตัวอย่างที่ใช้ในการทดลองประกอบไปด้วยทรายผสมน้ำ, ทรายผสมน้ำมันดีเซล, และทรายผสมน้ำและน้ำมันดีเซลที่ระดับอิมิตัวต่างๆอย่างละ 10 ตัวอย่างเป็นจำนวนทั้งสิ้น 90 ตัวอย่าง บรรจุตัวอย่างในรูปทรงกระบอกมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 มิลลิเมตรและสูง 11.8 มิลลิเมตร แล้วทำการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นเชิงแสงเฉลี่ยและระดับการอิมิตัวด้วยของเหลวในทรายโดยการวิเคราะห์ภาพถ่ายเชิงซ้อน (Multispectral Image Analysis Method, MIAM) เพื่อนำความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นเชิงแสงเฉลี่ย (Average Optical Density, AOD) และระดับการอิมิตัวของของเหลวในทรายมาทำการศึกษาการไหลซึมของน้ำมันดีเซลผ่านทรายที่ไม่อิมิตัวด้วยน้ำภายใต้สภาวะน้ำขึ้น-น้ำลง โดยใช้เทคนิคการวิเคราะห์ภาพถ่าย

- ส่วนที่ 3 ทำการศึกษาผลของการเปลี่ยนแปลงของอัตราการไหลของน้ำใต้ดินในแนวนอนและการขึ้นลงของน้ำใต้ดินที่มีผลต่อการเคลื่อนตัวของน้ำมันดีเซลในตัวกลางพรุนเนื้อเดียวกันในสภาพไม่อิมิตัวด้วยน้ำโดยใช้เทคนิควิเคราะห์ภาพถ่ายอย่างง่าย (Simplified Image Analysis Method, SIAM) มาใช้ในการหาระดับความอิมิตัวของของเหลวและพฤติกรรมการเคลื่อนตัวของน้ำมันดีเซล การทดลองทำการจำลองสภาพการไหลของน้ำใต้ดินที่แตกต่างกัน 6 สภาวะ โดยทำการบรรจุดินทรายออตตาวาเบอร์ 3820 และดินทรายออตตาวาเบอร์ 3821 โดยใช้ทรายน้ำหนัก 15 กิโลกรัมบรรจุลงในแท็งก์อะครีลิก มีขนาด 50x60x3.5 ซม. (มิติภายใน) เพื่อควบคุมความหนาแน่นอยู่ที่ 1.76 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ส่วนของเหลวที่ใช้ในการทดสอบคือ น้ำ และน้ำมันดีเซล

#### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- ทราบถึงคุณสมบัติไหลซึมผ่านของน้ำมันเบนซินและน้ำมันแก๊สโซฮอล์ ที่สภาวะความดันต่างๆ กัน
- เข้าใจผลกระทบจากความหนาแน่นของดินทรายและระดับความลึกของดินทราย ที่มีต่อคุณสมบัติด้านการไหลซึมผ่านของน้ำมันเบนซินและน้ำมันแก๊สโซฮอล์
- ทราบถึงพฤติกรรมการไหลของน้ำมันเบนซินและน้ำมันแก๊สโซฮอล์ จากเส้นโค้งลักษณะเฉพาะดินกับน้ำ (Soil water characteristic curve)
- ทราบถึงปริมาณการตกค้างของน้ำมันเบนซินและน้ำมันแก๊สโซฮอล์หลังจากการไหลซึมผ่านจากเส้นโค้งลักษณะเฉพาะดินกับน้ำ (Soil water characteristic curve)
- ทราบความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นเชิงแสงเฉลี่ย (Average Optical Density, AOD) และระดับการอิมิตัวด้วยของเหลวในทรายทดลอง
- ทราบผลของการเปลี่ยนแปลงของอัตราการไหลของน้ำใต้ดินในแนวนอนและการขึ้นลงของน้ำใต้ดินที่มีผลต่อการเคลื่อนตัวของน้ำมันดีเซลในตัวกลางพรุนเนื้อเดียวกันในสภาพไม่อิมิตัวด้วยน้ำ

## บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 2.1 Light Non-Aqueous Phase Liquid (LNAPL)

Non-aqueous Phase Liquids (NAPLs) เป็นองค์ประกอบหนึ่งในปิโตรเลียมซึ่งเป็นสารประกอบอินทรีย์ที่ได้มาจากธรรมชาติ โดยเกิดจากปฏิกิริยาเคมีและชีวเคมีของสารอินทรีย์ในชั้นใต้ดินลึกเป็นเวลานานนับพันปี ซึ่งสารประกอบของปิโตรเลียม เช่น ไฮโดรคาร์บอน และสารประกอบอินทรีย์อื่นๆของไนโตรเจน ซัลเฟอร์ และออกซิเจน ปิโตรเลียมสามารถมีได้ 3 รูปแบบ ได้แก่ (i) ก๊าซธรรมชาติ, (ii) น้ำมันดิบ, และ (ii) ของแข็งยางมะตอย (เกรียงศักดิ์, 2546) โดยปิโตรเลียมนำไปเป็นเชื้อเพลิงเป็นส่วนมาก ถ้าให้เกิดการรั่วไหลออกสู่สิ่งแวดล้อมตามี่ต่างๆ ปิโตรเลียมถูกกลั่นมาจากพวกน้ำมันดิบ โดยน้ำมันดิบสารประกอบประกอบด้วยสารประกอบไฮโดรคาร์บอน กับ ไฮโดรเจนเป็นส่วนใหญ่ ไฮโดรคาร์บอนที่อยู่ในน้ำมันดิบมี 3 ประเภท (ปราโมทย์, 2533)

ของเหลวที่ไม่ละลายน้ำ (Non-aqueous Phase Liquids; NAPL's) ถูกพบอย่างมากในการปนเปื้อนชั้นใต้ดินและน้ำใต้ดิน โดยถูกปลดปล่อยออกจากสถานกำจัดมูลฝอยอันตรายและสถานกำจัดมูลฝอยชุมชนที่ถูกใช้งานมานานหรือมีระบบการจัดการที่มีซึ่งส่วนมากปัญหาการปนเปื้อน NAPLs นี้เกี่ยวข้องกับการรั่วซึมของท่อหรือบรรจุภัณฑ์ของปิโตรเลียม ท่อที่เกิดจากการกัดกร่อน บ่อบาดาลที่ร้าง และอุบัติเหตุต่างๆ (Testa, 1994; Cohen and Mercer, 1993) ซึ่ง NAPLs เหล่านี้ก่อให้เกิดการปนเปื้อนของน้ำใต้ดินซึ่งเป็นปัญหาสำคัญเนื่องจาก NAPLs เกิดการตกค้างภายในชั้นดินและถ้าปริมาณ NAPLs มีมากพอก็จะสามารถก่อให้เกิดการเคลื่อนที่ไปสู่ระดับน้ำใต้ดิน (water table) ซึ่งทำให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมในระยะยาว โดยปัจจัยสำคัญที่ก่อให้เกิดพฤติกรรมการปนเปื้อนที่ต่างกัน คือ ความหนาแน่น ดังรูปที่ 2-1 ซึ่ง NAPLs สามารถถูกแบ่งประเภทได้ตามความหนาแน่นเมื่อเทียบกับน้ำโดยความหนาแน่นของน้ำเท่ากับ  $1 \text{ g/cm}^3$  (Testa, 1994) เนื่องจากน้ำมันเชื้อเพลิงเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนซึ่งแยกตัวจากน้ำ โดยเรียกตามลักษณะของสารประกอบนี้ว่า non-aqueous phase liquid (NAPL) โดยมีการแบ่งชนิดของ NAPLตามความหนาแน่นเป็น 2 ชนิดดังนี้

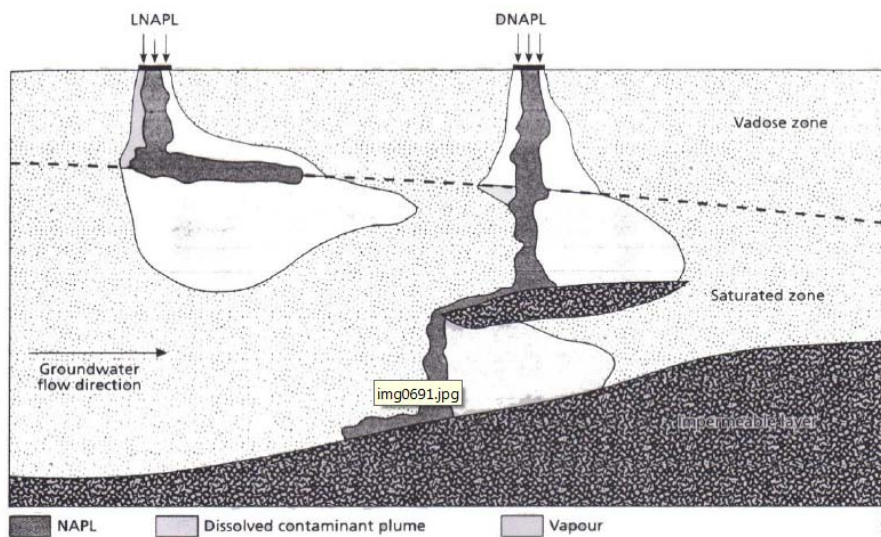
- Light non-aqueous phase liquid (LNAPL) เป็นของเหลวชนิดที่มีน้ำหนักเบา คือมีความหนาแน่นน้อยกว่าน้ำโดยทั่วไปจะลอยอยู่บนผิวน้ำ เช่น น้ำมันเชื้อเพลิงและผลิตภัณฑ์ปิโตรเลียม
- Dense non-aqueous phase liquid (DNAPL) เป็นของเหลวชนิดที่มีความหนาแน่นมากกว่าน้ำโดยทั่วไปจะจมอยู่ใต้น้ำ เช่น chlorinated solvent

LNAPLs ที่มีความหนาแน่นน้อยกว่าน้ำ ( $<1 \text{ g/cm}^3$ ) เมื่อเกิดการปนเปื้อนลงสู่ชั้นน้ำใต้ดินจะเกิดสภาพการลอยอยู่เหนือระดับน้ำใต้ดิน เรียกสารปนเปื้อนชนิดดังกล่าวว่า LNAPLs (Light Nonaqueous Phase Liquid) ชนิดของ LNAPLs ส่วนมากคือ ปิโตรเลียม ไฮโดรคาร์บอน และผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากกระบวนการกลั่น เช่น gasoline, diesel และเชื้อเพลิงที่ใช้ในการขนส่งทางอากาศ ส่วนของ NAPLs ที่มีความหนาแน่นมากกว่าน้ำ ( $>1 \text{ g/cm}^3$ ) เรียกว่า DNAPLs (Dense Non-aqueous Phase Liquid) ซึ่งเป็นสารประกอบประเภท chlorinated solvent (PCBs) และ tar ซึ่ง NAPLs แต่ละชนิดเกิดจากการผสมของสารที่มีความหนาแน่นไม่

เท่ากันได้อย่างหลากหลาย ซึ่งพฤติกรรมของ NAPLs นั้นๆขึ้นอยู่กับสัดส่วนของสารที่เติมลงไปเป็น NAPLs ชนิดต่างๆ (Hardisty and Özdemiroglu, 2005) ซึ่ง Frenstra and Cherry ได้กล่าวว่ปัจจัยที่ก่อให้เกิดการปนเปื้อนของ NAPLs ขึ้นอยู่กับ

- ปริมาณของ NAPLs ที่ไหลปนเปื้อนสู่สิ่งแวดล้อม
- ลักษณะพื้นที่ที่ถูก NAPLs ปนเปื้อน
- ระยะเวลาที่ NAPLs ถูกปลดปล่อย
- คุณสมบัติของ NAPLs
- สภาพของการไหลในชั้นใต้ดิน

โดยในงานวิจัยนี้ศึกษาเฉพาะของเหลวที่ไม่ละลายน้ำประเภทความหนาแน่นน้อยกว่าน้ำ (Light Nonaqueous Phase Liquid; LNAPLs )

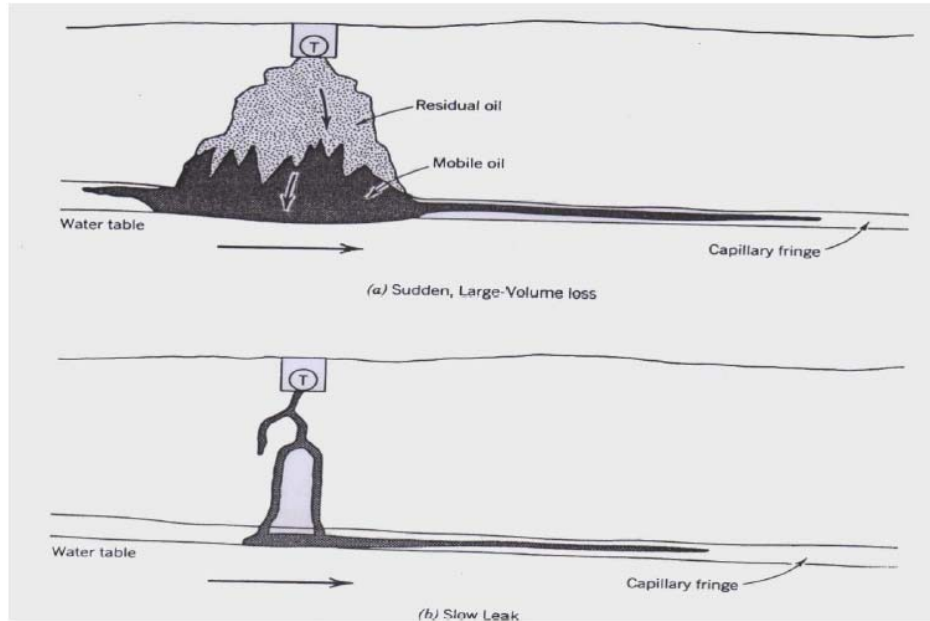


รูปที่ 2-1 ลักษณะการเคลื่อนที่ NAPLs ที่แบ่งแยกตามความหนาแน่น คือ LNAPLs และ DNAPLs (Mercel van der perk, 2006)

เมื่อการหกหรือรั่วซึมของ LNAPLs ลงสู่ชั้นใต้ดิน สารปนเปื้อนจะซึมผ่านชั้นไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ (Unsaturated Zone) ซึ่งเคลื่อนที่ในแนวตั้งด้วยอิทธิพลของแรงโน้มถ่วงของโลก (gravitational force) (Fetter, 1999) ความสามารถของสารปนเปื้อนที่เคลื่อนที่ได้อย่างรวดเร็วขึ้นอยู่กับความซับซ้อนและความไม่เป็นระเบียบของเม็ดดินหรือหินตะกอนต่างๆ (Lehr *et al.*, 2002) ซึ่งปกติในชั้นใต้ดินจะมีลักษณะไม่เป็นระเบียบเนื่องจากชั้นดินเกิดจากดินหลายชนิดอยู่ร่วมกัน Hardisty and Özdemiroglu (2005) อธิบายว่าตัวกลางที่ไม่เป็นระเบียบ (heterogonous media) จะเกิดการเคลื่อนที่ในแนวตั้งและเกิดการแพร่กระจายไปทางด้านข้างในชั้นไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ Domenico and Schwartz (1990) อธิบายว่ารูปแบบการแพร่กระจายของสารปนเปื้อนขึ้นอยู่กับบริเวณที่เกิดการปนเปื้อนเช่นเดียวกัน การปล่อยของสารปนเปื้อนในปริมาณมากๆและ



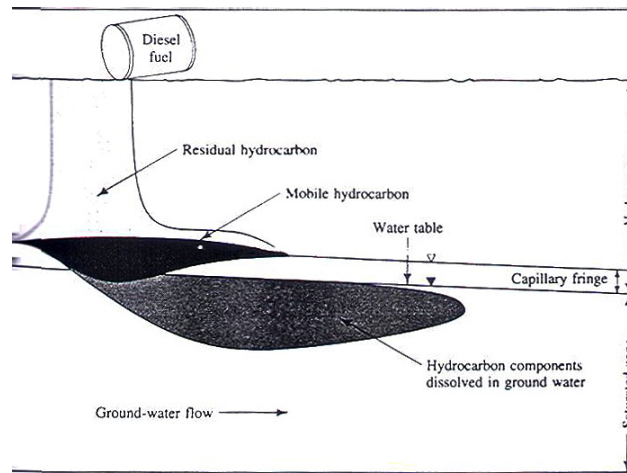
ในระยะเวลาอันสั้นสารปนเปื้อนจะสามารถเคลื่อนที่ลงอย่างรวดเร็วและมีการแพร่กระจายออกทางด้านข้างเป็นรูปกรวยดังรูปที่ 2-2 (บน) แต่เมื่อเปรียบเทียบกับ การปลดปล่อยสารปนเปื้อนอย่างช้าๆระยะเวลาในการเคลื่อนที่ของสารปนเปื้อนจะเคลื่อนที่ไปตามช่องที่สามารถซึมผ่านไปได้โดยสะดวกมากรูปที่ 2-2 (ล่าง) ซึ่งช่องดังกล่าวนี้อาจเป็นช่องเดี่ยวหรือแขนงก็ได้ เมื่อ LNAPLs เคลื่อนที่ไปสารปนเปื้อนนี้สามารถเกาะที่ผิวของอนุภาคเม็ดดินอย่างหลวมๆเรียกว่า sorbed contaminated (Pinder *et al.*, 2006)



รูปที่ 2-2 การเคลื่อนที่ของ LNAPLs (บน) การเคลื่อนที่ของ LNAPLs จากแหล่งที่มีปริมาณและเกิดการไหลอย่างรวดเร็ว (ล่าง) การเคลื่อนที่ออกจากแหล่งอย่างช้าๆและมีปริมาณของสารปนเปื้อนน้อย (Domenico and Schwartz, 1990)

## 2.2 การปนเปื้อนของ LNAPL ในดิน

การปนเปื้อนของ LNAPL ในดินอาจเกิดจากสาเหตุหลายประการ เช่น การรั่วไหลจากถังเก็บน้ำมันใต้ดิน ถังเก็บในคลังน้ำมันและท่อส่งน้ำมัน การรั่วไหลอาจเกิดขึ้นเนื่องจากการกดทับและการทรุดตัวของฐานราก เป็นต้น เป็นสาเหตุให้เกิดการแพร่มลพิษสู่ชั้นน้ำใต้ดิน นอกจากนี้การปนเปื้อนอาจเกิดจากการเทน้ำมันเครื่องที่ใช้แล้วทิ้ง การเกิดอุบัติเหตุบนถนนของรถบรรทุกทุกน้ำมัน การปนเปื้อนของน้ำมันนั้นขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย เช่น ปริมาณที่ปนเปื้อน คุณสมบัติของน้ำมัน โครงสร้างของชั้นดินหรือชั้นหินบริเวณที่เกิดการปนเปื้อน ก่อนที่น้ำมันจะเกิดการปนเปื้อนลงสู่ชั้นน้ำใต้ดินได้นั้นจะต้องผ่านชั้นต่างๆ คือ ชั้นดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ (Vadose zone), ชั้นคาพิลลารี (Capillary zone) และ ชั้นน้ำใต้ดิน (Saturated zone) ดังแสดงในรูปที่ 2-3



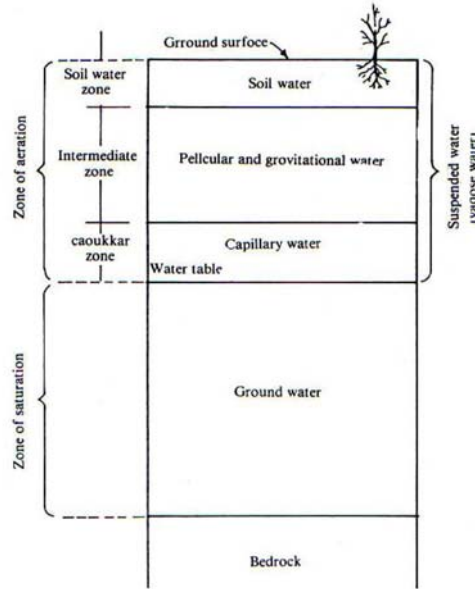
รูปที่ 2-3 การเคลื่อนตัวของ LNAPL ผ่านชั้นดิน (Fetter, 1999)

การเกิดการรั่วไหลจากถังเก็บน้ำมันใต้ดิน (Underground Storage Tank: UST) นั้น เริ่มแรกจะเกิดการซึมลงสู่ชั้นดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ (Vadose zone) โดยถ้าการรั่วไหลเกิดขึ้นปริมาณเพียงเล็กน้อยน้ำมันจะถูกดูดซับไว้ตามช่องว่างระหว่างอนุภาคของดิน และไม่สามารถไหลซึมผ่านลงไปสู่ชั้นน้ำใต้ดินหรือชั้นดินอิ่มตัวด้วยน้ำ (Saturated zone) เว้นแต่อนุภาคของดินมีคุณสมบัติในการดูดซับไว้ได้ไม่ดี หรือมีการนำพาลงไปพร้อมกับน้ำฝน และในกรณีที่มีการรั่วไหลออกมามากการปนเปื้อนสู่ชั้นน้ำใต้ดินก็มีโอกาสมากเช่นกัน Gangadharan et al. (1988) พบว่าถ้าค่าสัมประสิทธิ์การซึมน้ำของชั้นดินเป็นแบบเนื้อเดียวกันทุกทิศทาง (Homogeneous and Isotropic) แล้ว การเคลื่อนตัวของน้ำมันผ่านชั้นดินนี้จะมีรูปทรงเป็นรูปกรวยคว่ำ แต่ถ้าสัมประสิทธิ์ของการซึมน้ำของชั้นดินไม่เป็นเนื้อเดียวกัน รูปร่างการเคลื่อนตัวนั้นจะมีรูปร่างเป็นแบบไม่แน่นอน

การเคลื่อนของน้ำมันที่ชั้นคาพิลลารี (Capillary zone) เริ่มแรกจะเคลื่อนที่ตามแนวขวาง แต่เมื่อน้ำมันเคลื่อนตัวถึงแถบคาพิลลารี (Capillary fringe) ชั้นของน้ำมันจะหนาขึ้นอันเนื่องมาจากคุณสมบัติของน้ำมันที่ไม่สามารถละลายน้ำ และเมื่อมีการรวมตัวกันมากจนถึงจุดอิ่มตัวแล้ว น้ำมันจะเริ่มแพร่กระจายไปตามทิศทางของการไหลของน้ำใต้ดิน หรือ ตามความลาดชันของพื้นที่ และน้ำมันบางส่วนจะถูกดูดซับไว้ตามช่องว่างของอนุภาคดิน (Fetter, 1999)

### 2.3 การแบ่งชั้นดินตามลักษณะของน้ำใต้ดิน

ลักษณะทางกายภาพของชั้นดินที่เกิดน้ำใต้ดินนั้นสามารถแบ่งออกได้ 2 ชั้น คือ ชั้นไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ (unsaturation zone) และชั้นอิ่มตัวด้วยน้ำ (saturation zone) (รูปที่ 2-4) โดยชั้นทั้งสองถูกแบ่งด้วยเส้นระดับน้ำใต้ดิน (water table) ซึ่งเป็นระดับที่ความดันของน้ำใต้ดิน (hydrostatic pressure) เท่ากับความดันบรรยากาศ (atmospheric pressure) (วีระพล, 2528)



รูปที่ 2-4 การแบ่งชั้นดินตามลักษณะของน้ำใต้ดิน (Domenico, 1990)

### 2.3.1 ชั้นไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ (unsaturation zone)

เนื่องจากชั้นดินนี้ช่องว่างระหว่างอนุภาคของดินประกอบด้วยอากาศและน้ำ จึงนิยมเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า aeration zone (วีระพล, 2528) หรือ vadosic zone โดยน้ำในเขตนี้เป็นน้ำที่เกาะในช่องว่างของเม็ดดิน หรือน้ำที่กำลังอยู่ในระหว่างทางที่จะเคลื่อนลงไปสู่ชั้นอิ่มตัวด้วยน้ำ (saturation zone) น้ำในชั้นนี้จะถูกกระทำด้วยแรงดึงดูดของโมเลกุลด้วยการต่อต้านกับแรงโน้มถ่วง ซึ่งแรงดึงดูดนี้มีผลในระยะทางที่น้อยมากสามารถดึงน้ำได้ในช่องว่างเล็กๆระหว่างหินและแผ่นตัวออกเป็นฟิล์มบางๆเคลือบบนผิวของหินหรือเม็ดดินนั้นๆ (สำนักอุทกวิทยาและบริหารน้ำ, 2542) ด้วยแรงดึงดูดระหว่างอนุภาค(adhesive force) น้ำที่อยู่ในชั้นดินนี้เรียกว่า vadosic water หรือ soil moisture ชั้นไม่อิ่มด้วยน้ำนี้สามารถแบ่งย่อยได้อีก 3 ชั้นย่อยโดยเริ่มจากผิวดินด้านบนลงมาถึงระดับน้ำใต้ดิน (ชูโชค, 2535) ได้แก่

- ชั้นดิน-น้ำ (soil-water zone) เป็นชั้นที่อยู่ติดกับพื้นผิวดิน การกระจายของความชื้นนี้จะขึ้นกับสภาพผิวดินซึ่งแปรเปลี่ยนตามฤดูกาลและขึ้นกับระดับน้ำใต้ดิน การเคลื่อนที่ของน้ำในชั้นนี้เป็นไปได้ทั้งสองทิศทางโดยเคลื่อนที่ลงเมื่อน้ำซึมผ่านลงมาตามแรงโน้มถ่วงและเคลื่อนที่ขึ้นในกรณีที่เกิดการระเหยและการดูดน้ำจากพืช ภายในชั้นนี้อาจมีน้ำได้เป็นครั้งคราวเนื่องจากฝนตกหนักหรือได้รับน้ำจากการชลประทานมาก เมื่อการเคลื่อนที่ลงของน้ำโดยแรงโน้มถ่วงหยุดแล้ว ปริมาณน้ำในดินของชั้นนี้ เรียกว่า field capacity และถ้าปริมาณน้ำในดินในชั้นนี้ลดลงไปจนถึงค่าหนึ่งซึ่งพืชไม่สามารถดูดเอาไปใช้ได้แล้ว น้ำที่คงค้างอยู่เรียกว่า hygroscopic water
- ชั้นกลาง (intermediate zone) เป็นชั้นที่มีความหนาแน่นไม่แน่นอนขึ้นอยู่กับระดับน้ำใต้ดิน ถ้าระดับน้ำใต้ดินสูงมากอาจไม่มีชั้นนี้ก็เป็นได้ น้ำในชั้นนี้ประกอบด้วยน้ำโดยแรงโน้มถ่วง (gravitational water) จะเคลื่อนที่ด้วยแรงโน้มถ่วงของโลก ส่วน pellicular water จะยึดติดอยู่แรง capillary

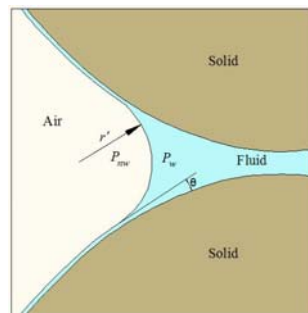
- ชั้นคาปิลลารี (capillary fringe หรือ capillary zone) เป็นส่วนที่อยู่เหนือเส้นระดับน้ำใต้ดิน (water table) เล็กน้อย โดยเริ่มจากระดับน้ำใต้ดินขึ้นไปจนถึงระดับสูงสุดของความชื้นที่จะถูกดึงขึ้นไปด้วยแรงดึงประเทภแรงตึงผิว (surface tension) แรงคาปิลลารี (capillary force) และพลังงานผิว (surface energy) น้ำส่วนใหญ่ที่อยู่ตามช่องว่างดินในชั้นนี้ด้วยแรงตึงผิว (ฉลอง, 2538) การที่น้ำชั้นนี้อยู่สูงกว่าระดับน้ำใต้ดินเล็กน้อยเนื่องมาจากความดันในชั้นนี้มีความดันต่ำกว่าความดันบรรยากาศ โดยความสูงของชั้นนี้ขึ้นกับขนาดของช่องว่างของเม็ดดิน ถ้าช่องว่างยิ่งเล็กน้ำสามารถขึ้นไปได้มากซึ่งเรียกว่า capillary rise

ในชั้นดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำภายในชั้นดินนั้นจะมีน้ำรวมอยู่ด้วยโดยน้ำเหล่านี้จะอาศัยอยู่ระหว่างช่องว่างระหว่างเม็ดดิน แต่เราไม่สามารถนำน้ำเหล่านั้นขึ้นมาได้เนื่องจากมีแรงดึงดูดที่ผิวของเม็ดดินหรือจะเรียกว่าความดันที่ชื่อว่าแรงดันคาปิลลารี (Capillary pressure) ซึ่งแรงดันจะกระทำกันระหว่างเม็ดดินและผิวน้ำที่หุ้มเม็ดดินนั้นไว้ โดยจะมีลักษณะเป็นเส้นโค้งขนานกับผิวของเม็ดดิน ในชั้นดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำค่าแรงดันคาปิลลารีจะมีค่าเป็นลบ แต่เราสามารถอ้างอิงค่าแรงดันคาปิลลารีที่เป็นแรงตึงผิวได้ ในสภาพนี้จะมีค่าเป็นบวก กำหนดให้  $P_w$  เป็นความดันในส่วนที่เปียกและ  $P_{nw}$  เป็นความดันในส่วนที่แห้งและ  $P_c$  เป็นแรงดันคาปิลลารีโดยมีสมการ

$$P_c = P_{nw} - P_w \quad (2-1)$$

จากรูปที่ 2-5 แสดงให้เห็นถึงมุมรัศมี ( $r'$ ) ที่เป็นลักษณะคล้ายวงกลม โดยสมการที่ (2-2) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันคาปิลลารี ( $P_c$ ) และค่าแรงตึงที่ผิวหน้าของของเหลว (Surface tension) ( $\sigma$ ) และ รัศมี ( $r'$ )

$$P_c = -\frac{2\sigma}{r'} \cos\theta \quad (2-2)$$



รูปที่ 2-5 รัศมี ( $r'$ ) จากแรงดันคาปิลลารี (Fetter, 1999)

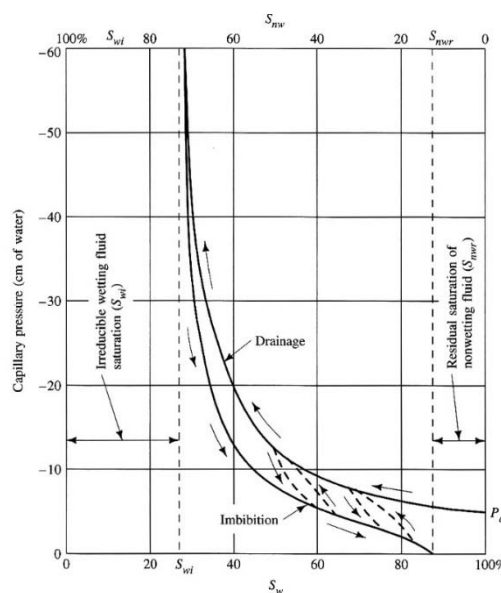
### 2.3.2 ชั้นอิ่มตัวด้วยน้ำ (saturation zone)

ชั้นอิ่มตัวด้วยน้ำนี้อยู่ต่อจากชั้นชั้นไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ (unsaturation zone) มีความหนาแน่นแตกต่างกันไปหลายระดับและแผ่ขยายลงไปจนถึงระดับความลึกของชั้นหินที่ไม่มีช่องว่างทุกช่องว่างรวมถึงรอยแยกหรือโพรง ในชั้นนี้จะเต็มไปด้วยน้ำภายใต้แรงดันที่เรียกว่า hydrostatic pressure เป็นชั้นกักเก็บน้ำใต้ดินดังกล่าวแล้ว ผิวบนของชั้นอิ่มตัวด้วยน้ำนี้จะอยู่ภายใต้แรงกดดันของบรรยากาศซึ่งระดับน้ำสามารถเลื่อนขึ้นลงได้อย่าง

อิสระขึ้นอยู่กับปริมาณน้ำที่เก็บกักไว้ ซึ่งน้ำที่อยู่ใต้สภาวะนี้เรียกว่าชั้นน้ำอิสระ (unconfined ground water) แต่ถ้าส่วนบนของชั้นนี้อยู่ใต้แรงกดดันของ hydrostatic pressure ซึ่งเกิดจากมีชั้นหินเนื้อแน่น (impermeable formation) ปิดทับอยู่ด้านบน เรียกว่า ชั้นน้ำภายใต้แรงดัน (confined ground water) หรือน้ำบาดาล (artesian water)

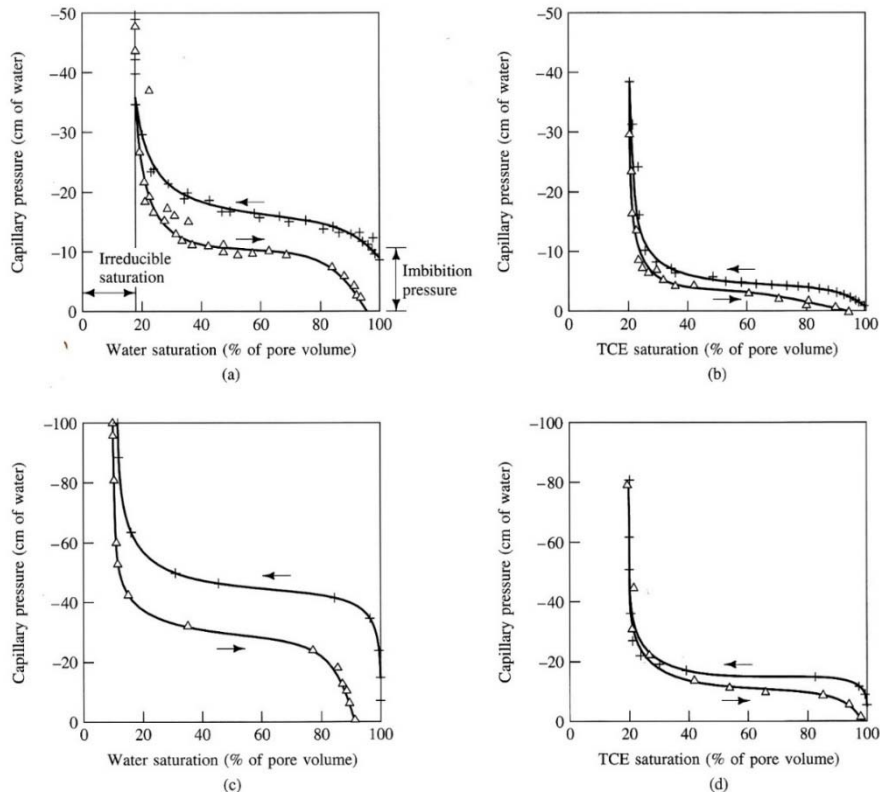
## 2.4 เส้นโค้งลักษณะเฉพาะดินกับน้ำ (Soil water characteristic curve)

รูปที่ 2-6 เรียกว่ากราฟ Soil water retention curve หรือกราฟ Capillary pressure curve เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Capillary pressure และการอิ่มตัวด้วยน้ำ (Saturation) ของดิน สามารถหาได้จากการทดลองโดยทำให้ดินอิ่มตัวด้วยน้ำหรืออยู่ในสภาพที่เปียกเรียกว่า Wetting fluid saturation,  $S_w$  จากนั้นค่อยๆ ทำให้ดินแห้งโดยเพิ่มความดันเพื่อให้น้ำไหลออก (Drainage) จุด  $P_d$  คือจุดที่ความดันสามารถทำให้น้ำเริ่มไหลออกเรียกว่า Displacement imbibitions bubbling pressure หรือ Air entry value เมื่อน้ำเริ่มไหลออกก็จะทำให้ค่าของ Wetting fluid saturation,  $S_w$  น้อยลงเรื่อยๆ และสภาพของดินจะเปลี่ยนจากสภาวะจากดินที่อิ่มตัวด้วยน้ำเป็นสภาวะที่ดินไม่อิ่มตัวด้วยน้ำหรือเรียกว่า Nonwetting fluid saturation,  $S_{nw}$  จนเส้นการแห้ง (Drying curve) ขึ้นเป็นแนวตั้ง แสดงว่าที่ความดันสูงกว่านี้ก็ไม่สามารถทำให้น้ำไหลได้เนื่องจากมีแรงดันคาปิลารีทำให้น้ำเกาะอยู่ที่ผิวของเม็ดดิน โดยระยะของแนวตั้งถึงเส้นแกน Y เรียกว่า Irreducible wetting fluid saturation,  $S_{wi}$  ส่วนเส้นการเปียก (Imbibitions หรือ wetting curve) คือการทำที่ดินไม่อิ่มตัวด้วยน้ำเปลี่ยนเป็นสภาวะที่ดินอิ่มตัวด้วยน้ำ โดยการทำให้น้ำซึมเข้าไปในชั้นดินดินอิ่มตัว แต่ค่าของ Wetting fluid saturation,  $S_w$  จะได้น้อยกว่าเดิมเนื่องจากน้ำที่เข้าไปแทนที่ในช่องว่างของเม็ดดินไม่สามารถไล่อากาศที่ขังอยู่ในช่องว่างระหว่างเม็ดดินได้ทั้งหมด จึงไม่สามารถทำให้ค่า Wetting fluid saturation,  $S_w$  กลับเป็นเหมือนสภาพเดิม โดยค่าความแตกต่างนี้เรียกว่า Residual saturation of nonwetting fluid saturation,  $S_{nwr}$



รูปที่ 2-6 เส้นโค้งลักษณะเฉพาะดินกับน้ำ (Fetter, 1999)

รูปที่ 2-7 เป็นตัวอย่างกราฟ Soil water characteristic curve กราฟ (a) น้ำและอากาศ ใน Medium sand, (b) อากาศและสาร LNAPL (Trichloroethylene) ใน Medium sand, (c) น้ำและอากาศ ใน Fine sand, และ (d) อากาศและสาร LNAPL (Trichloroethylene) ใน Fine sand



รูปที่ 2-7 ตัวอย่างกราฟ Soil water characteristic curve (Fetter, 1999)

## 2.5 Soil-water characteristic curve (SWCC) modeling parameters

ตัวแปรที่ใช้ในทางคณิตศาสตร์ในการจำลอง Soil water characteristic curve จะประกอบด้วยจุดที่มีส่วนเกี่ยวข้องกับถึง Water content หรือ Suction ที่สภาวะความถ่วงจำเพาะ และจุดที่ได้จากการทดลองหลายๆ ครั้งโดยที่ทำการกำหนดค่าที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลง นั่นคือเลือกการจับกลุ่มของสมการของเส้นโค้งโดยทั่วไปที่ทำการกำหนดจุด โดยที่ Saturated water content ( $\theta_s$ ) จะบรรยายถึงส่วนทั้งหมดที่ช่องว่างโพรงอากาศในดินถูกแทนที่ด้วยน้ำ ส่วนใหญ่จะเหมือนกับการดูดซึมที่แสดงในเส้นโค้งของกราฟ ส่วน Air entry หรือ Bubbling ( $\psi_b$ ) จะบรรยายถึงแรงดูดที่ทำให้น้ำเริ่มเกิดการไหล โดยที่ปริมาณของ Air entry และ Residual water content จะสอดคล้องในการสร้างเส้นที่ผ่านระหว่างจุดต่อจุด

จุดประสงค์ของโมเดลเพื่อให้ตัวแปรทั้งหมดสามารถนิยามถึง Normalizing water content ( $\Theta$ ) (สมการที่ 2-3) ที่ดินอิ่มตัวและประเมินถึงการเปอร์เซ็นต์คงเหลือของของเหลว และสามารถกล่าวได้ว่าปริมาณคงเหลือของ Water content ( $\Theta$ ) นั้นมีนัยสำคัญต่อปริมาณคงเหลือใน Degree of saturation ( $S_e$ ) (โดยที่  $\Theta = S_e$ ) (สมการที่ 2-4)

$$\Theta = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \quad (2-3)$$

$$S_e = \frac{S - S_r}{1 - S_r} \quad (2-4)$$

### 2.5.1 สมการของ Book and Corey (BC), 1964

$$S_e = \begin{cases} \left(\frac{h}{h_b}\right)^{-\lambda} & (h > h_b) \\ 1 & (h \leq h_b) \end{cases} \quad (2-5)$$

โดยที่  $S_e$  = Effective Degree of Saturation  
 $h$  = ค่า Matrix Suction Head (ที่ระดับความสูงต่างๆ)  
 $h_b$  = ค่า Air Entry Head  
 $\lambda$  = ปริมาณค่าเฉลี่ยของฟองอากาศ

### 2.5.2 สมการ Van Genuchten (VG), 1980

$$S_e = \left[ \frac{1}{1 + (\alpha h)^n} \right]^m \quad (m = 1 - 1/n) \quad (2-6)$$

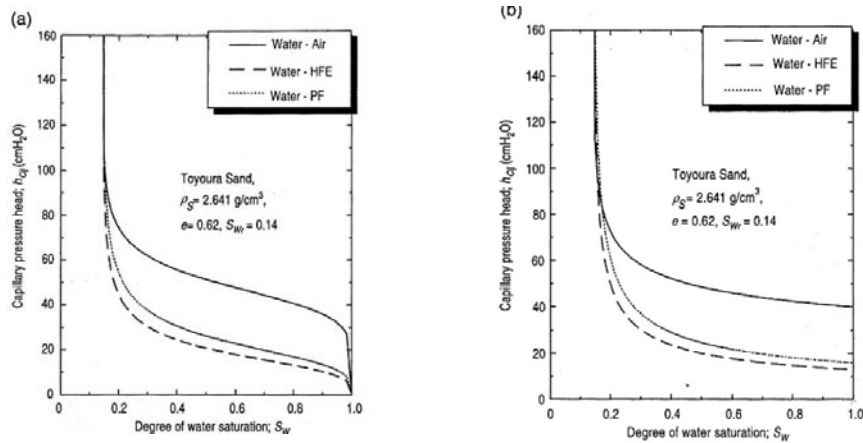
โดยที่  $\alpha$  = ตัวแปรที่มีความสัมพันธ์กับสถานะของความถ่วงจำเพาะ  
 $n$  = ตัวแปรที่เป็นความสัมพันธ์ของปริมาณค่าเฉลี่ยของฟองอากาศของดิน  
 $m$  = ตัวแปรที่เป็นความสัมพันธ์ของลักษณะของเส้นโค้งในกราฟ

### 2.5.3 สมการของ Kosugi (LN), 1996

$$S_e = Q \left[ \frac{\ln(h/h_m)}{\sigma} \right] \quad (2-7)$$

โดยที่  $Q$  = Complementary cumulative normal distribution function  
 $h_m$  = ตัวแปรที่เป็นค่าเฉลี่ยความสูงของกราฟ  
 $\sigma$  = ตัวแปรที่เป็นค่าเฉลี่ยของความถ่วงจำเพาะ

โดยสมการของ Van Genuchten และ Brooks and Corey จะมีความแตกต่างกันอยู่ คือ สมการของ Van Genuchten เส้นการแห้ง (Drying curve) จะเริ่มจากแรงดันคาปิลลารีที่ศูนย์ จากนั้นจะเพิ่มขึ้นมาเรื่อยๆ ส่วนสมการของ Brooks and Corey เส้นการแห้งจะเริ่มจากแรงดันคาปิลลารี ที่จุด  $P_d$  จากนั้นจึงค่อยๆ เพิ่มขึ้นตามลำดับดังแสดงในรูปที่ 2-8



รูปที่ 2-8 ความแตกต่างของสมการ Van Genuchten และ Brooks and Corey (a) สมการของ Van Genuchten (b) สมการของ Brooks and Corey (Fetter, 1999)

## 2.6 วิธีการวิเคราะห์ภาพถ่าย (Image Analysis Method)

### 2.6.1 การวิเคราะห์ภาพถ่ายเชิงซ้อน (MIAM)

จาก Beer's Law ว่าด้วยเรื่องการผ่านได้ของแสงคู่ขนานจากการผ่านการฉายรังสีแสงเดี่ยว (Monochromatic) ผ่านวัสดุตัวกลางที่เป็นเนื้อเดียวกันความยาวของคลื่นแสงจะมีค่าเท่ากับความสามารถในการดูดกลืนแสงของวัสดุตัวกลางชนิดนั้นที่เป็นสัดส่วนกับความเข้มเชิงแสง จาก Lambert's Law ว่าด้วยเรื่องการผ่านได้ของแสงคู่ขนานแสงคู่ขนานจากการผ่านการฉายรังสีแสงเดี่ยว (Monochromatic) ผ่านวัสดุตัวกลางที่เป็นเนื้อเดียวกัน ค่าความเข้มแสงเท่ากับค่าความดูดกลืนแสงที่เป็นสัดส่วนต่อความยาวคลื่น ในที่นี้ความสัมพันธ์ของทั้งสองความสัมพันธ์ระบุว่าการผ่านได้ของแสงคู่ขนานที่เกิดจากการฉายรังสีแสงเดี่ยว (Monochromatic) ผ่านวัสดุตัวกลางที่เป็นเนื้อเดียวกันการดูดกลืนแสงจะเป็นสัดส่วนกับค่าของความเข้มแสงและระยะเวลาในการผ่านได้ของแสงขึ้นอยู่กับสารตัวทำละลาย, ความยาวคลื่นและความเข้มแสง จาก Beer's Law และ Lambert's Law จะเกี่ยวข้องกันกับพลังงานของรังสีในลำแสงของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ากับความยาวความของคลื่นของลำแสงที่ถูกดูดกลืนไว้ด้วยวัสดุตัวกลาง และความเข้มของแสงตามลำดับ จากความสัมพันธ์ของ Swinehart (1962) จะได้สมการที่ (2-8)

$$A = -\log_{10} \frac{P}{P_0} = abc \tag{2-8}$$

- เมื่อ
- A = ความหนาแน่นของแสง
  - P = ความเข้มของแสง
  - a = ความสามารถในการดูดกลืนของแสง
  - b = ระยะของลำแสงในการดูดซับ
  - c = ความเข้มของแสงที่ถูกดูดกลืนไว้
  - P<sub>0</sub> = รังสีไฟฟ้า



Kecharvarzi et al. (2000) ได้นำเสนอการวิเคราะห์ภาพถ่ายเชิงซ้อน (MIAM) เพื่อตรวจสอบค่าการกระจายตัวของความเข้มแสงของของไหลภายใต้สภาพล้นของน้ำ, LNAPL และอากาศในการทดลองสองมิติ ในห้องปฏิบัติการเช่นเดียวกับวิธีการส่องผ่านได้ของแสงและวิธีการสะท้อนของแสง ซึ่งวิธีนี้เป็นวิธีการที่ไม่ทำลายระบบเหมาะสำหรับระบบที่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วของความหนาแน่นเชิงแสง ยังสามารถช่วยกำหนดไว้ภายใต้เงื่อนไขของการสะท้อนกลับของแสงได้ดังสมการที่ (2-9) และ (2-10)

$$D = \log_{10}(\rho) \tag{2-9}$$

$$\rho = \frac{I^r}{I^0} \tag{2-10}$$

เมื่อ  $I^r$  และ  $I^0$  เป็นความเข้มของแสงและแสงที่สะท้อนให้เห็นในสีขาวปกติตามลำดับ

ความแตกต่างในการสะท้อนกลับของน้ำและ LNAPL ภายในค่าของความยาวคลื่นของแสงที่แคบๆนั้นสามารถทำการวัดได้โดยสเปกโตรมิเตอร์ซึ่งเป็นเครื่องมือพื้นฐานในการหาระดับของความอืดด้วยของเหลว เมื่อเปรียบเทียบความเข้มของแสงที่สะท้อนระหว่างความยาวคลื่นแต่จะขึ้นอยู่กับปริมาณของของเหลวที่มีอยู่ในระบบแต่ในระบบของภาพดิจิทัลได้ทำการแยกความยาวของคลื่นที่ผ่านได้โดยการติดตั้งฟิวเตอร์กรองแสงไว้ด้านหน้าของเลนส์กล้อง เพื่อที่จะใช้ประโยชน์ในการสอบเทียบของแต่ละกลุ่มของตัวกลางที่แตกต่างกันไปของระดับความอืดด้วยน้ำ, อากาศกับ LNAPL, และน้ำกับ LNAPL ซึ่งจะถูกบันทึกเป็นภาพภาพโดยมีการถ่ายภาพที่มีการติดตั้งสีดำและสีขาว รวมทั้งสีเทา ถูกนำมาวางถัดจากตัวอย่างตามเงื่อนไขของการรูปภาพความเข้มแสงซึ่งได้ทำการแบ่งโดยใช้ระดับของสีเทา 4096 ซึ่งความหนาแน่นเฉลี่ยของแสงในเฟสของของเหลวและ LNAPL ถูกกำหนดดังสมการที่ (2-11)

$$D = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N d_{ji} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \left[ -\log_{10} \left[ \frac{I_{ji}^r}{I_{ji}^0} \right] \right] \tag{2-11}$$

- โดยที่
- N คือ จำนวนพิกเซลในรูปภาพที่ทำการวิเคราะห์ (พิกเซล)
  - i คือ ความถี่ของแสงที่ใช้ในการทดลอง (นาโนเมตร)
  - $D_i$  คือ ความหนาแน่นเชิงแสงของแต่ละพิกเซล (ไม่มีหน่วย)
  - $I_{ji}^r$  คือ ความเข้มของแสงที่สะท้อนจากวัตถุในแต่ละพิกเซล (candela)
  - $I_{ji}^0$  คือ ความเข้มของแสงที่สะท้อนจากสีขาวสมบูรณ์ (candela)

$$D_i^l = \lambda_i^l S_i + \beta_i^l \tag{2-12}$$

$$D_i^n = \lambda_i^n S_i + \beta_i^n, \quad i = 500, 760, 970 \text{ nm} \tag{2-13}$$

ซึ่งในกรณีที่ 1 และ n และ l หมายถึง น้ำและ LNAPL ตามลำดับ, i หมายถึง ความยาวของคลื่นจากศูนย์กลางของสามความยาวคลื่นของแสง และ  $\lambda$  กับ  $\beta$  เป็นค่าสัมประสิทธิ์การถดถอย โดยที่ Kecharvarzi et al. (2000) กล่าวว่า  $\lambda$  จะขึ้นอยู่กับความพรุนของวัสดุกลางและมีความสัมพันธ์กันแบบเชิงเส้นเท่านั้น ส่วน  $\beta$  เป็นค่าของการสะท้อนกลับของสื่อกลางที่มีรูพรุนที่แห้งหรือไม่ถูกรบกวนจากการเปลี่ยนแปลงของของไหลแต่ความหนาแน่นเชิงแสงเฉลี่ยเป็นฟังก์ชันเชิงเส้นของระดับความอืดด้วย LNAPL และระดับความอืดด้วยน้ำสามารถเขียนได้ดังสมการที่ (2-14)

$$D_i^{nl} = \lambda_i^l S_i + \lambda_i^n S_n + \beta_i^{nl} \quad (2-14)$$

เมื่อ  $D_i^{nl}$  คือความหนาแน่นเชิงแสงเฉลี่ยในพื้นที่ๆสนใจและ  $\beta_i^{nl}$  ความหนาแน่นเชิงแสงเฉลี่ยของสื่อกลางที่มีรูพรุน พิจารณามีค่าเท่ากับสมการที่ (2-14) ของความยาวคลื่นแสง จากสามส่วนที่เกิดจากความยาวคลื่นจะได้สามสมการและสามารถแก้สมการที่ (2-15) ทำให้เกิดความสัมพันธ์ดังสมการที่ (2-15)

$$S_i = \frac{\lambda_i^n (D_k^{nl} - 2\beta_k^{nl}) - \lambda_k^n (D_i^{nl} - 2\beta_i^{nl})}{\lambda_k^n \lambda_i^l - \lambda_i^n \lambda_k^l}$$

$$S_n = \frac{\lambda_k^l (D_k^{nl} - 2\beta_k^{nl}) - \lambda_k^n (D_i^{nl} - 2\beta_i^{nl})}{\lambda_k^n \lambda_i^l - \lambda_i^n \lambda_k^l} \quad (2-15)$$

i, k = 500, 760, 970 nm

เมื่อต้องการลดความแปรปรวนของระดับความอืดตัวของของเหลวโดยการทำให้ตัวหารของสมการที่ (2-15) จะต้องมีขนาดใหญ่ นั่นคือค่าสัมประสิทธิ์  $\lambda$  จะต้องมีขนาดใหญ่และควรแตกต่างกันไปได้สำหรับแต่ละความยาวคลื่นที่เลือกซึ่งจะขึ้นอยู่กับข้อมูล Kecharvarzi et al. (2000) เป็นที่ชัดเจนว่าการรวมกันของ i = 500 และ k = 760 นาโนเมตร หรือ i = 500 และ k = 970 นาโนเมตร เพื่อที่จะแก้สมการที่ (2-15) ทุกค่า  $\lambda$  และ  $\beta$  สามารถหาได้จากระบบสองเฟสในการบันทึกภาพซึ่งเป็นสิ่งที่สำคัญมากโดยการให้แสงสว่างที่สม่ำเสมอทั้งระบบที่ทำทดลองต้องมีสภาพของแสงสว่างที่คงที่ตลอดการทดลอง

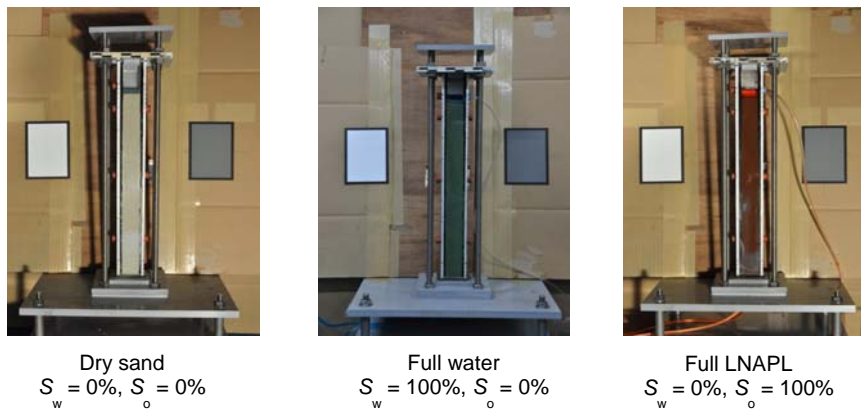
การวิเคราะห์ภาพถ่ายเชิงซ้อน (MIAM) จะถูกนำไปใช้ในการทดลองเพื่อดูการแทรกซึมและการกระจายตัวของ LNAPL ในสื่อกลางที่มีรูพรุนในระดับความอืดตัวของแล้วต่างๆกัน ส่วนพฤติกรรมการไหลของของไหลชนิดหนึ่งในการทดลองที่ได้อธิบายรายละเอียดโดย Kechavarzi et al. (2005) แต่สำหรับสำหรับสื่อกลางที่มีรูพรุนขั้นตอนการสอบเทียบที่จะครอบคลุมผลของค่าสัมประสิทธิ์ที่จะเป็นไปได้สำหรับการคำนวณค่าระดับความอืดตัวของของเหลวจากสมการที่ (2-15) ในระหว่างขั้นตอนการศึกษา 3 หรือ 4 โดยที่ LNAPL จะอยู่ในทรายที่อืดตัวด้วยของเหลวบางส่วนในวัสดุที่เป็นเนื้อเดียวกันหรือชั้นของน้ำด้านล่างและช่องว่างคาปิลารีตั้งแต่ 20 ถึงประมาณ 50 เซนติเมตร ค่าความแตกต่างระหว่างระดับความอืดตัวจะถูกนำไปใช้ในการวัดค่าความแตกต่างกันที่ 2.8 – 10.5 % ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับวิธีการทดลอง

### 2.6.2 การวิเคราะห์ภาพถ่ายอย่างง่าย (SIAM)

การวิเคราะห์ภาพถ่ายอย่างง่าย (SIAM) (Flores, 2010) ในทำนองเดียวกันกับวิธีการวิเคราะห์ภาพถ่ายเชิงซ้อน โดยที่ Beer-Lambert Law ในเรื่องการส่งผ่านได้ของแสงที่เป็นความสัมพันธ์เชิงเส้นกันระหว่างความหนาแน่นเชิงแสงเฉลี่ย ( $D_i$ ) และค่าระดับความอืดตัวด้วยน้ำและระดับความอืดตัวด้วย LNAPL ( $S_w$  และ  $S_o$ ) ที่ใช้ในการคำนวณระดับความอืดตัวด้วยน้ำและ ระดับการอืดตัวด้วย LNAPL และการกระจายตัวของระดับความอืดตัวของ LNAPL ภายใต้เงื่อนไขของน้ำใต้ดินที่มีความผันผวนภายในห้องปฏิบัติการที่ถูกควบคุมสภาพแวดล้อม ซึ่งการวิเคราะห์ภาพถ่ายอย่างง่าย จะเกิดผลกระทบของตัวแปรที่เกิดจากการสะท้อนของแสงที่ถูกจัดความจำเป็นในการเตรียมความพร้อมของหลายๆกลุ่มตัวอย่างที่จะเป็นสำหรับการปรับเทียบเชิงเส้น

ระนาบการถดถอย ในเวลาเดียวกันยังเป็นการปรับปรุงความถูกต้องสำหรับจุดที่ไกลจากจุดศูนย์กลาง และได้มีการพัฒนาการประยุกต์วิธีการวิเคราะห์ภาพถ่ายอย่างง่ายให้มีความเรียบง่ายมากขึ้นในเรื่องของกระบวนการที่ซับซ้อนของการสอบเทียบสำหรับการวิเคราะห์ภาพถ่ายเชิงซ้อน (MIAM) ในการลดความซับซ้อนในกระบวนการเปรียบเทียบ แต่การวิเคราะห์ภาพถ่ายอย่างง่าย (SIAM) จะมีความซับซ้อนทางคณิตศาสตร์และการวิเคราะห์คำนวณมากกว่าโดยการที่จะมีความไม่ได้เกี่ยวข้องกันหนึ่งชุดของตนเองโดยที่สมการความเกี่ยวข้องของ (จากภาพที่ถ่ายจากทั้งสองความยาวคลื่นที่แตกต่างกัน) สำหรับการเปลี่ยนแปลงเชิงพื้นที่ของทั้งแสงเองและปัจจัยอื่นและอื่นๆ

การวิเคราะห์ภาพถ่ายอย่างง่ายเป็นวิธีการที่ช่วยปรับปรุงในเรื่องของการเปรียบเทียบของกลุ่มตัวอย่างแทนที่จะต้องมาทำการเปรียบเทียบกลุ่มตัวอย่างที่แตกต่างกันมากถึง 60 ตัวอย่างหรือมากกว่านั้นมาก และยังเป็นวิธีการที่ช่วยในการร่นระยะเวลาของการเปรียบเทียบภาพซึ่งวิธีใหม่ที่ใช้ในการวิเคราะห์ต้องการเพียงแค่การเปรียบเทียบแค่สามภาพโดยถ่ายจากกล้องแต่ละตัว โดยการศึกษารูปแบบหลักของทรายที่มีอยู่ภายใต้สถานะใดสถานะหนึ่งเท่านั้นดังสามเงื่อนไขดังที่เกี่ยวข้อต่อไปนี ทรายแห้ง ( $S_w=0\%$  และ  $S_o=0\%$ ), ทรายอิ่มตัวด้วยน้ำ ( $S_w=100\%$  และ  $S_o=0\%$ ) และทรายที่อิ่มตัวด้วย NAPL ( $S_w=0\%$  และ  $S_o=100\%$ ) ดังนั้นทั้งสามเงื่อนไขนี้ทำให้สามตัวแปรที่เป็นสมการเชิงเส้น (รูปที่ 2-10) ซึ่งสามารถนำมาลงจุดโดยไม่จำเป็นต้องเปรียบเทียบถึง 60 ตัวอย่างที่มีความแตกต่างกัน กับระดับความอิ่มตัวของน้ำและ LNAPL ขึ้นตอนต่อไปจะถูกนำเสนอโดย Flores (2010) สำหรับการวิเคราะห์รูปถ่ายอย่างง่าย

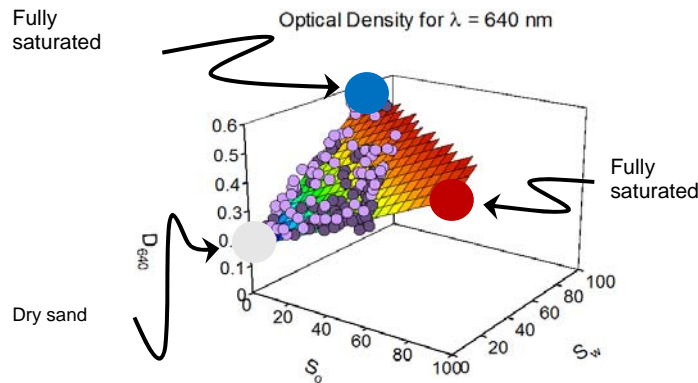


รูปที่ 2-9 ภาพที่ใช้ในการเปรียบเทียบ

Flores (2010) ได้ทำการยืนยันว่าทั้งสามจุดที่เกิดจากทรายแห้ง ( $S_w=0\%$  และ  $S_o=0\%$ ), ทรายอิ่มตัวด้วยน้ำ ( $S_w=100\%$  และ  $S_o=0\%$ ) และทรายที่อิ่มตัวด้วย NAPL ( $S_w=0\%$  และ  $S_o=100\%$ ) ไม่ใช่สมการเชิงเส้นที่ดีนักแต่เพื่อที่จะกำหนดสมการถดถอยจากสมการที่ (2-16)  $\beta_k^m$  ซึ่งเป็นค่าจากสมการความหนาแน่นเชิงแสงเฉลี่ยของทรายแห้งเป็นจุดที่หนึ่ง, จุดที่สองคือระดับความอิ่มตัวของทรายกับน้ำ ( $S_w=100\%$ ) และจุดที่สามคือระดับความอิ่มตัวของ LNAPL ( $S_o=100\%$ )

$$\begin{bmatrix} D_i \\ D_j \end{bmatrix}_{mn} = \begin{bmatrix} (D_i^{10} - D_i^{00}) \cdot S_w + (D_i^{01} - D_i^{00}) \cdot S_o + D_i^{00} \\ (D_j^{10} - D_j^{00}) \cdot S_w + (D_j^{01} - D_j^{00}) \cdot S_o + D_j^{00} \end{bmatrix}_{mn} \quad (2-16)$$

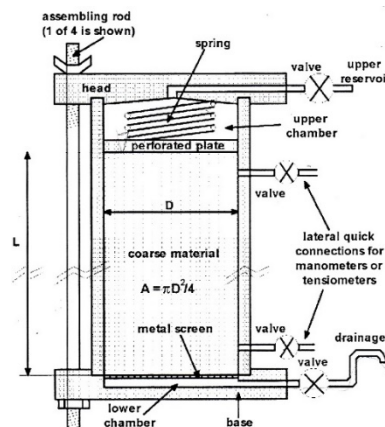
- เมื่อ  $m$  และ  $n$  คือ ขนาดของเมทริกซ์
- $[D_i]$  และ  $[D_j]$  คือ ค่าความหนาแน่นเชิงแสงเฉลี่ยของแต่ละองค์ประกอบในแต่ละความยาวคลื่น  $i$  และ  $j$
- $[D_i^{00}]_{mn}$  and  $[D_j^{00}]_{mn}$  คือ ความหนาแน่นเชิงแสงเฉลี่ยขององค์ประกอบของทรายแห้ง
- $[D_i^{10}]_{mn}$  and  $[D_j^{10}]_{mn}$  คือ ความหนาแน่นเชิงแสงเฉลี่ยขององค์ประกอบของที่อิ่มตัวด้วยน้ำ
- $[D_i^{01}]_{mn}$  and  $[D_j^{01}]_{mn}$  คือ ความหนาแน่นเชิงแสงเฉลี่ยขององค์ประกอบของที่อิ่มตัวด้วย LNAPL



รูปที่ 2-10 ระนาบของสมการ

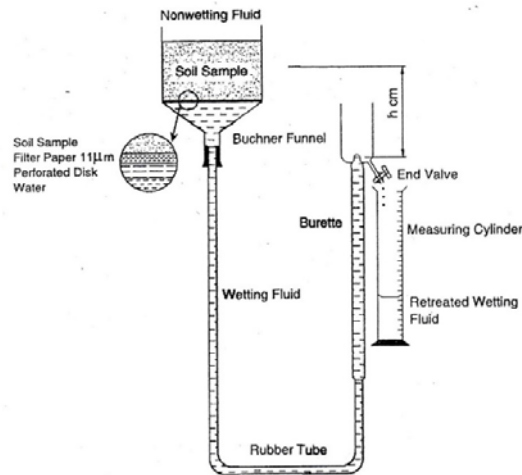
## 2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Robert et al. (2007) ทำการทดลองหาเส้นโค้งลักษณะเฉพาะดินกับน้ำ โดยใช้กระบอกทรงกลมสูง 183 เซนติเมตร (รูปที่ 2-11) ทำการทดลองหาความสัมพันธ์ระหว่าง น้ำ อากาศ และ ทรายหยาบ ทำการทดลองเพื่อหาเส้นการแห้ง (Drying curve) โดยทำให้ตัวอย่างทรายหยาบอิ่มตัวด้วยน้ำ แล้วทำการระบายน้ำ รอจนกว่าน้ำจะหยุดไหล บันทึกค่าต่างๆ และนำมาเขียนกราฟความสัมพันธ์เส้นโค้งลักษณะเฉพาะดินกับน้ำ เมื่อนำผลการทดลองมาเปรียบเทียบกับ การทดสอบมาตรฐานโดยใช้เครื่องอัดความดัน (Tempe cell) พบว่า ความสัมพันธ์เส้นโค้งลักษณะเฉพาะดินกับน้ำมีค่าใกล้เคียงกัน



รูปที่ 2-11 กระบอกทรงกลมที่ใช้ในการหาเส้นโค้งลักษณะเฉพาะดินกับน้ำของ Robert et al (2007)

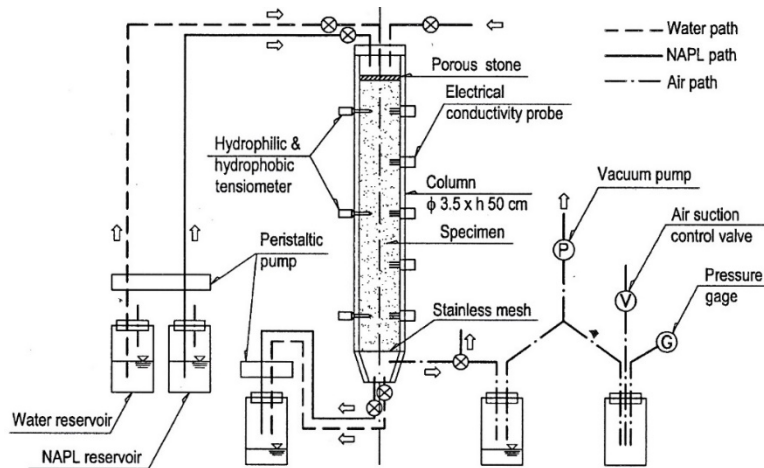
Sharma et al. (2003) ทำการศึกษาหาเส้นโค้งลักษณะเฉพาะดินกับน้ำ โดยใช้สมการของ Van Genuchten (1980) ในการหาความสัมพันธ์ระหว่าง น้ำ กับ อากาศ อากาศ กับ LNAPL และ LNAPL กับ อากาศ โดย LNAPL ที่ใช้ในการทดลองคือ น้ำมันสกัดจากธรรมชาติ (Mineral Oil) และทรายที่ใช้ในการทดลองเป็นทรายหยาบ อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองแสดงในรูปที่ 2-12 โดยเป็นการศึกษาเฉพาะเส้นการแห้ง (Drying curve)



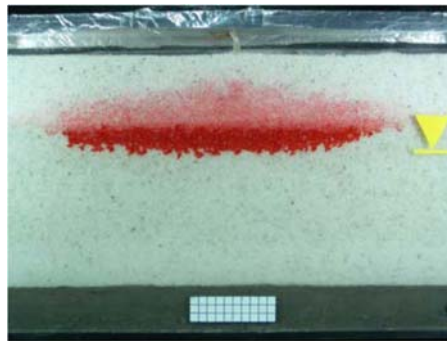
รูปที่ 2-12 อุปกรณ์ที่ใช้ในการศึกษาเส้นโค้งลักษณะเฉพาะดินกับน้ำของ Sharma et al. (2003)

Kamon et al. (2003) ได้ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่าง สัมประสิทธิ์การไหลซึมผ่านได้ (Coefficient of permeability) ระดับขั้นความอิ่มตัว (Degree of saturation) และแรงดัน (Pressure) ในการเคลื่อนตัวของ สารเคมีที่เรียกว่า DNAPL (Dense non-aqueous phase liquid) ในดินทราย โดยใช้ Tensiometer ในการวัด ค่าเมตริกซ์ดูดน้ำ (Matrix Suction) นอกจากนี้ยังมีการติดตั้ง Electric conductivity probe ในการวัด ค่าระดับความอิ่มตัวอีกด้วย ความสัมพันธ์ที่ได้จากการทดลองสามารถนำมาเขียนเส้นโค้งลักษณะเฉพาะดินกับน้ำ โดยใช้สมการของ Van Genuchten (1980) และ Brooks and Corey (1964) และประยุกต์ใช้สมการของ Lenhard and Parker (1987) เขียนเส้นโค้งลักษณะเฉพาะดินกับน้ำ จากการทดลองพบว่าเส้นโค้งลักษณะเฉพาะดินกับน้ำที่ได้จากสมการ Van Genuchten (1980) และ Brooks and Corey (1964) มีความแม่นยำพอสมควร ส่วนเส้นโค้งลักษณะเฉพาะดินกับน้ำที่ได้จากสมการ Lenhard and Parker (1987) ยังไม่เป็นที่น่าพอใจ รูปที่ 2-13 แสดงอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองของ Kamon et al. (2003)

วรรณรัฐ (2549) ได้ศึกษาพฤติกรรมการณ์การปนเปื้อนของ LNAPL ในชั้นดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำที่มีความไม่สม่ำเสมอ (heterogeneous) ทางโครงสร้าง ซึ่ง LNAPL ที่ทำการศึกษาคือ BTEX เป็นสารประกอบของน้ำมันเบนซิน 91 โดยการทดลองเป็นการจำลองการรั่วของถังเก็บน้ำมันใต้ดินด้วยวิธีการวิเคราะห์จากภาพดิจิทัล โดยบันทึกภาพลักษณะการเคลื่อนที่และการถ่ายเทมวลของน้ำมันเชื้อเพลิงด้วยกล้องดิจิทัลยี่ห้อ Casio รุ่น EX-Z40 4 mega pixels x 3 zoom ที่มีความคมชัดสูง ดังแสดงในภาพที่ 2-16 ซึ่งในการทดลองมีการถ่ายภาพของการเคลื่อนตัวของน้ำมันเชื้อเพลิงในระยะทางในแนวตั้งและแนวนอน จากนั้นนำผลที่ได้มาทำการประมวลผล โดยการใช้โปรแกรม Matlab v.7 เพื่อหาค่าเชิงปริมาณ



รูปที่ 2-13 อุปกรณ์ที่ใช้ในการศึกษาเส้นโค้งลักษณะเฉพาะดินกับน้ำของ Kamon et al. (2003)



รูปที่ 2-16 LNAPL plume น้ำมัน ซึ่งบันทึกภาพจากภาพถ่ายดิจิทัล (วรรณรัฐ, 2549)

จากการศึกษาพบว่าเมื่อเกิดการรั่วไหลของน้ำมันเบนซิน 91 (LNAPL) จากถังกักเก็บใต้ดิน พบว่าในช่วงแรก LNAPL จะเคลื่อนที่ในแนวตั้งและแนวระนาบ เท่าๆ กันในเวลาต่อมาเมื่อ LNAPL เคลื่อนที่ถึง capillary fringe ถ้ามีแรง capillary มากกว่าแรงโน้มถ่วงและแรงหนืด จะทำให้ LNAPL ไม่เคลื่อนที่ในแนวตั้ง แต่จะเกิดการเคลื่อนที่ในแนวระนาบแทนและเมื่อเวลาผ่านไประยะหนึ่งการเคลื่อนที่ของ LNAPL ทั้งในแนวตั้งและแนวระนาบจะหยุดการเคลื่อนที่ (immobilization) เนื่องจากทรายอิมตัวไปด้วยน้ำมัน หลังจากนั้นเมื่อมีการลดระดับน้ำลง พบว่า LNAPL จะเคลื่อนที่ลงในแนวตั้งเนื่องจากแรงโน้มถ่วง ซึ่งเป็นผลมาจากการที่ระดับน้ำลดลงทำให้ช่องว่างของทรายเพิ่มขึ้นทำให้ LNAPL สามารถเคลื่อนที่ได้ดีขึ้น และจะมี LNAPL บางส่วนที่เหลือค้างและเกิดการอิมตัวอยู่ในพื้นที่การปนเปื้อน

สุวสันต์ และคณะ (2554) ได้ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นเชิงแสงเฉลี่ยและระดับการอิมตัวด้วยของเหลวในทรายโดยใช้เทคนิคการวิเคราะห์ภาพถ่ายตัวอย่างทรายที่ใช้ในการทดสอบคือทรายมาตรฐานโทยุระ และของเหลวที่ทดสอบคือ ซีฟิ่งเหลว และ น้ำมันดีเซล ตัวอย่างที่ทดสอบประกอบไปด้วย ทรายผสมน้ำ ทรายผสมซีฟิ่งเหลว ทรายผสมน้ำมันดีเซล ทรายผสมน้ำและซีฟิ่งเหลว และ ทรายผสมน้ำและน้ำมันดีเซล ที่ระดับการอิมตัวต่างๆ สำหรับอุปกรณ์ที่ใช้บรรจุตัวอย่างเป็นโลหะรูปทรงกระบอกมีเส้นผ่าศูนย์กลาง 4 ซม. และสูง 1.96 ซม. ความหนาแน่นของทรายตัวอย่างเท่ากับ 1.64 กรัม/ลบ.ซม. น้ำที่ใช้

ในการทดสอบถูกย้อมสีฟ้าด้วยบิลเลียนบูลเอฟซีเอฟด้วยอัตราส่วน 1:10,000 ส่วนซีฟิ่งเหลวและน้ำมันดีเซลถูกย้อมสีแดงด้วยเรดซูดานสามด้วยอัตราส่วน 1:10,000 เช่นเดียวกัน การทดลองทำโดยถ่ายภาพตัวอย่างด้วยกล้องดิจิทัลจำนวน 2 ตัว โดยกล้องแต่ละตัวทำการติดตั้งฟิลเตอร์กรองแสงให้ผ่านที่ 2 ความถี่คือ 450 นาโนเมตร และ 640 นาโนเมตร รูปถ่ายที่ได้ถูกนำไปวิเคราะห์เพื่อหาค่าความหนาแน่นเชิงแสงเฉลี่ยในแต่ละช่วงความถี่ จากการศึกษาพบว่าความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นเชิงแสงเฉลี่ยและระดับการอิมมิตัวด้วยของเหลวในทรายโดยใช้เทคนิคการวิเคราะห์ภาพถ่ายพบว่ามีความสัมพันธ์เป็นแบบเชิงเส้น และจากความสัมพันธ์ที่ได้ เมื่อทราบค่าความหนาแน่นเชิงแสงเฉลี่ยที่ความถี่ 450 นาโนเมตร และ 640 นาโนเมตร จากการวิเคราะห์ภาพถ่าย จะสามารถนำไปประมาณค่าระดับการอิมมิตัวด้วยของเหลว ณ เวลาใดๆในการศึกษาวิจัยพฤติกรรมการปนเปื้อนของซีฟิ่งเหลว และ น้ำมันดีเซลภายในทรายภายใต้สภาพแวดล้อม ในคอลัมน์ 1 มิติ และ แท็งก์ 2 มิติ

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

- ทำให้สังเกตเห็นผิวน้ำอิสระ ทิศทางการไหลของน้ำมันเชื้อเพลิง ทั้งลักษณะการไหลคงตัวและการไหลไม่คงตัวในสภาพ 2 มิติ ทั้งในแนวกว้างและยาว (Kim and Corapcioglu, 2003)
- สามารถตรวจจุดสมดุลของตำแหน่ง Plume ของน้ำมันเชื้อเพลิง เหนือระดับน้ำตัวกลางเปียกได้ (Schroth *et al.*, 1995)
- สามารถลอกเลียนแบบการเคลื่อนที่ของของเหลวที่ไม่สามารถละลายผสมกันได้ (Schroth *et al.*, 1995, 1998)
- ค่าเฉลี่ยในแนวตั้งของแบบจำลอง 2 มิติ สามารถพัฒนาเพื่อใช้อธิบายถึงพื้นที่ในการแพร่และการเคลื่อนที่ของ LNAPLs ที่หกหรือรั่วจากถังเก็บน้ำมันใต้ดิน (Kim and Corapcioglu, 2003)
- 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



### บทที่ 3 เส้นโค้งลักษณะเฉพาะของดินกับของเหลว

#### 3.1 วัสดุที่ใช้ในการทดลอง

##### 3.1.1 ทราย

ตัวอย่างดินทรายที่ใช้ในการทดลองทำการเก็บตัวอย่างจากบริเวณคณะวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยบูรพา จังหวัดชลบุรี ที่ระดับความลึก 0.4 เมตร และ 0.7 เมตร โดยมีระดับความลึกของน้ำใต้ดินที่ 0.8 เมตร ตัวอย่างทรายที่ได้เป็นตัวอย่างแบบถูกรบกวน (Disturbed sample) ระหว่างทำการเก็บตัวอย่างได้ทำการทดสอบความหนาแน่นในสนาม (ASTM D1556-00) ที่ระดับความลึก 0.4 เมตร และ 0.7 เมตร ตามลำดับ รูปที่ 3-1 แสดงการเก็บตัวอย่างดินในสนาม



รูปที่ 3-1 การเก็บตัวอย่างดินในสนาม

เมื่อมองด้วยตาเปล่ามีลักษณะเป็นดินทรายสีน้ำตาลอ่อนมีเศษหินและฝุ่นปะปนอยู่มาก ลักษณะเม็ดดินเป็นเม็ดกลม ส่วนดินที่ความลึก 0.7 เป็นดินทรายที่มีสีน้ำตาลเข้มมีความชื้นสูงเนื่องจากอยู่ใต้ระดับน้ำใต้ดิน ขนาดเม็ดดินค่อนข้างเล็กดังแสดงนรูปที่ 3-2 คุณสมบัติของดินบางอย่างได้แสดงไว้ในตารางที่ 3-1



(a) ดินที่ความลึก 0.4 เมตร



(b) ดินที่ความลึก 0.7 เมตร

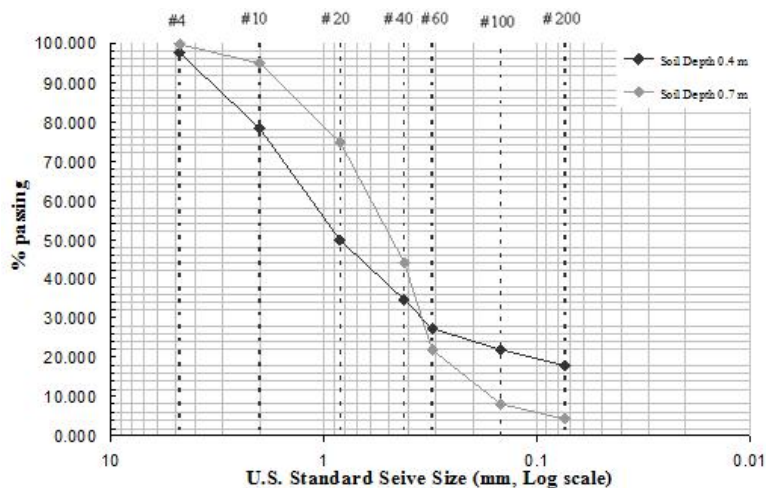
รูปที่ 3-2 ตัวอย่างดินทรายที่ใช้ในการทดลอง



ตารางที่ 3-1 คุณสมบัติของดินทรายตัวอย่าง

คุณสมบัติ	ระดับความลึกของดิน (เมตร)	
	0.4	0.7
ความหนาแน่นในสนาม (กรัม/ซม. <sup>3</sup> )	1.97	1.48
ปริมาณความชื้นในดิน (%)	9.40	16.39
ความถ่วงจำเพาะ	2.68	2.65
Soil Classification (USCS)	SC	SP
สัมประสิทธิ์ของการซึม (ซม./วินาที)	-	0.03686

การกระจายขนาดของเม็ดดิน ทดสอบโดยวิธี Sieve Analysis ได้ผลดังแสดงในรูปที่ 3-3 ตัวอย่างดินที่ความลึก 0.4 เมตร มีค่าสัมประสิทธิ์ความสม่ำเสมอ (Coefficient of Uniformity,  $C_u$ ) หาค่าไม่ได้ และค่าสัมประสิทธิ์ความโค้ง (Coefficient of Curvature,  $C_c$ ) หาค่าไม่ได้ เนื่องจากค่า  $D_{10}$  มีค่าเท่ากับ 0 เพราะว่าเป็นทรายที่มีฝุ่นในปริมาณมาก ส่วนตัวอย่างดินที่ความลึก 0.7 เมตร มีค่าสัมประสิทธิ์ความสม่ำเสมอ (Coefficient of Uniformity,  $C_u$ ) 1.77 และค่าสัมประสิทธิ์ความโค้ง (Coefficient of Curvature,  $C_c$ ) 1.10 จัดเป็นดินทรายที่มีขนาดคละไม่ดี (Poorly-Graded Soil) เมื่อจำแนกดินตามระบบ Unified Soil Classification จัดเป็นดินประเภท SP (Sand Poorly Graded) จากการทดลองพบว่าดินที่ความลึก 0.4 เมตร เป็นดินที่ประกอบไปด้วยดินเม็ดละเอียด (Fine grained soil) มาก ซึ่งดินจำพวกนี้มีค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้ต่ำ เมื่อนำมาทำให้ที่อิ่มตัวด้วยน้ำเวลาปล่อยให้ น้ำไหลออกมา น้ำจะไม่ไหลซึมออกมา หรือไหลในปริมาณที่น้อยมาก จึงไม่เหมาะสมที่จะนำมาใช้ในการทดลอง



รูปที่ 3-3 การโค้งการกระจายตัวของอนุภาคดิน

### 3.1.2 ของเหลว

ของเหลวที่ใช้ในการศึกษาการไหลซึมผ่านประกอบไปด้วย น้ำกลั่น, น้ำมันเบนซิน 95, น้ำมันแก๊สโซฮอล์ E20, และ น้ำมันแก๊สโซฮอล์ E85 ดังแสดงในรูปที่ 3-4 ซึ่งเป็นน้ำมันที่มีจำหน่ายที่สถานีบริการน้ำมัน บริษัท ปตท.โดยมีคุณสมบัติต่างๆ ดังตารางที่ 3-2



รูปที่ 3-4 ของเหลวที่ใช้ในการทดลอง

ตารางที่ 3-2 คุณสมบัติของของเหลวที่ใช้ในการทดลอง

ของเหลว	สี	ความถ่วงจำเพาะ	ความหนืด (cm <sup>2</sup> /sec)	จุดวาบไฟ (°C)	แรงตึงผิว (mN/m)
น้ำ	ใส	1	1.129	-	71.97
แก๊สโซฮอล์ E20	แดง	0.761	0.79	60-90	33.06
แก๊สโซฮอล์ E85	แดงอ่อน	0.789	0.82	50-90	NA
เบนซิน 95	เหลือง	0.71	0.74	70-100	28.88

### 3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

กระบอกทรงสูง (One dimensional column) ที่ใช้มีขนาดพื้นที่หน้าตัด 0.1x 0.1 เมตร มีความสูง 1 เมตร ผลิตจาก อะครีลิก (Acrylics) โดยมีจุดเก็บตัวอย่างดิน (Sampling port ) ทั้งสิ้น 9 จุด แต่ละจุดอยู่ห่างกัน 0.1 เมตร ด้านข้างของกระบอกทรงสูงติดตั้ง ท่อพีวีซี ขนาด 6 นิ้ว เพื่อเป็นแหล่งเก็บกักของเหลวที่ใช้ในการทดลอง ด้านล่างของกระบอกทรงสูงติดตั้งรูระบายของเหลว เพื่อให้สามารถระบายของเหลวออกจากกระบอกทรงสูงได้ และที่ท่อพีวีซี ได้ทำการติดตั้งวาล์วควบคุมการไหลเพื่อควบคุมปริมาณของเหลวที่เข้าสู่กระบอกทรงสูงไว้ด้วย กระบอกทรงสูงแสดงในรูปที่ 3-5



รูปที่ 3-5 อุปกรณ์ทดลองการไหลซึมผ่านแบบใช้กระบอกทรงสูง (One dimensional column)

ท่อเก็บตัวอย่างทราย (Sampling tube) ใช้ในการเก็บตัวอย่างจากจุดเก็บตัวอย่างที่ติดตั้งไว้ในกระบอกทรงสูง โดยท่อเก็บตัวอย่างทรายมีความยาวประมาณ 0.3 เมตร และมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.5 นิ้ว ท่อเก็บตัวอย่างทรายแสดงไว้ในรูปที่ 3-6



รูปที่ 3-6 ท่อเก็บตัวอย่างทราย (Sampling tube)

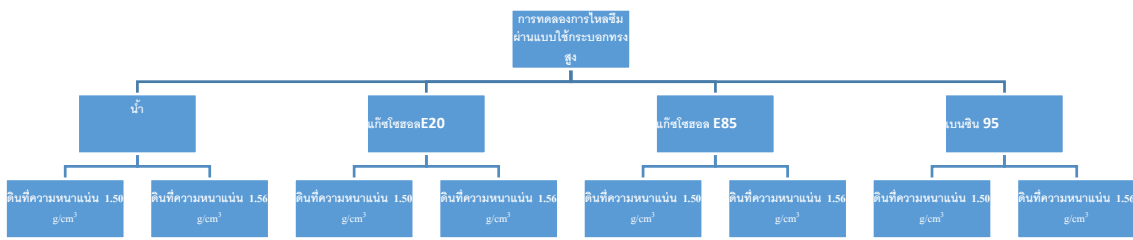
### 3.3 วิธีการทดลอง

ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างในการทดลองการไหลซึมผ่านแบบใช้กระบอกทรงสูงสามารถทำได้โดยทำการบรรจุทรายลงในกระบอกทรงสูงและทำการบดอัดแบบเปียก (Wet compaction) โดยบดอัดให้ทรายมีความหนาแน่น 1.50 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร จากนั้นทำทรายให้อิ่มตัวด้วยน้ำ โดยให้น้ำซึมขึ้นจากด้านล่างอย่างช้าๆ จนซึมมาถึงที่ผิวบนสุดของทราย จากนั้นทิ้งไว้ 30 นาที นำน้ำส่วนเกินทิ้ง ให้น้ำอยู่ในระดับเท่ากับผิวทรายชั้นบนสุด ส่วนการทดลองกับน้ำมันเบนซินออกเทน 95 และน้ำมันแก๊สโซฮอล์ สามารถทำได้เช่นเดียวกันโดยเปลี่ยนของเหลวจากน้ำเป็นน้ำมันเบนซินออกเทน 95 และน้ำมันแก๊สโซฮอล์ E20 และน้ำมันแก๊สโซฮอล์ E85 ตามลำดับ โดยในแต่ละของเหลว ความหนาแน่นของทรายจะมีทั้งสิ้น 2 ค่า คือ 1.50 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร และ 1.56 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ตามลำดับ

หลังจากกระบวนการเตรียมการทดลองข้างต้นเสร็จสิ้น สามารถดำเนินการทดลองได้โดยเปิดวาล์วด้านล่างของท่อพีวีซี ให้ของเหลวไหลออกกระบอกทรงสูงโดยปล่อยให้จนกระทั่งไม่มีของเหลวไหลออกมาจากกระบอกทรงสูงจึงทำการเก็บตัวอย่างดินทรายจากจุดเก็บตัวอย่างโดยใช้ท่อเก็บตัวอย่างประมาณ 150 กรัม ตัวอย่างที่ได้ในแต่ละการทดลองมีทั้งสิ้น 9 ตัวอย่าง นำตัวอย่างดินดังกล่าวไปเข้าเตาอบที่อุณหภูมิ  $110 \pm 5$  องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วนำมาชั่งน้ำหนักเพื่อหาค่าความชื้นที่ระดับต่างๆ กัน ทำการทดลองโดยใช้ของเหลวแตกต่างกัน 4 อย่างได้แก่ น้ำกลั่น, น้ำมันเบนซินออกเทน 95, และน้ำมันแก๊สโซฮอล์ E20, และน้ำมันแก๊สโซฮอล์ E85 ตามลำดับ จากนั้นนำค่าที่ได้จากการทดลองไปเขียนเส้นโค้งลักษณะเฉพาะดินกับน้ำ

### 3.4 แผนการทดลอง

แผนการทดลองการไหลซึมผ่านแบบใช้กระบอกทรงสูงแสดงดังรูปที่ 3-7



รูปที่ 3-7 แผนการทดลองการไหลซึมผ่านแบบใช้กระบอกทรงสูง

### 3.5 ผลการทดลอง

ของเหลวที่ใช้ในการทดลอง 4 ชนิด คือ น้ำ, น้ำมันเบนซิน 95, แก๊สโซฮอล์ E20, และแก๊สโซฮอล์ E85 ผลการทดลองที่ได้จะจำแนกผลการทดลองของของเหลวแต่ละชนิด โดยการใช้สมการของ Brooks and Corey (BC), van Genuchten (VG), และ Kosugi (LN) โดยผลการทดลองจะแสดงเปรียบเทียบความสัมพันธ์ของการไหลซึมผ่านที่ความหนาแน่น 2 ค่า คือ ความหนาแน่น 1.50 และ 1.56 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ตามลำดับ และมีการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างของเหลวชนิดต่างๆ ที่ความหนาแน่นต่างกัน จากการทดลองทำการกำหนดระดับน้ำที่ 0 เซนติเมตรให้อิ่มตัวด้วยน้ำตลอดเวลาจึงกำหนดให้ค่าเปอร์เซ็นต์การอิ่มตัว (%S) เท่ากับ 100 % และค่า Volumetric water content ที่ความหนาแน่น 1.50 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร เท่ากับ 0.43 และค่า Volumetric water content ที่ความหนาแน่น 1.56 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร เท่ากับ 0.41 ตามลำดับ ส่วนที่ความสูง 10 เซนติเมตรค่าที่ทำการวัดมีค่าน้อยมาก ทำให้เส้นโค้งลักษณะเฉพาะดินกับน้ำมีค่าคลาดเคลื่อนจากความเป็นจริง จึงต้องมีการปรับแก้ค่าเพื่อให้เส้นโค้งลักษณะเฉพาะดินกับน้ำมีความถูกต้องมากขึ้น ผลการทดลองการไหลแบบใช้กระบอกทรงสูงมีดังนี้

#### 3.5.1 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำกับอากาศ

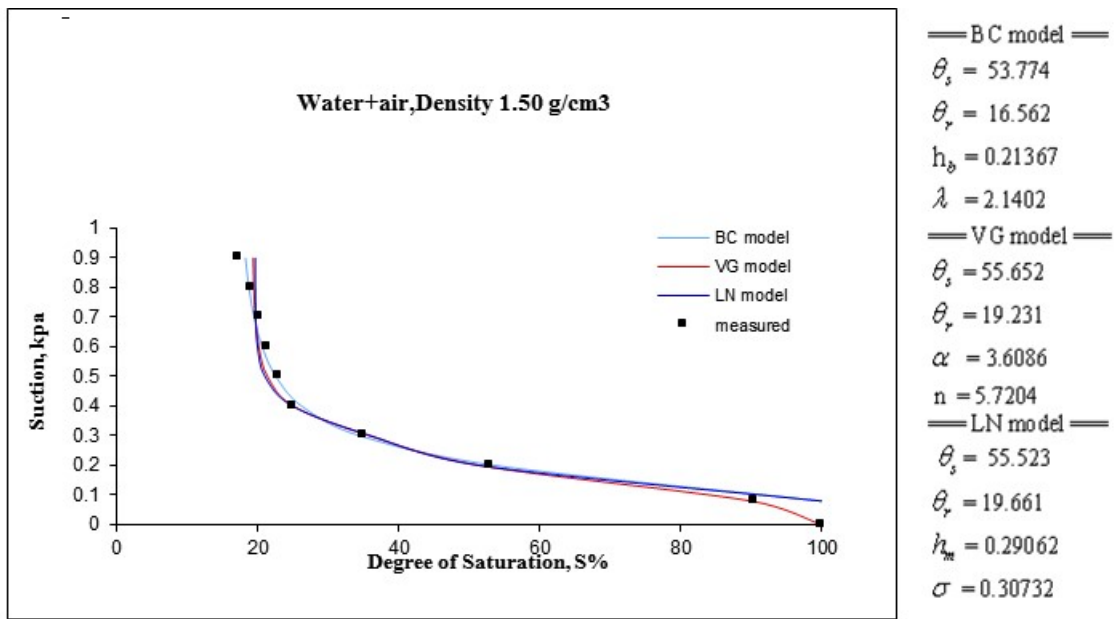
ผลการทดลองความสัมพันธ์ระหว่างน้ำกับอากาศ ที่ความหนาแน่น 1.50 และ 1.56 g/cm<sup>3</sup> แสดงในตารางที่ 3-3 และ 3-4 ตามลำดับ เมื่อนำข้อมูลมาเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระดับชั้นความอิ่มตัว (Degree of Saturation) กับ ค่าแรงดูด (Suction) และกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Volumetric water content กับ ค่าแรงดูด (Suction) โดยการใช้สมการของ Brooks and Corey (BC), van Genuchten (VG), Kosugi (LN) สามารถแสดงดังรูปที่ 3-8 ถึง 3-11 และวิเคราะห์ตัวแปรได้ดังตารางที่ 3-5

ตารางที่ 3-3 ผลการทดลองความสัมพันธ์ระหว่างน้ำกับอากาศ ที่ความหนาแน่น 1.50 g/cm<sup>3</sup>

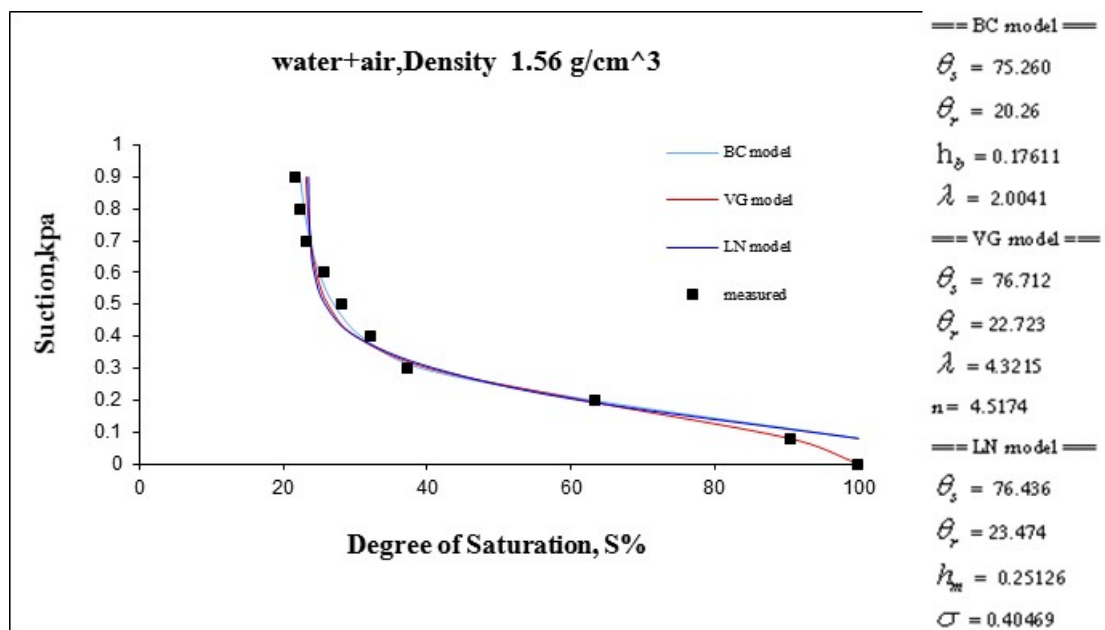
Capillary Pressure (kPa)	Volumetric Water Content, $\theta$	Degree of Saturation, S%
0.9	0.074	17.277
0.8	0.082	18.996
0.7	0.087	20.153
0.6	0.091	21.279
0.5	0.099	22.947
0.4	0.108	25.032
0.3	0.150	34.971
0.2	0.227	52.873
0.1	*0.40(0.235)	*90.000(70.25)
0	*0.430	*100.000

ตารางที่ 3-4 ผลการทดลองความสัมพันธ์ระหว่างน้ำกับอากาศ ที่ความหนาแน่น 1.56 g/cm<sup>3</sup>

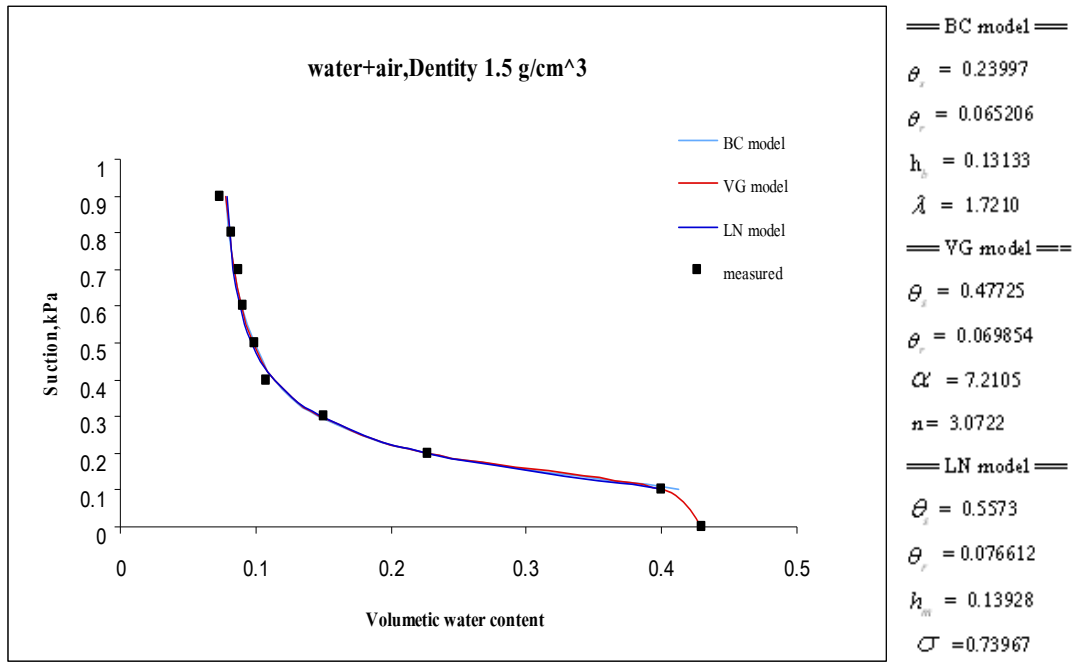
Capillary Pressure (kPa)	Volumetric Water Content, $\theta$	Degree of Saturation, S%
0.9	0.089	21.681
0.8	0.092	22.419
0.7	0.095	23.289
0.6	0.106	25.750
0.5	0.115	28.039
0.4	0.132	32.240
0.3	0.153	37.303
0.2	0.259	63.229
0.1	*0.38(0.308)	*90.400(75.25)
0	*0.410	*100.000



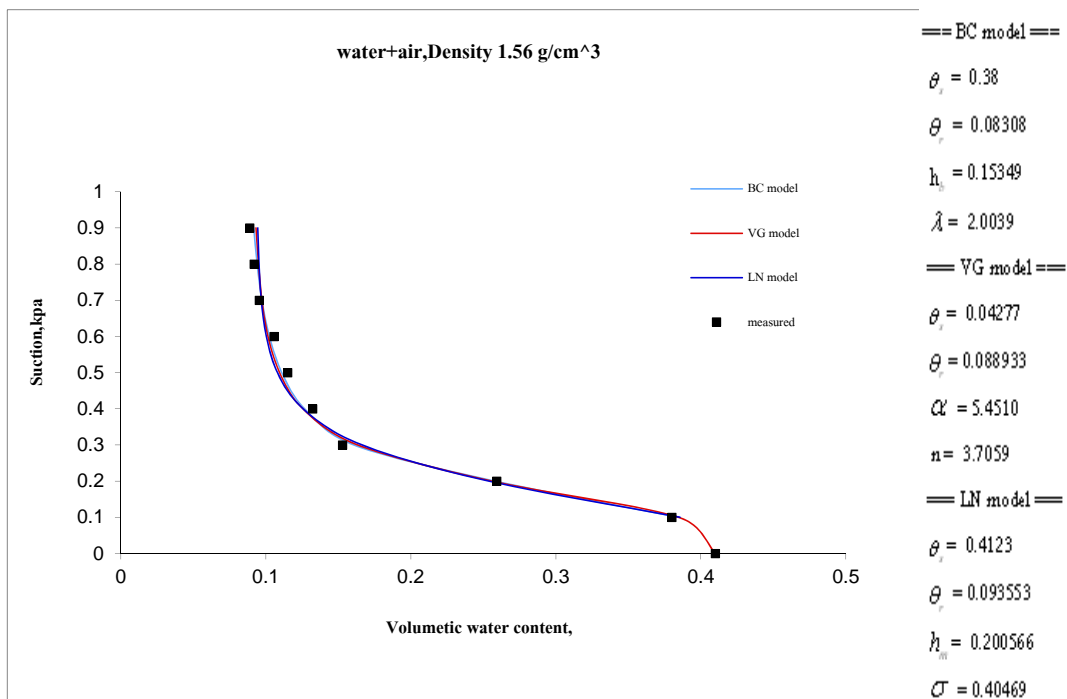
รูปที่ 3-8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระดับชั้นความอิ่มตัว (Degree of Saturation) กับ ค่าแรงดูด (Suction) ของน้ำกับอากาศ ที่ความหนาแน่นของทราย 1.50 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร



รูปที่ 3-9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระดับชั้นความอิ่มตัว (Degree of Saturation) กับ ค่าแรงดูด (Suction) ของน้ำกับอากาศ ที่ความหนาแน่นของทราย 1.56 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร



รูปที่ 3-10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Volumetric water content กับ ค่าแรงดูด (Suction) ของ น้ำกับอากาศ ที่ความหนาแน่นของทราย 1.50 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร



รูปที่ 3-11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Volumetric water content กับ ค่าแรงดูด (Suction) ของ น้ำกับอากาศ ที่ความหนาแน่นของทราย 1.56 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร

ตารางที่ 3-5 แสดงค่าต่างๆที่ได้จากกราฟ รูปที่ 3-8 ถึง 3-11 (VG Model)

Density (g/cm <sup>3</sup> )	Air-entry (kPa)	Irreducible saturation, S%	Residual Water Content, $\theta$
1.50	0.08	19.37	0.082
1.56	0.08	23.18	0.097

### 3.5.2 ความสัมพันธ์ระหว่าง แก๊สโซฮอล์ E20 กับ อากาศ

ผลการทดลองของความสัมพันธ์ระหว่างแก๊สโซฮอล์ E20 กับอากาศ ที่ความหนาแน่น 1.50 และ 1.56 g/cm<sup>3</sup> แสดงในตารางที่ 3-6 และ 3-7 ตามลำดับ เมื่อนำข้อมูลมาเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระดับชั้นความอิ่มตัว (Degree of Saturation) กับ ค่าแรงดูด (Suction) และกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Volumetric water content กับ ค่าแรงดูด (Suction) โดยการใช้สมการของ Brooks and Corey (BC), van Genuchten (VG), Kosugi (LN) สามารถแสดงดังรูปที่ 3-12 ถึง 3-15 และวิเคราะห์ตัวแปรได้ดังตารางที่ 3-8

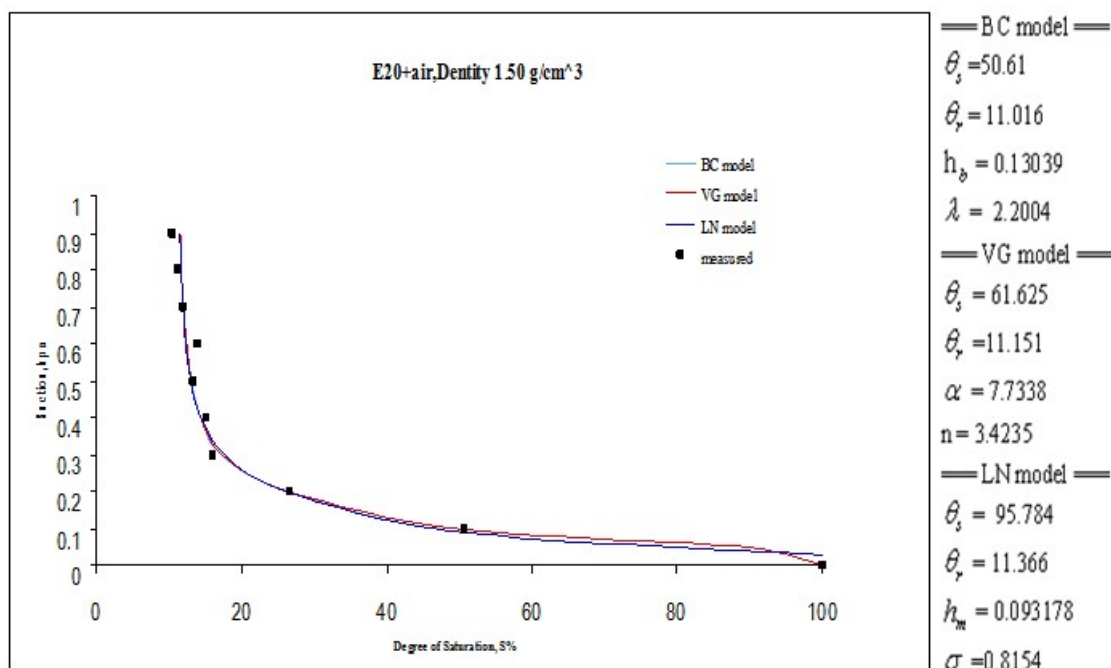
ตารางที่ 3-6 ผลการทดลองความสัมพันธ์ระหว่างแก๊สโซฮอล์ E20 กับอากาศ ที่ความหนาแน่น 1.50 g/cm<sup>3</sup>

Capillary Pressure (kPa)	Volumetric Water content, $\theta$	Degree of Saturation, S%
0.9	0.045	10.505
0.8	0.049	11.297
0.7	0.051	11.926
0.6	0.060	13.956
0.5	0.058	13.381
0.4	0.065	15.116
0.3	0.069	16.097
0.2	0.115	26.699
0.1	0.234	50.610
0	*0.430	*100.000

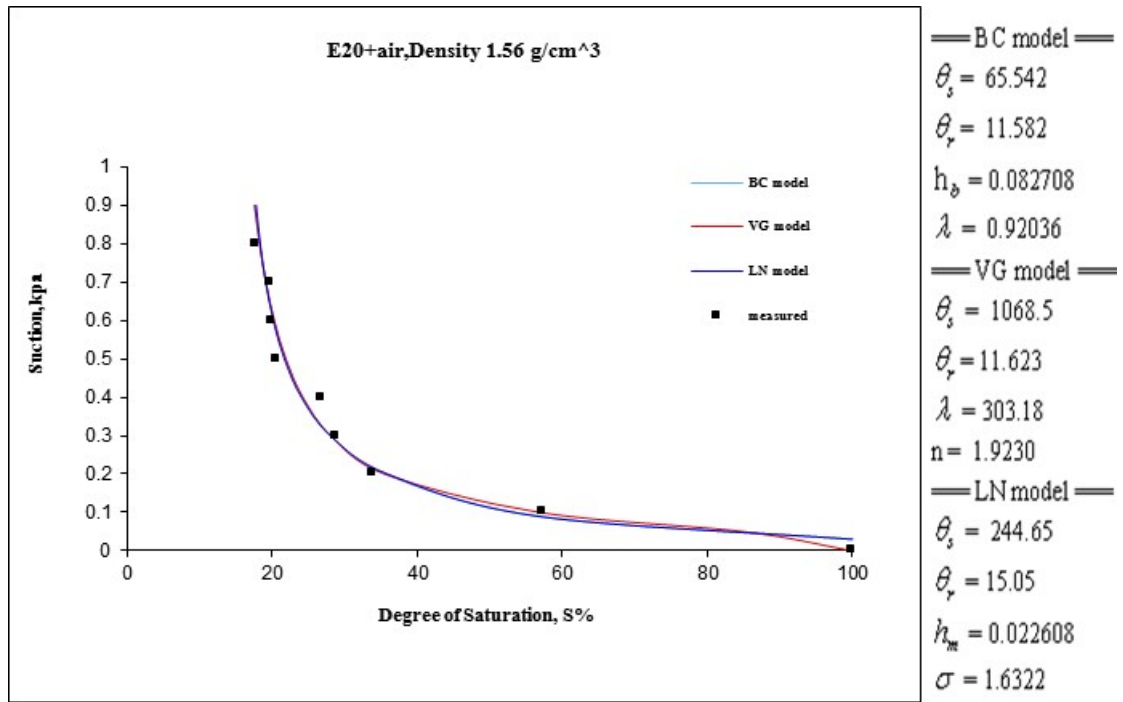


ตารางที่ 3-7 ผลการทดลองความสัมพันธ์ระหว่างแก๊สโซฮอลล์ E20 กับอากาศ ที่ความหนาแน่น 1.56 g/cm<sup>3</sup>

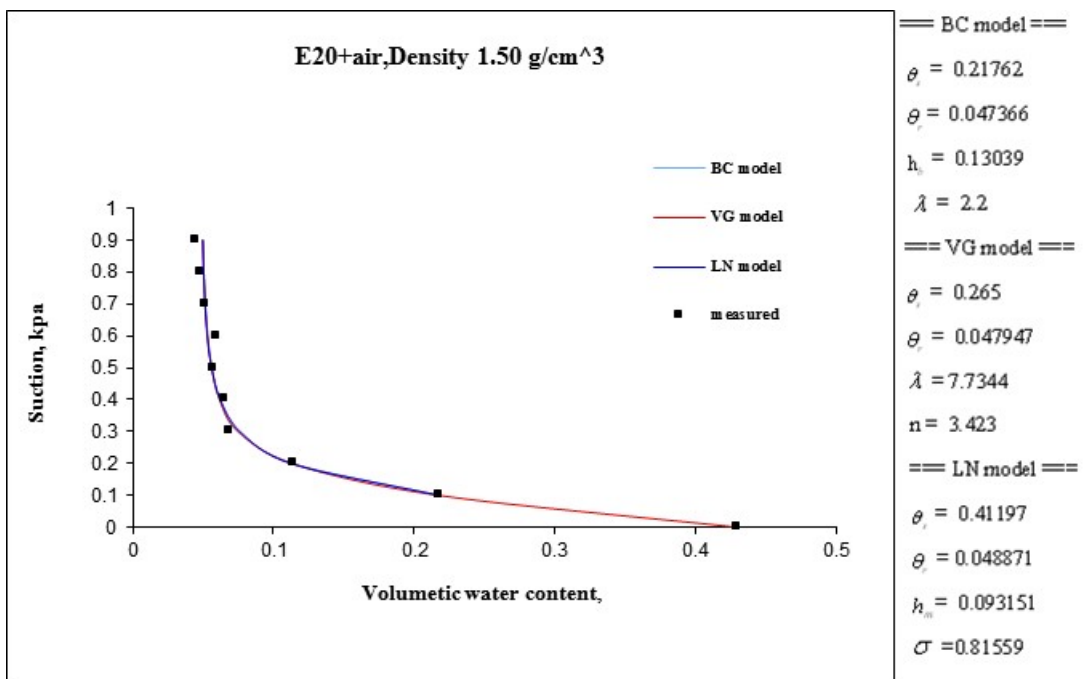
Capillary Pressure (kPa)	Volumetric Water Content, $\theta$	Degree of Saturation, S %
0.9	0.071	17.394
0.8	0.072	17.700
0.7	0.080	19.732
0.6	0.081	19.871
0.5	0.084	20.573
0.4	0.110	26.879
0.3	0.117	28.683
0.2	0.138	33.867
0.1	0.234	57.212
0	*0.410	*100.000



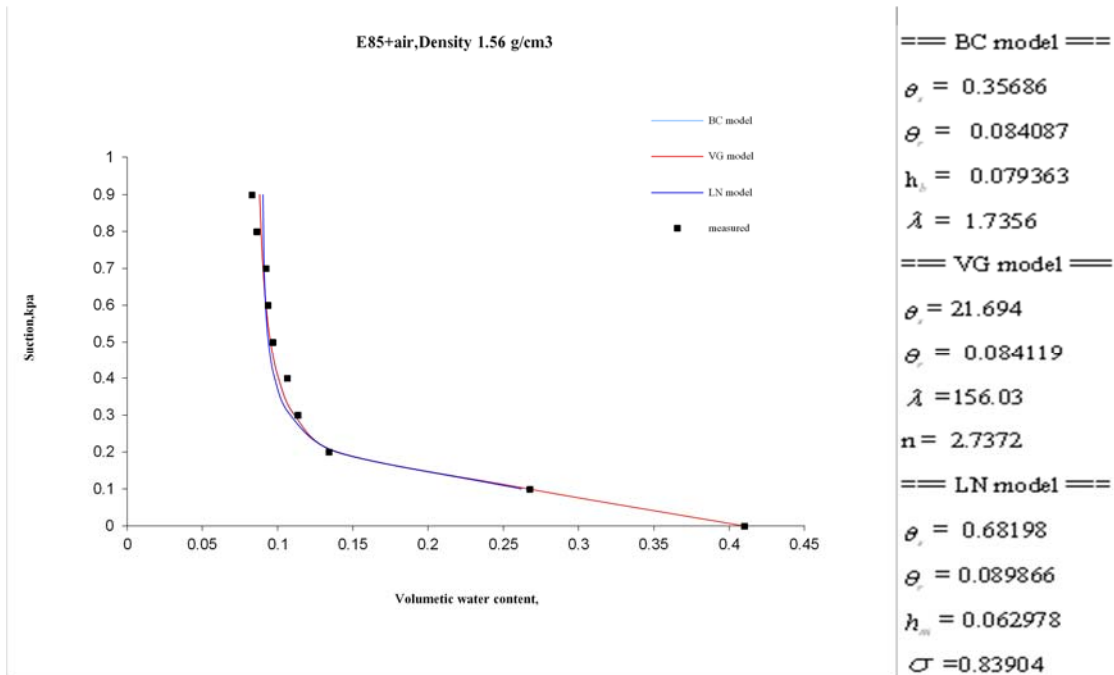
รูปที่ 3-12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระดับชั้นความอิ่มตัว (Degree of Saturation) กับ ค่าแรงดูด (Suction) ของแก๊สโซฮอลล์ E20 กับอากาศ ที่ความหนาแน่นของทราย 1.50 g/cm<sup>3</sup>



รูปที่ 3-13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระดับชั้นความอิ่มตัว (Degree of Saturation) กับ ค่าแรงดูด (Suction) ของแก๊สโซฮอล์ E20 กับอากาศ ที่ความหนาแน่นของทราย 1.56 g/cm<sup>3</sup>



รูปที่ 3-14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Volumetric water content กับ ค่าแรงดูด (Suction) ของ แก๊สโซฮอล์ E20 กับอากาศ ที่ความหนาแน่นของทราย 1.50 g/cm<sup>3</sup>



รูปที่ 3-15 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Volumetric water content กับ ค่าแรงดูด (Suction) ของ แก๊สโซฮอล์ E20 กับอากาศ ที่ความหนาแน่นของทราย 1.56 g/cm<sup>3</sup>

ตารางที่ 3-8 ค่าต่างๆที่ได้จากกราฟที่ 3-12 ถึง 3-15 (VG Model)

Density g/cm <sup>3</sup>	Air-entry (kPa)	Irreducible of saturation, S%	Residual Water Content, $\theta$
1.50	0.03	11.07	0.080
1.56	0.03	17.59	0.071

### 3.5.3 ผลการทดลองความสัมพันธ์ระหว่าง แก๊สโซฮอล์ E85 กับ อากาศ

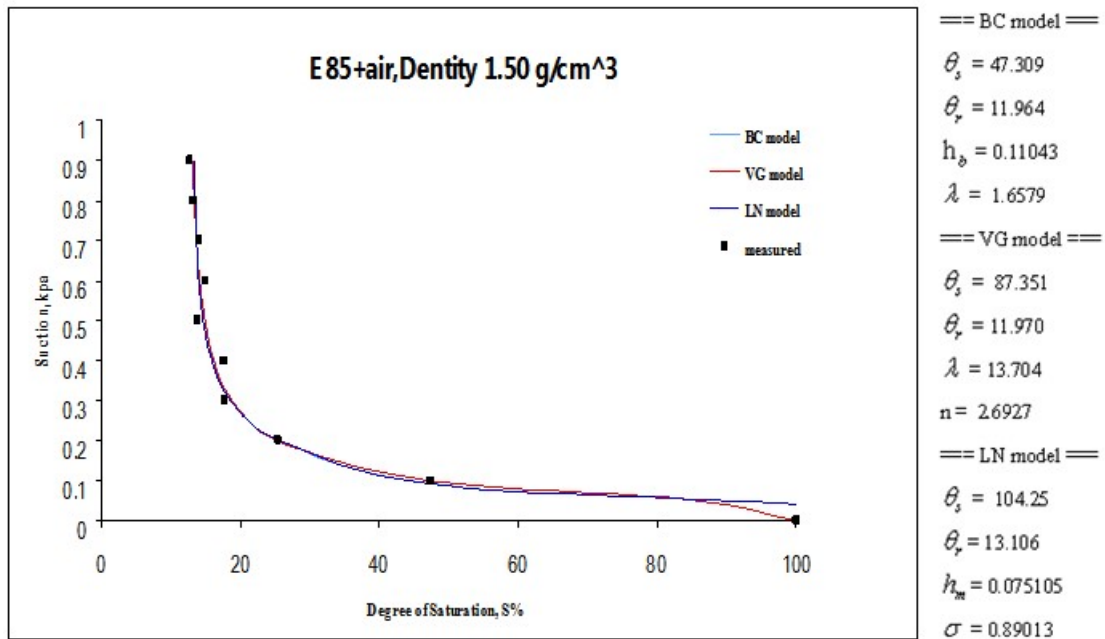
ผลการทดลองของความสัมพันธ์ระหว่างแก๊สโซฮอล์ E85 กับอากาศ ที่ความหนาแน่น 1.50 และ 1.56 g/cm<sup>3</sup> แสดงดังตารางที่ 3-9 และ 3-10 ตามลำดับ เมื่อนำข้อมูลมาเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระดับขึ้นความอิ่มตัว (Degree of Saturation) กับ ค่าแรงดูด (Suction) และกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Volumetric water content กับ ค่าแรงดูด (Suction) โดยการใช้สมการของ Brooks and Corey (BC), van Genuchten (VG), และ Kosugi (LN) สามารถแสดงดังรูปที่ 3-16 ถึง 3-19 และวิเคราะห์ตัวแปรได้ดังตารางที่ 3-11

ตารางที่ 3-9 ผลการทดลองความสัมพันธ์ระหว่างแก๊สโซฮอล์ E85 กับอากาศ ที่ความหนาแน่น 1.50 g/cm<sup>3</sup>

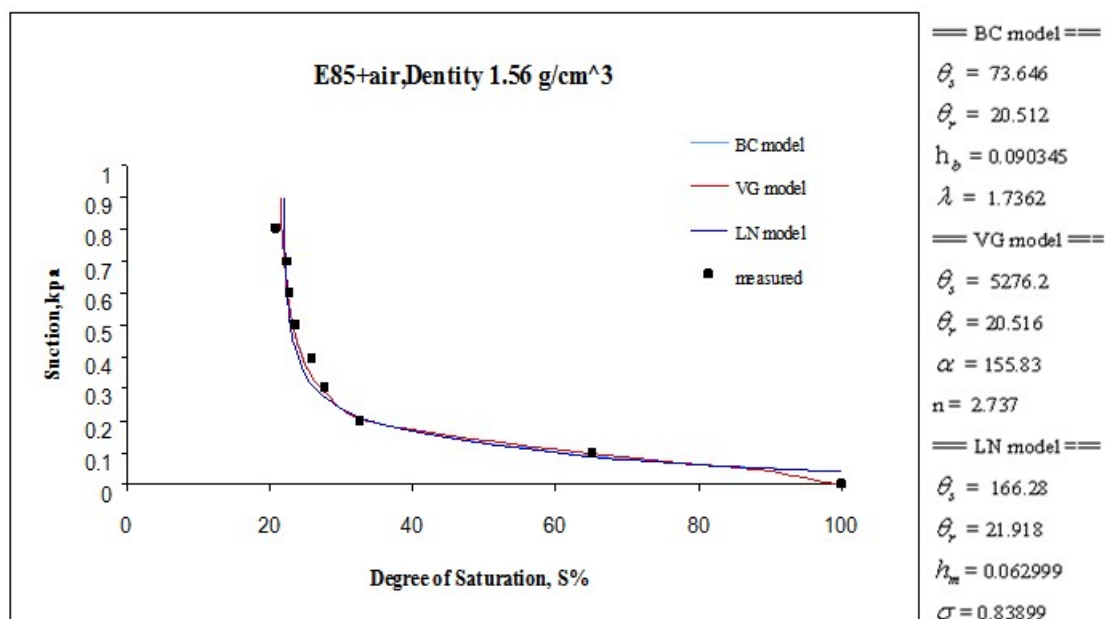
Capillary Pressure (kPa)	Volumetric Water, $\theta$	Degree of Saturation, S%
0.9	0.054	12.642
0.8	0.056	13.110
0.7	0.056	13.035
0.6	0.064	14.894
0.5	0.059	13.731
0.4	0.076	17.574
0.3	0.076	17.759
0.2	0.109	25.334
0.1	0.203	47.309
0	*0.430	*100.000

ตารางที่ 3-10 ผลการทดลองความสัมพันธ์ระหว่างแก๊สโซฮอล์ E85 กับอากาศ ที่ความหนาแน่น 1.50 g/cm<sup>3</sup>

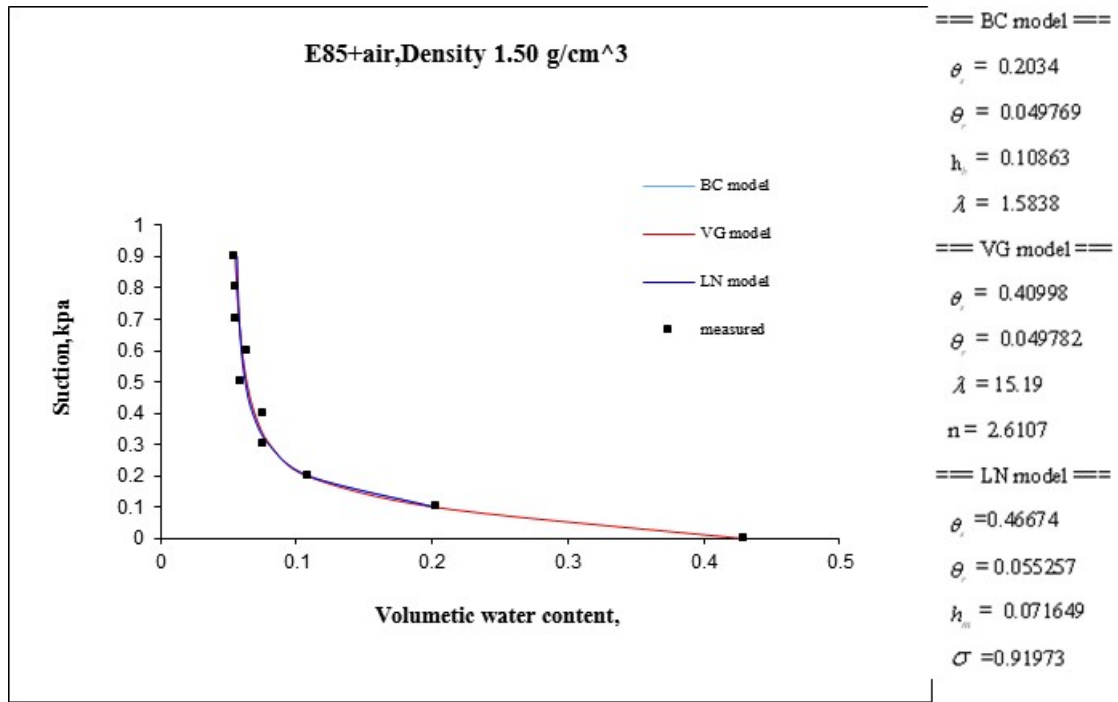
Capillary Pressure (kPa)	Volumetric Water, $\theta$	Degree of Saturation, S%
0.9	0.083	20.222
0.8	0.086	20.963
0.7	0.092	22.509
0.6	0.093	22.801
0.5	0.097	23.608
0.4	0.106	25.926
0.3	0.113	27.665
0.2	0.134	32.663
0.1	0.267	65.216
0	*0.410	*100.000



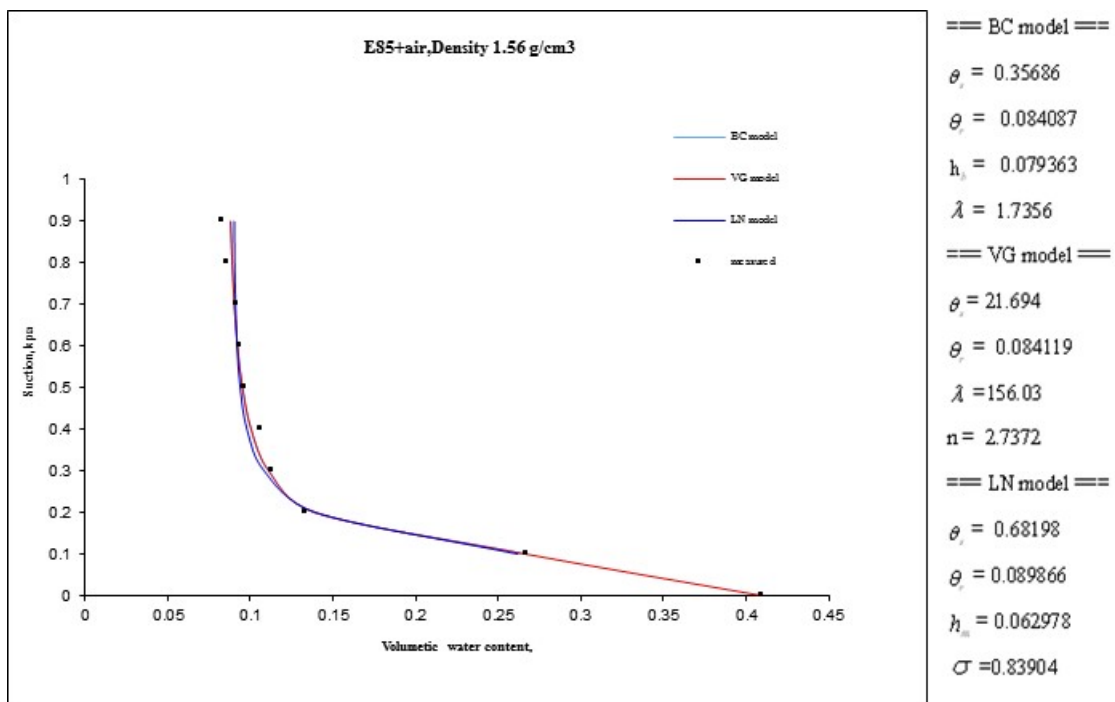
รูปที่ 3-16 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระดับชั้นความอิ่มตัว (Degree of Saturation) กับค่าแรงดูด (Suction) ของแก๊สโซฮอล์ E85 กับอากาศ ที่ความหนาแน่นของทราย 1.50 g/cm<sup>3</sup>



รูปที่ 3-17 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระดับชั้นความอิ่มตัว (Degree of Saturation) กับ ค่าแรงดูด (Suction) ของแก๊สโซฮอล์ E85 กับอากาศ ที่ความหนาแน่นของทราย 1.56 g/cm<sup>3</sup>



รูปที่ 3-18 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Volumetric water content กับ ค่าแรงดูด (Suction) ของแก๊สโซฮอล์ E85 กับอากาศ ที่ความหนาแน่นของทราย 1.50 g/cm<sup>3</sup>



รูปที่ 3-19 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Volumetric water content กับ ค่าแรงดูด (Suction) ของแก๊สโซฮอล์ E85 กับอากาศ ที่ความหนาแน่นของทราย 1.56 g/cm<sup>3</sup>

ตารางที่ 3-11 ค่าต่างๆที่ได้จากกราฟ ที่ 3-16 ถึง 3-19 (VG Model)

Density g/cm <sup>3</sup>	Air-entry (kPa)	Irreducible saturation, S%	Residual Water Content, $\theta$
1.50	0.04	12.64	0.054
1.56	0.04	21.50	0.88

### 3.5.4 ความสัมพันธ์ระหว่าง น้ำมันเบนซิน 95 กับ อากาศ

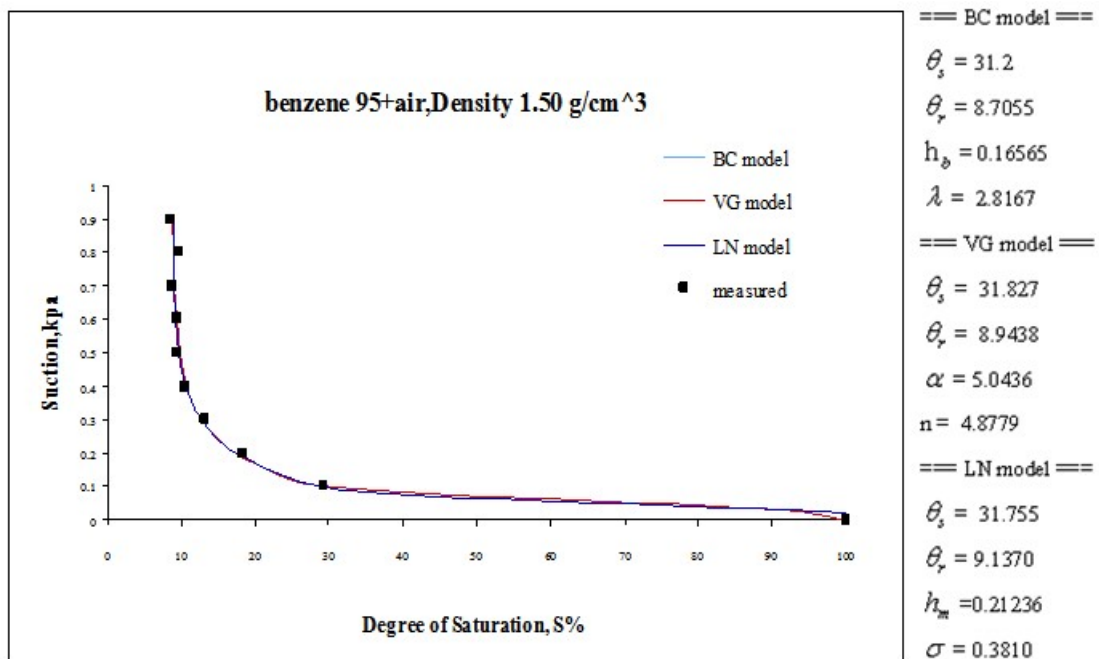
ผลการทดลองของความสัมพันธ์ระหว่างเบนซิน 95 กับอากาศ ที่ความหนาแน่น 1.50 และ 1.56 g/cm<sup>3</sup> แสดงในตารางที่ 3-12 และ 3-13 ตามลำดับ เมื่อนำข้อมูลมาเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระดับชั้นความอิ่มตัว (Degree of Saturation) กับ ค่าแรงดูด (Suction) และกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Volumetric water content กับ ค่าแรงดูด (Suction) โดยการใช้สมการของ Brooks and Corey (BC), van Genuchten (VG), และ Kosugi (LN) สามารถแสดงดังรูปที่ 3-20 ถึง 3-23 และวิเคราะห์หัวแปรได้ดังตารางที่ 3-14

ตารางที่ 3-12 ผลการทดลองความสัมพันธ์ระหว่างเบนซิน 95 กับอากาศ ที่ความหนาแน่น 1.50 g/cm<sup>3</sup>

Capillary Pressure (kPa)	Volumetric Water, $\theta$	Degree of Saturation, S%
0.9	0.037	8.583
0.8	0.041	9.590
0.7	0.038	8.883
0.6	0.041	9.448
0.5	0.041	9.482
0.4	0.045	10.431
0.3	0.056	13.088
0.2	0.094	21.915
0.1	0.106	31.200
0	*0.430	*100.000

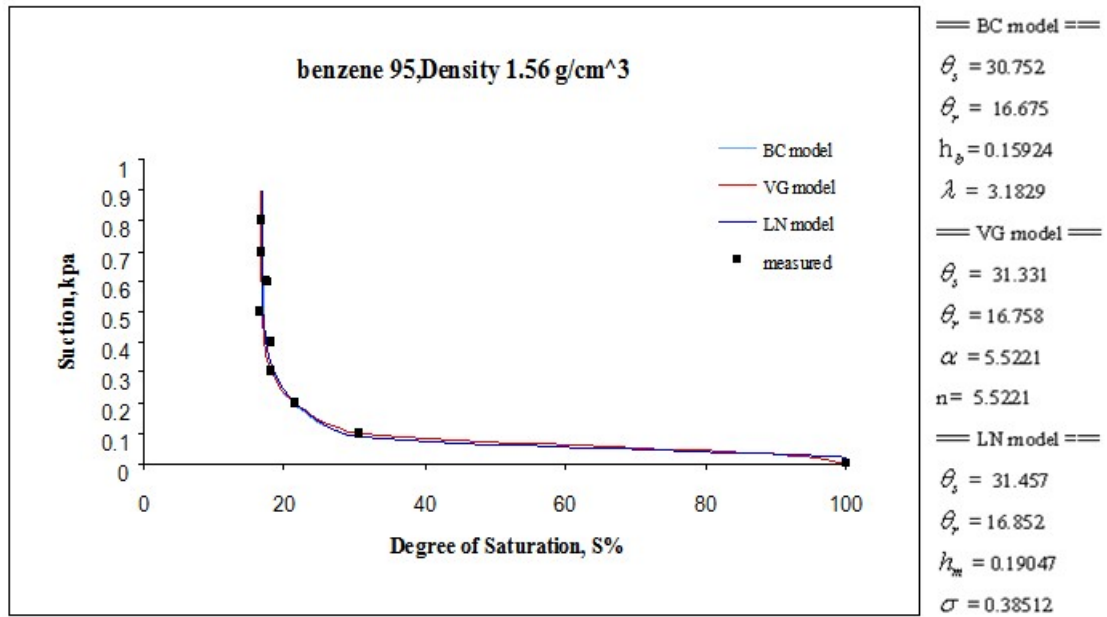
ตารางที่ 3-13 ผลการทดลองความสัมพันธ์ระหว่างเบนซิน 95 กับอากาศ ที่ความหนาแน่น 1.56 g/cm<sup>3</sup>

Capillary Pressure (kPa)	Volumetric Water, $\theta$	Degree of Saturation, S%
0.9	0.067	16.273
0.8	0.069	16.805
0.7	0.068	16.655
0.6	0.072	17.521
0.5	0.068	16.538
0.4	0.075	18.216
0.3	0.074	18.099
0.2	0.096	23.527
0.1	0.126	30.752
0	*0.410	*100.000

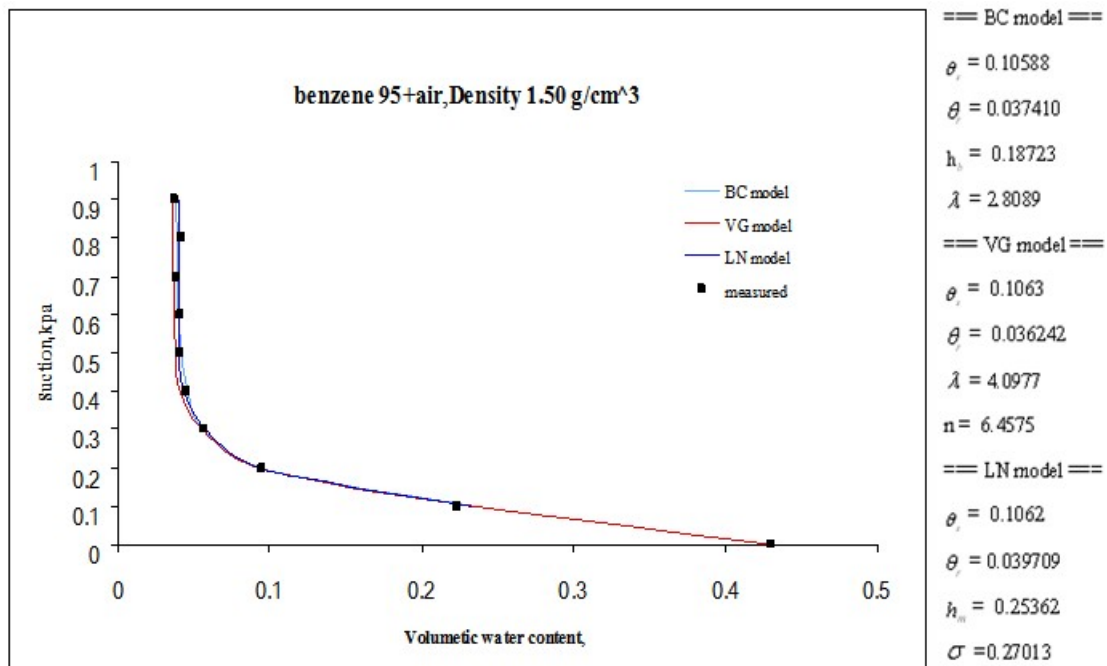


รูปที่ 3-20 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระดับชั้นความอิ่มตัว (Degree of Saturation) กับค่าแรงดูด (Suction) ของน้ำมันเบนซิน 95 กับอากาศ ที่ความหนาแน่นของทราย 1.50 g/cm<sup>3</sup>

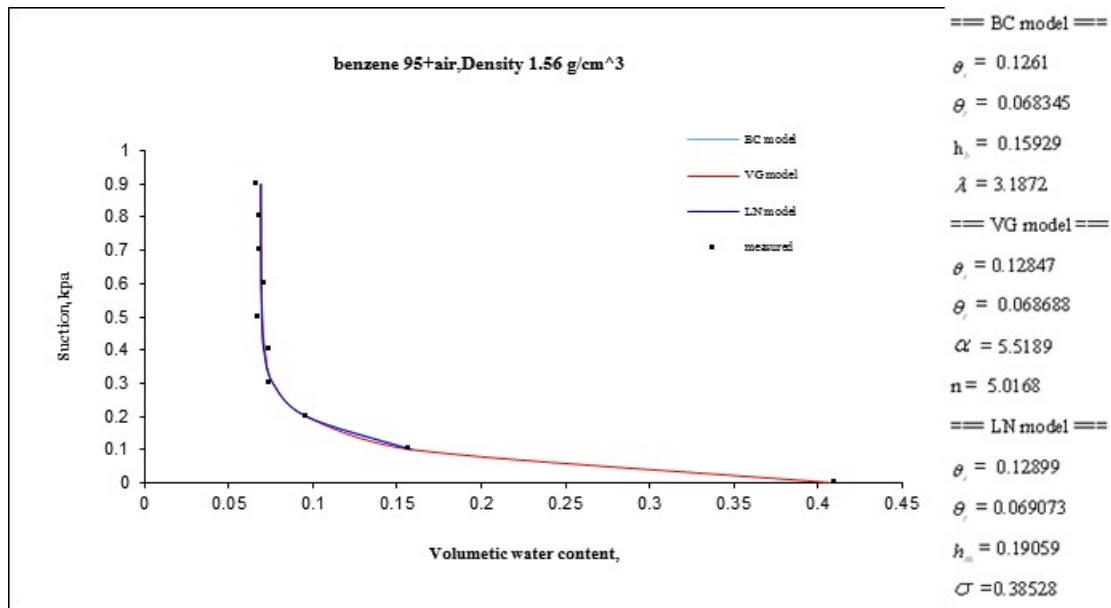




รูปที่ 3-21 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระดับชั้นความอิ่มตัว (Degree of Saturation) กับค่าแรงดูด (Suction) ของน้ำมันเบนซิน 95 กับอากาศ ที่ความหนาแน่นของทราย 1.56 g/cm<sup>3</sup>



รูปที่ 3-22 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Volumetric water content กับ ค่าแรงดูด (Suction) ของ น้ำมันเบนซิน 95 กับอากาศ ที่ความหนาแน่นของทราย 1.50 g/cm<sup>3</sup>



รูปที่ 3-23 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Volumetric water content กับ ค่าแรงดูด (Suction) ของ น้ำมันเบนซิน 95 กับอากาศ ที่ความหนาแน่นของทราย 1.50 g/cm<sup>3</sup>

ตารางที่ 3-14 ค่าต่างๆที่ได้จากกราฟที่ 3-20 ถึง 3-23 (VG Model)

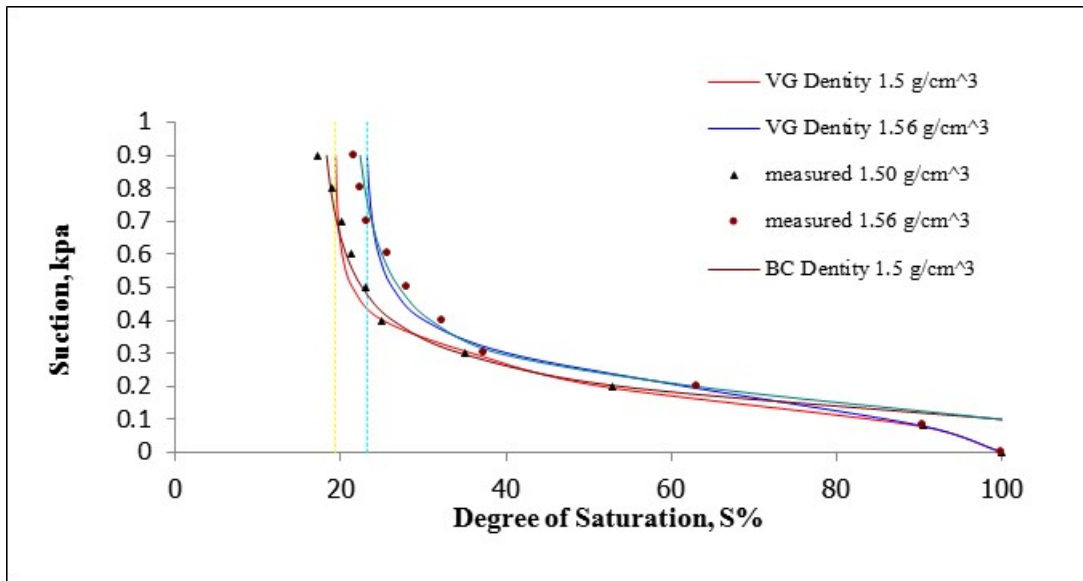
Density g/cm <sup>3</sup>	Air-entry (kPa)	Irreducible of saturation, S%	Residual Water Content, $\theta$
1.50	0.02	8.583	0.037
1.56	0.02	16.768	0.069

### 3.6 วิเคราะห์ผลการทดลอง

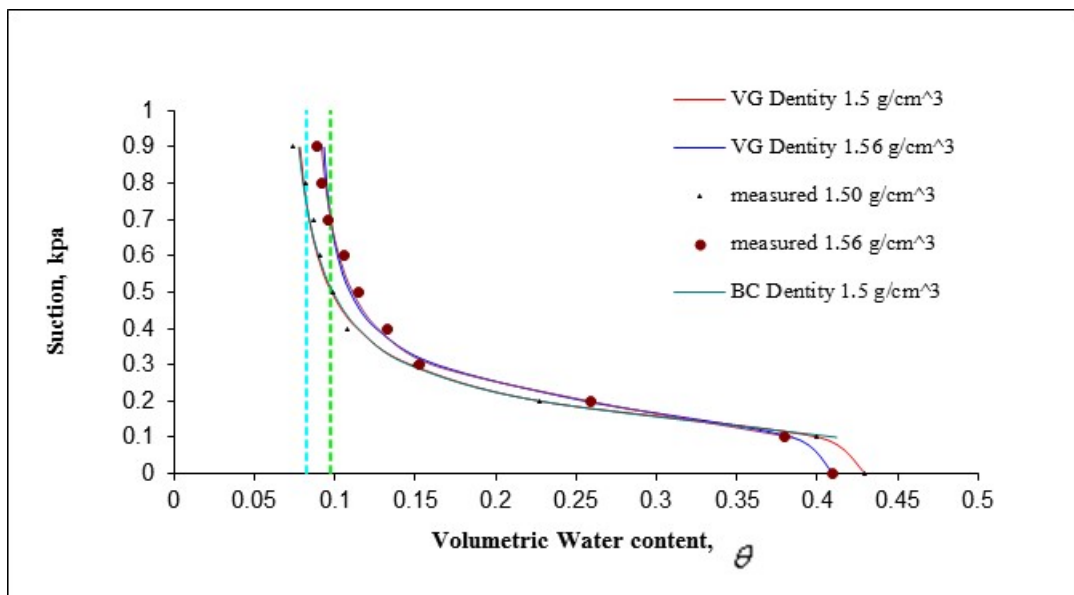
เปรียบเทียบผลการทดลองที่ความหนาแน่น 1.50 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตรและความหนาแน่น 1.56 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ที่ของเหลวน้ำ, แก๊สโซฮอล์ E20, แก๊สโซฮอล์ E85, น้ำมันเบนซิน95 โดยใช้สมการของ Van Genuchten (VG), Brooks and Corey (BC)

#### 3.6.1 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่าง น้ำ กับ อากาศ ที่ความหนาแน่นของทรายแตกต่างกัน

การเปรียบเทียบผลการทดลองความสัมพันธ์ระหว่างน้ำ กับ อากาศ ที่ความหนาแน่นของทรายที่แตกต่างกันคือ 1.50 และ 1.56 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร แสดงดังรูปที่ 3-24 และ 3-25 ตามลำดับ ค่า Air-entry และ Irreducible saturation สามารถสรุปความสัมพันธ์ระหว่างน้ำกับอากาศ ที่ความหนาแน่นของทรายที่แตกต่างกันได้ดังตารางที่ 3-15 และ 3-16



รูปที่ 3-24 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระดับชั้นความอิ่มตัว (Degree of Saturation) กับค่าแรงดูด (Suction) ของน้ำกับอากาศที่ความหนาแน่น 1.50 g/cm<sup>3</sup> และความหนาแน่น 1.56 g/cm<sup>3</sup>



รูปที่ 3-25 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Volumetric water content กับ ค่าแรงดูด (Suction) ของน้ำกับอากาศ ที่ความหนาแน่น 1.50 g/cm<sup>3</sup> และความหนาแน่น 1.56 g/cm<sup>3</sup>

ตารางที่ 3-15 แสดงค่า Air-entry และ Irreducible saturation (BC Model)

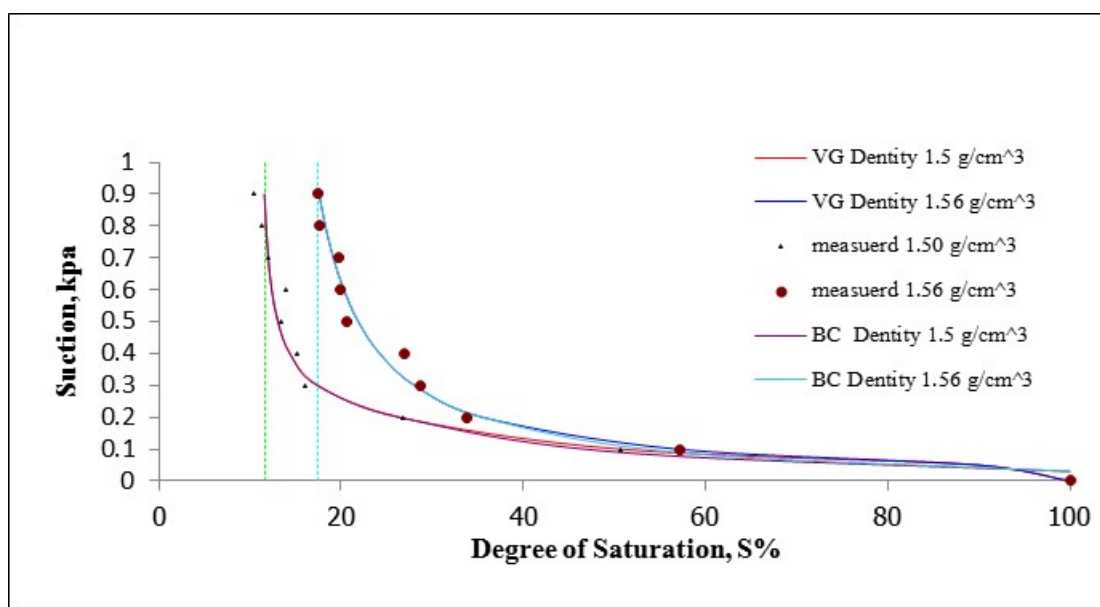
Density g/cm <sup>3</sup>	Air-entry (kPa)	Irreducible saturation, S%
1.50	0.08	19.370
1.56	0.08	23.177

ตารางที่ 3-16 แสดงค่า Air-entry และ Residual Water Content (VC Model)

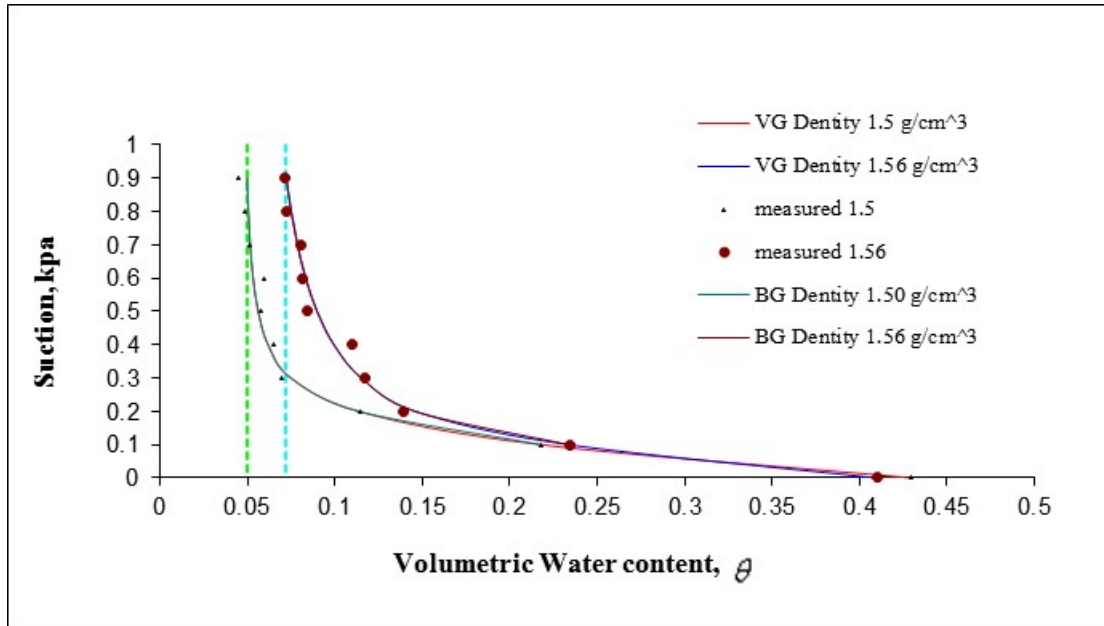
Density g/cm <sup>3</sup>	Air-entry (kPa)	Residual Water Content, $\theta$
1.50	0.08	0.082
1.56	0.08	0.097

### 3.6.2 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่าง แก๊สโซฮอลล์ E20 กับ อากาศ ที่ความหนาแน่นของทรายแตกต่างกัน

การเปรียบเทียบผลการทดลองความสัมพันธ์ระหว่างแก๊สโซฮอลล์ E20 กับ อากาศ ที่ความหนาแน่นของทรายที่แตกต่างกันคือ 1.50 และ 1.56 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร แสดงดังรูปที่ 3-26 และ 3-27ตามลำดับ ค่า Air-entry และ Irreducible saturation สามารถสรุปความสัมพันธ์ระหว่างแก๊สโซฮอลล์ E20 กับอากาศ ที่ความหนาแน่นของทรายที่แตกต่างกันได้ดังตารางที่ 3-17 และ 3-18



รูปที่ 3-26 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระดับชั้นความอิ่มตัว (Degree of Saturation) กับค่าแรงดูด (Suction) ของแก๊สโซฮอลล์ E20 กับอากาศที่ความหนาแน่น 1.50 g/cm<sup>3</sup> และความหนาแน่น 1.56 g/cm<sup>3</sup>



รูปที่ 3-27 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง volumetric water content กับ ค่าแรงดูด (Suction) ของ แก๊สไซซอล E20 กับอากาศ ที่ความหนาแน่น 1.50 g/cm<sup>3</sup> และความหนาแน่น 1.56 g/cm<sup>3</sup>

ตารางที่ 3-17 ค่า Air-entry และ Irreducible saturation (BC Model)

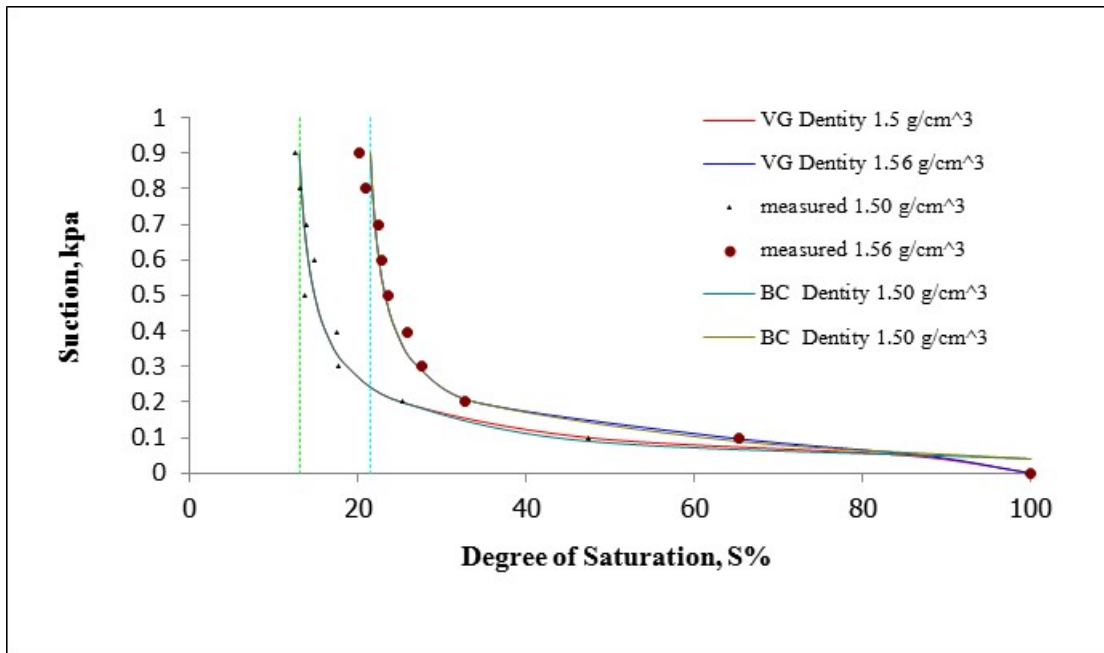
Density g/cm <sup>3</sup>	Air-entry (kPa)	Irreducible saturation, S%
1.50	0.04	11.609
1.56	0.04	17.394

ตารางที่ 3-18 ค่า Air-entry และ Residual Water Content (VG Model)

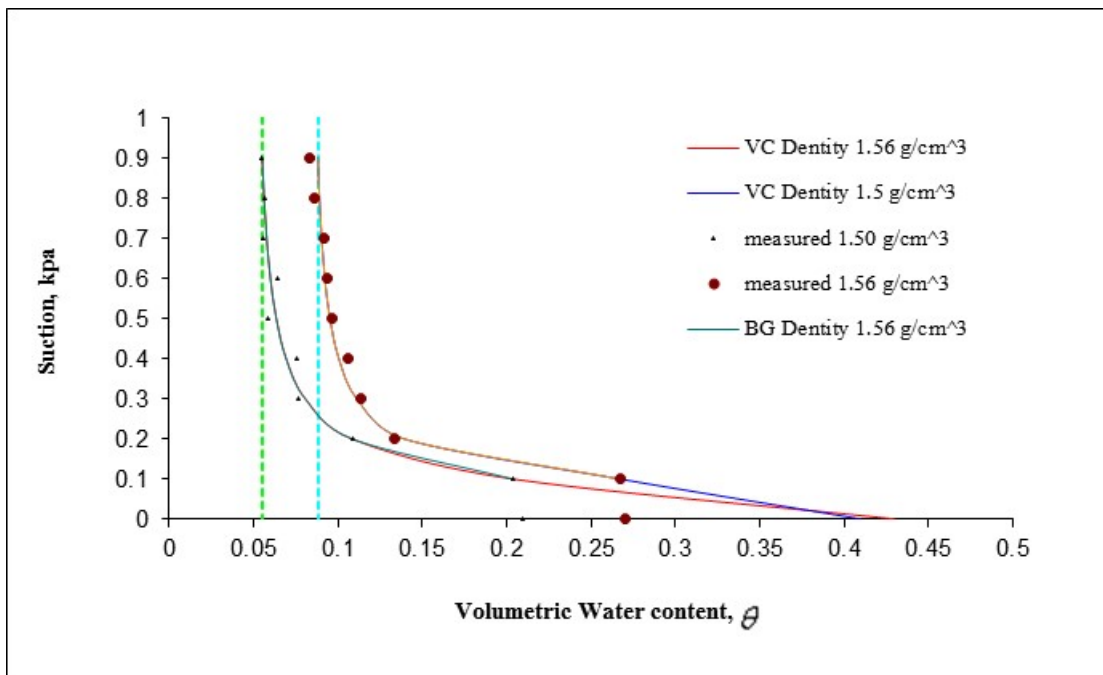
Density g/cm <sup>3</sup>	Air-entry (kPa)	Residual Water Content, $\theta$
1.50	0.04	0.050
1.56	0.04	0.071

### 3.6.3 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่าง แก๊สไซซอล E85 กับ อากาศ ที่ความหนาแน่นของทรายแตกต่างกัน

การเปรียบเทียบผลการทดลองความสัมพันธ์ระหว่างแก๊สไซซอล E85 กับ อากาศ ที่ความหนาแน่นของทรายที่ต่างกันคือ 1.50 และ 1.56 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร แสดงดังรูปที่ 3-28 และ 3-29 ตามลำดับ ค่า Air-entry และ Irreducible saturation สามารถสรุปความสัมพันธ์ระหว่างแก๊สไซซอล E85 กับอากาศ ที่ความหนาแน่นของทรายที่ต่างกันได้ดังตารางที่ 3-19 และ 3-20



รูปที่ 3-28 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระดับชั้นความอิ่มตัว (Degree of Saturation) กับค่าแรงดูด (Suction) ของแก๊สโซฮอล์ E85 กับอากาศที่ความหนาแน่น 1.50 g/cm<sup>3</sup> และความหนาแน่น 1.56 g/cm<sup>3</sup>



รูปที่ 3-29 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง volumetric water content กับ ค่าแรงดูด (Suction) ของแก๊สโซฮอล์ E85 กับอากาศ ที่ความหนาแน่น 1.50 g/cm<sup>3</sup> และความหนาแน่น 1.56 g/cm<sup>3</sup>

ตารางที่ 3-19 ค่า Air-entry และ Irreducible saturation จากรูปที่ 4.23 (BC Model)

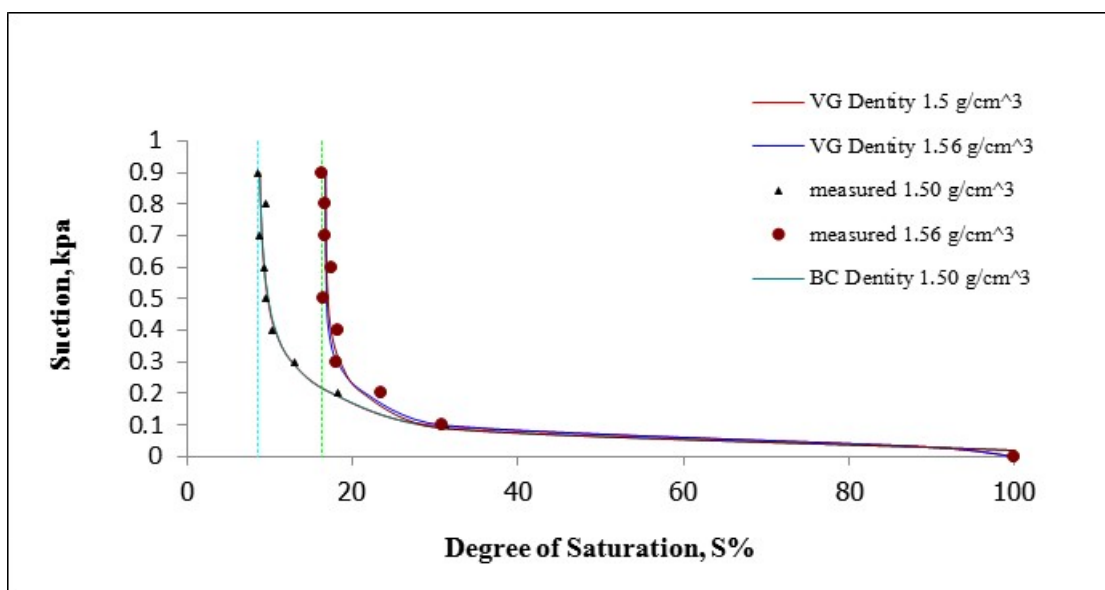
Density g/cm <sup>3</sup>	Air-entry (kPa)	Irreducible saturation, S%
1.50	0.03	12.641
1.56	0.03	21.497

ตารางที่ 3-20 ค่า Air-entry และ Residual Water Content จากรูปที่ 4.24 (VG Model)

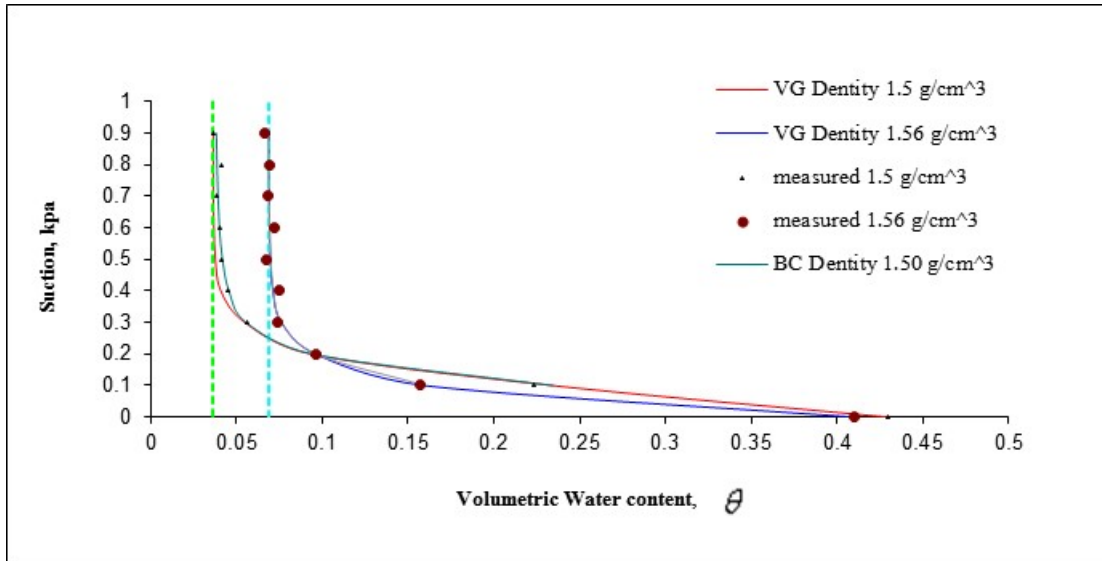
Density g/cm <sup>3</sup>	Air-entry (kPa)	Residual Water Content, $\theta$
1.50	0.03	0.054
1.56	0.03	0.088

### 3.6.4 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างน้ำมันเบนซิน 95 กับ อากาศ ที่ความหนาแน่นของทรายแตกต่างกัน

การเปรียบเทียบผลการทดลองความสัมพันธ์ระหว่างน้ำมันเบนซิน 95 กับ อากาศ ที่ความหนาแน่นของทรายที่แตกต่างกันคือ 1.50 และ 1.56 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร แสดงดังรูปที่ 3-30 และ 3-31 ตามลำดับ ค่า Air-entry และ Irreducible saturation สามารถสรุปความสัมพันธ์ระหว่างแก๊สโซฮอล์ E85 กับอากาศ ที่ความหนาแน่นของทรายที่แตกต่างกันได้ดังตารางที่ 3-21 และ 3-22



รูปที่ 3-30 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระดับชั้นความอิ่มตัว (Degree of Saturation) กับค่าแรงดูด (Suction) ของน้ำมันเบนซิน 95 กับอากาศที่ความหนาแน่น 1.50 g/cm<sup>3</sup> และความหนาแน่น 1.56 g/cm<sup>3</sup>



รูปที่ 3-31 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง volumetric water content กับ ค่าแรงดูด (Suction) ของน้ำมันเบนซิน 95 กับอากาศ ที่ความหนาแน่น 1.50 g/cm<sup>3</sup> และความหนาแน่น 1.56 g/cm<sup>3</sup>

ตารางที่ 3-21 ค่า Air-entry และ Irreducible saturation (BC Model)

Density g/cm <sup>3</sup>	Air-entry (kPa)	Irreducible saturation, S%
1.50	0.02	8.583
1.56	0.02	16.768

ตารางที่ 3-22 ค่า Air-entry และ Residual Water Content (VG Model)

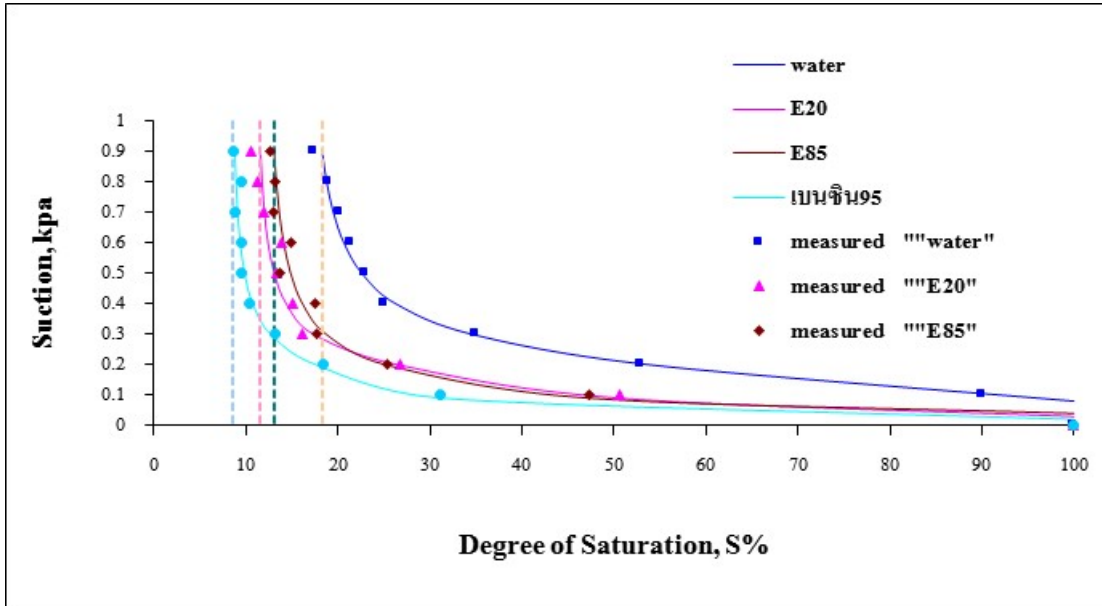
Density g/cm <sup>3</sup>	Air-entry (kPa)	Residual Water Content, $\theta$
1.50	0.02	0.037
1.56	0.02	0.069

ผลการทดลองความสัมพันธ์ของการไหลซึมผ่านของของเหลวทั้ง 4 ชนิดที่ความหนาแน่นของทรายที่แตกต่างกัน 2 ค่า พบว่าดินทรายที่มีความหนาแน่นมากกว่า (1.56 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร) จะมีการตกค้างของของเหลวมากกว่าดินทรายที่มีความหนาแน่นน้อยกว่า (1.50 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร) ในทุกของเหลวที่ใช้ในการทดลอง



3.6.5 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างของเหลวทั้ง 4 ชนิด กับ อากาศ ที่ความหนาแน่นของทรายเท่ากับ  $1.50 \text{ g/cm}^3$

การเปรียบเทียบผลการทดลองความสัมพันธ์ของเหลวทั้ง 4 ชนิด ได้แก่ น้ำกลั่น แก๊สโซฮอล์ E20 แก๊สโซฮอล์ E85 และน้ำมันเบนซิน 95 กับ อากาศ ที่ความหนาแน่นของทรายเท่ากับ 1.50 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร แสดงดังรูปที่ 3-32



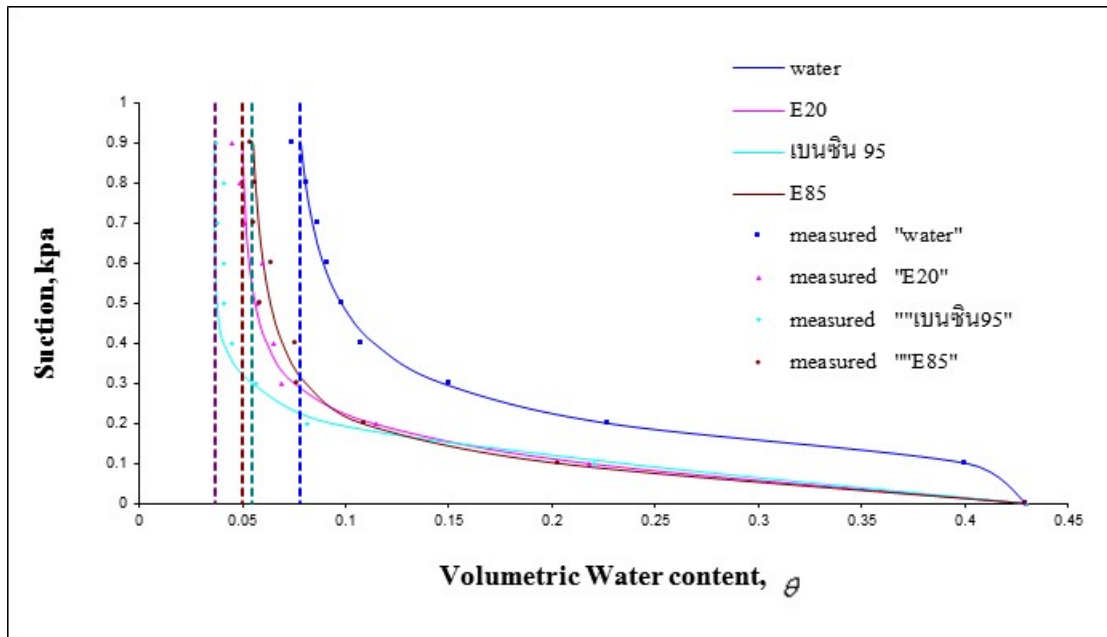
รูปที่ 3-32 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระดับชั้นความอิ่มตัว (Degree of Saturation) กับค่าแรงดูด (Suction) ของน้ำกลั่น น้ำมันเบนซิน 95 แก๊สโซฮอล์ E20 และ แก๊สโซฮอล์ E85 กับอากาศที่ความหนาแน่น  $1.50 \text{ g/cm}^3$  (BC Model)

ค่า Air-entry และ Irreducible saturation จากรูปที่ 3-32 สามารถสรุปความสัมพันธ์ระหว่างน้ำกลั่น น้ำมันเบนซิน 95 แก๊สโซฮอล์ E20 และ แก๊สโซฮอล์ E85 กับอากาศ ที่ความหนาแน่นของทรายเท่ากับ  $1.50 \text{ g/cm}^3$  ได้ดังตารางที่ 3-23

ตารางที่ 3-23 ค่า Air-entry และ Irreducible saturation (BC Model)

Liquid	Air-entry (kPa)	Irreducible saturation, S%
Distilled Water	0.08	19.371
Gasohol E85	0.04	12.642
Gasohol E20	0.03	11.068
Gasoline 95	0.02	8.853

ค่า Air-entry และ Residual water content จากรูปที่ 3-33 สามารถสรุปความสัมพันธ์ระหว่างน้ำกลั่น มันทันเบนซิน 95 แก๊สโซฮอล์ E20 และ แก๊สโซฮอล์ E85 กับอากาศ ที่ความหนาแน่นของทรายเท่ากับ  $1.50 \text{ g/cm}^3$  ได้ดังตารางที่ 3-24



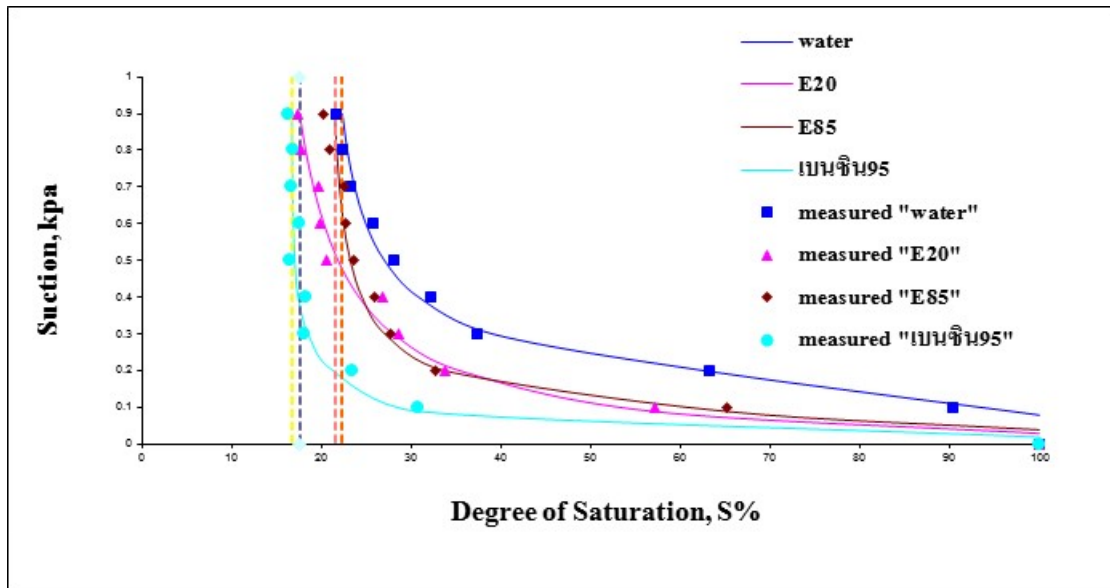
รูปที่ 3-33 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Volumetric water content กับ Suction ของน้ำกลั่น มันทันเบนซิน 95 แก๊สโซฮอล์ E20 และ แก๊สโซฮอล์ E85 กับอากาศที่ความหนาแน่น  $1.50 \text{ g/cm}^3$  (VG Model)

ตารางที่ 3-24 ค่า Air-entry และ Residual water content (VG Model)

Liquid	Air-entry (kPa)	Residual Water Content, $\theta$
Distilled Water	0.08	0.082
Gasohol E85	0.03	0.054
Gasohol E20	0.04	0.050
Gasoline 95	0.02	0.037

### 3.6.6 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างของเหลวทั้ง 4 ชนิด กับ อากาศ ที่ความหนาแน่นของทรายเท่ากับ $1.56 \text{ g/cm}^3$

การเปรียบเทียบผลการทดลองความสัมพันธ์ของเหลวทั้ง 4 ชนิด ได้แก่ น้ำกลั่น, แก๊สโซฮอล์ E20, แก๊สโซฮอล์ E85, และน้ำมันเบนซิน 95 กับ อากาศ ที่ความหนาแน่นของทรายเท่ากับ  $1.56 \text{ g/cm}^3$  กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร แสดงดังรูปที่ 3-34



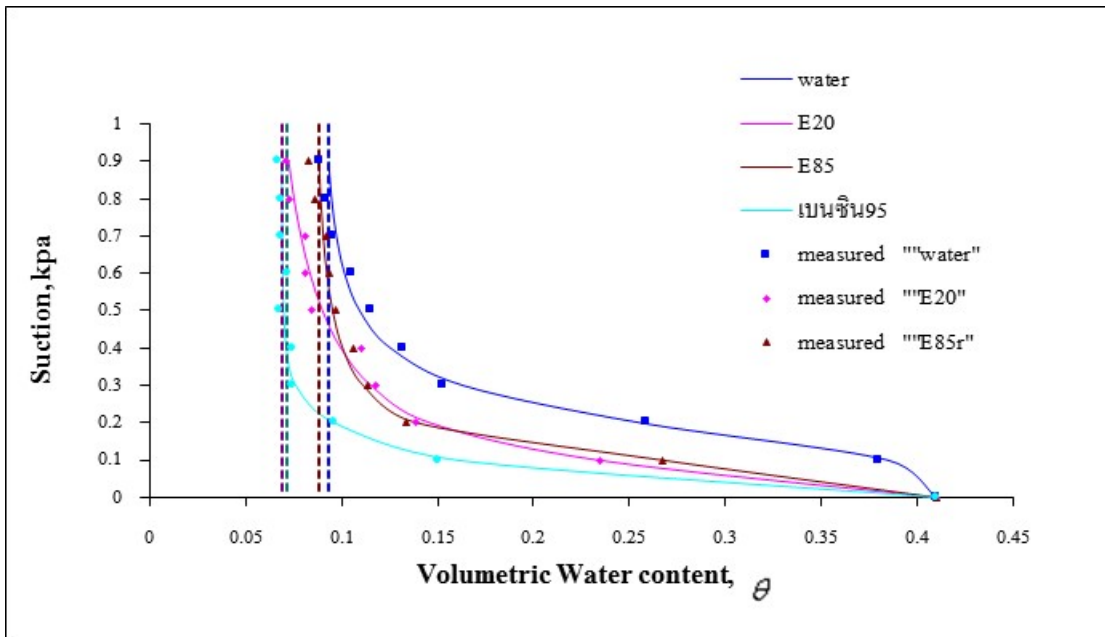
รูปที่ 3-34 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระดับชั้นความอิ่มตัว (Degree of Saturation) กับค่าแรงดูด (Suction) ของน้ำกลั่น มันทนเบนซิน 95 แก๊สโซฮอล์ E20 และ แก๊สโซฮอล์ E85 กับอากาศที่ความหนาแน่น  $1.56 \text{ g/cm}^3$  (BC Model)

ค่า Air-entry และ Irreducible saturation จากรูปที่ 3-34 สามารถสรุปความสัมพันธ์ระหว่างน้ำกลั่น มันทนเบนซิน 95 แก๊สโซฮอล์ E20 และ แก๊สโซฮอล์ E85 กับอากาศ ที่ความหนาแน่นของทรายเท่ากับ  $1.56 \text{ g/cm}^3$  ได้ดังตารางที่ 3-25

ตารางที่ 3-25 ค่า Air-entry และ Irreducible saturation (BC Model)

Liquid	Air-entry (kPa)	Irreducible saturation, S%
Distilled Water	0.08	23.177
Gasohol E85	0.03	21.497
Gasohol E20	0.04	17.588
Gasoline 95	0.02	16.768

ค่า Air-entry และ Residual water content จากรูปที่ 3-35 สามารถสรุปความสัมพันธ์ระหว่างน้ำ กลั่น, มันทนเบนซิน 95, แก๊สโซฮอล์ E20, และ แก๊สโซฮอล์ E85 กับอากาศ ที่ความหนาแน่นของทรายเท่ากับ  $1.56 \text{ g/cm}^3$  ได้ดังตารางที่ 3-36



รูปที่ 3-35 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Volumetric water content กับ ค่า Suction ของน้ำกลั่น มັນเบนซิน 95 แก๊สโซฮอล์ E20 และ แก๊สโซฮอล์ E85 กับอากาศที่มีความหนาแน่น 1.56 g/cm<sup>3</sup> (VG Model)

ตารางที่ 3-26 ค่า Air-entry และ Residual water content (VG Model)

Liquid	Air-entry (kPa)	Residual Water Content, $\theta$
Distilled Water	0.08	0.097
Gasohol E85	0.03	0.088
Gasohol E20	0.04	0.071
Gasoline 95	0.02	0.068

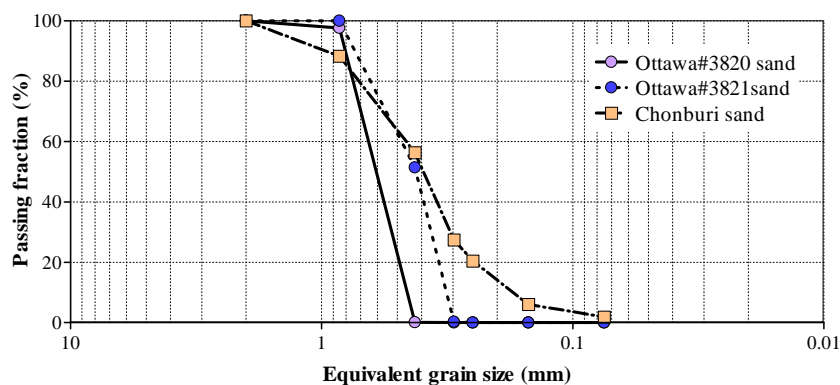
ผลการทดลองความสัมพันธ์ของการไหลซึมผ่านของของเหลวทั้ง 4 ชนิดที่มีความหนาแน่น 1.50 และ 1.56 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร พบว่า ที่ทั้งสองความหนาแน่น น้ำกลั่นมีการตกค้างมากที่สุด อันดับรองลงมา คือ แก๊สโซฮอล์ E85 แก๊สโซฮอล์ E20 และ น้ำมันเบนซิน 95 ตามลำดับ

## บทที่ 4 ผลกระทบของการขึ้นลงของระดับน้ำใต้ดินต่อการปนเปื้อนของน้ำมัน

### 4.1 วัสดุที่ใช้ในการทดลอง

ทรายออกตาดาว่า #3820, ทรายออกตาดาว่า #3821, และทรายชลบุรีถูกนำมาใช้เป็นตัวกลางในการทดลองการไหลซึมผ่านของน้ำและน้ำมันดีเซลและได้แสดงคุณสมบัติทางวิศวกรรมของตัวกลางดังกล่าวแสดงในรูปที่ 4-1 และตารางที่ 4-1 ตามลำดับ โดยที่น้ำมันดีเซลถูกย้อมสีด้วย Red Sudan III จาก Nacalai tesque, Japan (1:10000 โดยน้ำหนัก) และน้ำที่ถูกย้อมน้ำเงินด้วย Brilliant Blue FCF จาก Nacalai tesque, Japan (1:10000 โดยน้ำหนัก) เพื่อเป็นการเพิ่มศักยภาพในการสังเกตภาพและบันทึกภาพและยังช่วยเพิ่มการดูดกลืนแสงไฟแต่จะไม่ได้มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของคุณสมบัติขั้นพื้นฐานของน้ำและน้ำมันดีเซล โดยที่คุณสมบัติของของเหลวที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ถูกนำเสนอในตารางที่ 4-2

ในการที่จะศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นเชิงแสงเฉลี่ยและระดับความอิ่มตัวของของเหลว นั้น ระหว่างที่ทำการทดลองนั้นจะต้องควบคุมการระเหยของน้ำและน้ำมันดีเซลให้มีการระเหยให้น้อยที่สุดหรือไม่เกิดการระเหยเลยทั้งในสภาพที่ย้อมสีและไม่ได้ย้อมสี โดยการใช้เทคนิคการวิเคราะห์ภาพถ่ายนั้น ภาพถ่ายของน้ำและน้ำมันดีเซลจะต้องอยู่ในสภาพที่จะต้องการระเหยเป็นเวลาอย่างน้อย 72 ชั่วโมง โดยที่การทดลองนั้นของเหลวทั้งสองถูกบรรจุอยู่ในหลอด Centrifuge 15 มล. (ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 มม. และมีความสูง 118 มม.) และควบคุมอุณหภูมิห้องให้อยู่ที่  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$  และความชื้นสัมพัทธ์ 70% เพื่อให้สามารถระเหยได้ถึง 72 ชั่วโมง ในการหาอัตราการระเหยนั้นจะนำน้ำหนักเริ่มต้นที่ถูกวัดและน้ำหนักสุดท้ายหลังจากนั้น 3 วัน มาทำการเปรียบเทียบกันหลังจากการทำการบันทึกผลพบว่าอัตราการระเหยของน้ำและน้ำมันดีเซลนั้นมีอัตราการระเหยที่ต่ำมาก (น้อยกว่า 3%) จึงสามารถนำมาใช้ในการทดลองได้ อัตราการระเหยของน้ำมันดีเซลและน้ำถูกนำเสนอในรูปที่ 4-2

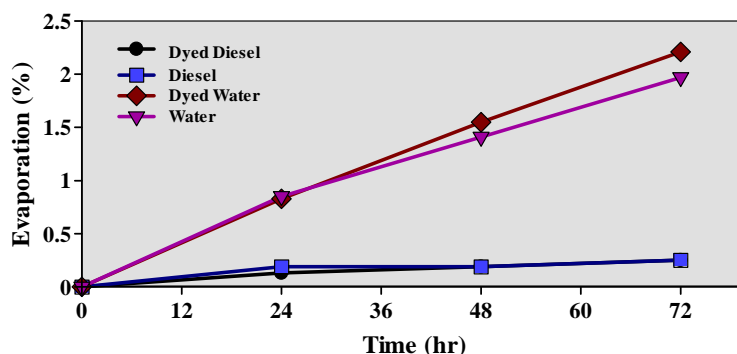


ตารางที่ 4-1 คุณสมบัติทางวิศวกรรมของตัวกลาง

คุณสมบัติ	ทราย Ottawa #3820	ทราย Ottawa #3821	ทราย Chonburi
Soil particle density, $\rho_s$ (g/cm <sup>3</sup> )	2.64	2.63	2.66
Uniformity coefficient, $C_u$	1.47	1.56	2.68
Mean grain size ( $D_{50}$ ), mm	0.643	0.422	0.397
Hydraulic conductivity, $k$ (cm/s)	$2.02 \times 10^{-2}$	$1.80 \times 10^{-2}$	$3.69 \times 10^{-2}$
Diesel hydraulic conductivity, $k_{\text{diesel}}$ (cm/s)	$1.91 \times 10^{-2}$	$1.58 \times 10^{-2}$	-
USCS	SP	SP	SP

ตารางที่ 4-2 คุณสมบัติของของเหลวที่ใช้ในการศึกษา

คุณสมบัติ	น้ำ	น้ำมันดีเซล
Density, $\rho_s$ (g/cm <sup>3</sup> )	0.998	0.865
Viscosity, $\nu$ (mm <sup>2</sup> /s)	1.00	7.00
Vapor pressure (mmHg)	0.40	17.54



รูปที่ 4-2 อัตราการระเหยของน้ำมันดีเซลและน้ำ

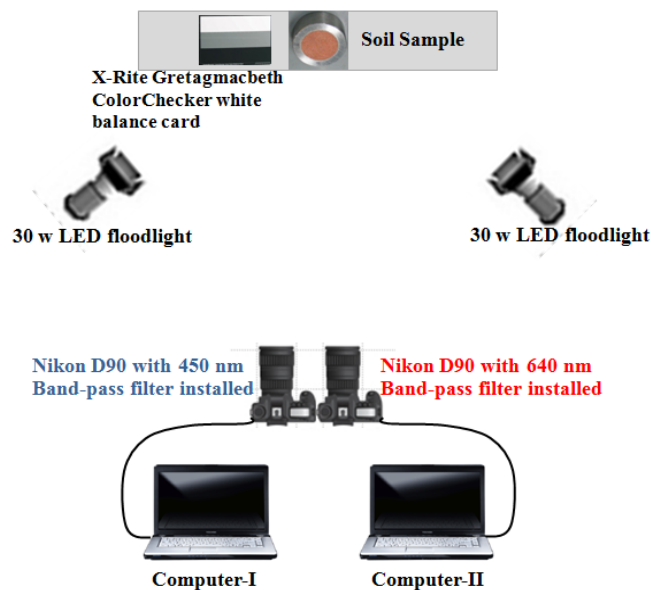
## 4.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

### 4.2.1 การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นเชิงแสงเฉลี่ยและระดับความอิ่มตัวของของเหลวในทราย

Kechavazi et al. (2000) and Flores (2010) พบว่าความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นเชิงแสงเฉลี่ยและระดับความอิ่มตัวของ LNAPL กับน้ำ ซึ่งเป็นพื้นฐานหลักของการหาความสัมพันธ์โดยใช้เทคนิควิเคราะห์ภาพถ่าย โดยที่ภาพถ่ายนั้นจะถูกนำไปเป็นเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์การระดับความอิ่มตัวของน้ำและน้ำมันดีเซล ในการศึกษา Kechavazi et al. (2000) ได้ทำการใช้กล้องระบบดิจิทัลที่อยู่ในช่วงอินฟราเรดที่มีวงสเปกตรัมแคบๆ ในช่วงคลื่นอินฟราเรดที่มองเห็นเป็นช่วงสั้นๆ (10 นาโนเมตร ที่มีขนาดใหญ่และเป็นศูนย์กลางที่ 500,760 และ 970 นาโนเมตร) และกล้องที่ใช้ 2 ตัว นั้นได้มีการติดตั้งตัวกรองแสงผ่านแถบที่

แตกต่างกันซึ่งความยาวของคลื่นที่ถูกนำมาใช้ (450 นาโนเมตร และ 640 นาโนเมตร) โดยที่ Flores (2010) ได้ทำการศึกษาในทำนองเดียวกันกับการวิจัยในครั้งนี้

ในการทดลองจะใช้กล้อง Nikon D90 จำนวน 2 ตัว และทำการติดตั้งแผ่นกรองแสงที่มีความยาวของคลื่น 450 นาโนเมตร และ 640 นาโนเมตร โดยที่กล้องจะถูกตั้งค่าให้เป็นโหมดถ่ายภาพด้วยตัวเอง (manual mode) เพื่อที่จะได้ควบคุมความเร็วของชัตเตอร์ไว้ และมีการติดแผ่นสีขาวสมดุล (white balance card) ไว้เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ กล้องทั้งสองตัวจะถูกเชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์ผ่านสาย USB และถูกควบคุมการถ่ายภาพด้วยโปรแกรม Nikon Camera control Pro 2. X-Rite และแผ่นสีขาวสมดุลจะถูกติดตั้งอยู่ถัดไปจากตัวอย่างเพื่อที่จะใช้ในการอ้างอิงสีขาวและสีดำในการวิเคราะห์ ส่วนแสงสว่างที่ใช้คือ Floodlights 30 W LED และห้องที่ใช้ในการทดลองจะถูกควบคุมอุณหภูมิไว้ที่ 20 °C มีค่าความชื้นสัมพัทธ์อยู่ที่ 70% โดยทำการทดลองตามคำแนะนำของ Flores (2010) ในส่วนของภาพที่ได้ทำการบันทึกนั้นจะเป็นภาพไฟล์ NEF (Nikon 12-bit proprietary RAW format) แล้วทำการดัดแปลงไฟล์เป็นรูปแบบ TIFF format (Tagged Image File Format) และใช้ ViewNX 2.0. TIFF images ในการวิเคราะห์ภาพด้วยโปรแกรมที่เขียนด้วยโปรแกรม MATLAB 2007A ในส่วนของการติดตั้งอุปกรณ์ดังแสดงในรูปที่ 4-3

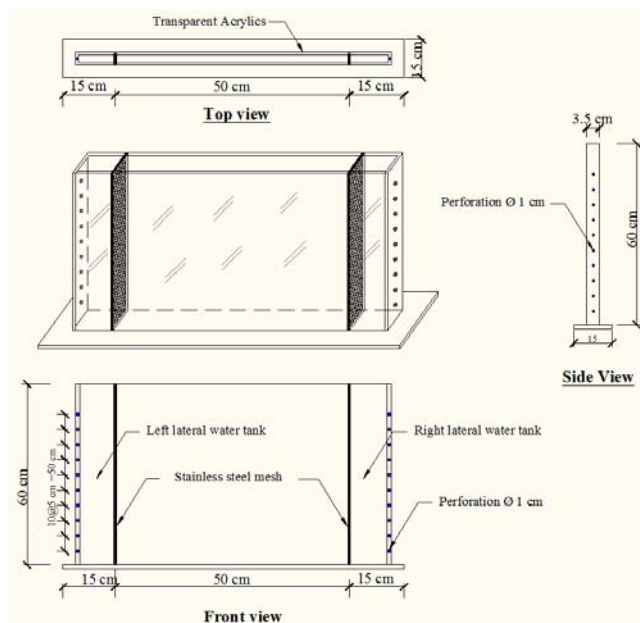


รูปที่ 4-3 การติดตั้งอุปกรณ์ในการทดลองความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นเชิงแสงเฉลี่ยและระดับความอิ่มตัวของของเหลว

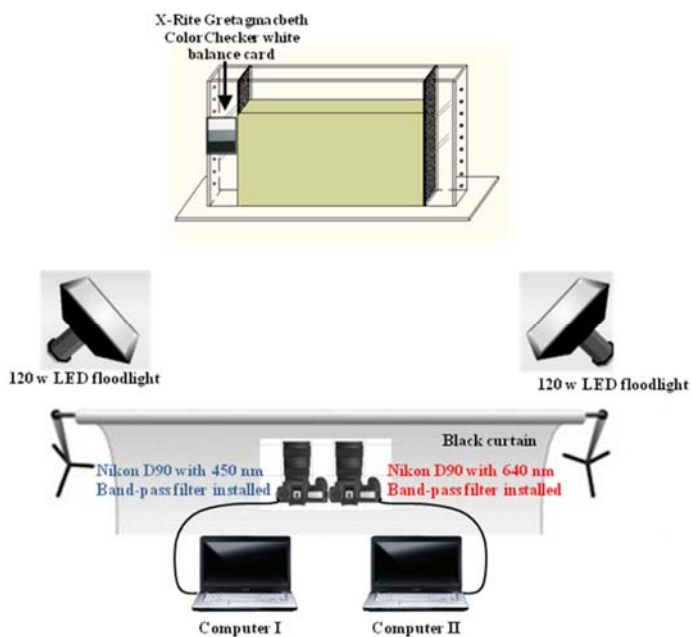
#### 4.2.2 การศึกษาการไหลซึมของน้ำมันดีเซลผ่านทรายที่ไม่มีอิมิตัวด้วยน้ำภายใต้สถานะน้ำขึ้น-น้ำลง

Acrylics Tank มีขนาด 50x60x3.5 ซม. (ภายในมิติ) ดังที่แสดงในรูปที่ 4-4 โดยถูกออกแบบมาเพื่อใช้ในการศึกษาครั้งนี้ที่คล้ายกันในส่วนของบทก่อนหน้านี้คือกล้องที่ถูกนำมาใช้ กล้อง Nikon D90 ติดกับแผ่นกรองแสง 450 นาโนเมตร และ Nikon D90 ติดกับแผ่นกรองแสง 640 นาโนเมตร กล้องทั้ง 2 ถูกตั้งค่าให้ถ่ายภาพด้วยตนเอง (manual mode) เพื่อให้แสงและความเร็วชัตเตอร์มีความคงที่และมีการติดแผ่นสมดุลสี

ขาว (white balance card) และกล้องจะถูกเชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์ผ่านสาย USB มีการควบคุมกล้องโดยใช้โปรแกรม Nikon Camera Control Pro2X-Rite และมีการวัดแสงสมดุลสีขาวโดยการติดตั้ง white balance card อยู่ถัดจากตัวอย่างเพื่อใช้ในการอ้างอิงทั้งหมด 2 สีคือ สีขาวและสีดำ และไฟ Floodlights 120 W LED ถูกนำมาใช้เพื่อให้แสงสว่างกับตัวอย่างโดยไฟจะถูกเปิดโดยอัตโนมัติก่อนจะทำการบันทึกภาพ 30 วินาที และปิดหลังจากทำการบันทึกภาพไปแล้ว 30 วินาที และมีการติดตั้งฉากสีดำเพื่อหลีกเลี่ยงแสงสะท้อน อุปกรณ์ติดตั้งจะแสดงในรูปที่ 4-5



รูปที่ 4-4 แบบแท่งค์ 2 มิติ



รูปที่ 4-5 การติดตั้งอุปกรณ์ในการทดลอง



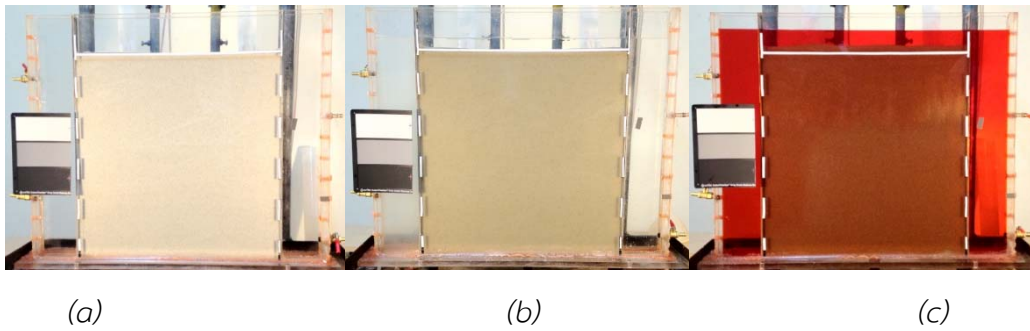
### 4.3 วิธีการทดลอง

#### 4.3.1 การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นเชิงแสงเฉลี่ยและระดับความอิ่มตัวของของเหลวในทราย

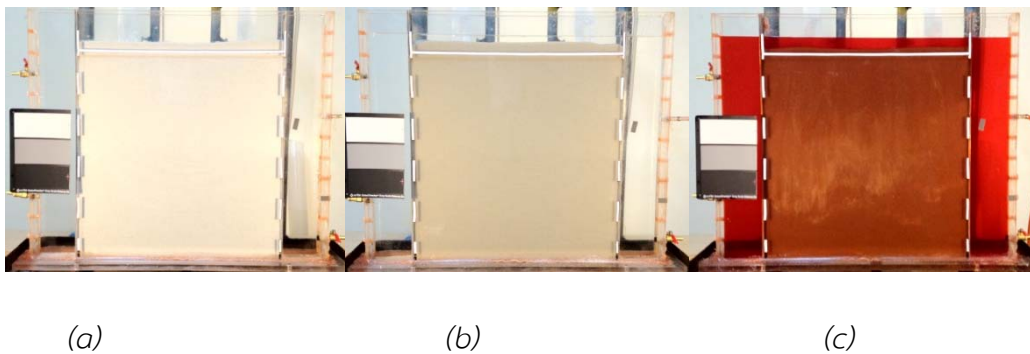
ทำการเตรียมตัวอย่างทั้งหมด 90 ตัวอย่าง โดยตัวอย่างแต่ละตัวอย่างจะถูกผสมกับน้ำและน้ำมันดีเซลในสัดส่วนที่ต่างกัน แล้วนำมาบรรจุลงภาชนะรูปทรงกระบอกที่มีปริมาตร 25 ลูกบาศก์เซนติเมตร ตัวอย่างรูปทรงกระบอก (เส้นผ่านศูนย์กลาง 40 มม., ความสูง 20 มม.) ตัวอย่างแต่ละตัวอย่างจะถูกนำมาวางห่างจะหน้ากล้อง 1.5 เมตร และแสงสว่างที่ใช้ในการทดลอง Floodlights 30 W LED และมีการติดแผ่นสมดุลสีขาว (white balance card) เพื่อใช้ในการอ้างอิงสีขาวและสีดำที่เป็นส่วนหนึ่งของภาพถ่ายแต่ละภาพ กล้องจะถูกตั้งค่าให้เป็นโหมดถ่ายภาพด้วยตัวเอง (manual mode) ห้องที่ใช้ในการทดลองจะถูกควบคุมอุณหภูมิไว้ที่ 20 C° และมีความชื้นสัมพัทธ์อยู่ที่ 70% ในส่วนของภาพที่ได้ทำการบันทึกจะเป็นภาพไฟล์ NEF (Nikon 12-bit proprietary RAW format) แล้วถูกทำการตัดแปลงไฟล์เป็นรูปแบบ TIFF format (Tagged Image File Format) และใช้ ViewNX 2.0. TIFF images ในการวิเคราะห์ภาพด้วยโปรแกรมที่เขียนด้วยโปรแกรม MATLAB 2007A โดยจะทำการเปรียบเทียบค่าระดับความอิ่มตัวของของเหลวของน้ำและน้ำมันดีเซลกับความหนาแน่นเชิงแสงเฉลี่ยในแต่ละความยาวคลื่น (450 และ 640 นาโนเมตร)

#### 4.3.2 การศึกษาการไหลซึมของน้ำมันดีเซลผ่านทรายที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำภายใต้สภาวะน้ำขึ้น-น้ำลง

ในทางค์ 2 มิตินั้นได้ดำเนินการเพื่อศึกษาผลของการเปลี่ยนแปลงระดับการไหลของน้ำใต้ดินในแนวนอนที่มีการซึมผ่านของน้ำมันดีเซลในตัวกลางที่เป็นเนื้อเดียวกันและแตกต่างกัน โดยใช้เทคนิควิเคราะห์ภาพถ่ายอย่างง่ายมาใช้ในการหาระดับความอิ่มตัวของของเหลวและพฤติกรรมการกระจายตัวของน้ำมันดีเซล การทดลองมีทั้งสิ้น 6 ตัวอย่าง แต่ละตัวอย่างจะมีสภาพที่แตกต่างกันเพื่อที่จะนำมาทำการวิเคราะห์การไหลซึมผ่านของน้ำมันดีเซลผ่านทรายที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ การทดสอบแท็งก์จะต้องทำการบันทึกภาพด้วยกล้องแต่ละตัวซึ่งจะประกอบไปด้วยแท็งก์ทรายแห้ง, ทรายที่อิ่มตัวด้วยน้ำ และทรายที่อิ่มตัวด้วยน้ำมันดีเซล โดยจะทำการบันทึกภาพด้วยกันทั้งหมด 6 ภาพ ซึ่งมาจาก  $[D_{450}^{00}]_{mn}$ ,  $[D_{450}^{10}]_{mn}$ ,  $[D_{450}^{01}]_{mn}$ ,  $[D_{640}^{00}]_{mn}$ ,  $[D_{640}^{10}]_{mn}$  และ  $[D_{640}^{01}]_{mn}$  และภาพจากการเปรียบเทียบสำหรับทราย Ottawa#3820 และ Ottawa#3821 จะถูกนำเสนอในรูปแบบที่ 4-6 และ 4-7 ตามลำดับ



รูปที่ 4-6 การเปรียบเทียบภาพสำหรับการทดลองทราย Ottawa #3820 T-1, T-2, และ T-3 (a) แท็งก์ที่เต็มไปด้วยทรายแห้ง, (b) แท็งก์ที่เต็มไปด้วยทรายที่อิ่มตัวไปด้วยน้ำ, (c) แท็งก์ที่เต็มไปด้วยทรายที่อิ่มตัวไปด้วยน้ำมันดีเซล



รูปที่ 4-7 การเปรียบเทียบภาพสำหรับการทดลองทราย Ottawa #3821 T-4, T-5, และ T-6 (a) แท็งก์ที่เต็มไปด้วยทรายแห้ง, (b) แท็งก์ที่เต็มไปด้วยทรายที่อิ่มตัวไปด้วยน้ำ, (c) แท็งก์ที่เต็มไปด้วยทรายที่อิ่มตัวไปด้วยน้ำมันดีเซล

#### 4.4 แผนการทดลอง

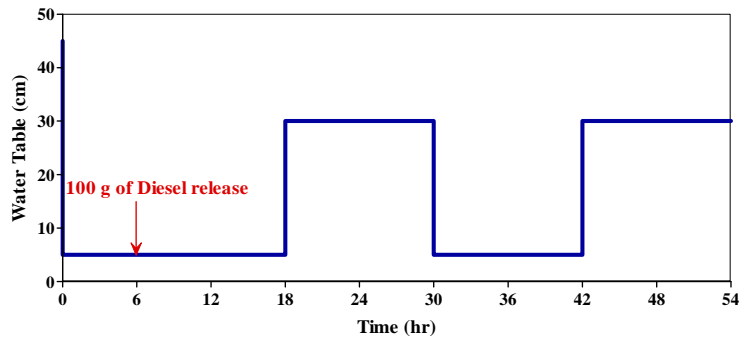
การทดสอบในแท็งค์ 2 มิติ ที่มีระดับการไหลของน้ำกับน้ำมันดีเซล และการแทรกซึมผ่านของว่างของอากาศ ได้ดำเนินการศึกษาตามตารางที่มีผลของการผันผวนและการไหลของน้ำใต้ดินในแนวนอนที่มีผลต่อพฤติกรรมการไหลซึมของน้ำมันดีเซลผ่านวัสดุที่เป็นเนื้อเดียวกัน พร้อมกันทั้ง 2 ตัวกลางดังแสดงในตารางที่ 4-3

**ตารางที่ 4-3** การทดสอบการไหลซึมของน้ำมันดีเซลผ่านทราย

การทดสอบ	ทราย	Hydraulics gradient (i)	การขึ้นของระดับน้ำ
T-1	ทราย Ottawa#3820	0	มี
T-2	ทราย Ottawa#3820	0.1	มี
T-3	ทราย Ottawa#3820	0.2	มี
T-4	ทราย Ottawa#3821	0	มี
T-5	ทราย Ottawa#3821	0.1	มี
T-6	ทราย Ottawa#3821	0.2	มี

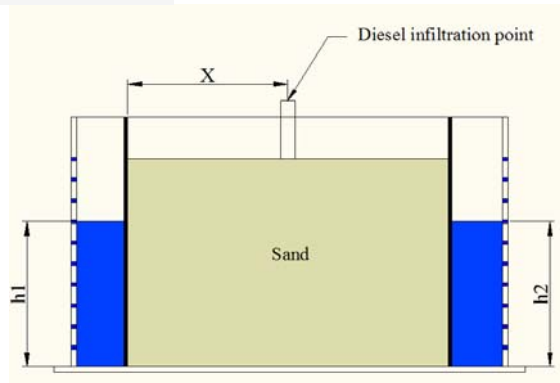
การทดสอบแท่งกัก 2 มิติ ที่มีกรไหลซึมผ่านของน้ำ, น้ำมันดีเซล และอากาศ ได้ดำเนินการศึกษาโดยใช้วัสดุตัวกลางคือทราย Ottawa #3820 และ Ottawa #3821 การเตรียมทรายทำได้โดยการนำทรายไปล้างด้วยน้ำแล้วนำไปอบจนแห้งหลังจากนั้นนำมาเทใส่แท่งกักให้สูง 50 เซนติเมตร และควบคุมความหนาแน่นอยู่ที่ 1.76 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ซึ่งภาพถ่ายของทรายแห้งจะถูกนำมาอ้างอิงมาในการวิเคราะห์ภาพถ่ายส่วนในถึงตรงกลางทำให้เต็มไปด้วน้ำอย่างช้าๆและภาพถ่ายจะถูกนำมาอ้างอิงด้วทรายที่อิ่มตัวด้วน้ำ ส่วนภาพทางด้านซ้ายจะเป็นถึงที่ทำให้ทรายอิ่มตัวด้วน้ำมันซึ่งภาพถ่ายจะถูกนำไปอ้างอิงด้วทรายที่อิ่มตัวด้วน้ำมัน ในส่วนที่คล้ายกับการทดสอบคอลัมน์หนึ่งมิติ โดยการทดลองจะแบ่งออกเป็น 4 ขั้นตอน (ดูรูปที่ 4-8): ระบายน้ำก่อน (t = 0 ถึง 18 ชั่วโมง) หลังจากขั้นตอนแรกให้ทำการเพิ่มระดับน้ำ (t = 18 ถึง 30 ชั่วโมง) หลังจากนั้นทำการระบายน้ำครั้งที่สอง (t = 30 ถึง 42 ชั่วโมง) และหลังจากการลดระดับน้ำครั้งที่สอง (t = 42 ถึง 52 ชั่วโมง) ทำการไล่ระดับน้ำสำหรับการทดลองโดยการควบคุมระดับถึงด้านข้าง (H1 และ H2) รูปที่ 4-9 และระดับของน้ำในถึงด้านข้างในแต่ละขั้นตอนที่แสดงในตารางที่ 4-4

- การระบายน้ำครั้งแรก: น้ำภายในถึงจะถูกระบายออกหลังจากนั้นอีก 6 ชั่วโมง จะทำการปล่อยน้ำมันดีเซล 100 กรัม โดยที่น้ำมันดีเซลจะถูกปล่อยให้แทรกซึมแบบอิสระ (ทดลอง T-1 และทดลอง T-4, x = 25 ซม. ทดลอง T-2, T-3, T-5, และ T-6, x = 15 ซม.) น้ำมันดีเซลได้ถูกปล่อยให้ไหลซึมแบบอิสระลงไปในถึงเป็นเวลา 12 ชั่วโมง ซึ่งขั้นตอนนี้จะใช้เวลาทั้งสิ้น 18 ชั่วโมง
- การเพิ่มระดับน้ำครั้งแรก: ปรับระดับของน้ำในถึงให้สูงขึ้นอย่างช้าๆที่ระดับ 30 ซม. จากขั้นตอนก่อนหน้า โดยการกรองน้ำในถึงด้านข้างทั้งสองถึง ในระหว่างขั้นตอนการระบายน้ำที่ถูกแทนที่ด้วน้ำ ขั้นตอนนี้ใช้เวลาทั้งสิ้น 12 ชั่วโมง
- การระบายน้ำครั้งที่สอง: น้ำและน้ำมันดีเซลภายในถึงจะถูกระบายออกอีกครั้งโดยการลดระดับน้ำภายในถึงด้านข้างตามระดับที่ต้องการด้งแสดงในตารางที่ 4-4 โดยที่จะไม่มน้ำมันดีเซลเข้าไปเพิ่มเติมในถึงอีก ขั้นตอนนี้ใช้เวลาทั้งสิ้น 12 ชั่วโมง
- การเพิ่มระดับน้ำครั้งที่สอง: ทำการเพิ่มระดับน้ำในถึงให้เท่าเดิมอีกครั้งตามขั้นตอนเพิ่มระดับน้ำครั้งแรก และในขั้นตอนนี้ใช้เวลาทั้งสิ้น 12 ชั่วโมง



รูปที่ 4-8 ระดับของน้ำกับระยะเวลาของการทำการทดลอง

การบันทึกภาพจะถูกทำการบันทึกด้วยกล้องดิจิทัลทุกครั้งชั่วโมงจากกล้อง 2 ตัว กล้องถูกตั้งค่าโหมดถ่ายภาพด้วยตนเอง และมีการติดตั้งสปีชวสมบรูณ์ กล้องถูกควบคุมการถ่าย (Nikon Camera Control Pro2) เพื่อหลีกเลี่ยงการสั่นสะเทือนในขณะถ่ายภาพ และ Floodlights 120 W LED จะถูกเปิดขึ้นก่อน 30 วินาทีก่อนที่จะมีการทำการบันทึกภาพ แล้วมีการควบคุมอุณหภูมิของห้องเอาไว้ที่ 20°C มีความชื้น 70% เงื่อนไขในการทดลองจะสรุปไว้ที่ตารางที่ 4-4



รูปที่ 4-9 การบรรจุทรายในถังทดสอบ

ตารางที่ 4-4 เงื่อนไขในการทดลอง

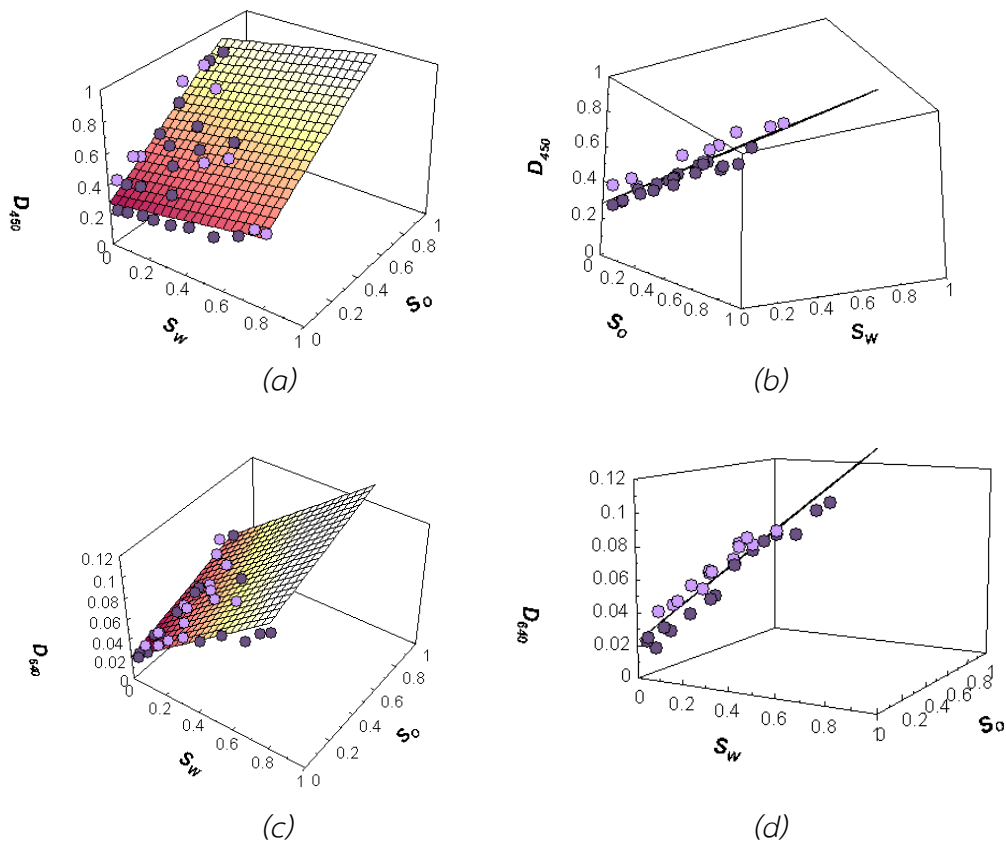
ขั้นตอนการทดสอบ	ระยะเวลา	ระดับน้ำ						หมายเหตุ
		i = 0		i = 0.1		i = 0.2		
		h1	h2	h1	h2	h1	h2	
Initial Condition	0 hr	50 cm	50 cm	50 cm	50 cm	50 cm	50 cm	
First Drainage	0 hr - 18 hr	5 cm	5 cm	10 cm	5 cm	15 cm	5 cm	ให้น้ำมันดีเซล 100 g ไหลซึมที่เวลา = 6 hr
First Imbibition	18 hr - 30 hr	35 cm	35 cm	40 cm	35 cm	45 cm	35 cm	
Second Drainage	30 hr - 42 hr	5 cm	5 cm	10 cm	5 cm	15 cm	5 cm	
Second Imbibition	42 hr - 54 hr	35 cm	35 cm	40 cm	35 cm	45 cm	35 cm	

ภาพทั้งหมดที่บันทึกระหว่างการทดลองจะเป็นรูปแบบไฟล์ NEF (Nikon proprietary RAW version files) ทำการแปลงภาพให้เป็นรูปแบบไฟล์ TIFF ด้วยโปรแกรม View NX2 จากนั้นทำการวิเคราะห์ภาพถ่ายด้วยโปรแกรม Matlab เพื่อคำนวณระดับความอิ่มตัวของน้ำ ( $[S_w]_{mn}$ ) และระดับความอิ่มตัวของน้ำมันดีเซล ( $[S_o]_{mn}$ ) ที่เวลาใดๆ

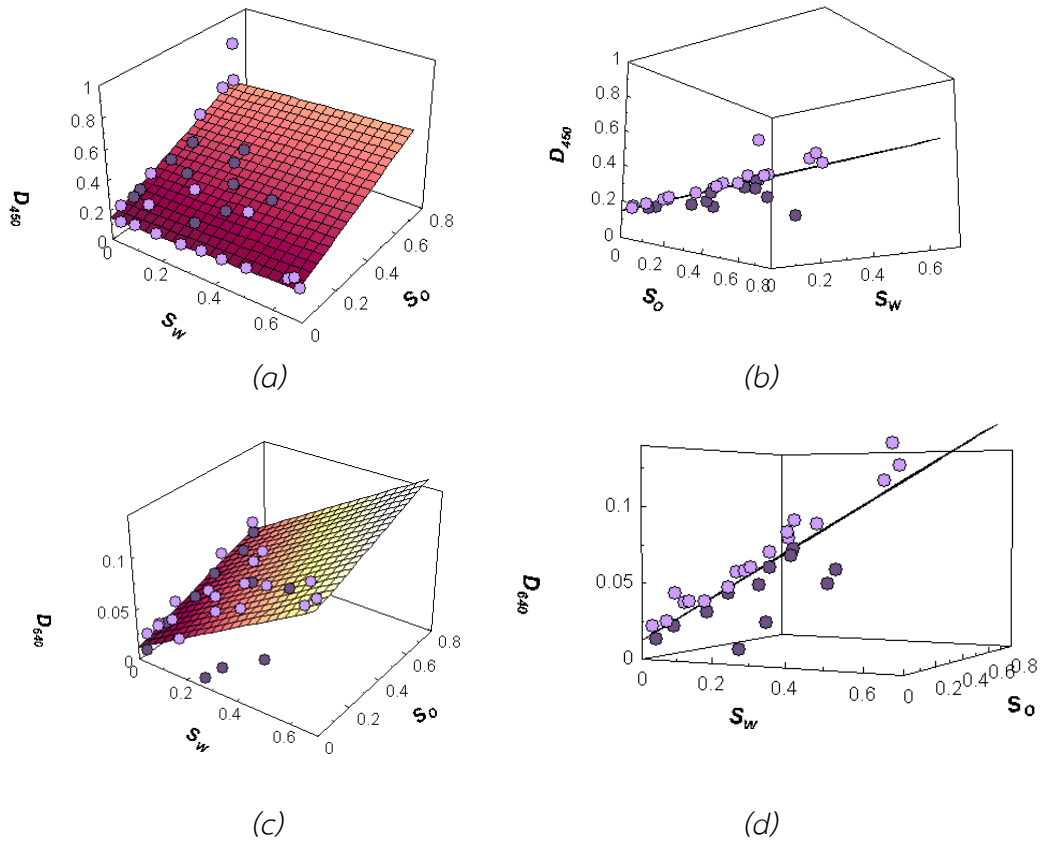
#### 4.5 ผลการทดลอง

##### 4.5.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นเชิงแสงเฉลี่ยและระดับความอิ่มตัวของของเหลวในทราย

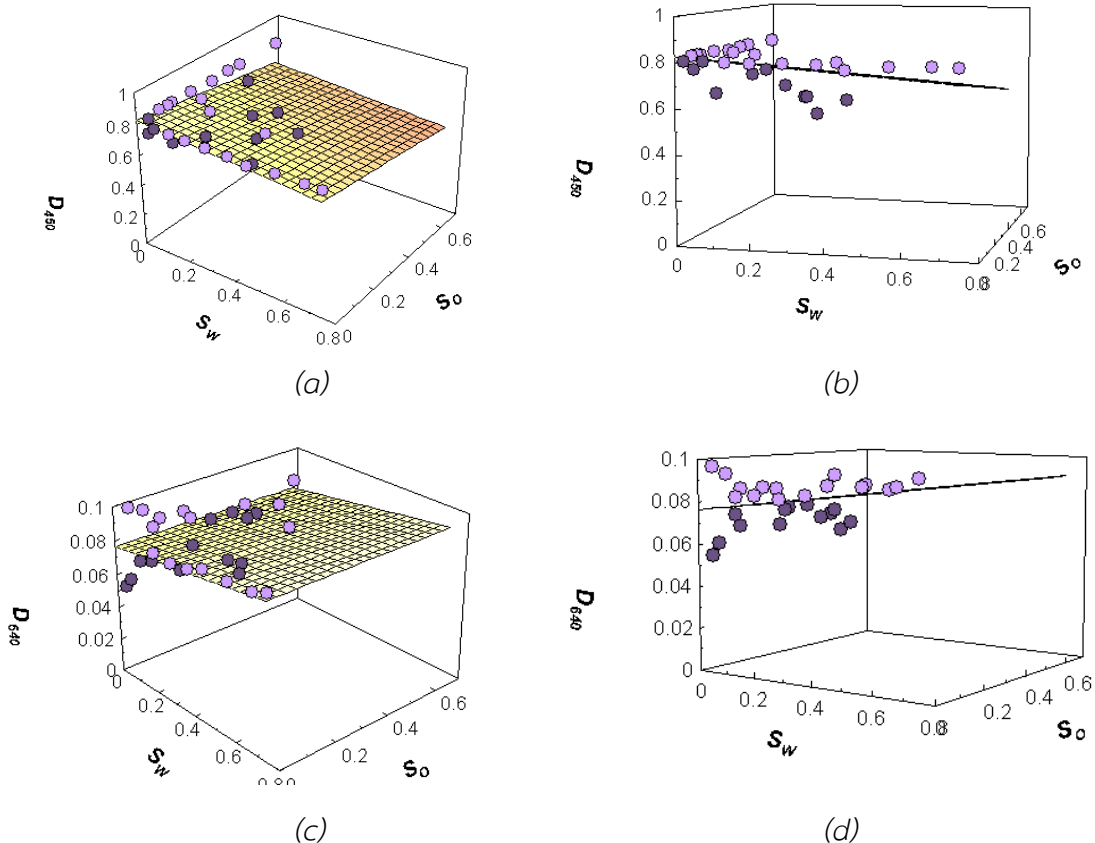
ความสัมพันธ์ระหว่างระดับความอิ่มตัวของน้ำมันดีเซล ( $S_o$ ), ระดับความอิ่มตัวของน้ำ ( $S_w$ ) และความหนาแน่นเชิงแสงเฉลี่ย (AOD) ของดินทรายทั้งสามชนิดแสดงในรูปที่ 4-10 ถึง 4-12 และสมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นเชิงแสงเฉลี่ยและระดับความอิ่มตัวของของเหลวในทรายแต่ละชนิด แสดงดังตารางที่ 4-5 ตามลำดับ



รูปที่ 4-10 Ottawa #3820 sand แสดงความสัมพันธ์ความหนาแน่นเชิงแสงและระดับความอิ่มตัวของน้ำมันดีเซลและน้ำในแต่ละช่วงของความยาวคลื่น (a) ความหนาแน่นเชิงแสงเฉลี่ยสำหรับ  $\lambda = 450$  นาโนเมตร ( $D_{450}$ ), ระดับความอิ่มตัวของดีเซล ( $S_o$ ) และระดับความอิ่มตัวของน้ำ ( $S_w$ ), (b) มุมมองตั้งฉากกับระนาบของ  $D_{450}$ ,  $S_o$  และ  $S_w$ , (c) ความหนาแน่นเชิงแสงเฉลี่ยสำหรับ  $\lambda = 640$  นาโนเมตร ( $D_{640}$ ), ระดับความอิ่มตัวของดีเซล ( $S_o$ ) และระดับความอิ่มตัวของน้ำ ( $S_w$ ), (d) มุมมองตั้งฉากกับระนาบของ  $D_{640}$ ,  $S_o$  และ  $S_w$



รูปที่ 4-11 Ottawa #3821 sand แสดงความสัมพันธ์ความหนาแน่นเชิงแสงและระดับความอิ่มตัวของน้ำมัน ดีเซลและน้ำในแต่ละช่วงของความยาวคลื่น (a) ความหนาแน่นเชิงแสงเฉลี่ยสำหรับ  $\lambda = 450$  นาโนเมตร (D<sub>450</sub>), ระดับความอิ่มตัวของดีเซล (S<sub>o</sub>) และระดับความอิ่มตัวของน้ำ (S<sub>w</sub>), (b) มุมมองตั้งฉากกับระนาบของ D<sub>450</sub>, S<sub>o</sub> และ S<sub>w</sub>, (c) ความหนาแน่นเชิงแสงเฉลี่ยสำหรับ  $\lambda = 640$  นาโนเมตร (D<sub>640</sub>), ระดับความอิ่มตัวของ ดีเซล (S<sub>o</sub>) และระดับความอิ่มตัวของน้ำ (S<sub>w</sub>), (d) มุมมองตั้งฉากกับระนาบของ D<sub>640</sub>, S<sub>o</sub> และ S<sub>w</sub>



รูปที่ 4-12 ทรายชลบุรี แสดงความสัมพันธ์ความหนาแน่นเชิงแสงและระดับความอิ่มตัวของน้ำมันดีเซลและน้ำในแต่ละช่วงของความยาวคลื่น (a) ความหนาแน่นเชิงแสงเฉลี่ยสำหรับ  $\lambda = 450$  นาโนเมตร ( $D_{450}$ ), ระดับความอิ่มตัวของดีเซล ( $S_o$ ) และระดับความอิ่มตัวของน้ำ ( $S_w$ ), (b) มุมมองตั้งฉากกับระนาบของ  $D_{450}$ ,  $S_o$  และ  $S_w$ , (c) ความหนาแน่นเชิงแสงเฉลี่ยสำหรับ  $\lambda = 640$  นาโนเมตร ( $D_{640}$ ), ระดับความอิ่มตัวของดีเซล ( $S_o$ ) และระดับความอิ่มตัวของน้ำ ( $S_w$ ), (d) มุมมองตั้งฉากกับระนาบของ  $D_{640}$ ,  $S_o$  และ  $S_w$

ตารางที่ 4-5 สมการความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นเชิงแสงเฉลี่ยและระดับความอิ่มตัวของของเหลวในทรายแต่ละชนิด

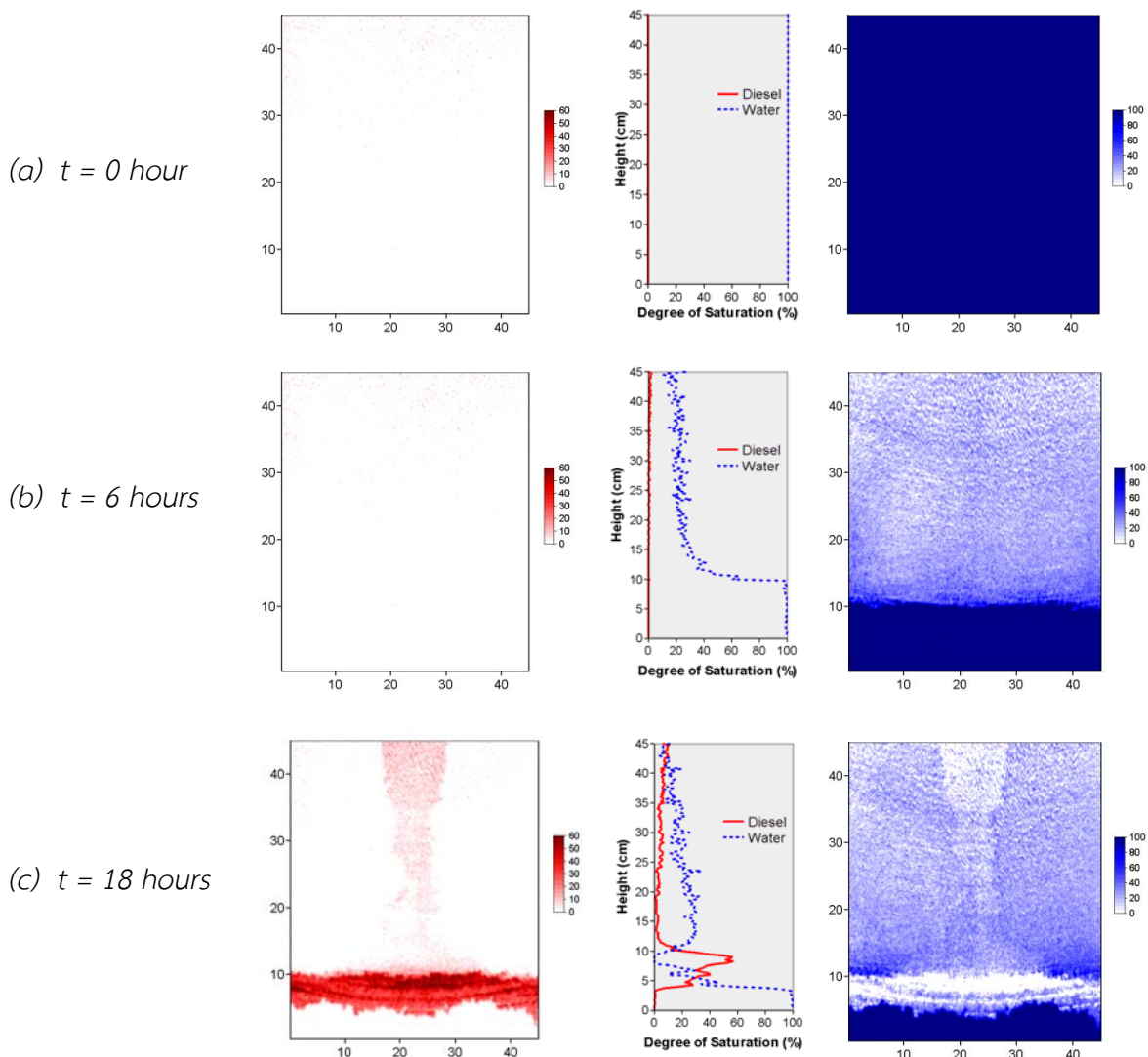
ทราย	$D_{450}$	$R^2$	$D_{640}$	$R^2$
Ottawa#3820	$0.222S_w + 0.773S_o + 0.279$	0.91	$0.128S_w + 0.047S_o + 0.230$	0.93
Ottawa#3821	$0.080S_w + 0.567S_o + 0.146$	0.71	$0.148S_w + 0.061S_o + 0.012$	0.74
ชลบุรี	$0.119S_w - 0.208S_o + 0.827$	0.19	$0.019S_w - 0.001S_o + 0.076$	0.16

ตารางที่ 4-5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นเชิงแสงเฉลี่ยและระดับความอิ่มตัวของของเหลวมีความสัมพันธ์แบบเชิงเส้นกันจากความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นเชิงแสงเฉลี่ยของ  $D_{450}$  และ  $D_{640}$  กับระดับความอิ่มตัวของน้ำมันดีเซล ( $S_o$ ) และระดับความอิ่มตัวของน้ำ ( $S_w$ ) ซึ่งเราจะใช้ค่าสัมประสิทธิ์ความแม่นยำ (coefficients of correlation,  $R^2$ ) เป็นตัวตัดสินใจในการเลือกชนิดของวัสดุที่จะนำมาใช้เป็น

ตัวกลางในการศึกษาการซึมของน้ำมันดีเซลผ่านชั้นทรายที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ พบว่าค่าสัมประสิทธิ์ความแม่นยำของทราย Ottawa #3820 มีค่าเท่ากับ 0.91 ( $D_{450}$ ) และ 0.93 ( $D_{640}$ ), ทราย Ottawa #3821 มีค่าเท่ากับ 0.71 ( $D_{450}$ ) และ 0.74 ( $D_{640}$ ) และทรายชลบุรี (Chonburi Sand) มีค่าเท่ากับ 0.19 ( $D_{450}$ ) และ 0.16 ( $D_{640}$ ) ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์ความแม่นยำที่เป็นที่น่าพอใจในการนำมาเป็นวัสดุกลางในการศึกษาการเปลี่ยนแปลงระดับการไหลของน้ำใต้ดินในแนวนอนที่มีการซึมผ่านของน้ำมันดีเซลจึงเลือกวัสดุที่มีค่าของค่าสัมประสิทธิ์ความแม่นยำมากกว่า 0.70 พบว่าทราย Ottawa #3820 และ Ottawa #3821 จึงเหมาะแก่การนำไปศึกษาต่อไป สำหรับทรายชลบุรีมีค่าสัมประสิทธิ์ความแม่นยำที่ต่ำมากคือมีค่าเท่ากับ 0.19 ( $D_{450}$ ) และ 0.16 ( $D_{640}$ ) จึงไม่เหมาะต่อการนำไปศึกษาด้วยวิธีการวิเคราะห์ภาพถ่ายอย่างง่าย (Simplified Image Analysis Method) เนื่องจากความสัมพันธ์ที่ได้ไม่เป็นแบบเส้นตรง (nonlinear relationship) ทั้งนี้สาเหตุอาจเกิดจากทรายชลบุรีที่เป็นทรายที่มีปริมาณของสารอินทรีย์ค่อนข้างสูง

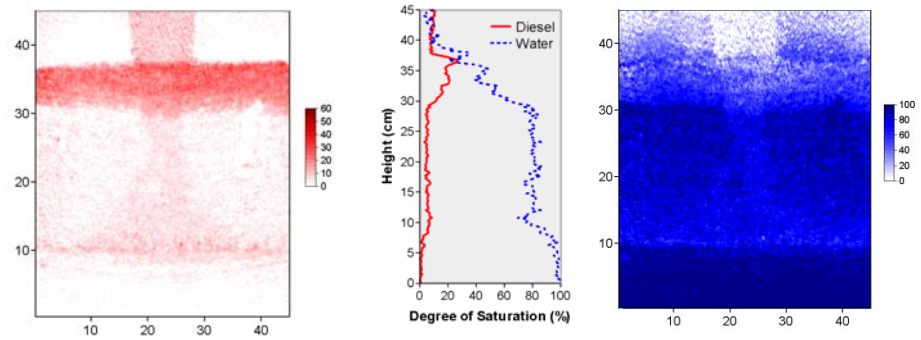
#### 4.5.2 ผลกระทบของการไหลของน้ำใต้ดินและสถานะน้ำขึ้นน้ำลงต่อการไหลซึมของน้ำมันดีเซลผ่านทรายที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ

ผลการทดสอบ Test T-1: ทราย Ottawa #3820,  $i = 0$  แสดงในรูปที่ 4-13 และ 4-14

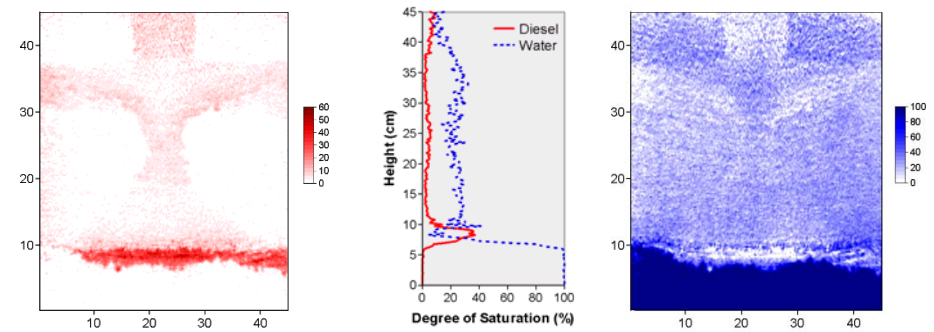




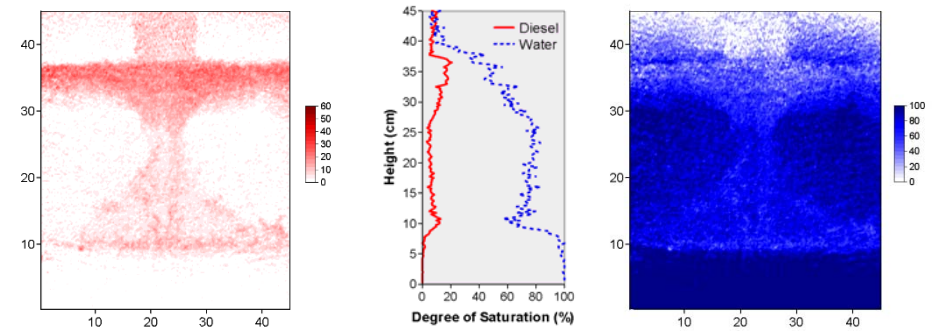
(d)  $t = 30$  hours



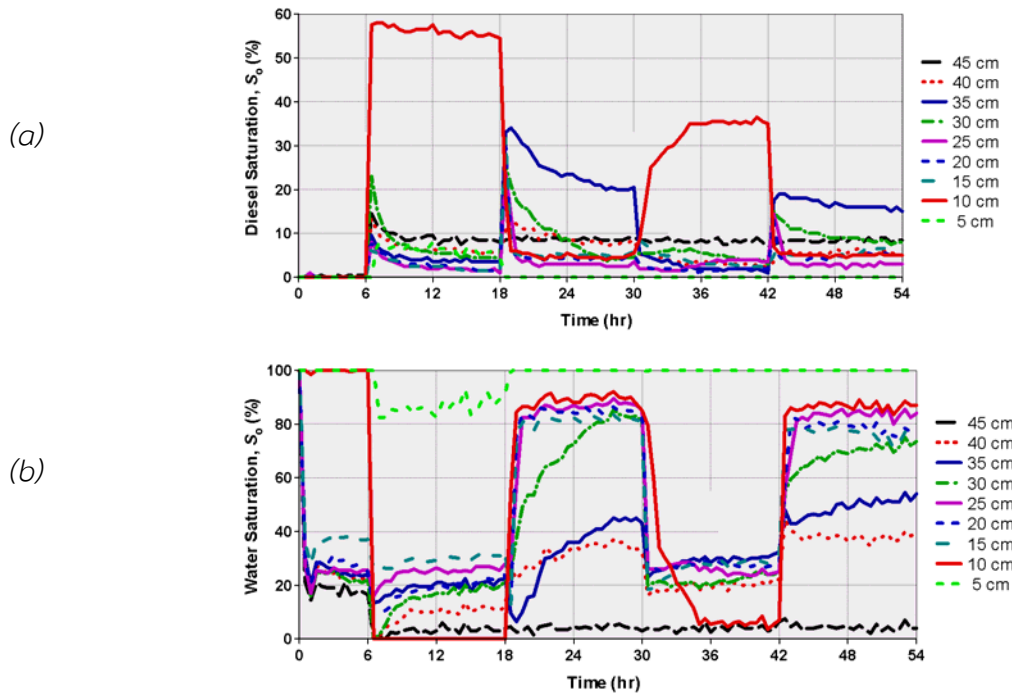
(e)  $t = 42$  hours



(f)  $t = 54$  hours

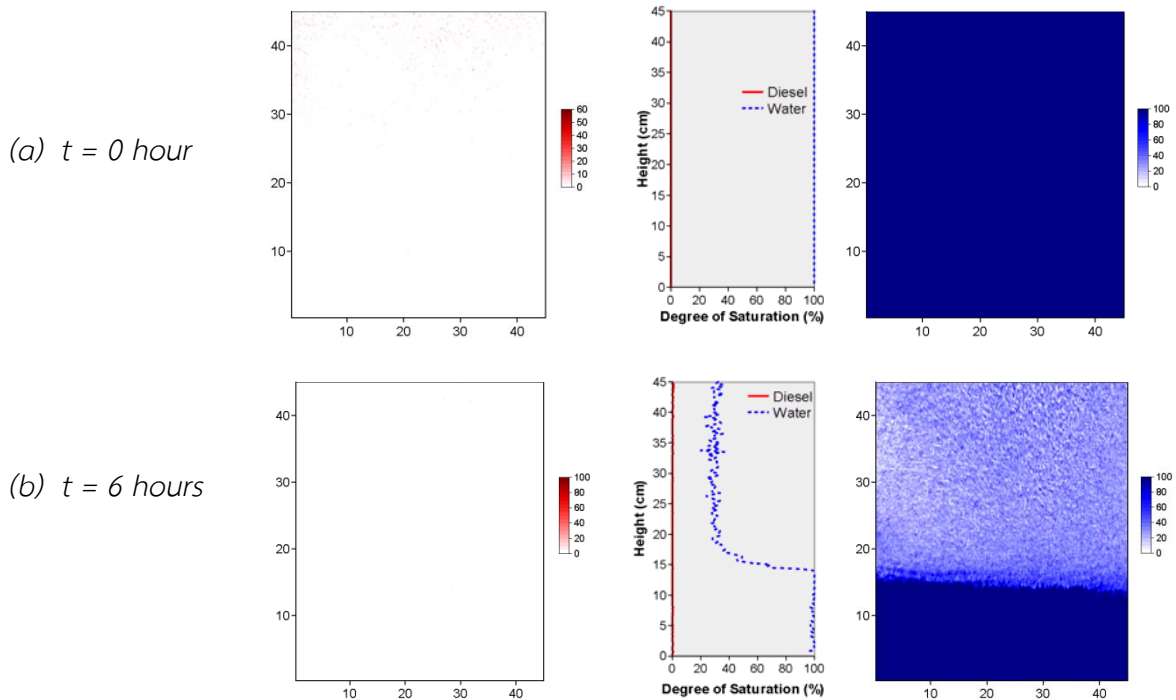


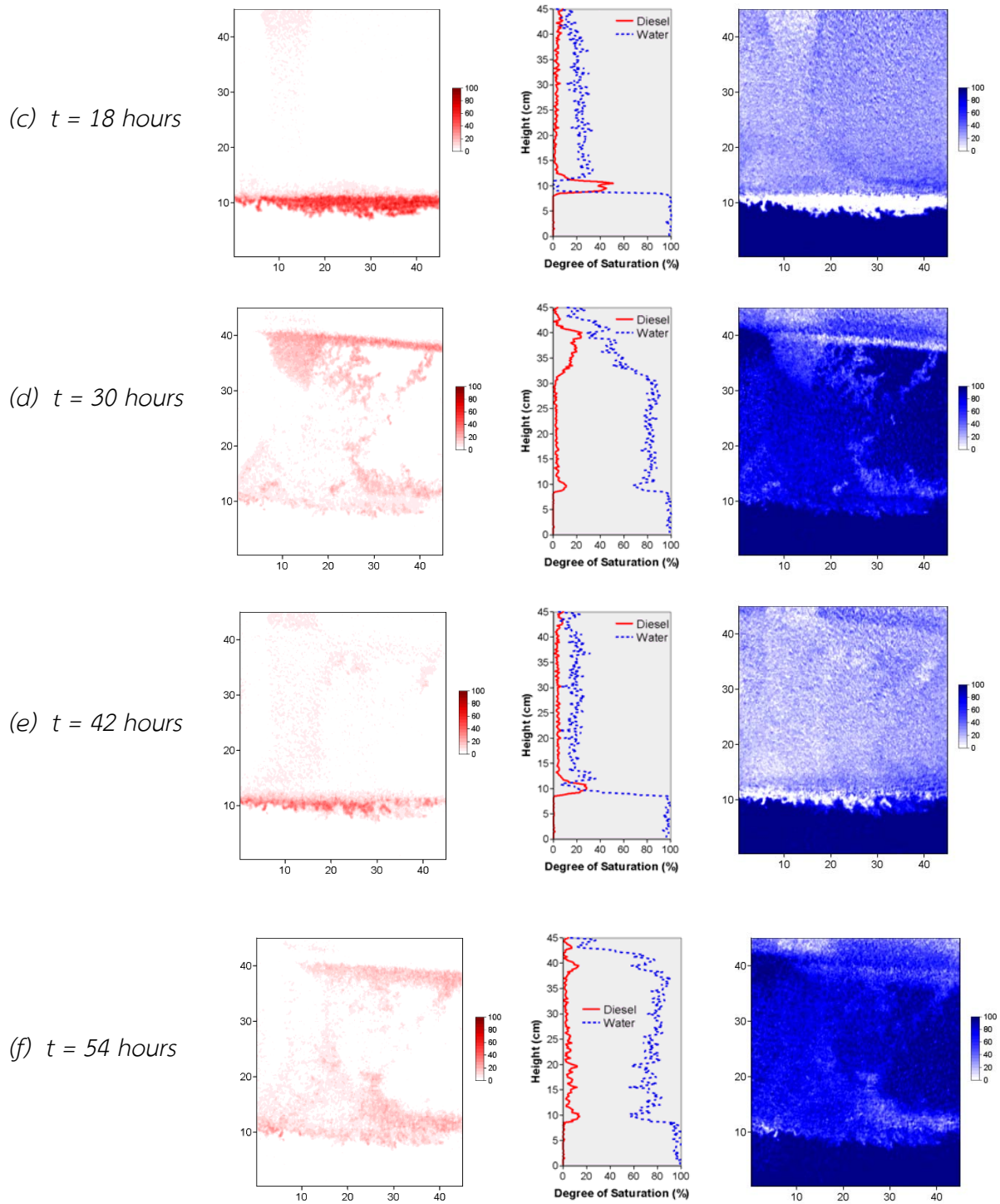
รูปที่ 4-13 เส้นระดับความอิ่มตัวของน้ำมันดีเซล (ซ้าย), เส้นระดับความอิ่มตัวของน้ำและน้ำมันดีเซล (กลาง) และเส้นระดับความอิ่มตัวของน้ำ(ขวา) ที่ไหลออกจากจุดกึ่งกลางของจุดรั่วไหลในแต่ละช่วงเวลาในแต่ละการทดลอง



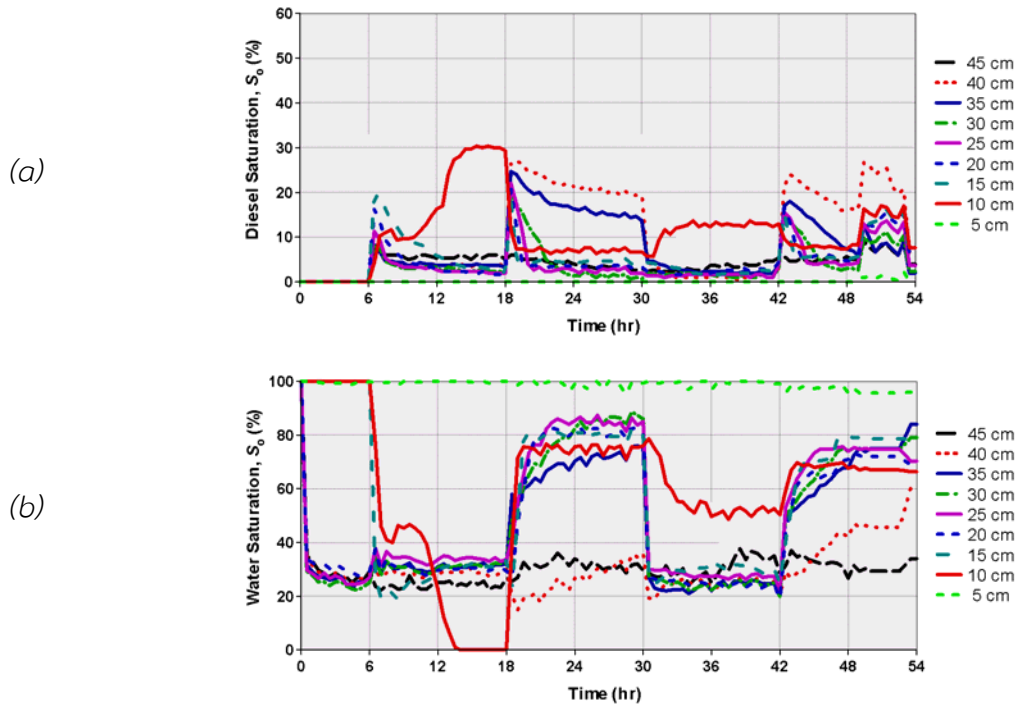
รูปที่ 4-14 (a) เส้นระดับความอิ่มตัวของน้ำมันดีเซลในช่วงเวลาต่างๆของการทดลอง T-1, (b) เส้นระดับความอิ่มตัวของน้ำในช่วงเวลาต่างๆของการทดลอง T-1

ผลการทดสอบ Test T-2: ทราย Ottawa#3820,  $i = 0.1$  แสดงในรูปที่ 4-15 และ 4-16



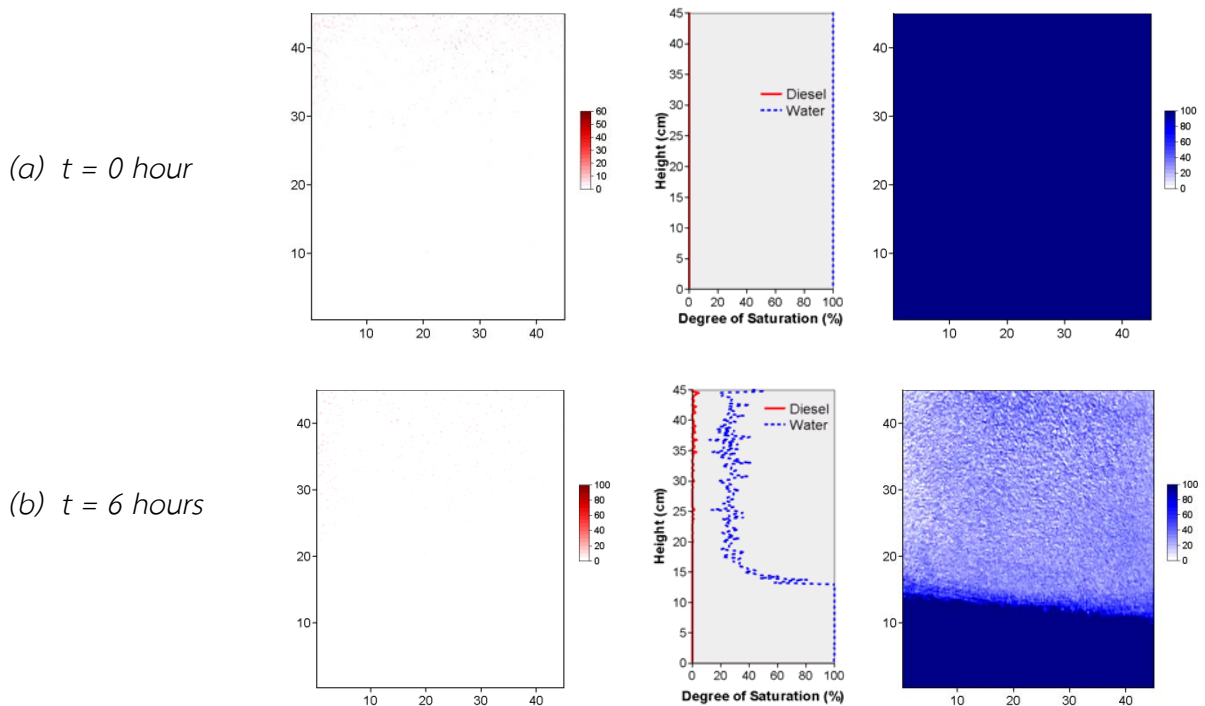


รูปที่ 4-15 เส้นระดับความอิ่มตัวของน้ำมันดีเซล (ซ้าย), เส้นระดับความอิ่มตัวของน้ำและน้ำมันดีเซล (กลาง) และเส้นระดับความอิ่มตัวของน้ำ(ขวา) ที่ไหลออกจากจุดกึ่งกลางของจุดรั่วไหลในแต่ละช่วงเวลาในแต่ละการทดลอง



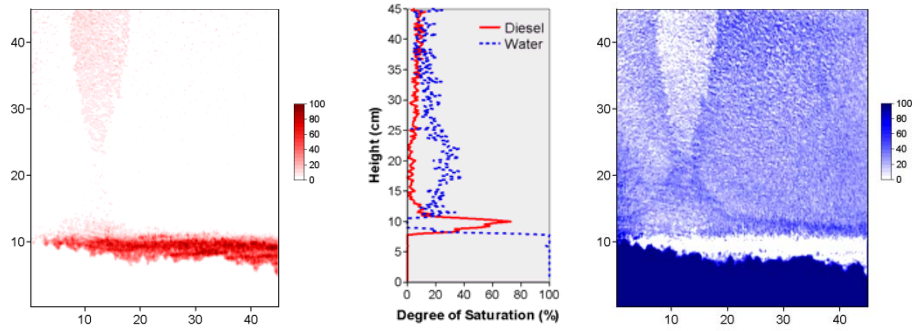
รูปที่ 4-16 (a) เส้นระดับความอิ่มตัวของน้ำมันดีเซลในช่วงเวลาต่างๆของการทดลอง T-2, (b) เส้นระดับความอิ่มตัวของน้ำในช่วงเวลาต่างๆของการทดลอง T-2

ผลการทดสอบ Test T-3: ทราย Ottawa#3820 sand,  $i = 0.2$  แสดงในรูปที่ 4-17 และ 4-18

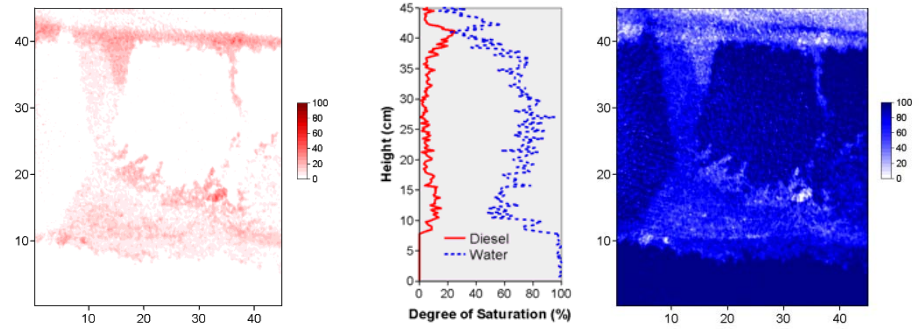




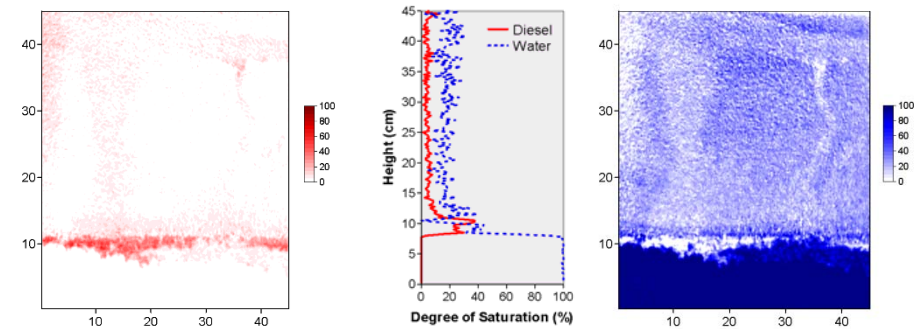
(c)  $t = 18$  hours



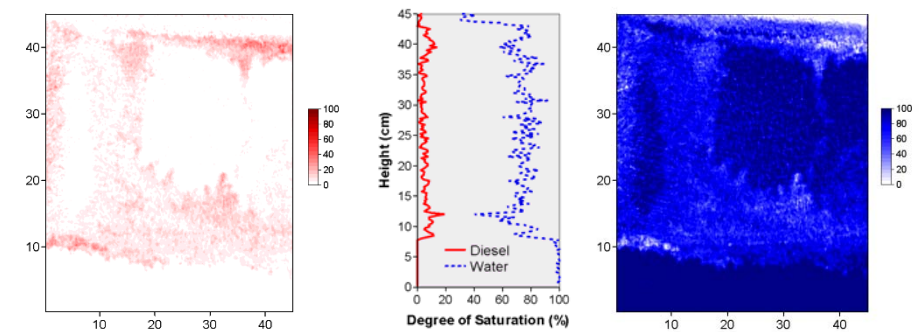
(d)  $t = 30$  hours



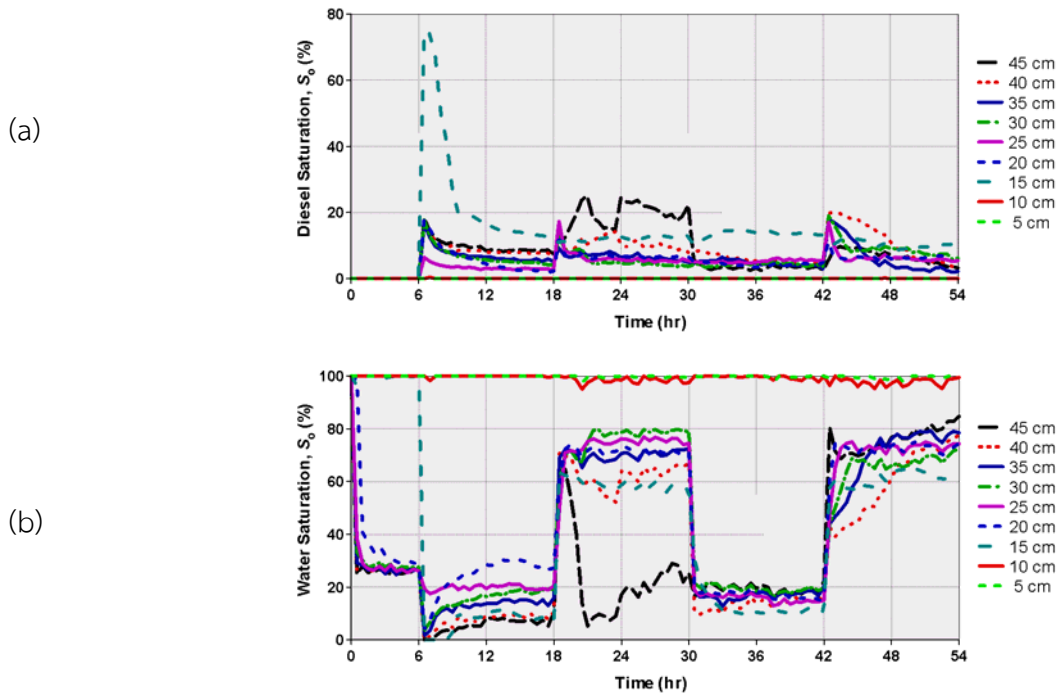
(e)  $t = 42$  hours



(f)  $t = 54$  hours

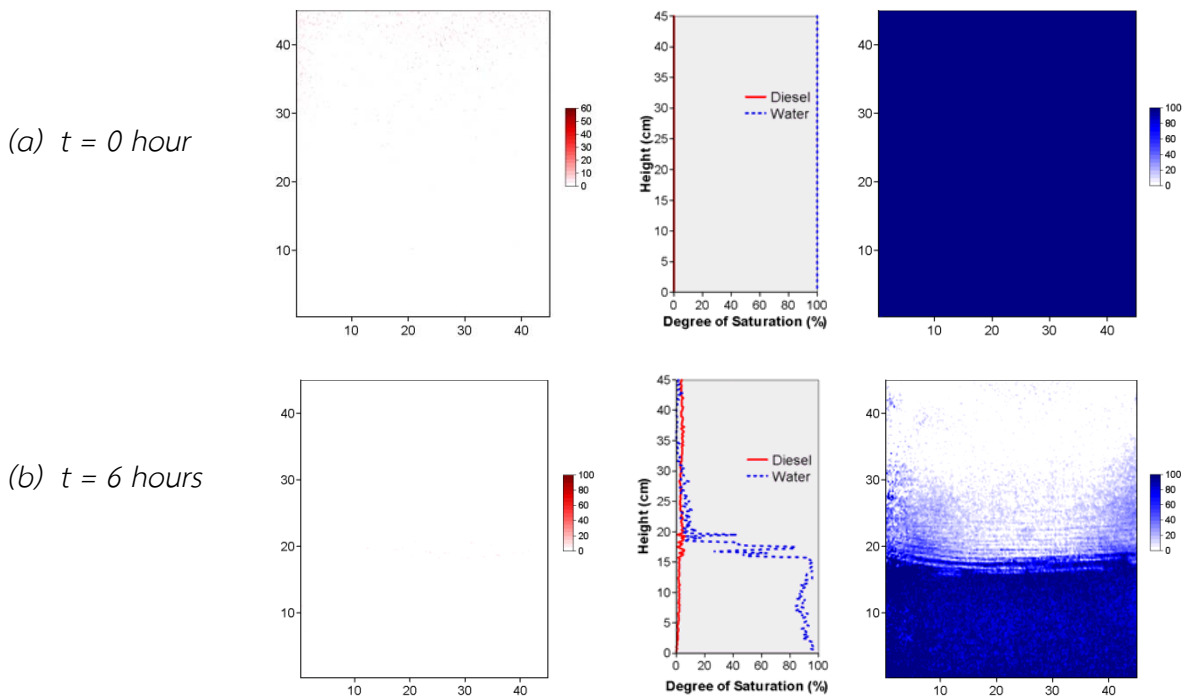


รูปที่ 4-17 เส้นระดับความอึมตัวของน้ำมันดีเซล (ซ้าย), เส้นระดับความอึมตัวของน้ำและน้ำมันดีเซล (กลาง) และเส้นระดับความอึมตัวของน้ำ(ขวา) ที่ไหลออกจากจุดกึ่งกลางของจุดรั่วไหลในแต่ละช่วงเวลาในแต่ละการทดลอง

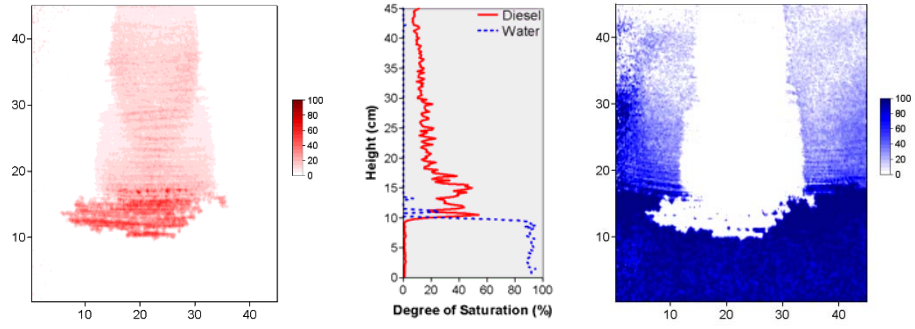


รูปที่ 4-18 (a) เส้นระดับความอิ่มตัวของน้ำมันดีเซลในช่วงเวลาต่างๆของการทดลอง T-3, (b) เส้นระดับความอิ่มตัวของน้ำในช่วงเวลาต่างๆของการทดลอง T-3

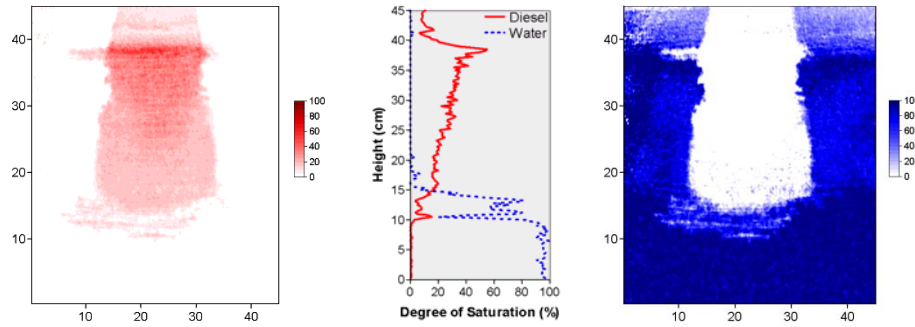
ผลการทดสอบ Test T-4: ทราย Ottawa#3821 sand,  $i = 0$  แสดงในรูปที่ 4-19 และ 4-20



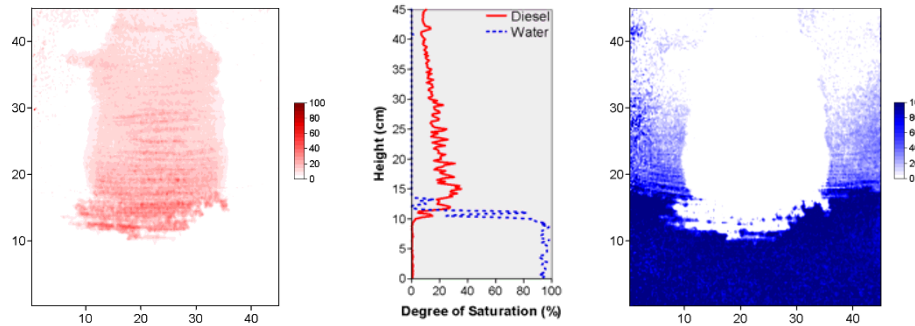
(c)  $t = 18$  hours



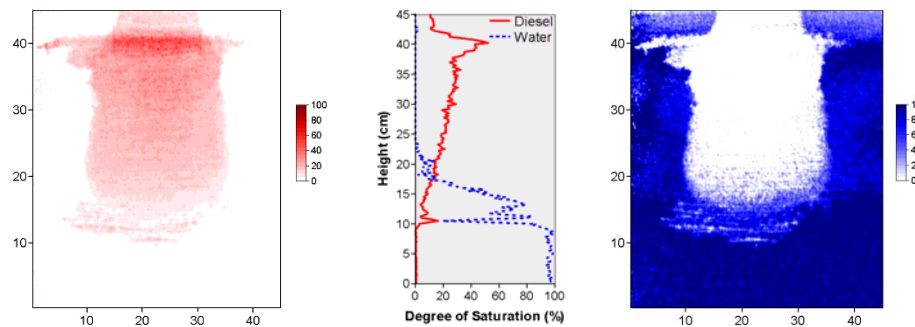
(d)  $t = 30$  hours



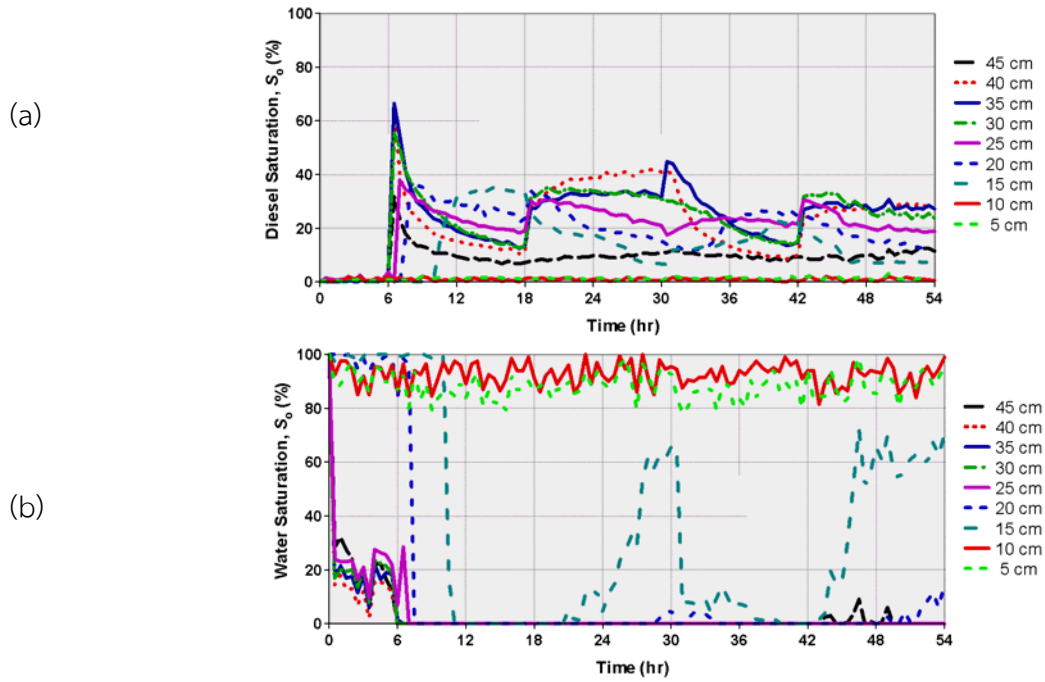
(e)  $t = 42$  hours



(f)  $t = 54$  hours

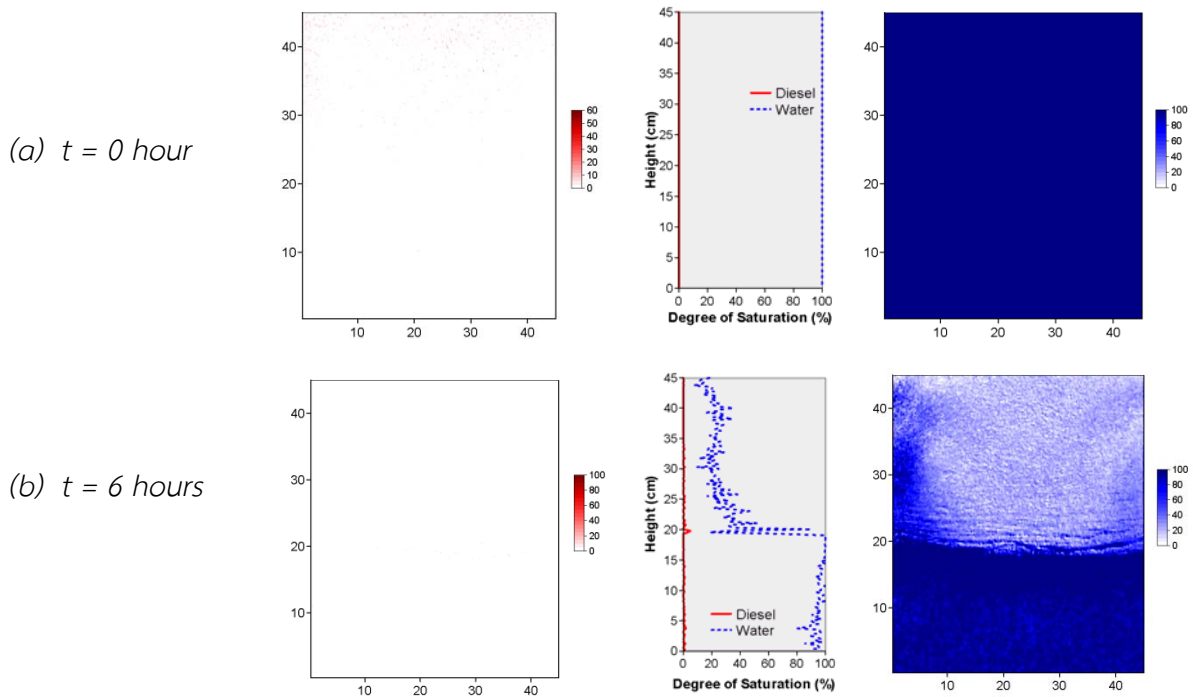


รูปที่ 4-19 เส้นระดับความอิ่มตัวของน้ำมันดีเซล (ซ้าย), เส้นระดับความอิ่มตัวของน้ำและน้ำมันดีเซล (กลาง) และเส้นระดับความอิ่มตัวของน้ำ(ขวา) ที่ไหลออกจากจุดกึ่งกลางของจุดรั่วไหลในแต่ละช่วงเวลาในแต่ละการทดลอง

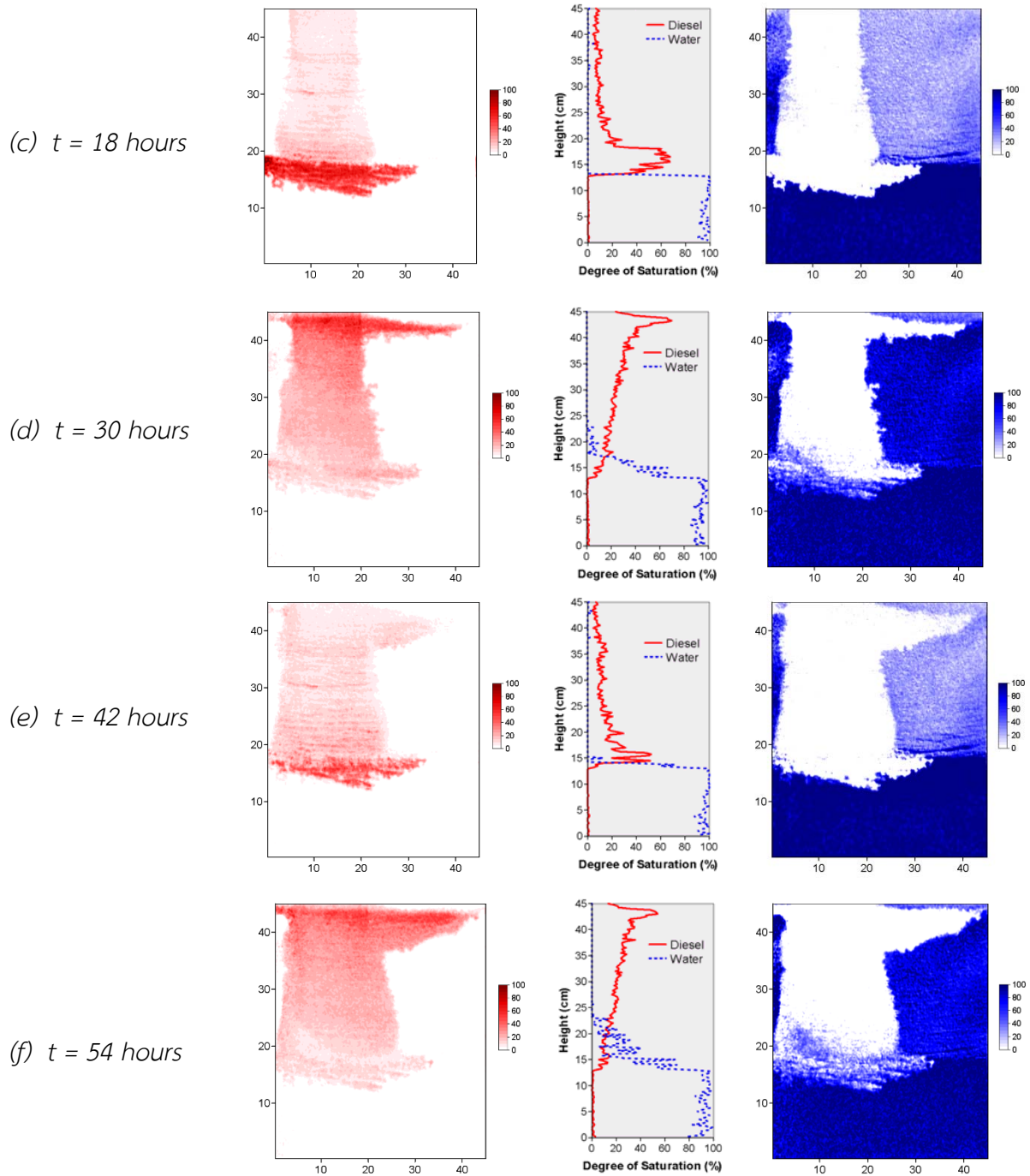


รูปที่ 4-20 (a) เส้นระดับความอิ่มตัวของน้ำมันดีเซลในช่วงเวลาต่างๆของการทดลอง T-4, (b) เส้นระดับความอิ่มตัวของน้ำในช่วงเวลาต่างๆของการทดลอง T-4

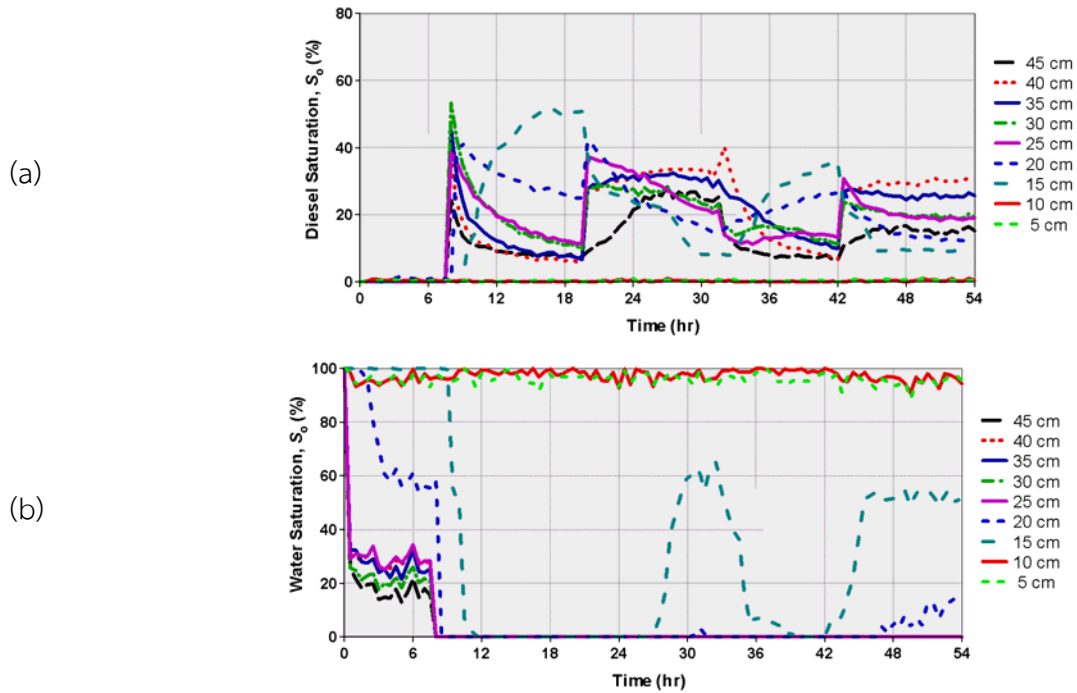
ผลการทดสอบ Test T-5: ทราย Ottawa#3821 sand,  $i = 0.1$  แสดงในรูปที่ 4-21 และ 4-22





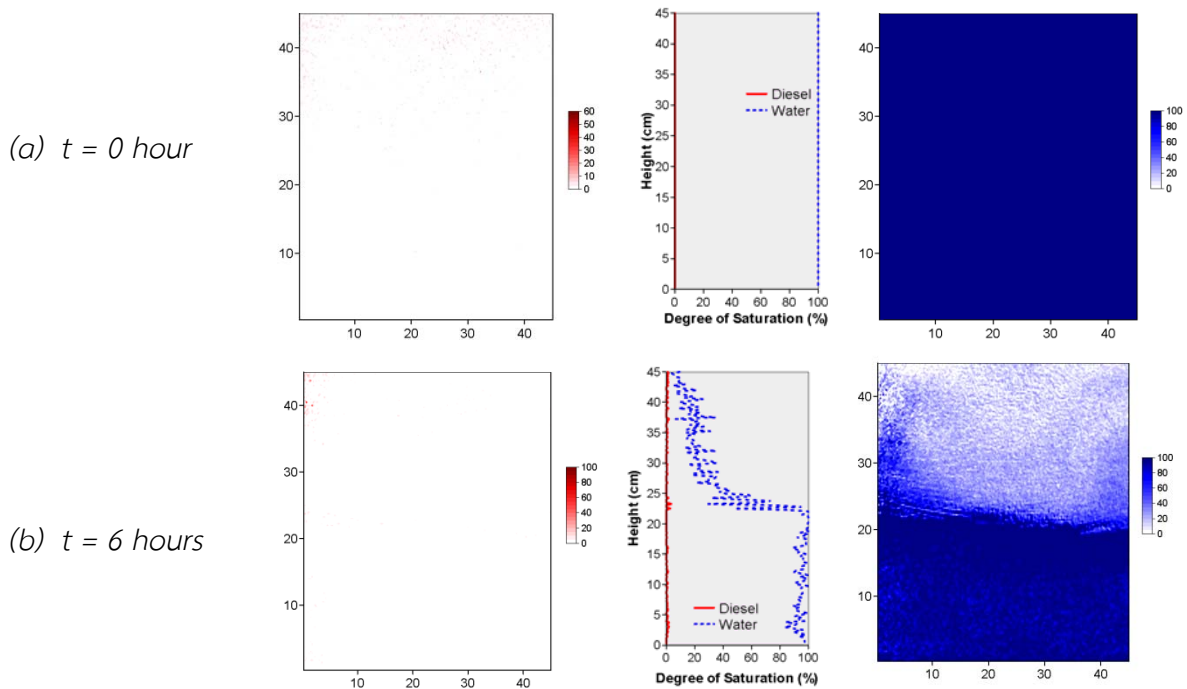


รูปที่ 4-21 เส้นระดับความอิ่มตัวของน้ำมันดีเซล (ซ้าย), เส้นระดับความอิ่มตัวของน้ำและน้ำมันดีเซล (กลาง) และเส้นระดับความอิ่มตัวของน้ำ(ขวา) ที่ไหลออกจากจุดกึ่งกลางของจุดรั่วไหลในแต่ละช่วงเวลาในแต่ละการทดลอง

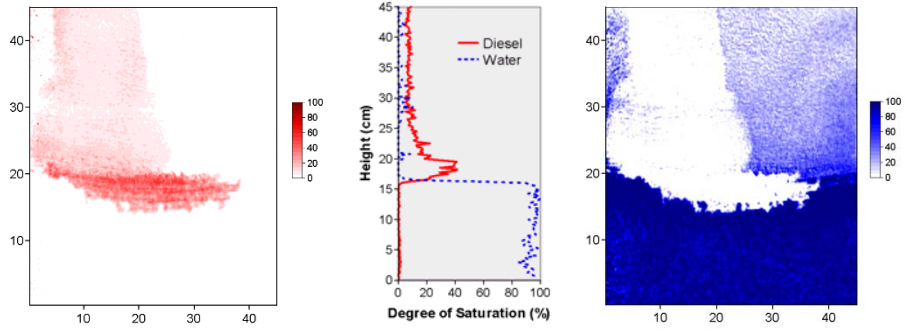


รูปที่ 4-22 (a) เส้นระดับความอิ่มตัวของน้ำมันดีเซลในช่วงเวลาต่างๆของการทดลอง T-5, (b) เส้นระดับความอิ่มตัวของน้ำในช่วงเวลาต่างๆของการทดลอง T-5

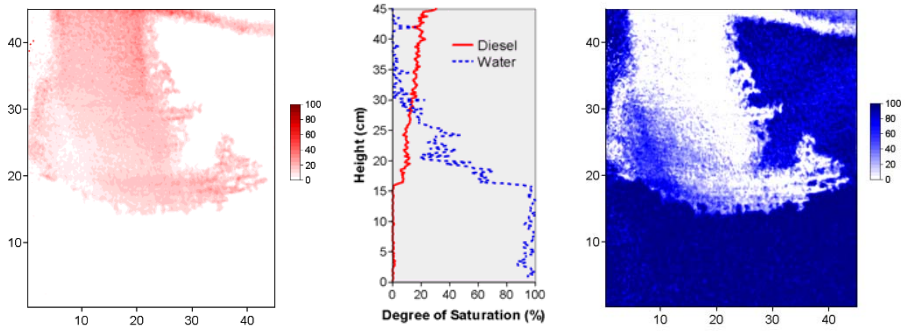
ผลการทดสอบ Test T-6: ทราย Ottawa#3821 sand,  $i = 0.2$  แสดงในรูปที่ 4-23 และ 4-24



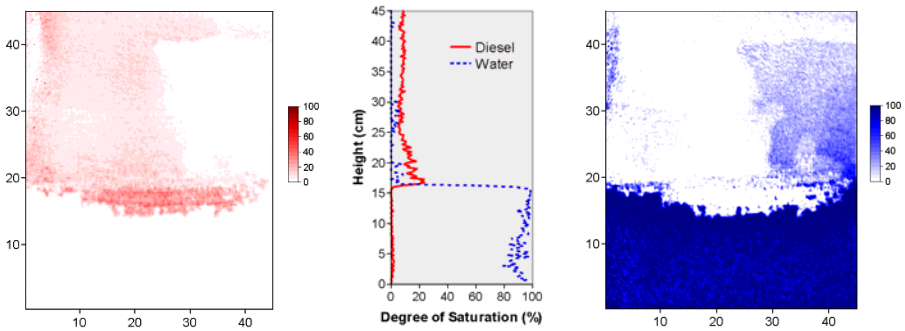
(c)  $t = 18$  hours



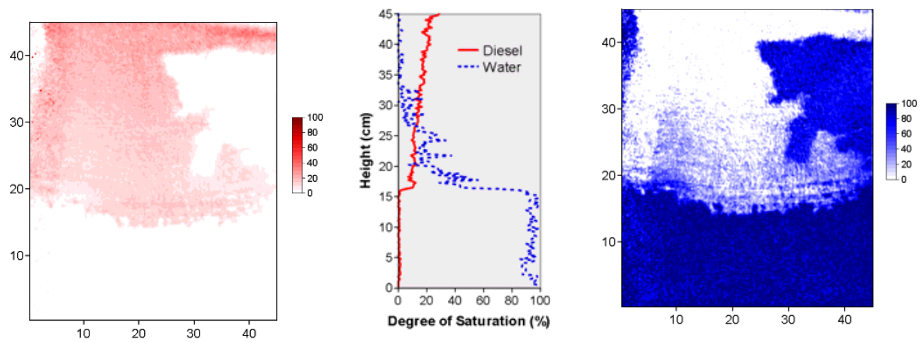
(d)  $t = 30$  hours



(e)  $t = 42$  hours

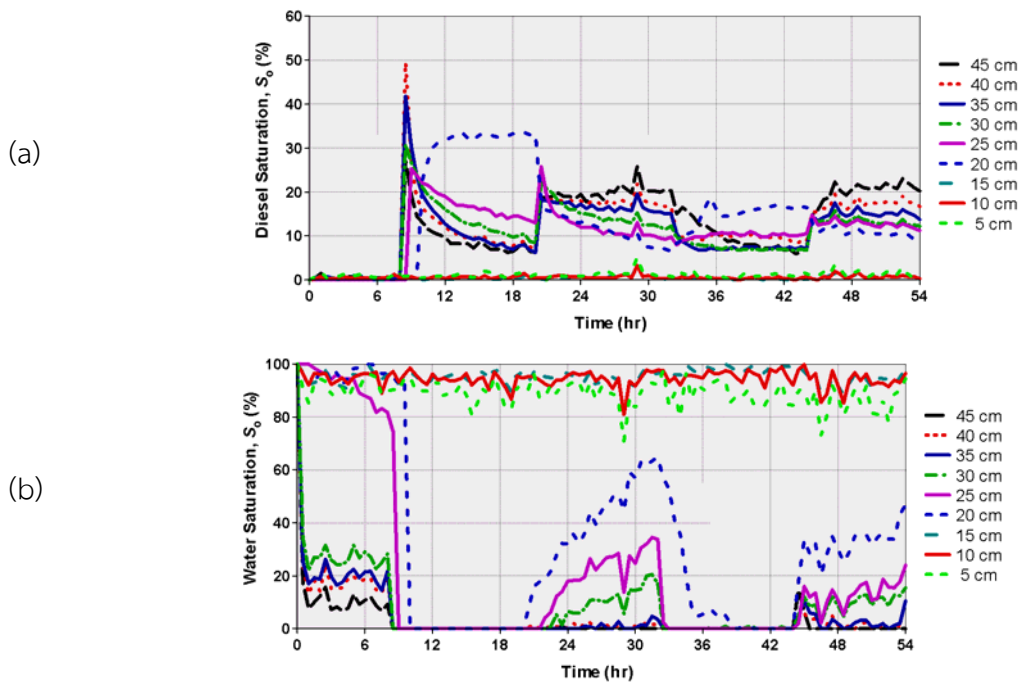


(f)  $t = 54$  hours



รูปที่ 4-23 เส้นระดับความอิ่มตัวของน้ำมันดีเซล (ซ้าย), เส้นระดับความอิ่มตัวของน้ำและน้ำมันดีเซล (กลาง) และเส้นระดับความอิ่มตัวของน้ำ(ขวา) ที่ไหลออกจากจุดกึ่งกลางของจุดรั่วไหลในแต่ละช่วงเวลาในแต่ละการทดลอง

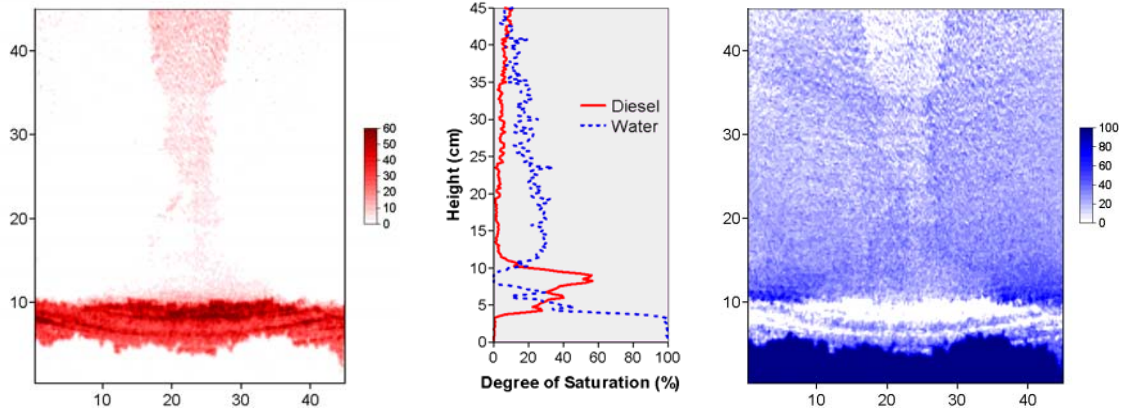
ทดลอง



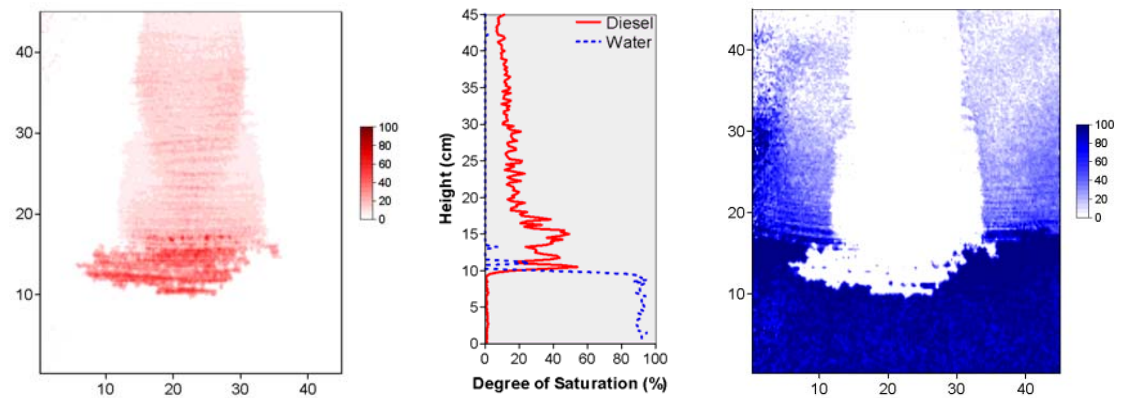
รูปที่ 4-24 (a) เส้นระดับความอิ่มตัวของน้ำมันดีเซลในช่วงเวลาต่างๆของการทดลอง T-6, (b) เส้นระดับความอิ่มตัวของน้ำในช่วงเวลาต่างๆของการทดลอง T-6

#### 4.6 วิเคราะห์ผลการทดลอง

จากการทดลองการไหลซึมของน้ำมันดีเซลผ่านทรายที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำภายใต้สภาวะน้ำขึ้น-น้ำลง ของน้ำมันดีเซลในตัวกลางที่เป็นเนื้อเดียวกันในการหาระดับความอิ่มตัวของของเหลวและพฤติกรรมกระจายตัวของน้ำมันดีเซลพบว่า จากตัวอย่างทดลอง T-1 และ T-4 รายละเอียดของการทดลองดังแสดงในตารางที่ 4-3 ที่เวลา 18 ชั่วโมง การไหลซึมของน้ำมันดีเซลของตัวอย่างทดลอง T-1 และ T-4 ดังแสดงในรูปที่ 4-25 และ 4-26 ตามลำดับ จะสังเกตได้ว่าการทดลองที่ T-1 น้ำมันดีเซลจะไหลซึมลงมาได้เร็วกว่าและไหลไปได้ไกลจากจุดรั่วซึมมากกว่าการทดลอง T-4 ที่น้ำมันดีเซลจะไหลซึมได้ช้ากว่ามาก โดยผลของการแตกต่างของการไหลซึมดังกล่าวเป็นผลมาจากการที่การทดลองทั้งสองนั้นมีตัวกลางที่เป็นสื่อกลางในการไหลซึมของน้ำมันดีเซลที่ต่างกันซึ่งตัวอย่างทดลองที่ T-1 และ T-4 มีทราย Ottawa #3820 และ Ottawa #3821 เป็นสื่อกลางในการทดลองตามลำดับ โดยที่ทราย Ottawa #3820 (T-1) จะมีขนาดของเม็ดทรายที่ใหญ่กว่า Ottawa #3821 (T-4) ที่มีขนาดเม็ดที่เล็กกว่า แต่ทรายทั้งสองชนิดมีค่าความนำชลศาสตร์ (Hydraulic conductivity,  $k$ ) และอัตราส่วนของช่องว่างระหว่างเม็ดดิน (Void Ratio) ที่ใกล้เคียงกันทำให้ ดังแสดงในตารางที่ 4-1 ซึ่งผลของความแตกต่างของการทดลองทั้งสองนั้นมาจากการที่ทรายที่มีขนาดของเม็ดที่ใหญ่และเล็กนั้นจะมีแรงเสียดทานที่ผิวที่แตกต่าง ส่งผลให้ทรายที่มีขนาดเม็ดใหญ่การซึมของน้ำมันดีเซลนั้นจะไหลซึมไปได้ง่ายกว่าและไหลซึมตามชั้นของน้ำใต้ไปได้ไกลจากจุดรั่วซึมมาก ส่วนทรายที่มีขนาดเม็ดที่เล็กนั้นน้ำมันดีเซลจะไหลซึมได้ช้ากว่าและไหลซึมตามชั้นของน้ำใต้ดินได้น้อย



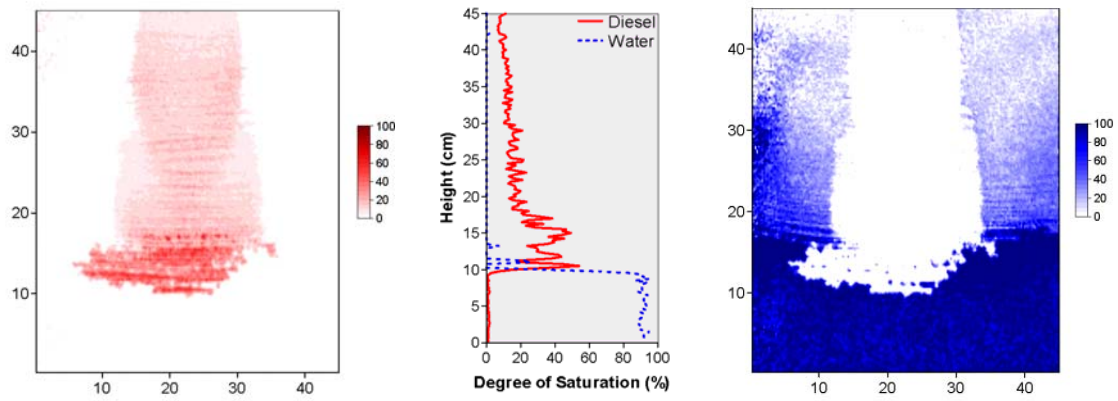
รูปที่ 4-25 การทดลอง T-1 (Ottawa #3820) มีค่า  $i=0$  ที่เวลา 18 ชั่วโมง แสดงระดับความอิ่มตัวของน้ำมันดีเซล (ซ้าย), เส้นระดับความอิ่มตัวของน้ำและน้ำมันดีเซล (กลาง), ระดับความอิ่มตัวของน้ำ (ขวา)



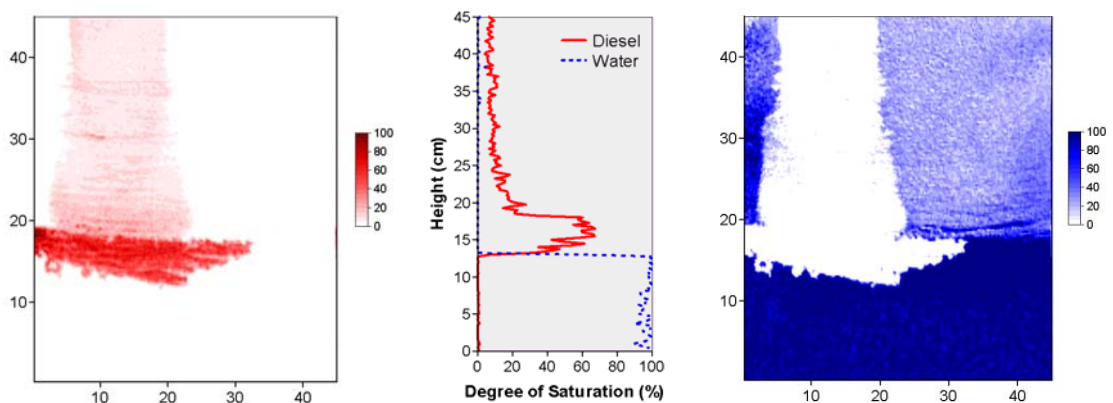
รูปที่ 4-26 การทดลอง T-4 (Ottawa #3821) มีค่า  $i=0$  ที่เวลา 18 ชั่วโมง แสดงระดับความอิ่มตัวของน้ำมันดีเซล (ซ้าย), เส้นระดับความอิ่มตัวของน้ำและน้ำมันดีเซล (กลาง), ระดับความอิ่มตัวของน้ำ (ขวา)

ส่วนในผลของการเปลี่ยนแปลงการไหลของน้ำใต้ดินในแนวนอนนั้นมีผลต่อการไหลซึมของน้ำมันดีเซล พบว่าน้ำมันดีเซลที่เป็น LNAPLs จะซึมผ่านในแนวตั้งลงมาภายใต้แรงโน้มถ่วงของโลกและจะซึมผ่านช่องว่างแคปิลารีจนถึงชั้นดินที่อิ่มตัวด้วยน้ำ และบางส่วนของน้ำมันดีเซลจะแทรกอยู่เหนือชั้นของน้ำใต้ดิน พบว่าน้ำมันดีเซลจำนวนมากจะสะสมอยู่เหนือชั้นของน้ำใต้ดินและทำให้เกิดการลดลงของช่องว่างคาปิลารีทำให้การซึมของน้ำและน้ำมันดีเซลลดลง จากสมมาตรการเคลื่อนที่ด้านข้างของน้ำมันดีเซลพบว่าการทดลองที่ T-1 และ T-4 ซึ่งไม่มีการไหลของน้ำใต้ดินในแนวนอนส่วนในการทดลองที่ T-2, T-5 ( $i=0.1$ ) และการทดลองที่ T-3, T-4 ( $i=0.2$ ) การเคลื่อนที่ด้านข้างตามทิศทางการไหลของน้ำใต้ดินพบว่าน้ำมันดีเซลจะลอยอยู่เหนือระดับของน้ำและจะไหลซึมไปตามทิศทางการไหลน้ำ ถ้าชั้นของน้ำใต้ดินมีอัตราการไหลของน้ำใต้ดินที่สูงทำให้การปนเปื้อนของน้ำมันดีเซลนั้นจะมีการปนเปื้อนขนาดใหญ่เมื่อเปรียบเทียบกับอัตราการไหลของน้ำใต้ดินที่ต่ำกว่าดังแสดงในรูปที่ 4-27 สำหรับทราย Ottawa #3821

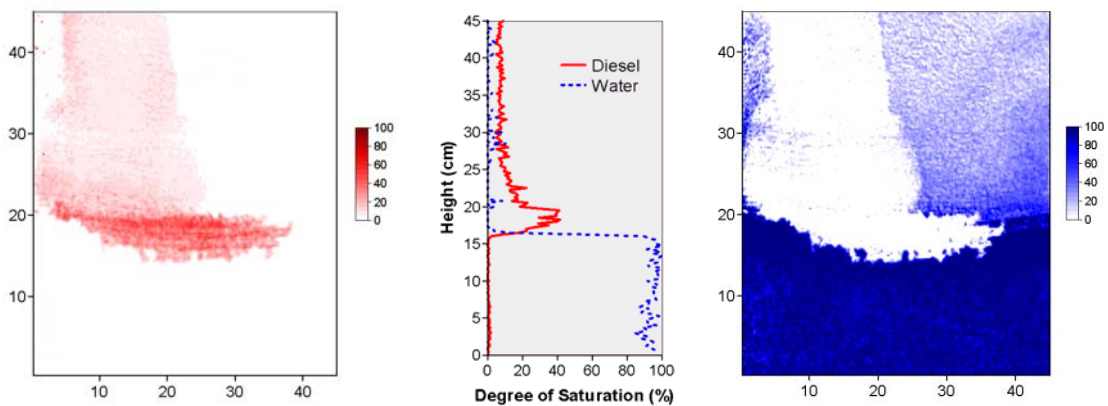




(a) การทดลองที่ T-4 ( $i=0$ )



(b) การทดลองที่ T-5 ( $i=0.1$ )

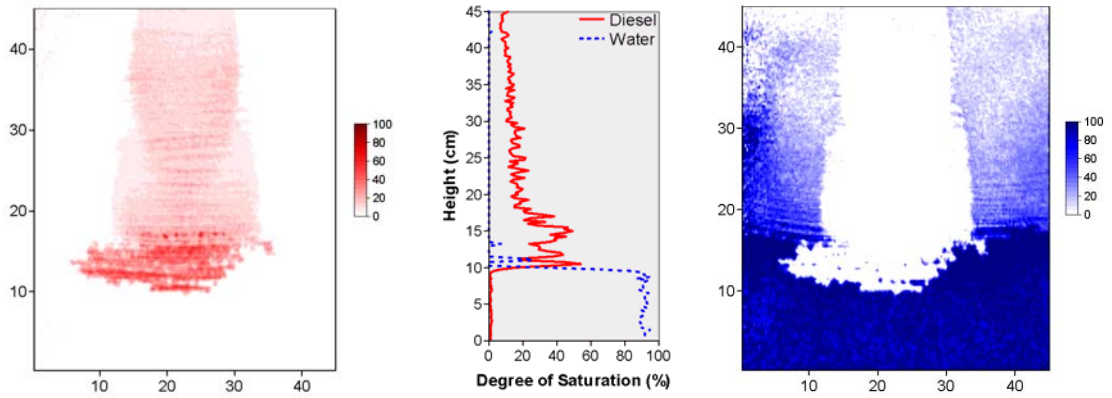


(c) การทดลองที่ T-6 ( $i=0.2$ )

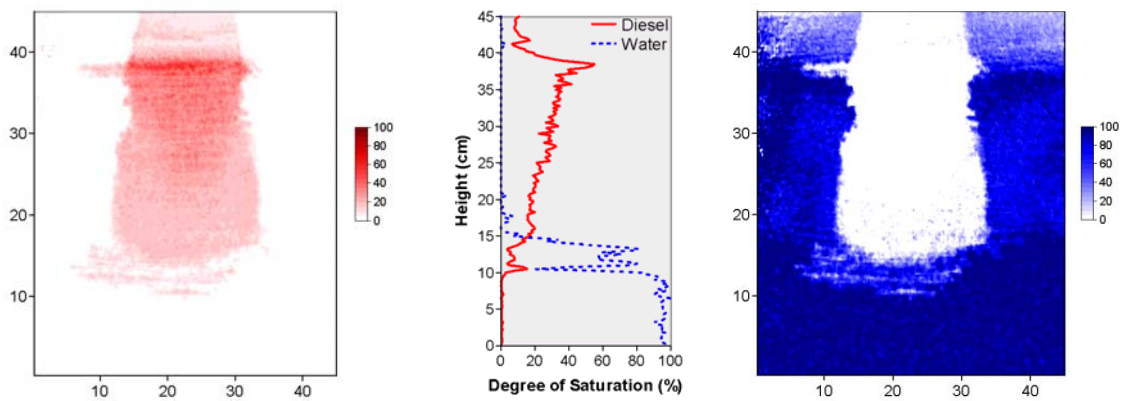
รูปที่ 4-27 การทดลองที่ T-4 ถึง T-6 ที่เวลา 18 ชั่วโมง แสดงระดับความอิ่มตัวของน้ำมันดีเซล (ซ้าย), เส้นระดับความอิ่มตัวของน้ำและน้ำมันดีเซล (กลาง), ระดับความอิ่มตัวของน้ำ (ขวา)

ผลของการขึ้น-ลง ของระดับน้ำใต้ดินนั้นพบว่าจากรูปที่ 4-28(a) เมื่อน้ำมันดีเซลไหลซึมออกจากจุดรั่วซึมน้ำมันจะซึมลงมาตามแนวตั้งเมื่อถึงชั้นที่อิ่มตัวด้วยน้ำ น้ำมันจะลอยตัวอยู่เหนือชั้นของน้ำที่ระดับความสูง 10 เซนติเมตร ทำให้ระดับความอิ่มตัวของน้ำมันบริเวณเหนือชั้นของน้ำมีค่าที่สูงมากกว่าบริเวณอื่นๆ หลังจาก

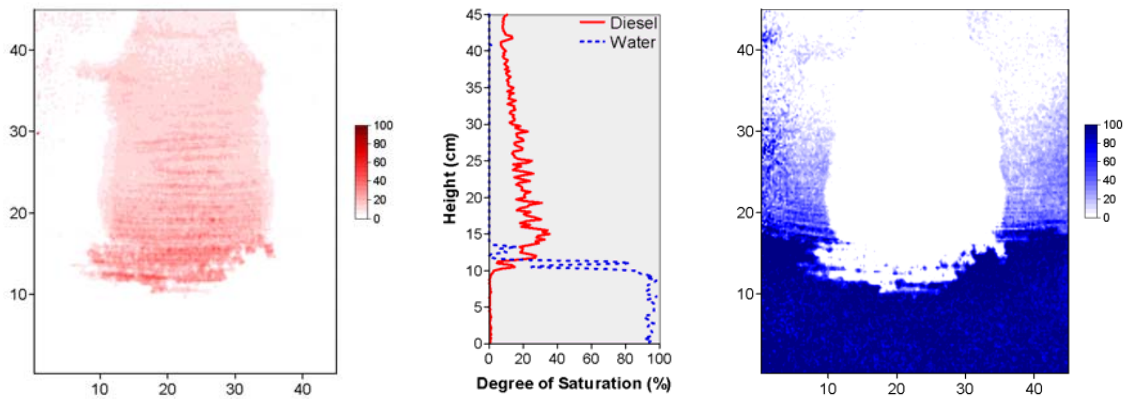
นั้นเมื่อทำการเพิ่มระดับของน้ำใต้ดินน้ำมันดีเซลก็ส่วนใหญ่ก็จะลอยขึ้นไปพร้อมกับน้ำและจะลอยอยู่เหนือระดับของน้ำทำให้ความอืดตัวของน้ำมันดีเซลที่ระดับ 40 เซนติเมตร มีระดับความอืดตัวของน้ำมันดีเซลที่สูง แต่จะมีน้อยมันดีเซลบางส่วนที่ไม่ได้ลอยขึ้นไปพร้อมกับการขึ้นของระดับน้ำทำให้เกิดการคั่งค้างอยู่ในทรายและจะมีปริมาณคั่งค้างในระดับความสูงต่างๆที่แตกต่างกันดังแสดงในรูปที่ 4-28(b) และเมื่อทำการลดระดับของชั้นน้ำลงอีกครั้งน้ำที่ลอยอยู่เหนือน้ำก็จะค่อยๆซึมลงมาตามระดับของน้ำที่ลดลงทำให้ระดับความอืดตัวที่ระดับ 10 เซนติเมตรมีค่ามาก ดังแสดงในรูปที่ 4-28(c) แต่เมื่อนำค่าของระดับความอืดตัวของน้ำมันที่ระดับ 10 เซนติเมตร ที่เวลา 18 ชั่วโมง และ 42 ชั่วโมง ดังแสดงในรูปที่ 4-28(a) และ 4-28(b) ตามลำดับ จะสังเกตได้ว่าค่าระดับความอืดตัวของน้ำมันที่ 18 ชั่วโมงจะมีค่าระดับความอืดตัวที่มากกว่าที่เวลา 42 ชั่วโมง และการคั่งค้างของน้ำมันดีเซลที่ระดับความสูงต่างๆก็จะมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้น ซึ่งน้ำมันที่คั่งค้างอยู่นั้นจะส่งผลทำให้เกิดการปนเปื้อนอย่างต่อเนื่องเมื่อมีการขึ้น-ลง ของระดับน้ำใต้ดิน



(a)  $t = 18$  hour



(b)  $t = 30$  hour



(c)  $t = 42$  hour

รูปที่ 4-28 การทดลองที่ T-4 (Ottawa #3821) มีค่า  $i=0$  แสดงระดับความอิ่มตัวของน้ำมันดีเซล (ซ้าย), เส้นระดับความอิ่มตัวของน้ำและน้ำมันดีเซล (กลาง), ระดับความอิ่มตัวของน้ำ (ขวา) ที่เวลาต่างๆ



## บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง

จากการศึกษาการไหลซึมผ่านของน้ำกลั่น น้ำมันแก๊สโซฮอล์ E20 น้ำมันแก๊สโซฮอล์ E85มันเบนซิน 95 ผ่านทราย จากสภาวะที่ทรายอิ่มตัวจน (Saturated) เป็นสภาวะที่ทรายไม่อิ่มตัว (Unsaturated) โดยเครื่องมือที่ใช้ในการทดลองคือ กระจกทรงสูงหนึ่งมิติ (One Dimensional Column) ตัวอย่างทรายที่ใช้ในการทดลองทำการเก็บตัวอย่างที่ระดับความลึก 0.40 เมตร และ 0.70 เมตร โดยทำการควบคุมความหนาแน่นของตัวอย่างทรายที่ใช้ในการทดลอง 2 ค่า คือ ที่ความหนาแน่นที่  $1.50 \text{ g/cm}^3$  และความหนาแน่นที่  $1.56 \text{ g/cm}^3$  ตามลำดับ ของเหลวที่ใช้ในการทดลองประกอบด้วย น้ำกลั่น น้ำมันเบนซินออกเทน 95 น้ำมันแก๊สโซฮอล์ E20 น้ำมันแก๊สโซฮอล์ E85 สามารถสรุปผลการทดลองได้ดังนี้

- ดินที่ระดับความลึก 0.40 เมตร ไม่เหมาะสมที่จะนำมาศึกษาการไหลซึมผ่านของน้ำมันเบนซินและน้ำมันแก๊สโซฮอล์ เพราะดินดังกล่าวเป็นดินที่ประกอบไปด้วยดินเม็ดละเอียด (Fine grained soil) มาก ซึ่งดินจำพวกนี้มีค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้ต่ำ เมื่อนำมาทำให้ที่อิ่มตัวด้วยน้ำเวลาปล่อยให้น้ำไหลออกมา น้ำจะไม่ไหลซึมออกมา หรือไหลในปริมาณที่น้อยมาก จึงไม่เหมาะสมที่จะนำมาใช้ในการทดลองซึ่งมีระยะเวลาในการทดลองจำกัด
- ดินทรายที่มีความหนาแน่นมากกว่า ( $1.56 \text{ กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร}$ ) จะมีการตกค้างของของเหลวมากกว่าดินทรายที่มีความหนาแน่นน้อยกว่า ( $1.50 \text{ กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร}$ ) โดยมีความมากกว่าประมาณ 20-40 % ในทุกของเหลวที่ใช้ในการทดลอง เนื่องจากดินที่มีความหนาแน่นมาก จะมีขนาดช่องว่างในเม็ดดินที่เล็กกว่าดินที่มีความหนาแน่นน้อย ทำให้มีค่ามูร์ซีมี ( $r'$ ) ระหว่างเม็ดดินน้อย
- การทดลองความสัมพันธ์ของการไหลซึมผ่านของของเหลวทั้ง 4 ชนิดที่ความหนาแน่น 1.50 และ 1.56 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร พบว่า ที่ทั้งสองความหนาแน่น น้ำกลั่นมีการตกค้างมากที่สุด อันดับรองลงมาคือ แก๊สโซฮอล์ E85 แก๊สโซฮอล์ E20 และ น้ำมันเบนซิน 95 ตามลำดับ โดยน้ำมีการตกค้างมากกว่าเบนซิน ประมาณ 40-100 % น้ำมันแก๊สโซฮอล์ E85 มีการตกค้างมากกว่าเบนซิน ประมาณ 20-25 % น้ำมันแก๊สโซฮอล์ E20 มีการตกค้างมากกว่าเบนซิน ประมาณ 5-30 % ทั้งนี้เนื่องจากน้ำมีความถ่วงจำเพาะ ความหนืด และแรงตึงผิวมากกว่าของเหลวชนิดอื่นๆ ทำให้การไหลผ่านช่องว่างระหว่างเม็ดดินนั้นทำได้ยาก จึงมีการตกค้างมากที่สุด ส่วนน้ำมันเบนซิน 95 มีความถ่วงจำเพาะ ความหนืด และแรงตึงผิวน้อยที่สุดจึงทำให้การไหลผ่านช่องว่างระหว่างเม็ดดินนั้นเป็นไปได้ง่ายกว่าของเหลวชนิดอื่นๆจึงทำให้มีตกค้างน้อยที่สุด

จากการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นเชิงแสงเฉลี่ยและระดับความอิ่มตัวของของเหลวในทรายพบว่าความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นเชิงแสงเฉลี่ยและระดับความอิ่มตัวของของเหลวมีความสัมพันธ์แบบเชิงเส้นกันจากความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นเชิงแสงเฉลี่ยของ  $D_{450}$  และ  $D_{640}$  กับระดับความอิ่มตัวของน้ำมันดีเซล ( $S_o$ ) และระดับความอิ่มตัวของน้ำ ( $S_w$ ) ซึ่งเราจะใช้ค่าสัมประสิทธิ์ความแม่นยำ (coefficients of correlation,  $R^2$ ) เป็นตัวตัดสินใจในการเลือก พบว่าค่าสัมประสิทธิ์ความแม่นยำของทราย Ottawa #3820 มีค่าเท่ากับ 0.91 ( $D_{450}$ ) และ 0.93 ( $D_{640}$ ), ทราย Ottawa #3821 มีค่าเท่ากับ 0.71

( $D_{450}$ ) และ 0.74 ( $D_{640}$ ) และทรายชลบุรี (Chonburi Sand) มีค่าเท่ากับ 0.19 ( $D_{450}$ ) และ 0.16 ( $D_{640}$ ) ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์ความแม่นยำที่เป็นที่น่าพอใจในการนำมาเป็นวัสดุกลางในการศึกษาการเปลี่ยนแปลงระดับการไหลของน้ำใต้ดินในแนวนอนที่มีการซึมผ่านของน้ำมันดีเซลจึงเลือกวัสดุที่มีค่าของค่าสัมประสิทธิ์ความแม่นยำมากกว่า 0.70 พบว่าทราย Ottawa #3820 และ Ottawa #3821 จึงเหมาะแก่การนำไปศึกษาต่อไป สำหรับทรายชลบุรีมีค่าสัมประสิทธิ์ความแม่นยำที่ต่ำมากจึงไม่เหมาะแก่การนำมาการศึกษาเพราะจะทำให้ผลของการศึกษาโดยใช้เทคนิควิเคราะห์ภาพถ่ายมีการคลาดเคลื่อนเนื่องจากทรายชลบุรีที่เป็นทรายที่มีปริมาณของสารอินทรีย์ที่สูง

จากการศึกษาการไหลซึมของน้ำมันดีเซลผ่านทรายที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำภายใต้สภาวะน้ำขึ้น-น้ำลง พบว่าเมื่อน้ำมันดีเซลรั่วไหลออกจากจุดรั่วซึม น้ำมันดีเซลจะไหลซึมไปตามแนวโค้งตามแรงโน้มถ่วงของโลก และจะไหลซึมผ่านจนมาถึงชั้นที่อิ่มตัวด้วยน้ำซึ่งในชั้นนี้น้ำมันดีเซลจะลอยอยู่เหนือระดับของน้ำโดยที่เม็ดทรายที่มีขนาดใหญ่จะส่งผลทำให้การไหลซึมของน้ำมันดีเซลจะไหลได้เร็วกว่าเม็ดทรายที่มีขนาดเล็กซึ่งเป็นผลมาจากแรงเสียดทานที่ผิวของเม็ดทราย เมื่อชั้นของระดับน้ำมีค่าของความชันทางชลศาสตร์ (Hydraulic Gradient,  $i$ ) เข้ามาเกี่ยวข้องกับค่าของความชันทางชลศาสตร์จะส่งผลทำให้การไหลซึมของน้ำมันดีเซลในแนวราบซึ่งถ้ามีค่าของความชันทางชลศาสตร์ที่มากจะทำให้การไหลของน้ำมันดีเซลในแนวราบจะไหลไปได้ไกลจากจุดรั่วซึมเมื่อเปรียบเทียบการค่าของความชันทางชลศาสตร์ที่น้อยจะไหลในแนวราบได้น้อยกว่า

ในส่วนของการขึ้น-ลง ของระดับน้ำใต้ดิน เมื่อระดับลดลงในระดับต่ำสุดน้ำมันจะไหลซึมลงมาอยู่เหนือบริเวณของชั้นน้ำทำให้ระดับความอิ่มตัวของน้ำมันดีเซลที่บริเวณนี้มีค่าที่สูงกว่าบริเวณอื่น แต่เมื่อเพิ่มระดับของชั้นน้ำให้อยู่ในระดับสูงสุดน้ำมันดีเซลที่ลอยอยู่เหนือน้ำจะค่อยๆเคลื่อนตัวขึ้นไปพร้อมกับน้ำและส่วนใหญ่จะลอยอยู่เหนือระดับของน้ำแต่จะมีน้ำมันดีเซลบางส่วนที่คั่งค้างอยู่ในช่องว่างของเม็ดทรายไม่เคลื่อนตัวขึ้นไปพร้อมกับระดับของน้ำ น้ำมันดีเซลที่คั่งค้างอยู่ในส่วนนี้จะส่งผลทำให้เกิดการปนเปื้อนลงไปในแหล่งน้ำตามธรรมชาติที่ใกล้เคียงกับจุดที่เกิดการรั่วซึม เมื่อนำน้ำที่เกิดการปนเปื้อนมาอุปโภคและบริโภค จะส่งผลเสียต่อสุขภาพ

## เอกสารอ้างอิง

- ASTM International, Designation: D 2325 – 68 (Reapproved 2000) “Standard Test Method for Capillary- Moisture Relationships for Coarse- and Medium textured Soils by Porous-Plate Apparatus” pp. 228-232
- Chapuis, R. P., Masse, I., Madinner, B., and Aubertin, M. (2007), “A Drainage Column Test for Determining Unsaturated Properties of Coarse Material”, Vol. 30, Issue 2, pp. 1-7
- Darnault, C. J. G., Throop, J. A., Di Carlo, D. A., Rimmer, A., Steenhuis, T. S., and Parlange, J.Y. (1998), “Visualization by light transmission of oil and water contents in transient two-phase flow fields”, Journal of Contaminant Hydrology, Vol. 31(3-4), pp. 337-348
- Fagerlund, F., Illangasekare, T.H., and Niemi, A. (2007), “Nonaqueous-Phase Liquid Infiltration and Immobilization in Heterogeneous Media: 2. Application to Stochastically Heterogeneous Formations”, Vadose Zone Journal, Vol. 6, pp. 483-495
- Ferrand, L. A., Milly, P. C. D., and Pinder, G. F. (1989), “Experimental Determination of Three-Fluid Saturation Profiles in Porous media”, Journal of Contaminant Hydrology, Vol. 4, pp. 373-395
- Fetter, C. W. (1999), Contaminant Hydrogeology, 2<sup>nd</sup> Ed., Prentice Hall
- Flores, G. (2010), “A Simplified Image Analysis Method to Evaluate LNAPL Saturation under Fluctuating Groundwater Conditions”, Doctoral thesis, Kyoto University
- Flores, G., Katsumi, T., Inui, T., and Kamon, M. (2010), “Examination of LNAPL Migration in Porous Media Using a Simplified Image Analysis Method”, Proc. of 9<sup>th</sup> Geo-environmental Engineering, Korea, pp. 83-90
- Kechavarzi, C., Soga, K., and Wiert, P. (2000), “Multispectral image analysis method to determine dynamic fluid saturation distribution in two-dimensional three-fluid phase flow laboratory experiments”, Journal of Contaminant Hydrology, Vol. 46(3-4), pp. 265-293
- Lu, N. and Likos, W. J. (2004), Unsaturated Soil Mechanics, Wiley
- Kamon, M., Endo, K., and Katsumi, T. (2003), “Measuring the k-S-p relation on DNAPLs migration”, Engineering Geology, Vol. 70, Issues 3-4, pp. 351-363
- Oostrom, M., Dane, J.H., and Wietsma, T.W. (2007), “A Review of Multidimensional, Multifluid Intermediate-scale Experiments: Flow Behavior, Saturation Imaging, and Tracer Detection and Quantification”, Vadose Zone Journal, Vol. 6(3), pp. 610-637

- Rimmer, A., Di Carlo, D. A., Steenhuis, T. S., Bierck, B., Durnford, D., and Parlange, J. Y. (1998), "Rapid fluid content measurement method for fingered flow in an oil-water-sand system using synchrotron X-rays", *Journal of Contaminant Hydrology*, Vol. 31(3-4), pp. 315-335
- Sharma, R. S. and Mohamed, M. H. A. (2003), "An experimental investigation of LNAPL migration in an unsaturated/saturated sand" *Engineering Geology*, Vol. 70, Issues 3-4, pp. 305-313
- Sudsang, S., Flores, G., Katsumi, T., Inui, T., Likitlersuang, S., and Yimsiri, S. (2010), "Study of Diesel Migration in Porous Media by the Simplified Image Analysis Method", *Proc. of 23<sup>rd</sup> KKCNN Symposium on Civil Engineering, Taiwan*, pp. 379-382
- Tuck, D. M., Bierck, B. R., and Jaffe, P. R. (1998), "Synchrotron Radiation Measurement of Multiphase Fluid Saturations in Porous Media: Experimental Technique and Error Analysis", *Journal of Contaminant Hydrology*, Vol. 31(3-4), pp. 231-256
- กิจการ พรหม (2547), อุทกธรณีวิทยาสิ่งแวดล้อม, มหาวิทยาลัยนเรศวร, พิษณุโลก
- มณฑิเยร์ กังศศิเทียม (2529), กลศาสตร์ของดินด้านวิศวกรรม, กองวิจัยและทดลอง, กรมชลประทาน, กรุงเทพฯ
- ยงยุทธ โอสดสภา (2541), ปฐพีวิทยาเบื้องต้น, พิมพ์ครั้งที่ 7, ภาควิชาปฐพีวิทยา, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ
- วรรณัฐ ศรีพงษ์พิจิตร (2549), การศึกษาพฤติกรรมการปนเปื้อนของน้ำมันเชื้อเพลิงในชั้นดินไม่อิ่มตัว ด้วยการวิเคราะห์จากภาพดิจิทัล, วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ
- ศุภสิทธิ์ คนใหญ่, วิชัย ศรีบุญลือ และ เกรียงศักดิ์ ศรีสุข (2548), "ค่าสภาพนำชลศาสตร์ไม่อิ่มตัวของดินเค็ม ซึ่งเป็นฟังก์ชันของความชื้น", *วารสารวิจัย มข. (ฉบับบัณฑิตศึกษา)* 5, 2, หน้า 80-89
- สถาพร คูวิจิตรจรรู (2542), ปฐพีกลศาสตร์, พิมพ์ครั้งที่ 1, กรุงเทพฯ
- สถาพร คูวิจิตรจรรู (2542), ทดลองปฐพีกลศาสตร์, พิมพ์ครั้งที่ 1, กรุงเทพฯ

**ผลผลิต**

Yimsiri, S., Euaapiwatch, S., Flores, G., Katsumi, T., and Likitlersuang, S. (2016), “Effects of water table fluctuation on diesel fuel migration in one-dimensional laboratory study”, *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, DOI: 10.1080/19648189.2016.1197158



## Effects of water table fluctuation on diesel fuel migration in one-dimensional laboratory study

S. Yimsiri, S. Euaapiwatch, G. Flores, T. Katsumi & S. Likitlersuang

**To cite this article:** S. Yimsiri, S. Euaapiwatch, G. Flores, T. Katsumi & S. Likitlersuang (2016): Effects of water table fluctuation on diesel fuel migration in one-dimensional laboratory study, European Journal of Environmental and Civil Engineering, DOI: [10.1080/19648189.2016.1197158](https://doi.org/10.1080/19648189.2016.1197158)

**To link to this article:** <http://dx.doi.org/10.1080/19648189.2016.1197158>



Published online: 16 Jun 2016.



Submit your article to this journal [↗](#)



Article views: 3



View related articles [↗](#)



View Crossmark data [↗](#)

## Effects of water table fluctuation on diesel fuel migration in one-dimensional laboratory study

S. Yimsiri<sup>a\*</sup>, S. Euaapiwatch<sup>a</sup>, G. Flores<sup>b</sup>, T. Katsumi<sup>c</sup> and S. Likitlersuang<sup>d</sup>

<sup>a</sup>Department of Civil Engineering, Burapha University, Chonburi, Thailand; <sup>b</sup>Faculty of Engineering, Kyoto University, Kyoto, Japan; <sup>c</sup>Graduate School of Global Environmental Studies, Kyoto University, Kyoto, Japan; <sup>d</sup>Geotechnical Research Unit, Department of Civil Engineering, Chulalongkorn University, Bangkok, Thailand

(Received 5 September 2014; accepted 26 May 2016)

The effects of water table fluctuation on diesel fuel redistribution in unsaturated soil are investigated in the laboratory by one-dimensional column test. The simplified image analysis method is used to assess the saturation distributions of water and diesel in the flow domain under transient condition. The experiments are undertaken on two homogeneous sands to study the effects of different particle sizes. The two-phase experimental data illustrate soil–liquid characteristic curves (SLCCs) of water/air and diesel/air systems. The SLCCs of diesel/water systems can be predicted by scaling procedure. A descending order of matric suction at a given saturation of wetting phase is in the order of air/water, diesel/water and air/diesel systems. Coarser particle size gives smaller entry pressure, residual matric suction and residual degree of saturation. The three-phase (air/water/diesel) experimental data illustrate that, during imbibition stages, air and diesel are entrapped below water table with the entrapped air saturations of 18–24% and entrapped diesel saturations of 6–10% for fine sand. Coarser particle size yields smaller entrapped diesel saturations and larger entrapped air saturations. The residual diesel saturations during drainage stages and entrapped diesel saturations during imbibition stages do not show any systematic difference as these stages are repeated. During imbibition stages, 37–47% of the total amount of diesel fuel is entrapped under the water table. Also, there is no systematic difference in the amount of diesel fuel entrapped under the water table when imbibition stages are repeated.

**Keywords:** LNAPL; diesel fuel; water table fluctuation; residual; entrapment

### 1. Introduction

Groundwater is the most important freshwater resource that humanity must rely on. Only 0.5% of the world's total water supply is available to human as a freshwater (97% is saline water in the ocean and 2.5% is frozen as ice caps and glaciers) and 98% of the available freshwater is groundwater (Feth, 1973). Groundwater can be contaminated by many causes and contamination by organic products, which are often associated with petroleum hydrocarbons or halogenated compounds used as industrial solvents, poses one of major problems. The contamination of groundwater by petroleum hydrocarbons, such as diesel fuel and gasoline as a result of improper disposal practices, spills and leaking storage facilities, represents one of the most common sources of subsurface contamination

---

\*Corresponding author. Email: [ysiam@buu.ac.th](mailto:ysiam@buu.ac.th)

(United State Environmental Protection Agency (US EPA), 2002). These contaminants exist as an immiscible phase when in contact with water and their densities are less than water which makes them being classified as light non-aqueous phase liquids (LNAPLs). These products are usually multi-component organic mixtures consisted of chemicals with varying degrees of water solubility, but are toxic at low concentration. Therefore, they can act as long-term sources of groundwater contamination.

After LNAPL is released on the surface, it moves downward through the unsaturated zone and a fraction is retained in the soil pores as residual phase by capillary forces until movement stops. If large amount of LNAPL is released, however, it reaches saturated zone and spread laterally along the capillary fringe and may also depress the capillary fringe and groundwater table. Fluctuation of groundwater table complicates the migration of LNAPL by causing LNAPL redistribution across the zone of fluctuation because LNAPL becomes entrapped above and below the mobile LNAPL due to capillary force. Such fluctuation of groundwater table commonly occurs in any geographical regions and may arise from variation in aquifer recharge–discharge, groundwater extraction or injection through wells, seasonal rainfall, barometric effects, tidal influences and evapotranspiration cycles. Redistribution of LNAPL due to groundwater table fluctuations may lead to enhanced dissolution of LNAPL source zone and dissolved-plume formation.

To select appropriate remedial strategy at an LNAPL-contaminated site, it is necessary to delineate the extent of the contaminated area. This information can be obtained by an extensive field investigation, which generally is expensive and time-consuming. Such a field investigation can be optimised if the likely migration pattern of LNAPL can be estimated by numerical analysis. A number of numerical simulators have been developed to model LNAPL transport in subsurface (e.g. Host-Madsen & Jensen, 1992; Kaluarachchi & Parker, 1989; Karapanagioti, Gaganis, & Burganos, 2003; Unger, Sudicky, & Forsyth, 1995). Under groundwater table fluctuation condition, the hysteresis nature of the relative permeability-saturation-capillary pressure relationships and fluid entrapment phenomenon are important aspects of the implemented constitutive relationship for the numerical analysis (e.g. Oostrom, Hofstee, & Wietsma, 2006; Steffy, Johnston, & Barry, 1998; Van Geel & Sykes, 1997). Their predictive capability and adequacy of various assumptions embodied in them need to be evaluated against well-controlled laboratory experiment under transient and static conditions before confident predictions of the fate of LNAPLs in subsurface of field-scale problems can be made.

There have been many intermediate-scale multiphase flow experiments of LNAPL transport in which quantitative data are obtained. The LNAPL transport experiments were conducted in one-dimension by; e.g. Eckberg and Sunada (1984) and Lenhard, Dane, Parker, and Kaluarachchi (1988) and in 2-dimension by; e.g. Van Geel and Sykes (1994) and Kechavarzi, Soga, and Illangasekare (2005). Few researchers conducted the experiments to study effects of water table fluctuation on LNAPL redistribution in one-dimension, e.g. Lenhard, Johnson, and Parker (1993), Steffy et al. (1998) and Kamon, Li, Flores, Inui, and Katsumi (2006), and in two-dimension, e.g. Van Geel and Sykes (1997) and Oostrom et al. (2006). Very few researchers investigated the effects of repetition of water table fluctuation on LNAPL redistribution (e.g. Chompusri, Rivett, & Mackay, 2002). Unfortunately, due to the limitation of instrumentation technique, there was quantitative information of fluid saturations only either at discrete point under dynamic condition or of entire domain at near steady-state condition. Numerous researchers have also studied effects of particle size on the behaviour of unsaturated soil, i.e. on soil–liquid characteristic curve (SLCC) (e.g. Arya & Paris, 1981; Yang, Rahardjo, Leong, & Fredlund, 2004), on residual saturation (e.g. Ryan & Dhir, 1993),



and on permeability (e.g. Arya, Leij, Shouse, & van Genuchten, 1999; Chapuis, 2004); however, most studies have been done with soil element tests. Therefore, there is a dearth of intermediate-scale experimental data of transient fluid saturation distribution in the entire flow domain at any time under water table fluctuation condition with attention to effects of particle size.

The objective of the present study is to carry out a one-dimensional immiscible three-phase flow experiment with consideration on the effects of water table fluctuation on LNAPL redistribution and entrapment with particular attention to particle size of sand and repetition of water table fluctuation. The experiments are carried out under well-defined and controlled conditions by two laboratory one-dimensional columns each containing a different sand material. The phase saturation data are measured using an image analysis technique to obtain detailed quantitative data of transient fluid saturation distribution in an entire flow domain. These experimental results can develop better understanding on the effects of water table fluctuation on LNAPL migration and can provide well-controlled laboratory experimental data against which numerical models can validate their predictive capabilities.

## 2. Simplified image analysis method (SIAM)

In laboratory test, measurement of NAPL saturation is the most difficult and important task in acquiring precise quantitative data. Although gravimetric sampling method is the most accurate, it cannot provide saturation data continuously because soil samples must be removed from a soil mass. Conventionally, the non-intrusive and non-destructive methods used to measure fluid saturations are: e.g.  $\gamma$ -ray attenuation, X-ray attenuation, time domain reflectometry (TDR) and electrical conductivity probes (e.g. DiCarlo, Bauters, Steenhuis, Parlange, & Bierck, 1997; Kamon, Endo, & Katsumi, 2003; Topp, Davis, & Annan, 1980; Tuck, Bierck, & Jaffe, 1998). Although accurate, these methods are experimentally demanding and do not allow the acquisition of transient fluid saturation distribution in the entire flow domain at any specific time. The data generated are restricted to either saturation distribution under static or steady-state flow conditions or local measurement of saturation during transient flow. Owing to these experimental difficulties, the number of multi-dimensional three-phase flow experiments, where both saturation and pressure of all fluids are measured, are not abundant.

The SIAM developed by Flores, Katsumi, Inui, and Kamon (2011) is employed in this research to assess the saturation distributions of water and LNAPL in sand under transient condition. This method is a non-intrusive and non-destructive technique to measure saturations of fluids in porous media in the entire domain of the experimental column. The Beer–Lambert Law of Transmittance is employed to obtain linear relationships between average optical density (defined in Equation (1)) and fluid saturations that can be used, after proper calibration, to calculate fluid saturations of soil samples when their photos are taken.

$$D_i = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N d_{ji} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \left[ -\log_{10} \left( \frac{I_{ji}^r}{I_{ji}^0} \right) \right] \quad (1)$$

where  $D_i$  is the average optical density,  $i$  is a given spectral band,  $N$  is number of pixels contained in area of interest,  $d_{ji}$  is optical density of individual pixels,  $I_{ji}^r$  is intensity of the reflected light given by individual pixel values and  $I_{ji}^0$  is intensity of light that reflected by an ideal white surface.

The SIAM uses two consumer-grade digital cameras with the 450 and 640-nm band-pass filters. The transmittance analysis shows that, at wavelength of 640 nm, the red-dyed diesel gave maximum transmittance and the water gave minimum transmittance, whereas the opposite pattern was observed at wavelength of 450 nm. The calibration process requires three calibrating photos corresponding to the extremities of the  $D_i$ - $S_w$ - $S_o$  relationship plane, which are (i) dry sand ( $S_w = 0\%$ ,  $S_o = 0\%$ ), (ii) sand fully saturated with water ( $S_w = 100\%$ ,  $S_o = 0\%$ ) and (iii) sand fully saturated with NAPL ( $S_w = 0\%$ ,  $S_o = 100\%$ ) (see Figure 1), where  $S_w$  is water saturation and  $S_o$  is NAPL saturation. The matrix of correlation equation can then be obtained as shown in Equation (2).

$$\begin{bmatrix} D_{450} \\ D_{640} \end{bmatrix}_{14 \times 400} = \begin{bmatrix} (D_{450}^{10} - D_{450}^{00})S_w + (D_{450}^{01} - D_{450}^{00})S_o + D_{450}^{00} \\ (D_{640}^{10} - D_{640}^{00})S_w + (D_{640}^{01} - D_{640}^{00})S_o + D_{640}^{00} \end{bmatrix}_{14 \times 400} \quad (2)$$

where  $14 \times 400$  is the dimension of matrix,  $[D_{450}]_{14 \times 400}$  and  $[D_{640}]_{14 \times 400}$  are average optical densities of each mesh element for wavelengths 450 and 640 nm,  $[D_{450}^{00}]_{14 \times 400}$  and  $[D_{640}^{00}]_{14 \times 400}$  are average optical densities of each mesh element for dry sand;  $[D_{450}^{10}]_{14 \times 400}$  and  $[D_{640}^{10}]_{14 \times 400}$  for water-saturated sand;  $[D_{450}^{01}]_{14 \times 400}$  and  $[D_{640}^{01}]_{14 \times 400}$  for NAPL-saturated sand.

In this analysis, the studied domain ( $3.5 \times 100 \text{ cm}^2$ ) is divided into 5,600 ( $14 \times 400$ ) mesh elements of  $0.25 \times 0.25 \text{ cm}^2$  each. This discretisation is selected on the basis of trial analysis to optimise dispersion of the results. During the experiment, the photos are taken and the average optical densities of each mesh element of the studied domain are calculated and compared to the corresponding ones for all three cases and then water saturation  $[S_w]_{14 \times 400}$  and NAPL saturation  $[S_o]_{14 \times 400}$  can be obtained by solving Equation (2). It is verified that (i) a linear relationship exists between optical density and saturations of water and diesel fuel for Ottawa #3821 and #3820 sands with coefficients of determination ( $r^2$ ) ranging between 0.78 and 0.93 and (ii) the accuracy of obtained degree of saturation is  $\pm 10\%$ .

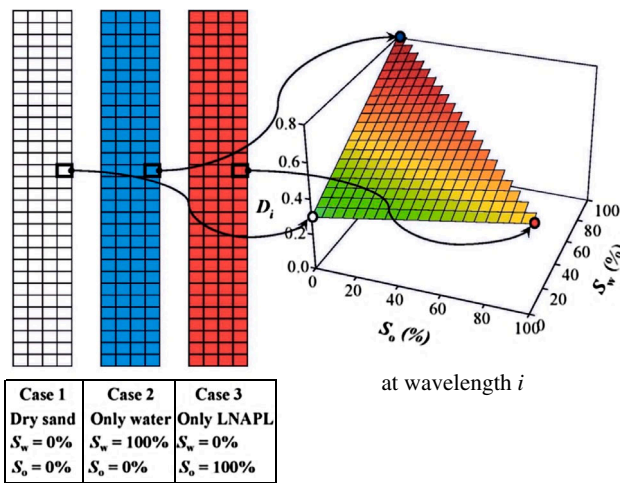


Figure 1. Simplified image analysis method.

### 3. Details of experiments

In this study, there are three experimental parts, i.e. (i) Tempe pressure cell, (ii) two-phase column experiment and (iii) three-phase column experiment. The two-phase column experiment and Tempe pressure cell aim to study the SLCCs of tested sands. The three-phase column experiment aims to investigate the effects of groundwater table fluctuation on diesel fuel distribution in subsurface.

#### 3.1. Tested sands and LNAPL

Two sand materials, i.e. Ottawa #3821 and #3820 sands, are used in this study. These tested sands are classified as poorly graded fine and medium sands, respectively, at relatively dense state. Their grain-size distribution curves are shown in Figure 2 and some properties are summarised in Table 1. Both sands are prepared at similar dry unit weight and void ratio resulting in relatively similar coefficient of permeability. Thus, the only difference between these two specimens is the grain size.

Diesel fuel is used as an experimental LNAPL. It is dyed red with Red Sudan III (1:10000 by weight) to enhance visual observation and increase its light absorbance properties. There is no noticeable change in the physical properties of diesel fuel after being mixed with dye and the dye does not migrate between water and diesel fuel and it is not absorbed by sand particles. The properties of the liquids employed in this study are summarised in Table 2.

#### 3.2. Tempe pressure cell

The air/water and air/diesel drainage tests at high matric suction are conducted using a Tempe pressure cell. In these tests, air is the non-wetting fluid and water or diesel fuel is the wetting fluid. The air pressure of 10–90 kPa is supplied through the inlet tube at the top cap and the liquid is allowed to drain out of the soil specimen from the underneath outlet which is connected to the atmosphere (0 kPa). The system is left for 24 h to reach equilibrium at each applied air pressure which is confirmed by observing the

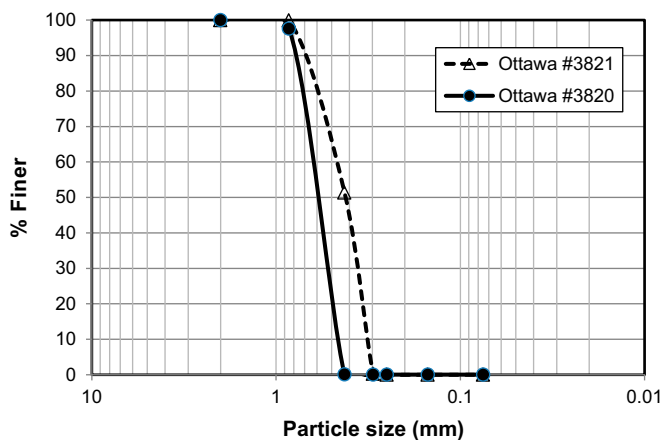


Figure 2. Grain-size distribution curves of tested sands.

Table 1. Properties of tested sands.

Properties	Ottawa #3821	Ottawa #3820
Unified Soil Classification System (USCS)	SP	SP
Description (according to USCS)	Fine sand	Medium sand
Specific gravity, $G_s$	2.63	2.64
Mean grain size ( $D_{50}$ ), mm	0.422	0.643
Coefficient of uniformity, $C_u$	1.48	1.36
Coefficient of curvature, $C_c$	0.91	0.95
Coeff. of permeability of water, $k_w$ (cm/s)*	$1.80 \times 10^{-2}$	$2.02 \times 10^{-2}$
Coeff. of permeability of diesel, $k_o$ (cm/s)*	$1.58 \times 10^{-2}$	$1.91 \times 10^{-2}$
Dry unit weight, $\gamma_{dry}$ (kN/m <sup>3</sup> )	17.6	17.6
Void ratio, $e$	0.49	0.50

\*Constant-head permeability test at 20 °C.

Table 2. Properties of tested liquids.

Properties	Water	Diesel fuel
Density, $\rho_s$ (g/cm <sup>3</sup> ) at 20 °C	0.998	0.865
Kinematic viscosity, $\mu$ (mm <sup>2</sup> /s) at 20 °C	1.00	4.10
Surface tension (mN/m) at 20 °C	70.28	28.80
Vapor pressure (mmHg) at 40 °C	7.37	3.75

change of weight of draining liquid being less than 0.5%. The procedure is then repeated at higher applied air pressure. The change in the liquid content of the soil specimen is measured by the volume of draining liquid.

### 3.3. Two-phase column experiment

One-dimensional columns,  $3.5 \times 3.5 \times 110$  cm<sup>3</sup> constructed of transparent acrylic walls, are employed in this study. The base of column is connected to the constant-head water reservoir to control the water pressure at its base. The upper air-phase boundary condition is atmospheric. Evaporation is minimised by covering top of the column with plastic plate that contained small holes to avoid producing vacuum. There are access ports at every 10 cm along the column height for sample collection to determine the liquid saturation by gravimetric method. The sampling ports has 10 mm diameter; therefore, the obtained liquid saturations are average values over these areas. The room temperature and humidity are controlled to maintain relatively stable values of 20 °C and 80%, respectively. The laboratory set-up and example colour photos are presented by Flores et al. (2011).

The air/water and air/diesel drainage tests at low matric suction are conducted by two-phase column experiment. The column is packed with oven-dried sand up to  $h = 105$  cm (where  $h$  is the height from the base of column). The column packing is done in short lift to ensure sample homogeneity. The sand is slowly wetted from below until water or diesel fuel ponded on the surface after which suction is applied from top to remove trapped air. After that, the liquid head at the base of the column is lowered to  $h = 5$  cm and the liquid inside the column is allowed to drain out through the base of column. The column is left for 72 h to allow for equilibrium by observing the change of weight of draining liquid being less than 0.5%.

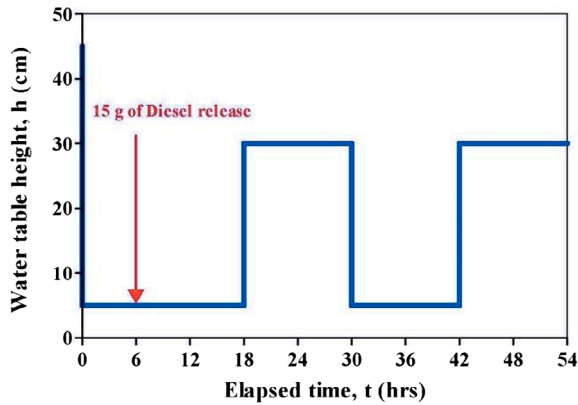


Figure 3. Prescribed water pressure at the base of the column.

### 3.4. Three-phase column experiment

The effects of groundwater table fluctuation on diesel fuel distribution are studied by three-phase column experiment. The experimental set-up is similar to that of two-phase column experiment except that, in this experiment, dry sands are filled up to only  $h = 45$  cm. After fully saturated condition, the water pressure at the base is varied to control the water table height in the column in four stages, i.e. first drainage, first imbibition, second drainage, and second imbibition, as shown in Figure 3. The water pressure head at the base of the column is altered instantaneously to the required value and the water table height inside the column is correspondingly altered in an uncontrolled rate with each stage finished within 5–10 min. The detail of each stage is described as follow.

- (i) First drainage: The water pressure at the base is lowered from  $h = 45$  to 5 cm and the water inside the column is allowed to drain freely out of the base. After 6 h, 15 g ( $17.3 \text{ cm}^3$ ) of diesel fuel is introduced from the top of column; therefore, the system composes of three phases from this point onward. The column is left for further 12 h and this stage takes totally 18 h.
- (ii) First imbibition: The water pressure at the base is raised from  $h = 5$  to 30 cm and the water table inside the column is allowed to move freely upward. After that, the column is left for 12 h.
- (iii) Second drainage: The water pressure at the base is lowered from  $h = 30$  to 5 cm and the water table inside the column is allowed to move freely downward. No additional diesel is added to the system. After that, the column is left for 12 h.
- (iv) Second imbibition: The first imbibition process is repeated in this stage.

## 4. Soil–liquid characteristic curves

### 4.1. SLCCs in two-phase systems of air/water and air/diesel

The SLCC is a relationship between the liquid saturation and matric suction ( $S$ - $p$  relation) of soil. In this study, the main drainage (drying) curves of  $S$ - $p$  relations can be analysed. The SLCCs of Ottawa #3821 and #3820 sands are shown in Figures 4 and 5,

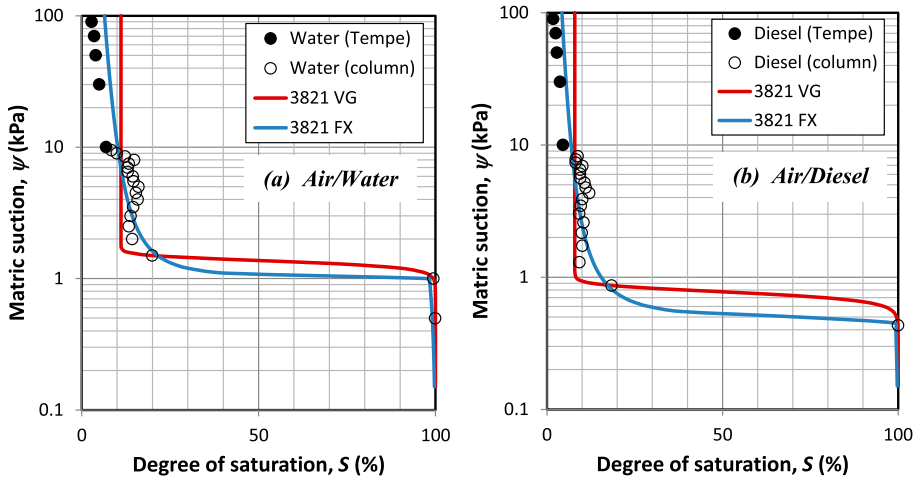


Figure 4. SLCCs of Ottawa #3821 sand.

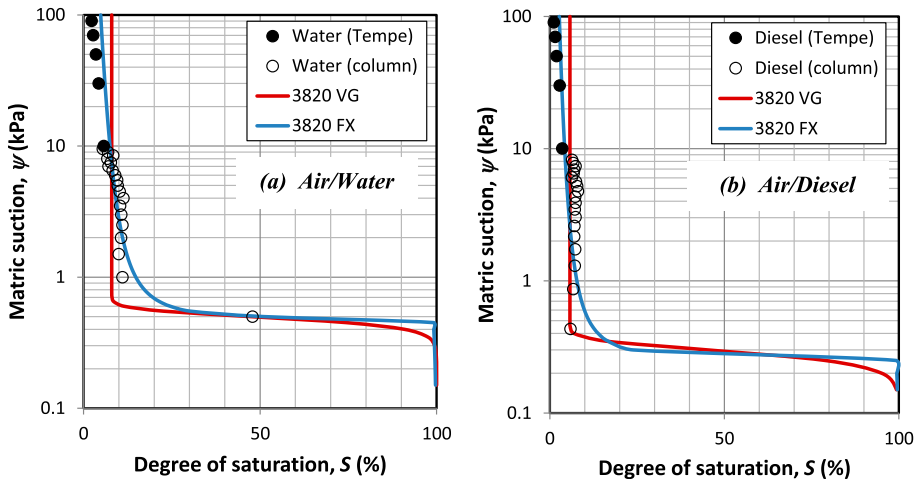


Figure 5. SLCCs of Ottawa #3820 sand.

respectively, the data of which are obtained from both two-phase column experiment (at low matric suction of less than 10 kPa) and Tempe pressure cell (at high matric suction of 10–90 kPa). In two-phase column experiment, the height of a measurement location above the liquid table is assumed to equal to the matric suction (or negative pore-liquid pressure head) at that point. The obtained SLCCs are fitted with the empirical models of van Genuchten (1980) (VG) (Equation 3) and Fredlund and Xing (1994) (FX) (Equation 4) with a least-squares algorithm and the resulting SLCCs are shown in Figures 4 and 5. The constants of the models are summarised in Table 3 and it shows that finer sand (Ottawa #3821) yields larger  $S_r$ ,  $\psi_r$ ,  $a$  and  $n$  but smaller  $m$ , whereas diesel fuel gives lower  $S_r$ ,  $a$  and  $n$  but larger  $m$ . The effects of particle size on model parameters obtained in this research are consistent with Yang et al. (2004). From this

Table 3. Constants of SLCC models.

Sand	Fluid pair	van Genuchten model					Fredlund & Xing model				
		$S_r$	$a$ (kPa)	$m$	$n$	$r^2$	$\psi_r$ (kPa)	$a$ (kPa)	$m$	$n$	$r^2$
Ottawa #3821	Air/Water	0.1109	1.460	2.55	15.56	0.982	4.252	1.027	0.37	155.0	0.993
	Air/Diesel	0.0790	0.854	2.81	11.78	0.988	4.723	0.487	0.51	54.3	0.995
Ottawa #3820	Air/Water	0.0797	0.556	2.88	10.00	0.982	3.825	0.482	0.42	130.0	0.994
	Air/Diesel	0.0574	0.376	4.72	7.09	0.989	2.589	0.260	0.50	119.0	0.989

Note: All variables are defined in Equation 4.

research, the FX model fits the experimental data better (indicated by  $r^2$  in Table 3), particularly at large matric suction which is consistent with the discussion of Fredlund and Xing (1994). Thus, only the FX model is used for further analysis.

$$S = S_r + (1 - S_r) \left[ \frac{1}{1 + \left(\frac{\psi}{a}\right)^n} \right]^m \quad (S_r, a, m, n \text{ are fitting parameters}) \quad (3)$$

$$S = \left[ 1 - \frac{\ln\left(1 + \frac{\psi}{\psi_r}\right)}{\ln\left(1 + \frac{10^6}{\psi_r}\right)} \right] \left[ \frac{1}{\ln\left[e + \left(\frac{\psi}{a}\right)^n\right]} \right]^m \quad (\psi_r, a, m, n \text{ are fitting parameters}) \quad (4)$$

where  $S$  = degree of saturation;  $\psi$  = matric suction;  $S_r$  = residual degree of saturation (see Figure 8);  $\psi_r$  = residual matric suction (see Figure 8);  $\psi_a$  = air-entry pressure (see Figure 8);  $e$  = natural number 2.71828 ...;  $a$  = model parameter relates to air-entry pressure ( $a$  increases,  $\psi_a$  increases);  $m$  = model parameter relates to residual degree of saturation ( $m$  decreases,  $\psi_r$  increases);  $n$  = model parameter relates to slope of SLCC ( $n$  decreases,  $d\psi/dS$  increases)

#### 4.2. Estimation of SLCC in two-phase system of diesel/water

For a rigid porous medium, it is only necessary to measure  $S$ - $p$  relations for two of the three two-phase systems (i.e. air/water, air/NAPL or NAPL/water) and the  $S$ - $p$  relation of the third system may then be predicted (Lenhard & Parker, 1987). In the scaling procedure proposed by Parker, Lenhard, and Kuppusamy (1987),  $S$ - $p$  relations of two-phase systems are adjusted to obtain a unique scaled function for a given porous medium after applying a linear transformation to matric suction as shown in Equation (5).

$$\bar{S}_w(\beta_{aw}\psi_{aw}) = \bar{S}_o(\beta_{ao}\psi_{ao}) = \bar{S}_w(\beta_{ow}\psi_{ow}) = S^*(\psi^*) \quad (5)$$

where  $a$ ,  $o$  and  $w$  refer to air, NAPL, and water phases, respectively;  $\bar{S}_j = (S_j - S_{jr}) / (1 - S_{jr})$  is the effective saturation of wetting phase  $j$ ;  $S_{jr}$  is the irreducible saturation of wetting phase  $j$  ( $S_{jr} = 0$  for FX model);  $\beta_{ij}$  is a fluid pair-dependent

scaling factor; and  $S^*(\psi^*)$  is a scaled function between the saturation of wetting phase and matric suction. The scaling coefficients are related as shown in Equation (6) (Lenhard & Parker, 1987). In this study, Equation (6) is employed to determine the scaling factor  $\beta_{ow}$  rather than deriving it on the basis of fluid interfacial tensions because small water solubility and volatility of organic compounds can affect the fluid interfacial tensions (Lenhard & Parker, 1988).

$$\frac{1}{\beta_{aw}} = \frac{1}{\beta_{ow}} + \frac{1}{\beta_{ao}} \quad (6)$$

The procedure for predicting  $S$ - $p$  relationship of diesel–water system is described as follows; (i) taking the air–water system as a reference fluid pair system and setting  $\beta_{aw} = 1.0$ ; (ii) fitting  $S$ - $p$  relation of air–water system to obtained  $S^*(\psi^*)$ ; (iii) obtaining  $\beta_{ao}$  by fitting  $S$ - $p$  relation of air–diesel system; (iv) obtaining  $\beta_{ow}$  by using Equation (6); and (v) calculating  $\bar{S}_w$  and  $\psi_{ow}$  according to Equation (5). The scaled effective saturation–matric suction relations are shown in Figure 6. All the scaling factors in air/water, air/diesel and diesel/water systems are summarised in Table 4. The scaling factor of each fluid pair is relatively similar for each porous medium which may indicate that the scaling factors are fluid-dependent parameters as indicated in Parker et al. (1987).

From the obtained FX parameters and scaling factors, the  $S$ - $p$  relations of all two-phase systems can be shown in Figure 7. The SLCCs show that, once the value of the matric suction increases slightly above the entry pressure, significant reduction in the degree of saturation is recorded which means that most of liquid drains out of the sand specimen. The tested sand specimens are poorly graded resulting in a relatively flat transition in the  $S$ - $p$  relationship. The physical properties can be derived from these SLCCs (see drying curve in Figure 8) and the results are summarised in Table 5. It can be seen that finer sand has larger  $\psi_a$ ,  $\psi_r$  and  $S_r$ , whereas diesel fuel gives smaller  $\psi_a$  and  $\psi_r$ . The effects of particle size on these physical parameters are also consistent with those reported by Yang et al. (2004).

Figure 7 shows that a descending sequence of matric suction at a given saturation of wetting phase is in the order of air/water, diesel/water and air/diesel systems. The entry

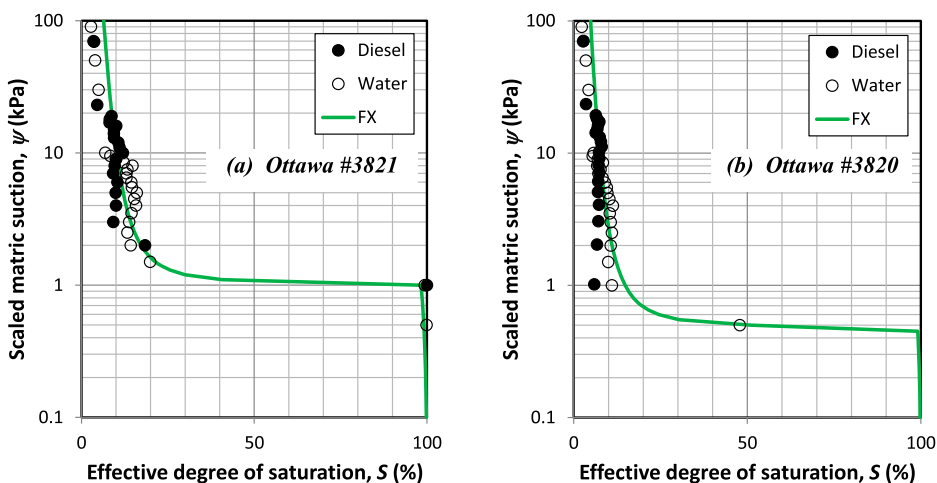


Figure 6. Scaled effective saturation–matric suction relations.



Table 4. Scaling factors of all two-phase systems.

Scaling factors	Ottawa #3821	Ottawa #3820
$\beta_{aw}^*$	1	1
$\beta_{ao}^{**}$	2.308	2.348
$\beta_{ow}^{**}$	1.764	1.742

\*Reference system.

\*\*Use Equation (6).

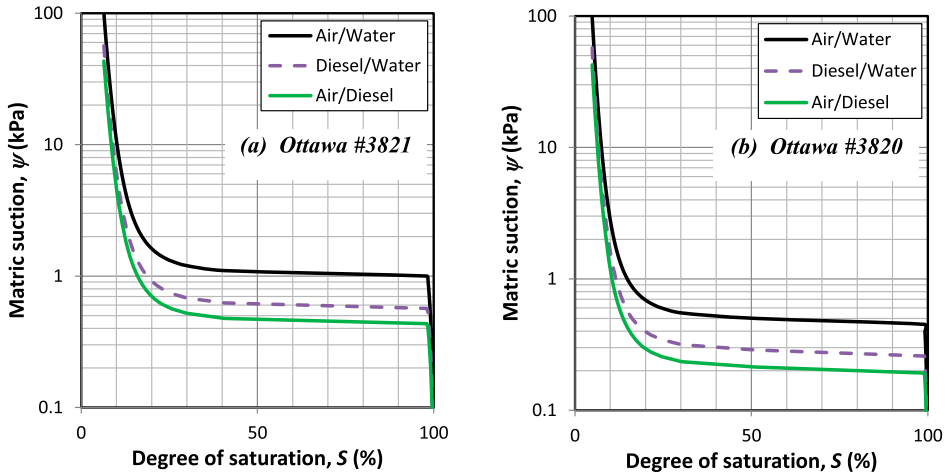


Figure 7. Saturation-matric suction relations of all two-phase systems.

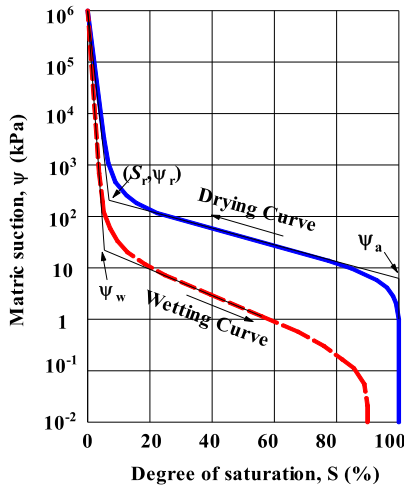


Figure 8. Idealised SLCCs.

Downloaded by [Dr Siam Yimsiri] at 01:05 19 June 2016

Table 5. Physical properties derived from Fredlund and Xing SLCCs.

Fluid pair	Sand	$\psi_a$ (kPa)	$\psi_r$ (kPa)	$S_r$ (%)
Air/Water	Ottawa #3821	1.0	1.1	9.5
	Ottawa #3820	0.45	0.52	7.5
Air/Diesel	Ottawa #3821	0.42	0.50	10.5
	Ottawa #3820	0.20	0.23	8.5
Diesel/Water	Ottawa #3821	0.56	0.63	10.0
	Ottawa #3820	0.25	0.31	8.0

Note: All variables are defined in Figure 8.

pressure of air/water system is larger than that of diesel/water system. This suggests that, in their corresponding two-phase systems, diesel fuel is easier to displace water than air at the beginning of drainage process. The entry pressure of air/water system is larger than that of air/diesel system. This also suggests that diesel fuel is easier to be desaturated than water in their corresponding two-phase systems. This phenomenon is also consistent with the results from other LNAPLs presented by; e.g. Parker et al. (1987), Busby, Lenhard, and Rolston (1995), Sharma and Mohamed (2003), and Kamon, Li, Endo, Inui, and Katsumi (2007).

## 5. Effects of groundwater table fluctuation on diesel fuel distribution

The effects of groundwater table fluctuation on diesel fuel distribution can be analysed from the three-phase column experiment. The profiles of water and diesel saturations in entire domain during each test stage are presented. During the experiment, it is verified that the difference between total amount of diesel fuel derived from volume integration of the image analysis is within  $\pm 10\%$  of the actual amount which indicates accuracy of SIAM used in current study. To avoid confusion in the following discussion, entrapped fluid is defined as non-wetting fluid that is occluded by water at a location far below the water table during imbibition process, whereas residual fluid is defined as immobile fluid held in place at a location far above the water table by capillary force after fluid is allowed to drain (Lenhard, Oostrom, & Dane, 2004).

### 5.1. First drainage stage

The water saturation profiles, after the water pressure at the base of the column is lowered to  $h = 5$  cm for 6 h, is shown in Figure 9 and they are compared with the SLCCs (FX model) derived earlier (air/water curves in Figure 7). The consistency between these data indicates the uniformity of packing of soil column between tests. The thicknesses of capillary fringe are 9 and 4 cm for Ottawa #3821 and #3820 sands, respectively.

At  $t = 6$  h, 15 g of diesel fuel is introduced to the soil surface such that slight ponding occurs; therefore, the diesel fuel pressure may be assumed to be near atmospheric. The diesel fuel infiltrates into the sand surface within 10 and 5 min for Ottawa #3821 and #3820 sands, respectively. Mobile diesel fuel moves downward while residual diesel fuel remains behind. The dynamic variations of fluid saturation profiles with time between  $t = 6$ –18 h are shown in Figures 10 and 11 for Ottawa #3821 and #3820 sands, respectively. For Ottawa #3821 (fine sand), the diesel fuel front reaches the capillary fringe within approximately 7 h ( $t = 13$  h) with the rate of advancement of approxi-

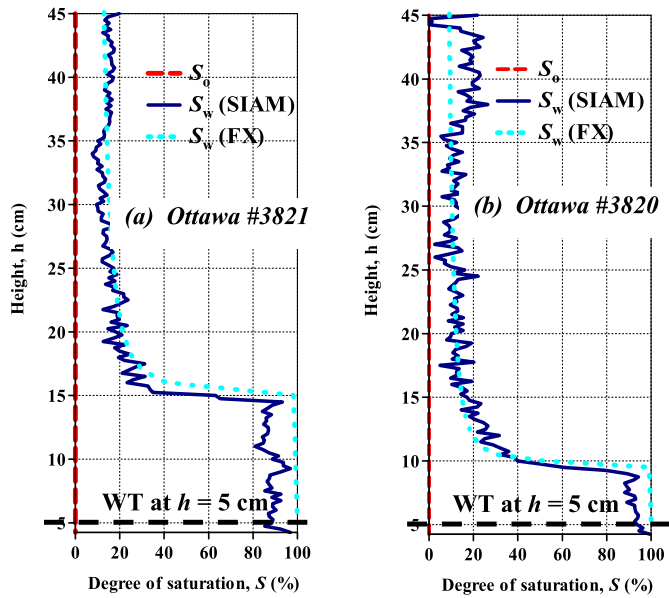


Figure 9. Water saturation profiles at  $t = 6$  h.

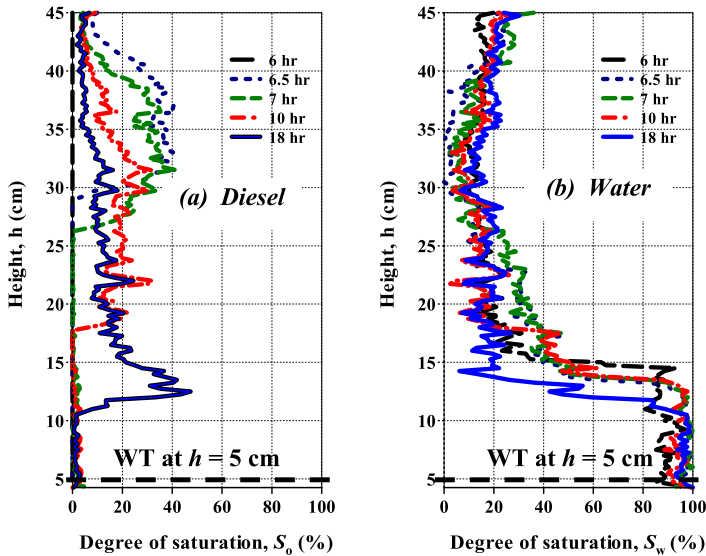


Figure 10. Liquid saturation profiles of Ottawa #3821 sand during  $t = 6-18$  h.

mately 7 cm/hr at the beginning and decreasing to approximately 1.5 cm/hr when diesel front approaching the capillary fringe. For Ottawa #3820 (medium sand), similar behaviour is observed but with faster rate of diesel front advancement. Most diesel fuel rapidly moves to the capillary fringe within less than 0.5 h ( $t = 6.5$  h) which gives the rate of diesel front advancement of more than 70 cm/hr.

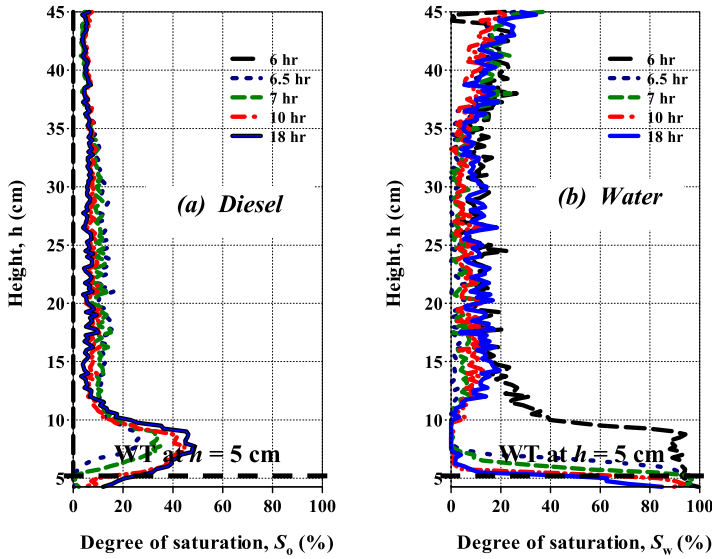


Figure 11. Liquid saturation profiles of Ottawa #3820 sand during  $t = 6-18$  h.

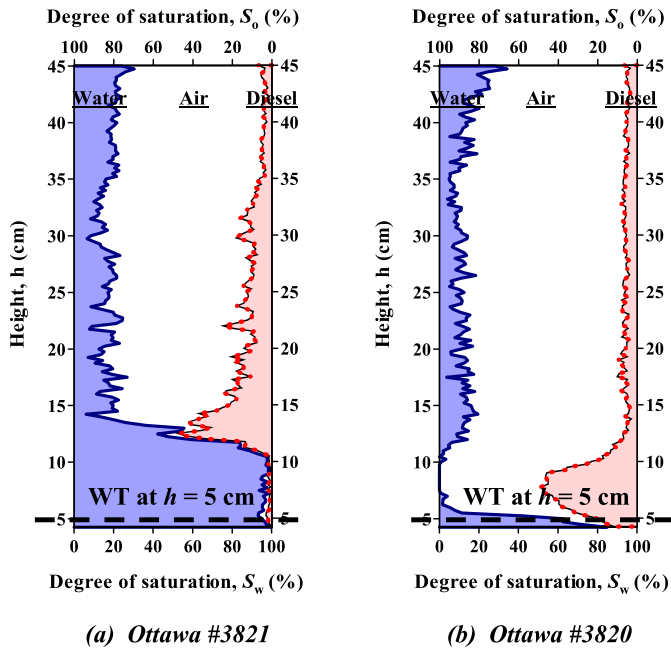


Figure 12. Liquid saturation profiles at end of 1st drainage stage ( $t = 18$  h).

Figure 12 shows the liquid saturation profiles at the end of first drainage ( $t = 18$  h) which is considered as close to equilibrium state. For Ottawa #3821 (fine sand), addition of diesel fuel leads to decrease in the thickness of the capillary fringe from 9 to 5 cm without changes in the position of the water table and the thickness of diesel pool above

the capillary fringe is 7 cm (Figure 12(a)). The presence of the diesel fuel reduces the capillary force in an air/water system to an air/diesel/water system; consequently, the thickness of capillary fringe of the water table is correspondingly reduced. For Ottawa #3820 (medium sand), the diesel fuel totally eliminates the capillary fringe with slight depression of the water table by 2 cm and the thickness of diesel pool above the water table is 9 cm (Figure 12(b)). At the diesel pool, the diesel fuel saturation is large and the water saturation is negligible. The residual liquid saturations above the diesel pool are  $S_{o,r} = 3.8\%$  and  $S_{w,r} = 14.4\%$  for Ottawa #3821 and  $S_{o,r} = 4.1\%$  and  $S_{w,r} = 10.2\%$  for Ottawa #3820 sands.

**5.2. First imbibition stage**

At  $t = 18$  h, the water pressure at the base of the column is raised to  $h = 30$  cm and the dynamic variations of fluid saturation profiles with time during  $t = 18-30$  h are shown in Figure 13 and 14 for Ottawa #3821 and #3820 sands, respectively. For Ottawa #3821 (fine sand), after the water table rises, the diesel fuel moves up in an apparently delayed response where the system reaches equilibrium after 4 h ( $t = 22$  h). For Ottawa #3820 (medium sand), most diesel fuel rapidly moves up toward the top of the column within 0.5 h ( $t = 18.5$  h). After that, the diesel fuel continues accumulating above the water table (Figure 14(a)), whereas the water seems to already reach its equilibrium state (Figure 14(b)). This indicates that the diesel fuel moves upward slower than water due possibly to its larger viscosity.

Figure 15 shows the liquid saturation profiles at the end of first imbibition stage ( $t = 30$  h) which is considered as close to equilibrium state. For Ottawa #3821 (fine sand), the thickness of the capillary fringe after the water table rise further decreases from 5 to 2 cm without changes in the position of the water table and the thickness of diesel pool above the capillary fringe is still 7 cm (Figure 15(a)). This reduction of

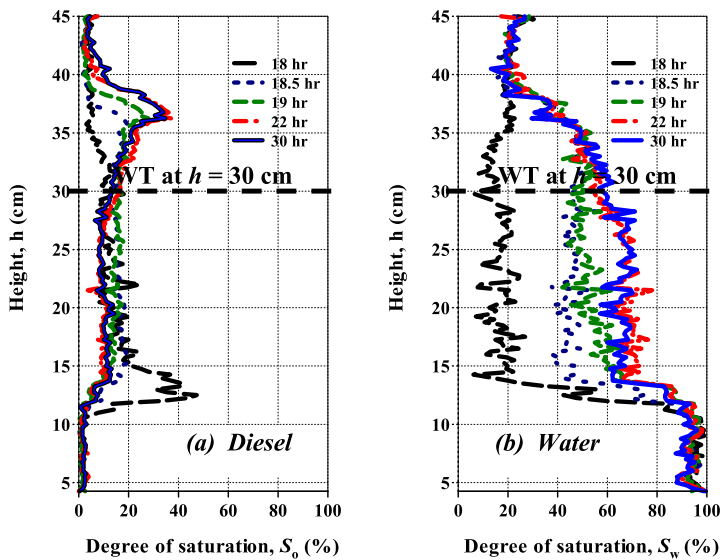


Figure 13. Liquid saturation profiles of Ottawa #3821 sand during  $t = 18-30$  h.

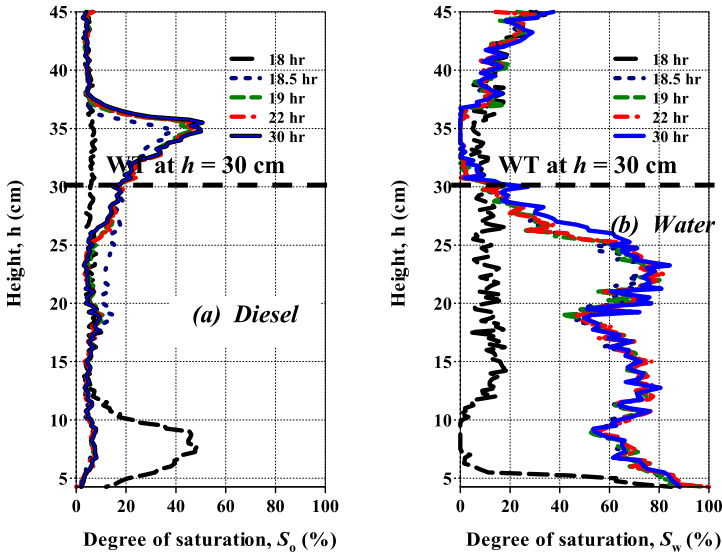


Figure 14. Liquid saturation profiles of Ottawa #3820 sand during  $t = 18\text{--}30$  h.

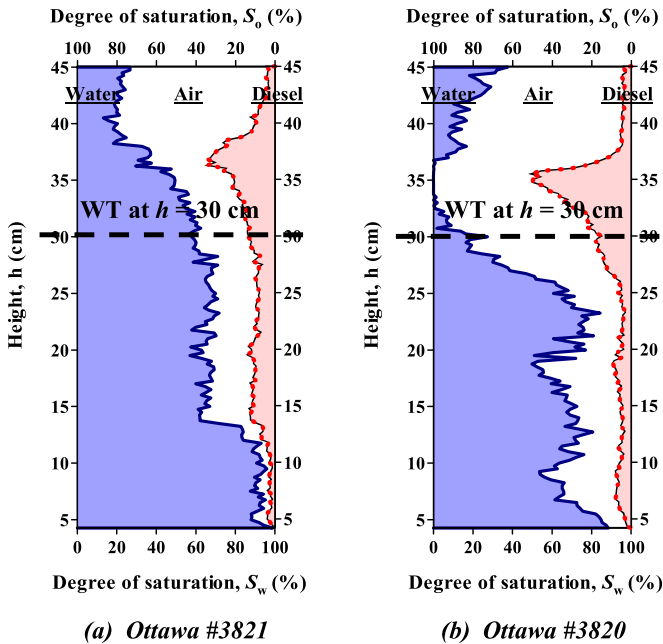


Figure 15. Liquid saturation profiles at end of 1st imbibition stage ( $t = 30$  h).

capillary fringe is expected because water is imbibing into the porous media. For Ottawa #3820 (medium sand), the diesel fuel totally eliminates the capillary fringe with slight depression of the water table by 4 cm and the thickness of diesel pool above the water table is 12 cm (Figure 15(b)). At the diesel pool, the diesel fuel saturation is large

and the water saturation is negligible. At the end of first imbibition stage, there are air and diesel fuel entrapped under the water table. The entrapped saturations of each phase are  $S_{a,e} = 24.1\%$  and  $S_{o,e} = 10.2\%$  for Ottawa #3821 and  $S_{a,e} = 27.1\%$  and  $S_{o,e} = 4.6\%$  for Ottawa #3820 sands.

### 5.3. Second drainage stage

At  $t = 30$  h, the water pressure at the base of the column is again lowered to  $h = 5$  cm and the dynamic variation of fluid saturation profiles with time during  $t = 30-42$  h are shown in Figure 16 and 17 for Ottawa #3821 and #3820 sands, respectively. For Ottawa #3821 (fine sand), the diesel fuel front reaches the capillary fringe within approximately 4 h ( $t = 34$  h) with the rate of advancement of approximately 6 cm/hr (Figure 16(a)). For Ottawa #3820 (medium sand), most diesel fuel rapidly moves to the capillary fringe within approximately 1 h ( $t = 31$  h) which gives the rate of diesel front advancement of approximately 30 cm/hr (Figure 17(a)). Generally, the observed behaviour during second drainage stage is relatively similar to first drainage stage.

Figure 18 shows the liquid saturation profiles at the end of second drainage stage ( $t = 42$  h) which is considered as close to equilibrium state. For Ottawa #3821 (fine sand), the thickness of the capillary fringe increases from 2 to 5 cm without depression of the water table and the thickness of diesel pool above the capillary fringe is 6 cm (Figure 18(a)). For Ottawa # 3820 (medium sand), the diesel fuel totally eliminates the capillary fringe with slight depression of the water table by 1 cm and the thickness of diesel pool above the water table is 6 cm (Figure 18(b)). The liquid saturation profiles at the end of second drainage stage are relatively similar to that at the end of first drainage stage. The residual liquid saturations above the diesel pool are  $S_{o,r} = 4.9\%$  and  $S_{w,r} = 10.7\%$  for Ottawa #3821 and  $S_{o,r} = 4.6\%$  and  $S_{w,r} = 7.9\%$  for Ottawa #3820 sands.

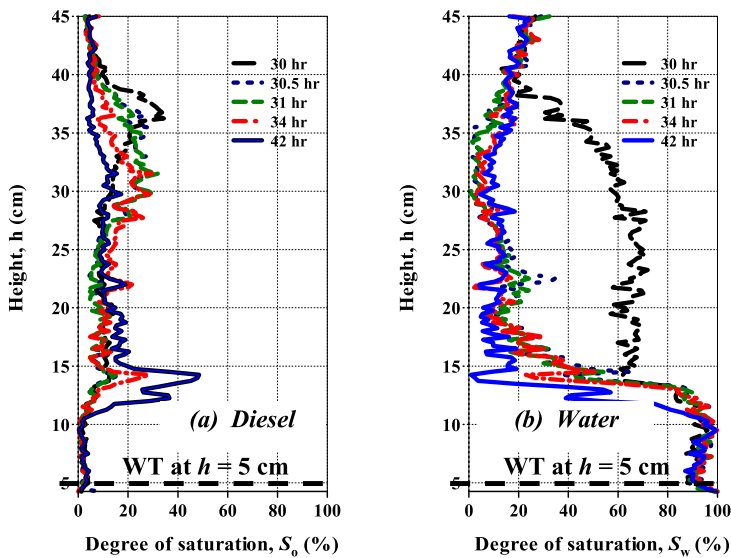


Figure 16. Liquid saturation profiles of Ottawa #3821 sand during  $t = 30-42$  h.

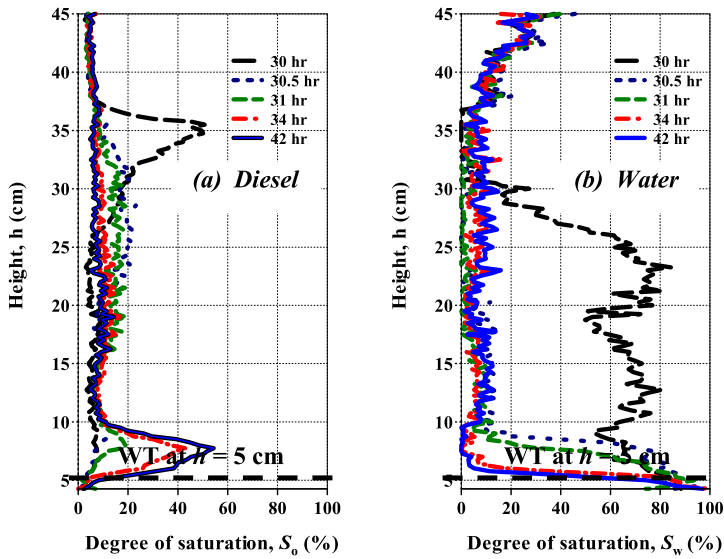


Figure 17. Liquid saturation profiles of Ottawa #3820 sand during  $t = 30\text{--}42$  h.

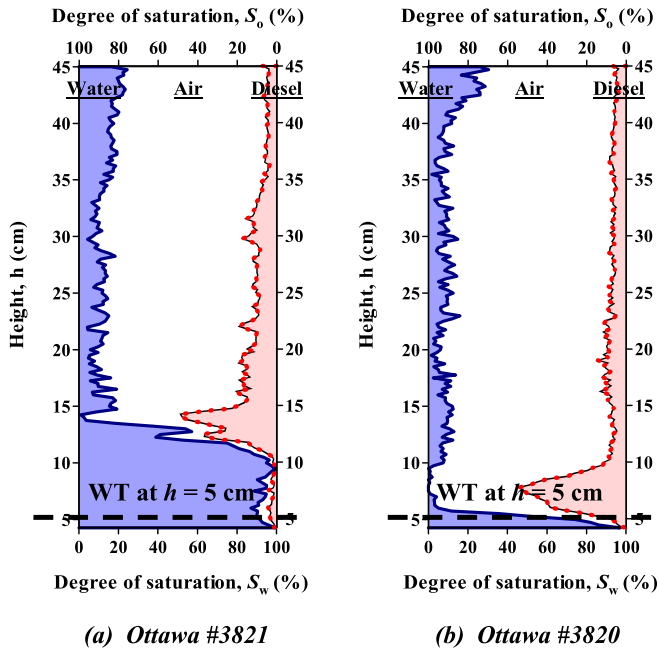


Figure 18. Liquid saturation profiles at end of 2nd drainage stage ( $t = 42$  h).

#### 5.4. Second imbibition stage

At  $t = 42$  h, the water pressure at the base of the column is again raised to  $h = 30$  cm and the dynamic variation of fluid saturation profiles with time during  $t = 42\text{--}54$  h are shown in Figures 19 and 20 for Ottawa #3821 and #3820 sands, respectively. For



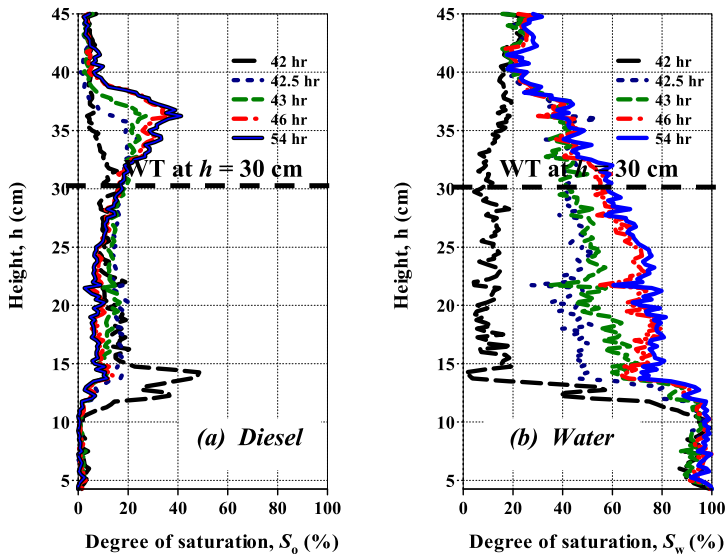


Figure 19. Liquid saturation profiles of Ottawa #3821 sand during  $t = 42\text{--}54$  h.

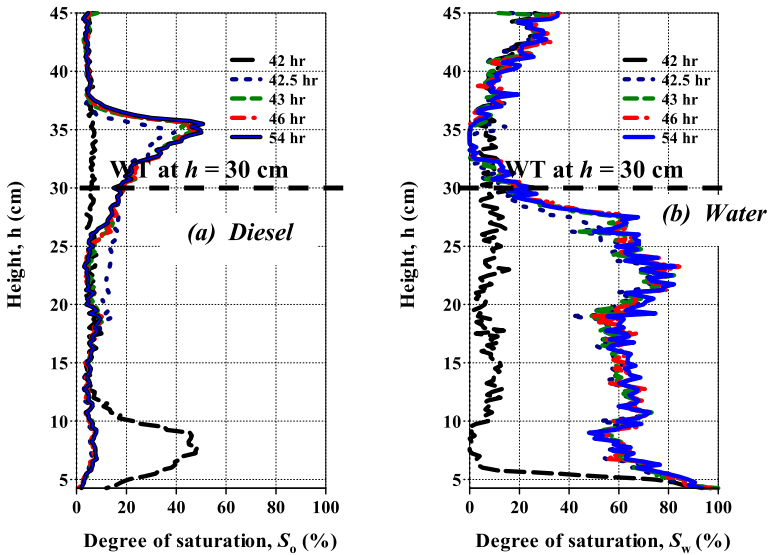


Figure 20. Liquid saturation profiles of Ottawa #3820 sand during  $t = 42\text{--}54$  h.

Ottawa #3821 (fine sand), after the water table rises, the diesel fuel moves up in a delayed fashion where the system reaches equilibrium after 4 h (at  $t = 46$  h). For Ottawa #3820 (medium sand), most diesel fuel rapidly moves up toward the top of the column within 1 h ( $t = 43$  h). After that, the diesel fuel continues accumulating above the water table (Figure 20(a)), whereas the water seems to already reach its equilibrium state (Figure 20(b)). Generally, the behaviour during second imbibition stage is relatively similar to that of first imbibition stage.

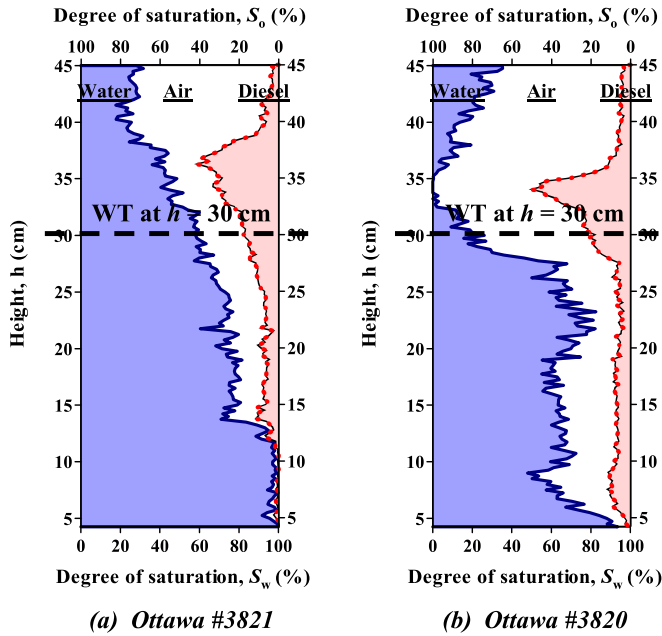


Figure 21. Liquid saturation profiles at end of 2nd imbibition stage ( $t = 54$  h).

Figure 21 shows the liquid saturation profiles at the end of second imbibition stage ( $t = 54$  h) which is considered as close to equilibrium state. For Ottawa #3821 (fine sand), the diesel fuel totally eliminates the capillary fringe with depression of the water table by 4 cm and the thickness of diesel pool above the water table is 13 cm (Figure 21(a)). For Ottawa #3820 (medium sand), the diesel fuel also totally eliminates the capillary fringe with slight depression of the water table by 2 cm and the thickness of diesel pool above the water table is 9 cm (Figure 21(b)). The liquid saturation profiles at the end of second imbibition stage are relatively similar to those at the end of first imbibition stage. The entrapped saturations of each phase at the end of second imbibition stage are  $S_{a,e} = 17.9\%$  and  $S_{o,e} = 6.7\%$  for Ottawa #3821 and  $S_{a,e} = 30.1\%$  and  $S_{o,e} = 6.0\%$  for Ottawa #3820 sands.

## 6. Discussions

The residual saturations at the end of drainage stages and the entrapped saturations at the end of imbibition stages are summarised in Figure 22. The total residual saturations (diesel + water) during drainage stages of Ottawa #3821 sand are larger than those of Ottawa #3820 sand due to finer sand particle size. Also, the entrapped diesel saturations during imbibition stages of Ottawa #3821 sand are larger than those of Ottawa #3820 sand due also to finer sand particle size. However, the entrapped air saturations during imbibition stages of Ottawa #3821 sand are smaller than those of Ottawa #3820 sand. The residual diesel saturations during drainage stages are approximately unchanged as the drainage stages are repeated. This may not be consistent with Chompusri et al. (2002) who showed that the residual LNAPL above a mobile phase became smaller with continued water table oscillations.

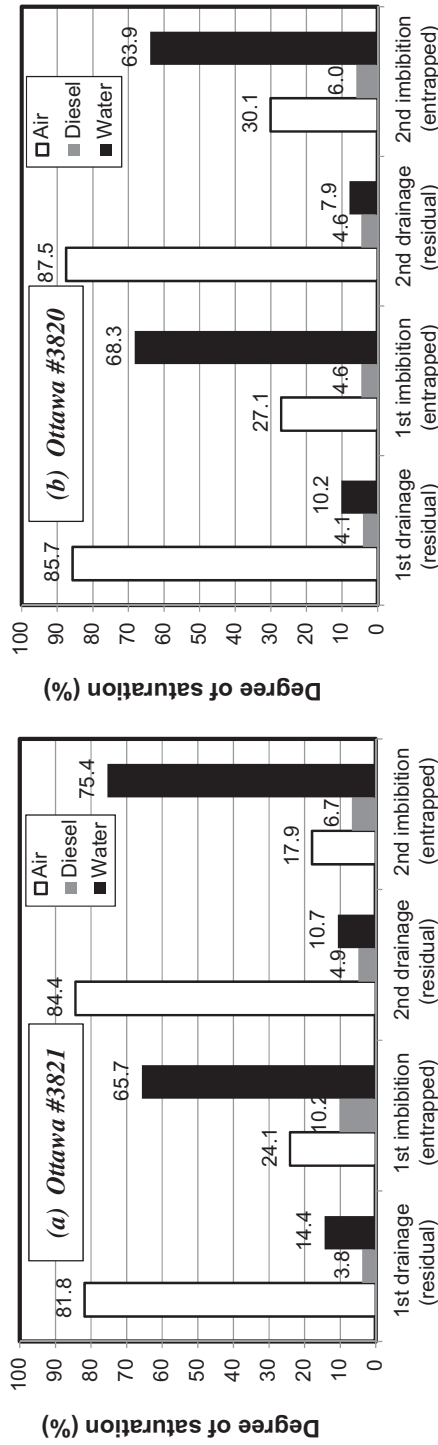


Figure 22. Residual and entrapped saturations in three-phase systems.

Table 6. Comparison of residual entrapped air during imbibition stage.

Properties	Lenhard et al. (1993)	Ryan and Dhir (1993)	This research	
Porous medium	Sandy material $D_{50} = 400 \mu\text{m}$	Glass particle $D_{50} = 210\text{--}710 \mu\text{m}$	Ottawa #3821 $D_{50} = 400 \mu\text{m}$	Ottawa #3820 $D_{50} = 600 \mu\text{m}$
Medium density*	$e = 0.67 \gamma = 16.2 \text{ kN/m}^3$	$e = 0.58\text{--}0.69$	$e = 0.49 \gamma = 17.6 \text{ kN/m}^3$	$e = 0.50 \gamma = 17.6 \text{ kN/m}^3$
LNAPL	Soltrol 170	Soltrol 170	Diesel fuel	Diesel fuel
Water table movement	5 cm/10 min	Slowly	Rapidly	Rapidly
Entrapped air ( $S_{a,e}$ )	6–10%	7–17%	18–24%	27–30%

\* $e$  = void ratio,  $\gamma$  = unit weight.

During imbibition stages (rising water table), there is some air (apart from some diesel) entrapped under water table. This phenomenon was also observed from similar experiments by Lenhard et al. (1993) and Ryan and Dhir (1993), the comparison of which is summarised in Table 6. All researches used similar sizes of porous media and similar LNAPLs (Soltrol 170 and diesel have relatively similar viscosity and surface tension); however, the amounts of entrapped air obtained from this research are much larger than those of other researches. This may be due to two main reasons, i.e. (i) the sands used in this research are denser and (ii) the water table movement in this research is more rapid. The denser sand specimens reduce the pore sizes and increase the pore tortuosity which may hinder the escape of air from the pore during imbibition process. Moreover, the oscillation of the water table is controlled by instantaneously adjustment of the water pressure at the base of the column to a specified value and allow the water table height in the column to correspondingly alter in an uncontrolled rate. This may introduce turbulent flow at the fluid interface which enhances air entrapment. However, this effect is expected to be less for Ottawa #3821 sand since the movement of water table is slower.

It is also noted that this experiment is conducted in one-dimension which limits the flow channel. In a two-dimensional rising water table system, diesel may not rise as fast as the water table and can be completely by-passed. In that case, the rising diesel has to displace water when it moves upward and the water/diesel entry pressure has to be

Table 7. Comparison of extension two-phase to three-phase.

Sand	Stage	Water residual		Total liquid residual	
		$S_w^{aow*}$	$S_w^{ow**}$	$S_t^{aow*}$	$S_o^{ao**}$
Ottawa #3821	1st drainage	14.4	10.0	18.2	10.5
	2nd drainage	10.7	10.0	15.6	10.5
Ottawa #3820	1st drainage	10.2	8.0	14.3	8.5
	2nd drainage	7.9	8.0	12.5	8.5

Note: All variables are defined in Equations (7) and (8).

\*From experiment (see Figure 22).

\*\*From SLCCs (see Table 5).

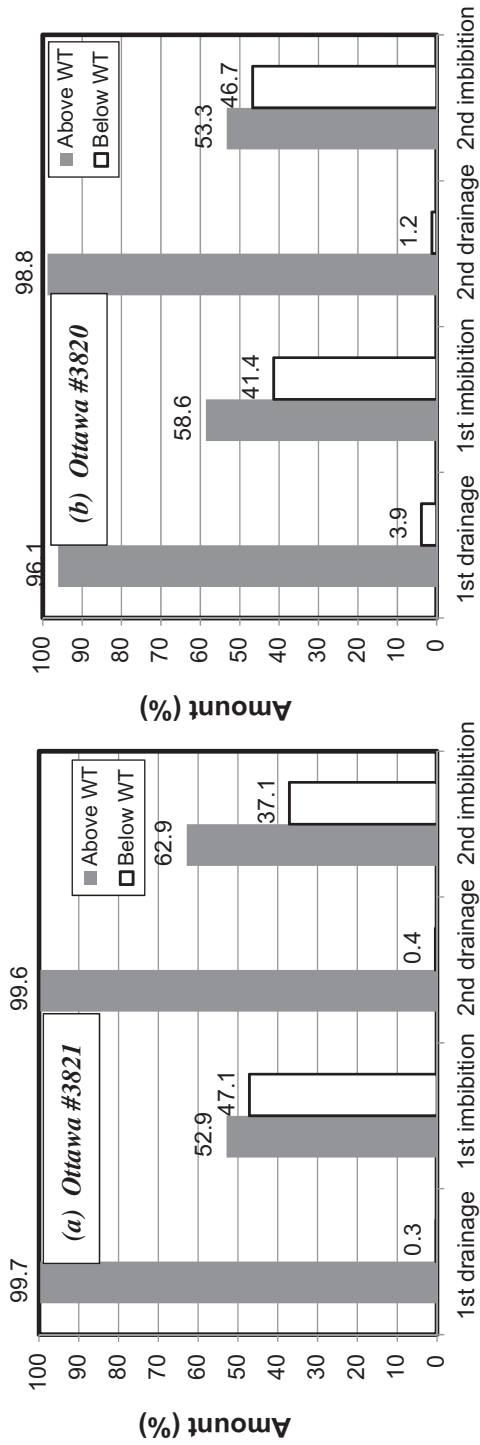


Figure 23. Amount of diesel fuel above and below water table.

exceeded for this to occur. Especially in fine-grained sand, the entry pressure might be such that a body of continuous diesel may be retained below the water table.

In three-phase systems of air, NAPL, and water in which the water phase is the most preferentially wetting fluid followed by the NAPL and the least wetting air phase, the total liquid saturation is a function of two-phase air/NAPL matric suction (Equation (7)) and the water saturation is a function of two-phase NAPL/water matric suction (Equation (8)) (Lenhard & Parker, 1987). Therefore, the SLCCs of two-phase systems obtained in Figure 7 can be used to estimate the residual liquid saturations observed during drainage stages of three-phase experiment, the comparison of which is summarised in Table 7. It can be seen that the comparison is acceptable and the results of second drainage stage give better consistency.

$$S_t^{aow} = S_o^{ao}(\psi_{ao}) \quad (7)$$

$$S_w^{aow} = S_w^{ow}(\psi_{ow}) \quad (8)$$

where  $S_t^{aow} = S_w^{aow} + S_o^{aow}$ , superscript *aow* denotes 3-phase system, and superscripts *ow* and *ao* denote 2-phase NAPL/water and air/NAPL systems, respectively.

Figure 23 presents the amount of diesel fuel above and below water table at equilibrium of each stage. It is noted that the elevation of water table is derived from the water pressure at the base of the column. During drainage stages, most of the diesel fuel locates above the water table. Very small amount of diesel fuel enters under water table for Ottawa #3820 because diesel fuel depresses the existing thin capillary fringe due to coarse sand particle size. During imbibition stages, 37–47% of the total amount of diesel fuel is entrapped under the water table. Comparison of the results of first with second imbibition stages, there is no systematic difference in the amount of diesel fuel entrapped under the water table with the change in particle size. Several parameters may affect LNAPL distribution in porous media after water table fluctuation, including volume of LNAPL present, magnitude and speed of water table fluctuation and porous media and LNAPL properties (e.g. Lenhard et al., 1993; Oostrom et al., 2006).

## 7. Conclusions

The effects of water table fluctuation on diesel migration in vadose zone are investigated by one-dimensional column test. The saturation distributions of water and diesel in the entire flow domain under transient condition are measured by the SIAM (Flores et al., 2011). The two-phase column and Tempe pressure cell data yield soil-liquids characteristic curves (SLCCs) of air/water and air/diesel systems. The empirical model of Fredlund and Xing (1994) fits the experimental data better particularly at large matric suction. By applying scaling procedure (Lenhard & Parker, 1987), the SLCCs of a diesel/water system can be predicted. Comparing the SLCCs of three two-phase systems, a descending sequence of matric suction at a given saturation of wetting phase is in the order of air/water, diesel/water and air/diesel systems. Finer particle size gives larger entry pressure ( $\psi_a$ ), residual matric suction ( $\psi_r$ ) and residual degree of saturation ( $S_r$ ), whereas larger fluid viscosity yields smaller  $\psi_a$  and  $\psi_r$ .

The three-phase column data show the effects of groundwater table fluctuation on diesel fuel distribution. Water table fluctuation results in a considerable increase in the vertical extent of the source zone. During drainage stages, diesel and water are present as residual phases above the water table and the total residual saturation of finer sand is

larger. These residual saturations in three-phase system can be predicted from the obtained SLCCs of two-phase systems according to Lenhard and Parker (1987). During imbibition stages, the experimental data suggest that air and diesel are entrapped below water table with the entrapped air saturations of 18–24% and entrapped diesel saturations of 6–10% for fine sand. The residual diesel saturations during drainage stages and entrapped diesel saturations during imbibition stages do not show any systematic difference as these stages are repeated. When the sand particle size becomes coarser, the entrapped diesel saturations are smaller; however, the entrapped air saturations are larger. The amounts of entrapped air obtained from this study are much larger than those of other researches which may be due to the used of denser sands and more rapid water table movement in this study. During imbibition stages, 37–47% of the total amount of diesel fuel is entrapped under the water table. Comparisons of the results of first with second imbibition stages and of fine with coarse sands do not show any systematic difference in the amount of diesel fuel entrapped under the water table.

### Acknowledgements

The support provided by the Faculty of Engineering, Burapha University and AUN/SEED-Net is appreciated.

### Disclosure statement

No potential conflict of interest was reported by the authors.

### Funding

This work was supported by the Faculty of Engineering [grant number WJP 14/2556] and Burapha University [grant number NRCT 102/2558].

### References

- Arya, L. M., Leij, F. J., Shouse, P. J., & van Genuchten, M. (1999). Relationship between the hydraulic conductivity function and the particle-size distribution. *Soil Science Society of America Journal*, 63, 1063–1070.
- Arya, L. M., & Paris, J. F. (1981). A physicoempirical model to predict the soil moisture characteristic from particle-size distribution and bulk density data. *Soil Science Society of America Journal*, 45, 1023–1030.
- Busby, R. D., Lenhard, R. J., & Rolston, D. E. (1995). An investigation of saturation-capillary pressure relations in two- and three-fluid systems for several NAPLS in different porous media. *Ground Water*, 33, 570–578.
- Chapuis, R. P. (2004). Predicting the saturated hydraulic conductivity of sand and gravel using effective diameter and void ratio. *Canadian Geotechnical Journal*, 41, 787–795.
- Chompusri, S., Rivett, M. O., & Mackay, R. (2002). LNAPL redistribution on a fluctuating water table: Column experiments. *Groundwater Quality: Natural and Enhanced Restoration of Groundwater Pollution*, IAHS Publication No. 275, 225–231.
- DiCarlo, D. A., Bauters, T. W. J., Steenhuis, T. S., Parlange, J.-Y., & Bierck, B. R. (1997). High-speed measurements of three-phase flow using synchrotron X rays. *Water Resources Research*, 33, 569–576.
- Eckberg, D. K., & Sunada, D. K. (1984). Nonsteady three-phase immiscible fluid distribution in porous media. *Water Resources Research*, 20, 1891–1897.
- Feth, J. F. (1973). Water facts and figures for planners and managers. *US Geological Survey Circular*, 601–601.

- Fredlund, D. G., & Xing, A. (1994). Equations for the soil-water characteristic curve. *Canadian Geotechnical Journal*, 31, 521–532.
- Flores, G., Katsumi, T., Inui, T., & Kamon, M. (2011). A simplified image analysis method to study LNAPL migration in porous media. *Soils and Foundations*, 51, 835–847.
- van Gunechten, M. T. (1980). A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Science Society of America Journal*, 44, 892–898.
- Host-Madsen, J., & Jensen, K. H. (1992). Laboratory and numerical investigations of immiscible multiphase flow in soil. *Journal of Hydrology*, 135, 13–52.
- Kaluarachchi, J. J., & Parker, J. C. (1989). An efficient finite element method for modeling multiphase flow. *Water Resources Research*, 25, 43–54.
- Kamon, M., Endo, K., & Katsumi, T. (2003). Measuring the k-S-p relations on DNAPLs migration. *Engineering Geology*, 70, 351–363.
- Kamon, M., Li, Y., Endo, K., Inui, T., & Katsumi, T. (2007). Experimental study on the measurement of S-p relations of LNAPL in a porous medium. *Soils and Foundations*, 47, 33–45.
- Kamon, M., Li, Y., Flores, G., Inui, T., & Katsumi, T. (2006). Experimental and numerical study on migration of LNAPL under the influence of fluctuating water table in subsurface. *Annuals of Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University*, 49B, 383–392.
- Karapanagioti, H. K., Gaganis, P., & Burganos, V. N. (2003). Modeling attenuation of volatile organic mixtures in the unsaturated zone: Codes and usage. *Environmental Modelling & Software*, 18, 329–337.
- Kechavarzi, C., Soga, K., & Illangasekare, T. H. (2005). Two-dimensional laboratory simulation of LNAPL infiltration and redistribution in the vadose zone. *Journal of Contaminant Hydrology*, 76, 211–233.
- Lenhard, R. J., Dane, J. H., Parker, J. C., & Kaluarachchi, J. J. (1988). Measurement and simulation of one-dimensional transient three-phase flow for monotonic liquid drainage. *Water Resources Research*, 24, 853–863.
- Lenhard, R. J., Johnson, T. G., & Parker, J. C. (1993). Experimental observations of nonaqueous-phase liquid subsurface movement. *Journal of Contaminant Hydrology*, 12, 79–101.
- Lenhard, R. J., Oostrom, M., & Dane, J. H. (2004). A constitutive model for air-NAPL-water flow in the vadose zone accounting for immobile, non-occluded (residual) NAPL in strongly water-wet porous media. *Journal of Contaminant Hydrology*, 71, 261–282.
- Lenhard, R. J., & Parker, J. C. (1987). Measurement and prediction of saturation-pressure relationships in three-phase porous media systems. *Journal of Contaminant Hydrology*, 1, 407–424.
- Lenhard, R. J., & Parker, J. C. (1988). Experimental validation of the theory of extending two-phase saturation-pressure relations to three-fluid phase systems for monotonic drainage paths. *Water Resources Research*, 24, 373–380.
- Oostrom, M., Hofstee, C., & Wietsma, T. W. (2006). Behavior of a viscous LNAPL under variable water table conditions. *Soil & Sediment Contamination*, 15, 543–564.
- Parker, J. C., Lenhard, R. J., & Kuppasamy, T. (1987). A parametric model for constitutive properties governing multiphase flow in porous media. *Water Resources Research*, 23, 618–624.
- Ryan, R. G., & Dhir, V. K. (1993). The effect of soil-particle size on hydrocarbon entrapment near a dynamic water table. *Journal of Soil Contamination*, 2, 59–92.
- Sharma, R. S., & Mohamed, M. H. A. (2003). An experimental investigation of LNAPL migration in an unsaturated/saturated sand. *Engineering Geology*, 70, 305–313.
- Steffy, D. A., Johnston, C. D., & Barry, D. A. (1998). Numerical simulations and long-column tests of LNAPL displacement and trapping by a fluctuating water table. *Journal of Soil Contamination*, 7, 325–356.
- Topp, G. C., Davis, J. L., & Annan, A. P. (1980). Electromagnetic determination of soil water content: Measurements in coaxial transmission lines. *Water Resources Research*, 16, 574–582.
- Tuck, D. M., Bierck, B. R., & Jaffe, P. R. (1998). Synchrotron radiation measurement of multiphase fluid saturations in porous media: Experimental technique and error analysis. *Journal of Contaminant Hydrology*, 31, 231–256.
- Unger, A. J. A., Sudicky, E. A., & Forsyth, P. A. (1995). Mechanisms controlling vacuum extraction coupled with air sparging for remediation of heterogeneous formations contaminated by dense nonaqueous phase liquids. *Water Resources Research*, 31, 1913–1925.
- United State Environmental Protection Agency (US EPA) (2002), *National Water Quality Inventory 2000 Report* (EPA-841-R-02-001). Washington, DC: United States Environmental Protection Agency Office of Water.



- Van Geel, P. J., & Sykes, J. F. (1994). Laboratory and model simulations of LNAPL spill in a variably-saturated sand, 1. Laboratory experiment and image analysis techniques. *Journal of Contaminant Hydrology*, 17, 1–25.
- Van Geel, P. J., & Sykes, J. F. (1997). The importance of fluid entrapment, saturation hysteresis and residual saturations on the distribution of a lighter-than-water non-aqueous phase liquid in a variably saturated sand medium. *Journal of Contaminant Hydrology*, 25, 249–270.
- Yang, H., Rahardjo, H., Leong, E.-C., & Fredlund, D. G. (2004). Factors affecting drying and wetting soil-water characteristic curves of sandy soils. *Canadian Geotechnical Journal*, 41, 908–920.

## ประวัตินักวิจัย

ชื่อ	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สยาม ยิ้มศิริ
หน่วยงาน	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา
การศึกษา	Ph.D. (Soil Mechanics), University of Cambridge
ความเชี่ยวชาญ	Geotechnical Engineering, Geoenvironmental Engineering



## Effects of water table fluctuation on diesel fuel migration in one-dimensional laboratory study

S. Yimsiri, S. Euaapiwatch, G. Flores, T. Katsumi & S. Likitlersuang

To cite this article: S. Yimsiri, S. Euaapiwatch, G. Flores, T. Katsumi & S. Likitlersuang (2016): Effects of water table fluctuation on diesel fuel migration in one-dimensional laboratory study, European Journal of Environmental and Civil Engineering, DOI: [10.1080/19648189.2016.1197158](https://doi.org/10.1080/19648189.2016.1197158)

To link to this article: <http://dx.doi.org/10.1080/19648189.2016.1197158>



Published online: 16 Jun 2016.



Submit your article to this journal [↗](#)



Article views: 3



View related articles [↗](#)



View Crossmark data [↗](#)

## Effects of water table fluctuation on diesel fuel migration in one-dimensional laboratory study

S. Yimsiri<sup>a\*</sup>, S. Euaapiwatch<sup>a</sup>, G. Flores<sup>b</sup>, T. Katsumi<sup>c</sup> and S. Likitlersuang<sup>d</sup>

<sup>a</sup>Department of Civil Engineering, Burapha University, Chonburi, Thailand; <sup>b</sup>Faculty of Engineering, Kyoto University, Kyoto, Japan; <sup>c</sup>Graduate School of Global Environmental Studies, Kyoto University, Kyoto, Japan; <sup>d</sup>Geotechnical Research Unit, Department of Civil Engineering, Chulalongkorn University, Bangkok, Thailand

(Received 5 September 2014; accepted 26 May 2016)

The effects of water table fluctuation on diesel fuel redistribution in unsaturated soil are investigated in the laboratory by one-dimensional column test. The simplified image analysis method is used to assess the saturation distributions of water and diesel in the flow domain under transient condition. The experiments are undertaken on two homogeneous sands to study the effects of different particle sizes. The two-phase experimental data illustrate soil–liquid characteristic curves (SLCCs) of water/air and diesel/air systems. The SLCCs of diesel/water systems can be predicted by scaling procedure. A descending order of matric suction at a given saturation of wetting phase is in the order of air/water, diesel/water and air/diesel systems. Coarser particle size gives smaller entry pressure, residual matric suction and residual degree of saturation. The three-phase (air/water/diesel) experimental data illustrate that, during imbibition stages, air and diesel are entrapped below water table with the entrapped air saturations of 18–24% and entrapped diesel saturations of 6–10% for fine sand. Coarser particle size yields smaller entrapped diesel saturations and larger entrapped air saturations. The residual diesel saturations during drainage stages and entrapped diesel saturations during imbibition stages do not show any systematic difference as these stages are repeated. During imbibition stages, 37–47% of the total amount of diesel fuel is entrapped under the water table. Also, there is no systematic difference in the amount of diesel fuel entrapped under the water table when imbibition stages are repeated.

**Keywords:** LNAPL; diesel fuel; water table fluctuation; residual; entrapment

### 1. Introduction

Groundwater is the most important freshwater resource that humanity must rely on. Only 0.5% of the world's total water supply is available to human as a freshwater (97% is saline water in the ocean and 2.5% is frozen as ice caps and glaciers) and 98% of the available freshwater is groundwater (Feth, 1973). Groundwater can be contaminated by many causes and contamination by organic products, which are often associated with petroleum hydrocarbons or halogenated compounds used as industrial solvents, poses one of major problems. The contamination of groundwater by petroleum hydrocarbons, such as diesel fuel and gasoline as a result of improper disposal practices, spills and leaking storage facilities, represents one of the most common sources of subsurface contamination

---

\*Corresponding author. Email: [ysiam@buu.ac.th](mailto:ysiam@buu.ac.th)

(United State Environmental Protection Agency (US EPA), 2002). These contaminants exist as an immiscible phase when in contact with water and their densities are less than water which makes them being classified as light non-aqueous phase liquids (LNAPLs). These products are usually multi-component organic mixtures consisted of chemicals with varying degrees of water solubility, but are toxic at low concentration. Therefore, they can act as long-term sources of groundwater contamination.

After LNAPL is released on the surface, it moves downward through the unsaturated zone and a fraction is retained in the soil pores as residual phase by capillary forces until movement stops. If large amount of LNAPL is released, however, it reaches saturated zone and spread laterally along the capillary fringe and may also depress the capillary fringe and groundwater table. Fluctuation of groundwater table complicates the migration of LNAPL by causing LNAPL redistribution across the zone of fluctuation because LNAPL becomes entrapped above and below the mobile LNAPL due to capillary force. Such fluctuation of groundwater table commonly occurs in any geographical regions and may arise from variation in aquifer recharge–discharge, groundwater extraction or injection through wells, seasonal rainfall, barometric effects, tidal influences and evapotranspiration cycles. Redistribution of LNAPL due to groundwater table fluctuations may lead to enhanced dissolution of LNAPL source zone and dissolved-plume formation.

To select appropriate remedial strategy at an LNAPL-contaminated site, it is necessary to delineate the extent of the contaminated area. This information can be obtained by an extensive field investigation, which generally is expensive and time-consuming. Such a field investigation can be optimised if the likely migration pattern of LNAPL can be estimated by numerical analysis. A number of numerical simulators have been developed to model LNAPL transport in subsurface (e.g. Host-Madsen & Jensen, 1992; Kaluarachchi & Parker, 1989; Karapanagioti, Gaganis, & Burganos, 2003; Unger, Sudicky, & Forsyth, 1995). Under groundwater table fluctuation condition, the hysteresis nature of the relative permeability-saturation-capillary pressure relationships and fluid entrapment phenomenon are important aspects of the implemented constitutive relationship for the numerical analysis (e.g. Oostrom, Hofstee, & Wietsma, 2006; Steffy, Johnston, & Barry, 1998; Van Geel & Sykes, 1997). Their predictive capability and adequacy of various assumptions embodied in them need to be evaluated against well-controlled laboratory experiment under transient and static conditions before confident predictions of the fate of LNAPLs in subsurface of field-scale problems can be made.

There have been many intermediate-scale multiphase flow experiments of LNAPL transport in which quantitative data are obtained. The LNAPL transport experiments were conducted in one-dimension by; e.g. Eckberg and Sunada (1984) and Lenhard, Dane, Parker, and Kaluarachchi (1988) and in 2-dimension by; e.g. Van Geel and Sykes (1994) and Kechavarzi, Soga, and Illangasekare (2005). Few researchers conducted the experiments to study effects of water table fluctuation on LNAPL redistribution in one-dimension, e.g. Lenhard, Johnson, and Parker (1993), Steffy et al. (1998) and Kamon, Li, Flores, Inui, and Katsumi (2006), and in two-dimension, e.g. Van Geel and Sykes (1997) and Oostrom et al. (2006). Very few researchers investigated the effects of repetition of water table fluctuation on LNAPL redistribution (e.g. Chompusri, Rivett, & Mackay, 2002). Unfortunately, due to the limitation of instrumentation technique, there was quantitative information of fluid saturations only either at discrete point under dynamic condition or of entire domain at near steady-state condition. Numerous researchers have also studied effects of particle size on the behaviour of unsaturated soil, i.e. on soil–liquid characteristic curve (SLCC) (e.g. Arya & Paris, 1981; Yang, Rahardjo, Leong, & Fredlund, 2004), on residual saturation (e.g. Ryan & Dhir, 1993),

and on permeability (e.g. Arya, Leij, Shouse, & van Genuchten, 1999; Chapuis, 2004); however, most studies have been done with soil element tests. Therefore, there is a dearth of intermediate-scale experimental data of transient fluid saturation distribution in the entire flow domain at any time under water table fluctuation condition with attention to effects of particle size.

The objective of the present study is to carry out a one-dimensional immiscible three-phase flow experiment with consideration on the effects of water table fluctuation on LNAPL redistribution and entrapment with particular attention to particle size of sand and repetition of water table fluctuation. The experiments are carried out under well-defined and controlled conditions by two laboratory one-dimensional columns each containing a different sand material. The phase saturation data are measured using an image analysis technique to obtain detailed quantitative data of transient fluid saturation distribution in an entire flow domain. These experimental results can develop better understanding on the effects of water table fluctuation on LNAPL migration and can provide well-controlled laboratory experimental data against which numerical models can validate their predictive capabilities.

## 2. Simplified image analysis method (SIAM)

In laboratory test, measurement of NAPL saturation is the most difficult and important task in acquiring precise quantitative data. Although gravimetric sampling method is the most accurate, it cannot provide saturation data continuously because soil samples must be removed from a soil mass. Conventionally, the non-intrusive and non-destructive methods used to measure fluid saturations are: e.g.  $\gamma$ -ray attenuation, X-ray attenuation, time domain reflectometry (TDR) and electrical conductivity probes (e.g. DiCarlo, Bauters, Steenhuis, Parlange, & Bierck, 1997; Kamon, Endo, & Katsumi, 2003; Topp, Davis, & Annan, 1980; Tuck, Bierck, & Jaffe, 1998). Although accurate, these methods are experimentally demanding and do not allow the acquisition of transient fluid saturation distribution in the entire flow domain at any specific time. The data generated are restricted to either saturation distribution under static or steady-state flow conditions or local measurement of saturation during transient flow. Owing to these experimental difficulties, the number of multi-dimensional three-phase flow experiments, where both saturation and pressure of all fluids are measured, are not abundant.

The SIAM developed by Flores, Katsumi, Inui, and Kamon (2011) is employed in this research to assess the saturation distributions of water and LNAPL in sand under transient condition. This method is a non-intrusive and non-destructive technique to measure saturations of fluids in porous media in the entire domain of the experimental column. The Beer–Lambert Law of Transmittance is employed to obtain linear relationships between average optical density (defined in Equation (1)) and fluid saturations that can be used, after proper calibration, to calculate fluid saturations of soil samples when their photos are taken.

$$D_i = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N d_{ji} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \left[ -\log_{10} \left( \frac{I_{ji}^r}{I_{ji}^0} \right) \right] \quad (1)$$

where  $D_i$  is the average optical density,  $i$  is a given spectral band,  $N$  is number of pixels contained in area of interest,  $d_{ji}$  is optical density of individual pixels,  $I_{ji}^r$  is intensity of the reflected light given by individual pixel values and  $I_{ji}^0$  is intensity of light that reflected by an ideal white surface.

The SIAM uses two consumer-grade digital cameras with the 450 and 640-nm band-pass filters. The transmittance analysis shows that, at wavelength of 640 nm, the red-dyed diesel gave maximum transmittance and the water gave minimum transmittance, whereas the opposite pattern was observed at wavelength of 450 nm. The calibration process requires three calibrating photos corresponding to the extremities of the  $D_i$ - $S_w$ - $S_o$  relationship plane, which are (i) dry sand ( $S_w = 0\%$ ,  $S_o = 0\%$ ), (ii) sand fully saturated with water ( $S_w = 100\%$ ,  $S_o = 0\%$ ) and (iii) sand fully saturated with NAPL ( $S_w = 0\%$ ,  $S_o = 100\%$ ) (see Figure 1), where  $S_w$  is water saturation and  $S_o$  is NAPL saturation. The matrix of correlation equation can then be obtained as shown in Equation (2).

$$\begin{bmatrix} D_{450} \\ D_{640} \end{bmatrix}_{14 \times 400} = \begin{bmatrix} (D_{450}^{10} - D_{450}^{00})S_w + (D_{450}^{01} - D_{450}^{00})S_o + D_{450}^{00} \\ (D_{640}^{10} - D_{640}^{00})S_w + (D_{640}^{01} - D_{640}^{00})S_o + D_{640}^{00} \end{bmatrix}_{14 \times 400} \quad (2)$$

where  $14 \times 400$  is the dimension of matrix,  $[D_{450}]_{14 \times 400}$  and  $[D_{640}]_{14 \times 400}$  are average optical densities of each mesh element for wavelengths 450 and 640 nm,  $[D_{450}^{00}]_{14 \times 400}$  and  $[D_{640}^{00}]_{14 \times 400}$  are average optical densities of each mesh element for dry sand;  $[D_{450}^{10}]_{14 \times 400}$  and  $[D_{640}^{10}]_{14 \times 400}$  for water-saturated sand;  $[D_{450}^{01}]_{14 \times 400}$  and  $[D_{640}^{01}]_{14 \times 400}$  for NAPL-saturated sand.

In this analysis, the studied domain ( $3.5 \times 100 \text{ cm}^2$ ) is divided into 5,600 ( $14 \times 400$ ) mesh elements of  $0.25 \times 0.25 \text{ cm}^2$  each. This discretisation is selected on the basis of trial analysis to optimise dispersion of the results. During the experiment, the photos are taken and the average optical densities of each mesh element of the studied domain are calculated and compared to the corresponding ones for all three cases and then water saturation  $[S_w]_{14 \times 400}$  and NAPL saturation  $[S_o]_{14 \times 400}$  can be obtained by solving Equation (2). It is verified that (i) a linear relationship exists between optical density and saturations of water and diesel fuel for Ottawa #3821 and #3820 sands with coefficients of determination ( $r^2$ ) ranging between 0.78 and 0.93 and (ii) the accuracy of obtained degree of saturation is  $\pm 10\%$ .

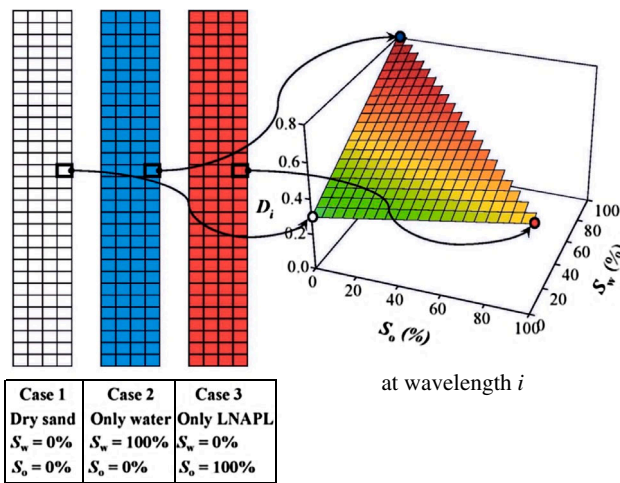


Figure 1. Simplified image analysis method.

### 3. Details of experiments

In this study, there are three experimental parts, i.e. (i) Tempe pressure cell, (ii) two-phase column experiment and (iii) three-phase column experiment. The two-phase column experiment and Tempe pressure cell aim to study the SLCCs of tested sands. The three-phase column experiment aims to investigate the effects of groundwater table fluctuation on diesel fuel distribution in subsurface.

#### 3.1. Tested sands and LNAPL

Two sand materials, i.e. Ottawa #3821 and #3820 sands, are used in this study. These tested sands are classified as poorly graded fine and medium sands, respectively, at relatively dense state. Their grain-size distribution curves are shown in Figure 2 and some properties are summarised in Table 1. Both sands are prepared at similar dry unit weight and void ratio resulting in relatively similar coefficient of permeability. Thus, the only difference between these two specimens is the grain size.

Diesel fuel is used as an experimental LNAPL. It is dyed red with Red Sudan III (1:10000 by weight) to enhance visual observation and increase its light absorbance properties. There is no noticeable change in the physical properties of diesel fuel after being mixed with dye and the dye does not migrate between water and diesel fuel and it is not absorbed by sand particles. The properties of the liquids employed in this study are summarised in Table 2.

#### 3.2. Tempe pressure cell

The air/water and air/diesel drainage tests at high matric suction are conducted using a Tempe pressure cell. In these tests, air is the non-wetting fluid and water or diesel fuel is the wetting fluid. The air pressure of 10–90 kPa is supplied through the inlet tube at the top cap and the liquid is allowed to drain out of the soil specimen from the underneath outlet which is connected to the atmosphere (0 kPa). The system is left for 24 h to reach equilibrium at each applied air pressure which is confirmed by observing the

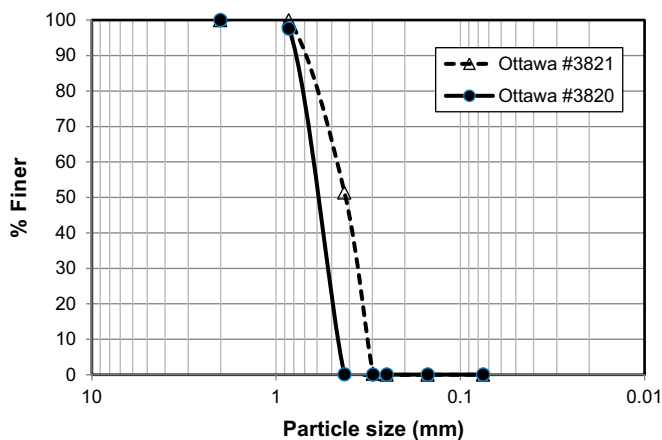


Figure 2. Grain-size distribution curves of tested sands.



Table 1. Properties of tested sands.

Properties	Ottawa #3821	Ottawa #3820
Unified Soil Classification System (USCS)	SP	SP
Description (according to USCS)	Fine sand	Medium sand
Specific gravity, $G_s$	2.63	2.64
Mean grain size ( $D_{50}$ ), mm	0.422	0.643
Coefficient of uniformity, $C_u$	1.48	1.36
Coefficient of curvature, $C_c$	0.91	0.95
Coeff. of permeability of water, $k_w$ (cm/s)*	$1.80 \times 10^{-2}$	$2.02 \times 10^{-2}$
Coeff. of permeability of diesel, $k_o$ (cm/s)*	$1.58 \times 10^{-2}$	$1.91 \times 10^{-2}$
Dry unit weight, $\gamma_{dry}$ (kN/m <sup>3</sup> )	17.6	17.6
Void ratio, $e$	0.49	0.50

\*Constant-head permeability test at 20 °C.

Table 2. Properties of tested liquids.

Properties	Water	Diesel fuel
Density, $\rho_s$ (g/cm <sup>3</sup> ) at 20 °C	0.998	0.865
Kinematic viscosity, $\mu$ (mm <sup>2</sup> /s) at 20 °C	1.00	4.10
Surface tension (mN/m) at 20 °C	70.28	28.80
Vapor pressure (mmHg) at 40 °C	7.37	3.75

change of weight of draining liquid being less than 0.5%. The procedure is then repeated at higher applied air pressure. The change in the liquid content of the soil specimen is measured by the volume of draining liquid.

### 3.3. Two-phase column experiment

One-dimensional columns,  $3.5 \times 3.5 \times 110$  cm<sup>3</sup> constructed of transparent acrylic walls, are employed in this study. The base of column is connected to the constant-head water reservoir to control the water pressure at its base. The upper air-phase boundary condition is atmospheric. Evaporation is minimised by covering top of the column with plastic plate that contained small holes to avoid producing vacuum. There are access ports at every 10 cm along the column height for sample collection to determine the liquid saturation by gravimetric method. The sampling ports has 10 mm diameter; therefore, the obtained liquid saturations are average values over these areas. The room temperature and humidity are controlled to maintain relatively stable values of 20 °C and 80%, respectively. The laboratory set-up and example colour photos are presented by Flores et al. (2011).

The air/water and air/diesel drainage tests at low matric suction are conducted by two-phase column experiment. The column is packed with oven-dried sand up to  $h = 105$  cm (where  $h$  is the height from the base of column). The column packing is done in short lift to ensure sample homogeneity. The sand is slowly wetted from below until water or diesel fuel ponded on the surface after which suction is applied from top to remove trapped air. After that, the liquid head at the base of the column is lowered to  $h = 5$  cm and the liquid inside the column is allowed to drain out through the base of column. The column is left for 72 h to allow for equilibrium by observing the change of weight of draining liquid being less than 0.5%.

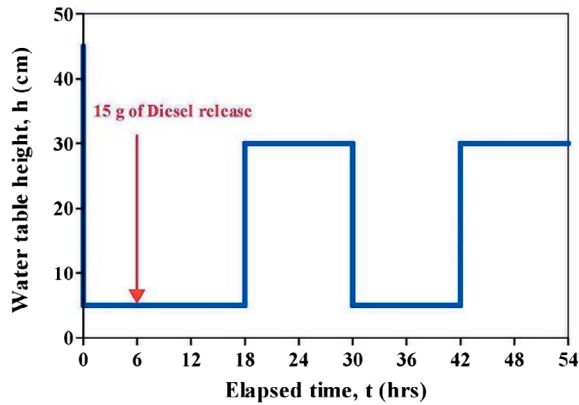


Figure 3. Prescribed water pressure at the base of the column.

### 3.4. Three-phase column experiment

The effects of groundwater table fluctuation on diesel fuel distribution are studied by three-phase column experiment. The experimental set-up is similar to that of two-phase column experiment except that, in this experiment, dry sands are filled up to only  $h = 45$  cm. After fully saturated condition, the water pressure at the base is varied to control the water table height in the column in four stages, i.e. first drainage, first imbibition, second drainage, and second imbibition, as shown in Figure 3. The water pressure head at the base of the column is altered instantaneously to the required value and the water table height inside the column is correspondingly altered in an uncontrolled rate with each stage finished within 5–10 min. The detail of each stage is described as follow.

- (i) First drainage: The water pressure at the base is lowered from  $h = 45$  to 5 cm and the water inside the column is allowed to drain freely out of the base. After 6 h, 15 g ( $17.3 \text{ cm}^3$ ) of diesel fuel is introduced from the top of column; therefore, the system composes of three phases from this point onward. The column is left for further 12 h and this stage takes totally 18 h.
- (ii) First imbibition: The water pressure at the base is raised from  $h = 5$  to 30 cm and the water table inside the column is allowed to move freely upward. After that, the column is left for 12 h.
- (iii) Second drainage: The water pressure at the base is lowered from  $h = 30$  to 5 cm and the water table inside the column is allowed to move freely downward. No additional diesel is added to the system. After that, the column is left for 12 h.
- (iv) Second imbibition: The first imbibition process is repeated in this stage.

## 4. Soil–liquid characteristic curves

### 4.1. SLCCs in two-phase systems of air/water and air/diesel

The SLCC is a relationship between the liquid saturation and matric suction ( $S$ - $p$  relation) of soil. In this study, the main drainage (drying) curves of  $S$ - $p$  relations can be analysed. The SLCCs of Ottawa #3821 and #3820 sands are shown in Figures 4 and 5,

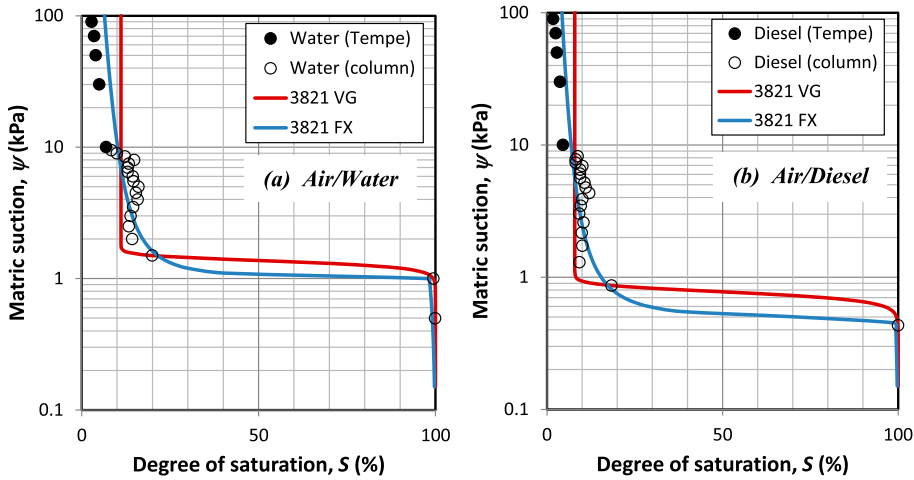


Figure 4. SLCCs of Ottawa #3821 sand.

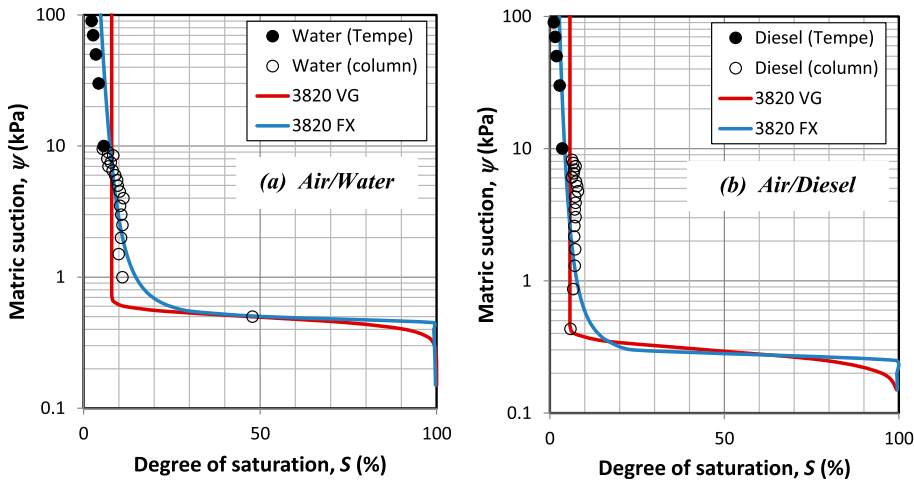


Figure 5. SLCCs of Ottawa #3820 sand.

respectively, the data of which are obtained from both two-phase column experiment (at low matric suction of less than 10 kPa) and Tempe pressure cell (at high matric suction of 10–90 kPa). In two-phase column experiment, the height of a measurement location above the liquid table is assumed to equal to the matric suction (or negative pore-liquid pressure head) at that point. The obtained SLCCs are fitted with the empirical models of van Genuchten (1980) (VG) (Equation 3) and Fredlund and Xing (1994) (FX) (Equation 4) with a least-squares algorithm and the resulting SLCCs are shown in Figures 4 and 5. The constants of the models are summarised in Table 3 and it shows that finer sand (Ottawa #3821) yields larger  $S_r$ ,  $\psi_r$ ,  $a$  and  $n$  but smaller  $m$ , whereas diesel fuel gives lower  $S_r$ ,  $a$  and  $n$  but larger  $m$ . The effects of particle size on model parameters obtained in this research are consistent with Yang et al. (2004). From this

Table 3. Constants of SLCC models.

Sand	Fluid pair	van Genuchten model					Fredlund & Xing model				
		$S_r$	$a$ (kPa)	$m$	$n$	$r^2$	$\psi_r$ (kPa)	$a$ (kPa)	$m$	$n$	$r^2$
Ottawa #3821	Air/Water	0.1109	1.460	2.55	15.56	0.982	4.252	1.027	0.37	155.0	0.993
	Air/Diesel	0.0790	0.854	2.81	11.78	0.988	4.723	0.487	0.51	54.3	0.995
Ottawa #3820	Air/Water	0.0797	0.556	2.88	10.00	0.982	3.825	0.482	0.42	130.0	0.994
	Air/Diesel	0.0574	0.376	4.72	7.09	0.989	2.589	0.260	0.50	119.0	0.989

Note: All variables are defined in Equation 4.

research, the FX model fits the experimental data better (indicated by  $r^2$  in Table 3), particularly at large matric suction which is consistent with the discussion of Fredlund and Xing (1994). Thus, only the FX model is used for further analysis.

$$S = S_r + (1 - S_r) \left[ \frac{1}{1 + \left(\frac{\psi}{a}\right)^n} \right]^m \quad (S_r, a, m, n \text{ are fitting parameters}) \quad (3)$$

$$S = \left[ 1 - \frac{\ln\left(1 + \frac{\psi}{\psi_r}\right)}{\ln\left(1 + \frac{10^6}{\psi_r}\right)} \right] \left[ \frac{1}{\ln\left[e + \left(\frac{\psi}{a}\right)^n\right]} \right]^m \quad (\psi_r, a, m, n \text{ are fitting parameters}) \quad (4)$$

where  $S$  = degree of saturation;  $\psi$  = matric suction;  $S_r$  = residual degree of saturation (see Figure 8);  $\psi_r$  = residual matric suction (see Figure 8);  $\psi_a$  = air-entry pressure (see Figure 8);  $e$  = natural number 2.71828 ...;  $a$  = model parameter relates to air-entry pressure ( $a$  increases,  $\psi_a$  increases);  $m$  = model parameter relates to residual degree of saturation ( $m$  decreases,  $\psi_r$  increases);  $n$  = model parameter relates to slope of SLCC ( $n$  decreases,  $d\psi/dS$  increases)

#### 4.2. Estimation of SLCC in two-phase system of diesel/water

For a rigid porous medium, it is only necessary to measure  $S$ - $p$  relations for two of the three two-phase systems (i.e. air/water, air/NAPL or NAPL/water) and the  $S$ - $p$  relation of the third system may then be predicted (Lenhard & Parker, 1987). In the scaling procedure proposed by Parker, Lenhard, and Kuppusamy (1987),  $S$ - $p$  relations of two-phase systems are adjusted to obtain a unique scaled function for a given porous medium after applying a linear transformation to matric suction as shown in Equation (5).

$$\bar{S}_w(\beta_{aw}\psi_{aw}) = \bar{S}_o(\beta_{ao}\psi_{ao}) = \bar{S}_w(\beta_{ow}\psi_{ow}) = S^*(\psi^*) \quad (5)$$

where  $a$ ,  $o$  and  $w$  refer to air, NAPL, and water phases, respectively;  $\bar{S}_j = (S_j - S_{jr}) / (1 - S_{jr})$  is the effective saturation of wetting phase  $j$ ;  $S_{jr}$  is the irreducible saturation of wetting phase  $j$  ( $S_{jr} = 0$  for FX model);  $\beta_{ij}$  is a fluid pair-dependent

scaling factor; and  $S^*(\psi^*)$  is a scaled function between the saturation of wetting phase and matric suction. The scaling coefficients are related as shown in Equation (6) (Lenhard & Parker, 1987). In this study, Equation (6) is employed to determine the scaling factor  $\beta_{ow}$  rather than deriving it on the basis of fluid interfacial tensions because small water solubility and volatility of organic compounds can affect the fluid interfacial tensions (Lenhard & Parker, 1988).

$$\frac{1}{\beta_{aw}} = \frac{1}{\beta_{ow}} + \frac{1}{\beta_{ao}} \tag{6}$$

The procedure for predicting  $S$ - $p$  relationship of diesel–water system is described as follows; (i) taking the air–water system as a reference fluid pair system and setting  $\beta_{aw} = 1.0$ ; (ii) fitting  $S$ - $p$  relation of air–water system to obtained  $S^*(\psi^*)$ ; (iii) obtaining  $\beta_{ao}$  by fitting  $S$ - $p$  relation of air–diesel system; (iv) obtaining  $\beta_{ow}$  by using Equation (6); and (v) calculating  $\bar{S}_w$  and  $\psi_{ow}$  according to Equation (5). The scaled effective saturation-matric suction relations are shown in Figure 6. All the scaling factors in air/water, air/diesel and diesel/water systems are summarised in Table 4. The scaling factor of each fluid pair is relatively similar for each porous medium which may indicate that the scaling factors are fluid-dependent parameters as indicated in Parker et al. (1987).

From the obtained FX parameters and scaling factors, the  $S$ - $p$  relations of all two-phase systems can be shown in Figure 7. The SLCCs show that, once the value of the matric suction increases slightly above the entry pressure, significant reduction in the degree of saturation is recorded which means that most of liquid drains out of the sand specimen. The tested sand specimens are poorly graded resulting in a relatively flat transition in the  $S$ - $p$  relationship. The physical properties can be derived from these SLCCs (see drying curve in Figure 8) and the results are summarised in Table 5. It can be seen that finer sand has larger  $\psi_a$ ,  $\psi_r$  and  $S_r$ , whereas diesel fuel gives smaller  $\psi_a$  and  $\psi_r$ . The effects of particle size on these physical parameters are also consistent with those reported by Yang et al. (2004).

Figure 7 shows that a descending sequence of matric suction at a given saturation of wetting phase is in the order of air/water, diesel/water and air/diesel systems. The entry

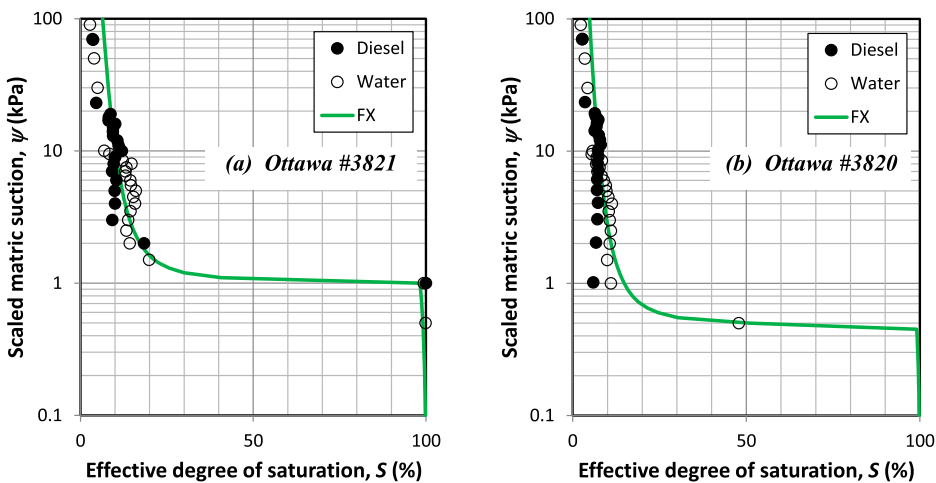


Figure 6. Scaled effective saturation-matric suction relations.

Table 4. Scaling factors of all two-phase systems.

Scaling factors	Ottawa #3821	Ottawa #3820
$\beta_{aw}^*$	1	1
$\beta_{ao}^{**}$	2.308	2.348
$\beta_{ow}^{**}$	1.764	1.742

\*Reference system.

\*\*Use Equation (6).

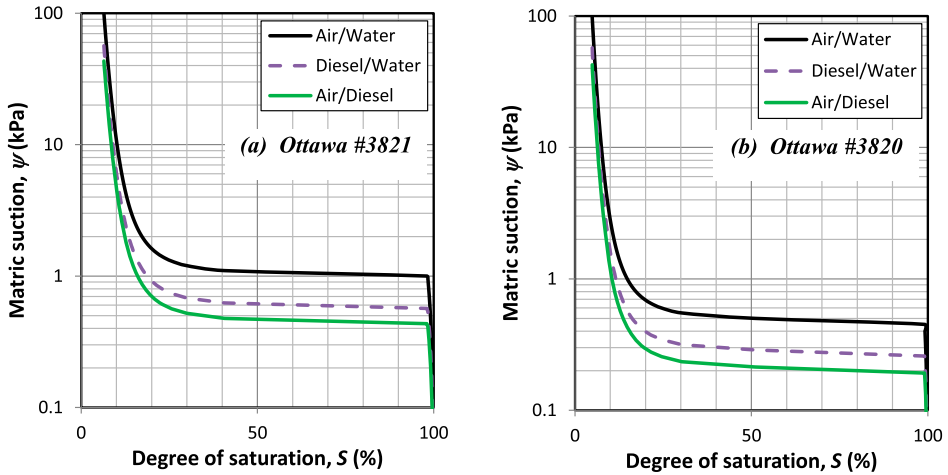


Figure 7. Saturation-matric suction relations of all two-phase systems.

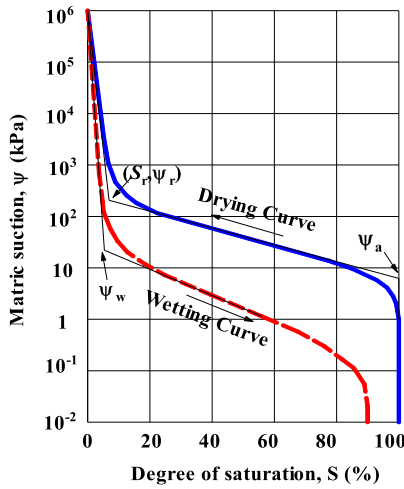


Figure 8. Idealised SLCCs.

Downloaded by [Dr Siam Yimsiri] at 01:05 19 June 2016

Table 5. Physical properties derived from Fredlund and Xing SLCCs.

Fluid pair	Sand	$\psi_a$ (kPa)	$\psi_r$ (kPa)	$S_r$ (%)
Air/Water	Ottawa #3821	1.0	1.1	9.5
	Ottawa #3820	0.45	0.52	7.5
Air/Diesel	Ottawa #3821	0.42	0.50	10.5
	Ottawa #3820	0.20	0.23	8.5
Diesel/Water	Ottawa #3821	0.56	0.63	10.0
	Ottawa #3820	0.25	0.31	8.0

Note: All variables are defined in Figure 8.

pressure of air/water system is larger than that of diesel/water system. This suggests that, in their corresponding two-phase systems, diesel fuel is easier to displace water than air at the beginning of drainage process. The entry pressure of air/water system is larger than that of air/diesel system. This also suggests that diesel fuel is easier to be desaturated than water in their corresponding two-phase systems. This phenomenon is also consistent with the results from other LNAPLs presented by; e.g. Parker et al. (1987), Busby, Lenhard, and Rolston (1995), Sharma and Mohamed (2003), and Kamon, Li, Endo, Inui, and Katsumi (2007).

## 5. Effects of groundwater table fluctuation on diesel fuel distribution

The effects of groundwater table fluctuation on diesel fuel distribution can be analysed from the three-phase column experiment. The profiles of water and diesel saturations in entire domain during each test stage are presented. During the experiment, it is verified that the difference between total amount of diesel fuel derived from volume integration of the image analysis is within  $\pm 10\%$  of the actual amount which indicates accuracy of SIAM used in current study. To avoid confusion in the following discussion, entrapped fluid is defined as non-wetting fluid that is occluded by water at a location far below the water table during imbibition process, whereas residual fluid is defined as immobile fluid held in place at a location far above the water table by capillary force after fluid is allowed to drain (Lenhard, Oostrom, & Dane, 2004).

### 5.1. First drainage stage

The water saturation profiles, after the water pressure at the base of the column is lowered to  $h = 5$  cm for 6 h, is shown in Figure 9 and they are compared with the SLCCs (FX model) derived earlier (air/water curves in Figure 7). The consistency between these data indicates the uniformity of packing of soil column between tests. The thicknesses of capillary fringe are 9 and 4 cm for Ottawa #3821 and #3820 sands, respectively.

At  $t = 6$  h, 15 g of diesel fuel is introduced to the soil surface such that slight ponding occurs; therefore, the diesel fuel pressure may be assumed to be near atmospheric. The diesel fuel infiltrates into the sand surface within 10 and 5 min for Ottawa #3821 and #3820 sands, respectively. Mobile diesel fuel moves downward while residual diesel fuel remains behind. The dynamic variations of fluid saturation profiles with time between  $t = 6$ –18 h are shown in Figures 10 and 11 for Ottawa #3821 and #3820 sands, respectively. For Ottawa #3821 (fine sand), the diesel fuel front reaches the capillary fringe within approximately 7 h ( $t = 13$  h) with the rate of advancement of approxi-

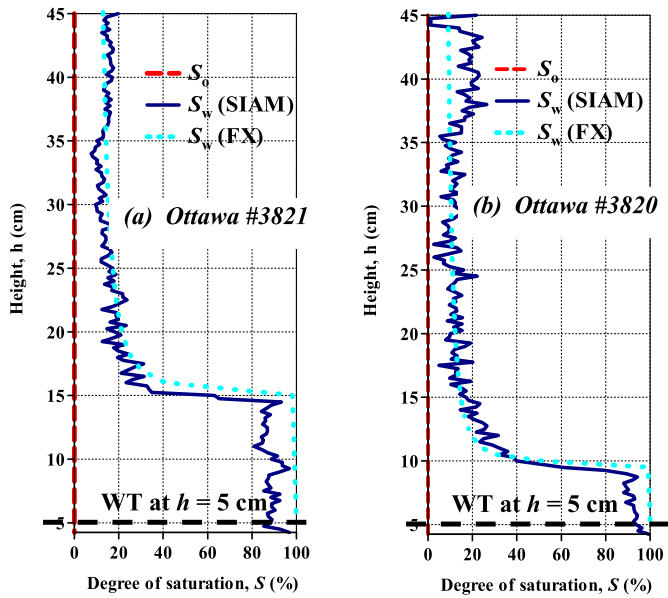


Figure 9. Water saturation profiles at  $t = 6$  h.

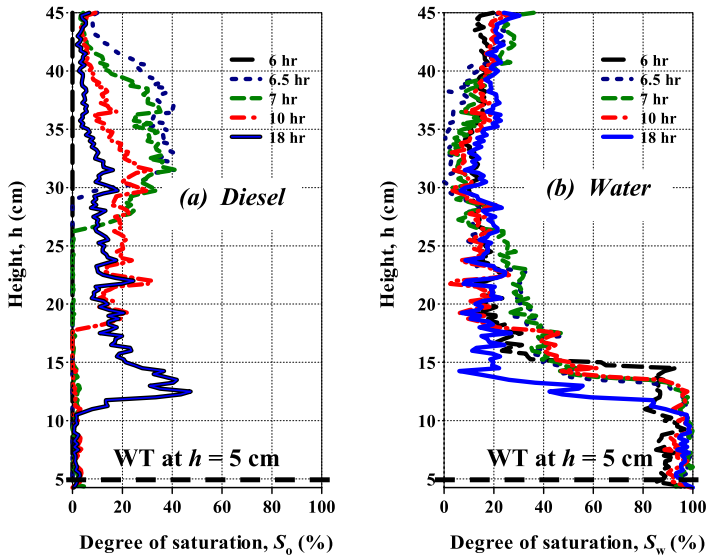


Figure 10. Liquid saturation profiles of Ottawa #3821 sand during  $t = 6-18$  h.

mately 7 cm/hr at the beginning and decreasing to approximately 1.5 cm/hr when diesel front approaching the capillary fringe. For Ottawa #3820 (medium sand), similar behaviour is observed but with faster rate of diesel front advancement. Most diesel fuel rapidly moves to the capillary fringe within less than 0.5 h ( $t = 6.5$  h) which gives the rate of diesel front advancement of more than 70 cm/hr.



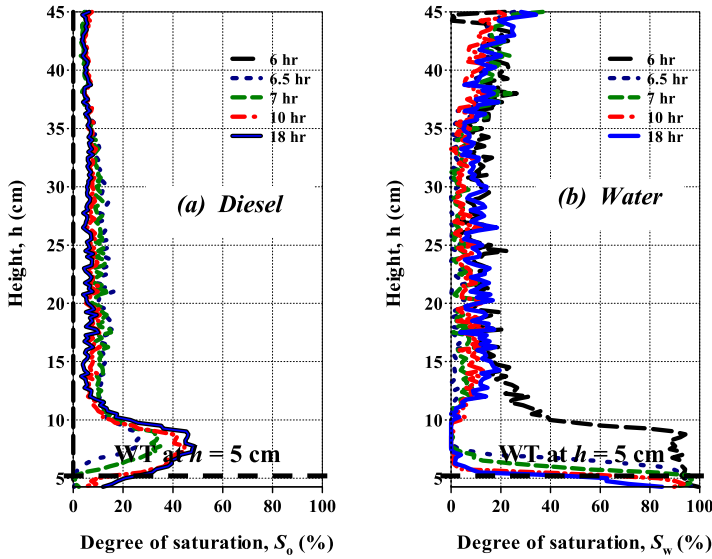


Figure 11. Liquid saturation profiles of Ottawa #3820 sand during  $t = 6$ – $18$  h.

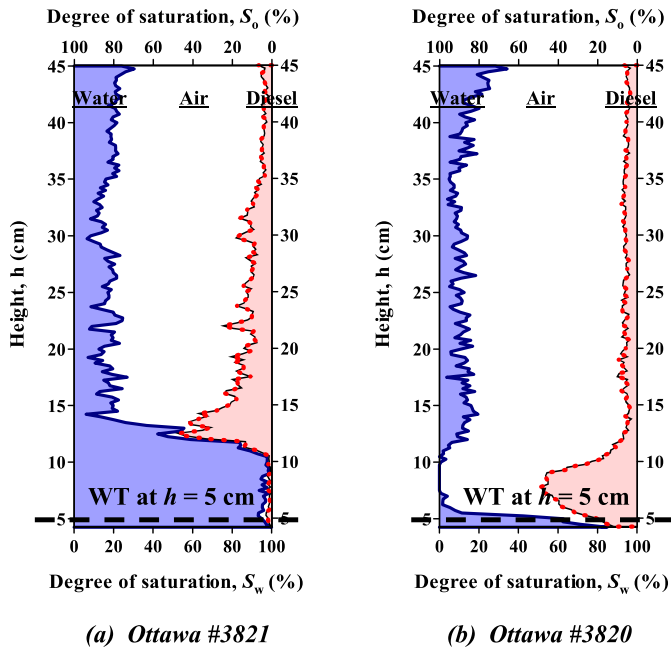


Figure 12. Liquid saturation profiles at end of 1st drainage stage ( $t = 18$  h).

Figure 12 shows the liquid saturation profiles at the end of first drainage ( $t = 18$  h) which is considered as close to equilibrium state. For Ottawa #3821 (fine sand), addition of diesel fuel leads to decrease in the thickness of the capillary fringe from 9 to 5 cm without changes in the position of the water table and the thickness of diesel pool above

the capillary fringe is 7 cm (Figure 12(a)). The presence of the diesel fuel reduces the capillary force in an air/water system to an air/diesel/water system; consequently, the thickness of capillary fringe of the water table is correspondingly reduced. For Ottawa #3820 (medium sand), the diesel fuel totally eliminates the capillary fringe with slight depression of the water table by 2 cm and the thickness of diesel pool above the water table is 9 cm (Figure 12(b)). At the diesel pool, the diesel fuel saturation is large and the water saturation is negligible. The residual liquid saturations above the diesel pool are  $S_{o,r} = 3.8\%$  and  $S_{w,r} = 14.4\%$  for Ottawa #3821 and  $S_{o,r} = 4.1\%$  and  $S_{w,r} = 10.2\%$  for Ottawa #3820 sands.

**5.2. First imbibition stage**

At  $t = 18$  h, the water pressure at the base of the column is raised to  $h = 30$  cm and the dynamic variations of fluid saturation profiles with time during  $t = 18-30$  h are shown in Figure 13 and 14 for Ottawa #3821 and #3820 sands, respectively. For Ottawa #3821 (fine sand), after the water table rises, the diesel fuel moves up in an apparently delayed response where the system reaches equilibrium after 4 h ( $t = 22$  h). For Ottawa #3820 (medium sand), most diesel fuel rapidly moves up toward the top of the column within 0.5 h ( $t = 18.5$  h). After that, the diesel fuel continues accumulating above the water table (Figure 14(a)), whereas the water seems to already reach its equilibrium state (Figure 14(b)). This indicates that the diesel fuel moves upward slower than water due possibly to its larger viscosity.

Figure 15 shows the liquid saturation profiles at the end of first imbibition stage ( $t = 30$  h) which is considered as close to equilibrium state. For Ottawa #3821 (fine sand), the thickness of the capillary fringe after the water table rise further decreases from 5 to 2 cm without changes in the position of the water table and the thickness of diesel pool above the capillary fringe is still 7 cm (Figure 15(a)). This reduction of

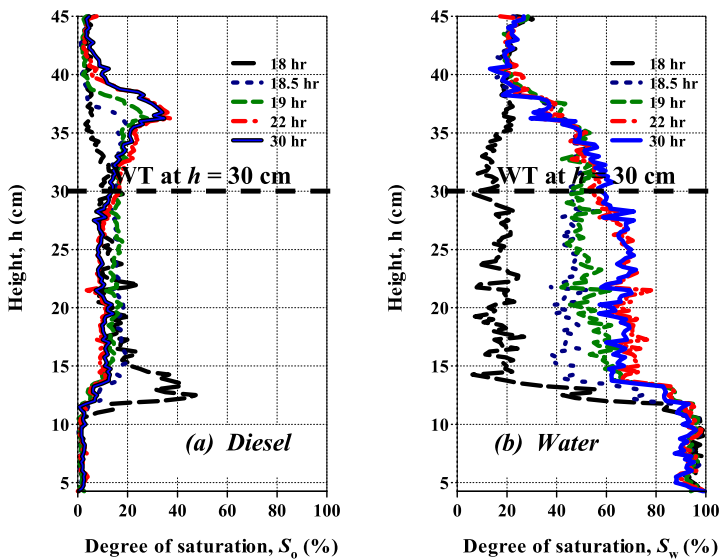


Figure 13. Liquid saturation profiles of Ottawa #3821 sand during  $t = 18-30$  h.

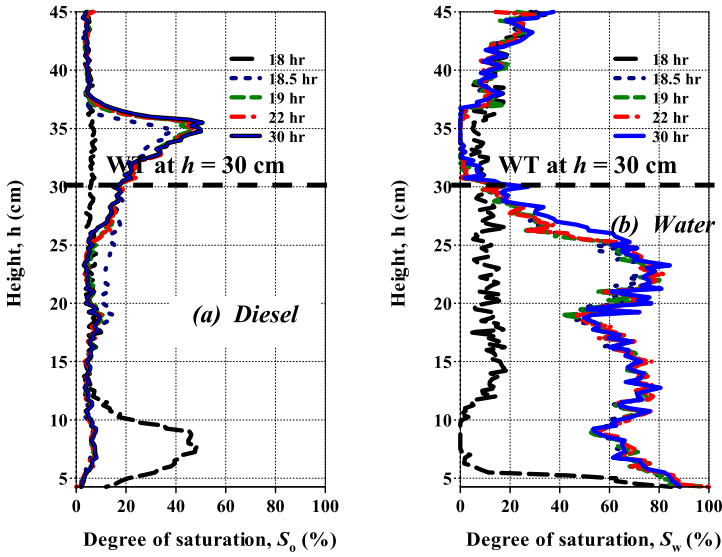


Figure 14. Liquid saturation profiles of Ottawa #3820 sand during  $t = 18\text{--}30$  h.

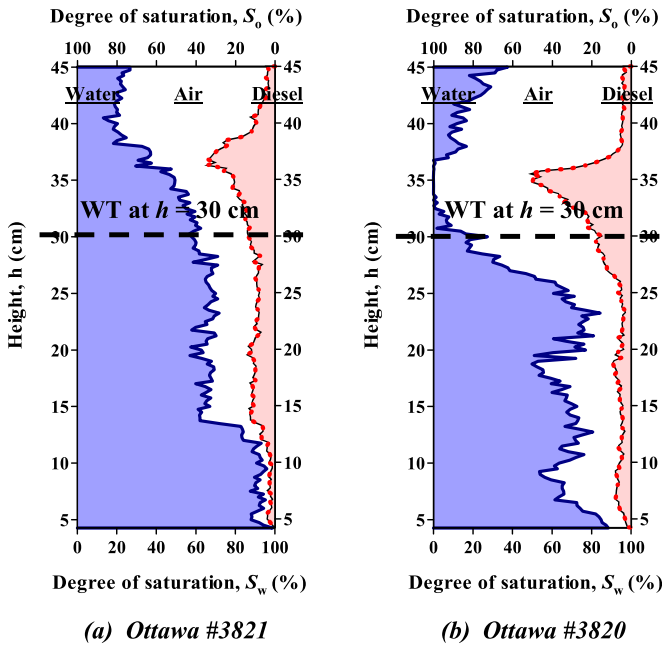


Figure 15. Liquid saturation profiles at end of 1st imbibition stage ( $t = 30$  h).

capillary fringe is expected because water is imbibing into the porous media. For Ottawa #3820 (medium sand), the diesel fuel totally eliminates the capillary fringe with slight depression of the water table by 4 cm and the thickness of diesel pool above the water table is 12 cm (Figure 15(b)). At the diesel pool, the diesel fuel saturation is large

and the water saturation is negligible. At the end of first imbibition stage, there are air and diesel fuel entrapped under the water table. The entrapped saturations of each phase are  $S_{a,e} = 24.1\%$  and  $S_{o,e} = 10.2\%$  for Ottawa #3821 and  $S_{a,e} = 27.1\%$  and  $S_{o,e} = 4.6\%$  for Ottawa #3820 sands.

### 5.3. Second drainage stage

At  $t = 30$  h, the water pressure at the base of the column is again lowered to  $h = 5$  cm and the dynamic variation of fluid saturation profiles with time during  $t = 30-42$  h are shown in Figure 16 and 17 for Ottawa #3821 and #3820 sands, respectively. For Ottawa #3821 (fine sand), the diesel fuel front reaches the capillary fringe within approximately 4 h ( $t = 34$  h) with the rate of advancement of approximately 6 cm/hr (Figure 16(a)). For Ottawa #3820 (medium sand), most diesel fuel rapidly moves to the capillary fringe within approximately 1 h ( $t = 31$  h) which gives the rate of diesel front advancement of approximately 30 cm/hr (Figure 17(a)). Generally, the observed behaviour during second drainage stage is relatively similar to first drainage stage.

Figure 18 shows the liquid saturation profiles at the end of second drainage stage ( $t = 42$  h) which is considered as close to equilibrium state. For Ottawa #3821 (fine sand), the thickness of the capillary fringe increases from 2 to 5 cm without depression of the water table and the thickness of diesel pool above the capillary fringe is 6 cm (Figure 18(a)). For Ottawa # 3820 (medium sand), the diesel fuel totally eliminates the capillary fringe with slight depression of the water table by 1 cm and the thickness of diesel pool above the water table is 6 cm (Figure 18(b)). The liquid saturation profiles at the end of second drainage stage are relatively similar to that at the end of first drainage stage. The residual liquid saturations above the diesel pool are  $S_{o,r} = 4.9\%$  and  $S_{w,r} = 10.7\%$  for Ottawa #3821 and  $S_{o,r} = 4.6\%$  and  $S_{w,r} = 7.9\%$  for Ottawa #3820 sands.

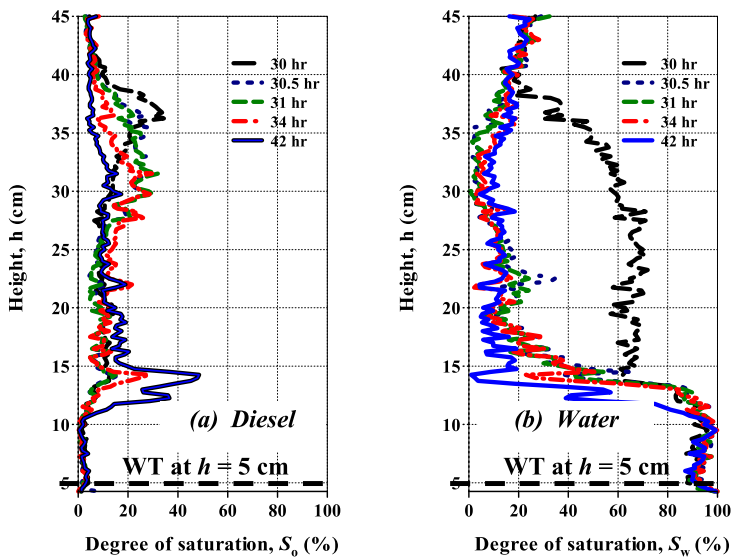


Figure 16. Liquid saturation profiles of Ottawa #3821 sand during  $t = 30-42$  h.

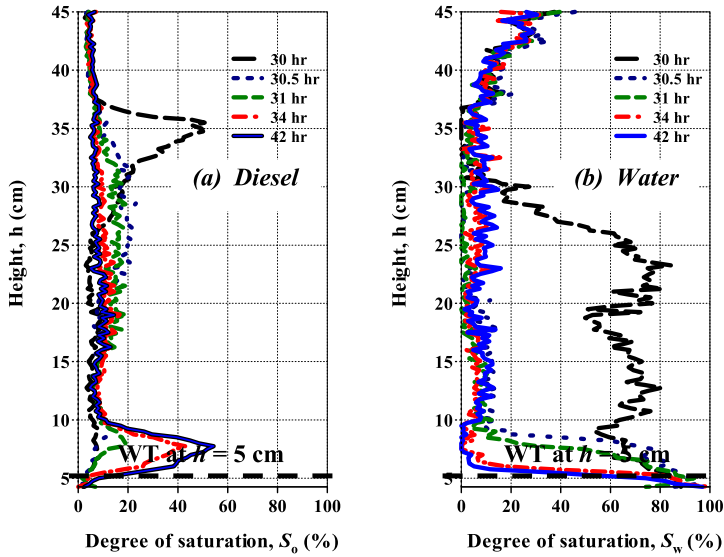


Figure 17. Liquid saturation profiles of Ottawa #3820 sand during  $t = 30\text{--}42$  h.

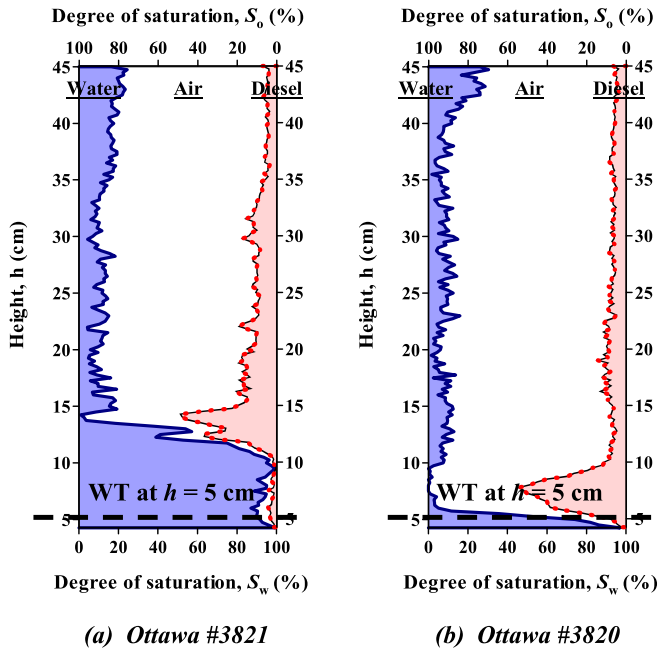


Figure 18. Liquid saturation profiles at end of 2nd drainage stage ( $t = 42$  h).

#### 5.4. Second imbibition stage

At  $t = 42$  h, the water pressure at the base of the column is again raised to  $h = 30$  cm and the dynamic variation of fluid saturation profiles with time during  $t = 42\text{--}54$  h are shown in Figures 19 and 20 for Ottawa #3821 and #3820 sands, respectively. For

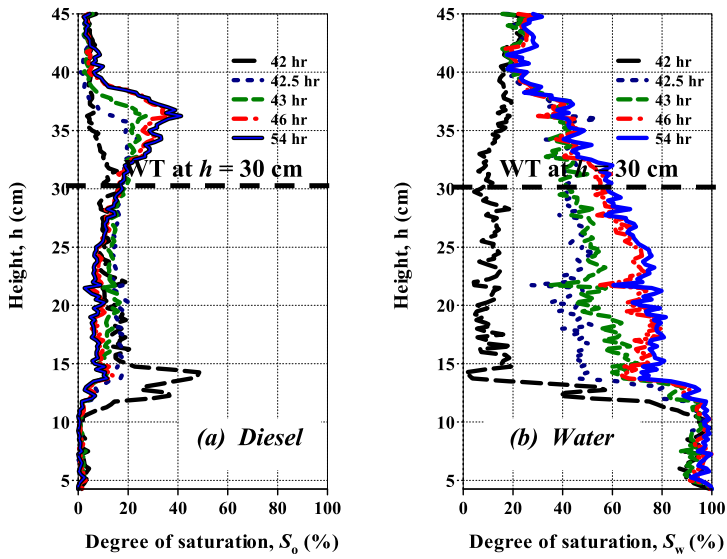


Figure 19. Liquid saturation profiles of Ottawa #3821 sand during  $t = 42\text{--}54$  h.

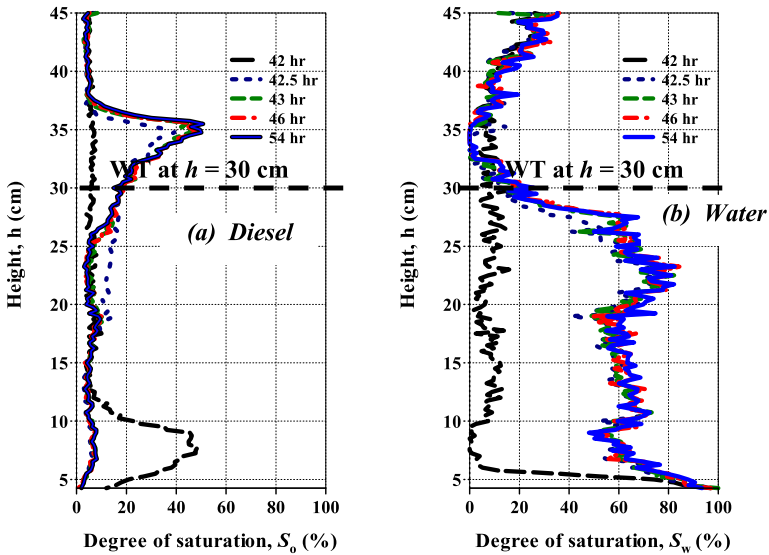


Figure 20. Liquid saturation profiles of Ottawa #3820 sand during  $t = 42\text{--}54$  h.

Ottawa #3821 (fine sand), after the water table rises, the diesel fuel moves up in a delayed fashion where the system reaches equilibrium after 4 h (at  $t = 46$  h). For Ottawa #3820 (medium sand), most diesel fuel rapidly moves up toward the top of the column within 1 h ( $t = 43$  h). After that, the diesel fuel continues accumulating above the water table (Figure 20(a)), whereas the water seems to already reach its equilibrium state (Figure 20(b)). Generally, the behaviour during second imbibition stage is relatively similar to that of first imbibition stage.

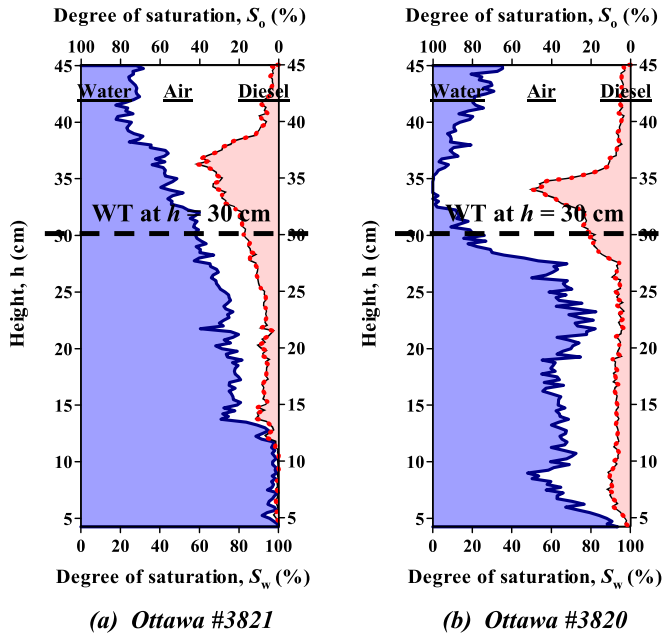


Figure 21. Liquid saturation profiles at end of 2nd imbibition stage ( $t = 54$  h).

Figure 21 shows the liquid saturation profiles at the end of second imbibition stage ( $t = 54$  h) which is considered as close to equilibrium state. For Ottawa #3821 (fine sand), the diesel fuel totally eliminates the capillary fringe with depression of the water table by 4 cm and the thickness of diesel pool above the water table is 13 cm (Figure 21(a)). For Ottawa #3820 (medium sand), the diesel fuel also totally eliminates the capillary fringe with slight depression of the water table by 2 cm and the thickness of diesel pool above the water table is 9 cm (Figure 21(b)). The liquid saturation profiles at the end of second imbibition stage are relatively similar to those at the end of first imbibition stage. The entrapped saturations of each phase at the end of second imbibition stage are  $S_{a,e} = 17.9\%$  and  $S_{o,e} = 6.7\%$  for Ottawa #3821 and  $S_{a,e} = 30.1\%$  and  $S_{o,e} = 6.0\%$  for Ottawa #3820 sands.

## 6. Discussions

The residual saturations at the end of drainage stages and the entrapped saturations at the end of imbibition stages are summarised in Figure 22. The total residual saturations (diesel + water) during drainage stages of Ottawa #3821 sand are larger than those of Ottawa #3820 sand due to finer sand particle size. Also, the entrapped diesel saturations during imbibition stages of Ottawa #3821 sand are larger than those of Ottawa #3820 sand due also to finer sand particle size. However, the entrapped air saturations during imbibition stages of Ottawa #3821 sand are smaller than those of Ottawa #3820 sand. The residual diesel saturations during drainage stages are approximately unchanged as the drainage stages are repeated. This may not be consistent with Chompusri et al. (2002) who showed that the residual LNAPL above a mobile phase became smaller with continued water table oscillations.

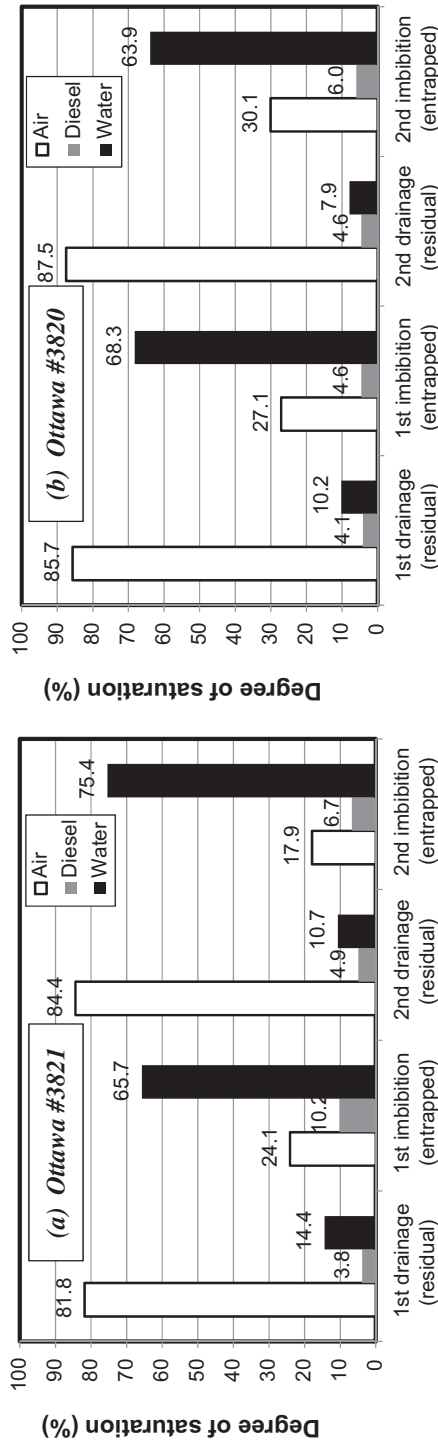


Figure 22. Residual and entrapped saturations in three-phase systems.



Table 6. Comparison of residual entrapped air during imbibition stage.

Properties	Lenhard et al. (1993)	Ryan and Dhir (1993)	This research	
Porous medium	Sandy material $D_{50} = 400 \mu\text{m}$	Glass particle $D_{50} = 210\text{--}710 \mu\text{m}$	Ottawa #3821 $D_{50} = 400 \mu\text{m}$	Ottawa #3820 $D_{50} = 600 \mu\text{m}$
Medium density*	$e = 0.67 \gamma = 16.2 \text{ kN/m}^3$	$e = 0.58\text{--}0.69$	$e = 0.49 \gamma = 17.6 \text{ kN/m}^3$	$e = 0.50 \gamma = 17.6 \text{ kN/m}^3$
LNAPL	Soltrol 170	Soltrol 170	Diesel fuel	Diesel fuel
Water table movement	5 cm/10 min	Slowly	Rapidly	Rapidly
Entrapped air ( $S_{a,e}$ )	6–10%	7–17%	18–24%	27–30%

\* $e$  = void ratio,  $\gamma$  = unit weight.

During imbibition stages (rising water table), there is some air (apart from some diesel) entrapped under water table. This phenomenon was also observed from similar experiments by Lenhard et al. (1993) and Ryan and Dhir (1993), the comparison of which is summarised in Table 6. All researches used similar sizes of porous media and similar LNAPLs (Soltrol 170 and diesel have relatively similar viscosity and surface tension); however, the amounts of entrapped air obtained from this research are much larger than those of other researches. This may be due to two main reasons, i.e. (i) the sands used in this research are denser and (ii) the water table movement in this research is more rapid. The denser sand specimens reduce the pore sizes and increase the pore tortuosity which may hinder the escape of air from the pore during imbibition process. Moreover, the oscillation of the water table is controlled by instantaneously adjustment of the water pressure at the base of the column to a specified value and allow the water table height in the column to correspondingly alter in an uncontrolled rate. This may introduce turbulent flow at the fluid interface which enhances air entrapment. However, this effect is expected to be less for Ottawa #3821 sand since the movement of water table is slower.

It is also noted that this experiment is conducted in one-dimension which limits the flow channel. In a two-dimensional rising water table system, diesel may not rise as fast as the water table and can be completely by-passed. In that case, the rising diesel has to displace water when it moves upward and the water/diesel entry pressure has to be

Table 7. Comparison of extension two-phase to three-phase.

Sand	Stage	Water residual		Total liquid residual	
		$S_w^{aow*}$	$S_w^{ow**}$	$S_t^{aow*}$	$S_o^{ao**}$
Ottawa #3821	1st drainage	14.4	10.0	18.2	10.5
	2nd drainage	10.7	10.0	15.6	10.5
Ottawa #3820	1st drainage	10.2	8.0	14.3	8.5
	2nd drainage	7.9	8.0	12.5	8.5

Note: All variables are defined in Equations (7) and (8).

\*From experiment (see Figure 22).

\*\*From SLCCs (see Table 5).

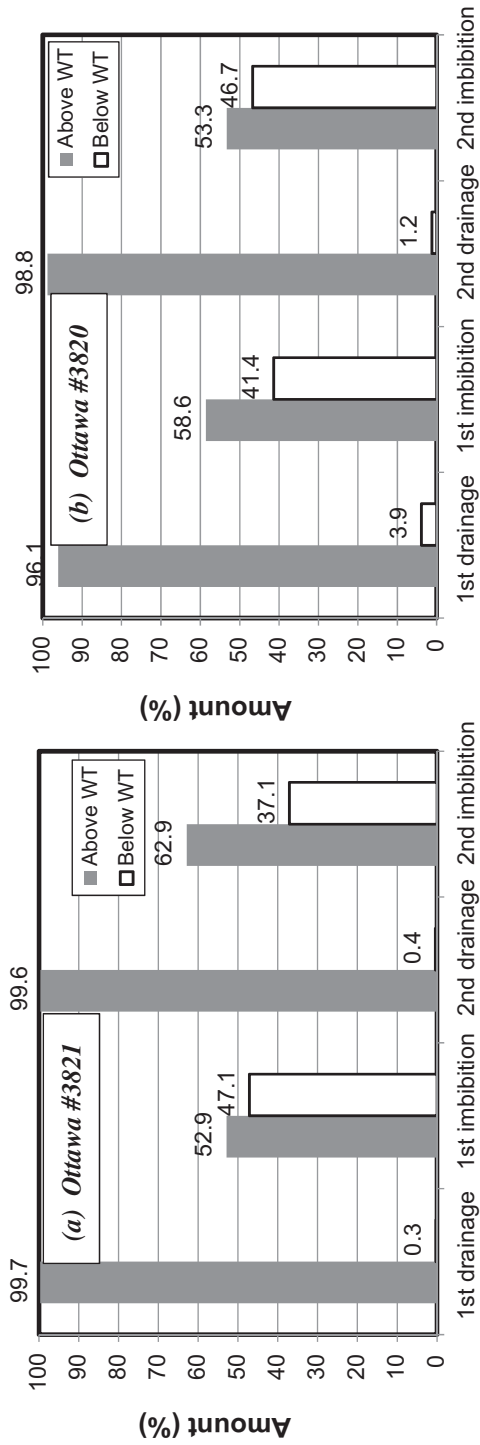


Figure 23. Amount of diesel fuel above and below water table.

exceeded for this to occur. Especially in fine-grained sand, the entry pressure might be such that a body of continuous diesel may be retained below the water table.

In three-phase systems of air, NAPL, and water in which the water phase is the most preferentially wetting fluid followed by the NAPL and the least wetting air phase, the total liquid saturation is a function of two-phase air/NAPL matric suction (Equation (7)) and the water saturation is a function of two-phase NAPL/water matric suction (Equation (8)) (Lenhard & Parker, 1987). Therefore, the SLCCs of two-phase systems obtained in Figure 7 can be used to estimate the residual liquid saturations observed during drainage stages of three-phase experiment, the comparison of which is summarised in Table 7. It can be seen that the comparison is acceptable and the results of second drainage stage give better consistency.

$$S_t^{aow} = S_o^{ao}(\psi_{ao}) \quad (7)$$

$$S_w^{aow} = S_w^{ow}(\psi_{ow}) \quad (8)$$

where  $S_t^{aow} = S_w^{aow} + S_o^{aow}$ , superscript *aow* denotes 3-phase system, and superscripts *ow* and *ao* denote 2-phase NAPL/water and air/NAPL systems, respectively.

Figure 23 presents the amount of diesel fuel above and below water table at equilibrium of each stage. It is noted that the elevation of water table is derived from the water pressure at the base of the column. During drainage stages, most of the diesel fuel locates above the water table. Very small amount of diesel fuel enters under water table for Ottawa #3820 because diesel fuel depresses the existing thin capillary fringe due to coarse sand particle size. During imbibition stages, 37–47% of the total amount of diesel fuel is entrapped under the water table. Comparison of the results of first with second imbibition stages, there is no systematic difference in the amount of diesel fuel entrapped under the water table with the change in particle size. Several parameters may affect LNAPL distribution in porous media after water table fluctuation, including volume of LNAPL present, magnitude and speed of water table fluctuation and porous media and LNAPL properties (e.g. Lenhard et al., 1993; Oostrom et al., 2006).

## 7. Conclusions

The effects of water table fluctuation on diesel migration in vadose zone are investigated by one-dimensional column test. The saturation distributions of water and diesel in the entire flow domain under transient condition are measured by the SIAM (Flores et al., 2011). The two-phase column and Tempe pressure cell data yield soil-liquids characteristic curves (SLCCs) of air/water and air/diesel systems. The empirical model of Fredlund and Xing (1994) fits the experimental data better particularly at large matric suction. By applying scaling procedure (Lenhard & Parker, 1987), the SLCCs of a diesel/water system can be predicted. Comparing the SLCCs of three two-phase systems, a descending sequence of matric suction at a given saturation of wetting phase is in the order of air/water, diesel/water and air/diesel systems. Finer particle size gives larger entry pressure ( $\psi_a$ ), residual matric suction ( $\psi_r$ ) and residual degree of saturation ( $S_r$ ), whereas larger fluid viscosity yields smaller  $\psi_a$  and  $\psi_r$ .

The three-phase column data show the effects of groundwater table fluctuation on diesel fuel distribution. Water table fluctuation results in a considerable increase in the vertical extent of the source zone. During drainage stages, diesel and water are present as residual phases above the water table and the total residual saturation of finer sand is

larger. These residual saturations in three-phase system can be predicted from the obtained SLCCs of two-phase systems according to Lenhard and Parker (1987). During imbibition stages, the experimental data suggest that air and diesel are entrapped below water table with the entrapped air saturations of 18–24% and entrapped diesel saturations of 6–10% for fine sand. The residual diesel saturations during drainage stages and entrapped diesel saturations during imbibition stages do not show any systematic difference as these stages are repeated. When the sand particle size becomes coarser, the entrapped diesel saturations are smaller; however, the entrapped air saturations are larger. The amounts of entrapped air obtained from this study are much larger than those of other researches which may be due to the used of denser sands and more rapid water table movement in this study. During imbibition stages, 37–47% of the total amount of diesel fuel is entrapped under the water table. Comparisons of the results of first with second imbibition stages and of fine with coarse sands do not show any systematic difference in the amount of diesel fuel entrapped under the water table.

### Acknowledgements

The support provided by the Faculty of Engineering, Burapha University and AUN/SEED-Net is appreciated.

### Disclosure statement

No potential conflict of interest was reported by the authors.

### Funding

This work was supported by the Faculty of Engineering [grant number WJP 14/2556] and Burapha University [grant number NRCT 102/2558].

### References

- Arya, L. M., Leij, F. J., Shouse, P. J., & van Genuchten, M. (1999). Relationship between the hydraulic conductivity function and the particle-size distribution. *Soil Science Society of America Journal*, 63, 1063–1070.
- Arya, L. M., & Paris, J. F. (1981). A physicoempirical model to predict the soil moisture characteristic from particle-size distribution and bulk density data. *Soil Science Society of America Journal*, 45, 1023–1030.
- Busby, R. D., Lenhard, R. J., & Rolston, D. E. (1995). An investigation of saturation-capillary pressure relations in two- and three-fluid systems for several NAPLS in different porous media. *Ground Water*, 33, 570–578.
- Chapuis, R. P. (2004). Predicting the saturated hydraulic conductivity of sand and gravel using effective diameter and void ratio. *Canadian Geotechnical Journal*, 41, 787–795.
- Chompusri, S., Rivett, M. O., & Mackay, R. (2002). LNAPL redistribution on a fluctuating water table: Column experiments. *Groundwater Quality: Natural and Enhanced Restoration of Groundwater Pollution*, IAHS Publication No. 275, 225–231.
- DiCarlo, D. A., Bauters, T. W. J., Steenhuis, T. S., Parlange, J.-Y., & Bierck, B. R. (1997). High-speed measurements of three-phase flow using synchrotron X rays. *Water Resources Research*, 33, 569–576.
- Eckberg, D. K., & Sunada, D. K. (1984). Nonsteady three-phase immiscible fluid distribution in porous media. *Water Resources Research*, 20, 1891–1897.
- Feth, J. F. (1973). Water facts and figures for planners and managers. *US Geological Survey Circular*, 601–601.

- Fredlund, D. G., & Xing, A. (1994). Equations for the soil-water characteristic curve. *Canadian Geotechnical Journal*, 31, 521–532.
- Flores, G., Katsumi, T., Inui, T., & Kamon, M. (2011). A simplified image analysis method to study LNAPL migration in porous media. *Soils and Foundations*, 51, 835–847.
- van Gunechten, M. T. (1980). A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Science Society of America Journal*, 44, 892–898.
- Host-Madsen, J., & Jensen, K. H. (1992). Laboratory and numerical investigations of immiscible multiphase flow in soil. *Journal of Hydrology*, 135, 13–52.
- Kaluarachchi, J. J., & Parker, J. C. (1989). An efficient finite element method for modeling multiphase flow. *Water Resources Research*, 25, 43–54.
- Kamon, M., Endo, K., & Katsumi, T. (2003). Measuring the k-S-p relations on DNAPLs migration. *Engineering Geology*, 70, 351–363.
- Kamon, M., Li, Y., Endo, K., Inui, T., & Katsumi, T. (2007). Experimental study on the measurement of S-p relations of LNAPL in a porous medium. *Soils and Foundations*, 47, 33–45.
- Kamon, M., Li, Y., Flores, G., Inui, T., & Katsumi, T. (2006). Experimental and numerical study on migration of LNAPL under the influence of fluctuating water table in subsurface. *Annals of Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University*, 49B, 383–392.
- Karapanagioti, H. K., Gaganis, P., & Burganos, V. N. (2003). Modeling attenuation of volatile organic mixtures in the unsaturated zone: Codes and usage. *Environmental Modelling & Software*, 18, 329–337.
- Kechavarzi, C., Soga, K., & Illangasekare, T. H. (2005). Two-dimensional laboratory simulation of LNAPL infiltration and redistribution in the vadose zone. *Journal of Contaminant Hydrology*, 76, 211–233.
- Lenhard, R. J., Dane, J. H., Parker, J. C., & Kaluarachchi, J. J. (1988). Measurement and simulation of one-dimensional transient three-phase flow for monotonic liquid drainage. *Water Resources Research*, 24, 853–863.
- Lenhard, R. J., Johnson, T. G., & Parker, J. C. (1993). Experimental observations of nonaqueous-phase liquid subsurface movement. *Journal of Contaminant Hydrology*, 12, 79–101.
- Lenhard, R. J., Oostrom, M., & Dane, J. H. (2004). A constitutive model for air-NAPL-water flow in the vadose zone accounting for immobile, non-occluded (residual) NAPL in strongly water-wet porous media. *Journal of Contaminant Hydrology*, 71, 261–282.
- Lenhard, R. J., & Parker, J. C. (1987). Measurement and prediction of saturation-pressure relationships in three-phase porous media systems. *Journal of Contaminant Hydrology*, 1, 407–424.
- Lenhard, R. J., & Parker, J. C. (1988). Experimental validation of the theory of extending two-phase saturation-pressure relations to three-fluid phase systems for monotonic drainage paths. *Water Resources Research*, 24, 373–380.
- Oostrom, M., Hofstee, C., & Wietsma, T. W. (2006). Behavior of a viscous LNAPL under variable water table conditions. *Soil & Sediment Contamination*, 15, 543–564.
- Parker, J. C., Lenhard, R. J., & Kuppasamy, T. (1987). A parametric model for constitutive properties governing multiphase flow in porous media. *Water Resources Research*, 23, 618–624.
- Ryan, R. G., & Dhir, V. K. (1993). The effect of soil-particle size on hydrocarbon entrapment near a dynamic water table. *Journal of Soil Contamination*, 2, 59–92.
- Sharma, R. S., & Mohamed, M. H. A. (2003). An experimental investigation of LNAPL migration in an unsaturated/saturated sand. *Engineering Geology*, 70, 305–313.
- Steffy, D. A., Johnston, C. D., & Barry, D. A. (1998). Numerical simulations and long-column tests of LNAPL displacement and trapping by a fluctuating water table. *Journal of Soil Contamination*, 7, 325–356.
- Topp, G. C., Davis, J. L., & Annan, A. P. (1980). Electromagnetic determination of soil water content: Measurements in coaxial transmission lines. *Water Resources Research*, 16, 574–582.
- Tuck, D. M., Bierck, B. R., & Jaffe, P. R. (1998). Synchrotron radiation measurement of multiphase fluid saturations in porous media: Experimental technique and error analysis. *Journal of Contaminant Hydrology*, 31, 231–256.
- Unger, A. J. A., Sudicky, E. A., & Forsyth, P. A. (1995). Mechanisms controlling vacuum extraction coupled with air sparging for remediation of heterogeneous formations contaminated by dense nonaqueous phase liquids. *Water Resources Research*, 31, 1913–1925.
- United State Environmental Protection Agency (US EPA) (2002), *National Water Quality Inventory 2000 Report* (EPA-841-R-02-001). Washington, DC: United States Environmental Protection Agency Office of Water.

- Van Geel, P. J., & Sykes, J. F. (1994). Laboratory and model simulations of LNAPL spill in a variably-saturated sand, 1. Laboratory experiment and image analysis techniques. *Journal of Contaminant Hydrology*, 17, 1–25.
- Van Geel, P. J., & Sykes, J. F. (1997). The importance of fluid entrapment, saturation hysteresis and residual saturations on the distribution of a lighter-than-water non-aqueous phase liquid in a variably saturated sand medium. *Journal of Contaminant Hydrology*, 25, 249–270.
- Yang, H., Rahardjo, H., Leong, E.-C., & Fredlund, D. G. (2004). Factors affecting drying and wetting soil-water characteristic curves of sandy soils. *Canadian Geotechnical Journal*, 41, 908–920.