



รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

การหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นเชิงแสงเฉลี่ยและระดับการอิ่มตัวของของเหลวในดินทรายด้วยเทคนิคการวิเคราะห์ภาพถ่ายเชิงซ้อน
Investigation of Average Optical Density and Degree of Liquids Saturation in Sand by Multispectral Image Analysis Method

สิทธิภัทร์ เอื้ออภิวัชร์
ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยบูรพา

โครงการวิจัยประเภทงบประมาณเงินรายได้ จากเงินอุดหนุนรัฐบาล
(งบประมาณแผ่นดิน) ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2559 มหาวิทยาลัยบูรพา

รหัสโครงการ 222682
สัญญาเลขที่ 168/2559

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

การหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นเชิงแสงเฉลี่ยและระดับการ
อิ่มตัวของของเหลวในดินทรายด้วยเทคนิคการวิเคราะห์ภาพถ่ายเชิงซ้อน
(Investigation of Average Optical Density and Degree of Liquids
Saturation in Sand by Multispectral Image Analysis Method)

สิทธิภัทร์ เอื้ออภิวรรักษ์
ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยบูรพา

มีนาคม 2561

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพาที่ให้ความสะดวกด้านเครื่องมือและห้องปฏิบัติการ เจ้าหน้าที่ธุรการ และช่างเทคนิคประจำภาควิชาวิศวกรรมโยธาทุกท่าน ที่ช่วยประสานงานและช่วยเหลือเป็นอย่างดี ขอขอบคุณทุนสนับสนุนการวิจัยจากงบประมาณเงินรายได้จากเงินอุดหนุนจากรัฐบาล (งบประมาณเงินแผ่นดิน) ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2559 มหาวิทยาลัยบูรพา ผ่านสำนักงานคณะกรรมการการวิจัยแห่งชาติ เลขที่สัญญา 162/2559

สุดท้ายนี้ผู้วิจัยหวังเป็นอย่างยิ่งว่าผลงานวิจัยชิ้นนี้จะเป็นฐานข้อมูล เพื่อเป็นประโยชน์ในการศึกษาพฤติกรรมการปนเปื้อนของดินสำหรับดินทรายชนิดต่างๆ ด้วยเทคนิค SIAM ต่อไป

บทสรุปสำหรับผู้บริหาร (Executive Summary)

ข้าพเจ้า นายสิทธิภัทร์ เอื้ออภิวรรักษ์ พนักงานมหาวิทยาลัย ตำแหน่งอาจารย์ สังกัดภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัย เรื่อง “การหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นเชิงแสงเฉลี่ยและระดับการอิ่มตัวของของเหลวในดินทรายด้วยเทคนิคการวิเคราะห์ภาพถ่ายเชิงซ้อน” (Investigation of Average Optical Density and Degree of Liquids Saturation in Sand by Multispectral Image Analysis Method) จากทุนอุดหนุนการวิจัย งบประมาณเงินรายได้ (เงินอุดหนุนจากรัฐบาล) ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2559 รหัสโครงการ 222682 สัญญาเลขที่ 168/2559 ได้รับงบประมาณรวมทั้งสิ้น 360,000 บาท ระยะเวลา 1 ปี ระหว่างวันที่ 1 ตุลาคม 2558 ถึงวันที่ 30 กันยายน 2559 ขณะนี้การดำเนินการวิจัยเสร็จสิ้นและได้ทำการตีพิมพ์เผยแพร่เรียบร้อยแล้ว โดยมีรายละเอียดของการวิจัยดังนี้

งานวิจัยนี้จะศึกษาหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นเชิงแสงเฉลี่ยและระดับการอิ่มตัวของของเหลวในดินทรายชนิดต่างๆ 5 ชนิด ได้แก่ ดินทรายออกตาวา 3820 ดินทรายออกตาวา 3821 ดินทรายอยุธยา ดินทรายชลบุรี และดินทรายโทยุระ ส่วนของเหลวที่ใช้ในการทดสอบ คือ น้ำ และ ซีฟิ่งเหลว โดยซีฟิ่งเหลวจะทำการย้อมสีแดงด้วยเรดซูดานสาม (Red Sudan III) ด้วยอัตราส่วน 1:10,000 โดยน้ำหนัก ทำการศึกษาคุณสมบัติทางด้านกายภาพและองค์ประกอบทางเคมีของดินทรายชนิดต่างๆ

ค่าความหนาแน่นเชิงแสงเฉลี่ยสามารถหาได้โดยถ่ายภาพตัวอย่างทรายผสมกับของเหลวที่ระดับการอิ่มตัวต่างๆ ด้วยกล้องดิจิทัลจำนวน 2 ตัว โดยกล้องแต่ละตัวทำการติดตั้งฟิลเตอร์กรองแสงให้ผ่านที่ความถี่ 450 นาโนเมตร และ 640 นาโนเมตร รูปถ่ายที่ได้ถูกนำไปวิเคราะห์เพื่อหาค่าความหนาแน่นเชิงแสงเฉลี่ยที่ความถี่ 450 นาโนเมตร และ 640 นาโนเมตรโดยใช้โปรแกรมการคำนวณที่เขียนบนซอฟต์แวร์ MatLab จากนั้นวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นเชิงแสงเฉลี่ยและระดับการอิ่มตัวของของเหลวในทรายชนิดต่างๆและวิเคราะห์ผลกระทบของลักษณะทางกายภาพและคุณสมบัติทางเคมีของดินทราย ที่มีผลต่อความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นเชิงแสงเฉลี่ยและระดับการอิ่มตัวของของเหลว จากการศึกษาพบว่าปัจจัยที่มีผลต่อความสัมพันธ์ดังกล่าวได้แก่ ขนาดคละของเม็ดดิน ลักษณะพื้นผิวของเม็ดดิน ธาตุในดิน และสีของดิน

งานวิจัยนี้ได้ทำการตีพิมพ์เผยแพร่ในวารสารวิชาการระดับชาติ โดยมีรายละเอียดดังนี้

Sitthiphat Eua-Apiwatch and Siam Yimsiri. (2016). Investigation of Average Optical Density and Degree of Liquids Saturation in Sand by Image Analysis Method. *KKU Engineering Journal*. 43(S1), 147-151

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้จะศึกษาหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นเชิงแสงเฉลี่ยและระดับการอิมตัวของของเหลวในดินทรายชนิดต่างๆ 5 ชนิด ได้แก่ ดินทรายออกตาวา 3820 ดินทรายออกตาวา 3821 ดินทรายอยุธยา ดินทรายชลบุรี และดินทรายไทยุระ ส่วนของเหลวที่ใช้ในการทดสอบ คือ น้ำ และ ชี๊ฝิ่งเหลว โดยชี๊ฝิ่งเหลวจะทำการย้อมสีแดงด้วยเรดซูดานสาม (Red Sudan III) ด้วยอัตราส่วน 1:10,000 โดยน้ำหนัก ทำการศึกษาคุณสมบัติทางด้านกายภาพและองค์ประกอบทางเคมีของดินทรายชนิดต่างๆ เช่น การทดสอบหาความถ่วงจำเพาะ (Specific gravity) การทดสอบการกระจายตัวของเม็ดดิน (Sieve analysis) การวิเคราะห์สารอินทรีย์ในดินด้วยการเผา (Ignition Loss Method) การถ่ายภาพขยายอนุภาพด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM)

ค่าความหนาแน่นเชิงแสงเฉลี่ยสามารถหาได้โดยถ่ายภาพตัวอย่างทรายผสมกับของเหลวที่ระดับการอิมตัวต่างๆ ด้วยกล้องดิจิทัลจำนวน 2 ตัว โดยกล้องแต่ละตัวทำการติดตั้งฟิลเตอร์กรองแสงให้ผ่านที่ความถี่ 450 นาโนเมตร และ 640 นาโนเมตร รูปถ่ายที่ได้ถูกนำไปวิเคราะห์เพื่อหาค่าความหนาแน่นเชิงแสงเฉลี่ยที่ความถี่ 450 นาโนเมตร และ 640 นาโนเมตรโดยใช้โปรแกรมการคำนวณที่เขียนบนซอฟต์แวร์ MatLab จากนั้นวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นเชิงแสงเฉลี่ยและระดับการอิมตัวของของเหลวในทรายชนิดต่างๆและวิเคราะห์ผลกระทบของลักษณะทางกายภาพและคุณสมบัติทางเคมีของดินทราย ที่มีผลต่อความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นเชิงแสงเฉลี่ยและระดับการอิมตัวของของเหลว

การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นเชิงแสงเฉลี่ยและระดับการอิมตัวของของเหลวในดินทรายแตกต่างกัน 5 ชนิดพบว่า ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นเชิงแสงเฉลี่ยและระดับการอิมตัวของของเหลวในดินทรายออกตาวา 3820 ออกตาวา 3821 ดินทรายไทยุระ มีความสัมพันธ์กันแบบแปรผันตรง กล่าวคือเมื่อระดับการอิมตัวของของเหลวในดินทรายเพิ่มมากขึ้น ค่าความเข้มแสงเฉลี่ยเพิ่มมากขึ้นตามไปด้วย ส่วนดินทรายอยุธยา ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นเชิงแสงเฉลี่ยและระดับการอิมตัวของของเหลวมีความสัมพันธ์กันแบบผกผัน กล่าวคือ เมื่อระดับการอิมตัวของของเหลวในดินทรายเพิ่มมากขึ้น ค่าความเข้มแสงเฉลี่ยมีค่าลดลง ส่วนในดินทรายชลบุรี ไม่พบความสัมพันธ์แบบเชิงเส้นระหว่างค่าความหนาแน่นเชิงแสงเฉลี่ยและระดับการอิมตัวของของเหลว โดยปัจจัยที่มีผลต่อความสัมพันธ์ดังกล่าวได้แก่ ขนาดคละของเม็ดดิน ลักษณะพื้นผิวของเม็ดดิน ธาตุในดิน สีของดิน

คำสำคัญ : ความหนาแน่นเชิงแสงเฉลี่ย, ระดับการอิมตัว

Abstract

This research aims to study the factors affecting the relationship between liquids saturation and average optical density in five different porous media (i.e., Ottawa#3820, Ottawa#3821, Toyoura sand, Ayutthaya sand, and Chonburi sands). Red-dyed Paraffin liquid with Red Sudan III (1:10000 by weight) was employed as experimental liquids in this study.

Physical and chemical properties of both porous media and liquids were investigated in laboratory including specific gravity, sieve analysis, Ignition loss method, Scanning Electron Microscope (SEM), viscosity, vapor pressure, and transmittance properties.

All samples were prepared at varying water and paraffin liquid saturations and compacted into cylindrical container, and then image of each sample was taken by 2 consumer-grade digital cameras fitted with 2 different band-pass filters (450 and 640 nm). Images were analyzed by an in-house program to obtain the average optical density for each spectral band. Graphic plots of degree of liquid saturation versus average optical density were constructed for each porous medium.

The results indicated that average optical density in both spectral bands were linearly proportion to degree of liquids saturation for all porous media except Ayutthaya sand which average optical density were inversely proportional to degree of liquid saturation and There were no linearly relationship between average optical density and degree of liquid saturation in Chonburi sand. Factors affecting the relationship between liquids saturation and average optical density were particles size distribution, surface texture of porous media, elements in porous media, and initial color of dry state of porous media.

Keywords: Average Optical Density, Saturation

สารบัญ

| เนื้อหา | หน้า |
|--|-----------|
| กิตติกรรมประกาศ | ก |
| บทสรุปสำหรับผู้บริหาร | ข |
| บทคัดย่อภาษาไทย | ค |
| บทคัดย่อภาษาอังกฤษ | ง |
| สารบัญ | จ |
| สารบัญตาราง | ช |
| สารบัญรูป | ซ |
| บทที่ 1 บทนำ | 1 |
| 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา | 1 |
| 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย | 2 |
| 1.3 ขอบเขตการศึกษา | 2 |
| 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ | 3 |
| บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง | 4 |
| 2.1 ความหนาแน่นเชิงแสงเฉลี่ย (Average Optical Density, AOD) | 4 |
| 2.2 คุณสมบัติการผ่านได้ของแสงในของเหลว | 5 |
| 2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง | 6 |
| บทที่ 3 วิธีการศึกษา | 10 |
| 3.1 คุณสมบัติทางกายภาพและองค์ประกอบทางเคมีของดินทราย | 10 |
| 3.2 คุณสมบัติทางกายภาพของของเหลว | 10 |
| 3.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นเชิงแสงเฉลี่ยและการอิมมิตัวของของเหลว | 10 |
| บทที่ 4 ผลการทดสอบ | 14 |
| 4.1 ผลการศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพของดินทราย | 14 |
| 4.2 ผลการถ่ายภาพขยายอนุภาคด้วยเครื่อง SEM | 15 |
| 4.3 ผลการศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพของของเหลว | 20 |
| 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นเชิงแสงเฉลี่ยและการอิมมิตัวของของเหลว | 21 |

| | |
|--|-----------|
| บทที่ 5 วิเคราะห์และสรุปผลการทดสอบ | 25 |
| 5.1 ค่าความหนาแน่นเชิงแสงเฉลี่ยและระดับการอิมตัวของของเหลว | 25 |
| 5.2 ปัจจัยที่มีผลต่อความสัมพันธ์ | 25 |
| | |
| เอกสารอ้างอิง | 29 |
| ภาคผนวก ก ผลผลิต (Output) | 30 |
| ภาคผนวก ข รายงานการเงิน | 36 |
| ภาคผนวก ค ประวัตินักวิจัย | 38 |

สารบัญตาราง

| ตารางที่ | หน้า |
|---|------|
| 3.1 การทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพและองค์ประกอบทางเคมีของดินทราย | 10 |
| 4.1 ผลการศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพของดินทราย | 14 |
| 4.2 ผลการศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพของของเหลว | 20 |
| 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นเชิงแสงเฉลี่ยและระดับการอิ่มตัวของของเหลว | 20 |
| 4.4 สมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นเชิงแสงเฉลี่ยและระดับการอิ่มตัวของของเหลวในดินทราย | 24 |
| 5.1 ขนาดคละของดินทราย | 26 |
| 5.2 สภาพพื้นผิวของทรายแต่ละชนิด | 26 |
| 5.3 สมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นเชิงแสงเฉลี่ยและระดับการอิ่มตัวของของเหลวในดินทราย | 27 |
| 5.4 สมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นเชิงแสงเฉลี่ยและระดับการอิ่มตัวของของเหลวในทรายชลบุรี | 27 |
| 5.5 ค่าความเข้มแสงเฉลี่ยเริ่มต้นของดินทรายที่ความความยาวคลื่น 450 และ 640 นาโนเมตร | 28 |

สารบัญรูปภาพ

| รูปที่ | หน้า |
|--|------|
| 2.1 คุณสมบัติการผ่านได้ของแสงในน้ำขุ่นด้วยสีฟ้าและซีฟิ่งเหลวขุ่นด้วยสีแดง | 5 |
| 2.2 ตัวอย่างดินทรายซิลิกาที่ระดับการอิ่มตัวของน้ำและ Sotrol ที่แตกต่างกัน | 7 |
| 2.3 ตัวอย่างการหาการเคลื่อนที่ของ LNAPL โดยใช้โปรแกรม MatLab | 8 |
| 2.4 การเตรียมตัวอย่างที่ใช้ในการสอบเทียบความสัมพันธ์ของวิธีวิเคราะห์ภาพถ่ายอย่างง่าย | 9 |
| 3.1 อุปกรณ์บรรจุตัวอย่างดิน | 11 |
| 3.2 ฟิลเตอร์กรองแสง | 11 |
| 3.3 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ | 12 |
| 3.4 ขั้นตอนการวิเคราะห์ภาพถ่าย | 13 |
| 4.1 เส้นโค้งแสดงการกระจายตัวของอนุภาคดิน | 11 |
| 4.2 ผลการถ่ายภาพขยายอนุภาคด้วยเครื่อง SEM ของดินทรายออกตาวา 3820 | 15 |
| 4.3 ผลการถ่ายภาพขยายอนุภาคด้วยเครื่อง SEM ของดินทรายออกตาวา 3821 | 15 |
| 4.4 ผลการถ่ายภาพขยายอนุภาคด้วยเครื่อง SEM ของดินทรายอยุธยา | 16 |
| 4.5 ผลการถ่ายภาพขยายอนุภาคด้วยเครื่อง SEM ของดินทรายชลบุรี | 16 |
| 4.6 ผลการถ่ายภาพขยายอนุภาคด้วยเครื่อง SEM ของดินทรายไทยุระ | 17 |
| 4.7 กราฟแสดงการกระจายตัวของพลังงานธาตุ (EDX Spectrum) ของดินทรายออกตาวา 3820 | 17 |
| 4.8 กราฟแสดงการกระจายตัวของพลังงานธาตุ (EDX Spectrum) ของดินทรายออกตาวา 3821 | 18 |
| 4.9 กราฟแสดงการกระจายตัวของพลังงานธาตุ (EDX Spectrum) ของดินทรายอยุธยา | 18 |
| 4.10 กราฟแสดงการกระจายตัวของพลังงานธาตุ (EDX Spectrum) ของดินทรายชลบุรี | 18 |
| 4.11 กราฟแสดงการกระจายตัวของพลังงานธาตุ (EDX Spectrum) ของดินทรายไทยุระ | 19 |
| 4.12 ผลของการศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของดินทรายโดยวิธี EDX | 19 |
| 4.13 คุณสมบัติการผ่านได้ของแสงในน้ำ และ ซีฟิ่งเหลวขุ่นด้วยสีแดง | 20 |

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

แหล่งพลังงานจากปิโตรเลียม เป็นปัจจัยที่สำคัญในการพัฒนาประเทศ และจากการขยายตัวของเศรษฐกิจในประเทศไทย ส่งผลให้อัตราการใช้น้ำมันเชื้อเพลิงทั้งในภาคอุตสาหกรรมและการคมนาคมขนส่งเพิ่มขึ้นเป็นอย่างมาก ทั้งนี้การใช้ประโยชน์จากผลิตภัณฑ์ปิโตรเลียมและน้ำมันเชื้อเพลิงนั้น หากมีการจัดการและมาตรการป้องกันการรั่วไหลและปนเปื้อนสู่สิ่งแวดล้อมที่ไม่เหมาะสม ทั้งในขั้นตอนการผลิต การแปรรูป การขนส่ง การขนถ่ายผลิตภัณฑ์แล้ว อาจส่งผลกระทบต่อสุขภาพและทรัพย์สินของมนุษย์ได้ โดยปกติน้ำมันเชื้อเพลิงจะทำการจัดเก็บไว้ในถังน้ำมันใต้ดิน (Underground Storage Tank, UST) การขาดการบำรุงรักษาและขาดระบบป้องกันการรั่วไหลของของถังน้ำมันใต้ดินที่เหมาะสมเป็นสาเหตุหลักของการปนเปื้อนของน้ำมันลงสู่ชั้นดินโดยเฉพาะอย่างยิ่งในชั้นดินทรายซึ่งมีความสามารถในการซึมผ่านของน้ำสูง มีโอกาสในการกระจายตัวของน้ำมันและเกิดการปนเปื้อนวงกว้าง น้ำมันเชื้อเพลิงเหล่านี้จัดว่าเป็นของเหลวที่ไม่ผสมกับน้ำและไม่ละลายน้ำ (Non-Aqueous Phase Liquids, NAPLs) โดยของเหลวจำพวกนี้สามารถจำแนกตามค่าความถ่วงจำเพาะได้ออกเป็นสองชนิด คือ ชนิดที่ค่าความถ่วงจำเพาะมากกว่าน้ำ (Dense Non-Aqueous Phase Liquids, DNAPLs) และ ชนิดที่ค่าความถ่วงจำเพาะน้อยกว่าน้ำ (Light Non-Aqueous Phase Liquids, LNAPLs)

นักวิจัยส่วนใหญ่ศึกษาพฤติกรรมของการปนเปื้อนของ NAPLs ในดินโดยทำการศึกษาการเคลื่อนตัวของ NAPLs ในคอลัมน์ 1 มิติ และแท่ง 2 มิติ ซึ่งค่าระดับการอิ่มตัวของ NAPLs และน้ำ เป็นตัวแปรที่สำคัญอย่างยิ่งในการทำนายพฤติกรรมของ LNAPLs โดยทั่วไปวิธีที่ใช้ในการประมาณค่าระดับการอิ่มตัวของน้ำและน้ำมันในดินได้แก่การใช้รังสีแกมมา (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 ซึ่งวิธีการต่างๆเหล่านี้ใช้งบประมาณในการศึกษาวิจัยค่อนข้างสูง การติดตั้งอุปกรณ์การทดลองมีความซับซ้อนและอาจเป็นอันตรายต่อผู้วิจัยได้

Kechavarzi และคณะ (2000) ได้นำเสนอวิธีการวิเคราะห์ค่าระดับการอิ่มตัวของของเหลวชนิด LNAPLs โดยการวิเคราะห์ภาพถ่ายเชิงซ้อน (Multispectral Image Analysis Method, MIAM) ซึ่งเป็นวิธีการทดสอบแบบไม่ทำลาย ปลอดภัย และสามารถประเมินค่าระดับการอิ่มตัวของของเหลวได้ภายใต้สภาพพลวัต โดยพบความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นเชิงแสงเฉลี่ย (Average Optical Density, AOD) และระดับการอิ่มตัวของของเหลวในทรายมีความสัมพันธ์แบบเส้นตรง (Linear relationship) เมื่อ

ทำการถ่ายภาพดินทรายตัวอย่างและคำนวณค่าความหนาแน่นเชิงแสงเฉลี่ยจะสามารถทำนายค่าระดับการอิมตัวของของเหลวในดินทรายได้

Flores และคณะ (2011) นำเสนอวิเคราะห์ภาพถ่ายอย่างง่าย (Simplified Image Analysis Method, SIAM) เพื่อใช้การศึกษาการวิเคราะห์ค่าระดับการอิมตัวของของเหลว ในดินทราย และสามารถประเมินค่าระดับการอิมตัวของของเหลวได้ โดยสามารถประมาณค่าระดับการอิมตัวของของเหลวได้ทุกตำแหน่งในภาพถ่ายที่ใช้ในการวิเคราะห์ Floresและคณะ (2011) พบว่าวิธีการวิเคราะห์ภาพถ่ายเชิงซ้อน ซึ่งถูกนำเสนอโดย Kechavarzi และคณะ (2000) มีการประมาณค่าระดับการอิมตัวของของเหลวความคลาดเคลื่อนไปจากความเป็นจริงเนื่องจากปัญหาการหักเหของมุมกล้อง และสมการที่ใช้ในการประมาณค่าระดับการอิมตัวของของเหลวเป็นสมการเดียวกันในทุกๆตำแหน่งในภาพถ่ายที่ใช้ในการวิเคราะห์ อย่างไรก็ตาม ก่อนที่จะใช้เทคนิค SIAM ยังคงต้องมีการตรวจสอบความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นเชิงแสงเฉลี่ยและระดับการอิมตัวของของเหลวในดินทรายก่อน Kechavarzi (2000) ได้ทำการศึกษาค่าความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นเชิงแสงเฉลี่ยและระดับการอิมตัวของของเหลวในทรายซิลิกาเพียงชนิดเดียว ส่วน Flores (2011) ได้ทำการศึกษาในดินทรายทราย นอกจากนี้ยังไม่มีการยืนยันว่าทรายชนิดอื่นๆ มีความสัมพันธ์แบบเดียวกับทรายซิลิกาหรือไม่ ดังนั้นจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องทำการศึกษาผลกระทบของลักษณะทางกายภาพและคุณสมบัติทางเคมีของดินทรายชนิดอื่นๆ ที่มีผลต่อความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นเชิงแสงเฉลี่ยและระดับการอิมตัวของของเหลว ทั้งนี้เพื่อนำความสัมพันธ์ที่ได้ไปประมาณค่าระดับการอิมตัวของของเหลวในการศึกษาพฤติกรรมการปนเปื้อนของน้ำมันเชื้อเพลิงในคอลัมน์ 1 มิติ และแท่ง 2 มิติสำหรับดินทรายชนิดต่างๆ ด้วยเทคนิค SIAM ต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 1.2.1 เพื่อศึกษาหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นเชิงแสงเฉลี่ยและระดับการอิมตัวของของเหลวในทรายชนิดต่างๆ
- 1.2.2 เพื่อศึกษาผลกระทบของลักษณะทางกายภาพและคุณสมบัติทางเคมีของดินทราย ที่มีผลต่อความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นเชิงแสงเฉลี่ยและระดับการอิมตัวของของเหลว

1.3 ขอบเขตการศึกษา

งานวิจัยนี้จะศึกษาหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นเชิงแสงเฉลี่ยและระดับการอิมตัวของของเหลวในทรายชนิดต่างๆ 4 ชนิด ได้แก่ ทรายออกตาวา ทรายทราย ทรายทราย ทรายทราย ส่วนของเหลวที่ใช้ในการทดสอบ คือ น้ำ และ น้ำมันดีเซล โดยน้ำที่ใช้ในการทดสอบถูกย้อมสีฟ้าด้วยบิลเลียนบูลเอฟซีเอฟ (Brilliant Blue FCF) ด้วยอัตราส่วน 1:10,000 โดยน้ำหนัก ส่วนซีฟิงเหลว และ น้ำมันดีเซลทำการย้อมสีแดงด้วยเรดซูดานสาม (Red Sudan III) ด้วยอัตราส่วน 1:10,000 โดยน้ำหนัก ทำการศึกษาคุณสมบัติทางด้านกายภาพและองค์ประกอบทางเคมีของดินทรายชนิดต่างๆ เช่น การทดสอบหาความถ่วงจำเพาะ (Specific gravity) การทดสอบการกระจายตัวของเม็ดดิน (Sieve analysis) การวิเคราะห์

สารอินทรีย์ในดินด้วยการเผา (Ignition Loss Method) การถ่ายภาพขยายอนุภาคด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM) การวิเคราะห์องค์ประกอบของดินทรายด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ โดย X-Ray Diffraction (XRD) และการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของดินทรายโดยวิธี X-Ray Fluorescence

ค่าความหนาแน่นเชิงแสงเฉลี่ยสามารถหาได้โดยถ่ายภาพตัวอย่างทรายผสมกับของเหลวที่ระดับการอิ่มตัวต่างๆ ด้วยกล้องดิจิทัลจำนวน 2 ตัว โดยกล้องแต่ละตัวทำการติดตั้งฟิลเตอร์กรองแสงให้ผ่านที่ความถี่ 450 นาโนเมตร และ 640 นาโนเมตร โดยห้องทดลองมีการควบคุมอุณหภูมิที่ 25 องศาเซลเซียส และควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ที่ 70 เปอร์เซ็นต์ เพื่อป้องกันการระเหยของของเหลว รูปถ่ายที่ได้ถูกนำไปวิเคราะห์เพื่อหาค่าความหนาแน่นเชิงแสงเฉลี่ยที่ความถี่ 450 นาโนเมตร และ 640 นาโนเมตร โดยใช้โปรแกรมการคำนวณที่เขียนบนซอฟต์แวร์ MatLab จากนั้นวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นเชิงแสงเฉลี่ยและระดับการอิ่มตัวของของเหลวในทรายชนิดต่างๆ และวิเคราะห์ผลกระทบของลักษณะทางกายภาพและคุณสมบัติทางเคมีของดินทราย ที่มีผลต่อความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นเชิงแสงเฉลี่ยและระดับการอิ่มตัวของของเหลว

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.4.1 สามารถระบุถึงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มแสงเฉลี่ยและค่าระดับการอิ่มตัวของของเหลวในดินทรายแต่ละชนิด
- 1.4.2 ทราบถึงปัจจัยที่มีผลต่อความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มแสงเฉลี่ยและค่าระดับการอิ่มตัวของของเหลวในดินทราย

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การศึกษาวิจัยเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นเชิงแสงเฉลี่ยและระดับการอิมตัวของของเหลวในทรายชนิดต่างๆ ด้วยเทคนิคการวิเคราะห์ภาพถ่ายเชิงซ้อนเป็นจุดเริ่มต้นเพื่อพิสูจน์ว่าดินทรายชนิดต่างๆที่นำมาศึกษาในครั้งนี้สามารถนำไปใช้เป็นวัสดุในการจำลองการเคลื่อนตัวของสารปนเปื้อนจำพวก NAPL ในชั้นดินได้ โดยหากพบว่าความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นเชิงแสงเฉลี่ยและระดับการอิมตัวของของเหลวในทรายชนิดต่างๆมีความสัมพันธ์กันแบบเชิงเส้น ก็จะสามารถประยุกต์ใช้เทคนิคการวิเคราะห์ภาพถ่ายอย่างง่าย (Simplified Image Analysis Method, SIAM) (Flores, 2011) ในการตรวจวัดค่าระดับการอิมตัวของของเหลวในการจำลองเพื่อศึกษาพฤติกรรมของการเคลื่อนตัวของ NAPL ในคอลัมน์ 1 มิติ และแท่งค์ 2 มิติ ต่อไป

2.1 ความหนาแน่นเชิงแสงเฉลี่ย (Average Optical Density, AOD)

ความหนาแน่นเชิงแสงเฉลี่ย (AOD) สามารถแสดงได้ดังสมการที่ (1)

$$D_i = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N d_{ji} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \left(-\log_{10} \left(\frac{I_{ji}^r}{I_{ji}^0} \right) \right) \quad (2.1)$$

| | | |
|--------|------------|--|
| 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) |

เทคนิคการวิเคราะห์ภาพถ่ายด้วยวิธีวิเคราะห์ภาพถ่ายเชิงซ้อน (Multi-spectral Image Analysis Method) จะใช้กล้องดิจิทัลจำนวน 2 ตัว โดยกล้องแต่ละตัวทำการติดตั้งฟิลเตอร์กรองแสงให้ผ่านที่ 2 ความถี่คือ 450 นาโนเมตร และ 640 นาโนเมตร ค่าความหนาแน่นเชิงแสงเฉลี่ยในแต่ละความถี่สามารถหาได้จากสมการที่ (2) และ (3) ตามลำดับ (Sudsang et al., 2010)

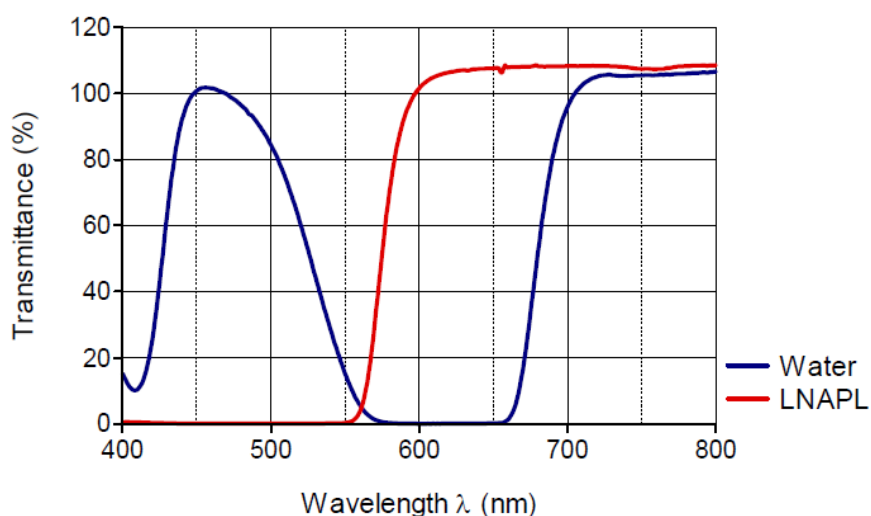
$$D_{450} = a \cdot S_w + b \cdot S_o + c \quad (2.2)$$

$$D_{640} = d \cdot S_w + e \cdot S_o + f \quad (2.3)$$

| | | |
|--------|-------------------------|---|
| โดยที่ | D_{450} | คือ ค่าความหนาแน่นเชิงแสงเฉลี่ยที่ความถี่ 450 นาโนเมตร (ไม่มีหน่วย) |
| | D_{640} | คือ ค่าความหนาแน่นเชิงแสงเฉลี่ยที่ความถี่ 640 นาโนเมตร (ไม่มีหน่วย) |
| | S_w | คือ ระดับการอิ่มตัวด้วยน้ำในดิน (ไม่มีหน่วย) |
| | S_o | คือ ระดับการอิ่มตัวด้วยน้ำมันในดิน (ไม่มีหน่วย) |
| | a, b, c, d, e และ f | คือ ค่าคงที่ (ไม่มีหน่วย) |

2.2 คุณสมบัติการผ่านได้ของแสงในของเหลว

Flores (2010) ได้ทำการทดสอบคุณสมบัติการผ่านได้ของแสงในช่วงความถี่ต่างๆ โดยใช้เครื่องมือ UV Spectrophotometer ในของเหลว 2 ชนิดคือ น้ำซึ่งถูกย้อมสีฟ้าด้วยบิลเลียนบูลเอฟซีเอฟ (Brilliant Blue FCF) ด้วยอัตราส่วน 1:10,000 โดยน้ำหนัก และ ขี้ผึ้งเหลว ซึ่งถูกย้อมด้วยสีแดงด้วยเรดซูดานสาม (Red Sudan III) ด้วยอัตราส่วน 1:10,000 พบว่า ที่ความถี่ 450 นาโนเมตร แสงสามารถเดินทางผ่านน้ำได้ 100% ในกรณีของขี้ผึ้งเหลว แสงถูกดูดซับไว้ทั้งหมด ไม่สามารถเดินทางผ่านขี้ผึ้งเหลวได้ ในทางตรงกันข้าม ที่ความถี่ 640 นาโนเมตร แสงสามารถเดินทางผ่านขี้ผึ้งเหลวได้มากกว่า 100% ส่วนในน้ำ แสงถูกดูดซับไว้ทั้งหมด ไม่สามารถเดินทางผ่านน้ำได้ คุณสมบัติการผ่านได้ของแสงในของเหลวทั้งสองชนิดแสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 2.1 คุณสมบัติการผ่านได้ของแสงในน้ำย้อมด้วยสีฟ้า และ ขี้ผึ้งเหลวย้อมด้วยสีแดง (Flores, 2010)

จากการศึกษาของ Flores, 2010 พบว่า ฟิเตอร์กรองแสงที่ความถี่ 450 นาโนเมตร และ 640 นาโนเมตร มีความเหมาะสมกับการทดลองเพื่อวัดระดับการอิ่มตัวของของเหลวโดยใช้เทคนิควิเคราะห์ภาพถ่าย เมื่อนำน้ำย้อมสีฟ้า และ ขี้ผึ้งเหลวย้อมสีแดง กรณีของน้ำมันดีเซลย้อมสีแดงด้วยเรดซูดานสาม (Red Sudan III) ด้วยอัตราส่วน 1:10,000 โดยน้ำหนัก ได้ทำการทดสอบคุณสมบัติการผ่านได้ของแสงที่ความถี่ต่างๆ โดยใช้เครื่องมือ UV Spectrophotometer พบว่ามีพฤติกรรมใกล้เคียงกับขี้ผึ้งเหลวย้อมสีแดง โดยที่ความถี่ 450 นาโนเมตร

แสงไม่สามารถผ่านได้ ส่วนที่ความถี่ 640 นาโนเมตร แสงสามารถผ่านได้ 95 % ดังนั้นในการศึกษาวิจัยในครั้งนี้ จึงใช้ฟิลเตอร์กรองแสงที่ความถี่ 450 นาโนเมตร และ 640 นาโนเมตร

2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Van Geel และ Sykes (1994) ได้ใช้เทคนิคการวิเคราะห์การสะท้อนของแสง (Light Reflection Method, LRM) ในการศึกษาพฤติกรรมเคลื่อนตัวของ n-heptane ในชั้นดินทรายซิลิกาซึ่งไม่อิ่มตัวในแท่งกึ่งสองมิติ โดยกล้องถ่ายรูปที่ใช้เป็นกล้องฟิล์มขนาด 35 มิลลิเมตร รูปภาพที่ได้จากกล้องฟิล์มจะถูกแปลงเป็นภาพถ่ายดิจิทัลขนาด 8 บิต เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ภาพถ่ายโดยการใช้โปรแกรม EASI ซึ่งเป็นโปรแกรมสำเร็จรูป เทคนิคการวิเคราะห์ภาพถ่ายมีความอ่อนไหวต่อสถานะของแสงเนื่องจากไม่สามารถที่จะควบคุมความเข้มของแสงให้คงที่ได้ตลอดระยะเวลาการทดลอง โดยการทดลองได้ใช้หลอดไฟทั้งสแตนด์ ขนาด 1000 วัตต์ ทำการทดลองโดยบดอัดทรายซิลิกาในสภาพแห้งในแท่ง ขนาด 150x120x6 ซม. และทำการปล่อยน้ำจากด้านล่างของแท่งเพื่อให้ตัวอย่างทรายซิลิกาอิ่มตัว หลังจากนั้นทำการลดระดับน้ำลง และ ทำการบันทึกภาพถ่ายที่เป็นสภาวะเริ่มต้นก่อนที่จะเกิดการเคลื่อนตัวของ n-heptane โดยจะใช้ภาพนี้ใช้ภาพนี้เป็นรูปภาพอ้างอิงใช้ในการเปรียบเทียบความเข้มของแสงและวิเคราะห์หาค่าระดับการอิ่มตัวของ n-heptane ในเวลาใดๆ ระหว่างการทดลอง หลังจากนั้นทำการปล่อยให้มีการไหลของ n-heptane ณ จุดกึ่งกลางของแท่ง โดยการทดลองไม่อนุญาตให้มีการไหลของน้ำในแนวราบ ในการทดลองมีการติดตั้ง Pressure transducer ที่ระดับแตกต่างกันจำนวนทั้งสิ้น 14 จุดเพื่อวัดความดันของน้ำและ n-heptane และ เพื่อทำการสอบเทียบค่าระดับการอิ่มตัวที่ได้จากการวิเคราะห์ภาพถ่าย การทดลองได้ผลเป็นที่น่าพอใจในการประมาณค่าระดับการอิ่มตัวของ n-heptane ในช่วงชั้นดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำซึ่งอยู่เหนือระดับน้ำที่ทำการควบคุมไว้ ส่วนการประมาณค่าระดับการอิ่มตัวของ n-heptane ในช่วงชั้นดินที่อยู่ต่ำกว่าระดับน้ำไม่เป็นที่น่าพอใจเท่าที่ควร โดยการศึกษาวิจัยนี้เป็นเพียงแนวทางในการค้นคว้าและศึกษาในการวิเคราะห์ค่าระดับการอิ่มตัวของของเหลวต่อไป

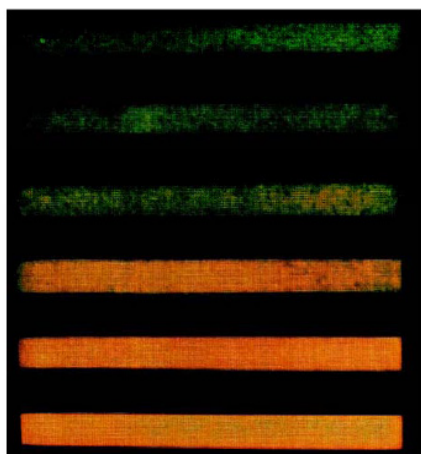
Darnault และคณะ (1998) ได้นำเสนอเทคนิคการส่องผ่านของแสง (Light Transmission Method, LTM) ในการประมาณค่าระดับการอิ่มตัวของของเหลวในระบบสองเฟส (น้ำ-LNAPL) โดยทำการเปรียบเทียบหาความสัมพันธ์ระหว่างค่า Hue ซึ่งเป็นค่าที่แสดงคุณสมบัติความบริสุทธิ์ของสีกับระดับการอิ่มตัวของน้ำ ในการทดลองจะแบ่งออกเป็นสองขั้นตอน คือ ขั้นตอนแรกเป็นการสอบเทียบหาสมการความสัมพันธ์ของค่า Hue และ ปริมาณความชื้นของน้ำในเชิงปริมาตร (Volumetric water content) ทำการทดลองผสมน้ำและ Sotrol 220 ในดินทรายซิลิกาโดยแปรผันค่าระดับการอิ่มตัวของน้ำซึ่งย้อมสีฟ้าและ Sotrol 220 ที่อัตราส่วนแตกต่างกัน จำนวนทั้งสิ้น 6 ตัวอย่าง และทำการบรรจุตัวอย่างดินลงในแท่งกึ่งสองมิติ ขนาด 32.5x26x1 ซม. โดยติดตั้งหลอดไฟฟลูออเรสเซนต์จำนวนทั้งสิ้น 24 หลอด ที่ด้านหลังของแท่งและทำการบัน

ภาพแสงที่ส่องผ่านตัวอย่างดินด้วยกล้องวิดีโอ ซึ่งภาพถ่ายจะถูกบันทึกในระบบ RGB ใน VHS เทป จึงต้องทำการแปลงภาพถ่ายจาก RGB ให้เป็น HSI (Hue, Intensity และ Saturation) โดย Hue ในรูปแบบ HSI สามารถหาได้จากจาก RGB เวกเตอร์ (R = สีแดง G = สีเขียวและ B = สีฟ้า) ความเข้มตามลำดับมีค่าสำหรับองค์ประกอบแต่ละเวกเตอร์ตั้งแต่ 0-255

$$H = 255 \left[\frac{1}{360} \left[\Upsilon - \arctan\left(\frac{2R - G - B}{\sqrt{3}(G - B)}\right) \right] \right] \quad (2.4)$$

Υ เป็นค่าคงที่จะขึ้นอยู่กับความเข้มของสีเขียวและสีฟ้า ($\Upsilon = 90$ สำหรับ $G \geq B$, $\Upsilon = 270$ สำหรับ $G < B$)

จากการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของ Hue จาก 100 พิกเซลล์จากภาพถ่ายของตัวอย่างดินซึ่งมีระดับการอิ่มตัวของน้ำที่แตกต่างกัน 6 ค่า พบว่าความสัมพันธ์ของค่า Hue และ ปริมาณความชื้นของน้ำในเชิงปริมาตร มีความสัมพันธ์กันแบบเส้นตรง



รูปที่ 2.2 ตัวอย่างดินทรายซิลิกาที่ระดับการอิ่มตัวของน้ำและ Sotrol ที่แตกต่างกัน

ขั้นตอนหลังจากได้สมการหาค่าระดับการอิ่มตัวของน้ำกับค่า ปริมาณความชื้นของน้ำในเชิงปริมาตรจากการสอบเทียบเป็นการทดสอบใช้ความสัมพันธ์ดังกล่าวในการทดสอบหาค่าระดับการอิ่มตัวของน้ำที่สภาวะต่างๆ โดยการจำลองการเคลื่อนตัวของน้ำในแท่งกึ่งสองมิติที่อิ่มตัวด้วย Sotrol โดยมีการเปรียบเทียบค่าระดับการอิ่มตัวของน้ำที่ได้จากวิธีเทคนิคการส่องผ่านของแสง กับ ค่าระดับความอิ่มตัวของของเหลวที่ได้จากการวัดด้วยรังสีเอกซ์ และจากการคำนวณปริมาณน้ำที่ใช้จริงในแต่ละการทดลอง จากการทดลองพบว่าเทคนิคการส่องผ่านของแสงมีความเหมาะสมกับการประยุกต์ใช้ในตัวอย่างที่มีความพรุนปานกลาง เท่านั้น และค่าระดับการอิ่มตัวที่ได้จากเทคนิคการส่องผ่านของแสง มีค่าคลาดเคลื่อนจากความเป็นจริงในของเหลวที่ไหล

ลึกและบริเวณด้านหน้าของแท่งก็ ข้อเสียของวิธีนี้คือ แท่งที่ใช้จะต้องมีขนาดที่บางเพื่อที่จะให้แสงสามารถส่องผ่านตัวกลางได้และตัวกลางต้องมีขนาดพรุนและโปร่งแสง

Simantiraki และคณะ (2008) นำเทคนิคการส่องผ่านของแสง (Light Transmission Method, LTM) ในการประมาณค่าระดับการอิ่มตัวของของเหลวในระบบสองเฟส (น้ำ-LNAPL) โดยทำการสอบเทียบหาค่าความสัมพันธ์ระหว่าง Hue กับปริมาณความชื้นของน้ำในเชิงปริมาตร (Volumetric water content) และความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มของแสง (Intensity) กับปริมาณความชื้นของน้ำในเชิงปริมาตร (Volumetric water content) ในการทดลองจะจำลองการรั่วไหลของ LNAPL ที่ผสมสีแดงชุดานสาม 0.003% โดยจะรั่วไหลเหนือชั้นทรายในอัตราที่คงที่ และมีแสงไฟคงที่ ทำการบันทึกภาพด้วยกล้อง โดยนำภาพที่ได้จากกล้องไปวิเคราะห์ค่าเฉลี่ยความเข้มของแสงด้วยโปรแกรม MatLab เพื่อหาระดับการอิ่มตัวของการเคลื่อนที่ของ LNAPL ที่รั่วไหลในโดเมน

$$I = 255 \left(\frac{R+G+B}{3} \right) \quad (2.5)$$



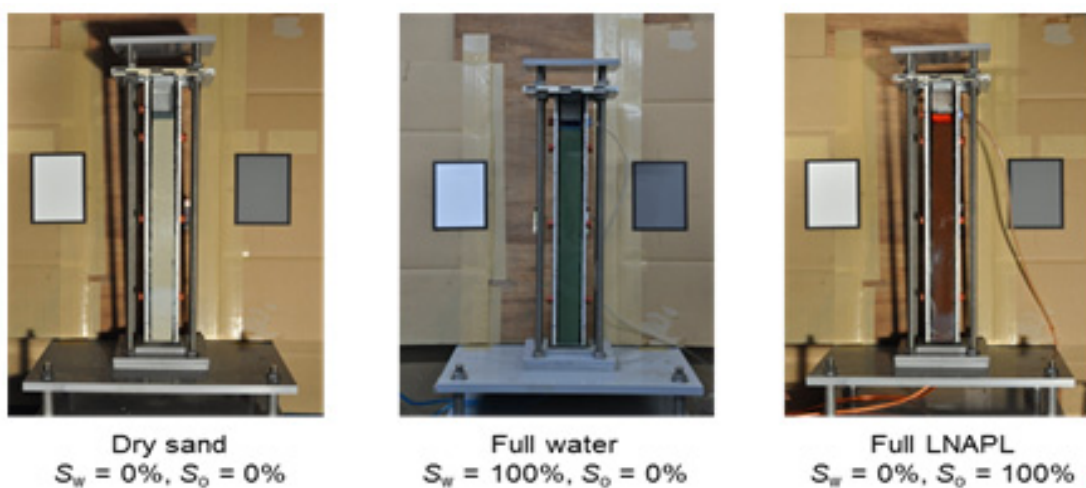
รูปที่ 2.3 ตัวอย่างการหาการเคลื่อนที่ของ LNAPL โดยใช้โปรแกรม MatLab

จากการสอบเทียบค่าที่ได้จะนำมาสร้างมาตรฐานในการสอบเทียบ และสรุปได้ว่าค่าความเข้มของแสงจะแปรผันตรงกับค่าระดับการอิ่มตัวของ LNAPL และการศึกษาอื่นบอกว่า ค่าของ Hue จะแปรผันตรงกับค่าระดับการอิ่มตัวของของน้ำ ขั้นตอนหลังจากการสอบเทียบจะนำไปหาการกระจายตัวของ LNAPL ที่ไหลในแนวตั้งและแนวราบ ซึ่งจากผลการทดลองสามารถหาได้เฉพาะค่า LNAPL

Flores และคณะ (2011) นำเสนอวิเคราะห์ภาพถ่ายอย่างง่าย (Simplified Image Analysis Method, SIAM) เพื่อใช้การศึกษาระดับการอิ่มตัวของของเหลว ในตัวกลางพรุนซึ่งวิธีนี้เป็นการทดสอบแบบไม่ทำลาย และสามารถประเมินค่าระดับการอิ่มตัวของของเหลวได้ภายใต้สภาพพลวัต นอกจากนี้ยังสามารถประมาณค่าระดับการอิ่มตัวของของเหลวได้ทุกตำแหน่งในภาพถ่ายที่ใช้ในการวิเคราะห์ Flores และคณะ (2011) พบว่าวิธีการวิเคราะห์ภาพถ่ายเชิงซ้อน ซึ่งถูกนำเสนอโดย Kechavarzi และคณะ (2000) มี

การประมาณค่าระดับการอิ่มตัวของของเหลวความคลาดเคลื่อนไปจากความเป็นจริงเนื่องจากปัญหาการหักเหของมุมกล้อง และสมการที่ใช้ในการประมาณค่าระดับการอิ่มตัวของของเหลวเป็นสมการเดียวกันในทุกๆ ตำแหน่งในภาพถ่ายที่ใช้ในการวิเคราะห์

วิธีการที่ใช้ในการสอบเทียบเพื่อหาสมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระดับการอิ่มตัวของของเหลวสามารถทำได้โดยการถ่ายภาพเพียง 3 ภาพ จากกล้องดิจิทัลซึ่งทำการติดตั้งฟิลเตอร์กรองแสงที่ 450 นาโนเมตร และ 640 นาโนเมตร โดยทำการเตรียมตัวอย่างเพียงแค่ 3 ตัวอย่าง ซึ่งแตกต่างจากวิธีการวิเคราะห์ภาพถ่ายเชิงซ้อนที่ต้องทำการเตรียมตัวอย่างถึง 74 ตัวอย่าง โดยตัวอย่างทั้งสามตัวอย่างสามารถเตรียมในคอลัมน์หรือแท็งก์ที่จะใช้ในการศึกษาพฤติกรรมเคลื่อนตัวของ LNAPL ทั้งในสภาพ 1 มิติและ 2 มิติ ตัวอย่างทั้งสามประกอบด้วย ตัวอย่างสภาพแห้ง ตัวอย่างสภาพอิ่มตัวด้วยน้ำ และ ตัวอย่างสภาพอิ่มตัวด้วย LNAPL ดังแสดงในรูปที่ 3 โดยน้ำจะถูกย้อมสีด้วยสีฟ้า ด้วย Brilliant Blue อัตราส่วน 1:10000 โดยน้ำหนัก และ LNAPL จะถูกย้อมสีด้วย Red Susan III อัตราส่วน 1:10000 โดยน้ำหนักเช่นเดียวกันการแบ่งพื้นที่ของภาพถ่ายเพื่อใช้ในการวิเคราะห์ภาพถ่ายอย่างง่ายแสดงดังรูปที่ 4



รูปที่ 2.4 การเตรียมตัวอย่างที่ใช้ในการสอบเทียบความสัมพันธ์ของวิธีวิเคราะห์ภาพถ่ายอย่างง่าย

บทที่ 3

วิธีการศึกษา

การดำเนินการวิจัยโครงการการศึกษาหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นเชิงแสงเฉลี่ยและระดับการอิมตัวของของเหลวในทรายชนิดต่างๆแบ่งการทดลองออกเป็นสามส่วนดังนี้

3.1 คุณสมบัติทางกายภาพและองค์ประกอบทางเคมีของดินทราย

ดินทรายที่ใช้ในการศึกษาประกอบด้วยดินทรายออกตาวา 3820 ดินทรายออกตาวา 3821 ดินทรายอยุธยา ดินทรายชลบุรี และดินทรายไทยุระ โดยการทดสอบแสดงดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 การทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพและองค์ประกอบทางเคมีของดินทราย

| การทดสอบ | มาตรฐาน |
|------------------------------|---------------|
| Specific gravity | ASTM D 854 |
| Grain-size analysis | ASTM D 422 |
| Loss on ignition | ASTM D7348-13 |
| Scanning Electron Microscopy | - |

3.2 คุณสมบัติทางกายภาพของของเหลว

ของเหลวที่ใช้ในการศึกษาประกอบด้วย น้ำและซีฟิ่งเหลวโดยซีฟิ่งเหลวจะถูกย้อมสีด้วย Red Susan III อัตราส่วน 1:10000 โดยน้ำหนัก การทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพของของเหลวประกอบด้วย

- การทดสอบหาความถ่วงจำเพาะ (Specific gravity)
- การทดสอบความหนืด (Viscosity test)
- การทดสอบความดันไอ (Vapor pressure test)
- การทดสอบคุณสมบัติการผ่านได้ของแสง (Transmittance)

3.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นเชิงแสงเฉลี่ยและการอิมตัวของของเหลว

การทดลองหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นเชิงแสงเฉลี่ยและระดับการอิมตัวของของเหลวในดินทรายชนิดต่างๆด้วยวิธีวิเคราะห์ภาพถ่ายเชิงซ้อน (Multispectral Image Analysis Method, MIAM) สามารถดำเนินการทดลองได้ดังนี้

เตรียมตัวอย่างทรายอบแห้ง 40-50 กรัม ผสมน้ำและพาราฟิน ที่ระดับการอิมตัวของเหลวแตกต่างกันเป็นจำนวนทั้งสิ้น 60 ตัวอย่าง ต่อดินทรายหนึ่งชนิด จากนั้นทำการบรรจุตัวอย่างลงในอุปกรณ์บรรจุ

ตัวอย่างทรงกระบอกมีเส้นผ่าศูนย์กลาง 4 ซม. ความสูง 1.96 ซม. และปริมาตรเฉลี่ย 24.64 ลบ.ซม. โดยควบคุมความหนาแน่นของทรายตัวอย่างเท่ากับ 1.64 กรัม/ลบ.ซม. อุปกรณ์บรรจุตัวอย่างแสดงดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 อุปกรณ์บรรจุตัวอย่างดิน

ทำการถ่ายภาพตัวอย่างด้วยกล้องดิจิทัลจำนวน 2 ตัว โดยกล้องแต่ละตัวทำการติดตั้งฟิลเตอร์กรองแสงให้ผ่านที่ความถี่ 450 นาโนเมตร และ 640 นาโนเมตร ฟิลเตอร์กรองแสงแสดงในรูปที่ 3.2 โดยห้องทดลองมีการควบคุมอุณหภูมิที่ 25 องศาเซลเซียส และควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ที่ 70 เปอร์เซ็นต์ เพื่อป้องกันการระเหยของของเหลว การติดตั้งอุปกรณ์ในการทดสอบแสดงในรูปที่ 3.3

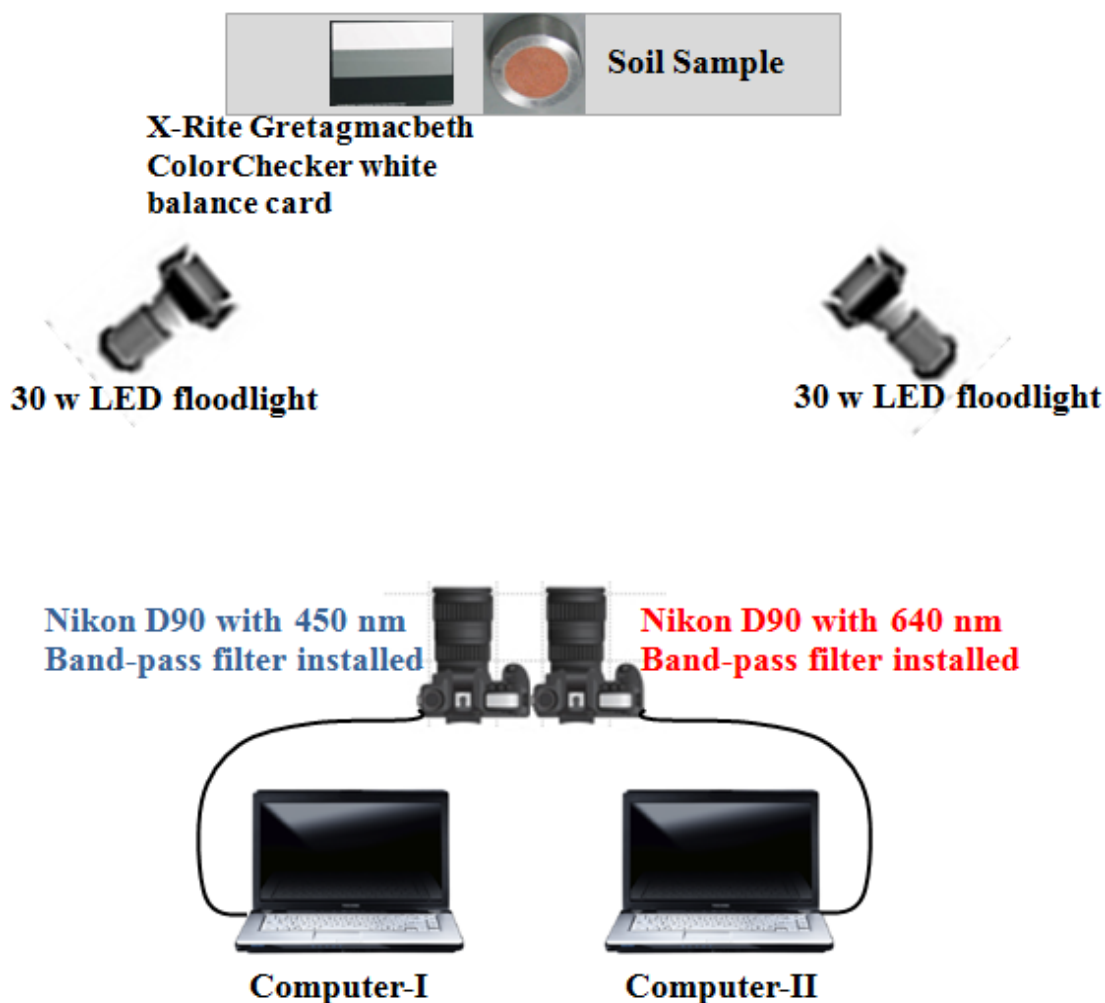


(ก) 450 นาโนเมตร



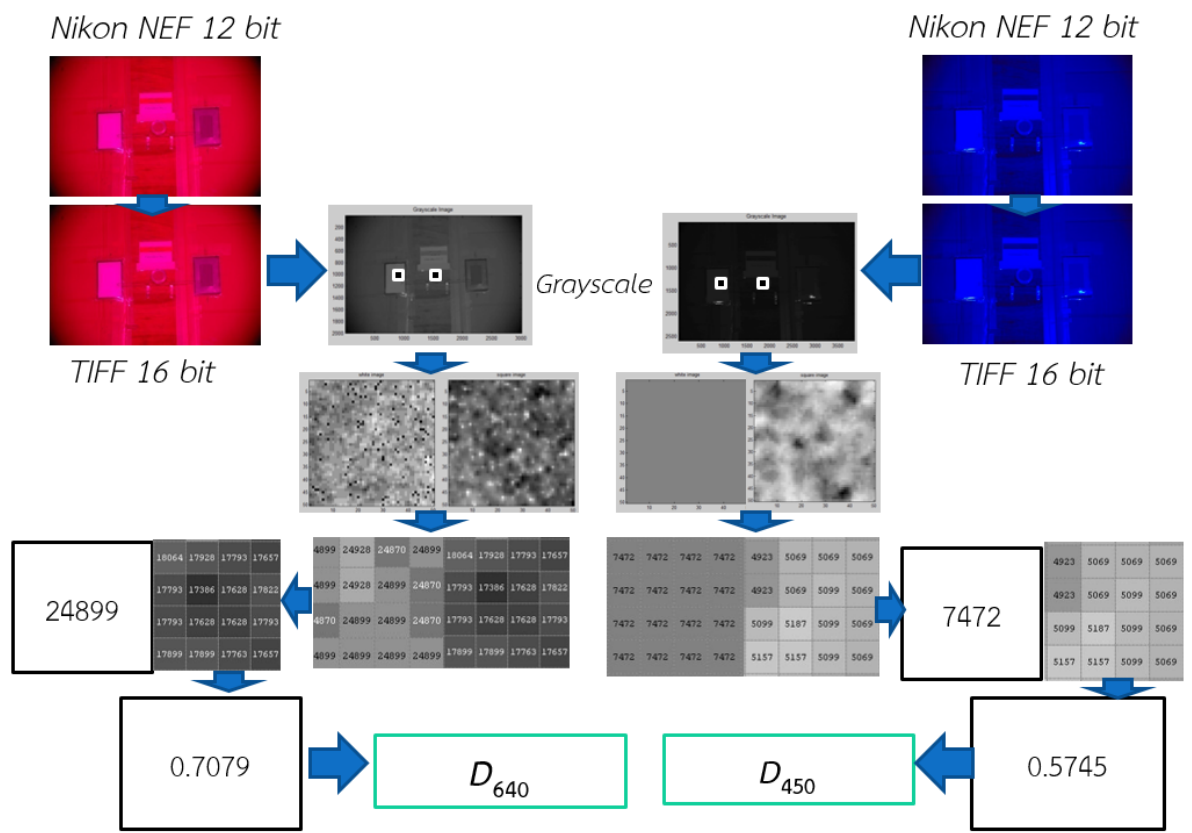
(ข) 640 นาโนเมตร

รูปที่ 3.2 ฟิลเตอร์กรองแสง



รูปที่ 3.3 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ

รูปถ่ายที่ได้ถูกนำไปวิเคราะห์เพื่อหาค่าความหนาแน่นเชิงแสงเฉลี่ยที่ความถี่ 450 นาโนเมตร และ 640 นาโนเมตร โดยใช้โปรแกรมการคำนวณที่เขียนบนซอฟต์แวร์ MatLab โดยรูปถ่ายที่ได้จากกล้องทั้งสอง จะอยู่ในรูปแบบ NEF ซึ่งเป็นรูปแบบ Raw file ของกล้อง Nikon จะต้องทำการแปลงรูปถ่ายให้อยู่ในรูปแบบ TIFF (Tagged Image File Format) ขนาด 16 บิต (65,536 เฉดสี) จากนั้นทำการแปลงรูปถ่ายให้เป็นแบบขาวดำ และทำการเลือกตำแหน่งของบริเวณที่จะวิเคราะห์ ซึ่งมีขนาด 137x137 พิกเซล และเลือกตำแหน่งของสีขาวเพื่อใช้อ้างอิง ทำการประมวลผลโดยใช้สมการที่ 31 ด้วยโปรแกรม Matlab ผลลัพธ์ที่ได้จะเป็นค่าความหนาแน่นเชิงแสงเฉลี่ยที่ความถี่ 450 นาโนเมตร และ 640 นาโนเมตร ขั้นตอนการวิเคราะห์ภาพถ่ายแสดงดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 ขั้นตอนการวิเคราะห์ภาพถ่าย

บทที่ 4

ผลการทดสอบ

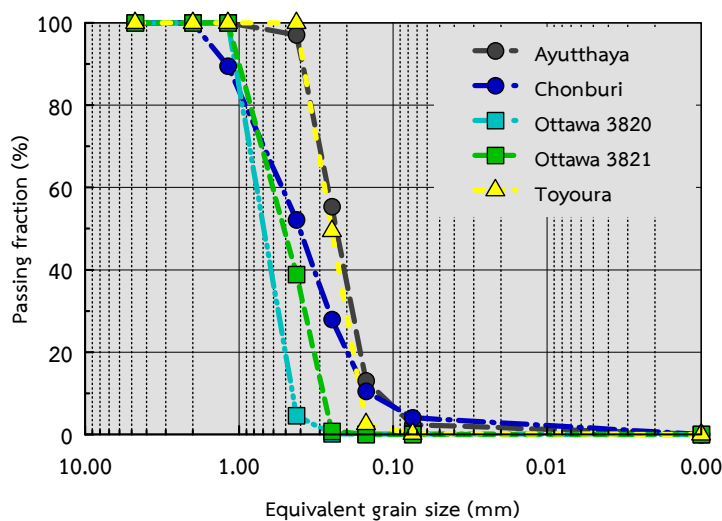
4.1 ผลการศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพของดินทราย

ผลการทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพของดินทรายแสดงดังตารางที่ 4.1 เส้นโค้งแสดงการกระจายตัวของอนุภาคดิน แสดงดังรูปที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ผลการศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพของดินทราย

| Properties | Ottawa 3820 | Ottawa 3821 | Ayutthaya | Chonburi | Toyoura |
|----------------------------------|-------------|-------------|-----------|----------|---------|
| Specific gravity, G_s | 2.62 | 2.66 | 2.62 | 2.65 | 2.64 |
| Uniformity coefficient, C_u | 1.02 | 0.72 | 0.99 | 0.97 | 0.89 |
| Curvature coefficient, C_c | 1.67 | 2.00 | 1.63 | 3.33 | 1.75 |
| Mean grain size (D_{50}), mm | 0.70 | 0.50 | 0.23 | 0.40 | 0.25 |
| USCS | SP | SP | SP | SP | SP |
| LOI (%) | 0.38 | 0.13 | 0.61 | 1.26 | 0.50 |

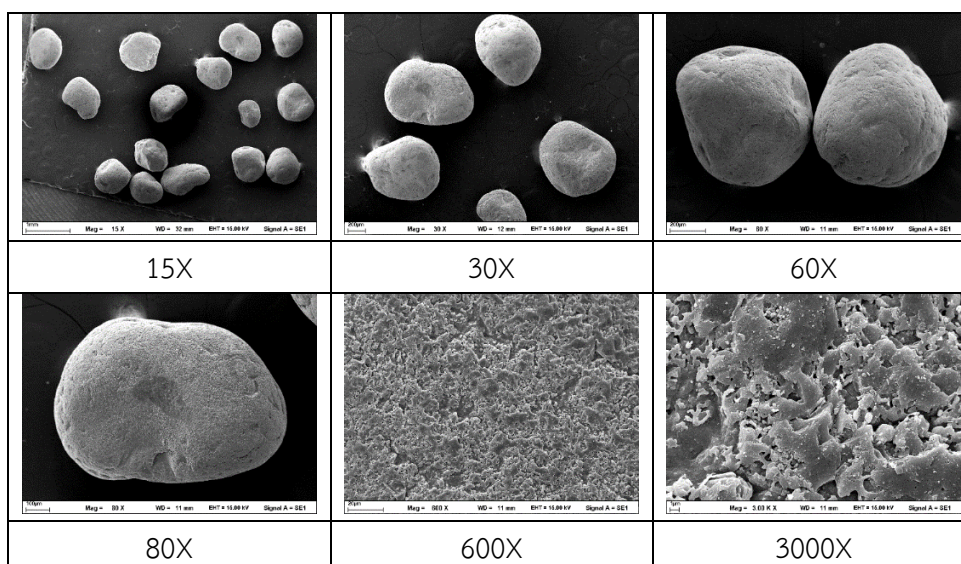
จากการทดสอบพบว่าค่าความถ่วงจำเพาะของดินทรายที่ใช้ทดสอบมีค่าอยู่ระหว่าง 2.62-2.66 ดินทรายออกตาวา 3820 มีขนาดของเม็ดดินใหญ่ที่สุดคือ 0.70 มม. ส่วนดินทรายอยุธยา มีขนาดเล็กที่สุดคือ 0.23 มม. ดินทรายทั้งหมดสามารถจำแนกตามระบบการจำแนกดินแบบเอกภาพ (Unified Soil Classification System, USCS) ได้เป็นดินทรายที่มีขนาดสม่ำเสมอ (SP) ผลการตรวจสอบปริมาณสารอินทรีย์ในดิน ด้วยวิธี Loss on ignition พบว่าดินทรายชลบุรีมีปริมาณสารอินทรีย์ปนอยู่มากที่สุดคือ 1.26% ส่วนดินทรายออกตาวา 3821 มีปริมาณสารอินทรีย์ปนอยู่น้อยที่สุด คือ 0.13%



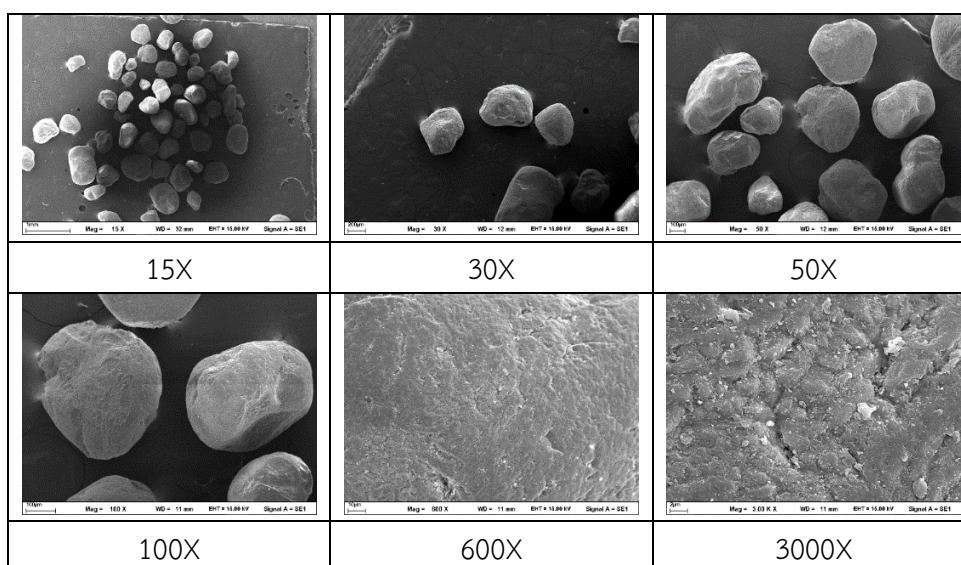
รูปที่ 4.1 เส้นโค้งแสดงการกระจายตัวของอนุภาคดิน

4.2 ผลการถ่ายภาพขยายอนุภาคด้วยเครื่อง SEM

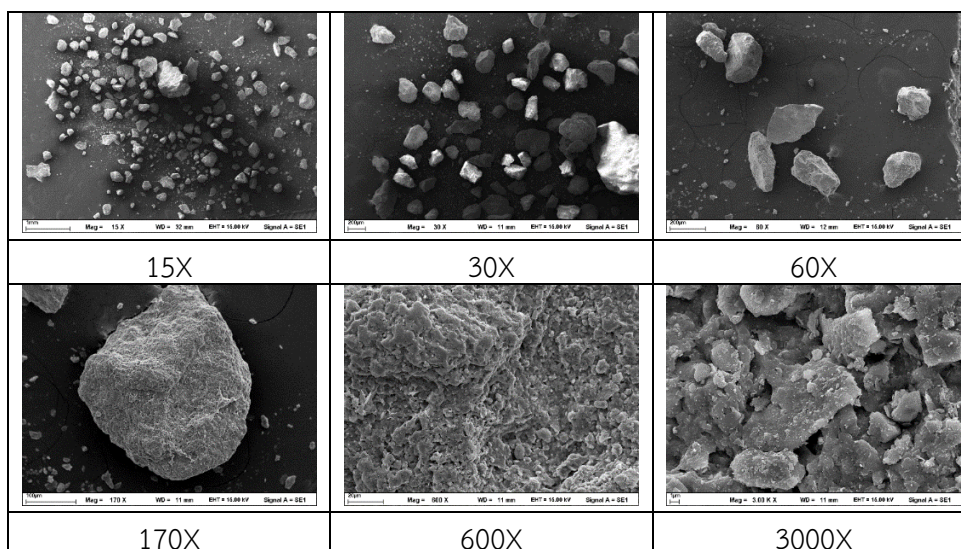
ดินทรายที่ใช้ในการศึกษาทุกชนิดถูกนำไปทำการศึกษาโครงสร้างบริเวณชั้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ณ ศูนย์กล้องจุลทรรศน์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา ผลการทดสอบแสดงดังรูปที่ 4.2 ถึงรูปที่ 4.6



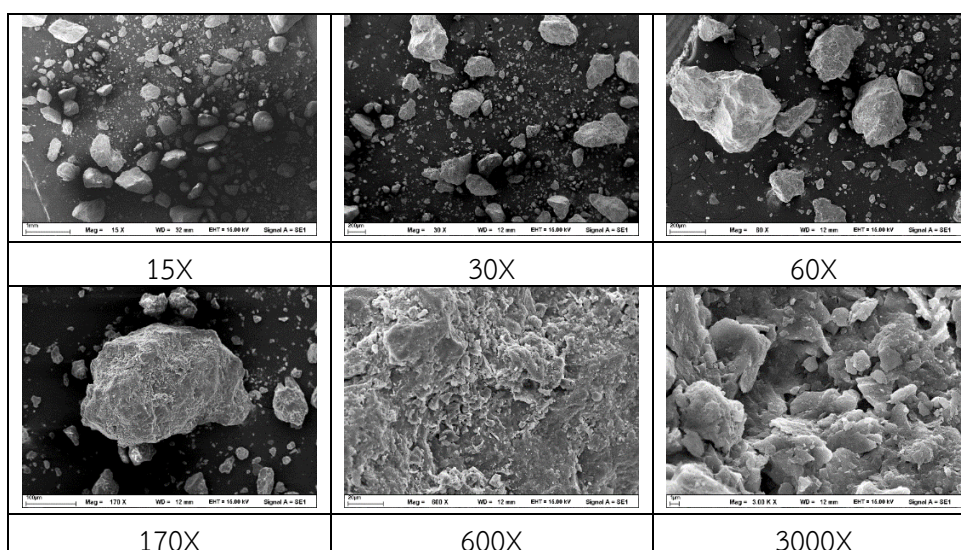
รูปที่ 4.2 ผลการถ่ายภาพขยายอนุภาคด้วยเครื่อง SEM ของดินทรายออกตาวา 3820



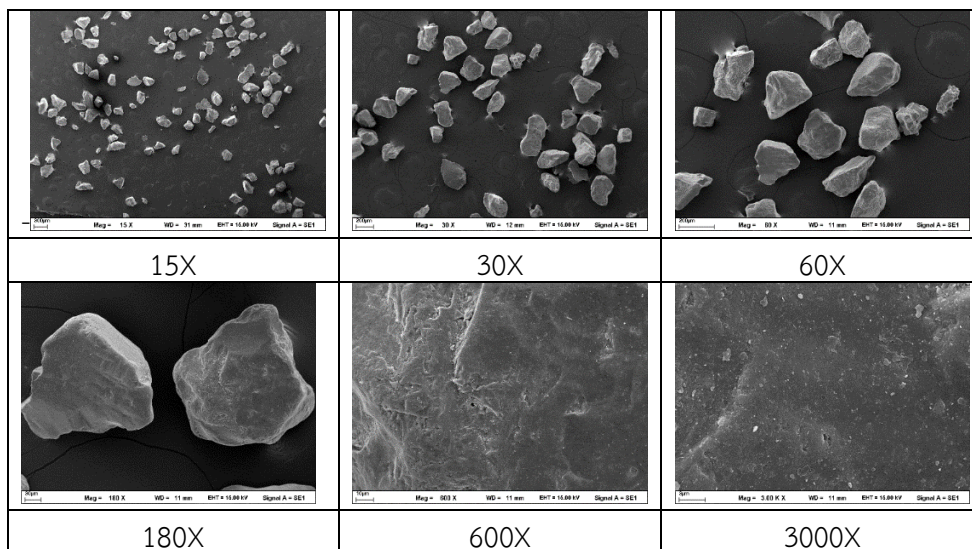
รูปที่ 4.3 ผลการถ่ายภาพขยายอนุภาคด้วยเครื่อง SEM ของดินทรายออกตาวา 3821



รูปที่ 4.4 ผลการถ่ายภาพขยายอนุภาคด้วยเครื่อง SEM ของดินทรายอยุธยา



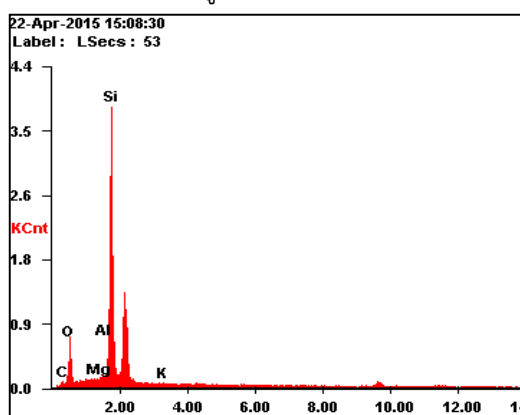
รูปที่ 4.5 ผลการถ่ายภาพขยายอนุภาคด้วยเครื่อง SEM ของดินทรายชลบุรี



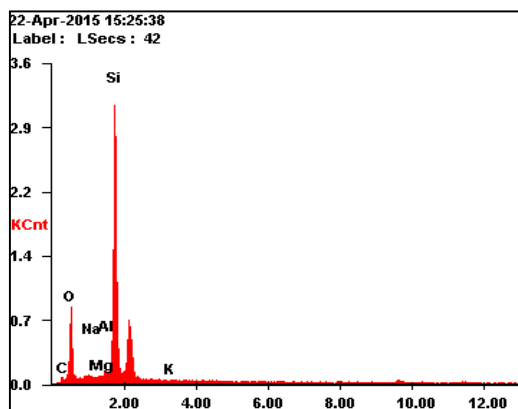
รูปที่ 4.6 ผลการถ่ายภาพขยายอนุภาคด้วยเครื่อง SEM ของดินทรายไทยุระ

ผลของการถ่ายภาพขยายอนุภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดจะทำให้เห็นลักษณะและพื้นผิวของเม็ดดินแต่ละชนิดเป็นดังนี้ ทรายอยู่ยามีขนาดของเม็ดทรายเล็ก ลักษณะของรูปร่างเป็นเหลี่ยมคม ผิวมีความขรุขระ ทรายชลบุรีมีขนาดของเม็ดทรายเล็กและใหญ่ผสมกัน ลักษณะของรูปร่างเป็นเหลี่ยมคม ผิวมีความขรุขระ ทรายออกตาวา 3821 ขนาดของเม็ดทรายเล็กมีความสม่ำเสมอ ลักษณะของรูปร่างเป็นทรงกลม ผิวมีความเรียบ ทรายออกตาวา 3820 ขนาดของเม็ดทรายใหญ่ที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับดินทรายชนิดอื่น ลักษณะของรูปร่างเป็นทรงกลม ผิวมีความขรุขระเล็กน้อย ทรายไทยุระ ขนาดของเม็ดทรายเล็ก มีความสม่ำเสมอ ลักษณะของรูปร่างเป็นเหลี่ยม ผิวมีความเรียบที่สุด

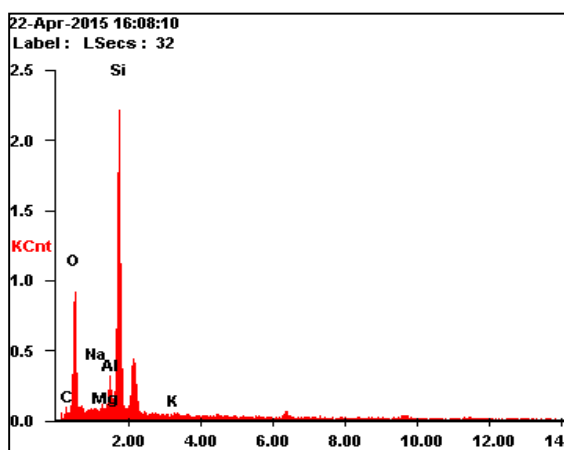
กราฟการแสดงผลการกระจายตัวของพลังงานธาตุ (EDX Spectrum) แสดงดังรูปที่ 4.7 ถึงรูปที่ 4.11 ปริมาณธาตุของแต่ละตัวอย่างดินทราย แสดงดังรูปที่ 4.12



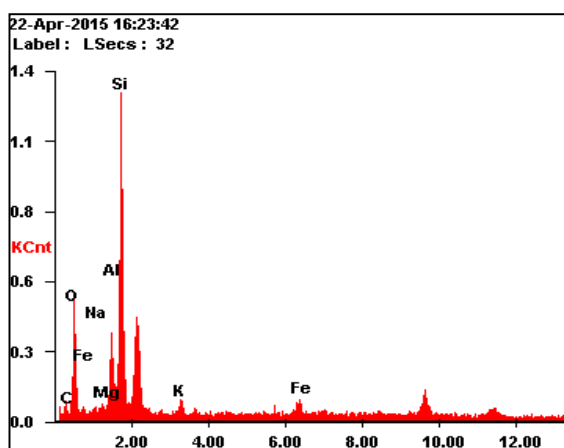
รูปที่ 4.7 กราฟแสดงผลการกระจายตัวของพลังงานธาตุ (EDX Spectrum) ของดินทรายออกตาวา 3820



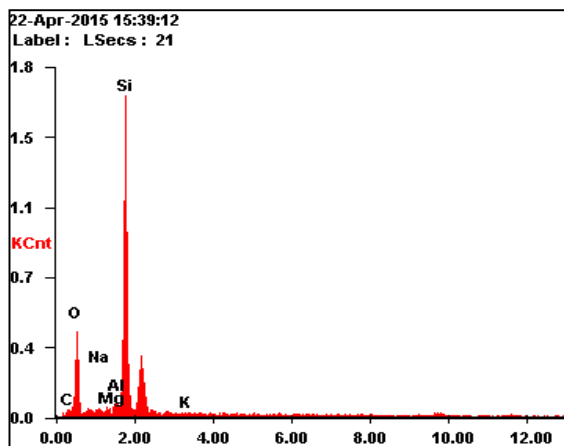
รูปที่ 4.8 กราฟแสดงการกระจายตัวของพลังงานธาตุ (EDX Spectrum) ของดินทรายออกตาวา 3821



รูปที่ 4.9 กราฟแสดงการกระจายตัวของพลังงานธาตุ (EDX Spectrum) ของดินทรายอยุธยา

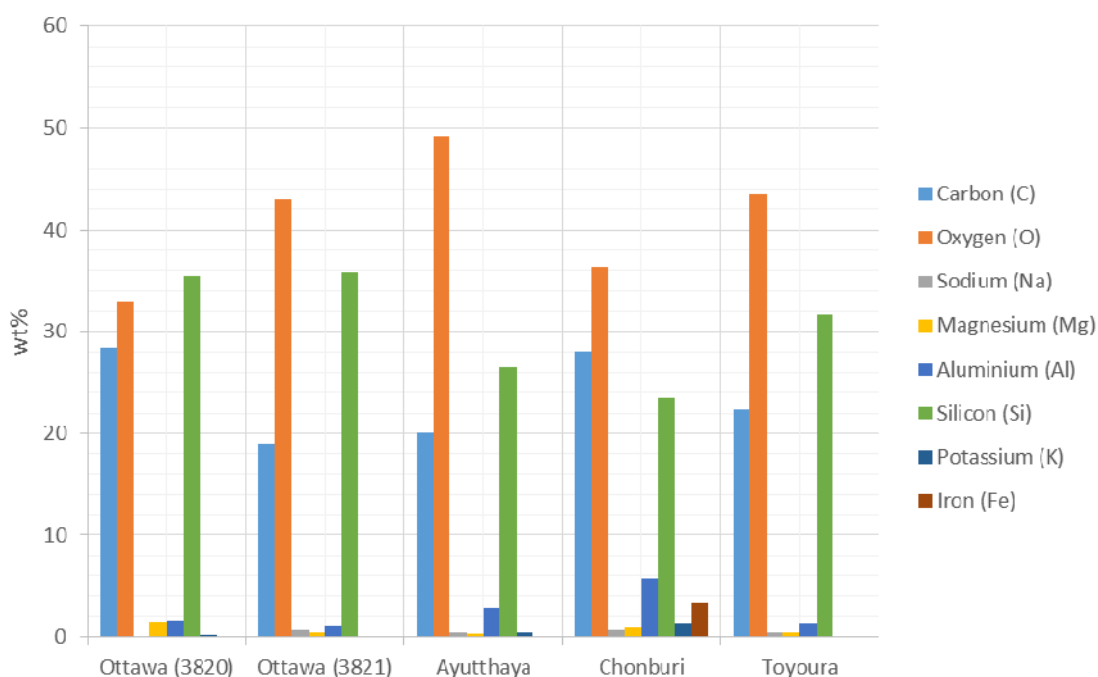


รูปที่ 4.10 กราฟแสดงการกระจายตัวของพลังงานธาตุ (EDX Spectrum) ของดินทรายชลบุรี



รูปที่ 4.11 กราฟแสดงการกระจายตัวของพลังงานธาตุ (EDX Spectrum) ของดินทรายไทยุระ

กราฟแสดงการกระจายตัวของพลังงานธาตุ (EDX Spectrum) ของดินทรายทุกชนิดพบว่า ส่วนใหญ่ประกอบไปด้วยธาตุซิลิกอน (Si) ออกซิเจน (O) และอลูมิเนียม (Al) นอกจากนี้ยังพบธาตุเหล็ก (Fe) และโพแทสเซียม (K) ในดินทรายชลบุรี ผลของการศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของดินทรายโดยวิธี EDX แสดงดังรูปที่ 4.12



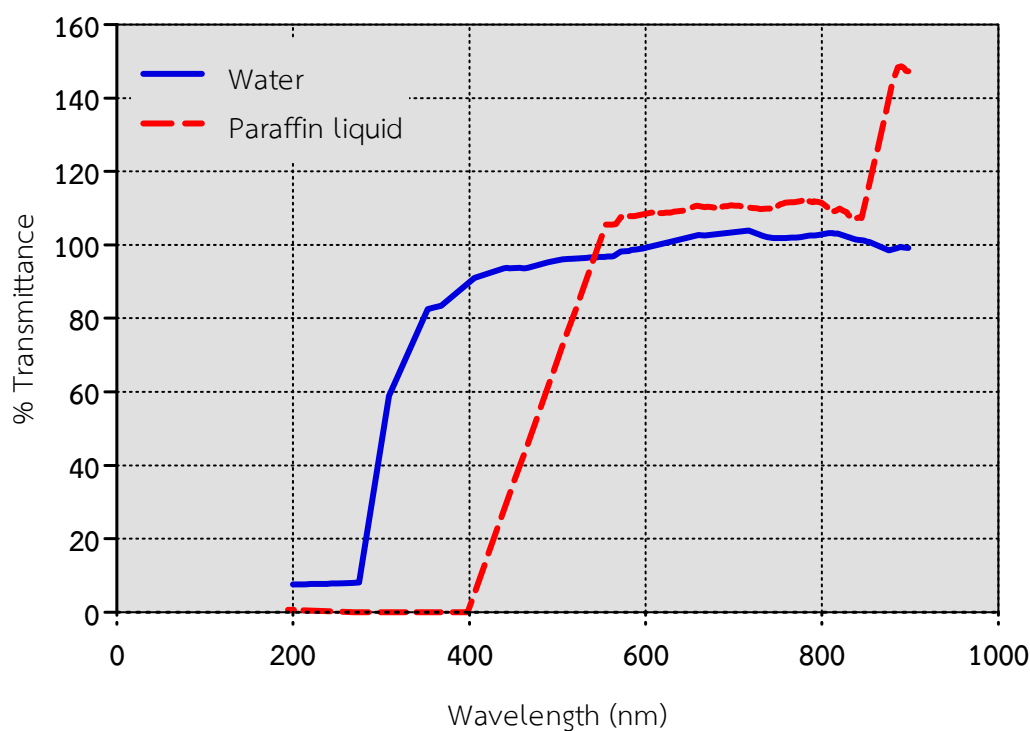
รูปที่ 4.12 ผลของการศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของดินทรายโดยวิธี EDX

4.3 ผลการศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพของของเหลว

ของเหลวที่ใช้ในการศึกษาประกอบด้วย น้ำและซีฟิ่งเหลว โดยซีฟิ่งเหลวจะถูกย้อมสีด้วย Red Susan III อัตราส่วน 1:10000 ผลการทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพของของเหลวแสดงดังตารางที่ 4.2 และผลการศึกษาคุณสมบัติการผ่านได้ของแสงในน้ำ และ ซีฟิ่งเหลวย้อมด้วยสีแดง แสดงดังรูปที่ 4.13

ตารางที่ 4.2 ผลการศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพของของเหลว

| Properties | Water | Paraffin Liquid |
|--|-------|-----------------|
| Density at 20°C, ρ_s (g/cm ³) | 0.998 | 0.883 |
| Viscosity, ν (mm ² /s) | 1.00 | 242.41 |
| Vapor pressure at 30°C (mmHg) | 4.30 | 0.50 |



รูปที่ 4.13 คุณสมบัติการผ่านได้ของแสงในน้ำ และ ซีฟิ่งเหลวย้อมด้วยสีแดง

จากการทดสอบพบว่าความหนาแน่นของน้ำคือ 0.998 กรัม/ลบ.ซม. และ ซีฟิ่งเหลวคือ 0.883 กรัม/ลบ.ซม. ค่าความหนืดของน้ำคือ 1 มม²/วินาที และ ซีฟิ่งเหลวคือ 242.41 1 มม²/วินาที และมีค่าความดันไอของน้ำและซีฟิ่งเหลวที่อุณหภูมิ 30°C เท่ากับ 4.30 มิลลิเมตรปรอท และ 0.50 มิลลิเมตรปรอท ตามลำดับ

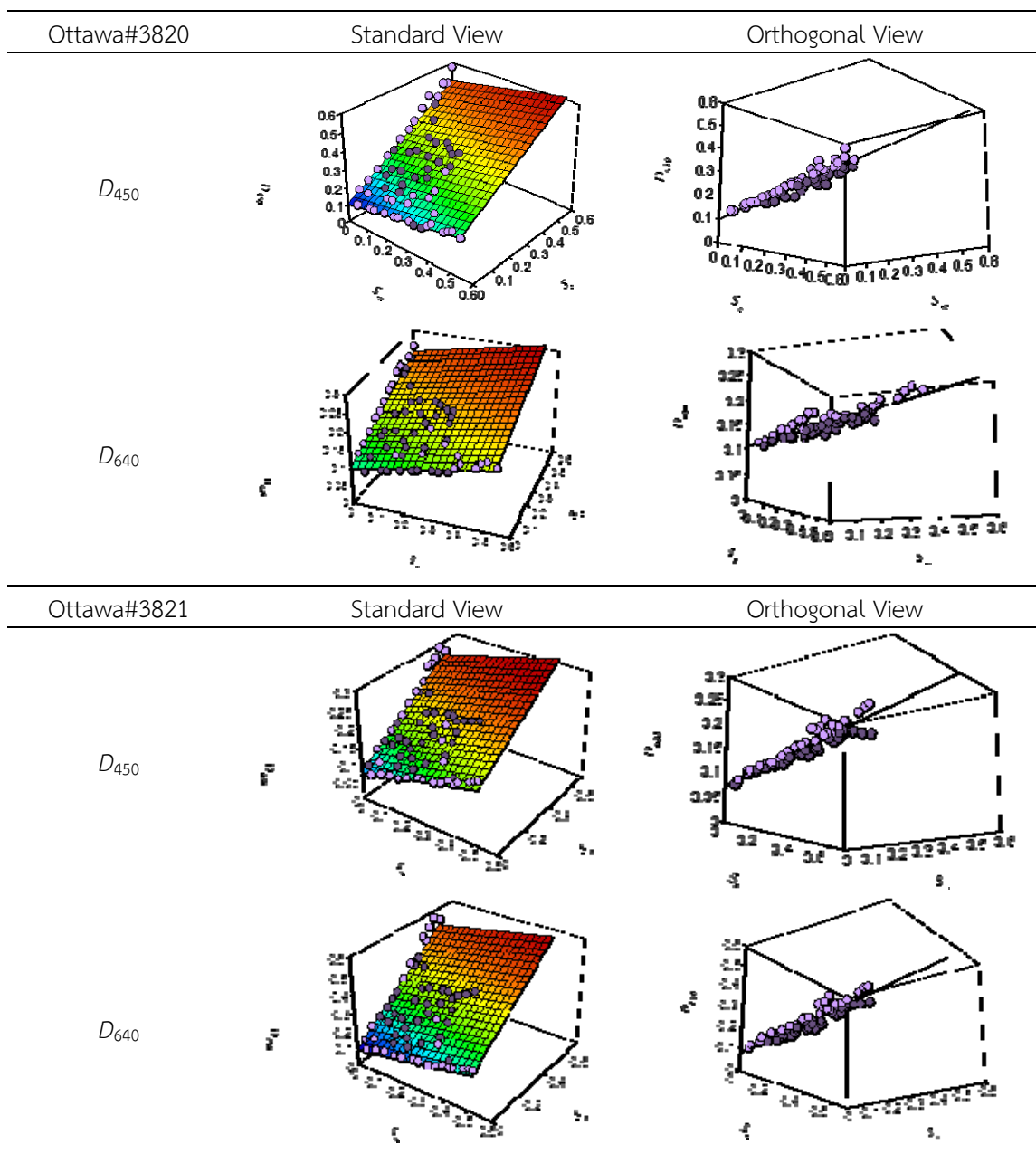
การทดสอบคุณสมบัติการผ่านได้ของแสงที่ความถี่ต่างๆ โดยเครื่อง UV Spectrophotometer ในน้ำไม่ย้อมสีพบว่าที่ความยาวคลื่นประมาณ 200-300 นาโนเมตรแสงผ่านได้ประมาณ 10% จากนั้น

ความสามารถในการผ่านได้ของแสงเพิ่มขึ้นจนถึง 90% ที่ความยาวคลื่น 400 นาโนเมตร จากนั้นเพิ่มขึ้นเล็กน้อยไปจนถึงช่วงความยาวคลื่นประมาณ 900 นาโนเมตร ส่วนในกรณีของซีฟิ่งเหลวย้อมสีแดง แสงไม่สามารถผ่านได้ในช่วงความยาวคลื่นต่ำกว่า 400 นาโนเมตร จากนั้นจะค่อยๆอนุญาตให้แสงผ่านได้จนถึง 110% ที่ช่วงความยาวคลื่น 550 นาโนเมตร และ แสงสามารถผ่านได้ดีที่สุดถึง 150% ที่ช่วงความยาวคลื่น 900 นาโนเมตร

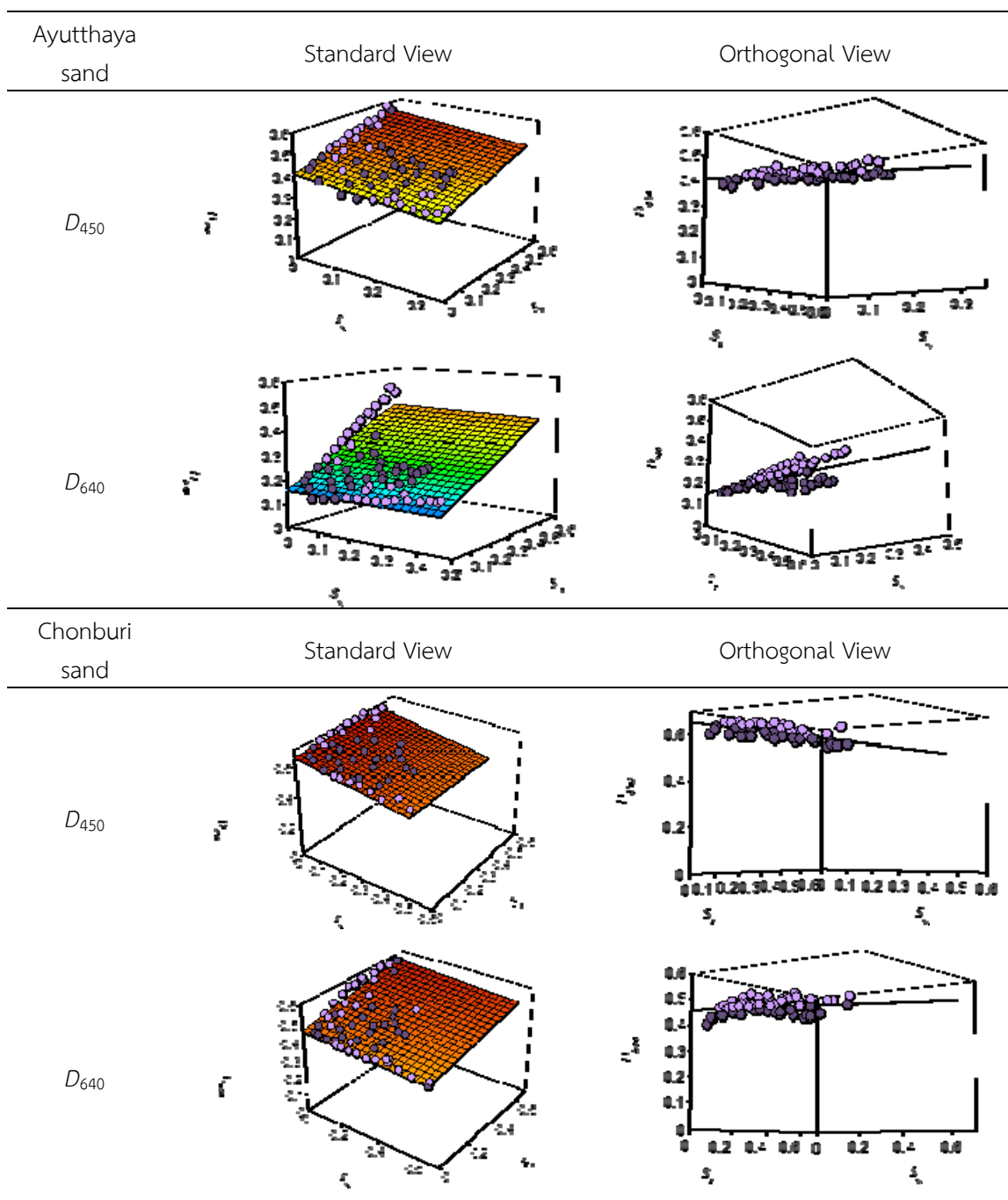
4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นเชิงแสงเฉลี่ยและการอิมิตัวของของเหลว

ดินตัวอย่างทั้ง 5 ชนิด ถูกนำมาทดสอบหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นเชิงแสงเฉลี่ย และระดับการอิมิตัวของของเหลวด้วยวิธีวิเคราะห์ภาพถ่ายเชิงซ้อน (Multispectral Image Analysis Method, MIAM) โดยดินตัวอย่างถูกเตรียมที่ระดับการอิมิตัวด้วยของเหลวแตกต่างกันเป็นจำนวนทั้งสิ้น 60 ตัวอย่างจากนั้นนำไปถ่ายภาพและวิเคราะห์หาความเข้มแสงเฉลี่ยที่ช่วงความยาวคลื่น 450 นาโนเมตร (D_{450}) และ ช่วงความยาวคลื่น 640 นาโนเมตร (D_{640}) และนำมาหาความสัมพันธ์กับระดับการอิมิตัวของของเหลว ผลการทดสอบแสดงดังตารางที่ 4.3

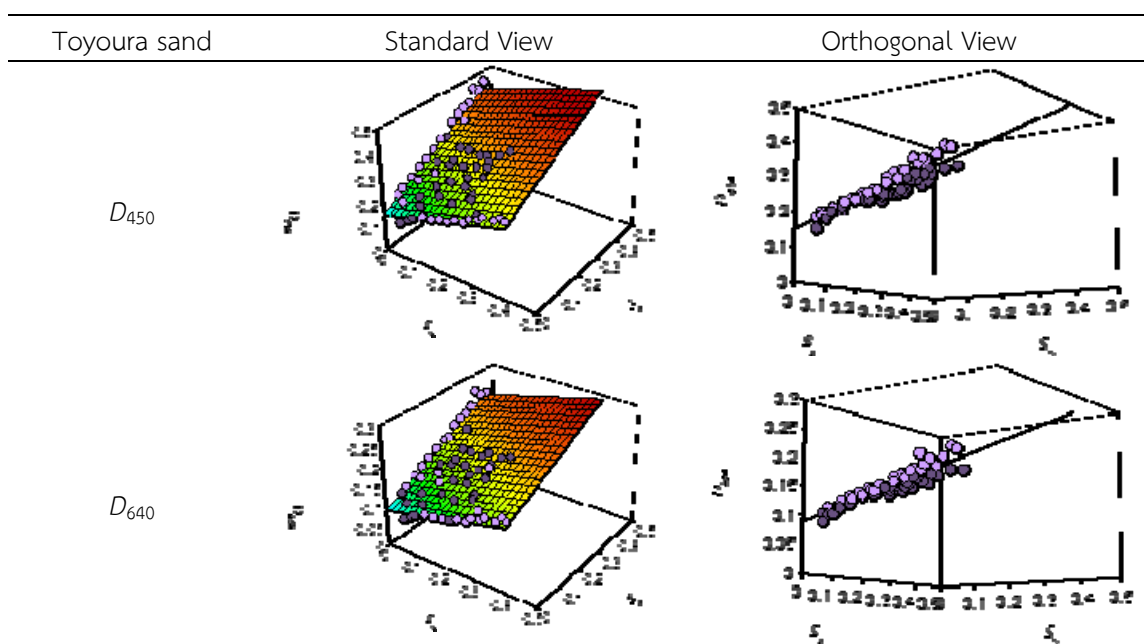
ตารางที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นเชิงแสงเฉลี่ยและระดับการอิ่มตัวของของเหลว



ตารางที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นเชิงแสงเฉลี่ยและระดับการอิ่มตัวของของเหลว (ต่อ)



ตารางที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นเชิงแสงเฉลี่ยและระดับการอิ่มตัวของของเหลว (ต่อ)



ตารางที่ 4.4 สมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นเชิงแสงเฉลี่ยและระดับการอิ่มตัวของของเหลวในดินทราย

| Material | D_{450} | R^2 | D_{640} | R^2 |
|-------------|---------------------------------|-------|---------------------------------|-------|
| Ottawa 3820 | $0.100 + 0.220 S_w + 0.665 S_o$ | 0.930 | $0.104 + 0.134 S_w + 0.224 S_o$ | 0.840 |
| Ottawa 3821 | $0.082 + 0.232 S_w + 0.693 S_o$ | 0.920 | $0.074 + 0.152 S_w + 0.312 S_o$ | 0.893 |
| Ayutthaya | $0.405 - 0.181 S_w + 0.277 S_o$ | 0.881 | $0.151 - 0.009 S_w + 0.519 S_o$ | 0.776 |
| Chonburi | $0.654 - 0.239 S_w + 0.009 S_o$ | 0.626 | $0.456 - 0.062 S_w + 0.159 S_o$ | 0.622 |
| Toyoura | $0.152 + 0.334 S_w + 0.587 S_o$ | 0.872 | $0.090 + 0.182 S_w + 0.307 S_o$ | 0.864 |

จากผลการทดสอบความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นเชิงแสงเฉลี่ยและระดับการอิ่มตัวของของเหลวในดินทรายแตกต่างกัน 5 ชนิดพบว่า ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นเชิงแสงเฉลี่ยและระดับการอิ่มตัวของของเหลวในดินทรายออตตาวา 3820 ออตตาวา 3821 ดินทรายไทยุระ มีความสัมพันธ์กันแบบแปรผัน กล่าวคือเมื่อระดับการอิ่มตัวของของเหลวในดินทรายเพิ่มมากขึ้น ค่าความเข้มแสงเฉลี่ยเพิ่มมากขึ้นตามไปด้วย ส่วนดินทรายอยุธยา ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นเชิงแสงเฉลี่ยและระดับการอิ่มตัวของของเหลวมีความสัมพันธ์กันแบบผกผัน กล่าวคือ เมื่อระดับการอิ่มตัวของของเหลวในดินทรายเพิ่มมากขึ้น ค่าความเข้มแสงเฉลี่ยมีค่าลดลง ส่วนในดินทรายชลบุรี ไม่พบความสัมพันธ์แบบเชิงเส้นระหว่างค่าความหนาแน่นเชิงแสงเฉลี่ยและระดับการอิ่มตัวของของเหลว

บทที่ 5

วิเคราะห์และสรุปผลการทดสอบ

5.1 ค่าความหนาแน่นเชิงแสงเฉลี่ยและระดับการอิ่มตัวของของเหลว

ดินตัวอย่างทั้ง 5 ชนิด ถูกนำมาทดสอบหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นเชิงแสงเฉลี่ยและระดับการอิ่มตัวของของเหลวด้วยวิธีวิเคราะห์ภาพถ่ายเชิงซ้อน (Multispectral Image Analysis Method, MIAM) โดยดินตัวอย่างถูกเตรียมที่ระดับการอิ่มตัวของของเหลวแตกต่างกันเป็นจำนวนทั้งสิ้น 60 ตัวอย่างจากนั้นนำไปถ่ายภาพและวิเคราะห์หาความเข้มแสงเฉลี่ยในช่วงความยาวคลื่น 450 นาโนเมตร (D_{450}) และ ช่วงความยาวคลื่น 640 นาโนเมตร (D_{640}) และนำมาหาความสัมพันธ์กับระดับการอิ่มตัวของของเหลว

การทดสอบความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นเชิงแสงเฉลี่ยและระดับการอิ่มตัวของของเหลวในดินทรายแตกต่างกัน 5 ชนิดพบว่า ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นเชิงแสงเฉลี่ยและระดับการอิ่มตัวของของเหลวในดินทรายออกตาวา 3820 ออกตาวา 3821 ดินทรายไทยระ มีความสัมพันธ์กันแบบแปรผกผัน กล่าวคือเมื่อระดับการอิ่มตัวของของเหลวในดินทรายเพิ่มมากขึ้น ค่าความเข้มแสงเฉลี่ยเพิ่มมากขึ้นตามไปด้วย ส่วนดินทรายอยุธยา ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นเชิงแสงเฉลี่ยและระดับการอิ่มตัวของของเหลวมีความสัมพันธ์กันแบบผกผัน กล่าวคือ เมื่อระดับการอิ่มตัวของของเหลวในดินทรายเพิ่มมากขึ้น ค่าความเข้มแสงเฉลี่ยมีค่าลดลง ส่วนในดินทรายชลบุรี ไม่พบความสัมพันธ์แบบเชิงเส้นระหว่างค่าความหนาแน่นเชิงแสงเฉลี่ยและระดับการอิ่มตัวของของเหลว

5.2 ปัจจัยที่มีผลต่อความสัมพันธ์

5.2.1 ขนาดคละของเม็ดดิน

สำหรับดินทรายชลบุรีที่ไม่พบความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นเชิงแสงเฉลี่ยและระดับการอิ่มตัวของของเหลวของดิน และ ทรายอยุธยาที่ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นเชิงแสงเฉลี่ยและระดับการอิ่มตัวของของเหลวของดินเป็นแบบผกผัน ผลการทดสอบหาขนาดคละของเม็ดดินแสดงดังตารางที่ 5.1พบว่าดินทรายชลบุรี และ ดินทรายอยุธยา มีเม็ดดินที่มีขนาดเล็กกว่า 0.075 มม. อยู่ร้อยละ 4.08 และ 2.33 ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับดินทรายชนิดอื่นๆ พบว่ามีปริมาณมากพอสมควร โดยสามารถจำแนกดินที่มีขนาดเล็กกว่า 0.075 มม.เหล่านี้เป็นดินจำพวกซิลต์ ไม่มีความเชื่อมโยง เมื่อเทียบกับดินทรายชนิดอื่นที่มีความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นเชิงแสงเฉลี่ยและระดับการอิ่มตัวของของเหลวของดินเป็นแบบแปรผกผัน จะพบว่ามีซิลต์เป็นส่วนประกอบน้อยมาก (0.2-1.5%) ซึ่งจะเห็นได้ปริมาณเม็ดดินที่มีขนาดเล็กกว่า 0.075 มม. เป็นปัจจัยที่มีผลต่อความสัมพันธ์ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นเชิงแสงเฉลี่ยและระดับการอิ่มตัวของของเหลวของดิน

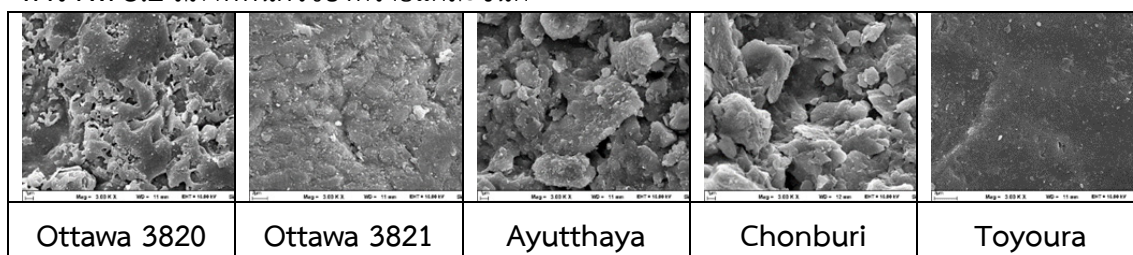
ตารางที่ 5.1 ขนาดคละของดินทราย

| Sieve Opening (mm) | Passing fraction (%) | | | | |
|--------------------|----------------------|-------------|-----------|---------|---------|
| | Ottawa 3820 | Ottawa 3821 | Ayutthaya | Chonbur | Toyoura |
| 2 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 |
| 1.18 | 100 | 100 | 100 | 89.53 | 100 |
| 0.425 | 4.59 | 38.87 | 97.08 | 52.13 | 99.99 |
| 0.25 | 0.15 | 0.76 | 55.37 | 27.96 | 49.42 |
| 0.15 | 0.12 | 0.02 | 13.06 | 10.52 | 2.56 |
| 0.075 | 0.12 | 0.02 | 2.33 | 4.08 | 0.15 |
| Pan | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

5.2.2 พื้นผิวของเม็ดดิน

ภาพถ่ายขยายอนุภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด แสดงดังตารางที่ 5.2 แสดงให้เห็นพื้นผิวของเม็ดดินทรายชลบุรีมีความขรุขระ ใกล้เคียงกับดินทรายอยุธยาซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นเชิงแสงเฉลี่ยและระดับการอิมมัตว์ของของเหลวเป็นแบบผกผัน ส่วนพื้นผิวของดินทรายชนิดอื่นๆ ค่อนข้างเรียบและพบความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นเชิงแสงเฉลี่ยและระดับการอิมมัตว์ของของเหลวเป็นแบบเชิงเส้น ดังนั้นลักษณะของพื้นผิวอาจเป็นปัจจัยหนึ่งที่ส่งผลกระทบต่อความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นเชิงแสงเฉลี่ยและระดับการอิมมัตว์ของของเหลวในดินทราย

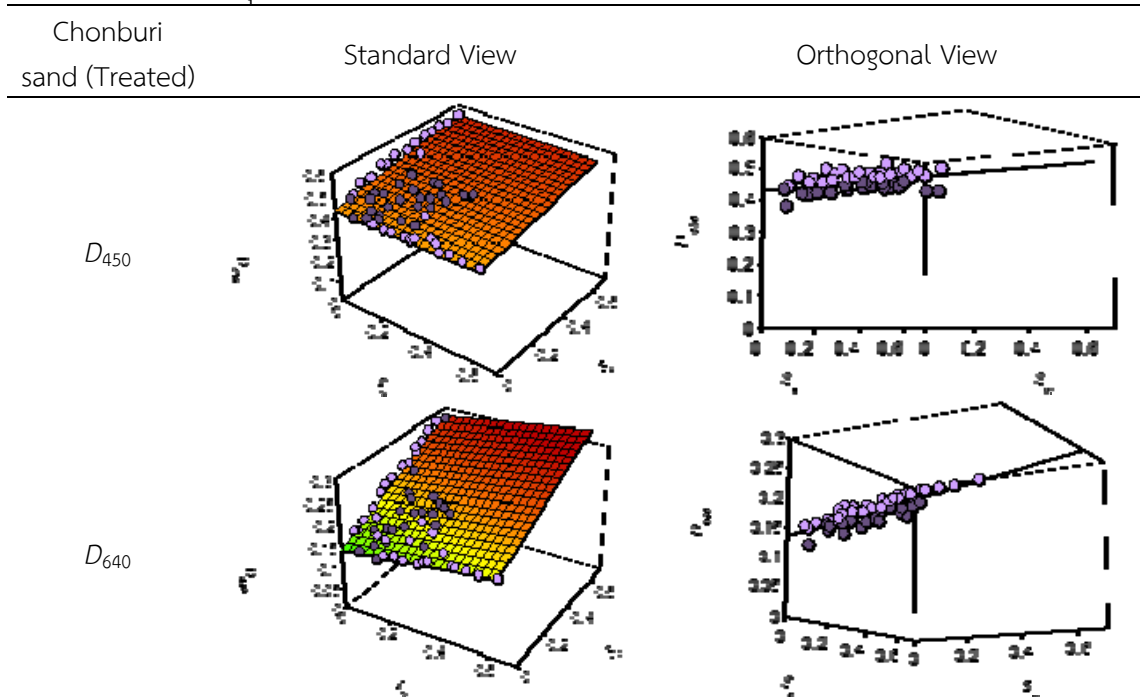
ตารางที่ 5.2 สภาพพื้นผิวของทรายแต่ละชนิด



5.2.3 ธาตุไนดิน

ในดินทรายทุกชนิด ยกเว้นดินทรายชลบุรี พบว่าปริมาณของธาตุซิลิกอน มีค่าสูงกว่าปริมาณธาตุคาร์บอน ยกเว้นในดินทรายชลบุรี ซึ่งมีปริมาณธาตุคาร์บอน สูงกว่าธาตุซิลิกอน ซึ่งธาตุคาร์บอน อาจอยู่ในรูปของสารอินทรีย์ที่ปนอยู่ในดิน สอดคล้องกับผลทดสอบหาสารอินทรีย์ในดินด้วยวิธี Loss in ignition พบว่า ปริมาณสารอินทรีย์ในดินทรายชลบุรีมีปริมาณสูงที่สุดคือ 1.26% เพื่อเป็นการศึกษาผลกระทบของธาตุคาร์บอนและสารอินทรีย์ในดิน จึงได้นำตัวอย่างดินทรายชลบุรีไปเผาที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง เพื่อให้ปริมาณคาร์บอนในตัวอย่างดินลดลง ก่อนจะนำมาทดสอบหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นเชิงแสงเฉลี่ยและระดับการอิมมัตว์ของของเหลวอีกครั้ง ผลการทดสอบความสัมพันธ์แสดงดังตารางที่ 5.3

ตารางที่ 5.3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นเชิงแสงเฉลี่ยและระดับการอิ่มตัวของของเหลวของดินชลบุรีที่ผ่านการเผา



ตารางที่ 5.4 สมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นเชิงแสงเฉลี่ยและระดับการอิ่มตัวของของเหลวในทรายชลบุรี

| Material | D_{450} | R^2 | D_{640} | R^2 |
|--------------------|---------------------------------|-------|---------------------------------|-------|
| Chonburi | $0.654 - 0.239 S_w + 0.009 S_o$ | 0.626 | $0.456 - 0.062 S_w + 0.159 S_o$ | 0.622 |
| Chonburi (Treated) | $0.431 - 0.014 S_w + 0.175 S_o$ | 0.635 | $0.136 + 0.074 S_w + 0.206 S_o$ | 0.858 |

ผลการทดสอบความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นเชิงแสงเฉลี่ยและระดับการอิ่มตัวของของเหลวของดินชลบุรีที่ผ่านการเผา พบว่าความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นเชิงแสงเฉลี่ยและระดับการอิ่มตัวของของเหลวในช่วงความถี่ 450 นาโนเมตรยังคงไม่พบความสัมพันธ์ในแบบเชิงเส้น ส่วนที่ช่วงความถี่ 640 นาโนเมตรพบความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นเชิงแสงเฉลี่ยและระดับการอิ่มตัวของของเหลวมีความสัมพันธ์กันแบบแปรผันตรง

5.2.3 สีของดิน

การใช้เทคนิคการวิเคราะห์ภาพถ่ายเชิงซ้อน (Multispectral Image Analysis Method, MIAM) เพื่อหาค่าความหนาแน่นเชิงแสงเฉลี่ยในดินทรายชนิดต่างๆ หลักการของการวิเคราะห์ภาพถ่ายเชิงซ้อนจะตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงของค่าความเข้มแสงเฉลี่ยที่เปลี่ยนแปลงไปเนื่องจากการเปลี่ยนไปของสีของตัวอย่างดินเมื่อระดับการอิ่มตัวของของเหลวเปลี่ยนแปลง พิจารณาค่าความ

เข้มแสงเฉลี่ยของดินทรายโดยการวิเคราะห์ภาพถ่ายเชิงซ้อนที่ระดับการอิ่มตัวของของเหลวต่างๆในทุกตัวอย่างดินทราย (เนื่องจากไม่สามารถถ่ายภาพดินทรายแห้งที่บรรจุในภาชนะบรรจุตัวอย่างได้) ดังแสดงในตารางที่ 5.5

ตารางที่ 5.5 ค่าความเข้มแสงเฉลี่ยเริ่มต้นของดินทรายที่ความความยาวคลื่น 450 และ 640 นาโนเมตร

| Material | Initial D_{450} | Initial D_{640} |
|-------------|-------------------|-------------------|
| Ottawa 3820 | 0.100 | 0.104 |
| Ottawa 3821 | 0.082 | 0.074 |
| Ayutthaya | 0.405 | 0.151 |
| Chonburi | 0.654 | 0.456 |
| Toyoura | 0.152 | 0.090 |
| Chonburi | 0.431 | 0.136 |

ค่าความเข้มแสงเฉลี่ยเริ่มต้นของดินทรายที่ความยาวคลื่น 450 และ 640 นาโนเมตร ของดินทรายที่มีความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นเชิงแสงเฉลี่ยและระดับการอิ่มตัวของของเหลวมีความสัมพันธ์เป็นแบบแปรผันตรง มีค่าระหว่าง 0.074 ถึง 0.152 ซึ่งมีค่าค่อนข้างต่ำเมื่อเปรียบเทียบกับดินทรายชลบุรีและดินทรายอยุธยา นอกจากนี้ยังพบว่า ค่าความเข้มแสงเฉลี่ยเริ่มต้นของดินทรายชลบุรีที่ความความยาวคลื่น 450 และ 640 นาโนเมตรเมื่อนำไปเผามีค่าลดลง ส่งผลให้ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นเชิงแสงเฉลี่ยและระดับการอิ่มตัวของของเหลวมีความสัมพันธ์เป็นแบบเชิงเส้น ในกรณีของค่าความเข้มแสงเฉลี่ยที่ความยาวคลื่น 640 นาโนเมตร ดังนั้นสีของดินทรายก็เป็นอีกหนึ่งปัจจัยที่ส่งผลต่อความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นเชิงแสงเฉลี่ยและระดับการอิ่มตัวของของเหลว สีของดินทรายก่อนและหลังเผาแสดงดังรูปที่ 5.1



รูปที่ 5.1 สีของดินทรายก่อนเผา (แถวบน) และหลังเผา (แถวล่าง)

เอกสารอ้างอิง

- Van Geel, P.J. and Sykes, J.F. (1994): "Laboratory and model simulations of a LNAPL spill in a variably-saturated sand, 1.Laboratory experiment and image analysis techniques", *Journal of Contamination Hydrology*, 17(1), 1-25
- Darnault, C.J.G., J.A. Throop, D.A. Dicarolo, A. Rimmer, T.S. Steenhuis and J.Y. Parlange, (1998): "Visualization by light transmission of oil and water contents in transient two-phase flow fields", *J. Contam. Hydrol.*, 31:337-348.
- Kechavarzi, C., Soga, K., and Wiat, P. (2000): "Multispectral Image Analysis Method to Determine Dynamic Fluid Saturation Distribution in Two-Dimensional Three-Fluid Phase Flow Laboratory Experiments." *J. of Contaminant Hydrology*, Vol.46, pp.265-293.
- Simantiraki, F., Aivalioti, M., and Gidarakos, E. (2008): "Implementation of an image analysis technique to determine LNAPL infiltration and distribution in unsaturated porous media" *Desalination* 248 (2009) 705-715
- 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 9th Geo-environmental Engineering*, Seoul, Korea., pp.83-90
- S. Sudsaeng, G. Flores, T. Katsumi, T. Inui, S. Likitlersuang and S. Yimsiri 2010. Study of Diesel Migration in Porous Media by the Simplified Image Analysis Method. *Proceeding of The 23rd KKCNN Symposium on Civil Engineering*, Taiwan: 379-382.

ภาคผนวก ก
ผลผลิต (Output)

Sitthiphat Eua-apiwatch and Siam Yimsiri. (2016). Investigation of Average Optical Density and Degree of Liquids Saturation in Sand by Image Analysis Method. *KKU Engineering Journal*. 43(S1), 147-151



Investigation of average optical density and degree of liquids saturation in sand by image analysis method

Sitthiphath Eua-Apiwatch* and Siam Yimsiri

Department of Civil Engineering, Burapha University, Chonburi 20131, Thailand.

Received April 2016
Accepted June 2016

Abstract

This research aims to apply an image analysis technique to investigate relationships between liquid saturations and Average Optical Densities (AODs) of four different porous media (i.e., Ottawa#3820, Ottawa#3821, Toyoura, and Chonburi sands). Water and diesel are used as liquids. Twenty tested samples, including 10 samples of air-water two-phase system and 10 samples of air-diesel two-phase system with variations of diesel and water saturations, are prepared for each porous medium. All samples are compacted into cylindrical containers then photos of each sample are taken by two digital cameras fitted with different band-pass filters. The photos are analyzed by an in-house program to obtain average optical densities for each spectral band. Relationships between AODs and liquid saturations are analyzed for each porous media. The results indicate that AODs are linearly proportion to degree of water and diesel saturations for all porous media in both spectral bands except Chonburi sand. The reason is due to the fact that Chonburi sand has a very rough surface which can absorb water and other liquids more than other media.

Keywords: LANPLs, Diesel, Saturation, Image analysis method

1. Introduction

Diesel fuel and gasoline leakage from underground storage tank (UST) is one of the most common subsurface contamination problems. Petroleum hydrocarbons do not readily mix with water and are known as Non-Aqueous Phase Liquids (NAPLs) which can be classified into two types, i.e. denser than water (Dense Non-Aqueous Phase Liquids, DNAPLs) and lighter than water (Light Non-Aqueous Phase Liquids, LNAPLs). Understanding the distribution of NAPLs in the subsurface is important for cost-effective remediation strategies of contaminated aquifers. In laboratory investigation, measurement of NAPLs saturation is the most difficult and important task in acquiring precise data [1]. Most image techniques used photon-attenuation, such as gamma ray [2] and X-ray techniques [3] to obtain NAPLs saturation. Multispectral Image Analysis Method (MIAM) has been developed by Kechavarzi et al. [4] as an alternative tool for measuring saturation distributions of NAPLs, air, and water in laboratory experiments under dynamic condition. Kechavarzi et al. [4] successfully established linear relationships between NAPL (Soltrol 220) saturation, water saturation, and optical density of silica sand by using narrow spectral band-pass filter (10 nm large and centered at 500, 760, and 970nm) installed in digital near-infrared cameras.

This research aims to study saturation-optical density relationships in four different sand, i.e. Ottawa#3820, Ottawa#3821, Toyoura, and Chonburi sands. Diesel is

selected as a NAPL and two Nikon D90 digital cameras with 640 and 450 nm band-pass filters are used to capture reflected light intensity within each spectral band. An image analysis technique following Flores et al. [5] is used to obtain NAPL, air, and water saturations. Two-phase (air-water and air-diesel) relationships are established for all porous media.

2. Materials and methods

2.1 Multispectral image analysis method

Multispectral Image Analysis Method has been proposed by Kechavarzi et al. [4] and provides a non-destructive and non-intrusive tool to measure degree of liquids and air saturations in both two-phase and three-phase system under dynamic condition. It provided a relationship between Average Optical Densities (AOD) and degree of liquid saturations in sand. The Optical density (D_r) is defined in term of reflectance as shown in Eq. (1).

$$D_r = -\log\left(\frac{I_r}{I^0}\right) \quad (1)$$

where I is the intensity of the reflected light from interested object and I^0 is the intensity of the reflected light from an ideal white surface, respectively.

The quantity of liquid presented in the system can be captured by digital cameras fitted with band-pass filters. From digital images, AOD (D_i) can be defined in term of reflected light intensities as shown in Eq. (2).

*Corresponding author. Tel.: +6681 451 4387
Email address: sitthiphath@buu.ac.th
doi: 10.14456/kkuenj.2016.44

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

where N is the number of pixels in the interested area and, for a given spectral band i , d_{ji} is the optical density of each pixel, I_{ji}^r is the reflected light intensity from each pixel, and I_{ji}^0 is the reflected light intensity from ideal white surface.

In two-phase (air-water and air-diesel) system only one camera fitted with band-pass filter (wavelengths $\lambda = i$) is required. Liquid saturation (S) can be obtained from following equation.

$$D_i = aS + b \quad (3)$$

2.2 Material, Equipment and method

2.2.1 Material

Ottawa#3820, Ottawa#3821, Toyoura, and Chonburi sands are used in this study. Basic properties of these sands are presented in Table 1. Figure 1 presents X-ray diffraction technique (XRD) diagrams of all sands. The results show that a dominant mineral of all porous media is quartz. Albite is found in both Chonburi and Toyoura sands. Microcline is found only in Chonburi sand and Orthoclase is found only in Toyoura sand. Scanning Electron Microscopy (SEM) is conducted for all porous media to investigate morphological appearances at surface of sands. Obtained SEM micrographs are shown in Figure 2. Red dyed diesel by Red Sudan III (1:10000 by weight) is selected as LNAPL and blue dyed water by Brilliant Blue FCF (1:10000 by weight) is used in this study.

2.2.2 Equipment

Two Nikon D90 digital cameras each fitted with a band-pass filter (450 nm and 640 nm) are used to capture images. White balance, shutter speed, and aperture of both cameras are kept constant. Two computers are used in this experiment and each computer are connected to digital camera via USB cable to remotely control digital cameras by Nikon Camera control Pro 2 program. X-Rite Gretagmabcth ColorChecker® white balance card is located close to the samples for white and black color reference. 30 W LED floodlights are applied in this experiment to lighten the sand samples. Equipment installation is shown in Figure 3.

2.2.3 Method

Known amounts of water and sand are mixed to produce 10 samples with a constant dry unit weight of sand with variation of water saturations. The samples are packed in 25 cm³ cylindrical shape container (h = 20 mm, d = 40 mm). Reflected light intensity of each sample are captured by both cameras which are located approximately 1.5 m away from the samples. To prevent evaporation of water, humidity and room temperature during test are kept constant at 70% and 20 °C, respectively. Diesel and sand are mixed with variation of diesel saturation to produce another 10 samples by similar procedures. Photos of all samples are recorded in NEF format and ViewNX 1.5.0 software is used to export all photos to TIFF format after that TIFF images are analyzed by MATLAB release 2007a following the methods of Flores et al. [5]. Image analysis procedure are presented in Figure 4.

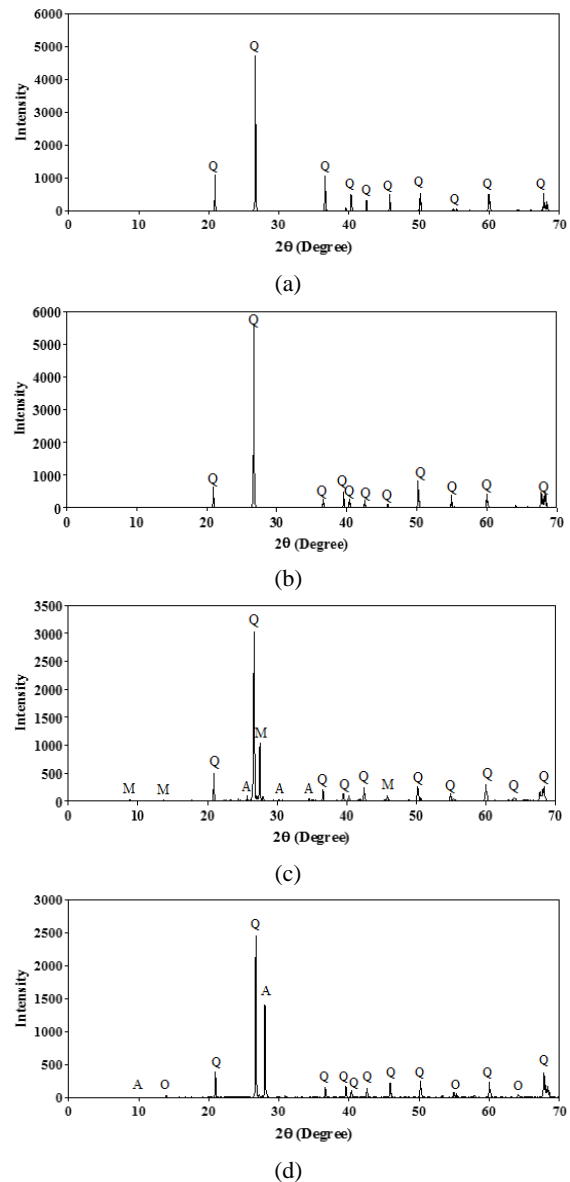


Figure 1 XRD diagram (a) Ottawa#3820 sand (b) Ottawa#3821 sand (c) Chonburi sand and (d) Toyoura sand. Peaks are due to Quartz (Q) (SiO₂), Microcline (M) (KAlSi₃O₈), Albite (A) (NaCa)(SiAl)₄O₈ and Orthoclase (O) (KAlSi₃O₈)

3. Results

AOD and water saturation relationships in different porous media for $\lambda = 450$ and 640 nm are presented in Figures 5 and 6, respectively. Image analysis results show that AODs in both wavelengths are linearly proportion to water saturations in each image for all porous media except Chonburi sand. The average optical density at wavelength $\lambda = 450$ nm of Chonburi sand is linearly independent with degree of water saturation and the coefficient of determination (R^2) in Table 2 shows the lowest value when compared to others porous media. At 640 nm wavelength, the coefficient of determination (R^2) is much better than at 450 nm wavelength indicating that the air-water two-phase system by image analysis method at 640 nm band-pass filter is more suitable than at 450 nm band-pass filter.

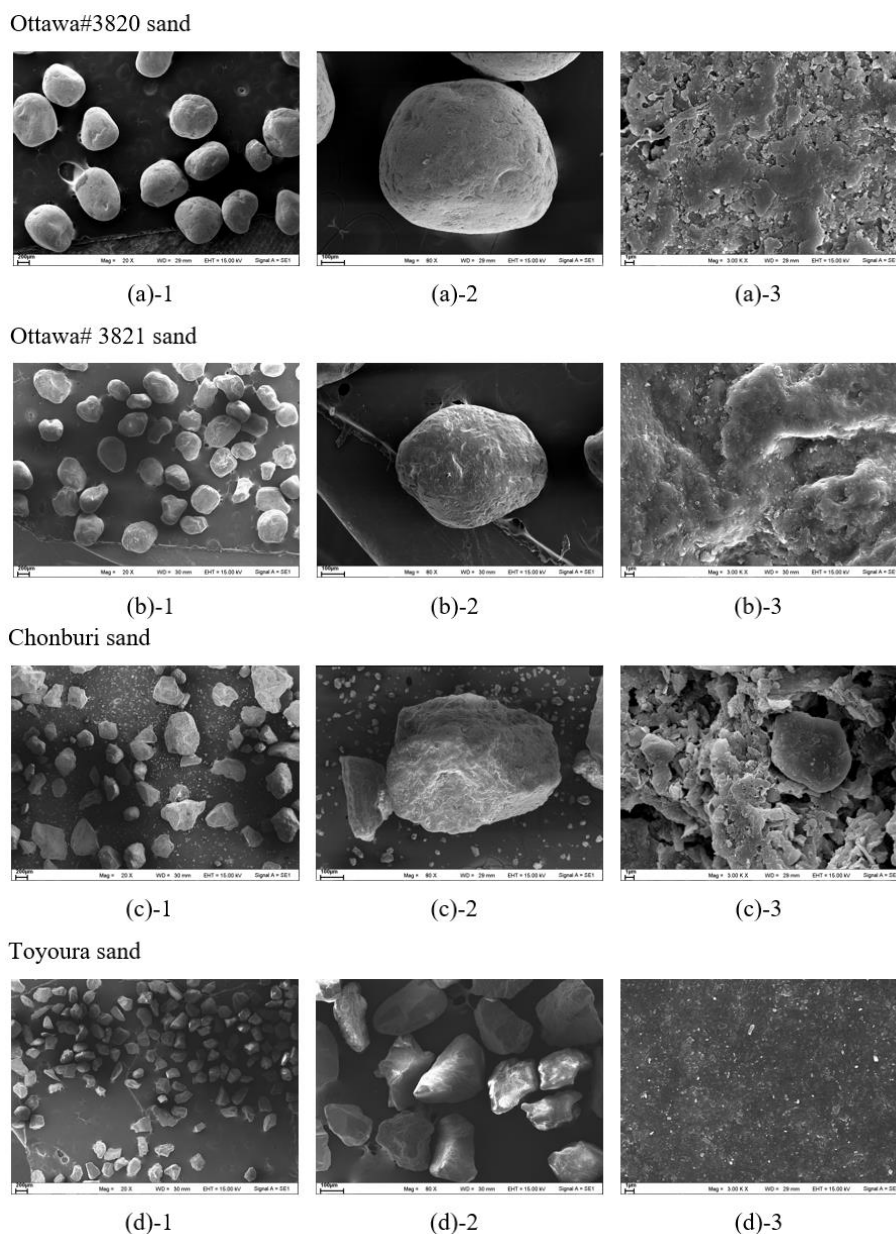


Figure 2 SEM micrographs of tested sand

Table 1 Basic properties of sand

| Properties | Ottawa#3820 | Ottawa#3821 | Chonburi | Toyourea |
|---|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| Particle density, ρ_s (g/cm ³) | 2.64 | 2.63 | 2.66 | 2.61 |
| Uniformity coefficient, C_u | 1.47 | 1.56 | 2.68 | 1.51 |
| Mean grain size (D_{50}), mm | 0.643 | 0.422 | 0.397 | 0.224 |
| Soil permeability, k (cm/s) | 2.02×10^{-2} | 1.80×10^{-2} | 3.69×10^{-2} | 2.01×10^{-3} |
| Average Porosity | 0.375 ± 0.012 | 0.384 ± 0.016 | 0.426 ± 0.020 | 0.445 ± 0.016 |
| USCS | SP | SP | SP | SP |
| LOI (%) | 0.38 | 0.13 | 1.26 | 0.50 |

Table 2 AOD and water saturation relationships

| Porous Media | D_{450} | R^2 | D_{640} | R^2 |
|------------------|---------------------|-------|---------------------|-------|
| Ottawa#3820 sand | $0.250 S_w + 0.248$ | 0.65 | $1.029 S_w + 0.309$ | 0.98 |
| Ottawa#3821 sand | $0.125 S_w + 0.152$ | 0.69 | $1.284 S_w + 0.068$ | 0.98 |
| Chonburi sand | $0.013 S_w + 0.802$ | 0.08 | $0.472 S_w + 0.654$ | 0.75 |
| Toyourea sand | $0.509 S_w + 0.273$ | 0.89 | $0.862 S_w + 0.066$ | 0.95 |

Table 3 AOD and diesel saturation relationships

| Porous Media | D_{450} | R^2 | D_{640} | R^2 |
|------------------|----------------------|-------|----------------------|-------|
| Ottawa#3820 sand | $0.669 S_o + 0.336$ | 0.94 | $0.638 S_o + 0.111$ | 0.94 |
| Ottawa#3821 sand | $0.588 S_o + 0.130$ | 0.92 | $0.608 S_o + 0.138$ | 0.95 |
| Chonburi sand | $-0.069 S_o + 0.825$ | 0.10 | $-0.360 S_o + 0.916$ | 0.55 |
| Toyoura sand | $0.680 S_o + 0.335$ | 0.96 | $0.484 S_o + 0.068$ | 0.93 |

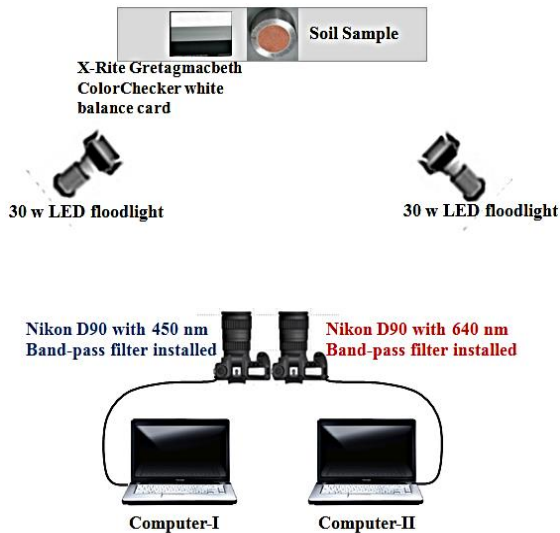


Figure 3 Experimental set up

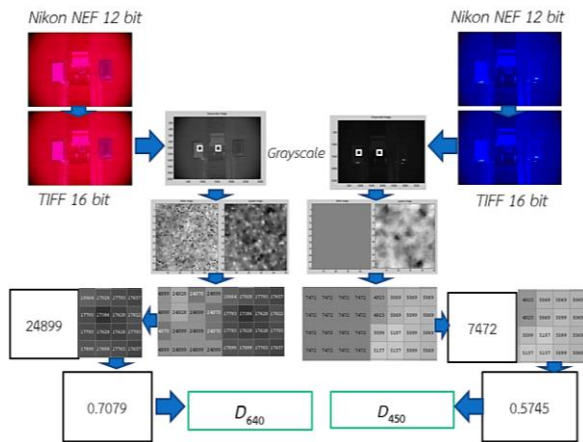


Figure 4 Image analysis procedure

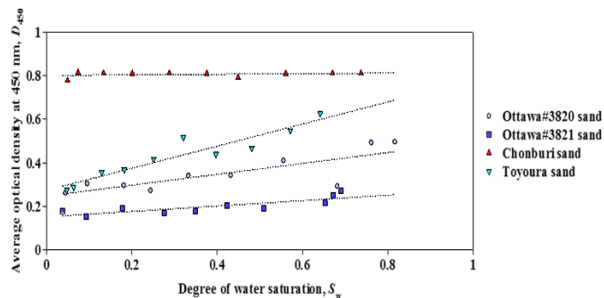


Figure 5 AOD and water saturation relationships in different porous media for $\lambda = 450$ nm.

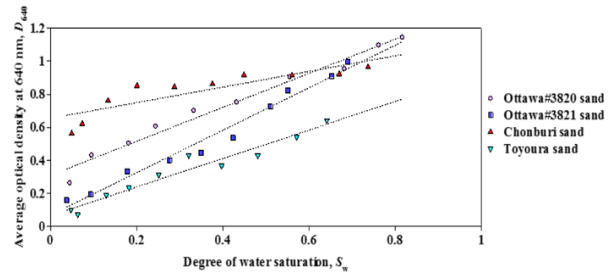


Figure 6 AOD and water saturation relationships in different porous media for $\lambda = 640$ nm.

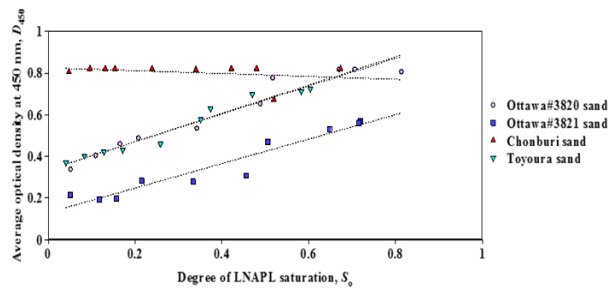


Figure 7 AOD and diesel saturation relationships in different porous media for $\lambda = 450$ nm.

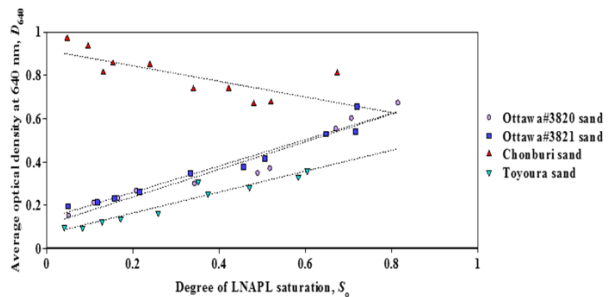


Figure 8 AOD and diesel saturation relationships in different porous media for $\lambda = 640$ nm.

In all porous media AOD and diesel saturation, have linear relationships except Chonburi sand as shown in Figures 7 and 8. AOD at 450 and 640nm of Chonburi sand have inverse relationships with degree of diesel saturation as presented in Table 3.

4. Discussion

AOD at both spectral bands of Chonburi sand exhibit inversely linear relationships with water and diesel saturations. SEM images (Figure 2c) show that the surface morphology of Chonburi sand is significantly different from other sands. The size distribution of Chonburi sand is large. Moreover, at high magnification, very rough particle surface is observed, which means that Chonburi sand may be able to absorb water and other liquids more than other media. These

observations are supported by the basic properties shown in Table 1, especially the highest hydraulic conductivity of Chonburi sand. In fact, at the time that the Chonburi-sand samples are prepared, liquids can be absorbed into the sand particles. SEM results and unsatisfactory coefficient of determination (R²) obtained from Chonburi sand confirm that the optical technique, such as Multispectral Image Analysis Method, is not suitable for this kind of sand.

5. Conclusions

AOD, water saturation, and diesel saturation relationships are investigated for four different sands and it is experimentally found that linear relationships between AOD, degree of water saturation, and degree of diesel saturation are existed in all sands, except Chonburi sand because liquids can be absorbed into the surface of Chonburi sand particle. Therefore, the Optical technique, such as Multispectral Image Analysis Method, may be suitable for the investigation of NAPLs behavior in various kinds of media, except the media that can absorb the liquids, such as for the case of Chonburi sand, which is firstly found in this research.

6. Acknowledgements

This work was financially supported by the Research Grant of Burapha University through National Research Council of Thailand (Grant No. 168/2559)

7. References

- [1] Kamaruddin SA, Sulaiman WNA, Rahman NA, Zakaria MP, Mustaffar M, Sa'ari R. A review of Laboratory and Numerical Simulations of Hydrocarbons Migration in Subsurface Environments. *Journal of Environmental Science and Technology* 2011;4(3):191-214.
- [2] Ferrand LA, Milly PCD, Pinder GF. Experimental Determination of Three-Fluid Saturation Profiles in Porous media. *Journal of Contaminant Hydrology* 1989;4:373-395.
- [3] Tuck DM, Bierck BR, Jaffe PR. Synchrotron radiation measurement of multiphase fluid saturations in porous media: Experimental technique and error analysis. *Journal of Contaminant Hydrology* 1998;31(3-4):231-256.
- [4] Kechavarzi C, Soga K, Wiart P. Multispectral Image Analysis Method to Determine Dynamic Fluid Saturation Distribution in Two-Dimensional Three-Fluid Phase Flow Laboratory Experiments. *Journal of Contaminant Hydrology* 2000;46:265-293.
- [5] Flores G, Katsumi T, Inui T, Kamon M. A simplified image analysis method to study LNAPLs migration in porous media. *Soil and Foundations* 2011;51:835-847.

ภาคผนวก ข
รายงานการเงิน

รายงานการเงิน

เลขที่โครงการระบบบริหารงานวิจัย 2559A10802074 สัญญาเลขที่ 162/2559
โครงการวิจัยประเภทงบประมาณเงินรายได้จากเงินอุดหนุนรัฐบาล (งบประมาณแผ่นดิน)
ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2559
มหาวิทยาลัยบูรพา

ชื่อโครงการ การหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นเชิงแสงเฉลี่ยและระดับการอิมตัวของของเหลวในดิน
ทรายด้วยเทคนิคการวิเคราะห์ภาพถ่ายเชิงซ้อน
หัวหน้าโครงการวิจัยผู้รับทุน ดร.สิทธิภัทร์ เอื้ออภิวรรักษ์
รายงานในช่วงตั้งแต่วันที่ 1 ตุลาคม 2558 ถึงวันที่ 30 กันยายน 2559
ระยะเวลา 1 ปี - เดือน ตั้งแต่วันที่ 1 ตุลาคม 2558

รายรับ

จำนวนเงินที่ได้รับ

| | | |
|----------------|-------------|--------------------|
| งวดที่ 1 (50%) | 180,000 บาท | เมื่อ ธันวาคม 2558 |
| งวดที่ 2 (40%) | 144,000 บาท | เมื่อ กรกฎาคม 2559 |
| งวดที่ 3 (10%) | บาท | เมื่อ |

รายจ่าย

| รายการ | งบประมาณที่ตั้งไว้ | งบประมาณที่ใช้จริง | จำนวนเงินคงเหลือ/เกิน |
|--|--------------------|--------------------|-----------------------|
| 1. ค่าตอบแทน | 202,000 | 202,000 | 0 |
| 2. ค่าวัสดุ | 52,000 | 52,000 | 0 |
| 3. ค่าทดสอบ | 70,000 | 70,000 | 0 |
| 4. ค่าธรรมเนียมอุดหนุน สถาบัน ร้อยละ 10 | 36,000 | 36,000 | 0 |
| รวม | 360,000 | 360,000 | 0 |

ลงนามหัวหน้าโครงการวิจัยผู้รับทุน