



รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

(ปีที่ ๑ ของ โครงการ ๒ ปี)

โครงการวิจัยงบประมาณเงินรายได้ (เงินอุดหนุนจากรัฐบาล)

ปีงบประมาณ พ.ศ. ๒๕๕๗

ชื่อโครงการวิจัย

การปนเปื้อนของน้ำมันในชั้นทรายเนื้อเดียวที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำภายใต้  
สภาวะระดับน้ำใต้ดินขึ้นลง

เลขที่ ๑๑๑/๒๕๕๗

โดย

สยาม ยิ้มศิริ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

กันยายน ๒๕๕๗

## บทคัดย่อ

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

## บทสรุปสำหรับผู้บริหาร

การบริโภคน้ำมันเชื้อเพลิงของประเทศไทยได้เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องเนื่องมาจากการเจริญเติบโตทางเศรษฐกิจของประเทศ ด้วยเหตุนี้ทำให้มีจำนวนของสถานีบริการน้ำมันเพิ่มมากขึ้นตามมาด้วยซึ่งทำให้มีโอกาสน้ำมันเชื้อเพลิงจะรั่วไหลจากสถานีบริการลงสู่ใต้ดินจากถังเก็บบนดินและใต้ดินและจากระบบท่อ น้ำมันเชื้อเพลิงที่รั่วไหลออกมาจะไหลซึมลงด้วยแรงโน้มถ่วงของโลกผ่านชั้น vadose zone (ดินส่วนที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ) และสู่ระดับน้ำใต้ดินในที่สุด น้ำมันเชื้อเพลิงที่รั่วไหลจะปนเปื้อนกับสิ่งแวดล้อมโดยรอบคือ ดิน, น้ำใต้ดิน, และน้ำบาดิน นอกจากนี้บางส่วนยังระเหยสู่อากาศ การปนเปื้อนจากน้ำมันเชื้อเพลิงนี้เป็นอันตรายต่อมนุษย์ โดยปัจจุบันปริมาณน้ำมันเชื้อเพลิงที่ถูกบริโภคมากที่สุดคือน้ำมันดีเซล เนื่องจากแนวโน้มปัญหาการรั่วซึมของน้ำมันดีเซลจะมีมากที่สุดเนื่องจากมีปริมาณการใช้สูงสุดจึงมีความจำเป็นในการศึกษาพฤติกรรมการปนเปื้อนของน้ำมันดีเซลในชั้นทรายเนื้อละเอียดที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำภายใต้สภาวะระดับน้ำใต้ดินชั้นลง เพื่อให้เข้าใจผลกระทบของการชั้นลงของระดับน้ำใต้ดินต่อพฤติกรรมการปนเปื้อนในชั้นทรายไม่อิ่มตัวด้วยน้ำของน้ำมันดีเซล เพื่อจะได้สามารถคำนวณการเคลื่อนตัวของมันได้อย่างถูกต้องในสถานการณ์ในสนาม และเพื่อช่วยในการออกแบบระบบ remediation

---

## คำนำ

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

โครงการวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากโครงการวิจัยงบประมาณเงินรายได้ (เงินอุดหนุนจากรัฐบาล) ปีงบประมาณ พ.ศ. 2557 (เลขที่ 111/2557) จากมหาวิทยาลัยบูรพา โดยส่วนหนึ่งของโครงการวิจัยนี้ได้ตีพิมพ์เป็นบทความวิจัยในเอกสารการประชุมสัมมนาทางวิชาการระดับชาติ จำนวน 1 บทความ ดังนี้

สยาม ยิ้มศิริ, สุวสันต์ สุดแสง, จิตพล สุริยะมงคลชัย, และ ศรัณย์ ศรีพินิจ (2556), "การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นเชิงแสงเฉลี่ยและความอิ่มตัวของของเหลวในทรายโดยใช้เทคนิคการวิเคราะห์ภาพถ่าย", การประชุมสัมมนาทางวิชาการมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก ครั้งที่ 6, โรงแรมชลจันทร์ พัทยา รีสอร์ท จังหวัดชลบุรี

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	i
บทสรุปสำหรับผู้บริหาร	ii
คำนำ	iii
สารบัญ	iv
<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 แก๊สไซโซล E20 กับ อากาศ	3-9
3.5.3	ผลการทดลองความสัมพันธ์ระหว่าง แก๊สไซโซล 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 แก๊สไซโซล E20 กับ อากาศ ที่ความหนาแน่นของทรายแตกต่างกัน	3-21
3.6.3	เปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่าง แก๊สไซโซล 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
	เอกสารอ้างอิง	R-1

ภาคผนวก ผลงานตีพิมพ์

## 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 ดังนั้นการปนเปื้อนของดินและน้ำใต้ดินก่อให้เกิดความเสี่ยงต่อสุขภาพของประชากรในด้านระบบทางเดินหายใจระบบประสาท, ความเสี่ยงในการเปลี่ยนแปลงทางพันธุกรรม, และการเกิดมะเร็ง ดังนั้นจึงควรมีการศึกษาพฤติกรรมของไหลซึมผ่านของน้ำมันเชื้อเพลิงในดินทรายเพื่อที่จะสามารถทำนายพฤติกรรมของการไหลซึมผ่านของน้ำมันเชื้อเพลิงหากเกิดการรั่วไหลและเพื่อหาแนวทางป้องกันที่เหมาะสม

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, และสามารถใช้ในการประเมินค่าระดับการอิ่มตัวของของเหลวได้ภายใต้สภาพพลวัตไปใช้ในการประมาณค่าระดับการอิ่มตัวของของเหลวในการศึกษาผลของการเปลี่ยนแปลงระดับการไหลของน้ำใต้ดินในแนวนอนที่มีการซึมผ่านของน้ำมันเชื้อเพลิงในตัวกลางที่เป็นเนื้อเดียวกัน

## 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

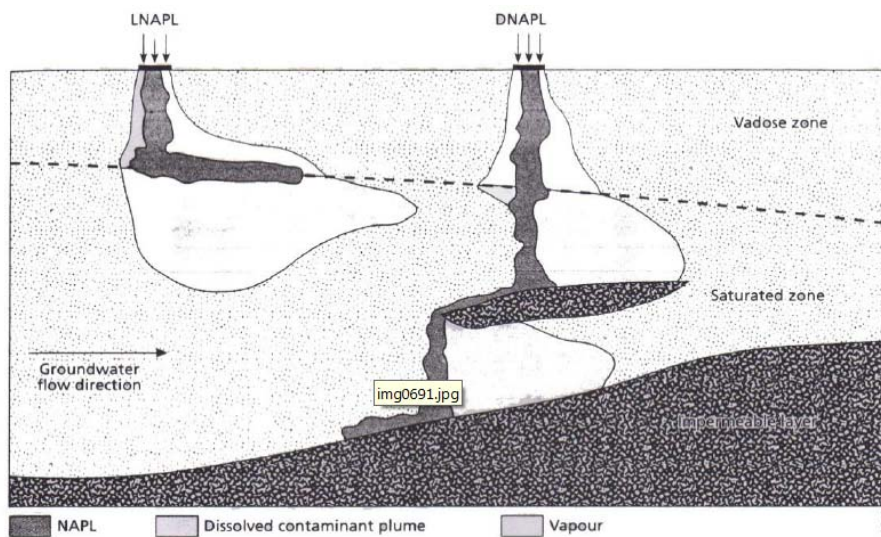
- Light non-aqueous phase liquid (LNAPL) เป็นของเหลวชนิดที่มีน้ำหนักเบา คือมีความหนาแน่นน้อยกว่าน้ำโดยทั่วไปจะลอยอยู่บนผิวน้ำ เช่น น้ำมันเชื้อเพลิงและผลิตภัณฑ์ปิโตรเลียม
- Dense non-aqueous phase liquid (DNAPL) เป็นของเหลวชนิดที่มีความหนาแน่นมากกว่าน้ำโดยทั่วไปจะจมอยู่ใต้น้ำ เช่น chlorinated solvent

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

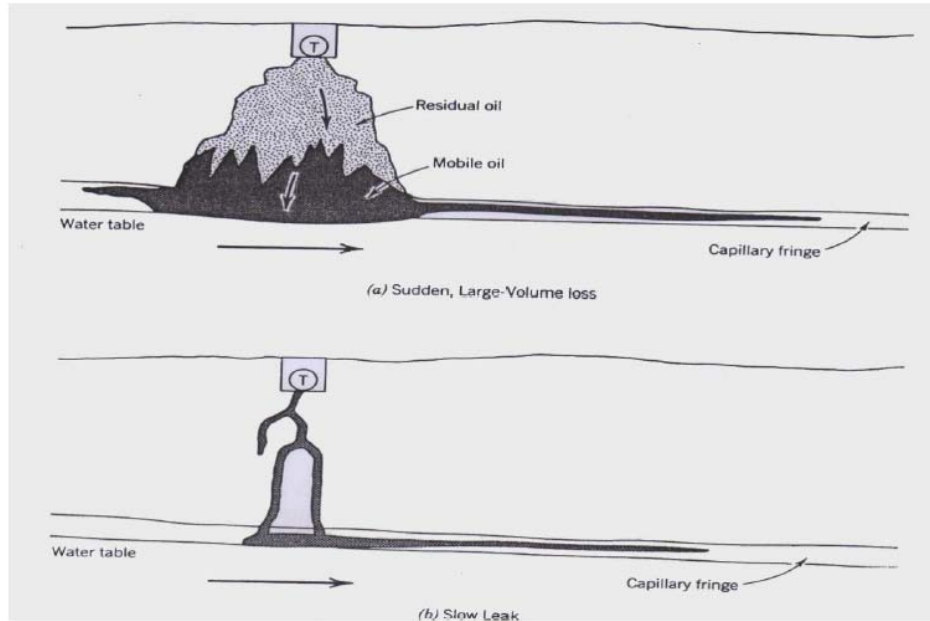
โดยในงานวิจัยนี้ศึกษาเฉพาะของเหลวที่ไม่ละลายน้ำประเภทความหนาแน่นน้อยกว่าน้ำ (Light Nonaqueous Phase Liquid; LNAPLs )



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

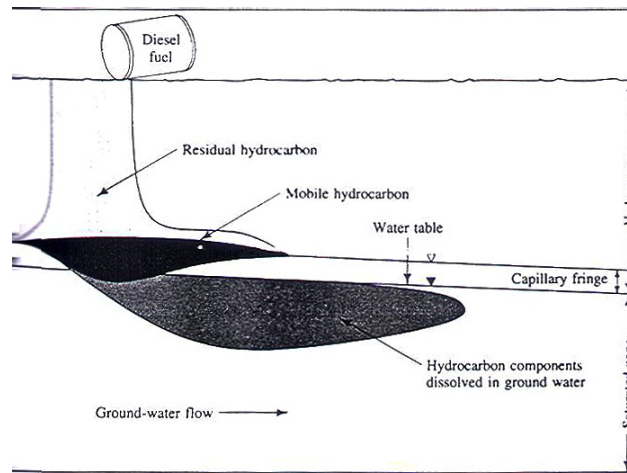
ในระยะเวลาอันสั้นสารปนเปื้อนจะสามารถเคลื่อนที่ลงอย่างรวดเร็วและมีการแพร่กระจายออกทางด้านข้างเป็นรูปกรวยดังรูปที่ 2-2 (บน) แต่เมื่อเปรียบเทียบกับ การปลดปล่อยสารปนเปื้อนอย่างช้าๆ ระยะเวลาในการเคลื่อนที่ของสารปนเปื้อนจะเคลื่อนที่ไปตามช่องที่สามารถซึมผ่านไปได้โดยสะดวกมากรูปที่ 2-2 (ล่าง) ซึ่งช่องดังกล่าวนี้อาจเป็นช่องเดี่ยวหรือแขนงก็ได้ เมื่อ LNAPLs เคลื่อนที่ไปสารปนเปื้อนนี้สามารถเกาะที่ผิวของอนุภาคเม็ดดินอย่างหลวมๆ เรียกว่า 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 นอกจากนี้การปนเปื้อนอาจเกิดจาก การเทน้ำมันเครื่องที่ใช้แล้วทิ้ง การเกิดอุบัติเหตุบนถนนของรถบรรทุกน้ำมัน การปนเปื้อนของน้ำมันนั้นขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย เช่น ปริมาณที่ปนเปื้อน คุณสมบัติของน้ำมัน โครงสร้างของชั้นดินหรือชั้นหินบริเวณที่เกิดการปนเปื้อน ก่อนที่น้ำมันจะเกิดการปนเปื้อนลงสู่ชั้นน้ำใต้ดินได้นั้นจะต้องผ่านชั้นต่างๆ คือ ชั้นดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ (Vadose zone), ชั้นคาพิลลารี (Capillary zone) และ ชั้นน้ำใต้ดิน (Saturated zone) ดังแสดงในรูปที่ 2-3



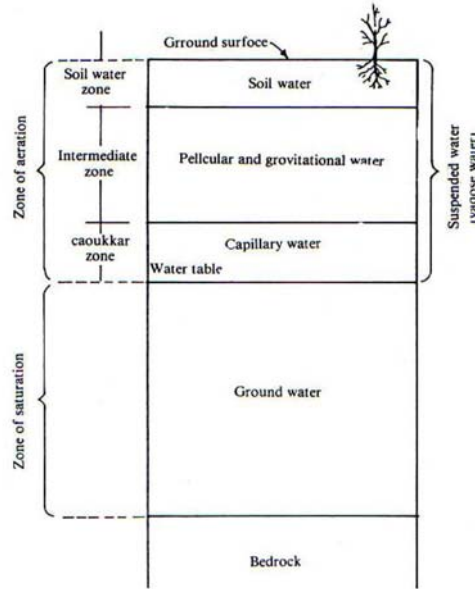
รูปที่ 2-3 การเคลื่อนตัวของ LNAPL ผ่านชั้นดิน (Fetter, 1999)

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

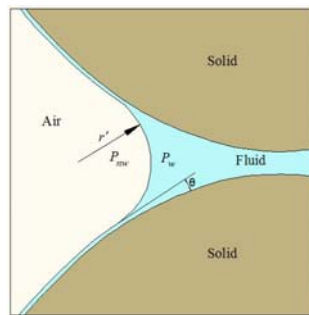
- ชั้นคาปิลลารี (capillary fringe หรือ capillary zone) เป็นส่วนที่อยู่เหนือเส้นระดับน้ำใต้ดิน (water table) เล็กน้อย โดยเริ่มจากระดับน้ำใต้ดินขึ้นไปจนถึงระดับสูงสุดของความชื้นที่จะถูกดึงขึ้นไปด้วยแรงดึงประเทภแรงตึงผิว (surface tension) แรงคาปิลลารี (capillary force) และพลังงานผิว (surface energy) น้ำส่วนใหญ่ที่อยู่ตามช่องว่างดินในชั้นนี้ด้วยแรงตึงผิว (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)

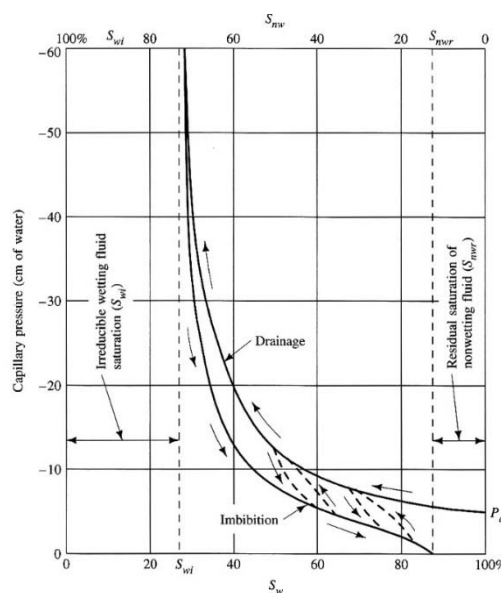
ชั้นอิ่มตัวด้วยน้ำนี้อยู่ต่อจากชั้นชั้นไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ (unsaturation zone) มีความหนาแน่นแตกต่างกันไปหลายระดับและแผ่ขยายลงไปจนถึงระดับความลึกของชั้นหินที่ไม่มีช่องว่างทุกช่องว่างรวมถึงรอยแยกหรือโพรง ในชั้นนี้จะเต็มไปด้วยน้ำภายใต้แรงดันที่เรียกว่า hydrostatic pressure เป็นชั้นกักเก็บน้ำใต้ดินดังกล่าวแล้ว 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)

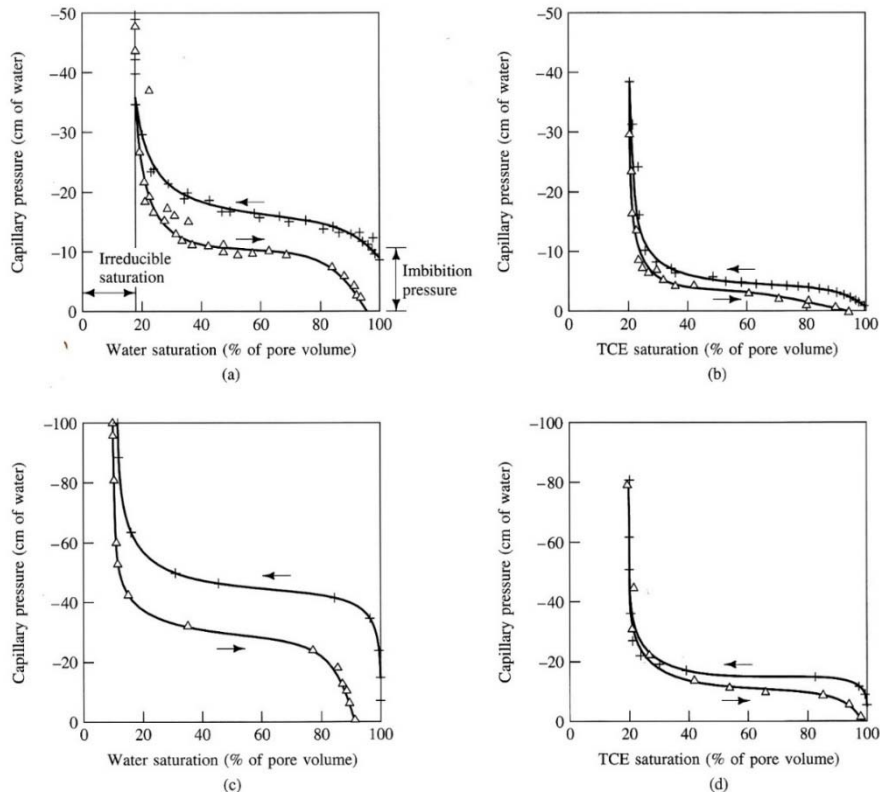
รูปที่ 2-6 เรียกว่ากราฟ Soil water retention curve หรือกราฟ Capillary pressure curve เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Capillary pressure และการอิ่มตัวด้วยน้ำ (Saturation) ของดิน สามารถหาได้จากการทดลองโดยทำให้ดินอิ่มตัวด้วยน้ำหรืออยู่ในสภาพที่เปียกเรียกว่า Wetting fluid saturation,  $S_w$  จากนั้นค่อยๆ 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 แสดงว่าที่ความดันสูงกว่านี้ก็ไม่สามารถทำให้น้ำไหลได้ เนื่องจากมีแรงดันคาปิลารีทำให้น้ำเกาะอยู่ที่ผิวของเม็ดดิน โดยระยะของแนวตั้งถึงเส้นแกน Y เรียกว่า Irreducible wetting fluid saturation,  $S_{wi}$  ส่วนเส้นการเปียก (Imbibitions หรือ wetting curve) คือการทำให้ดินไม่อิ่มตัวด้วยน้ำเปลี่ยนเป็นสภาวะที่ดินอิ่มตัวด้วยน้ำ 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 จะประกอบด้วยจุดที่มีส่วนเกี่ยวข้องถึง 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

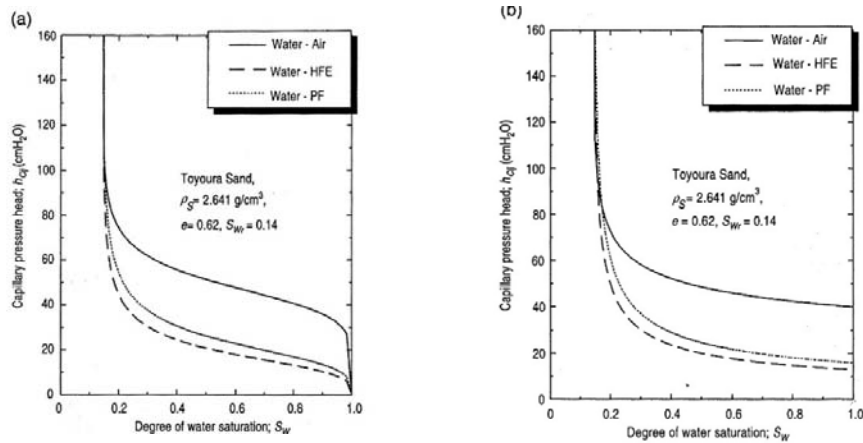
$$S_e = Q \left[ \frac{\ln(h/h_m)}{\sigma} \right] \quad (2-7)$$

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)

$$A = -\log_{10} \frac{P}{P_0} = abc \quad (2-8)$$

- 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)

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

$$\rho = \frac{I^r}{I^0} \quad (2-10)$$

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

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

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

- 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)

$$D_i^l = \lambda_i^l S_i + \beta_i^l \quad (2-12)$$

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

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  $\beta$  เป็นค่าของการสะท้อนกลับของสื่อกลางที่มีรูพรุนที่แห้งหรือไม่ถูกรบกวนจากการเปลี่ยนแปลงของของไหลแต่ความหนาแน่นเชิงแสงเฉลี่ยเป็นฟังก์ชันเชิงเส้นของระดับความอึดตัวของ LNAPL และระดับความอึดตัวของน้ำสามารถเขียนได้ดังสมการที่ (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

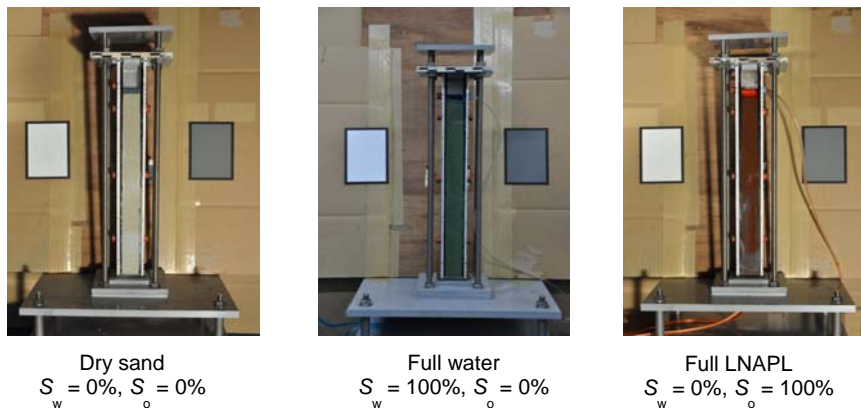
การวิเคราะห์ภาพถ่ายเชิงซ้อน (MIAM) จะถูกนำไปใช้ในการทดลองเพื่อดูการแทรกซึมและการกระจายตัวของ LNAPL ในสื่อกลางที่มีรูพรุนในระดับความอืดตัวของแล้วต่างๆกัน ส่วนพฤติกรรมการไหลของของไหลชนิดหนึ่งในการทดลองที่ได้อธิบายรายละเอียดโดย Kechavarzi et al. (2005) แต่สำหรับสำหรับสื่อกลางที่มีรูพรุนขั้นตอนการสอบเทียบที่จะครอบคลุมผลของค่าสัมประสิทธิ์ที่จะเป็นไปได้สำหรับการคำนวณค่าระดับความอืดตัวของของเหลวจากสมการที่ (2-15) ในระหว่างขั้นตอนการศึกษา 3 หรือ 4 โดยที่ LNAPL จะอยู่ในทรายที่อืดตัวของของเหลวบางส่วนในวัสดุที่เป็นเนื้อเดียวกันหรือชั้นของน้ำด้านล่างและช่องว่างคาปิลารีตั้งแต่ 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

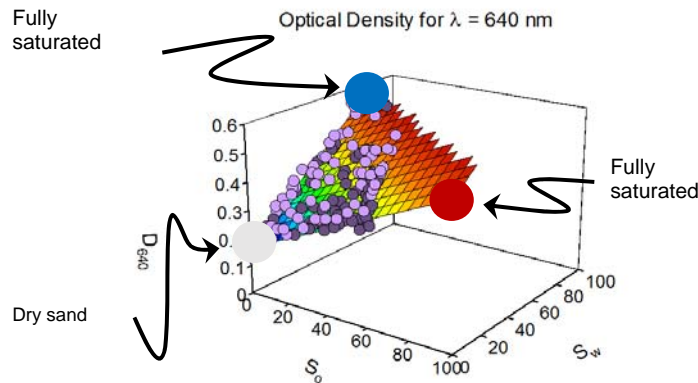


รูปที่ 2-9 ภาพที่ใช้ในการเปรียบเทียบ

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 ( $S_o=100\%$ )

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

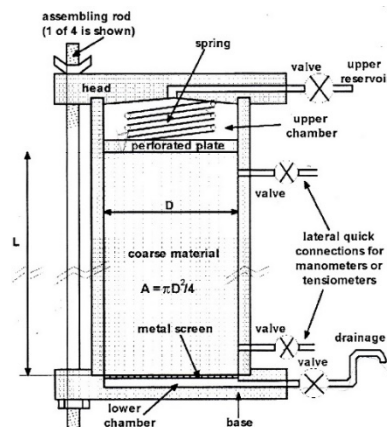
- เมื่อ  $m$  และ  $n$  คือ ขนาดของเมทริกซ์
- $[D_i]$  และ  $[D_j]$  คือ ค่าความหนาแน่นเชิงแสงเฉลี่ยของแต่ละองค์ประกอบในแต่ละความยาวคลื่น  $i$  และ  $j$
- $[D_i^{00}]_{mn}$  and  $[D_j^{00}]_{mn}$  คือ ความหนาแน่นเชิงแสงเฉลี่ยขององค์ประกอบของทรายแห้ง
- $[D_i^{10}]_{mn}$  and  $[D_j^{10}]_{mn}$  คือ ความหนาแน่นเชิงแสงเฉลี่ยขององค์ประกอบของที่อิ่มตัวด้วยน้ำ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



รูปที่ 2-10 ระนาบของสมการ

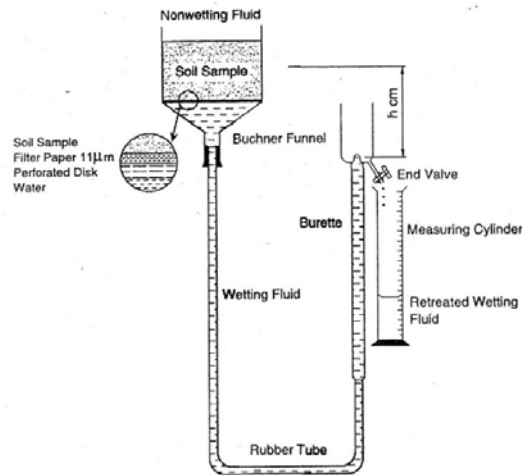
## 2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

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 โดยใช้ในการทดลองคือ น้ำมันสกัดจากธรรมชาติ (Mineral Oil) และทรายที่ใช้ในการทดลองเป็นทรายหยาบ อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองแสดงในรูปที่ 2-12 โดยเป็นการศึกษาเฉพาะเส้นการแห้ง (Drying curve)

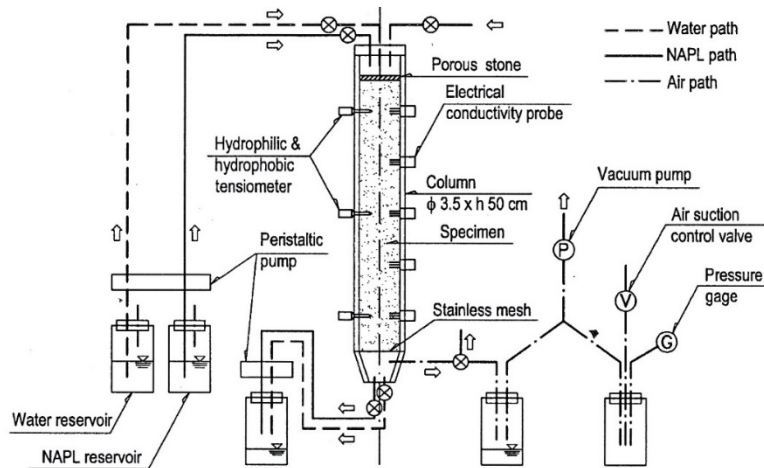


รูปที่ 2-12 อุปกรณ์ที่ใช้ในการศึกษาเส้นโค้งลักษณะเฉพาะดินกับน้ำของ Sharma et al. (2003)

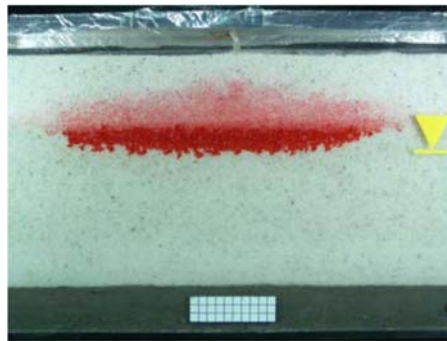
Kamon et al. (2003) ได้ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่าง สัมประสิทธิ์การไหลซึมผ่านได้ (Coefficient of permeability) ระดับขั้นความอิ่มตัว (Degree of saturation) และแรงดัน (Pressure) ในการเคลื่อนตัวของ สารเคมีที่เรียกว่า DNAPL (Dense non-aqueous phase liquid) ในดินทราย โดยใช้ Tensiometer ในการวัด ค่าเมตริกซ์ดูดน้ำ (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

สุวิสันต์ 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

ในการทดสอบถูกย้อมสีฟ้าด้วยบิลเลี่ยนบูลเอฟซีเอฟด้วยอัตราส่วน 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



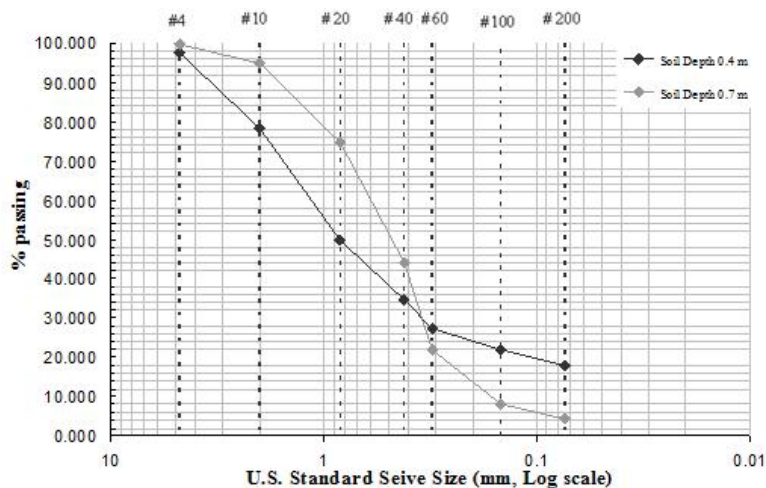
(b) ดินที่ความลึก 0.7 เมตร

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

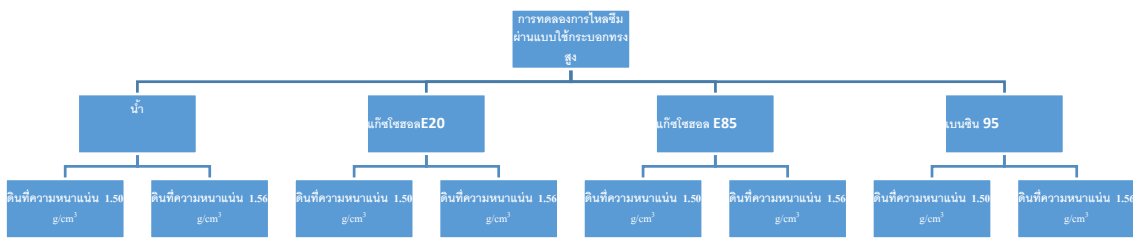
ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างในการทดลองการไหลซึมผ่านแบบใช้กระบอกทรงสูงสามารถทำได้โดยทำการบรรจุทรายลงในกระบอกทรงสูงและทำการบดอัดแบบเปียก (Wet compaction) โดยบดอัดให้ทรายมีความหนาแน่น 1.50 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร จากนั้นทำทรายให้อิ่มตัวด้วยน้ำ โดยให้น้ำซึมขึ้นจากด้านล่างอย่างช้าๆ จนซึมมาถึงที่ผิวบนสุดของทราย 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

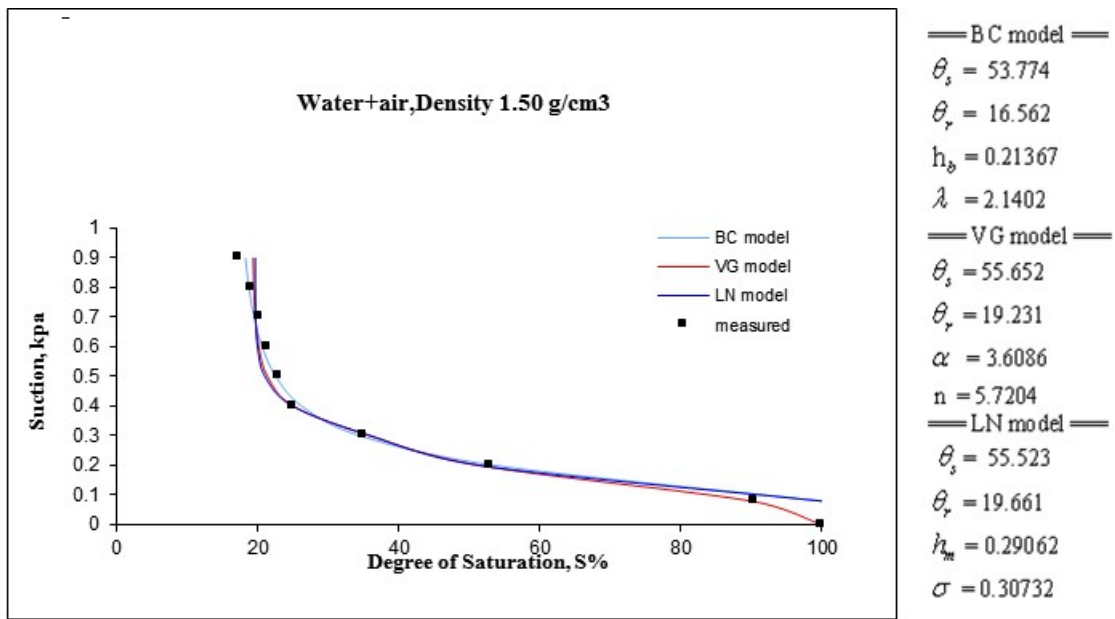
ตารางที่ 3-3 ผลการทดลองความสัมพันธ์ระหว่างน้ำกับอากาศ ที่ความหนาแน่น 1.50 g/cm<sup>3</sup>

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

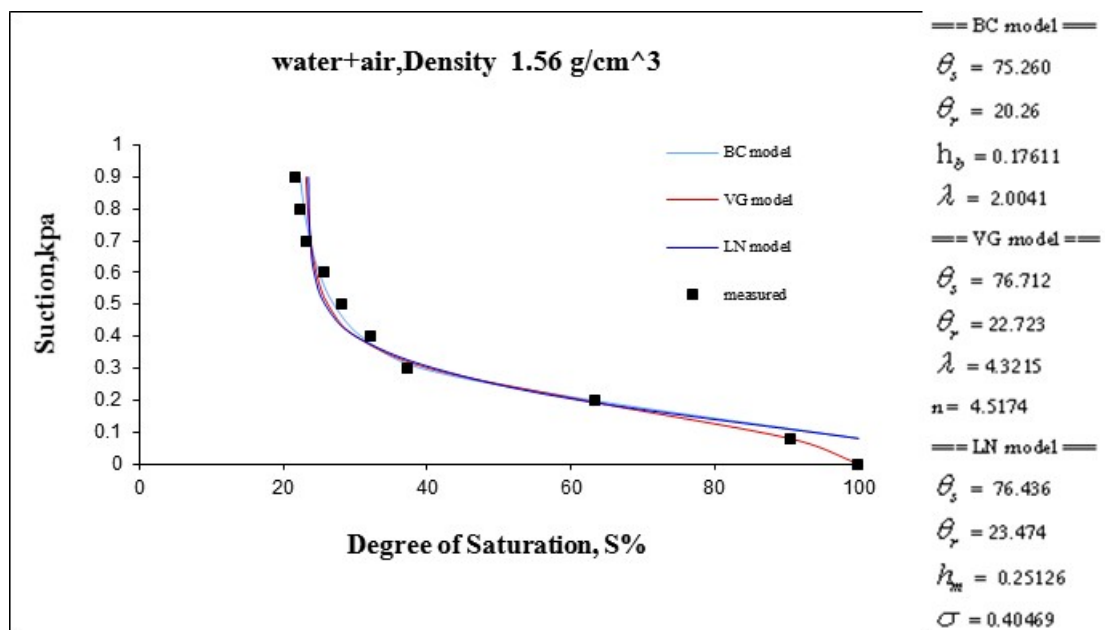
ตารางที่ 3-4 ผลการทดลองความสัมพันธ์ระหว่างน้ำกับอากาศ ที่ความหนาแน่น 1.56 g/cm<sup>3</sup>

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

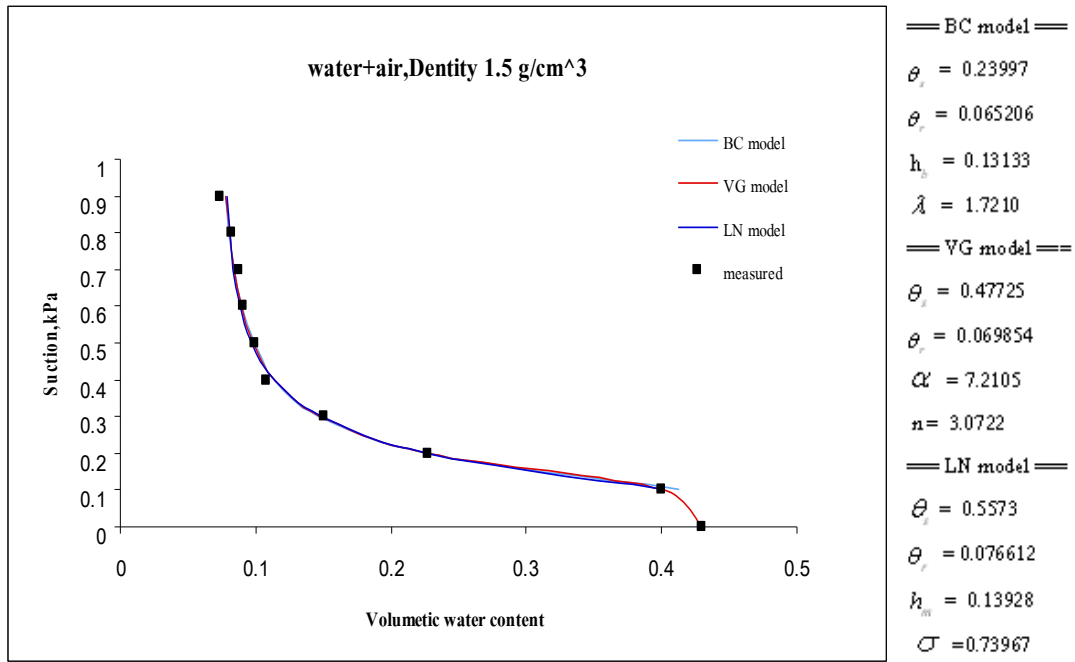




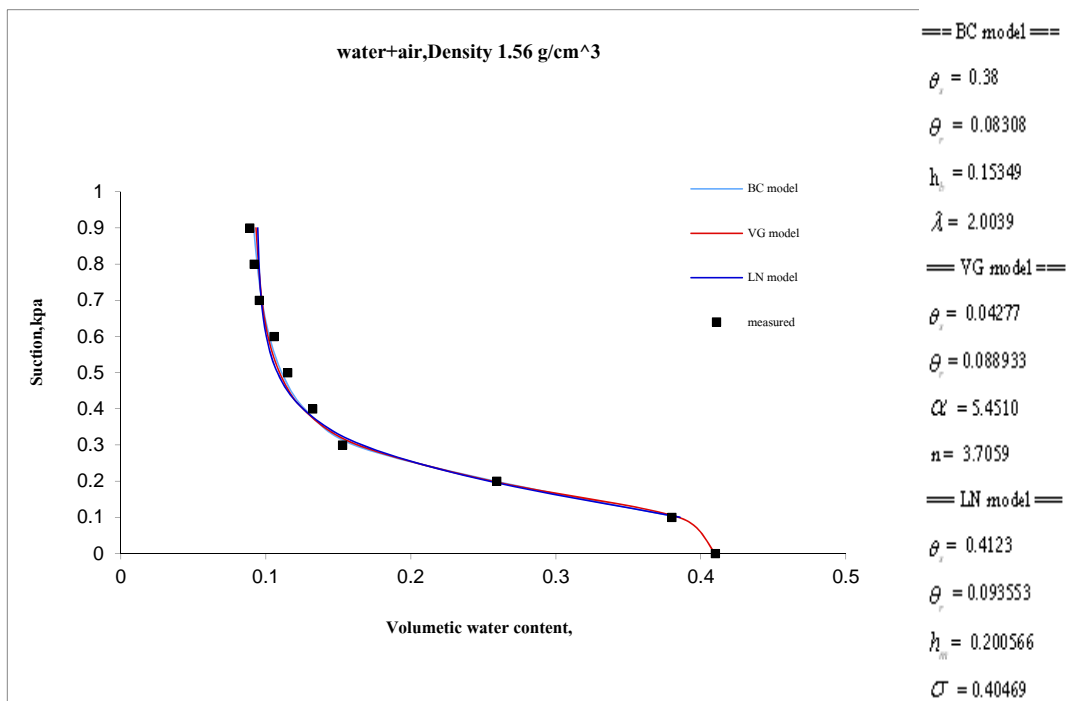
รูปที่ 3-8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระดับขั้นความอิ่มตัว (Degree of Saturation) กับ ค่าแรงดูด (Suction) ของน้ำกับอากาศ ที่ความหนาแน่นของทราย 1.50 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร



รูปที่ 3-9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระดับขั้นความอิ่มตัว (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

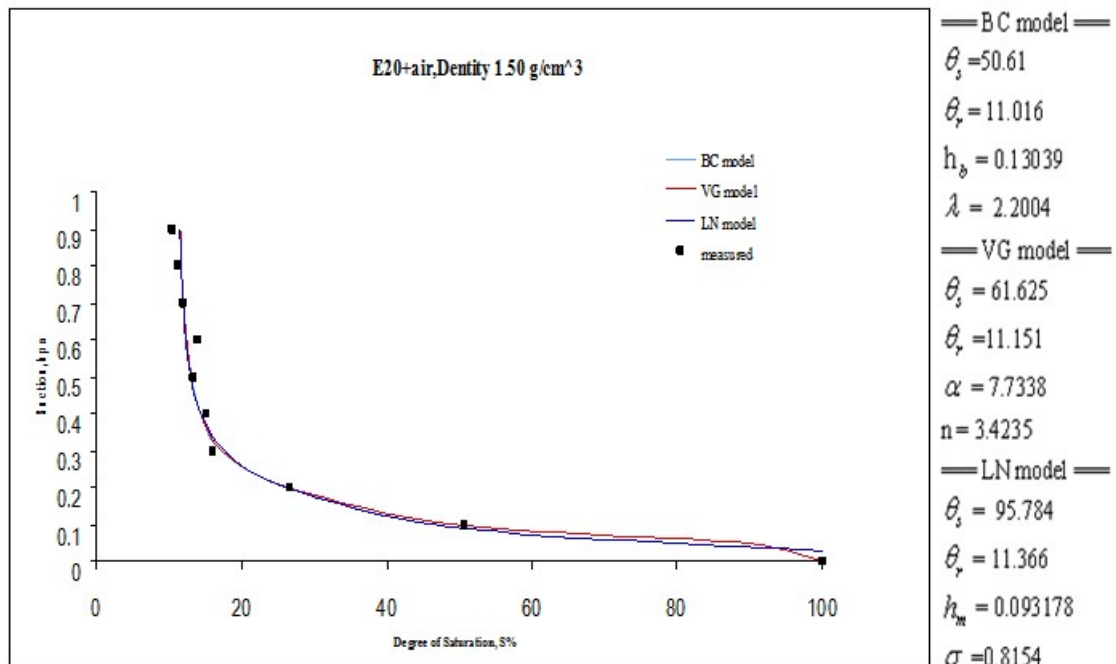
ผลการทดลองของความสัมพันธ์ระหว่างแก๊สโซฮอล์ E20 กับอากาศ ที่ความหนาแน่น 1.50 และ 1.56 g/cm<sup>3</sup> แสดงในตารางที่ 3-6 และ 3-7 ตามลำดับ เมื่อนำข้อมูลมาเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระดับชั้นความอิ่มตัว (Degree of Saturation) กับ ค่าแรงดูด (Suction) และกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Volumetric water 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>

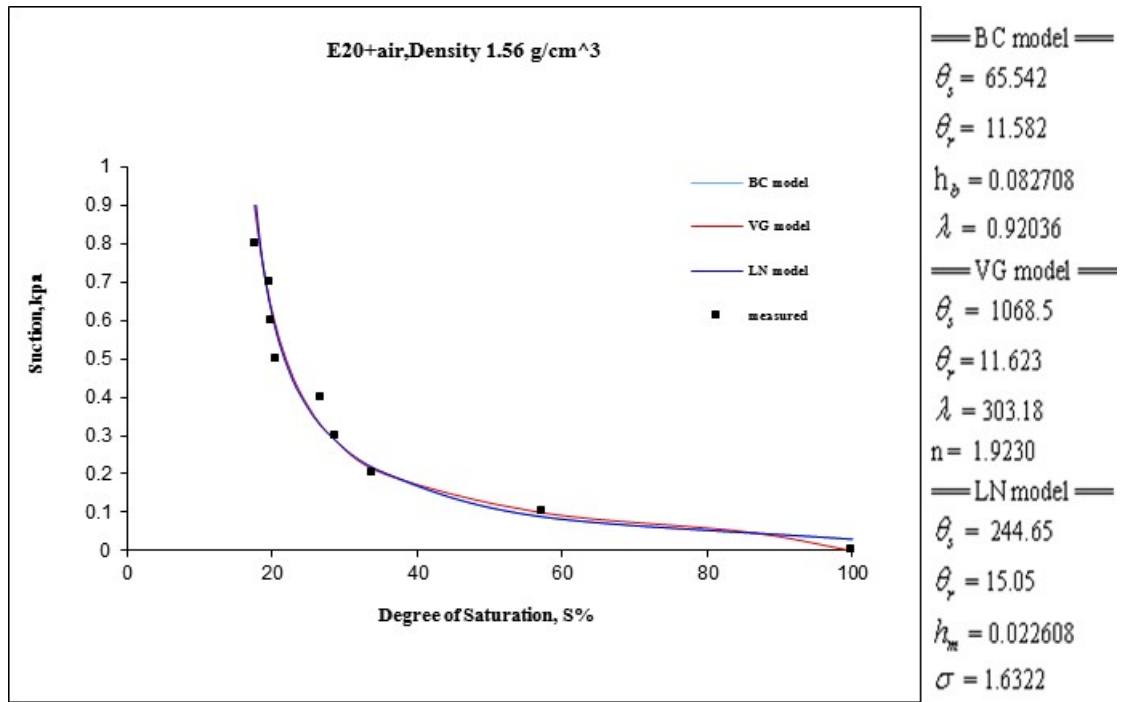
Capillary Pressure (kPa)	Volumetric Water content, $\theta$	Degree of Saturation, S%
0.9	0.045	10.505
0.8	0.049	11.297
0.7	0.051	11.926
0.6	0.060	13.956
0.5	0.058	13.381
0.4	0.065	15.116
0.3	0.069	16.097
0.2	0.115	26.699
0.1	0.234	50.610
0	*0.430	*100.000

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

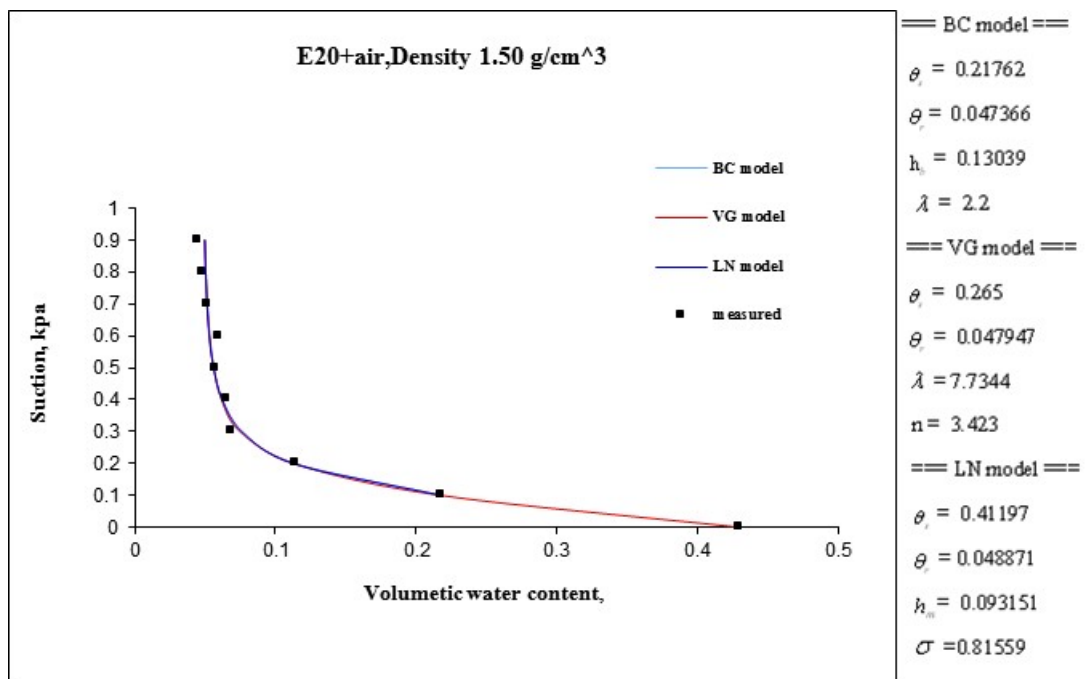
Capillary Pressure (kPa)	Volumetric Water Content, $\theta$	Degree of Saturation, S %
0.9	0.071	17.394
0.8	0.072	17.700
0.7	0.080	19.732
0.6	0.081	19.871
0.5	0.084	20.573
0.4	0.110	26.879
0.3	0.117	28.683
0.2	0.138	33.867
0.1	0.234	57.212
0	*0.410	*100.000



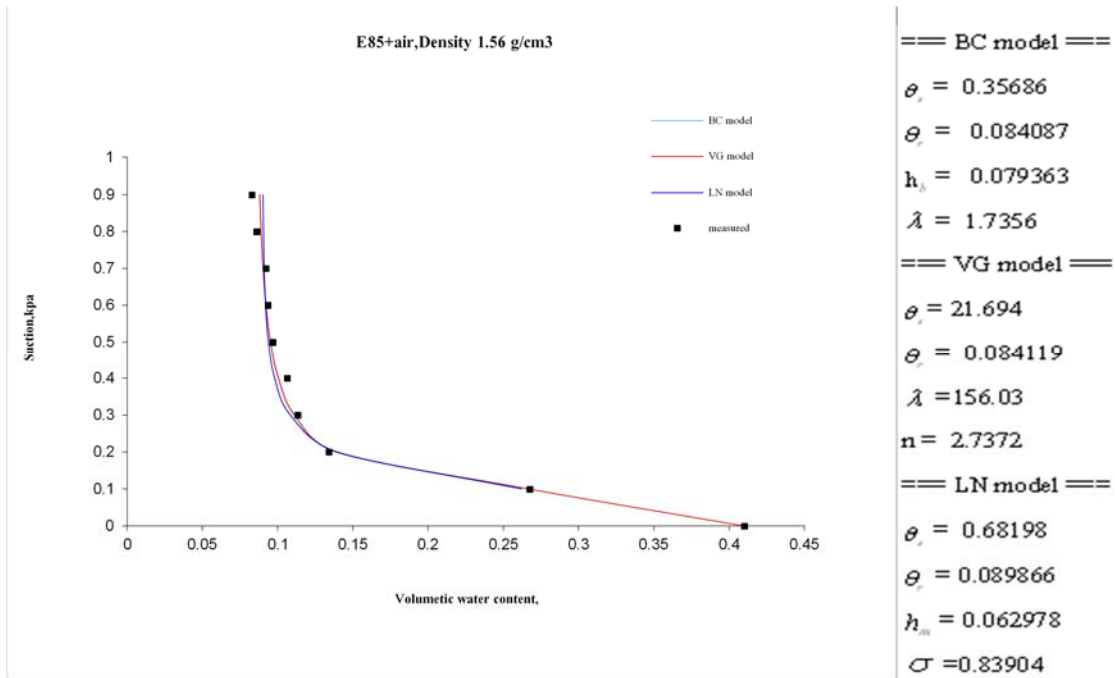
รูปที่ 3-12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระดับชั้นความอิ่มตัว (Degree of Saturation) กับ ค่าแรงดูด (Suction) ของแก๊สโซฮอลล์ E20 กับอากาศ ที่ความหนาแน่นของทราย 1.50 g/cm<sup>3</sup>



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

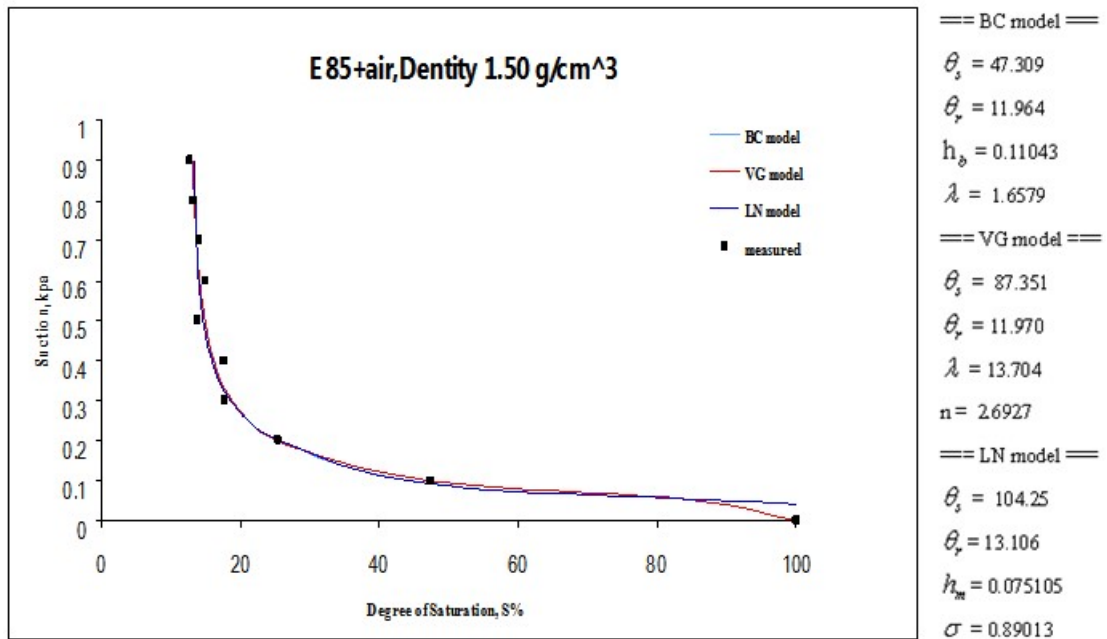
ผลการทดลองของความสัมพันธ์ระหว่างแก๊สโซฮอล์ E85 กับอากาศ ที่ความหนาแน่น 1.50 และ 1.56 g/cm<sup>3</sup> แสดงดังตารางที่ 3-9 และ 3-10 ตามลำดับ เมื่อนำข้อมูลมาเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระดับขึ้นความอิ่มตัว (Degree of Saturation) กับ ค่าแรงดูด (Suction) และกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Volumetric water 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>

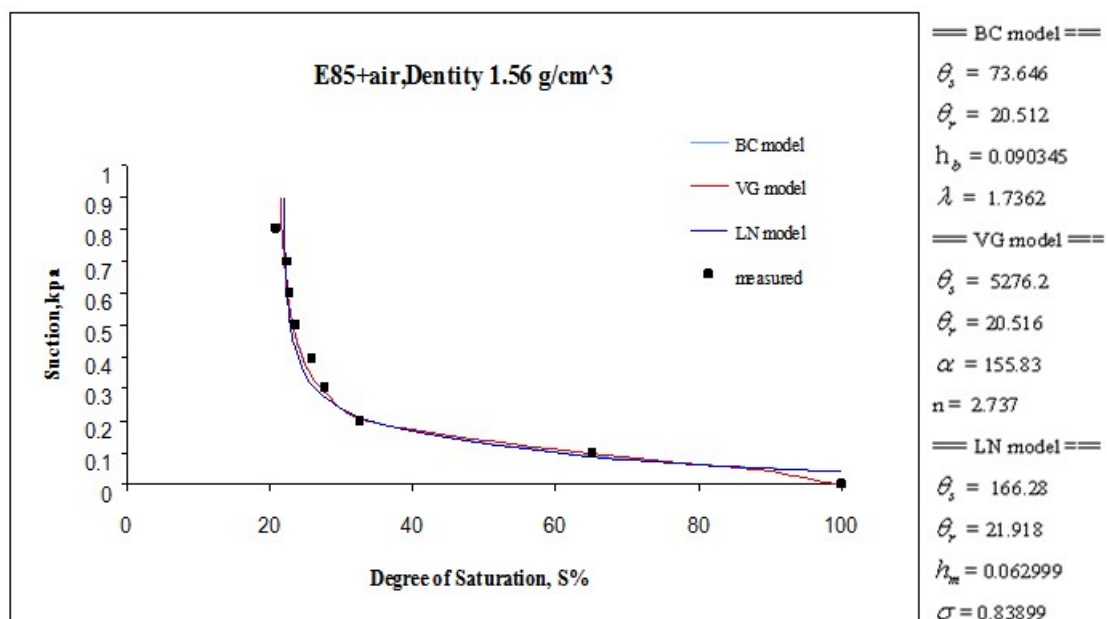
Capillary Pressure (kPa)	Volumetric Water, $\theta$	Degree of Saturation, S%
0.9	0.054	12.642
0.8	0.056	13.110
0.7	0.056	13.035
0.6	0.064	14.894
0.5	0.059	13.731
0.4	0.076	17.574
0.3	0.076	17.759
0.2	0.109	25.334
0.1	0.203	47.309
0	*0.430	*100.000

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

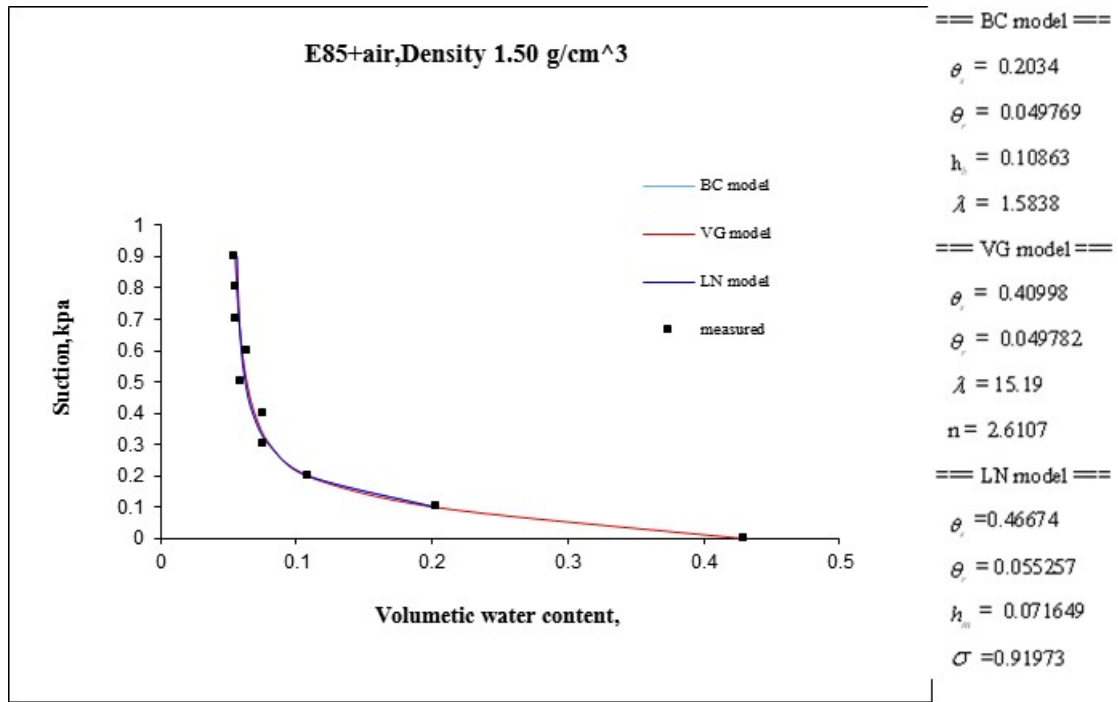


รูปที่ 3-16 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระดับชั้นความอิ่มตัว (Degree of Saturation) กับค่าแรงดูด (Suction) ของแก๊สโซฮอล์ E85 กับอากาศ ที่ความหนาแน่นของทราย 1.50 g/cm<sup>3</sup>

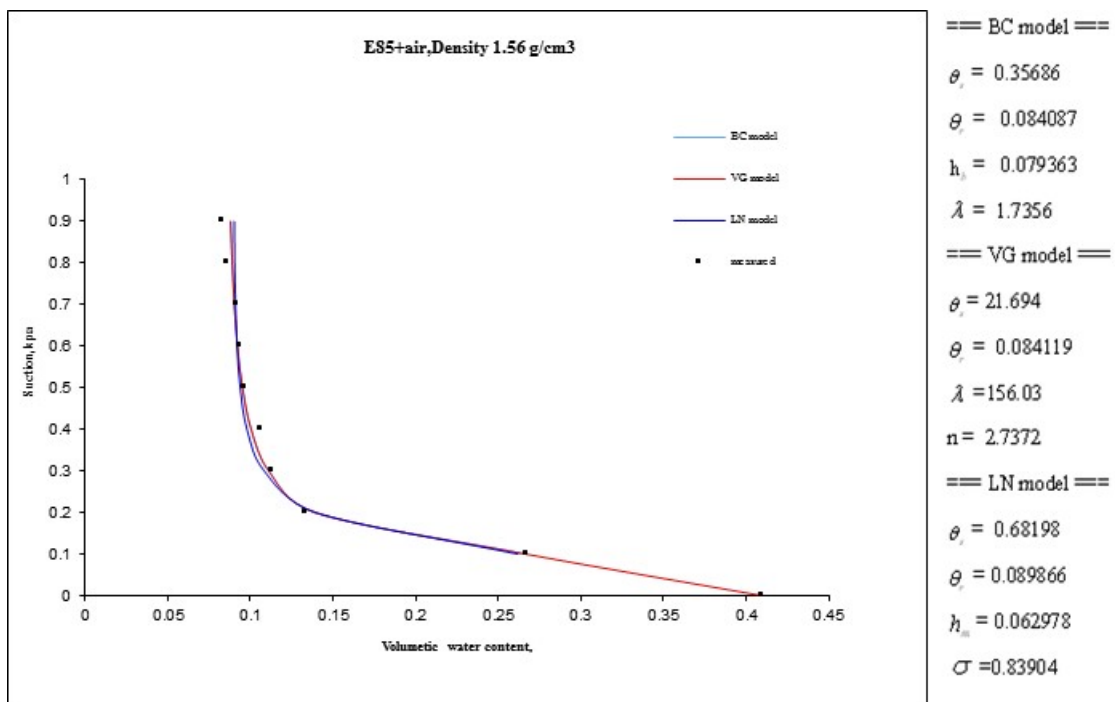


รูปที่ 3-17 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระดับชั้นความอิ่มตัว (Degree of Saturation) กับ ค่าแรงดูด (Suction) ของแก๊สโซฮอล์ E85 กับอากาศ ที่ความหนาแน่นของทราย 1.56 g/cm<sup>3</sup>





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



รูปที่ 3-19 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Volumetric water content กับ ค่าแรงดูด (Suction) ของ แก๊สโซฮอล์ 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

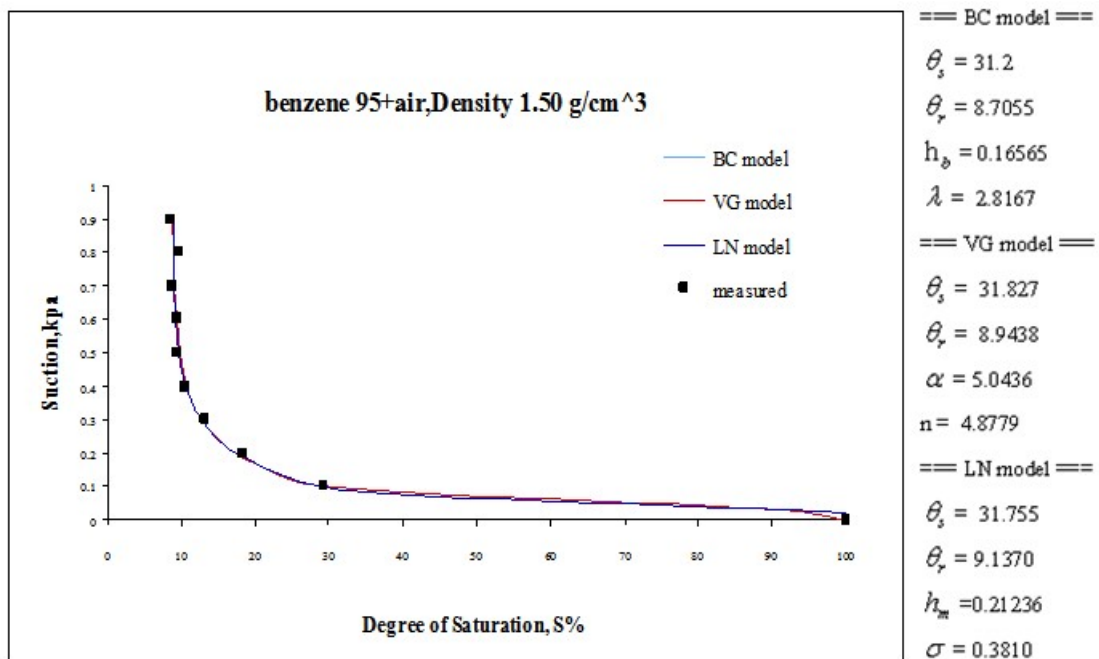
ผลการทดลองของความสัมพันธ์ระหว่างเบนซิน 95 กับอากาศ ที่ความหนาแน่น 1.50 และ 1.56 g/cm<sup>3</sup> แสดงในตารางที่ 3-12 และ 3-13 ตามลำดับ เมื่อนำข้อมูลมาเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระดับชั้นความอิ่มตัว (Degree of Saturation) กับ ค่าแรงดูด (Suction) และกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Volumetric water content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

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

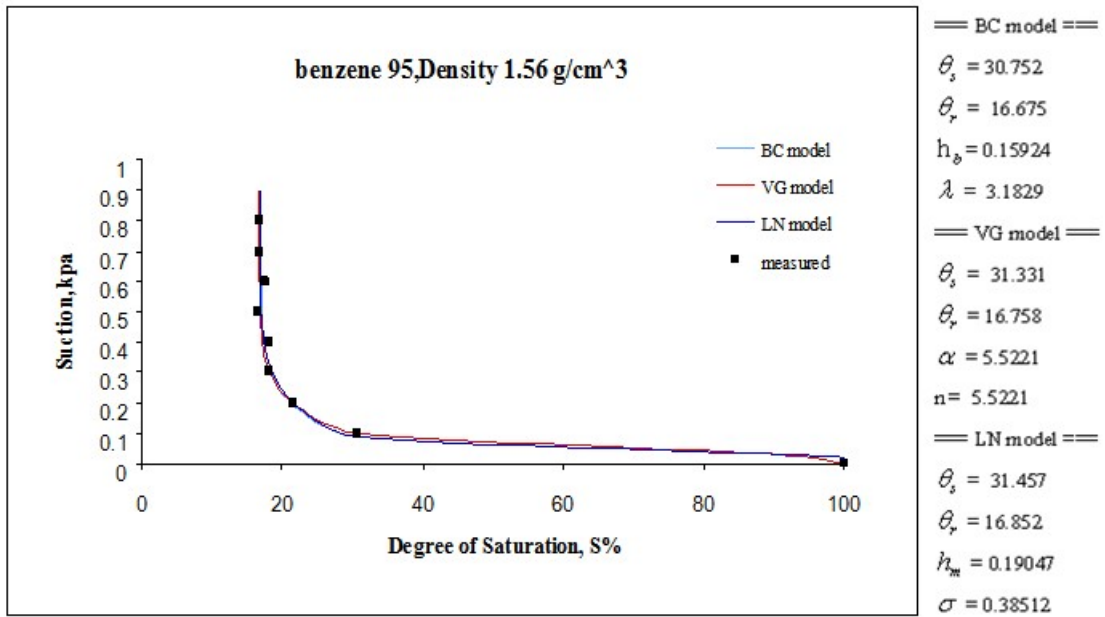
Capillary Pressure (kPa)	Volumetric Water, $\theta$	Degree of Saturation, S%
0.9	0.037	8.583
0.8	0.041	9.590
0.7	0.038	8.883
0.6	0.041	9.448
0.5	0.041	9.482
0.4	0.045	10.431
0.3	0.056	13.088
0.2	0.094	21.915
0.1	0.106	31.200
0	*0.430	*100.000

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

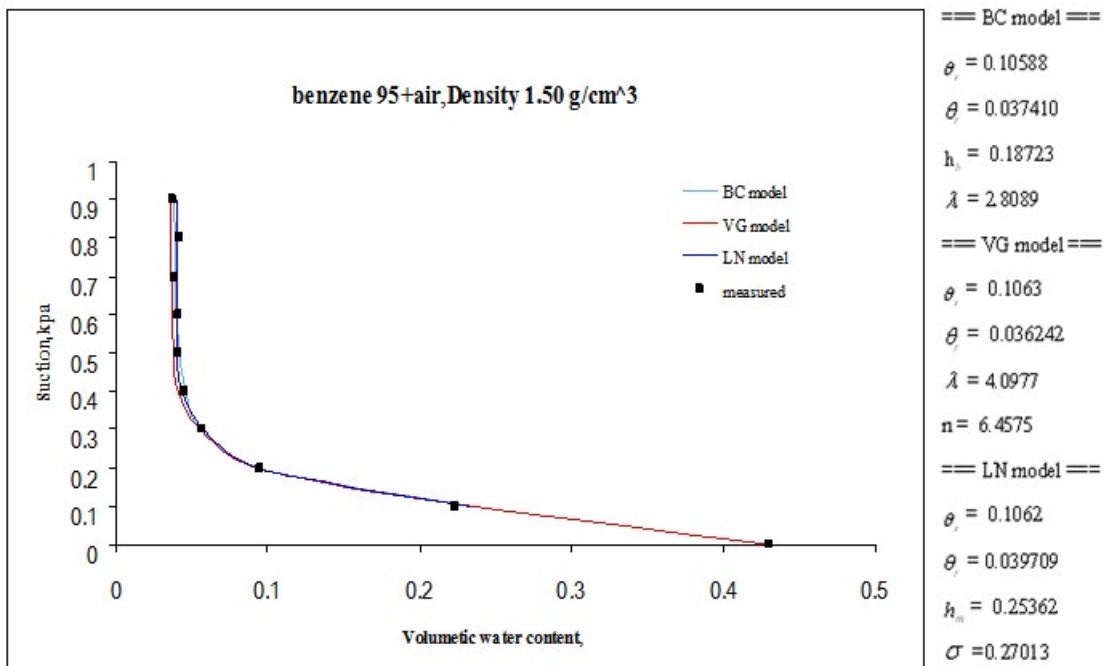
Capillary Pressure (kPa)	Volumetric Water, $\theta$	Degree of Saturation, S%
0.9	0.067	16.273
0.8	0.069	16.805
0.7	0.068	16.655
0.6	0.072	17.521
0.5	0.068	16.538
0.4	0.075	18.216
0.3	0.074	18.099
0.2	0.096	23.527
0.1	0.126	30.752
0	*0.410	*100.000



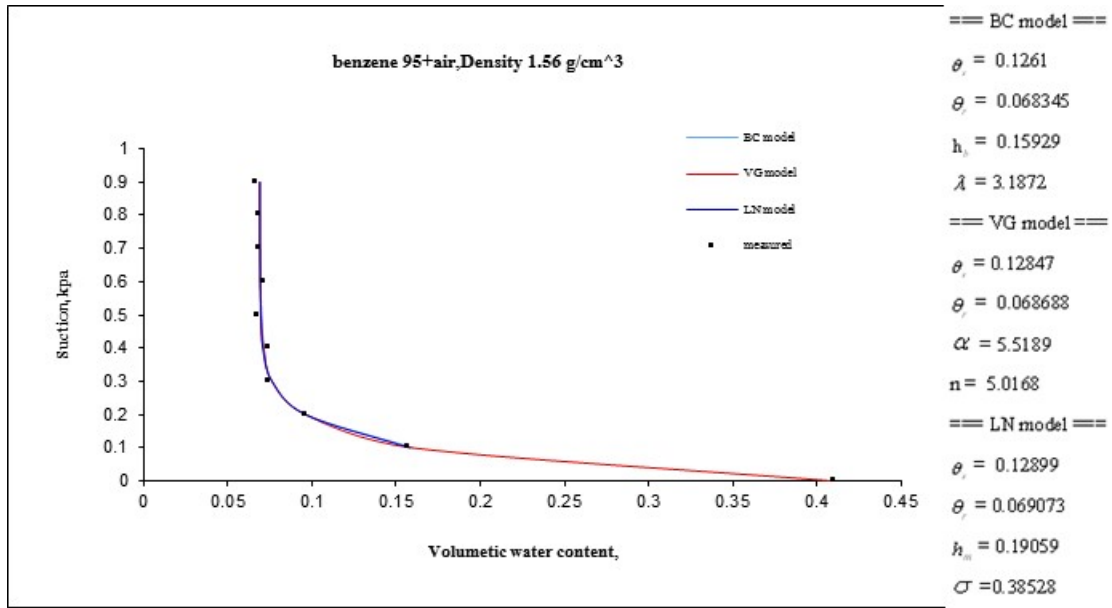
รูปที่ 3-20 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระดับชั้นความอิ่มตัว (Degree of Saturation) กับค่าแรงดูด (Suction) ของน้ำมันเบนซิน 95 กับอากาศ ที่ความหนาแน่นของทราย 1.50 g/cm<sup>3</sup>



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)

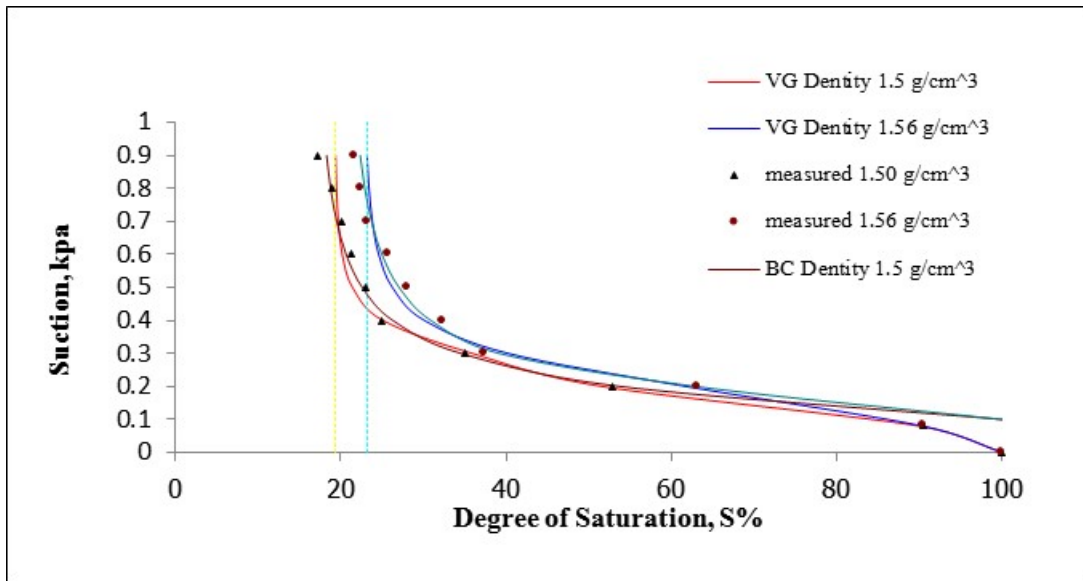
Density g/cm <sup>3</sup>	Air-entry (kPa)	Irreducible of saturation, S%	Residual Water Content, $\theta$
1.50	0.02	8.583	0.037
1.56	0.02	16.768	0.069

### 3.6 วิเคราะห์ผลการทดลอง

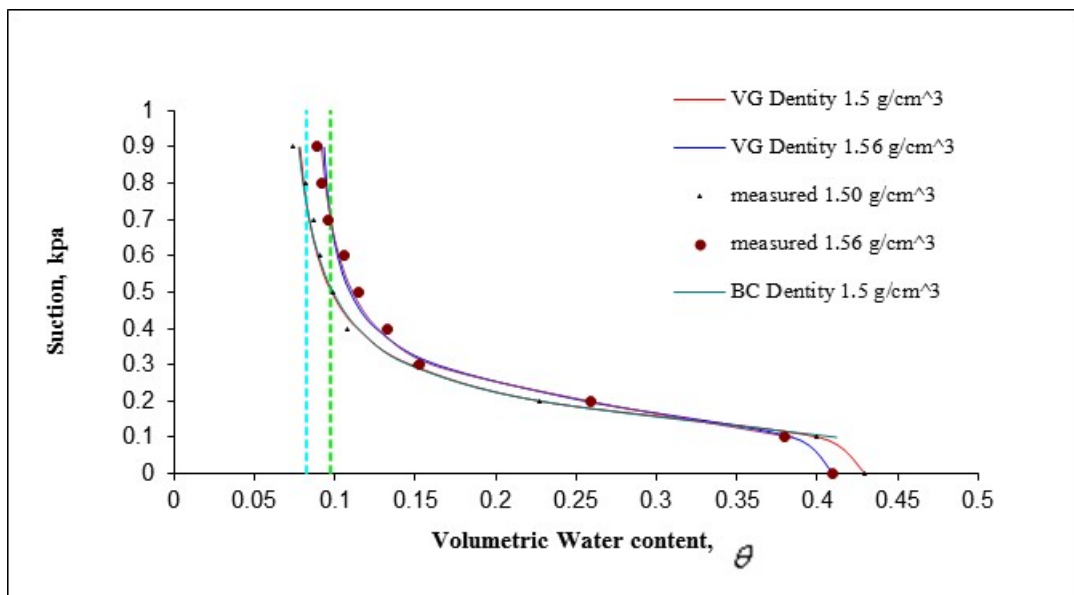
เปรียบเทียบผลการทดลองที่ความหนาแน่น 1.50 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตรและความหนาแน่น 1.56 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ที่ของเหลวน้ำ, แก๊สโซฮอล์ E20, แก๊สโซฮอล์ E85, น้ำมันเบนซิน95 โดยใช้สมการของ Van Genuchten (VG), Brooks and Corey (BC)

#### 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)

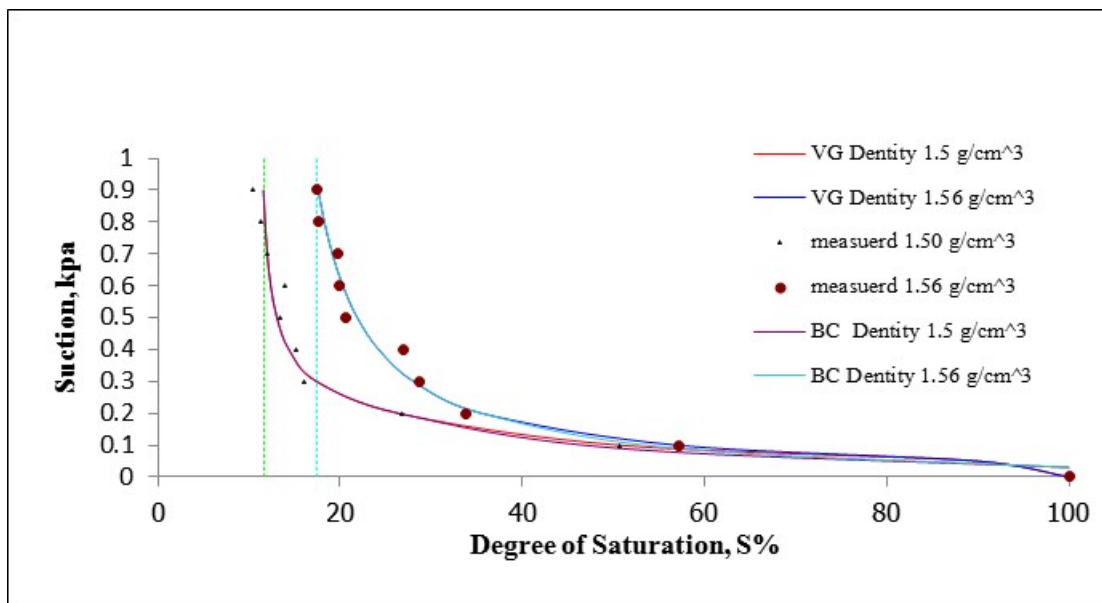
Density g/cm <sup>3</sup>	Air-entry (kPa)	Irreducible saturation, S%
1.50	0.08	19.370
1.56	0.08	23.177

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

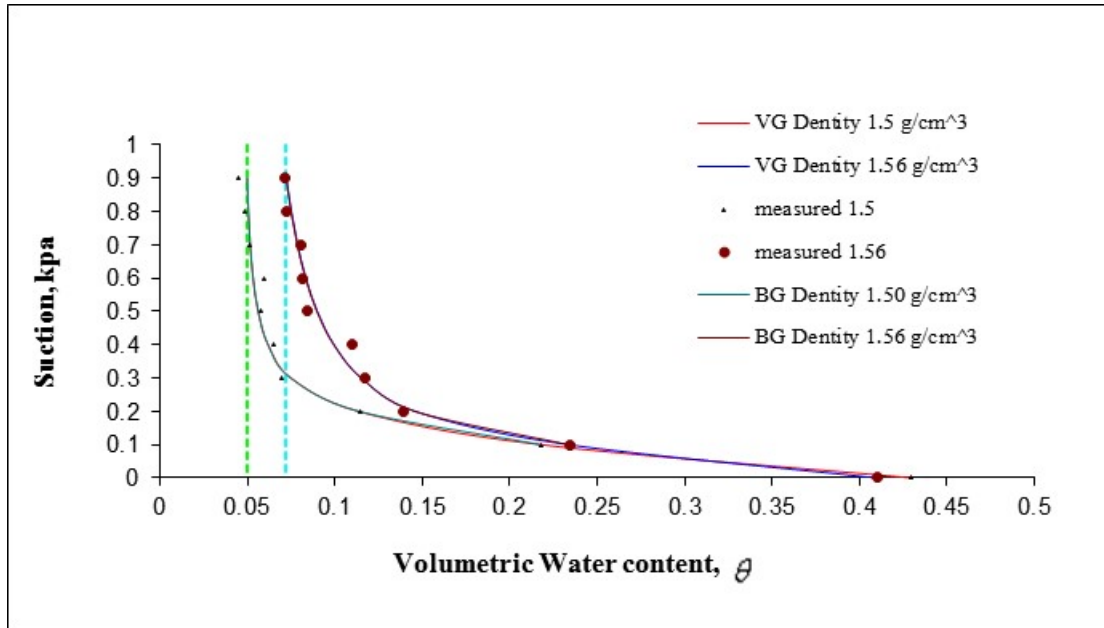
Density g/cm <sup>3</sup>	Air-entry (kPa)	Residual Water Content, $\theta$
1.50	0.08	0.082
1.56	0.08	0.097

### 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 แก๊สไซฮอลล์ 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

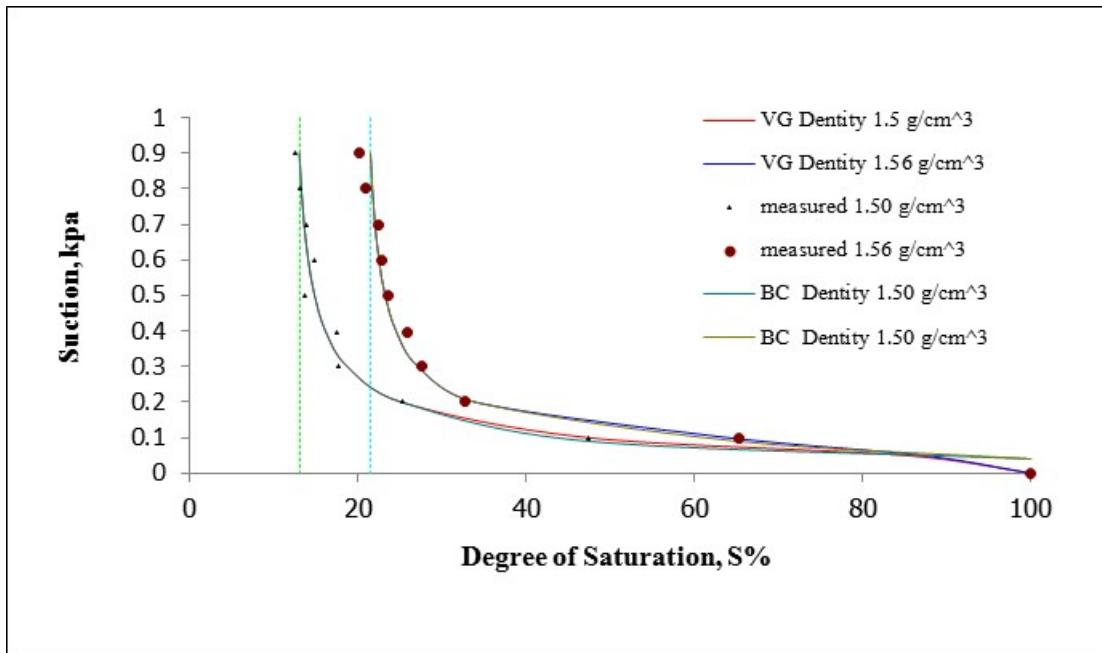
ตารางที่ 3-18 ค่า Air-entry และ Residual Water Content (VG Model)

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

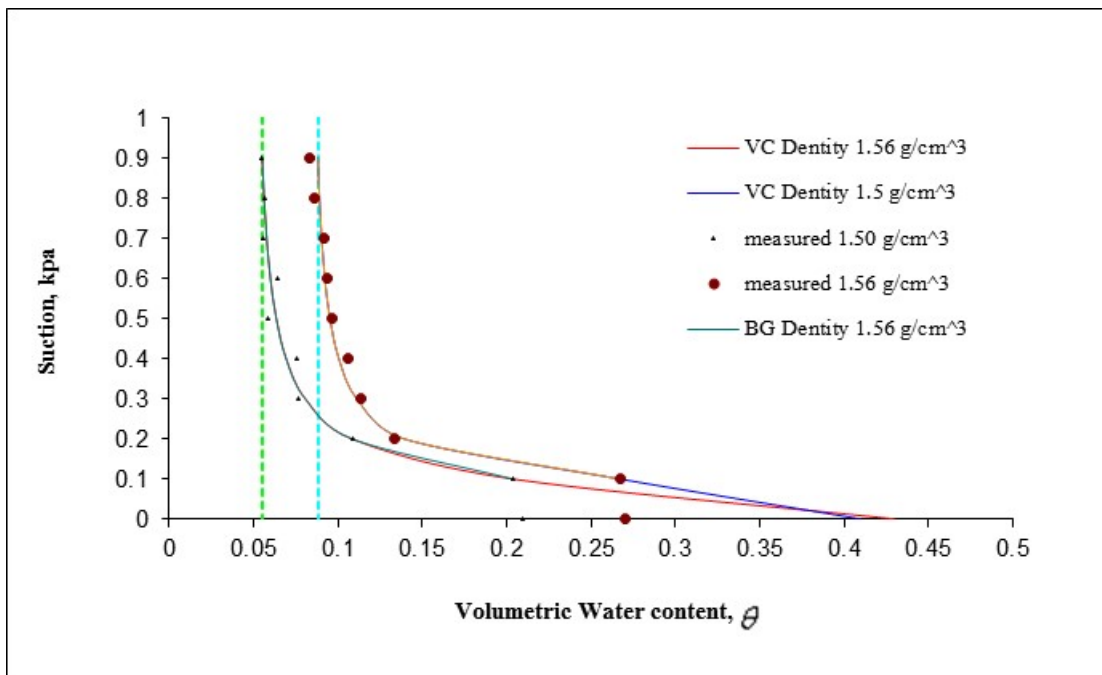
### 3.6.3 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่าง แก๊สไซฮอลล์ E85 กับ อากาศ ที่ความหนาแน่นของทรายแตกต่างกัน

การเปรียบเทียบผลการทดลองความสัมพันธ์ระหว่างแก๊สไซฮอลล์ E85 กับ อากาศ ที่ความหนาแน่นของทรายที่ต่างกันคือ 1.50 และ 1.56 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร แสดงดังรูปที่ 3-28 และ 3-29 ตามลำดับ ค่า Air-entry และ Irreducible saturation สามารถสรุปความสัมพันธ์ระหว่างแก๊สไซฮอลล์ 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)

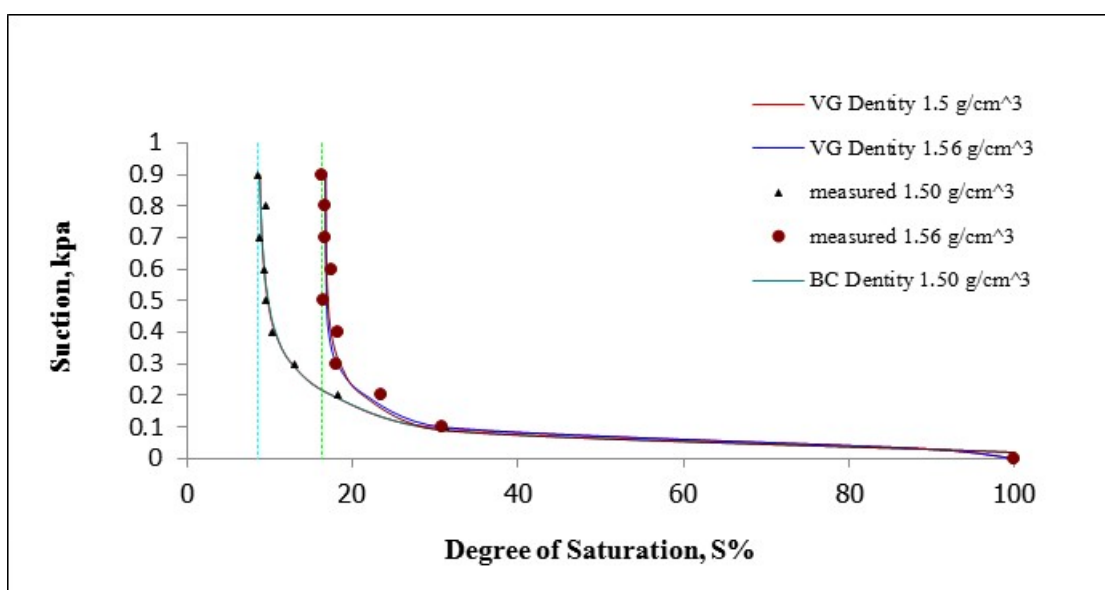
Density g/cm <sup>3</sup>	Air-entry (kPa)	Irreducible saturation, S%
1.50	0.03	12.641
1.56	0.03	21.497

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

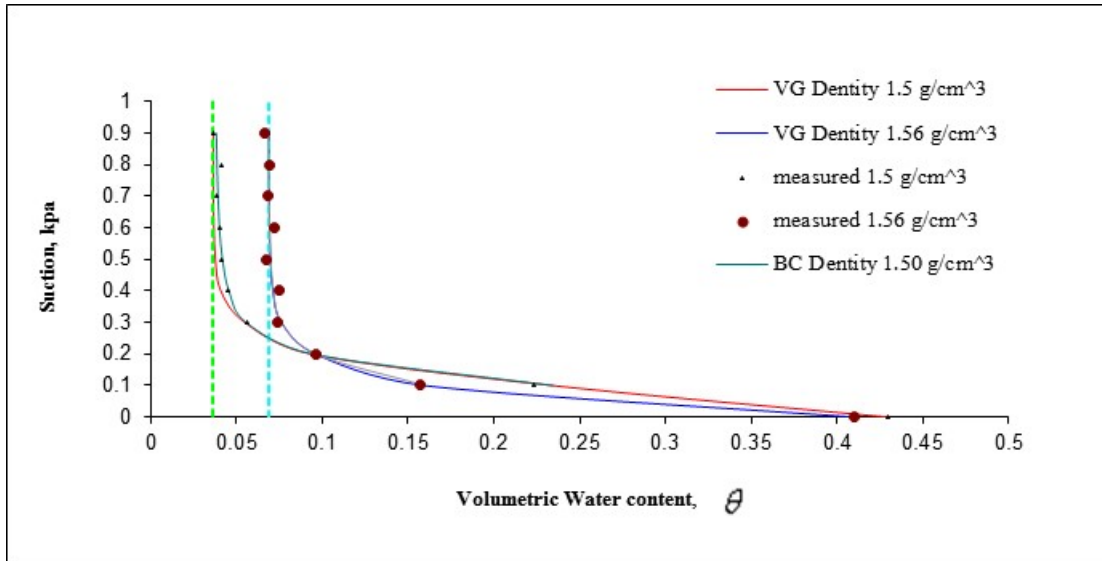
Density g/cm <sup>3</sup>	Air-entry (kPa)	Residual Water Content, $\theta$
1.50	0.03	0.054
1.56	0.03	0.088

### 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

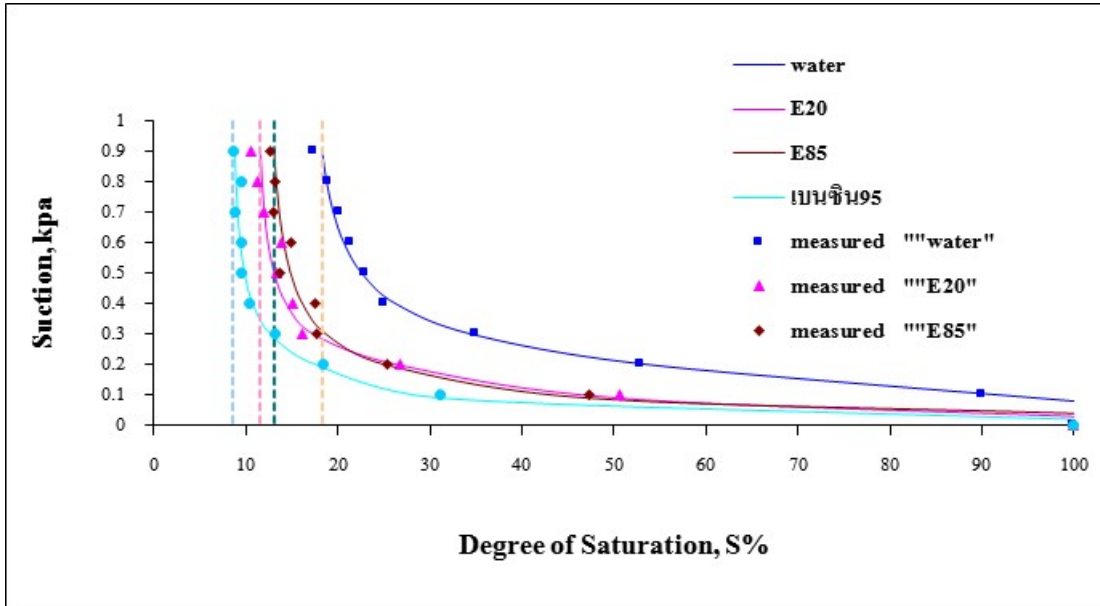
ตารางที่ 3-22 ค่า Air-entry และ Residual Water Content (VG Model)

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



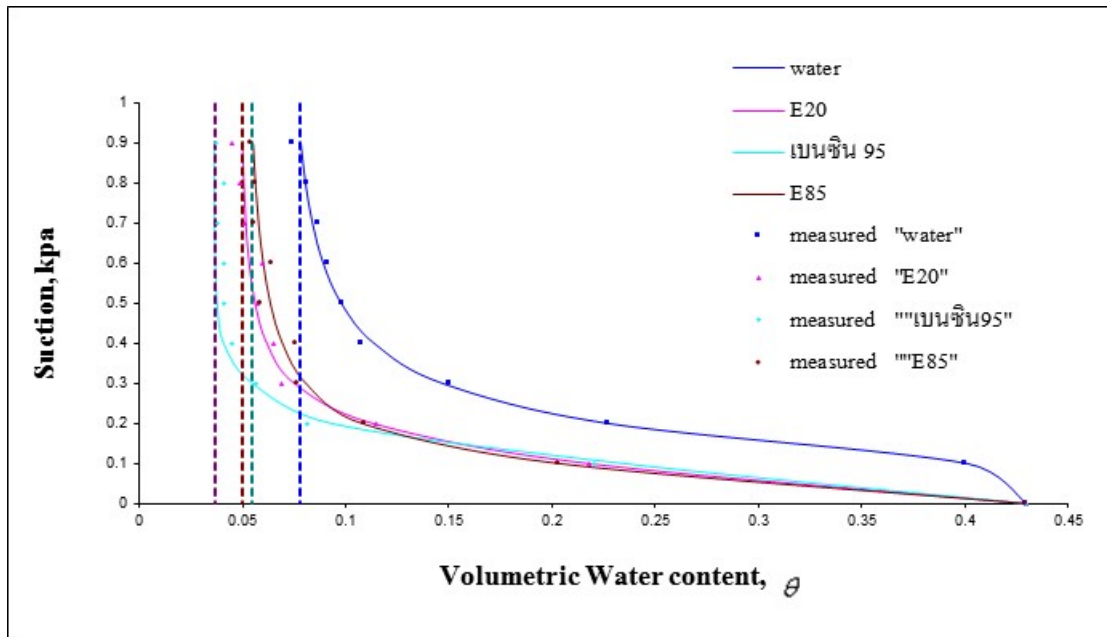
รูปที่ 3-32 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระดับชั้นความอิ่มตัว (Degree of Saturation) กับค่าแรงดูด (Suction) ของน้ำกลั่น น้ำมันเบนซิน 95 แก๊สโซฮอล์ E20 และ แก๊สโซฮอล์ E85 กับอากาศที่ความหนาแน่น  $1.50 \text{ g/cm}^3$  (BC Model)

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



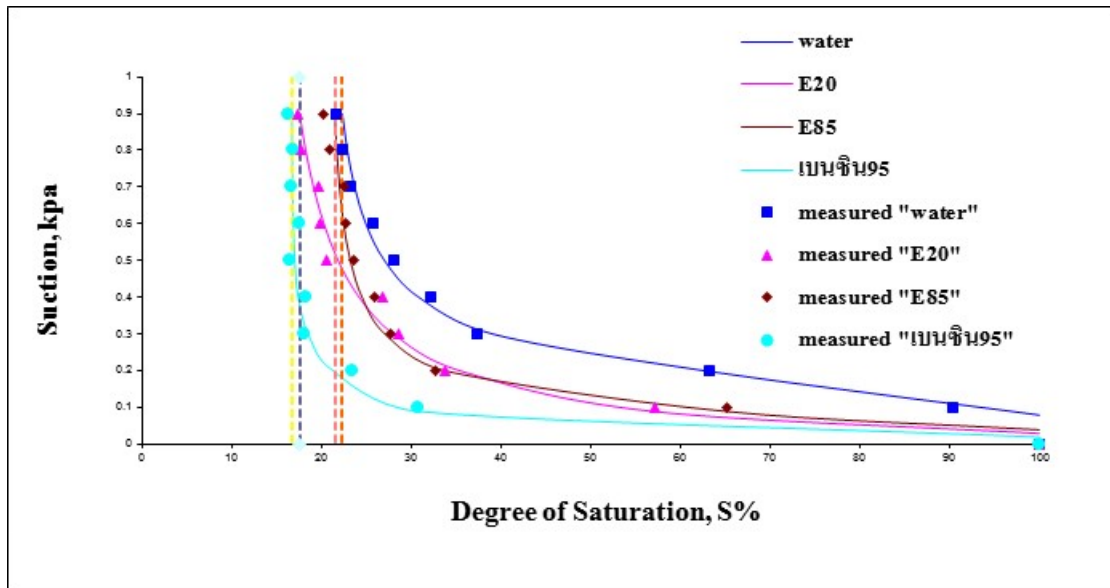
รูปที่ 3-33 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Volumetric water content กับ Suction ของน้ำกลั่น มันทันเบนซิน 95 แก๊สโซฮอล์ E20 และ แก๊สโซฮอล์ E85 กับอากาศที่ความหนาแน่น  $1.50 \text{ g/cm}^3$  (VG Model)

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



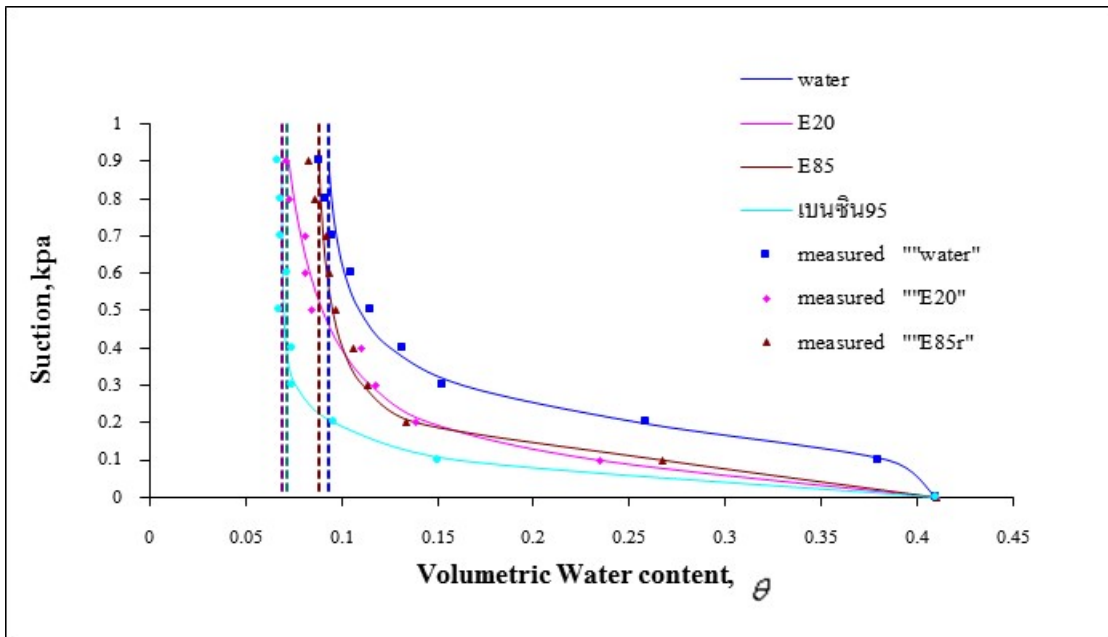
รูปที่ 3-34 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระดับชั้นความอิ่มตัว (Degree of Saturation) กับค่าแรงดูด (Suction) ของน้ำกลั่น มันทันเบนซิน 95 แก๊สโซฮอล์ E20 และ แก๊สโซฮอล์ E85 กับอากาศที่ความหนาแน่น  $1.56 \text{ g/cm}^3$  (BC Model)

ค่า Air-entry และ Irreducible saturation จากรูปที่ 3-34 สามารถสรุปความสัมพันธ์ระหว่างน้ำกลั่น มันทันเบนซิน 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, มันทันเบนซิน 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 มันเบนซิน 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

## 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), ธรณีวิทยาเบื้องต้น, พิมพ์ครั้งที่ 7, ภาควิชาปฐพีวิทยา, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ
- วรรณัฐ ศรีพงษ์พิจิตร (2549), การศึกษาพฤติกรรมการปนเปื้อนของน้ำมันเชื้อเพลิงในชั้นดินไม่อิ่มตัว ด้วยการวิเคราะห์จากภาพดิจิทัล, วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ
- ศุภสิทธิ์ คนใหญ่, วิชัย ศรีบุญลือ และ เกรียงศักดิ์ ศรีสุข (2548), "ค่าสภาพนำชลศาสตร์ไม่อิ่มตัวของดินเค็ม ซึ่งเป็นฟังก์ชันของความชื้น", *วารสารวิจัย มช. (ฉบับบัณฑิตศึกษา)* 5, 2, หน้า 80-89
- สถาพร คูวิจิตรจารุ (2542), ปฐพีกลศาสตร์, พิมพ์ครั้งที่ 1, กรุงเทพฯ
- สถาพร คูวิจิตรจารุ (2542), ทดลองปฐพีกลศาสตร์, พิมพ์ครั้งที่ 1, กรุงเทพฯ

ภาคผนวก ผลงานตีพิมพ์

การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นเชิงแสงเฉลี่ยและความอิ่มตัวของของเหลว  
ในทรายโดยใช้เทคนิคการวิเคราะห์ภาพถ่าย

Study of Relationship between Average Optical Density and Degree of Liquid Saturation in  
Sand Using Image Analysis Technique

สยาม ยิ้มศิริ สุวสันต์ สุดแสง ฐิตพล สุริยะมงคลชัย และ ศรีณย์ ศรีพิณิจ

Siam Yimsiri Suwasan Sudsaeng Titapol Suriyamongkolchai, and Sarun Sripinit

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

Email: ysiam@buu.ac.th

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาเบื้องต้นถึงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นเชิงแสงเฉลี่ยและความอิ่มตัวของของเหลวในทรายโดยใช้เทคนิคการวิเคราะห์ภาพถ่าย ตัวอย่างทรายที่ใช้ในการทดสอบคือทรายมาตรฐาน Toyoura และของเหลวที่ทดสอบคือน้ำมันดีเซล ตัวอย่างที่ทดสอบประกอบไปด้วย ทรายผสมน้ำ ทรายผสมน้ำมันดีเซล และ ทรายผสมน้ำและน้ำมันดีเซล ที่มีความอิ่มตัวต่างกัน น้ำที่ใช้ในการทดสอบถูกย้อมสีฟ้าด้วยบิลเลียมบูลเอฟซีเอฟด้วยอัตราส่วน 1:10,000 ส่วนน้ำมันดีเซลถูกย้อมสีแดงด้วยเรดซูดานสามด้วยอัตราส่วน 1:10,000 การทดลองทำโดยถ่ายภาพตัวอย่างด้วยกล้องดิจิทัลจำนวน 2 ตัว โดยกล้องแต่ละตัวทำการติดตั้งฟิลเตอร์กรองแสงให้ผ่านที่ 2 ความยาวคลื่นแสงคือ 450 นาโนเมตร และ 640 นาโนเมตร รูปถ่ายที่ได้ถูกนำไปวิเคราะห์เพื่อหาค่าความหนาแน่นเชิงแสงเฉลี่ยในแต่ละช่วงความยาวคลื่นแสง จากการทดสอบพบว่าความหนาแน่นเชิงแสงเฉลี่ยมีความสัมพันธ์แบบเชิงเส้นกับความอิ่มตัวของของเหลวในทราย

**คำสำคัญ:** ความหนาแน่นเชิงแสงเฉลี่ย ความอิ่มตัวของของเหลว เทคนิคการวิเคราะห์ภาพถ่าย การทดสอบแบบไม่ทำลายของเหลวที่ไม่ผสมกับน้ำและเบากว่าน้ำ

### Abstract

This research is a preliminary study of the relationship between Average Optical Density (AOD) and degree of liquid saturation in sand using image analysis technique. The sand used in this study is standard Toyoura sand and liquid used is diesel oil. The samples are (i) sand mixed with water, (ii) sand mixed with diesel oil, and (iii) sand mixed with diesel and water. Water is dyed with Brilliant Blue FCF with the ratio of 1:10,000 by weight and liquid paraffin and diesel is dyed with Red Sudan III with the ratio of 1:10,000 by weight. The test is performed by taking photos by 2 digital cameras with 2 different pass filters at 450 nm and 640 nm, respectively. The images are analyzed to obtain the AOD for each wavelength. The result shows that the relationship between the AOD and the degree of liquid saturation of diesel oil can be approximated as a linear relationship.

**Keywords:** Average optical density; Degree of liquid saturation; Image analysis; Non-destructive test; Light non-aqueous phase liquid

### 1. บทนำ

จากการขยายตัวของเศรษฐกิจในประเทศไทย ส่งผลให้อุตสาหกรรมใช้น้ำมันเชื้อเพลิงทั้งในภาคอุตสาหกรรมและการคมนาคมขนส่งเพิ่มขึ้นเป็นอย่างมากทำให้โอกาสในการปนเปื้อนของน้ำมันเชื้อเพลิงสู่สิ่งแวดล้อมสูงขึ้นตามไปด้วย การขาด

การบำรุงรักษาและขาดระบบป้องกันการรั่วไหลของของถ่วงน้ำมันใต้ดินเป็นสาเหตุหลักของการปนเปื้อนของน้ำมันลงสู่ชั้นดิน และแหล่งน้ำ น้ำมันเชื้อเพลิงเหล่านี้จัดว่าเป็นของเหลวที่ไม่ผสมกับน้ำและเบากว่าน้ำ (Light non-aqueous phase liquids, LNAPLs) ส่วนใหญ่แล้วนักวิจัยจะศึกษาพฤติกรรมของการปนเปื้อนของ LNAPLs ในชั้นดินโดยคอลัมน์ 1 มิติ และแท่ง 2 มิติ และวิธีที่ใช้ในการประมาณค่าระดับการอิ่มตัวของน้ำและน้ำมันในดินที่เป็นที่นิยมได้แก่การใช้รังสีแกมมา (Gamma radiation method (GRM)) (Ferrand et al., 1989) การใช้รังสีเอกซ์ (X-ray attenuation method (X-RAM)) (Rimmer et al., 1998) และ การใช้การส่องผ่านของแสง (Light transmission method, LTM)) (Darnault et al., 1998) เป็นต้น ซึ่งวิธีการต่างๆเหล่านี้ใช้ งบประมาณในการศึกษาวิจัยค่อนข้างสูงและอาจเป็นอันตรายต่อผู้วิจัยได้ ในการศึกษาที่ผู้วิจัยนำเสนอวิธีการวิเคราะห์ค่าความ อิ่มตัวของของเหลวชนิด LNAPLs โดยการวิเคราะห์ภาพถ่ายเชิงซ้อน (Multispectral image analysis method (MIAM)) (Kechavarzi et al., 2000) ซึ่งเป็นวิธีการทดสอบแบบไม่ทำลาย ปลอดภัย และสามารถประเมินค่าความอิ่มตัวของของเหลวได้ ภายใต้อุปกรณ์วัด โดยจะแสดงการหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นเชิงแสงเฉลี่ย (Average optical density, AOD) และความอิ่มตัวของของเหลวในทรายเพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการนำความสัมพันธ์ที่ได้ไปประมาณค่าความอิ่มตัวของ ของเหลวในการศึกษาพฤติกรรมการปนเปื้อนของน้ำมันเชื้อเพลิงต่อไป โดยความหนาแน่นเชิงแสงเฉลี่ย (AOD) สามารถแสดง ได้ดังสมการที่ (1) (Flores et al., 2010)

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

โดยที่  $N$  คือ จำนวนพิกเซลในรูปภาพที่ทำกรวิเคราะห์  
 $i$  คือ ความยาวคลื่นแสงที่ใช้ในการทดลอง  
 $D_i$  คือ ความหนาแน่นเชิงแสงของแต่ละพิกเซล  
 $I_{ji}^r$  คือ ความเข้มของแสงที่สะท้อนจากวัตถุในแต่ละพิกเซล  
 $I_{ji}^o$  คือ ความเข้มของแสงที่สะท้อนจากสีขาวอ้างอิง

เทคนิคการวิเคราะห์ภาพถ่ายด้วยวิธีวิเคราะห์ภาพถ่ายเชิงซ้อน (Multi-spectral Image Analysis Method) จะใช้กล้อง ดิจิตอลจำนวน 2 ตัว โดยกล้องแต่ละตัวทำการติดตั้งฟิลเตอร์กรองแสงให้ผ่านที่ 2 ความยาวคลื่นแสงคือ 450 นาโนเมตร และ 640 นาโนเมตร ค่าความหนาแน่นเชิงแสงเฉลี่ยในแต่ละความยาวคลื่นแสงสามารถหาได้จากสมการที่ (2) และ (3) ตามลำดับ (Sudsang et al., 2010)

$$D_{450} = a.S_w + b.S_o + c \quad (2)$$

$$D_{640} = d.S_w + e.S_o + f \quad (3)$$

โดยที่  $D_{450}$  คือ ค่าความหนาแน่นเชิงแสงเฉลี่ยที่ความยาวคลื่นแสง 450 นาโนเมตร  
 $D_{640}$  คือ ค่าความหนาแน่นเชิงแสงเฉลี่ยที่ความยาวคลื่นแสง 640 นาโนเมตร  
 $S_w$  คือ ความอิ่มตัวด้วยน้ำในดิน  
 $S_o$  คือ ความอิ่มตัวด้วยน้ำมันในดิน  
 $a, b, c, d, e$  และ  $f$  คือ ค่าคงที่

## 2. วิธีการดำเนินการวิจัย

ตัวอย่างทรายที่ใช้ในการทดสอบคือทรายโทปุระ ซึ่งเป็นดินทรายมาตรฐานสำหรับการทำวิจัยในประเทศญี่ปุ่น และมี คุณสมบัติพื้นฐานดังแสดงในตารางที่ 1 ของเหลวที่ใช้ในการทดสอบ คือ น้ำ และ น้ำมันดีเซล โดยน้ำที่ใช้ในการทดสอบถูกย้อม สีฟ้าด้วยบิลเลียนบลูเอฟซีเอฟ (Brilliant blue FCF) ด้วยอัตราส่วน 1:10,000 โดยน้ำหนัก ส่วนน้ำมันดีเซลทำการย้อมสีแดงด้วย เรดซูดานสาม (Red sudan III) ด้วยอัตราส่วน 1:10,000 โดยน้ำหนักเช่นเดียวกัน คุณสมบัติของของเหลวที่ใช้แสดงในตารางที่ 2

## ตารางที่ 1 คุณสมบัติของดินทรายตัวอย่าง

คุณสมบัติ	ผลการทดสอบ
ความหนาแน่นของดิน ( $g/cm^3$ )	1.64
ความถ่วงจำเพาะ	2.64
สัมประสิทธิ์ของความสม่ำเสมอ ( $C_u$ )	1.36
สัมประสิทธิ์ของความโค้ง ( $C_c$ )	0.96
Soil Classification (USCS)	SP

## ตารางที่ 2 คุณสมบัติของของเหลวที่ใช้ในการทดสอบ

ของเหลว	คุณสมบัติ ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส		
	ความถ่วงจำเพาะ ( $g/cm^3$ )	ความหนืด ( $mm^2/s$ )	ความดันไอ (mmHg)
น้ำ	0.998	1	17.54
น้ำมันดีเซล	0.865	7	0.4

การทดสอบทำโดยการเตรียมตัวอย่างทราย 40 กรัม ผสมน้ำ และน้ำมันดีเซล รวมถึงนำทรายผสมน้ำและน้ำมันดีเซล ที่ความอิ่มตัวของของเหลวแตกต่างกันกลุ่มละ 20 ตัวอย่างเป็นจำนวนทั้งสิ้น 60 ตัวอย่าง จากนั้นทำการบรรจุตัวอย่างลงในอุปกรณ์บรรจุตัวอย่างทรงกระบอกมีเส้นผ่าศูนย์กลาง 4 ซม. ความสูง 1.96 ซม. และปริมาตรเฉลี่ย 24.64 ลบ.ซม. โดยควบคุมความหนาแน่นของทรายตัวอย่างเท่ากับ 1.64 กรัม/ลบ.ซม. อุปกรณ์บรรจุตัวอย่างแสดงดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 อุปกรณ์บรรจุตัวอย่างดิน



รูปที่ 2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ

จากนั้นทำการถ่ายภาพตัวอย่างด้วยกล้องดิจิทัลจำนวน 2 ตัว โดยกล้องแต่ละตัวทำการติดตั้งฟิลเตอร์กรองแสงให้ผ่านที่ความยาวคลื่นแสง 450 นาโนเมตร และ 640 นาโนเมตร โดยห้องทดลองมีการควบคุมอุณหภูมิที่ 20 องศาเซลเซียส และควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ที่ 70 เปอร์เซ็นต์ เพื่อป้องกันการระเหยของของเหลว การติดตั้งอุปกรณ์ในการทดสอบแสดงในรูปที่ 2 และตัวอย่างดินที่ระดับการอิ่มตัวของของเหลวต่างๆกันแสดงในรูปที่ 3 ภาพถ่ายที่ได้ถูกนำไปวิเคราะห์เพื่อหาค่าความหนาแน่นเชิงแสงเฉลี่ยที่ความยาวคลื่นแสง 450 นาโนเมตร และ 640 นาโนเมตร โดยใช้โปรแกรมการคำนวณที่เขียนบนซอฟต์แวร์ MatLab



รูปที่ 3 ตัวอย่างดินที่ความอิ่มตัวของของเหลวต่างๆ

### 3. ผลการวิจัย

ความอิ่มตัวของน้ำ และ น้ำมันดีเซลในทราย สามารถคำนวณได้จากปริมาณของเหลวที่ใช้ในการเตรียมตัวอย่างแต่ละตัวอย่าง และจากการวิเคราะห์ภาพถ่ายสามารถคำนวณหาค่าความหนาแน่นเชิงแสงเฉลี่ยที่ความยาวคลื่นแสง 450 นาโนเมตร และ 640 นาโนเมตร ความสัมพันธ์ของค่าความหนาแน่นเชิงแสงเฉลี่ยและความอิ่มตัวของน้ำและน้ำมันดีเซลในทรายที่ความยาวคลื่นแสง 450 นาโนเมตร และ 640 นาโนเมตร แสดงดังสมการที่ (4) และ (5) ตามลำดับ

$$D_{450} = 0.181S_w + 0.359S_o + 0.246 \quad (R^2 = 0.83) \quad (4)$$

$$D_{640} = 0.301S_w + 0.252S_o + 0.128 \quad (R^2 = 0.95) \quad (5)$$

ระนาบแสดงความสัมพันธ์ของค่าความหนาแน่นเชิงแสงเฉลี่ยและความอิ่มตัวของน้ำ และ น้ำมันดีเซลในทราย แสดงดังรูปที่ 4 จากสมการที่ (4) และ (5) สามารถนำไปประมาณค่าความอิ่มตัวของน้ำและน้ำมันดีเซลในทราย ณ เวลาใดๆได้จากสมการที่ (6) และ (7)

$$\Delta S_w = 11.274\Delta D_{640} - 9.560\Delta D_{450} \quad (6)$$

$$\Delta S_o = -2.899\Delta D_{640} + 4.821\Delta D_{450} \quad (7)$$

เมื่อ  $\Delta S_w = S_w' - S_w^0$

$$\Delta S_o = S_o' - S_o^0$$

$$\Delta D_{450} = D_{450}' - D_{450}^0$$

$$\Delta D_{640} = D_{640}' - D_{640}^0$$

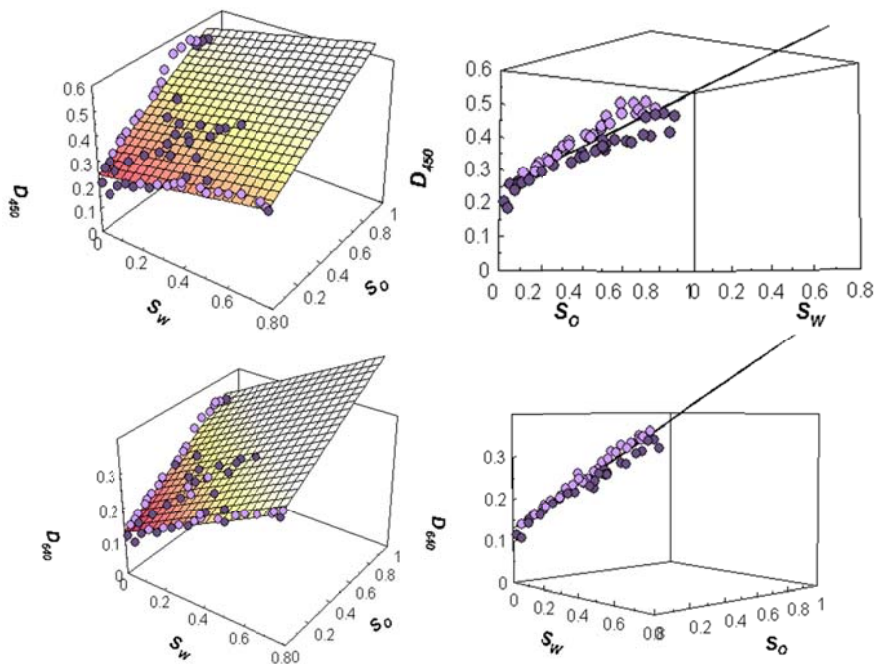
โดยที่

$S_w'$  และ  $S_o'$  คือ ความอิ่มตัวของน้ำ และ น้ำมันดีเซล ณ เวลาใดๆ

$S_w^0$  และ  $S_o^0$  คือ ความอิ่มตัวของน้ำ และ น้ำมันดีเซล ขณะเริ่มทำการทดสอบ

$D_{450}'$  และ  $D_{640}'$  คือ ค่าความหนาแน่นเชิงแสงเฉลี่ยของภาพถ่ายที่ 450 นาโนเมตร และ 640 นาโนเมตร ณ เวลาใดๆ

$D_{450}^0$  และ  $D_{640}^0$  คือ ค่าความหนาแน่นเชิงแสงเฉลี่ยของภาพถ่ายที่ 450 นาโนเมตร และ 640 นาโนเมตร ขณะเริ่มทำการทดสอบ



รูปที่ 4 ระบายความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นเชิงแสงเฉลี่ยและความอิ่มตัวของน้ำและน้ำมันดีเซลใน  
ทราย

#### 4. สรุปผลและอภิปรายผล

จากการทดลองพบว่าค่าสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจ (coefficient of determination,  $R^2$ ) ของความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นเชิงแสงเฉลี่ยและความอิ่มตัวของน้ำ และ น้ำมันดีเซลในทรายที่ความยาวคลื่นแสง 640 นาโนเมตร มีค่าสูงที่สุดคือ 0.95 ส่วนค่าสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจของความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นเชิงแสงเฉลี่ยและความอิ่มตัวของน้ำ และ น้ำมันดีเซลในทรายในช่วงความยาวคลื่นแสง 450 นาโนเมตร มีค่าต่ำที่สุดคือ 0.83 เป็นที่สังเกตว่าค่าสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจของความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นเชิงแสงเฉลี่ยและความอิ่มตัวของน้ำและของเหลวในทรายที่ความยาวคลื่นแสง 640 นาโนเมตร มีค่าสูงกว่าที่ความยาวคลื่นแสง 450 นาโนเมตร

#### 5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนบางส่วนโดยทุนอุดหนุนการวิจัยและพัฒนาเพื่อส่งเสริมความร่วมมือกับหน่วยงานภายนอก จากคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา เลขที่ 16/2555

#### 6. เอกสารอ้างอิง

Damault, 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 31(3-4): 337-348.

- 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 4: 373-395.
- Flores, G., Katsumi, T., Inui, T. and Kamon, M. 2010. **Examination of LNAPL Migration in Porous Media Using a Simplified Image Analysis Method.** Proc. 9<sup>th</sup> Geo-environmental Engineering, Seoul, Korea: 83-90.
- Kechavarzi, C., Soga, K. and Wiart, 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 46(3-4): 265-293.
- 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 31(3-4): 315-335.
- 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. 23<sup>rd</sup> KKCNN Symposium on Civil Engineering, Taiwan: 379-382.



การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นเชิงแสงเฉลี่ยและความอิ่มตัวของของเหลว  
ในทรายโดยใช้เทคนิคการวิเคราะห์ภาพถ่าย

Study of Relationship between Average Optical Density and Degree of Liquid Saturation in  
Sand Using Image Analysis Technique

สยาม ยิ้มศิริ สุวสันต์ สุดแสง ฐิตพล สุริยะมงคลชัย และ ศรัณย์ ศรีพิณิจ

Siam Yimsiri Suwasan Sudsaeng Titapol Suriyamongkolchai, and Sarun Sripinit

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

Email: ysiam@buu.ac.th

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาเบื้องต้นถึงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นเชิงแสงเฉลี่ยและความอิ่มตัวของของเหลวในทรายโดยใช้เทคนิคการวิเคราะห์ภาพถ่าย ตัวอย่างทรายที่ใช้ในการทดสอบคือทรายมาตรฐาน Toyoura และของเหลวที่ทดสอบคือน้ำมันดีเซล ตัวอย่างที่ทดสอบประกอบไปด้วย ทรายผสมน้ำ ทรายผสมน้ำมันดีเซล และ ทรายผสมน้ำและน้ำมันดีเซล ที่มีความอิ่มตัวต่างกัน น้ำที่ใช้ในการทดสอบถูกย้อมสีฟ้าด้วยบิลเลียมบูลเอฟซีเอฟด้วยอัตราส่วน 1:10,000 ส่วนน้ำมันดีเซลถูกย้อมสีแดงด้วยเรดซูดานสามด้วยอัตราส่วน 1:10,000 การทดลองทำโดยถ่ายภาพตัวอย่างด้วยกล้องดิจิทัลจำนวน 2 ตัว โดยกล้องแต่ละตัวทำการติดตั้งฟิลเตอร์กรองแสงให้ผ่านที่ 2 ความยาวคลื่นแสงคือ 450 นาโนเมตร และ 640 นาโนเมตร รูปถ่ายที่ได้ถูกนำไปวิเคราะห์เพื่อหาค่าความหนาแน่นเชิงแสงเฉลี่ยในแต่ละช่วงความยาวคลื่นแสง จากการทดสอบพบว่าความหนาแน่นเชิงแสงเฉลี่ยมีความสัมพันธ์แบบเชิงเส้นกับความอิ่มตัวของของเหลวในทราย

**คำสำคัญ:** ความหนาแน่นเชิงแสงเฉลี่ย ความอิ่มตัวของของเหลว เทคนิคการวิเคราะห์ภาพถ่าย การทดสอบแบบไม่ทำลายของเหลวที่ไม่ผสมกับน้ำและเบากว่าน้ำ

### Abstract

This research is a preliminary study of the relationship between Average Optical Density (AOD) and degree of liquid saturation in sand using image analysis technique. The sand used in this study is standard Toyoura sand and liquid used is diesel oil. The samples are (i) sand mixed with water, (ii) sand mixed with diesel oil, and (iii) sand mixed with diesel and water. Water is dyed with Brilliant Blue FCF with the ratio of 1:10,000 by weight and liquid paraffin and diesel is dyed with Red Sudan III with the ratio of 1:10,000 by weight. The test is performed by taking photos by 2 digital cameras with 2 different pass filters at 450 nm and 640 nm, respectively. The images are analyzed to obtain the AOD for each wavelength. The result shows that the relationship between the AOD and the degree of liquid saturation of diesel oil can be approximated as a linear relationship.

**Keywords:** Average optical density; Degree of liquid saturation; Image analysis; Non-destructive test; Light non-aqueous phase liquid

### 1. บทนำ

จากการขยายตัวของเศรษฐกิจในประเทศไทย ส่งผลให้อุตสาหกรรมใช้น้ำมันเชื้อเพลิงทั้งในภาคอุตสาหกรรมและการคมนาคมขนส่งเพิ่มขึ้นเป็นอย่างมากทำให้โอกาสในการปนเปื้อนของน้ำมันเชื้อเพลิงสู่สิ่งแวดล้อมสูงขึ้นตามไปด้วย การขาด

การบำรุงรักษาและขาดระบบป้องกันการรั่วไหลของของถ่วงน้ำมันใต้ดินเป็นสาเหตุหลักของการปนเปื้อนของน้ำมันลงสู่ชั้นดิน และแหล่งน้ำ น้ำมันเชื้อเพลิงเหล่านี้จัดว่าเป็นของเหลวที่ไม่ผสมกับน้ำและเบากว่าน้ำ (Light non-aqueous phase liquids, LNAPLs) ส่วนใหญ่แล้วนักวิจัยจะศึกษาพฤติกรรมของการปนเปื้อนของ LNAPLs ในชั้นดินโดยคอลัมน์ 1 มิติ และแท่ง 2 มิติ และวิธีที่ใช้ในการประมาณค่าระดับการอิ่มตัวของน้ำและน้ำมันในดินที่เป็นที่นิยมได้แก่การใช้รังสีแกมมา (Gamma radiation method (GRM)) (Ferrand et al., 1989) การใช้รังสีเอกซ์ (X-ray attenuation method (X-RAM)) (Rimmer et al., 1998) และ การใช้การส่องผ่านของแสง (Light transmission method, LTM)) (Darnault et al., 1998) เป็นต้น ซึ่งวิธีการต่างๆเหล่านี้ใช้ งบประมาณในการศึกษาวิจัยค่อนข้างสูงและอาจเป็นอันตรายต่อผู้วิจัยได้ ในการศึกษาที่ผู้วิจัยนำเสนอวิธีการวิเคราะห์ค่าความ อิ่มตัวของของเหลวชนิด LNAPLs โดยการวิเคราะห์ภาพถ่ายเชิงซ้อน (Multispectral image analysis method (MIAM)) (Kechavarzi et al., 2000) ซึ่งเป็นวิธีการทดสอบแบบไม่ทำลาย ปลอดภัย และสามารถประเมินค่าความอิ่มตัวของของเหลวได้ ภายใต้อสภาพแวดล้อม โดยจะแสดงการหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นเชิงแสงเฉลี่ย (Average optical density, AOD) และความอิ่มตัวของของเหลวในทรายเพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการนำความสัมพันธ์ที่ได้ไปประมาณค่าความอิ่มตัวของ ของเหลวในการศึกษาพฤติกรรมของการปนเปื้อนของน้ำมันเชื้อเพลิงต่อไป โดยความหนาแน่นเชิงแสงเฉลี่ย (AOD) สามารถแสดง ได้ดังสมการที่ (1) (Flores et al., 2010)

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

โดยที่  $N$  คือ จำนวนพิกเซลในรูปภาพที่ทำกรวิเคราะห์  
 $i$  คือ ความยาวคลื่นแสงที่ใช้ในการทดลอง  
 $D_i$  คือ ความหนาแน่นเชิงแสงของแต่ละพิกเซล  
 $I_{ji}^r$  คือ ความเข้มของแสงที่สะท้อนจากวัตถุในแต่ละพิกเซล  
 $I_{ji}^o$  คือ ความเข้มของแสงที่สะท้อนจากสีขาวอ้างอิง

เทคนิคการวิเคราะห์ภาพถ่ายด้วยวิธีวิเคราะห์ภาพถ่ายเชิงซ้อน (Multi-spectral Image Analysis Method) จะใช้กล้อง ดิจิตอลจำนวน 2 ตัว โดยกล้องแต่ละตัวทำการติดตั้งฟิลเตอร์กรองแสงให้ผ่านที่ 2 ความยาวคลื่นแสงคือ 450 นาโนเมตร และ 640 นาโนเมตร ค่าความหนาแน่นเชิงแสงเฉลี่ยในแต่ละความยาวคลื่นแสงสามารถหาได้จากสมการที่ (2) และ (3) ตามลำดับ (Sudsang et al., 2010)

$$D_{450} = a.S_w + b.S_o + c \quad (2)$$

$$D_{640} = d.S_w + e.S_o + f \quad (3)$$

โดยที่  $D_{450}$  คือ ค่าความหนาแน่นเชิงแสงเฉลี่ยที่ความยาวคลื่นแสง 450 นาโนเมตร  
 $D_{640}$  คือ ค่าความหนาแน่นเชิงแสงเฉลี่ยที่ความยาวคลื่นแสง 640 นาโนเมตร  
 $S_w$  คือ ความอิ่มตัวด้วยน้ำในดิน  
 $S_o$  คือ ความอิ่มตัวด้วยน้ำมันในดิน  
 $a, b, c, d, e$  และ  $f$  คือ ค่าคงที่

## 2. วิธีการดำเนินการวิจัย

ตัวอย่างทรายที่ใช้ในการทดสอบคือทรายโทปุระ ซึ่งเป็นดินทรายมาตรฐานสำหรับการทำวิจัยในประเทศญี่ปุ่น และมี คุณสมบัติพื้นฐานดังแสดงในตารางที่ 1 ของเหลวที่ใช้ในการทดสอบ คือ น้ำ และ น้ำมันดีเซล โดยน้ำที่ใช้ในการทดสอบถูกย้อม สีฟ้าด้วยบิลเลียนบลูเอฟซีเอฟ (Brilliant blue FCF) ด้วยอัตราส่วน 1:10,000 โดยน้ำหนัก ส่วนน้ำมันดีเซลทำการย้อมสีแดงด้วย เรดซูดานสาม (Red sudan III) ด้วยอัตราส่วน 1:10,000 โดยน้ำหนักเช่นเดียวกัน คุณสมบัติของของเหลวที่ใช้แสดงในตารางที่ 2

## ตารางที่ 1 คุณสมบัติของดินทรายตัวอย่าง

คุณสมบัติ	ผลการทดสอบ
ความหนาแน่นของดิน ( $g/cm^3$ )	1.64
ความถ่วงจำเพาะ	2.64
สัมประสิทธิ์ของความสม่ำเสมอ ( $C_u$ )	1.36
สัมประสิทธิ์ของความโค้ง ( $C_c$ )	0.96
Soil Classification (USCS)	SP

## ตารางที่ 2 คุณสมบัติของของเหลวที่ใช้ในการทดสอบ

ของเหลว	คุณสมบัติ ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส		
	ความถ่วงจำเพาะ ( $g/cm^3$ )	ความหนืด ( $mm^2/s$ )	ความดันไอ (mmHg)
น้ำ	0.998	1	17.54
น้ำมันดีเซล	0.865	7	0.4

การทดสอบทำโดยการเตรียมตัวอย่างทราย 40 กรัม ผสมน้ำ และน้ำมันดีเซล รวมถึงนำทรายผสมน้ำและน้ำมันดีเซล ที่ความอิ่มตัวของของเหลวแตกต่างกันกลุ่มละ 20 ตัวอย่างเป็นจำนวนทั้งสิ้น 60 ตัวอย่าง จากนั้นทำการบรรจุตัวอย่างลงในอุปกรณ์บรรจุตัวอย่างทรงกระบอกมีเส้นผ่าศูนย์กลาง 4 ซม. ความสูง 1.96 ซม. และปริมาตรเฉลี่ย 24.64 ลบ.ซม. โดยควบคุมความหนาแน่นของทรายตัวอย่างเท่ากับ 1.64 กรัม/ลบ.ซม. อุปกรณ์บรรจุตัวอย่างแสดงดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 อุปกรณ์บรรจุตัวอย่างดิน



รูปที่ 2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ

จากนั้นทำการถ่ายภาพตัวอย่างด้วยกล้องดิจิทัลจำนวน 2 ตัว โดยกล้องแต่ละตัวทำการติดตั้งฟิลเตอร์กรองแสงให้ผ่านที่ความยาวคลื่นแสง 450 นาโนเมตร และ 640 นาโนเมตร โดยห้องทดลองมีการควบคุมอุณหภูมิที่ 20 องศาเซลเซียส และควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ที่ 70 เปอร์เซ็นต์ เพื่อป้องกันการระเหยของของเหลว การติดตั้งอุปกรณ์ในการทดสอบแสดงในรูปที่ 2 และตัวอย่างดินที่ระดับการอิ่มตัวของของเหลวต่างๆกันแสดงในรูปที่ 3 ภาพถ่ายที่ได้ถูกนำไปวิเคราะห์เพื่อหาค่าความหนาแน่นเชิงแสงเฉลี่ยที่ความยาวคลื่นแสง 450 นาโนเมตร และ 640 นาโนเมตร โดยใช้โปรแกรมการคำนวณที่เขียนบนซอฟต์แวร์ MatLab



รูปที่ 3 ตัวอย่างดินที่ความอิ่มตัวของของเหลวต่างๆ

### 3. ผลการวิจัย

ความอิ่มตัวของน้ำ และ น้ำมันดีเซลในทราย สามารถคำนวณได้จากปริมาณของเหลวที่ใช้ในการเตรียมตัวอย่างแต่ละตัวอย่าง และจากการวิเคราะห์ภาพถ่ายสามารถคำนวณหาค่าความหนาแน่นเชิงแสงเฉลี่ยที่ความยาวคลื่นแสง 450 นาโนเมตร และ 640 นาโนเมตร ความสัมพันธ์ของค่าความหนาแน่นเชิงแสงเฉลี่ยและความอิ่มตัวของน้ำและน้ำมันดีเซลในทรายที่ความยาวคลื่นแสง 450 นาโนเมตร และ 640 นาโนเมตร แสดงดังสมการที่ (4) และ (5) ตามลำดับ

$$D_{450} = 0.181S_w + 0.359S_o + 0.246 \quad (R^2 = 0.83) \quad (4)$$

$$D_{640} = 0.301S_w + 0.252S_o + 0.128 \quad (R^2 = 0.95) \quad (5)$$

ระนาบแสดงความสัมพันธ์ของค่าความหนาแน่นเชิงแสงเฉลี่ยและความอิ่มตัวของน้ำ และ น้ำมันดีเซลในทราย แสดงดังรูปที่ 4 จากสมการที่ (4) และ (5) สามารถนำไปประมาณค่าความอิ่มตัวของน้ำและน้ำมันดีเซลในทราย ณ เวลาใดๆได้จากสมการที่ (6) และ (7)

$$\Delta S_w = 11.274\Delta D_{640} - 9.560\Delta D_{450} \quad (6)$$

$$\Delta S_o = -2.899\Delta D_{640} + 4.821\Delta D_{450} \quad (7)$$

เมื่อ  $\Delta S_w = S_w' - S_w^0$

$$\Delta S_o = S_o' - S_o^0$$

$$\Delta D_{450} = D_{450}' - D_{450}^0$$

$$\Delta D_{640} = D_{640}' - D_{640}^0$$

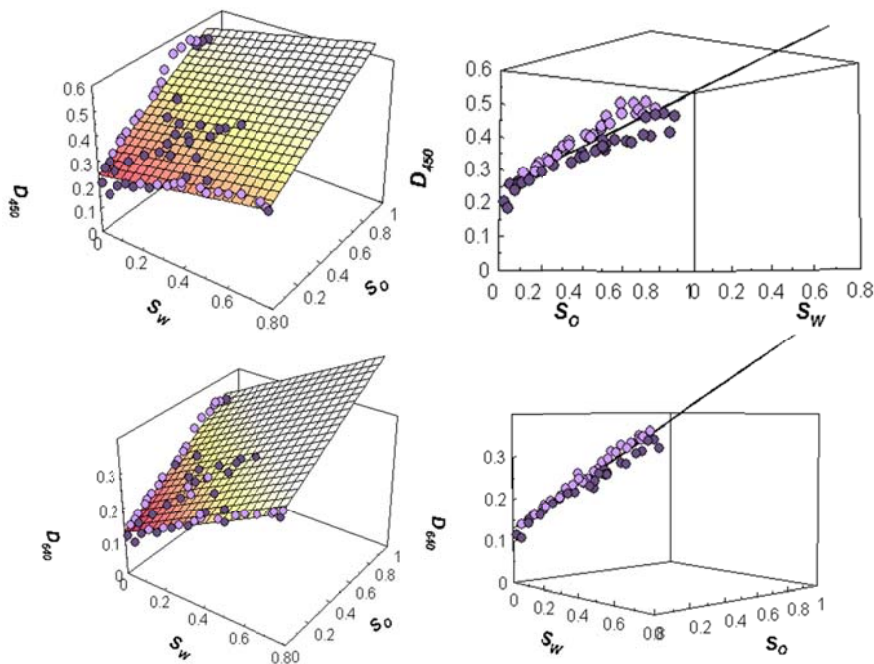
โดยที่

$S_w'$  และ  $S_o'$  คือ ความอิ่มตัวของน้ำ และ น้ำมันดีเซล ณ เวลาใดๆ

$S_w^0$  และ  $S_o^0$  คือ ความอิ่มตัวของน้ำ และ น้ำมันดีเซล ขณะเริ่มทำการทดสอบ

$D_{450}'$  และ  $D_{640}'$  คือ ค่าความหนาแน่นเชิงแสงเฉลี่ยของภาพถ่ายที่ 450 นาโนเมตร และ 640 นาโนเมตร ณ เวลาใดๆ

$D_{450}^0$  และ  $D_{640}^0$  คือ ค่าความหนาแน่นเชิงแสงเฉลี่ยของภาพถ่ายที่ 450 นาโนเมตร และ 640 นาโนเมตร ขณะเริ่มทำการทดสอบ



รูปที่ 4 ระบายความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นเชิงแสงเฉลี่ยและความอิ่มตัวของน้ำและน้ำมันดีเซลใน  
ทราย

#### 4. สรุปผลและอภิปรายผล

จากการทดลองพบว่าค่าสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจ (coefficient of determination,  $R^2$ ) ของความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นเชิงแสงเฉลี่ยและความอิ่มตัวของน้ำ และ น้ำมันดีเซลในทรายที่ความยาวคลื่นแสง 640 นาโนเมตร มีค่าสูงที่สุดคือ 0.95 ส่วนค่าสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจของความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นเชิงแสงเฉลี่ยและความอิ่มตัวของน้ำ และ น้ำมันดีเซลในทรายในช่วงความยาวคลื่นแสง 450 นาโนเมตร มีค่าต่ำที่สุดคือ 0.83 เป็นที่สังเกตว่าค่าสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจของความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นเชิงแสงเฉลี่ยและความอิ่มตัวของน้ำและของเหลวในทรายที่ความยาวคลื่นแสง 640 นาโนเมตร มีค่าสูงกว่าที่ความยาวคลื่นแสง 450 นาโนเมตร

#### 5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนบางส่วนโดยทุนอุดหนุนการวิจัยและพัฒนาเพื่อส่งเสริมความร่วมมือกับหน่วยงานภายนอก จากคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา เลขที่ 16/2555

#### 6. เอกสารอ้างอิง

Damault, 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 31(3-4): 337-348.

- 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 4: 373-395.
- Flores, G., Katsumi, T., Inui, T. and Kamon, M. 2010. **Examination of LNAPL Migration in Porous Media Using a Simplified Image Analysis Method.** Proc. 9<sup>th</sup> Geo-environmental Engineering, Seoul, Korea: 83-90.
- Kechavarzi, C., Soga, K. and Wiart, 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 46(3-4): 265-293.
- 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 31(3-4): 315-335.
- 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. 23<sup>rd</sup> KKCNN Symposium on Civil Engineering, Taiwan: 379-382.