ใบรับรองวิทยานิพนธ์
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม)

ปริญญา

วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม	วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
สาขา	**ภาควิชา**

เรื่อง ผลของการเปลี่ยนแปลงระดับน้ำใต้ดินต่อการแพร่กระจายของ LNAPL

Effect of Groundwater Levels Changing on Distribution of LNAPL

นามผู้วิจัย นางสาวชไมพร สุขธัมม์รักษา

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก ....

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์สัญญา สิริวิทยาปกรณ์, Ph.D.)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ....

(อาจารย์พีรกานต์ บรรเจิดกิจ, D.Tech.Sci.)

หัวหน้าภาควิชา ....

(รองศาสตราจารย์ชาติ เจียมไชยศรี, D.Eng.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

....

(รองศาสตราจารย์กัญจนา ธีระกุล, D.Agr.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ .... **เดือน** .... **พ.ศ.** ....

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

ผลของการเปลี่ยนแปลงระดับน้ำใต้ดินต่อการแพร่กระจายของ LNAPL

Effect of Groundwater Levels Changing on Distribution of LNAPL

โดย

นางสาวชไมพร สุขธัมม์รักษา

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม)
พ.ศ. 2555

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ชไมพร สุขธัมม์รักษา 2555: ผลของการเปลี่ยนแปลงระดับน้ำใต้ดินต่อการแพร่กระจายของ LNAPL ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม) สาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ผู้ช่วยศาสตราจารย์สัญญา สิริวิทยาปกรณ์, Ph.D. 81 หน้า

น้ำใต้ดินที่มีการปนเปื้อนด้วยสารจำพวก LNAPL (Light Non-Aqueous Phase Liquid) จะเป็นชั้นน้ำใต้ดินระดับตื้นซึ่งในชั้นนี้ระดับน้ำจะมีการเปลี่ยนแปลงได้ทั้งจากการสูบน้ำมาใช้และจากปริมาณน้ำฝน แต่การศึกษาในสถานที่จริงนั้นทำได้ค่อนข้างยาก ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงใช้แบบจำลองทางกายภาพในการศึกษาการเคลื่อนที่และแพร่กระจายของ LNAPL ในงานวิจัยนี้เลือกใช้ Heptane และ Decane เป็นตัวแทนของ LNAPL โดยศึกษาลักษณะการแพร่กระจายจากการเปลี่ยนแปลงของระดับน้ำใต้ดินในแนวดิ่ง โดยจำลองสภาพชั้นน้ำใต้ดินด้วยชั้นทรายและบันทึกผลโดยการถ่ายภาพจากนั้นทำการวิเคราะห์โดยใช้โปรแกรม Photoshop และแสดงผลออกมาเป็นกราฟความสัมพันธ์ของการกระจายตัวของ LNAPL ตามระดับความสูงของชั้นทรายเพื่อนำมาใช้กำหนดแนวทางในการจัดการได้อย่างเหมาะสมต่อไป

ผลการศึกษาพบความแตกต่างของอัตราการเปลี่ยนแปลงของระดับน้ำและลักษณะสมบัติของ LNAPL ที่ใช้ศึกษามีผลต่อการแพร่กระจายของ LNAPL โดยในกรณีของการเปลี่ยนแปลงระดับน้ำอย่างรวดเร็วจะมีอากาศและ LNAPL เหลือค้างอยู่ตามช่องว่างในชั้นทรายมากกว่ากรณีของการเปลี่ยนแปลงระดับน้ำอย่างช้า และ Decane จะเหลือเป็น LNAPL คงค้างมากกว่า Heptane เนื่องจากลักษณะสมบัติของสาร

________________ ________________________ ___ / ___ / ___

ลายมือชื่อนิสิต ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

Chamaiporn Sukthamruksa 2012: Effect of Groundwater Levels Changing on Distribution of LNAPL. Master of Engineering (Environmental Engineering), Major Field: Environmental Engineering, Department of Environmental Engineering. Thesis Advisor: Assistant Professor Sanya Sirivithayapakorn, Ph.D. 81 pages.

Groundwater contaminated by LNAPL (Light Non-Aqueous Phase Liquid) is usually the groundwater in the shallow aquifer, where the groundwater table level can be changed by pumping and recharging by rain. Since, conducting study in the real place is quite difficult, therefore, this research employed the physical model to study the vertical movement and distribution of LANPL. In this research, we choosed Heptane and Decane as the representative of LNAPL to study the distribution caused by changing of groundwater level. In this case, we simulated groundwater level changing in a sand layer and collecting the data by taking digital images. Subsequently, we analyzed the images by using Photoshop and plot the graphs between distribution of LNAPL with sand layer height. The results from this experiment could be used for management in the real contaminated site.

The results showed that rates of water level changing and LNAPLcharacteristics could affect the vertical distribution of LNAPL. In the case of water level changed rapidly, more air and LNAPL residual were found in sand pore. In the case of water level changed slowly, Decane remained in sand pore more than Heptane.

______________________ ___________________________________ ___ / ___ / ___

Student's signature Thesis Advisor's signature

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้เสร็จสมบูรณ์ได้โดยการช่วยเหลือจากผู้มีพระคุณหลายท่าน ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณอาจารย์ดร. สุชาติ เหลืองประเสริฐ ประธานกรรมการสอบ รองศาสตราจารย์ ดร.สุธา ขาวเธียร ผู้ทรงคุณวุฒิจากจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สัญญา สิริวิทยาปกรณ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก และอาจารย์ ดร.พีรกานติ์ บรรเจิดกิจ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ที่ให้คำปรึกษาในเรื่องการเรียน การค้นคว้าวิจัย และคำแนะนำด้านต่างๆ ที่เกี่ยวกับงานวิจัย ตลอดจนการตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์จนสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ คณาจารย์ ตลอดจนเจ้าหน้าที่ทุก ๆ ท่านที่ให้ความอนุเคราะห์เอกสารข้อมูล สถานที่ และเครื่องมือในการวิเคราะห์ตัวอย่าง

ขอขอบพระคุณบัณฑิตวิทยาลัยที่สนับสนุนทุนวิจัยระดับบัณฑิตศึกษา เพื่อการตีพิมพ์ผลงานในวารวิชาการสารระดับชาติ ประจำปีงบประมาณ 2553

สุดท้ายนี้ขอขอบคุณ ครอบครัว เพื่อน ๆ และพี่ ๆ ในห้องปฏิบัติการทุกท่านที่ให้กำลังใจ ให้ความช่วยเหลือ และช่วยสนับสนุนการทำวิทยานิพนธ์จนสำเร็จลุล่วงได้และขอขอบพระคุณผู้ที่ให้ความช่วยเหลือ และคำแนะนำในการทำวิทยานิพนธ์เล่มนี้ซึ่งมิได้เอ่ยนามในที่นี้ทุกๆ ท่าน

ชไมพร สุขธัมม์รักษา

เมษายน 2555

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สารบัญ

หน้า

สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(4)
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	(6)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	2
การตรวจเอกสาร	3
อุปกรณ์และวิธีการ	17
อุปกรณ์	17
วิธีการ	21
ผลและวิจารณ์	29
สรุปและข้อเสนอแนะ	42
สรุป	42
ข้อเสนอแนะ	43
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	44
ภาคผนวก	46
ภาคผนวก ก ข้อมูลการศึกษาการเปลี่ยนแปลงของความชื้นในชั้นทรายที่วิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Photoshop	47
ภาคผนวก ข ข้อมูลการศึกษาการแพร่กระจายของ LNAPL ที่วิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Photoshop	56
ประวัติการศึกษาและการทำงาน	81

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สารบัญตาราง

ตารางที่ **หน้า**

ตารางที่		หน้า
1	ตัวอย่างค่า Capillary rise สำหรับดินชนิดต่างๆ	5
2	ค่าความพรุน (n) โดยประมาณของดินและหินชนิดต่างๆ	8
3	ลักษณะสมบัติของ Heptane และ Decane	14
4	แสดงผลการทดสอบค่าความพรุนของทรายที่ใช้ทำการศึกษา	29

ตารางผนวกที่

ตารางผนวกที่		หน้า
ก1	ปริมาณฟองอากาศและน้ำจากการศึกษาการเปลี่ยนแปลงของความชื้นในชั้นทรายเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงระดับน้ำอย่างรวดเร็ว (การทดลองครั้งที่ 1)	48
ก2	ปริมาณฟองอากาศและน้ำจากการศึกษาการเปลี่ยนแปลงของความชื้นในชั้นทรายเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงระดับน้ำอย่างรวดเร็ว (การทดลองครั้งที่ 2)	50
ก3	ปริมาณฟองอากาศและน้ำจากการศึกษาการเปลี่ยนแปลงของความชื้นในชั้นทรายเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงระดับน้ำอย่างช้าๆ (การทดลองครั้งที่ 1)	52
ก4	ปริมาณฟองอากาศและน้ำจากการศึกษาการเปลี่ยนแปลงของความชื้นในชั้นทรายเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงระดับน้ำอย่างช้าๆ (การทดลองครั้งที่ 2)	54
ข1	ปริมาณของ Heptane ฟองอากาศและน้ำเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงระดับน้ำอย่างรวดเร็ว (การทดลองครั้งที่ 1)	57
ข2	ปริมาณของ Heptane ฟองอากาศและน้ำเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงระดับน้ำอย่างรวดเร็ว (การทดลองครั้งที่ 2)	60
ข3	ปริมาณของ Heptane ฟองอากาศและน้ำเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงระดับน้ำอย่างช้าๆ (การทดลองครั้งที่ 1)	63
ข4	ปริมาณของ Heptane ฟองอากาศและน้ำเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงระดับน้ำอย่างช้าๆ (การทดลองครั้งที่ 2)	66
ข5	ปริมาณของ Decane ฟองอากาศและน้ำเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงระดับน้ำอย่างรวดเร็ว (การทดลองครั้งที่ 1)	69

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางผนวกที่ **หน้า**

ข6	ปริมาณของ Decane ฟองอากาศและน้ำเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงระดับน้ำอย่างรวดเร็ว (การทดลองครั้งที่ 2)	72
ข7	ปริมาณของ Decane ฟองอากาศและน้ำเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงระดับน้ำอย่างช้าๆ (การทดลองครั้งที่ 1)	75
ข8	ปริมาณของ Decane ฟองอากาศและน้ำเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงระดับน้ำอย่างช้าๆ (การทดลองครั้งที่ 2)	78

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	การกระจายตัวของน้ำใต้ดินในแนวดิ่ง	4
2	แสดงเส้นโค้งเปียกและเส้นโค้งแห้งของดิน	10
3	แสดงผลกระทบที่เรียกว่า Ink bottle effect	11
4	แหล่งกำเนิดมลพิษจากการกระทำของมนุษย์	12
5	แสดงผลกระทบจากการเพิ่มขึ้นและลดลงของระดับน้ำในการแพร่กระจายของ LNAPLs	15
6	แบบจำลองที่ใช้ในการศึกษา	17
7	ภาพกล้องถ่ายรูปกำลังขยายสูง	18
8	แสดงกรวยแก้วที่ใช้ใส่ LNAPL	19
9	แสดงเฟรมที่ใช้เป็นกรอบอ้างอิงในการถ่ายภาพ	19
10	แสดงการเปรียบเทียบสีของ fluorescein ที่ละลายในน้ำกับ sudan IV ที่ละลายใน LNAPL	20
11	แสดงจุดเริ่มต้นของการหาขนาดพื้นที่ที่เล็กที่สุดที่ใช้เป็นตัวแทนในการศึกษา	22
12	แสดงแบบจำลองขณะใส่ LNAPL ผสม sudan IV	24
13	แสดงแบบจำลองหลังจากมีการลดระดับน้ำ	24
14	แสดงแบบจำลองหลังจากมีการเพิ่มระดับน้ำจนมีระดับเท่าเดิม	25
15	แสดงภาพที่ถ่ายจากกล้องที่มีกำลังขยายสูงและวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมPhotoshop	25
16	แสดงกรอบหน้าต่าง Info และ Histogram	26
17	แสดงการปรับ Level ของภาพ	26
18	แสดง selection ของฟองอากาศ	27
19	แสดงการใช้คำสั่ง color range ในการสร้าง selection และหาจำนวน pixel ของรูปภาพ	28
20	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความพรุนกับพื้นที่	30
21	แสดงภาพถ่ายขณะทำการศึกษา	32
22	กราฟแสดงความสัมพันธ์ของอากาศกับระดับความสูง	33

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
23	เปรียบเทียบกระจายตัวของ Heptane และ Decane ขณะปล่อยลงสู่แบบจำลอง	35
24	แสดงภาพแบบจำลองเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงระดับน้ำ	36
25	แสดงกราฟความสัมพันธ์ของเปอร์เซ็นต์ความพรุนของอากาศ LNAPL และน้ำกับความสูง	37
26	กราฟเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์ความพรุนกรณีการเปลี่ยนแปลงระดับน้ำอย่างรวดเร็ว	39
27	กราฟเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์ความพรุนกรณีการเปลี่ยนแปลงระดับน้ำอย่างช้าๆ	40

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

cp	=	หน่วยของความหนืด centipoise
h	=	ความดันชลศาสตร์รวม (Total Head)
h_p	=	ความดันเนื่องจากน้ำหนักของน้ำ (Pressure Head)
LNAPL	=	Light Non-Aqueous Phase Liquid
MSDS	=	Material Safety Data Sheet
NAPL	=	Non-Aqueous Phase Liquid
Ne	=	ความพรุน
V	=	ปริมาตรทั้งหมด
V_v	=	ปริมาตรของช่องว่าง
Z	=	ความดันเนื่องจากระดับความสูงจากระดับอ้างอิง (Elevation Head)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ผลของการเปลี่ยนแปลงระดับน้ำใต้ดินต่อการแพร่กระจายของ LNAPL

Effect of Groundwater Levels Changing on Distribution of LNAPL

คำนำ

ในปัจจุบันปัญหาการปนเปื้อนของสารมลพิษในสิ่งแวดล้อมมีแนวโน้มที่เพิ่มสูงขึ้น ซึ่งจากรายงานสถานการณ์คุณภาพสิ่งแวดล้อม และรายงานสถานการณ์ปริมาณสารมลพิษที่เกิดขึ้นในแต่ละปีที่ผ่านมาพบว่า มีปัญหามลพิษที่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่อง รวมไปถึงปัญหาการปนเปื้อนสารมลพิษในแหล่งน้ำใต้ดิน (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2553) โดยการปนเปื้อนในน้ำใต้ดินระดับตื้นของสารพิษสารเคมีซึ่งอาจเกิดได้จากหลายสาเหตุ เช่น การปนเปื้อนจากพื้นที่ลักลอบทิ้งของเสียอันตราย การรั่วซึมจากสารเคมีการเกษตร การรั่วไหลบริเวณที่มีการฝังถังสารเคมีหรือน้ำมันใต้ดินและจากการประกอบการอุตสาหกรรม (Fetter, 1999) โดยเฉพาะอย่างยิ่งกลุ่มของสารเคมีที่ไม่ละลายน้ำหรือละลายน้ำได้น้อยที่เรียกกันว่า NAPL (Non-Aqueous Phase Liquid) มักจะย่อยสลายตามกระบวนการทางธรรมชาติได้ช้าทำให้ตกค้างอยู่ในสิ่งแวดล้อมเป็นระยะเวลานาน ส่งผลให้เกิดการปนเปื้อนของดินและแหล่งน้ำอีกทั้งยังส่งผลกระทบต่อคุณภาพของแหล่งน้ำใต้ดิน ซึ่งเป็นปัญหาอย่างมากในปัจจุบัน

จากการปนเปื้อนของ NAPL ในสิ่งแวดล้อมทำให้มีผลกระทบตามที่กล่าวมาแล้ว ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงสนใจศึกษาการเคลื่อนตัวของ NAPL ชนิดที่มีความหนาแน่นน้อยกว่าน้ำหรือ LNAPL (Light Non-Aqueous Phase Liquid) ในชั้นน้ำใต้ดินระดับตื้นเนื่องจากน้ำใต้ดินในชั้นนี้มีการเปลี่ยนแปลงได้ค่อนข้างง่ายทั้งจากการสูบน้ำขึ้นมาใช้และจากปริมาณฝน โดยศึกษาการแพร่กระจายเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของระดับน้ำใต้ดินในแนวดิ่ง เพื่อนำมาใช้กำหนดแนวทางในการติดตามตรวจสอบและฟื้นฟู LNAPL จากแหล่งกำเนิดทุติยภูมิต่อไป โดยได้เลือกใช้แบบจำลองทางกายภาพ (physical model) ในการศึกษาเนื่องจากการศึกษาในพื้นที่จริงนั้นทำได้ค่อนข้างยาก โดยเลือกใช้การถ่ายภาพเพื่อบันทึกผลและแสดงผลออกมาเป็นกราฟความสัมพันธ์ของการกระจายตัวของ LNAPL ตามระดับความสูงของชั้นทราย

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วัตถุประสงค์

เพื่อศึกษาการแพร่กระจายของ LNAPL ในแนวดิ่งเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของระดับน้ำใต้ดิน

ขอบเขตของการศึกษา

1. เป็นการวิจัยเพื่อศึกษาการเคลื่อนที่และการแพร่กระจายของ LNAPL ในแบบจำลองทางกายภาพ (physical model) และใช้ทรายที่มีความพรุนขนาดเดียวกัน

2. การวิจัยครั้งนี้เลือกใช้ Heptane และ Decane เป็นตัวแทนของ LNAPL

3. ใช้การถ่ายภาพในการบันทึกผลและวิเคราะห์ผลการวิจัย (image analysis) โดยโปรแกรม Photoshop cs4

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

การตรวจเอกสาร

หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

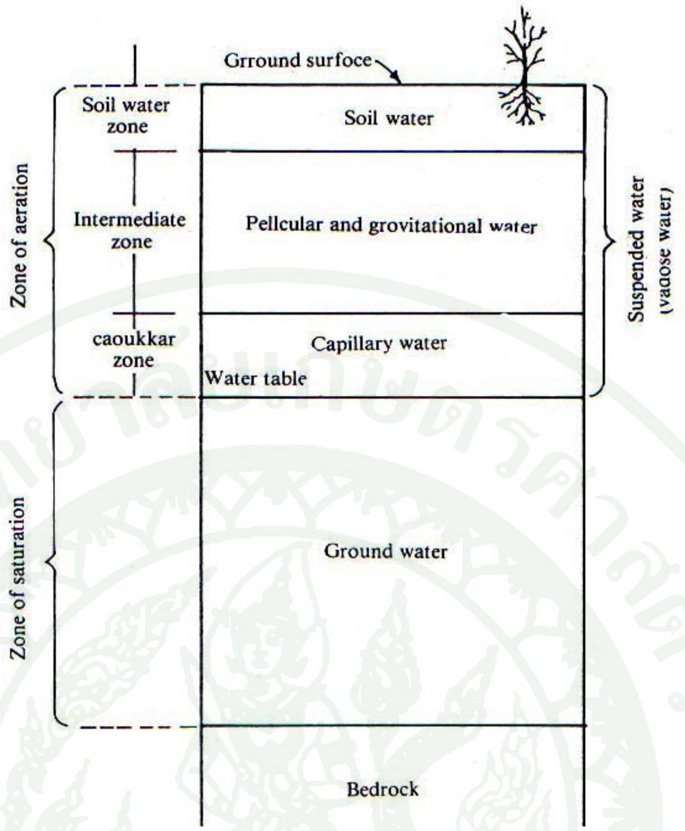
1. น้ำใต้ดิน

คำว่า “น้ำใต้ดิน” (groundwater) คือ น้ำที่แทรกอยู่ตามช่องว่างของกรวด ทราย หิน หรือตามรอยหินแตกเต็มทุกช่องชั้นธรณี (geologic stratum) จนเกิดเป็นบริเวณอิ่มตัวด้วยน้ำ (saturated zone) การอิ่มตัวมีสภาพการไหลซึมอย่างช้าๆ จากที่มีพลังงานสูงไปสู่ที่มีพลังงานต่ำ (ไสว, 2528)

1.1 องค์ประกอบชั้นใต้ดิน

ในทางธรณีวิทยาสามารถแบ่งน้ำใต้ดินออกเป็นหลายลักษณะด้วยกัน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับตำแหน่งและความลึกที่น้ำนั้นถูกกับเก็บอยู่ ซึ่งเมื่อพิจารณาองค์ประกอบของชั้นใต้ดิน ดังแสดงในภาพที่ 1 สามารถแบ่งชั้นดินและหินที่อยู่ใต้ผิวดินลงไปเป็น 2 ชั้นใหญ่ๆ คือชั้นสัมผัสอากาศ (zone of aeration) และชั้นที่อิ่มตัวด้วยน้ำ (zone of saturation) (ฉลอง, 2538)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 1 การกระจายตัวของน้ำใต้ดินในแนวดิ่ง

ที่มา: Domenico and Schwartz (1990)

1.1.1 ชั้นสัมผัสอากาศ (zone of aeration) หรือโซนที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ (unsaturated zone) เริ่มตั้งแต่ผิวดินลึกลงไปจนถึงระดับน้ำใต้ดิน (water table) ในบริเวณของส่วนสัมผัสอากาศ ช่องว่างระหว่างอนุภาคดินบางส่วนจะมีอากาศแทรกอยู่ และบางส่วนจะมีน้ำกักเก็บอยู่ เรียกน้ำใต้ดินส่วนที่เรียกว่า vadose หรือ suspended water ชั้นสัมผัสอากาศแบ่งย่อยได้เป็น 3 ชั้น คือ

ก. ชั้นรากพืช (soil water zone) อยู่ตอนบนสุดของชั้นสัมผัสอากาศโดยเริ่มจากผิวดินลงไปจนถึงความลึกของรากพืช มีความหนามากน้อยขึ้นอยู่กับชนิดของดินและพืช ชั้นนี้จึงมีอิทธิพลต่อการเกษตร

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ข. ชั้นช่วงกลาง (intermediate zone) อยู่ต่ำกว่าชั้นของ soil water จนถึงส่วนบนของชั้นคาพิลลารี ระดับน้ำใต้ดินในชั้นดินนี้เรียกว่า gravitational water เป็นน้ำที่เหลืออยู่หลังจากการซึมจากผิวลงไปสู่ชั้นที่อิ่มตัวด้วยน้ำ การเคลื่อนที่ของน้ำเป็นไปด้วยแรงดึงดูดของโลก

ค. ชั้นคาพิลลารี (capillary zone) หรือเรียกอีกอย่างว่า capillary fringe อยู่ระหว่าง intermediate zone กับชั้นที่อิ่มตัวด้วยน้ำ โดยเกิดจากการที่น้ำใต้ดินซึมขึ้นมาในช่องว่างระหว่างเม็ดดินด้วยแรงตึงผิว (surface tension) ของน้ำใต้ดินจากสภาพคาพิลลารี (Capillary rise) ซึ่งความหนาของชั้น capillary fringe นี้จะขึ้นอยู่กับขนาดของเม็ดดินและการเรียงตัวของเม็ดดินตลอดจนความหนาแน่นของน้ำใต้ดิน โดยระดับของแรงดึงคาพิลลารีอาจอยู่เหนือชั้นดินเพียง 2-3 ซม. ไปจนถึง 2 เมตร ซึ่งขึ้นอยู่กับของว่างระหว่างอนุภาคของดินหรือชนิดของดิน ตัวอย่างของค่า Capillary rise สำหรับดินชนิดต่างๆ แสดงไว้ในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ตัวอย่างค่า Capillary rise สำหรับดินชนิดต่างๆ

ชนิดของดิน	ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของเม็ดดิน (มม.)	Capillary rise (มม.)
Silt	0.02-0.05	2000
Coarse Silt	0.05-0.10	1055
Fine Sand	0.10-0.20	428
Medium Sand	0.20-0.50	246
Coarse Sand	0.50-1.00	135
Very Coarse Sand	1.00-2.00	65
Find Gravel	2.00-5.00	25

ที่มา: นิตยา (2551)

1.1.2 ชั้นที่อิ่มตัวด้วยน้ำ (zone of saturation) เริ่มจากจากระดับน้ำใต้ดินจนถึงชั้นของหินแข็ง (bed rock) ที่รองรับอยู่ในชั้นนี้ ดินหรือหินจะเต็มไปด้วยน้ำแต่เพียงอย่างเดียว ไม่มีส่วนที่เป็นอากาศเลย น้ำใต้ดินส่วนนี้เรียกว่าน้ำบาดาล

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

1.2 ประเภทของชั้นดินหรือชั้นหินที่เกี่ยวข้องกับน้ำใต้ดิน

ชั้นน้ำใต้ดินหรือชั้นหินอุ้มน้ำใต้ดินเป็นชั้นหิน ชั้นตะกอนหรือชั้นดินซึ่งให้น้ำออกมาได้เป็นปริมาณที่มากเพียงพอต่อการใช้อย่างมีนัยสำคัญ โดยทั่วๆ ไปชั้นหินอุ้มน้ำที่พัฒนาเอาน้ำใต้ดินขึ้นไปใช้ประมาณร้อยละ 90 จะเป็นน้ำจากชั้นหินร่วนของพวกกรวดทราย ชนิดของชั้นหินอุ้มน้ำใต้ดินที่เกี่ยวกับการเก็บและการไหลของน้ำใต้ดินแบ่งออกได้เป็นประเภทใหญ่ๆ 4 ประเภท (ทวีศักดิ์, 2546) คือ

1.2.1 ชั้นหินอุ้มน้ำ (aquifer) หรือเรียกว่าชั้นหินให้น้ำ เป็นชั้นดินหรือหินที่สามารถกับเก็บน้ำได้มาก และยอมให้น้ำไหลผ่านได้โดยสะดวก ชั้นดินหรือหินประเภทนี้ ได้แก่ กรวดทราย และหินที่มีรูพรุน (porous rocks) แบ่งเป็น 3 ประเภท ได้แก่

ก. ชั้นหินอุ้มน้ำเปิด (unconfined aquifer) หรือชั้นให้น้ำใต้ดินอิสระ เป็นชั้นดินหรือหินอุ้มน้ำที่ไม่อยู่ภายใต้แรงกดดัน และจะมีระดับน้ำใต้ดินอยู่ตอนบนสุดของส่วนที่อิ่มตัวด้วยน้ำ ซึ่งจะสัมผัสกับอากาศในเม็ดดิน บางครั้งเรียกว่า free หรือ nonartesian aquifer ลักษณะรูปร่างของระดับน้ำใต้ดิน ระดับน้ำใต้ดินอาจสูงขึ้นหรือต่ำลงขึ้นอยู่กับปริมาณของน้ำใต้ดินที่ถูกกับเก็บไว้ การไหลของน้ำใต้ดินในชั้นหินอุ้มน้ำลักษณะนี้ จะไหลไปตามความลาดชันของระดับน้ำใต้ดิน

ข. ชั้นหินอุ้มน้ำปิด (confined aquifer) เป็นชั้นหินอุ้มน้ำที่มีชั้นหินเนื้อแน่นกว่าเช่นชั้นทึบน้ำวางทับข้างบนและรองอยู่ข้างล่าง ทำให้ชั้นหินอุ้มน้ำและน้ำใต้ดินที่ถูกกับเก็บอยู่ภายใต้ความกดดันเนื่องจากน้ำหนักของหินที่กดทับซึ่งเป็นแรงดันที่มากกว่าแรงดันบรรยากาศ การไหลของน้ำจะมีลักษณะคล้ายๆ การไหลของน้ำในท่อ เพราะถูกประกบด้วยชั้นหินหนาแน่นทั้งข้างบนและข้างล่าง

ค. ชั้นน้ำลอย (perched aquifer) หรือชั้นหินอุ้มน้ำปลอม เป็นชั้นน้ำขนาดเล็กลอยอยู่เหนือชั้นหินอุ้มน้ำเปิด เกิดจากชั้นดินเหนียวขนาดเล็ก ชั้นหินเนื้อแน่นเหนือชั้นหินอุ้มน้ำเปิดนั้นซึ่งอยู่ในชั้นไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ ถ้าหากในบริเวณสัมผัสอากาศมีชั้นหินเนื้อแน่นหรือชั้นดินเหนียว ซึ่งน้ำซึมผ่านได้น้อยหรือซึมผ่านไม่ได้เป็นรูปโค้งคล้ายแอ่งเกิดร่วมอยู่ด้วยกัน มักพบชั้นน้ำนี้บ่อยๆ ในตะกอนลุ่มน้ำบ่อน้ำใต้ดิน

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

1.2.2 ชั้นหินซับน้ำ (aquiclude) จัดเป็นชั้นหินทึบน้ำ ซึ่งเป็นชั้นดินหรือหินที่มีคุณสมบัติในการดูดซับน้ำได้ แต่ช่องที่มีอยู่ขนาดเล็กมากน้ำไม่สามารถซึมผ่านได้โดยสะดวก หากเจาะบ่อลงไปในชั้นดินนี้จะไม่สามารถสูบน้ำซึมขึ้นมาใช้ได้ ชั้นหินประเภทนี้ได้แก่ ชั้นดินเหนียว เป็นต้น

1.2.3 ชั้นหินกั้นน้ำ (aquifuge) หรือชั้นหินแข็ง จัดเป็นชั้นหินทึบน้ำซึ่งเป็นชั้นดินหรือหินที่มีความหนาแน่นสูง ลักษณะเป็นหินเนื้อแน่น มีช่องภายในเพื่อกักเก็บน้ำน้อย ช่องภายในที่มีอยู่ไม่อาจติดต่อถึงกันได้ โดยปกติจะหมายถึงชั้นหินแข็ง เช่น หินแกรนิต หินบะซอลต์ เป็นต้น

1.2.4 ชั้นหินต้านน้ำ (aquitard) จัดเป็นชั้นหินทึบน้ำ ซึ่งเป็นชั้นหินหรือชั้นดินที่มีคุณสมบัติชะลอความเร็วของการไหลหรือต้านการไหลของน้ำไว้ แต่ไม่ป้องกันการไหลผ่านของน้ำบาดาลจากชั้นหินอุ้มน้ำหนึ่งไปยังอีกชั้นหินอุ้มน้ำที่อยู่ต่อเนื่องติดกัน โดยปกติจะหมายถึง ชั้นหินกั้นน้ำ (confining layer) ที่อยู่ติดกับชั้นหินอุ้มน้ำเดี่ยว หรือชั้นหินอุ้มน้ำหลายๆ ชั้นแทรกสลับกัน น้ำสามารถไหลผ่านชั้นหินต้านน้ำนี้ได้ แต่ด้วยอัตราที่ช้ามากเปรียบเสมือนการรั่วซึมผ่าน จึงเรียกชั้นหินต้านน้ำในลักษณะนี้ว่า ชั้นหินกั้นน้ำที่รั่วซึม (leaky confining layer) ชั้นหินประเภทนี้ได้แก่ กรวด ทรายปนดินเหนียว

1.3 การเคลื่อนที่ของน้ำใต้ดิน (Movement of groundwater)

1.3.1 ความดันชลศาสตร์ (Hydraulic head)

น้ำใต้ดินจะไหลจากบริเวณที่มีความดันชลศาสตร์ (Hydraulic head) สูงไปสู่บริเวณที่มีความดันชลศาสตร์ต่ำเสมอ ซึ่งความดันชลศาสตร์ ณ ตำแหน่งใดๆ ในชั้นหินอุ้มน้ำสามารถเขียนสมการได้ ดังนี้

$$h = z + h_p \quad \ldots(1)$$

โดยที่ h คือ ความดันชลศาสตร์รวม (Total head) , เมตร

Z คือ ความดันจากระดับความสูงจากระดับอ้างอิง (Elevation head), เมตร

h_p คือ ความดันเนื่องจากน้ำหนักของน้ำ (Pressure head) , เมตร

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ความดันชลศาสตร์ (Total head) เป็นตัวการสำคัญในการควบคุมการไหลและการเคลื่อนที่ของน้ำใต้ดิน โดยจะไหลจากจุดที่มีความดันชลศาสตร์สูงไปสู่ความดันชลศาสตร์ต่ำเสมอ และไม่ขึ้นกับ Elevation head หรือ Pressure head โดยตรง เพราะ Total head จะควบคุมการไหลของน้ำบาดาลเสมอ

1.3.2 ความพรุน (Porosity, n)

ดินประกอบด้วยเนื้อหรือเม็ดดินซึ่งเป็นของแข็งและช่องว่างระหว่างเม็ดดินที่มีน้ำและอากาศแทรกอยู่ ถ้าช่องว่างระหว่างเม็ดดินมีน้ำอยู่เต็มเรียกว่า อยู่ในสภาพอิ่มตัวด้วยน้ำ (Saturated) แต่ถ้ามีอากาศผสมอยู่ด้วยเรียกว่า อยู่ในสภาพไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ (Unsaturated) โดยค่าความพรุนของดินและหินชนิดต่างแสดงไว้ดังตารางที่ 2

ความพรุนของดินบอกให้รู้ถึงสัดส่วนของปริมาตรช่องว่างระหว่างเม็ดดินและปริมาตรทั้งหมดของดิน ซึ่งสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$Ne = \frac{V_v}{V} \qquad \text{...(2)}$$

โดยที่ Ne คือ ความพรุน, ไม่มีหน่วย
Vv คือ ปริมาตรของช่องว่าง, ปริมาตร
V คือ ปริมาตรทั้งหมด, ปริมาตร

ตารางที่ 2 ค่าความพรุน (n) โดยประมาณของดินและหินชนิดต่างๆ

ชนิดของดินและหิน	ค่าความพรุน (n)
ทราย (Sand)	0.25-0.4
ดินตะกอน (Silt)	0.35-0.5
ดินเหนียว (Clay)	0.4-0.7

ที่มา: ดัดแปลงจาก Freeze and Cherry (1979)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

โดยในการศึกษาครั้งนี้เปอร์เซ็นต์ของความพรุนทั้งหมดในแบบจำลองจะเท่ากับปริมาณของฟองอากาศ น้ำและ LNAPL

1.3.3 มุมสัมผัส (Contact angle) และ Hysteresis

มุมสัมผัสเป็นมุมระหว่างระนาบของปฏิสัมพันธ์ของของเหลว-ก๊าซกับระนาบของปฏิสัมพันธ์ของเหลว-ของแข็ง มุมสัมผัสนี้เป็นผลมาจากสมดุลระหว่างแรงแอดฮีชั่นกับแรงโคฮีชั่น

มุมสัมผัสนี้สามารถบอกแนวโน้มที่หยดของเหลวจะกระจายตัวในพื้นผิวเรียบของของแข็ง โดยมุมสัมผัสจะแปรผกผันกับความสามารถในการกระจายตัวของของเหลว

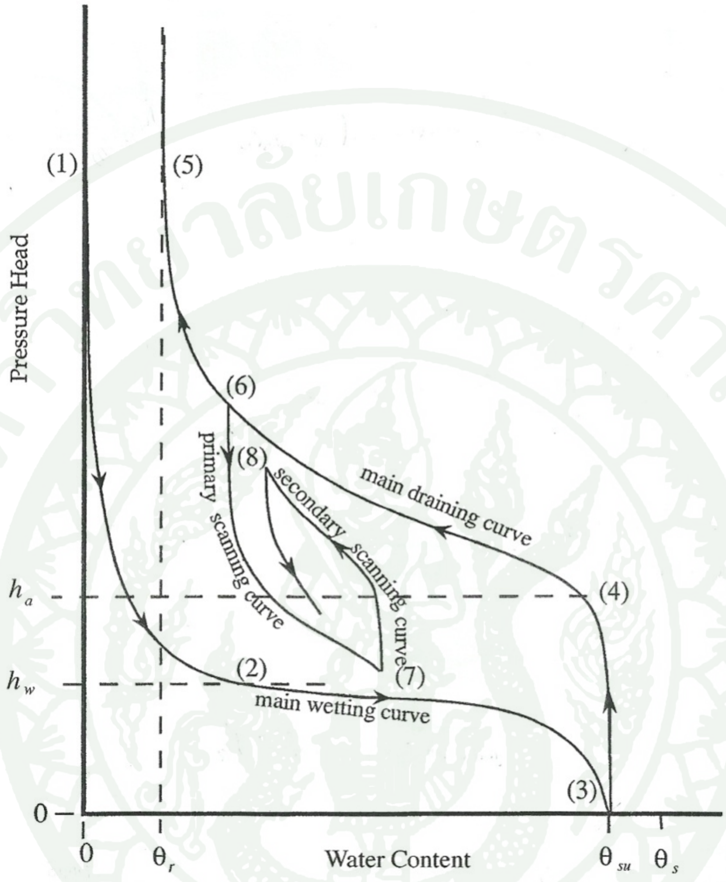
มุมสัมผัสที่น้อยกว่า 90 องศา โดยทั่วไปจะหมายถึง ความสามารถในการกระจายตัวหรือ wetting ของพื้นผิวอยู่ในระดับดีมาก และ ของเหลวจะกระจายออกไปเป็นบริเวณกว้าง มุมสัมผัสที่มากกว่า 90 องศา โดยทั่วไปจะหมายถึง ความสามารถในการกระจายตัวหรือ wetting ของพื้นผิวอยู่ในระดับไม่ดี และ ของเหลวจะสัมผัสกับพื้นผิวของเหลวเพียงเล็กน้อยและจะก่อตัวเป็นทรงหยดน้ำค้าง

สำหรับกรณีที่ของเหลวนั้นเป็นน้ำ พื้นผิวที่มีการกระจายตัวได้ดีหรือมีมุมสัมผัสเข้าใกล้ 0 องศา จะถูกเรียกว่า hydrophilic และพื้นผิวที่มีการกระจายตัวไม่ดีหรือมีมุมสัมผัสเข้าใกล้ 180 องศา จะถูกเรียกว่า hydrophobic พื้นผิวที่มีการกระจายตัวไม่ดีอย่างยิ่งยวด (Superhydrophobic) จะให้มุมสัมผัสที่มากกว่า 150 องศา ทำให้มีหน้าสัมผัสระหว่างของเหลวและของแข็งน้อยมากๆ ซึ่งกรณีนี้บางครั้งถูกเรียกว่า "Lotus effect" หรือ "ปรากฏการณ์ใบบัว"

ฮีสเทอริซิส (Hysteresis) คือความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นในดินและแรงดันภายในช่องว่างของดิน การสร้างกราฟการเก็บกักน้ำของดินทำได้โดยเริ่มจากดินที่อิ่มตัวแล้วจึงระบายน้ำออก กราฟที่ได้นี้จะเรียกว่า เส้นโค้งแห้ง และถ้ามีการทำให้ดินกลับมาอิ่มตัวอีกครั้ง จะได้กราฟอีกเส้นหนึ่งเรียกว่า เส้นโค้งเปียก ดังภาพที่ 2 โดยเริ่มต้นจากทรายแห้ง 100% จากนั้นทำให้เปียกจนถึงจุดอิ่มตัว จะได้เป็นเส้นโค้งเปียก (จุดที่ 1-3) จากนั้นระบายน้ำออจะพบว่าทรายจะไม่

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

กลับไปแห้งเหมือนเดิมซึ่งจะได้เป็นเส้นโค้งแห้ง (จุดที่ 3-5) โดยปรากฏการณ์นี้เรียกว่า ฮีสเทอริซิส (Hysteresis)



ภาพที่ 2 แสดงเส้นโค้งเปียกและเส้นโค้งแห้งของดิน

ที่มา: Selker *et al.* (1999)

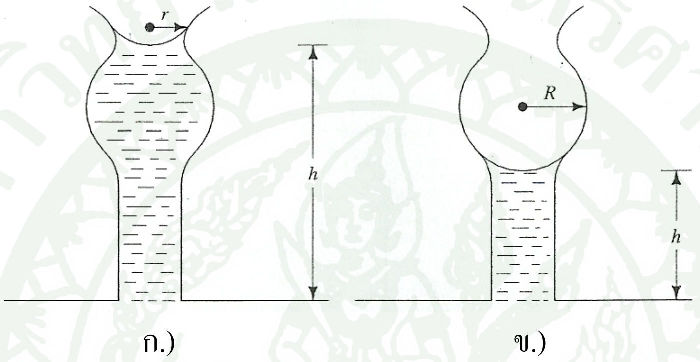
สาเหตุของการเกิด ฮีสเทอริซิส (Hysteresis) มีดังนี้

1. ผลกระทบของช่องว่างที่มีต่อสภาพทางธรณีวิทยาซึ่งทำให้เกิดผลกระทบที่เรียกว่า Ink bottle effect ดังภาพที่ 3 โดยรัศมีช่วงคอขวดคือ r และรัศมีช่วงที่กว้างที่สุดคือ R และเมื่อแรงดันระหว่างน้ำในช่องว่างกับผิวของตัวกลางมีค่าเป็นลบมากขึ้นน้ำจะถูกระบายออกจากกรูพรุน

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

2. มุมสัมผัสระหว่างน้ำและพื้นที่ผิวของตัวกลางมากขึ้นในช่วงที่มีน้ำเพิ่มมากขึ้นและจะตรงข้ามกันกับช่วงที่มีน้ำลดลง โดยในช่วงที่มีน้ำเพิ่มมากขึ้นเส้นโค้งเปียกก็จะมีรัศมีมากขึ้นด้วยซึ่งจะมากกว่ารัศมีความโค้งของเส้นโค้งแห้ง

3. อากาศที่ถูกขังอยู่ในช่องว่างในระหว่างรอบของฮีสเทอริซิสจะช่วยลดปริมาณความชื้นของดินที่จะถูกทำให้เปียก และในที่สุดอากาศก็จะถูกเก็บกักไว้ในชั้นทราย



ภาพที่ 3 แสดงผลกระทบที่เรียกว่า Ink bottle effect ก.) ความชื้นในกรณีที่มีการระบายน้ำ ข.) ความชื้นในกรณีที่มีการเติมน้ำ

ที่มา: Fetter (1999)

2. มลพิษในน้ำใต้ดิน

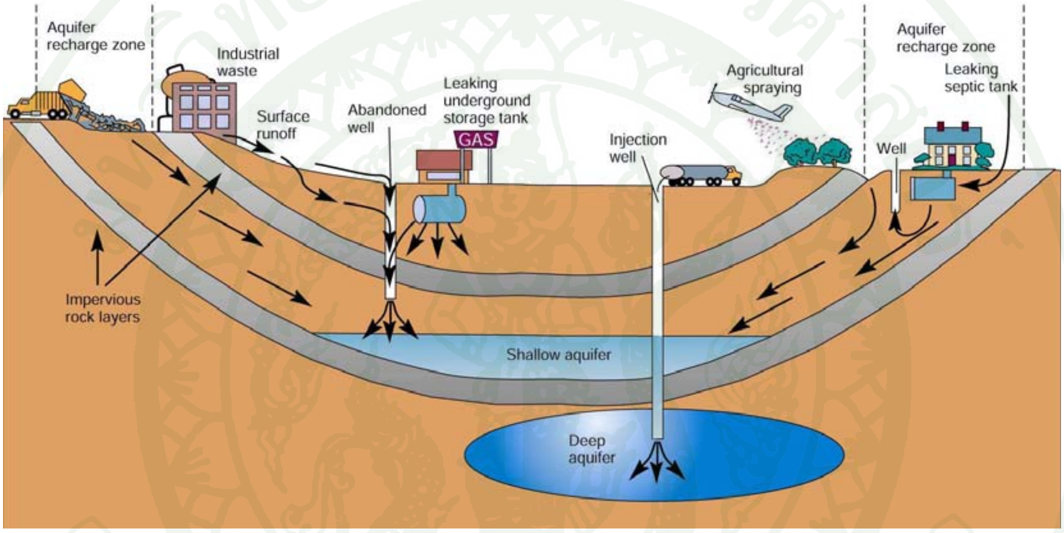
มลพิษในน้ำใต้ดิน หมายถึง การเสื่อมลงของคุณภาพน้ำใต้ดิน ทำให้น้ำใช้ประโยชน์ไม่ได้หรือเป็นอันตรายต่อสุขภาพ เนื่องจากสารพิษ สารเคมีหรือเชื้อโรค (Todd, 1980) เช่น แบคทีเรีย สารอินทรีย์ โลหะหนัก สารป้องกันกำจัดศัตรูพืชและสัตว์ รวมถึงการทำให้คุณสมบัติของน้ำใต้ดินเปลี่ยนแปลงไปทั้งทางกายภาพ เคมีและชีวภาพ (Fried, 1975) โดยปัญหาการปนเปื้อนในน้ำใต้ดินมีแหล่งที่มาที่แตกต่างกันไปทั้งที่ทราบแหล่งที่มาที่แน่นอน (point source) เช่น เป็นจุดกำจัดสารเคมีและไม่ทราบแหล่งที่มาที่แน่นอน (non-point source) เช่นเกิดฝนตกหรือน้ำไหลบ่าแล้วชะเอาน้ำมัน สารพิษและสารเคมีมากับน้ำ

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

3. แหล่งกำเนิดมลพิษในน้ำใต้ดิน

3.1 ธรรมชาติ เช่น จากการชะล้าง กัดเซาะ การย่อยสลายของวัตถุต้นกำเนิดดิน และองค์ประกอบทางธรณีวิทยา

3.2 การกระทำของมนุษย์แบ่งเป็น 3 แหล่งกำเนิด คือ เกษตรกรรม อุตสาหกรรม พาณิชยกรรมและที่อยู่อาศัย (Soliman *et al*., 1997) แสดงดังภาพที่ 4



ภาพที่ 4 แหล่งกำเนิดมลพิษจากการกระทำของมนุษย์

ที่มา: Cunningham *et al.* (2003)

โดยในการศึกษาจะกล่าวถึงมลพิษที่พบได้บ่อยครั้งในน้ำใต้ดิน จำพวกน้ำมันปิโตรเลียม หรือสารเคมีที่มักจะละลายน้ำได้น้อยเป็นต้น ซึ่งการปนเปื้อนนั้นเกิดจากการกระทำของมนุษย์ทั้งสิ้น

4. Non-Aqueous Phase Liquid (NAPL)

NAPL คือสารเคมีที่ไม่ละลายน้ำหรือละลายน้ำได้น้อย เป็นสารเคมีที่ไม่มีน้ำเจือปน แบ่งออกเป็น 2 ชนิด ตามความหนาแน่น คือ

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

- DNAPL (Dense Non-Aqueous Phase Liquid) มีความหนาแน่นมากกว่าน้ำ โดยทั่วไปมักจะจมอยู่ใต้น้ำ

- LNAPL(Light Non-Aqueous Phase Liquid) มีความหนาแน่นน้อยกว่าน้ำ โดยทั่วไปมักจะลอยอยู่บนผิวน้ำ

โดย NAPL ที่แพร่กระจายหรือรั่วไหลปนเปื้อนลงสู่ใต้ดินจะทำให้เกิดปัญหา NAPL ปนเปื้อนของน้ำใต้ดินเป็นเวลานาน (Tang *et al*., 1995)

ในที่นี้สนใจศึกษาเฉพาะ LNAPL เท่านั้น

Light Non-Aqueous Phase Liquid (LNAPL)

LNAPL คือ ของเหลวที่ไม่ใช่น้ำและมีความหนาแน่นน้อยกว่าน้ำ มีอัตราการละลายต่ำ เป็นสารอินทรีย์จำพวก Hydrocarbons เช่น น้ำมันดิบ (Oil) น้ำมันเชื้อเพลิง (Gasoline) รวมทั้งผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการกลั่นปิโตรเลียมLNAPL เป็นสารที่ไม่มีขั้วคือจะไม่ละลายในน้ำและเป็นอันตรายต่อคนกับสิ่งแวดล้อมซึ่งก็ขึ้นอยู่กับชนิดของสารเคมีและปริมาณที่มีการปนเปื้อนในสิ่งแวดล้อม

ตัวอย่างการปนเปื้อนของ LNAPL ในสิ่งแวดล้อม เช่น การรั่วซึมของถังเก็บน้ำมันใต้ดินและท่อส่งน้ำมัน การรั่วอาจเกิดขึ้นเนื่องจากการกดทับและการแตกของฐานหรืออาจเกิดจากอุบัติเหตุบนท้องถนนของรถบรรทุกน้ำมันรวมทั้งการกำจัดสารเคมีที่ไม่ถูกวิธีซึ่งเป็นสาเหตุที่ก่อให้เกิดการปนเปื้อนได้ การปนเปื้อนของ LNAPL นั้นขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายๆ อย่าง เช่น ปริมาณของ LNAPL ที่ปนเปื้อน ชนิดของ LNAPL รวมทั้งโครงสร้างของชั้นดินที่เกิดการปนเปื้อน เป็นต้น

จากการศึกษาลักษณะสมบัติของสารอินทรีย์หลายๆชนิดพบว่า Heptane (Van Geel and Sykes, 1994) เป็น LNAPL ที่มีลักษณะสมบัติที่เหมาะสมสำหรับการศึกษาวิจัยในครั้งนี้เนื่องจากมีความเป็นพิษต่ำและเพื่อเป็นการเปรียบเทียบจึงได้เลือกใช้ Decane เป็นตัวแทนของ LNAPL อีกหนึ่งชนิดเนื่องจากมีความหนืดที่แตกต่างกันอย่างชัดเจนโดย Heptane และ Decane มีลักษณะสมบัติดังตารางที่ 3

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางที่ 3 ลักษณะสมบัติของ Heptane และ Decane

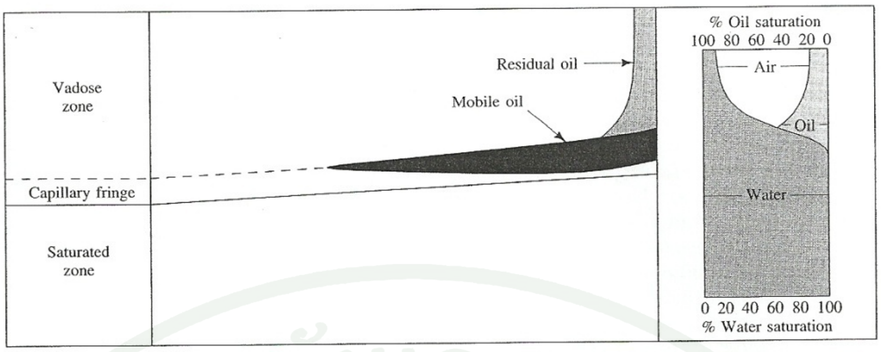
	Heptane	Decane
ความหนาแน่น	0.68 g/ml	0.73 g/ml
ความหนืด	0.386 cp at 25°C	0.92 cp at 25°C
ความสามารถในการละลาย	Immiscible	Immiscible
แรงตึงผิว	20.14 mN/meters at 20°C	31.5 mN/meters at 20°C

ที่มา: MSDS Sigma-Aldrich - D901 (Decane)
MSDS Labscan n-Heptane 95%

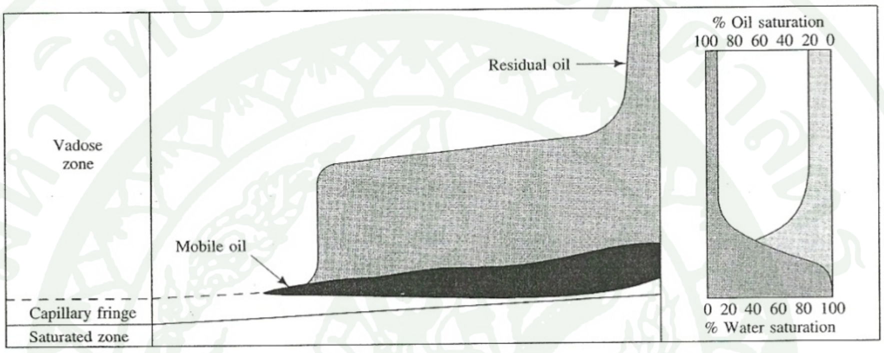
ผลกระทบจากการเพิ่มขึ้นและลดลงของระดับน้ำในการแพร่กระจายของ LNAPLs

การไหลของ LNAPL มีความซับซ้อนตามการเพิ่มขึ้นและลดลงของระดับน้ำตามฤดูกาล รูปที่ 5 (ก) แสดงให้เห็นชั้นของน้ำมันที่ลอยบนพื้นผิวของโซนคาพิลลารี เมื่อระดับน้ำลดลงชั้นของน้ำมันจะเคลื่อนที่ลงมาด้วยและมีน้ำมันบางส่วนตกค้างเหลืออยู่ในชั้น vadose zone เหนือระดับน้ำมันซึ่งเคลื่อนที่ลงมาแล้ว ดังแสดงในรูปที่ 5 (ข) เมื่อระดับน้ำเพิ่มขึ้น ระดับน้ำมันจะเคลื่อนที่เพิ่มขึ้นไปกับระดับน้ำ ดังรูปที่ 5 (ค) แสดงให้เห็นถึงน้ำมันที่ตกค้างที่เหลืออยู่ในเขตอิ่มตัว การไหลของน้ำและน้ำมันจะถูกควบคุมโดยกฎดาร์ซี และขึ้นอยู่กับผลกระทบของความหนาแน่น ความหนืดและการซึมผ่าน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับปัจจัยเหล่านี้อย่างใดอย่างหนึ่ง

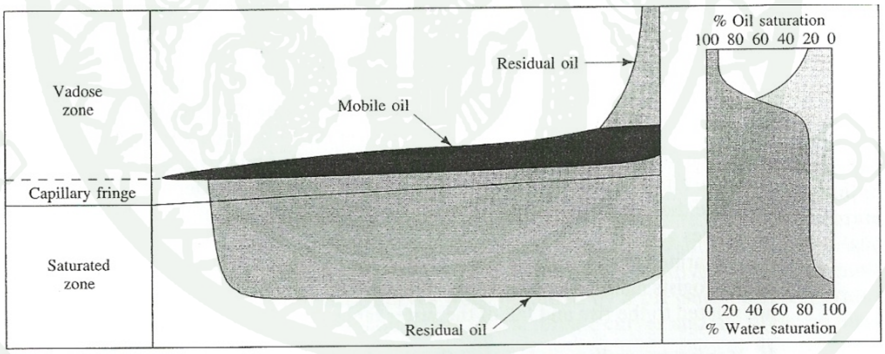
ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ก.)



ข.)



ค.)

ภาพที่ 5 แสดงผลกระทบจากการเพิ่มขึ้นและลดลงของระดับน้ำในการแพร่กระจายของ LNAPLs

ที่มา: Fetter (1999)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Tang *et al*. (1995) ศึกษาสมบัติของ NAPL โดยใช้ trichloroethene (TCE) และเบนซินเป็นตัวแทน โดยทำการศึกษาในระดับใต้ผิวดินภายใต้เงื่อนไขที่มีการเติมอากาศ จากผลการทดลองพบว่าการเปลี่ยนแปลงของระดับน้ำใต้ดินทำให้ TCE และเบนซินเคลื่อนที่ไป เมื่อระดับน้ำเพิ่มสูงขึ้น TCE จะยังคงอยู่กับที่ไม่ได้เคลื่อนที่ตามระดับน้ำที่เพิ่มสูงขึ้น แต่เบนซินนั้นมีแนวโน้มที่จะเคลื่อนที่ตามระดับน้ำที่สูงขึ้น และเมื่อพิจารณาเฉพาะกรณีของเบนซิน จะพบว่าที่ระดับผิวดินเบนซินจะเคลื่อนที่อย่างรวดเร็วเข้าสู่ capillary zone แต่ก็ไม่สามารถเคลื่นที่ไปในโซนอิ่มตัวได้ เพราะเบนซินนั้นเบากว่าน้ำและไม่สามารถเอาชนะแรงคาพิลลารีของน้ำได้ เมื่อระดับน้ำลดลงเบนซินก็จะเคลื่อนที่ลงมากับ capillary zone นั่นแสดงให้เห็นว่าเบนซินเป็นแหล่งมลพิษที่เคลื่อนที่ได้และเมื่อมีการเติมอากาศมวลของเบนซินจะแตกตัวเป็นอนุภาคเล็กๆ และถูกพาจาก saturated zone ไปยัง unsaturated zone ด้วยฟองอากาศ คือ เบนซินจะอยู่บริเวณ capillary zone และจะออกนอกบริเวณตรงกลางของแนวการเติมอากาศ

Fotini *et al*. (2009) ศึกษาการไหล และการกระจายตัวของ LNAPL 2 ชนิด คือ Soltrol 220 และน้ำมันดีเซล ในตัวกลาง (ทราย) ที่มีรูพรุน 2 ขนาด พบว่าในทุกการทดลองการเคลื่อนตัวในชั้นทรายละเอียดจะช้ากว่าทรายหยาบเนื่องด้วยขนาดของรูพรุนของเม็ดทรายของทรายละเอียดมีขนาดเล็กกว่าของทรายหยาบ และการเคลื่อนที่ของ LNAPL ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของๆไหลซึ่งสามารถอธิบายได้ด้วยผลการทดลองน้ำมันดีเซลสามารถเคลื่อนที่ได้อย่างรวดเร็วโดยเฉพาะในแนวดิ่งและยังสร้าง plume ซึ่งกว้างกว่าของ Soltrol ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่าน้ำมันดีเซลมีความหนืด และความหนาแน่นสูงกว่า เป็นผลให้ความหนาแน่นของน้ำมันดีเซลกระทำต่อแรง capillary forces ด้วยแรงกระทำที่มากกว่าเมื่อเทียบกับ Soltrol และ

Kechavarzi *et al*. (2005) ได้ทำการวิจัยเกี่ยวกับการซึมผ่านของ LNAPL ในชั้น vadose zone โดยเป็นการศึกษาในแบบจำลองและมีการใช้เครื่องวัดแรงตึงผิว (tensiometer) วัดแรงตึงผิวของน้ำและ LNAPL ในจุดต่างๆของแบบจำลองด้วย ตัวกลางที่ใช้คือทรายซิลิกามีค่า Cu เท่ากับ 1.35 จากการศึกษาทำให้ทราบว่าการกระจายตัวของ LNAPL ที่เหลือตกค้างสามารถกลายเป็นแหล่งกำเนิดระยะยาวของการปนเปื้อนได้ โดยไอระเหยที่ผ่านชั้น vadose และโซนที่มีส่วนประกอบของ LNAPL สามารถแพร่กระจายไปกับน้ำฝนหรือน้ำหลากต่างๆ ซึ่งส่งผลต่อการพัฒนาแหล่งน้ำบาดาลในพื้นที่ปนเปื้อน

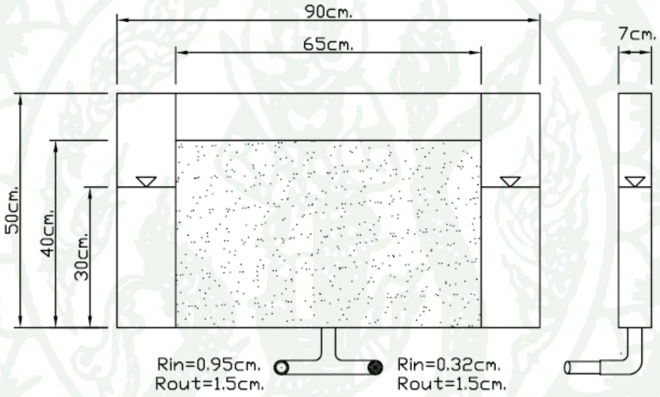
ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

อุปกรณ์และวิธีการ

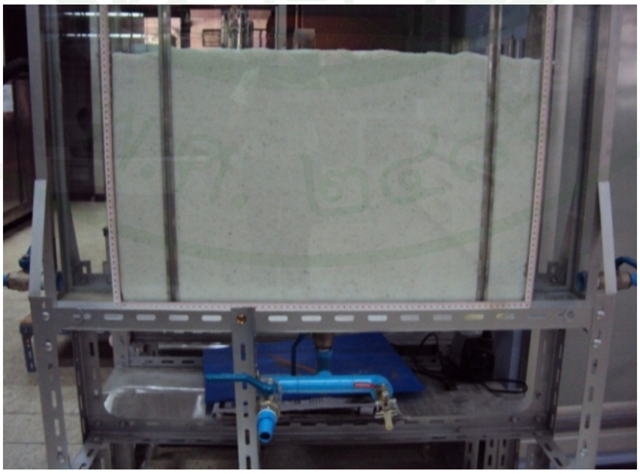
อุปกรณ์

1. เครื่องมือและอุปกรณ์

1.1 แบบจำลองเป็นตู้กระจกทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้า (ขนาดความสูง 50 ซม. ความยาว 90 ซม. ความหนา 7 ซม.) มีรูเปิดด้านล่างเพื่อใช้ในการระบายน้ำออก 2 ขนาดคือ 1.91 ซม. (6 หุน) และ 0.64 ซม. (2 หุน) ดังภาพที่ 6



ก.)



ข.)

ภาพที่ 6 ก.) แสดงแบบแปลนของแบบจำลอง ข.) แสดงภาพถ่ายแบบจำลองที่ใช้ก่อนทำการศึกษา

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

1.2 เครื่องคอมพิวเตอร์

1.3 กล้องถ่ายรูปกำลังขยายสูง (Dino-Lite digital microscope pro รุ่น AM-413T) ดังภาพที่ 7

ภาพที่ 7 ภาพกล้องถ่ายรูปกำลังขยายสูง

1.4 ตะแกรงสำหรับร่อนทรายเบอร์ 14 (1.4 mm.) และแบอร์ 20 (0.85 mm.)

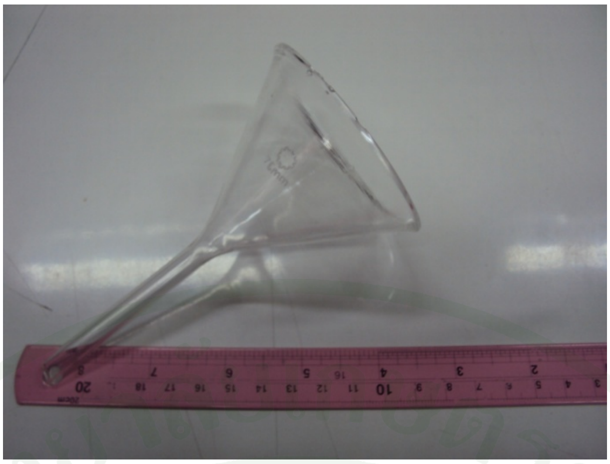
1.5 เครื่องชั่งละเอียด รุ่น 2100 MP2 ยี่ห้อ Sartorius

1.6 ตู้อบที่มีเครื่องควบคุมอุณหภูมิภายใน (Hot air oven) รุ่น ED 53/E2 ยี่ห้อ Binder

1.7 ทรายสีขาว

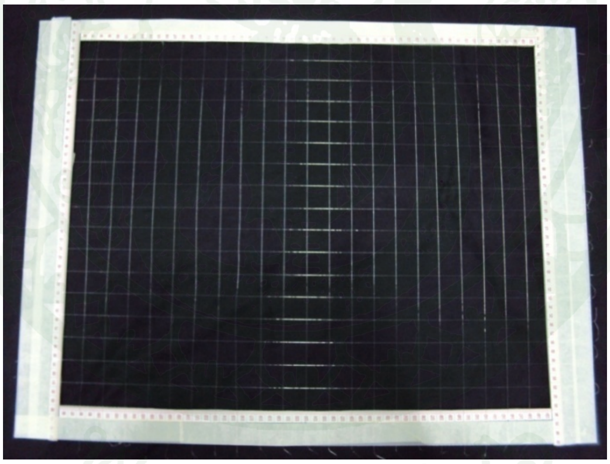
1.8 กรวยแก้วเพื่อใช้ใส่ LNAPL ในแบบจำลอง ดังภาพที่ 8

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 8 แสดงกรวยแก้วที่ใช้ใส่ LNAPL

1.9 เฟรมที่ใช้เป็นกรอบอ้างอิงในการถ่ายภาพ โดยแต่ละช่องมีขนาด 2.5x2.5 ซม. ดังภาพที่ 9



ภาพที่ 9 แสดงเฟรมที่ใช้เป็นกรอบอ้างอิงในการถ่ายภาพ

2. สารเคมี

2.1 LNAPL

n-Heptane 95% AR1078-G 2.5L Labscan CAS No. 142-82-5

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

Decane 99% D90-1 Sigma-Aldrich CAS No. 124-18-5

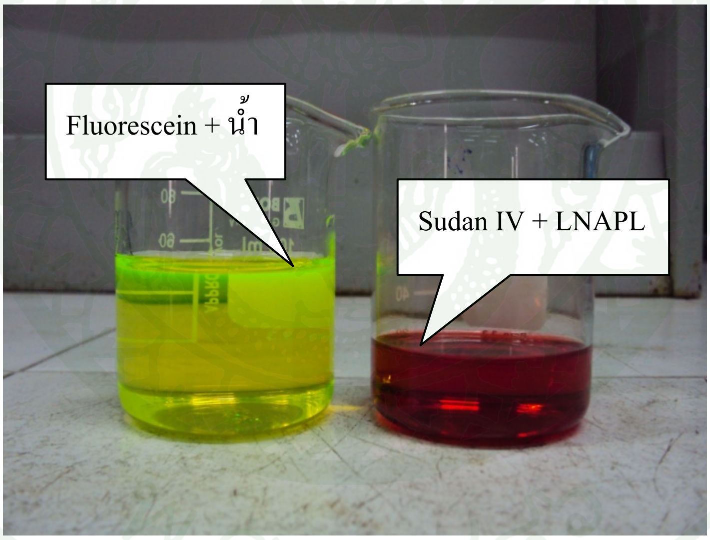
2.2 สีที่ใช้ในการย้อม LNAPL

Sudan IV (Scarlet R) 84650 Fluka CAS No. 85-83-6

2.3 สีที่ใช้ผสมน้ำ

Fluorescein 46955 Fluka CAS No. 2321-07-5

sudan IV และ fluorescein มีสีที่คล้ายกัน แต่เมื่อนำไปละลายกับ LNAPL และ น้ำ ตามลำดับจะมีสีที่แตกต่างกันอย่างชัดเจน ดังภาพที่ 10



ภาพที่ 10 แสดงการเปรียบเทียบสีของ fluorescein ที่ละลายในน้ำกับ sudan IV ที่ละลายใน LNAPL

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิธีการ

1. ศึกษาและเก็บรวบรวมข้อมูลจำเป็นพื้นฐาน

ศึกษาค้นคว้า รวบรวมข้อมูลพื้นฐานที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย เช่น การตรวจสอบเอกสารงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการเคลื่อนตัวของสารมลพิษน้ำใต้ดิน รวมทั้งคุณสมบัติของ LNAPL และวิธีการวิเคราะห์ผลด้วยโปรแกรม Photoshop

2. เตรียมทรายและศึกษาความพรุนของทรายที่ใช้ในแบบจำลอง

ทรายที่ใช้เป็นทรายสีขาวมีขนาดประมาณ 0.85-1.4 มม. โดยผ่านการร่อนด้วยตะแกรงเบอร์ 14 (1.4 mm.) และเบอร์ 20 (0.85 mm.) จากนั้นล้างทำความสะอาดและอบให้แห้งประมาณ 8-10 ชั่วโมง เมื่อทำการทดลองเสร็จในแต่ละครั้งจะมีการล้างทำความสะอาดทรายและอบแห้งใหม่ทุกครั้ง

ศึกษาความพรุนของทรายที่ใช้โดยนำทรายใส่ในกระบอกตวงขนาด 10 มล. นำไปชั่งน้ำหนักโดยใช้เครื่องชั่งละเอียด แล้วจึงเติมน้ำลงไปจนอิ่มตัว นำไปชั่งน้ำหนักอีกครั้งเพื่อหาน้ำหนักของน้ำที่เพิ่มขึ้น โดยค่าความพรุนที่หาได้เป็นค่าความพรุนจริงของทรายและนำไปเปรียบเทียบกับการหาความพรุนด้วยวิธี Image analysis ซึ่งเป็นการหาค่าความพรุนในสองมิติเท่านั้น

3. สร้างแบบจำลองทางกายภาพและเฟรมที่ใช้เป็นกรอบอ้างอิงในการถ่ายภาพ

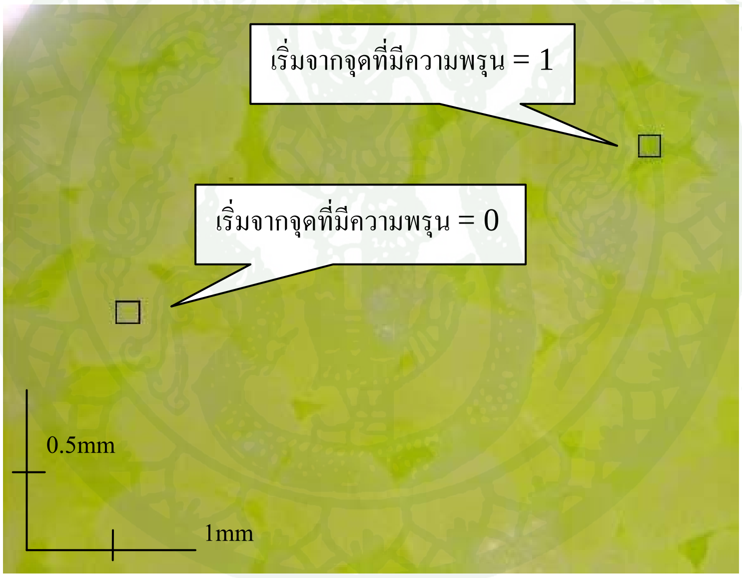
แบบจำลองขนาดความสูง 50 ซม. ความยาว 90 ซม. ความหนา 7 ซม. โดยทำจากกระจกใสเพื่อป้องกันการกัดกร่อนจากสารเคมีที่ใช้ในการศึกษาและมีรูเปิดด้านล่างเพื่อใช้ในการระบายน้ำออก 2 ขนาดคือ 1.91 ซม. (6 หุน) และ 0.64 ซม. (2 หุน) เพื่อให้เห็นความแตกต่างของอัตราการระบายน้ำออกอย่างชัดเจนจากนั้น โดยมีอัตราเร็ว 6.67 ซม./นาที และ 2.86 ซม./นาที ตามลำดับและเพื่อให้การถ่ายภาพมีจุดอ้างอิงที่แน่นอนจึงได้จัดทำเฟรมขึ้นมาเพื่อช่วยในการถ่ายภาพ โดยทำจากแผ่นพลาสติก 65 x 48.5 ซม. นำมาเจาะรูตรงกลางขนาด 42.5 x 55 ซม. เพื่อขึงเอ็นให้ห่างกันช่องละ 2.5 ซม. ทั้งแนวตั้งและแนวนอนจะได้ช่องว่างขนาด 2.5x2.5 ซม. เพื่อใช้เป็นกรอบอ้างอิงในการ

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ถ่ายภาพ โดยแถวในแนวนอนแต่ละแถวจะมีช่องว่างจำนวน 22 ช่อง แต่จะใช้จริงเพียง 17 ช่อง ซึ่งพอดีกับขนาดของแบบจำลอง

4. ทดลองถ่ายภาพเพื่อหาขนาดพื้นที่ที่เล็กที่สุดที่ใช้เป็นตัวแทนในการศึกษา

ทดลองถ่ายรูปจากแบบจำลองเพื่อหาพื้นที่ที่เล็กที่สุดที่ยอมรับได้ที่จะใช้เป็นตัวแทนในการศึกษา โดยภาพที่ได้จะนำไปวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม photoshop โดยเริ่มจากจุดที่เป็นเม็ดทราย (มีความพรุน=0) และจากจุดที่ไม่ใช่ทราย (มีความพรุน =1) จากนั้นค่อยๆขยายพื้นที่ออกไปเรื่อยๆ เพื่อดูปริมาณน้ำในรูพรุนที่เปลี่ยนแปลงไปนำมาพลอตเป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำในรูพรุนกับพื้นที่ ดังภาพที่ 11



ภาพที่ 11 แสดงจุดเริ่มต้นของการหาขนาดพื้นที่ที่เล็กที่สุดที่ใช้เป็นตัวแทนในการศึกษา

5. เริ่มทำการศึกษาในแบบจำลอง

เริ่มจากการเตรียมน้ำ และ LNAPL ที่ใช้ในการศึกษา โดยน้ำที่ใช้เป็นน้ำประปาผสมกับ fluorescein ในอัตราส่วน fluorescein 25 มิลลิกรัม ในน้ำ 1 ลิตร หรือ 0.0025 % ส่วน LNAPL ที่ใช้จะมีการผสมสี sudan IV ในอัตราส่วน sudan IV 100 มิลลิกรัม ใน LNAPL 1 ลิตร หรือ 0.01 %

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

(Wipfler *et al*., 2004) เพื่อเพิ่มความชัดเจนขณะถ่ายภาพเนื่องจาก LNAPL ที่ใช้ในการศึกษาใสไม่มีสี จากนั้นใส่ทรายสีขาวที่ผ่านการคัดขนาดแล้วในแบบจำลองให้มีความสูง 40 ซม.

5.1 การศึกษาในขั้นแรกจะศึกษาการเปลี่ยนแปลงของความชื้นในชั้นทราย โดยมีขั้นตอนดังนี้

5.1.1 เติมน้ำผสม fluorescein ในแบบจำลองจากทางด้านข้างทั้ง 2 ข้างให้มีความสูง 30 ซม.

5.1.2 ปล่อยน้ำออกจากแบบจำลองให้เหลือระดับน้ำสูงเพียง 10 ซม. โดยการปล่อยน้ำออกจะปล่อยด้วยอัตราเร็วที่ต่างกันตามขนาดของท่อคือ คือ ท่อเล็ก 2.86 ซม./นาที และ ท่อใหญ่ 6.67 ซม./นาที โดยในแต่ละการทดลองจะปล่อยน้ำออกจากท่อเพียงขนาดเดียวเท่านั้น และในแต่ละท่อจะทำการทดลองเป็นจำนวน 2 ซ้ำ

5.1.3 รอจนระดับน้ำคงที่ประมาณ 10-15 นาที จากนั้นเติมน้ำในแบบจำลองจากทางด้านข้างทั้ง 2 ข้าง ด้านละเท่าๆกัน จนมีระดับเท่าเดิมที่ 30 ซม.

5.1.4 ถ่ายภาพเพื่อบันทึกผล ซึ่งการถ่ายภาพจะถ่ายเป็นแถวตามแนวนอนทั้งหมด 8 แถว ตามช่องของเฟรมแต่จะถ่ายเพียง 5 ช่อง คือถ่ายภาพ 1 ช่อง เว้น 3 ช่อง โดยในการถ่ายภาพใช้กำลังขยาย 50 เท่า

5.2 เริ่มศึกษาการแพร่กระจายของ LNAPL โดยมีขั้นตอนดังนี้

โดยเริ่มศึกษา LNAPL ทีละชนิดแยกกันในแต่ละการทดลอง เริ่มจาก heptane และ decane ตามลำดับ ในแต่ละชนิดทำการทดลองจำนวน 2 ซ้ำ มีขั้นตอน ดังนี้

5.2.1 เติมน้ำผสม fluorescein ในแบบจำลองจากทางด้านข้างทั้ง 2 ข้างให้มีความสูง 30 ซม. ดังภาพที่ 13

5.2.2 ใส่ LNAPL ปริมาณ 200 มล. เหนือระดับน้ำประมาณ 5 ซม. ปล่อยไว้ประมาณ 10 นาที จนการแพร่กระจายคงที่ ดังภาพที่ 12

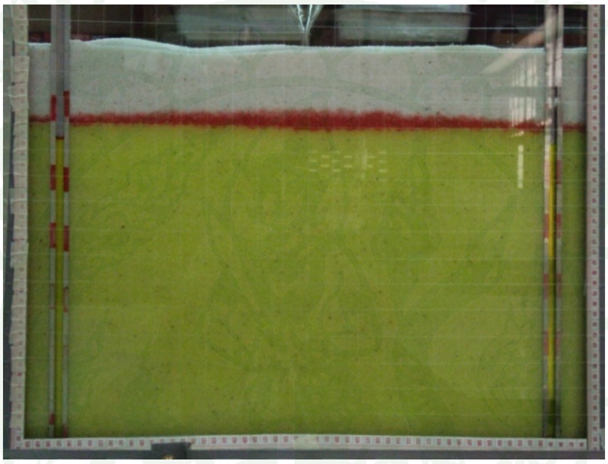
5.2.3 ปล่อยน้ำออกจากแบบจำลองให้เหลือระดับน้ำสูงเพียง 10 ซม. ดังภาพที่ 13โดยการปล่อยน้ำออกจะปล่อยด้วยอัตราเร็วที่ต่างกันตามขนาดของท่อคือ คือ ท่อเล็ก 2.86 ซม./นาที

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

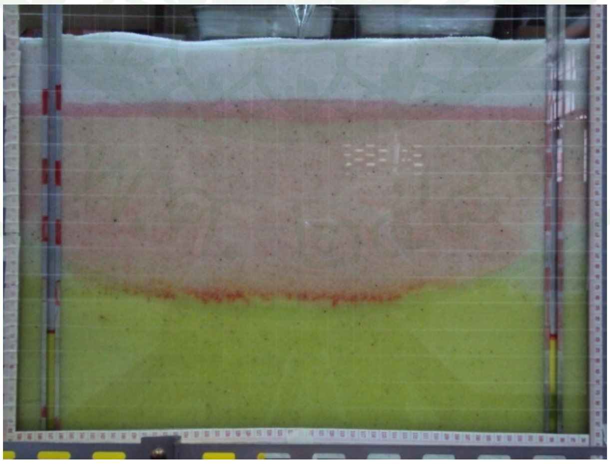
และ ท่อใหญ่ 6.67 ซม./นาที โดยในแต่ละการทดลองจะปล่อยน้ำออกจากท่อเพียงขนาดเดียวเท่านั้น และในแต่ละท่อจะทำการทดลองเป็นจำนวน 2 ซ้ำ

5.2.4 รอจนระดับน้ำคงที่ประมาณ 1 ชั่วโมง จากนั้นเติมน้ำในแบบจำลองจากทางด้านข้างทั้ง 2 ข้าง ด้านละเท่าๆกัน จนมีระดับเท่าเดิมที่ 30 ซม. ดังภาพที่ 14

5.2.5 ถ่ายภาพเพื่อบันทึกผล ซึ่งการถ่ายภาพจะถ่ายเป็นแถวตามแนวนอนทั้งหมด 8 แถว ตามช่องของเฟรมแต่จะถ่ายเพียง 9 ช่อง คือถ่ายภาพ 1 ช่อง เว้น 1 ช่อง โดยในการถ่ายภาพใช้กำลังขยาย 50 เท่า

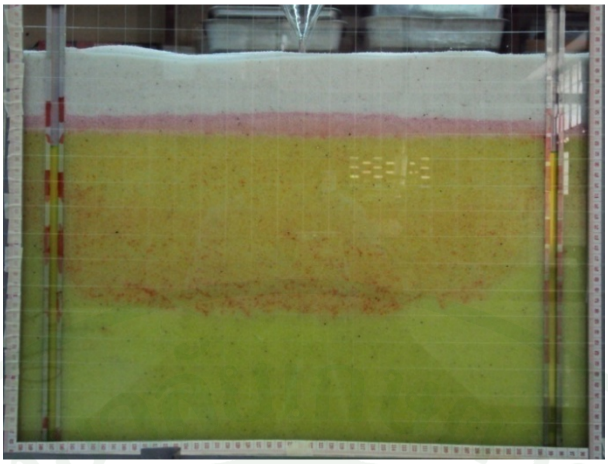


ภาพที่ 12 แสดงแบบจำลองขณะใส่ LNAPL ผสม sudan IV



ภาพที่ 13 แสดงแบบจำลองหลังจากมีการลดระดับน้ำ

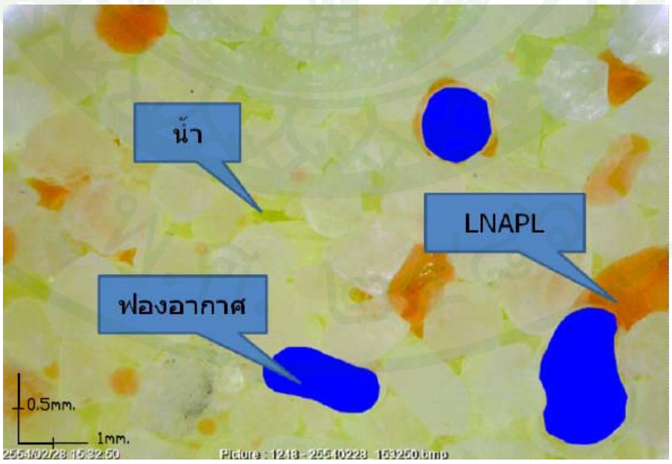
ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 14 แสดงแบบจำลองหลังจากมีการเพิ่มระดับน้ำจนมีระดับเท่าเดิม

6. วิเคราะห์ผลการวิจัยโดยใช้โปรแกรม Photoshop และแปลผล

หลังจากทำการทดลองในแบบจำลองแล้ว นำภาพที่ได้มาวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Photoshop เพื่อดูปริมาณการแพร่กระจายของ LNAPL ฟองอากาศและน้ำที่อยู่ตามช่องว่างในชั้นทรายโดยคิดจากจำนวน pixels ของสีในภาพดังนี้ สีแดงคือ ปริมาณของ LNAPL สีเขียวคือ ปริมาณของน้ำ และสีน้ำเงินคือ ปริมาณของฟองอากาศ ดังภาพที่ 15

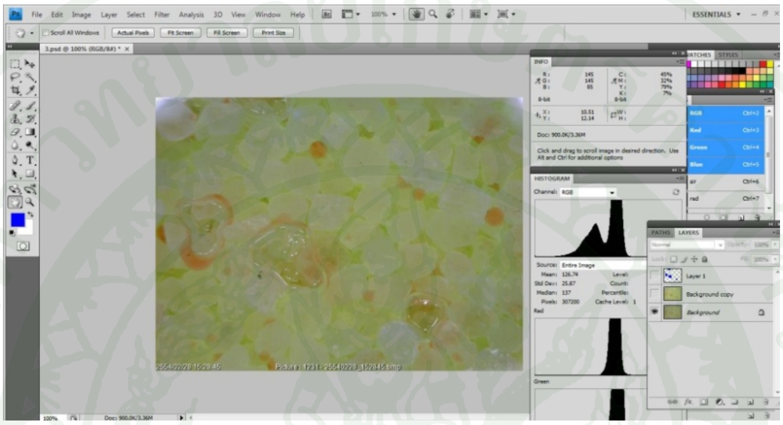


ภาพที่ 15 แสดงภาพที่ถ่ายจากกล้องที่มีกำลังขยายสูงและวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Photoshop

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

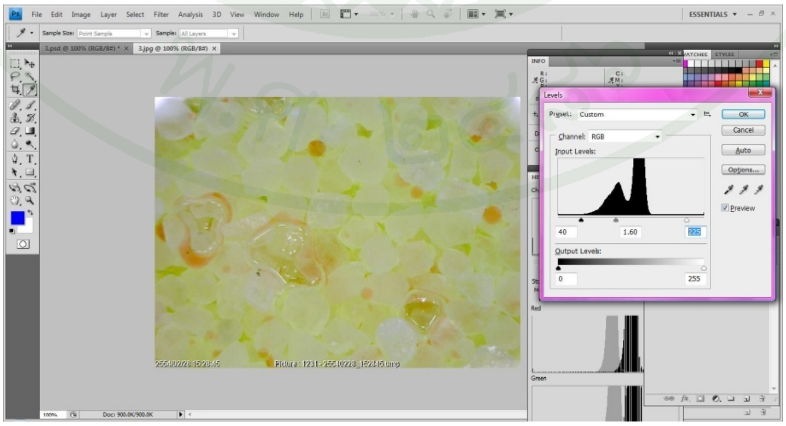
มีขั้นตอนการทำภาพในโปรแกรม Photoshop ดังนี้

1. เปิดโปรแกรม Photoshop CS4 Extended จากนั้น เปิดไฟล์รูปภาพที่ต้องการวิเคราะห์ จากนั้นไปที่ Menu bar “Window” เลือก Info และ histogram จะได้กรอบหน้าต่างดังภาพที่ 16เพื่อใช้ในการเลือกสีและดูจำนวน pixel



ภาพที่ 16 แสดงกรอบหน้าต่าง Info และ Histogram

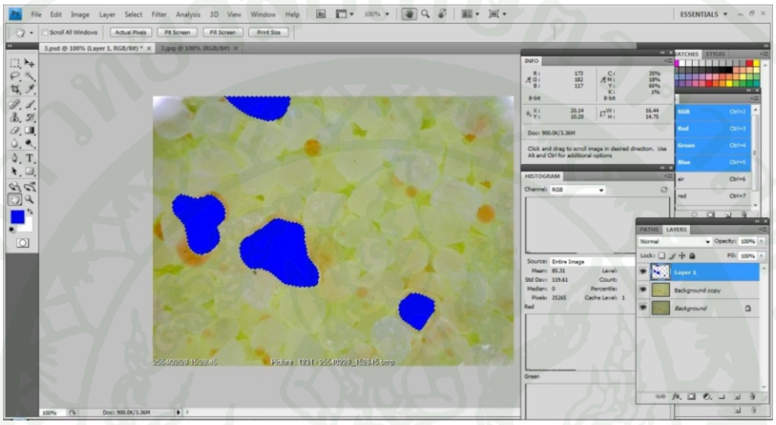
2. ปรับสีของภาพ (Level) โดยใช้คำสั่ง Ctrl+l เพื่อเพิ่มความสว่างของภาพและสีที่ชัดเจน โดยตั้งค่าที่ input level เป็น 40, 1.60, 225 ตามลำดับ ดังภาพที่ 17



ภาพที่ 17 แสดงการปรับ Level ของภาพ

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

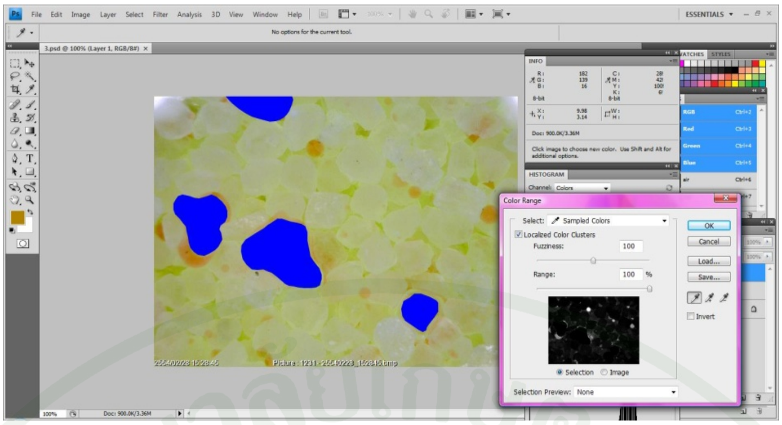
3. สร้างขอบเขตของฟองอากาศโดยใช้คำสั่ง Pen tool ในแถบเครื่องมือด้านซ้ายและสร้างเป็น selection ดังนี้ เลือกไอคอนรูปปากกาแล้วนำมาวาดตามขอบเขตของฟองอากาศในภาพ เมื่อได้ขอบเขตของฟองอากาศแล้ว กด Ctrl+ Alt +Enter เพื่อเปลี่ยนขอบเขตนั้นเป็น selection โดยเราสามารถทราบจำนวน pixel ของฟองอากาศได้จากกรอบหน้าต่าง Histogram ทั้งนี้อาจมีการลงสี selection ดังภาพที่ 18 เพื่อสะดวกในการมองเห็นเนื่องจากฟองอากาศในรูปนั้นใสมองเห็นได้ยาก



ภาพที่ 18 แสดง selection ของฟองอากาศ

4. หาจำนวน pixel ของสีแดง (LNAPL) และสีเขียว (น้ำ) โดยไปที่ menu bar “select” เลือก color range คลิกในภาพเลือกตำแหน่งสีที่ต้องการ จะได้ขอบเขตของสีที่เลือก กด ok ก็จะได้เป็น selection ของสีที่เราต้องการในขั้นตอนการเลือกสีเพื่อความแม่นยำในการทำภาพต่อๆไปควรไปดูค่าของสีในกรอบหน้าต่าง info ด้วย ดังภาพที่ 19

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 19 แสดงการใช้คำสั่ง color range ในการสร้าง selection และหาจำนวน pixel ของรูปภาพ

หลังจากการวิเคราะห์ภาพด้วยโปรแกรม Photoshop แล้ว นำค่า pixels ที่ได้มาคำนวณและพลอตเป็นกราฟความสัมพันธ์ของการกระจายตัวของ LNAPL ตามระดับความสูงในชั้นทราย ดังนี้

1. จำนวน pixel ทั้งหมดของภาพ = 307200 pixels นั่นคือ ทราย, น้ำ, อากาศและ LNAPL
2. ช่องว่างของภาพ = น้ำ, อากาศและ LNAPL คิดเป็น 100%
3. คำนวณแยกเป็นเปอร์เซ็นต์ของน้ำ, อากาศและ LNAPL และนำค่าที่ได้ไปพลอตเป็นกราฟ

7. สถานที่ทำการทดลอง

ห้องปฏิบัติการวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม 1 ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

8. ระยะเวลาที่ทำการวิจัย

เดือนมีนาคม พ.ศ. 2553 เดือนเมษายน พ.ศ. 2554

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ผลและวิจารณ์

งานวิจัยนี้เป็นการทดลองเพื่อศึกษาการแพร่กระจายของ LNAPL ในแนวดิ่งเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของระดับน้ำใต้ดินโดยใช้แบบจำลองทางกายภาพ ซึ่งการทดลองสามารถแบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือ ส่วนที่หนึ่งการศึกษาเบื้องต้นก่อนทำการทดลองในแบบจำลอง โดยหาค่าความพรุนของทรายที่ใช้และทดลองถ่ายภาพเพื่อหาขนาดพื้นที่ที่เล็กที่สุดที่ใช้เป็นตัวแทนในการศึกษา และส่วนที่สองทำการศึกษาในแบบจำลอง โดยเริ่มศึกษาจากน้ำประปาเพียงอย่างเดียวก่อนเพื่อดูความแตกต่างของปริมาณน้ำในรูพรุนที่อัตราการระบายน้ำออกที่ต่างกัน จากนั้นจึงเริ่มทดลองกับ LNAPL แต่ละชนิด โดยทำการศึกษาในห้องปฏิบัติการซึ่งผลการทดลองสามารถสรุปได้ดังนี้

1. ผลการศึกษาเบื้องต้นก่อนทำการทดลองในแบบจำลอง

1.1 จากการทดสอบหาค่าความพรุนของทรายที่ใช้ในการศึกษาขนาด 0.85-1.4 มม. หรือมีค่า Cu (Uniformity coefficient คือความสัมพันธ์ของขนาดตะแกรงที่ 60% ผ่านและ 10% ผ่าน) ประมาณ 1.67 พบว่ามีค่าความพรุนดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 แสดงผลการทดสอบค่าความพรุนของทรายที่ใช้ทำการศึกษา

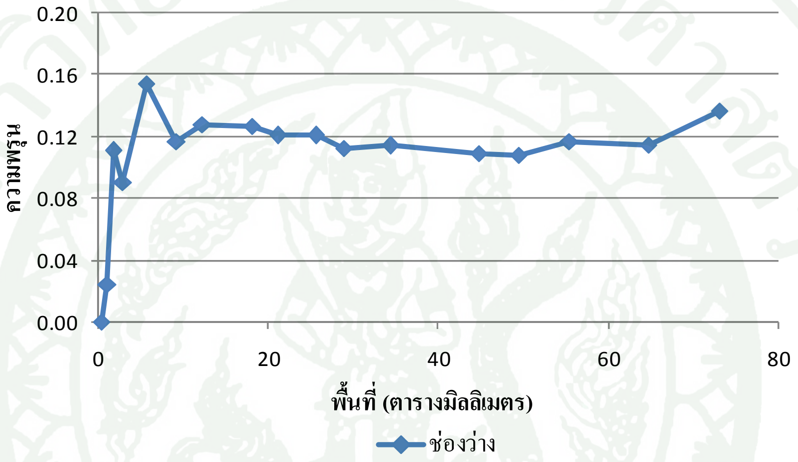
น้ำหนักน้ำ (กรัม)	น้ำหนักทราย (กรัม)	น้ำหนักน้ำ+ทราย (กรัม)	ความพรุน
3.09	6.21	9.30	0.33
3.19	6.20	9.39	0.34
2.23	5.30	7.53	0.30
2.21	5.34	7.55	0.29

จากค่าในตารางที่ 4 พบว่า ทรายที่ใช้ในการศึกษามีค่าความพรุนอยู่ระหว่าง 0.29-0.34 หรือมีค่าความพรุนเฉลี่ยอยู่ที่ 0.32 ซึ่งสอดคล้องกับค่าความพรุนของทรายจากตารางที่ 2 คือมีค่าอยู่ระหว่าง 0.25-0.4

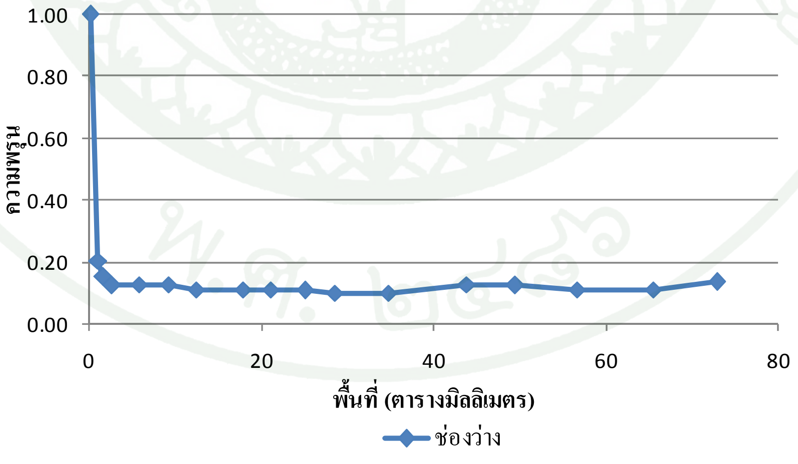
1.2 จากการทดลองถ่ายภาพเพื่อหาขนาดพื้นที่ที่เล็กที่สุดที่สามารถใช้เป็นตัวแทนในการศึกษาโดยแบ่งออกเป็น 2 กรณี คือ เริ่มจากพื้นที่ที่มีค่าความพรุนเป็น 0 ดังภาพที่ 20 (ก.) และ

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เริ่มจากพื้นที่ส่วนที่ไม่ใช่ทรายให้มีค่าความพรุนเป็น 1 ดังภาพที่ 20 (ข.) การวิเคราะห์ภาพที่ใช้เป็นการวิเคราะห์ใน 2 มิติ ซึ่งค่าที่ได้จะน้อยกว่าค่าความเป็นจริง โดยค่าที่ได้จะอยู่ที่ประมาณร้อยละ 40 ของค่าความเป็นจริง พบว่าขนาดของพื้นที่ที่เล็กที่สุดที่สามารถยอมรับได้คือขนาด 20 ตร.มม.ขึ้นไป แต่ภาพที่ถ่ายด้วยกล้องกำลังขยาย 50 เท่า มีขนาด 7.4 x 9.86 ตร.มม. หรือ 72.96 ตร.มม. ดังนั้นภาพที่ถ่ายจึงสามารถใช้เป็นภาพตัวแทนในการศึกษาได้ โดยขนาดของภาพที่ถ่ายได้มีขนาดใกล้เคียงกับความเป็นจริงแสดงว่าความหนาของกระจกที่ใช้ในแบบจำลองไม่มีผลกระทบต่อขนาดของภาพถ่าย



ก.)



ข.)

ภาพที่ 20 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความพรุนกับพื้นที่ ก.) เริ่มจากพื้นที่ที่มีความพรุนเป็น 0 ข.) เริ่มจากพื้นที่ที่มีความพรุนเป็น 1

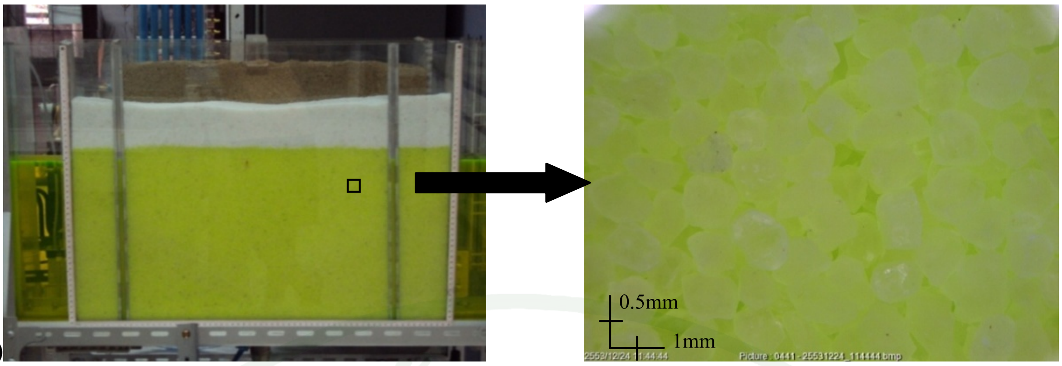
ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

2. ผลการศึกษาในแบบจำลอง

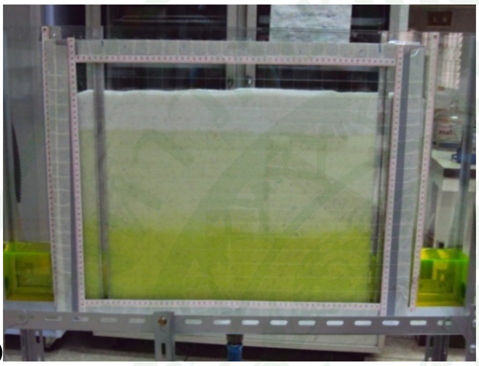
2.1 ผลการศึกษาการเปลี่ยนแปลงของความชื้นในชั้นทราย

จากการศึกษาพบว่าเมื่อเติมน้ำให้มีระดับ 30 ซม. จะมี Capillary rise สูงประมาณ 2-2.5 ซม. ดังภาพที่ 21 (ก.) และภาพขยาย แสดงให้เห็นว่าการเติมน้ำในครั้งแรกน้ำจะเข้าไปแทรกอยู่ตามรูพรุนโดยที่จะไม่มีฟองอากาศแทรกอยู่ตามช่องว่างของชั้นทรายซึ่งแตกต่างกับกรณีการลดระดับน้ำลงเหลือ 10 ซม. และรอจนระดับน้ำคงที่ซึ่งจะมีระดับ Capillary rise มากกว่า 3 ซม. ดังภาพที่ 21 (ข.) และเมื่อเติมน้ำให้อยู่ในระดับเดิมอีกครั้งดังภาพที่ 21 (ค.) จะสังเกตเห็นว่ามีฟองอากาศแทรกอยู่ตามชั้นทรายโดยที่น้ำจะไม่สามารถเข้าไปอยู่แทนที่ของอากาศที่อยู่ตามช่องว่างได้ทั้งหมดซึ่งเป็นไปตามปรากฏการณ์ฮีสเทอริซิส (Hysteresis) ที่เส้นโค้งเปียกในรอบแรกจะมีค่ามากกว่าเส้นโค้งเปียกในรอบถัดไป ดังภาพขยาย โดยในการศึกษาจะเริ่มต้นจากทรายแห้งทุกครั้ง

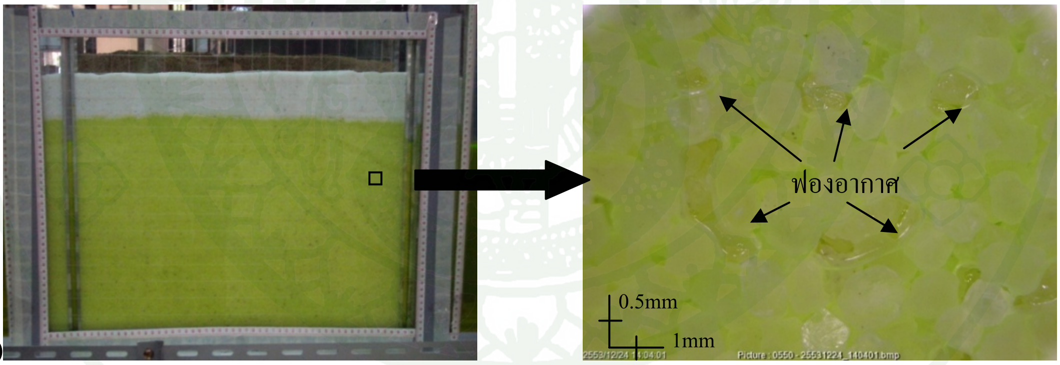
ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ก.)



ข.)

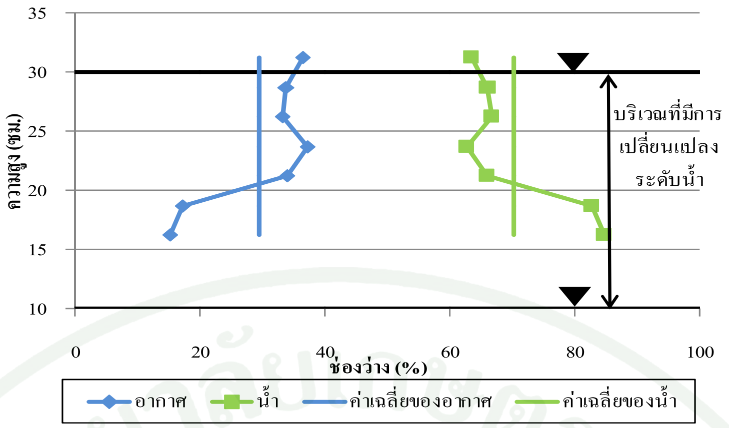


ค.)

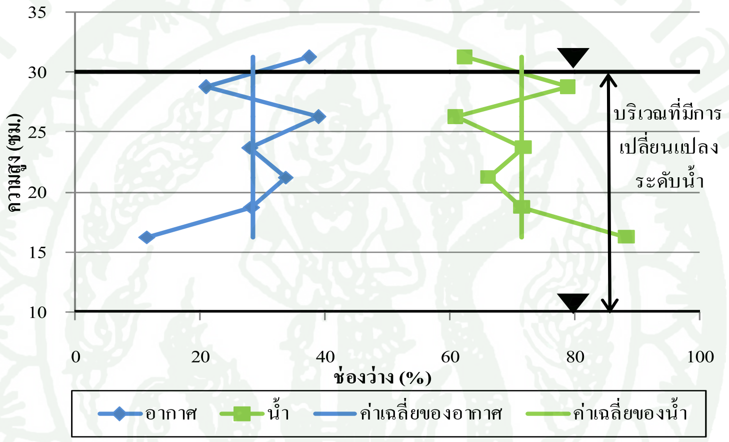
ภาพที่ 21 แสดงภาพถ่ายขณะทำการศึกษา ก.) เมื่อเติมน้ำให้มีระดับ 30 ข.) เมื่อลดระดับน้ำลงเหลือ 10 ซม. ค.) เมื่อเติมน้ำให้อยู่ในระดับ

การศึกษาการเปลี่ยนแปลงของความชื้นในชั้นทรายได้แบ่งการศึกษาออกเป็น 2 ส่วน คือ การเปลี่ยนแปลงระดับน้ำอย่างรวดเร็ว (อัตราการระบายน้ำออกเป็น 6.67 ซม./นาที) ดังภาพที่ 22 (ก.) และการเปลี่ยนแปลงระดับน้ำอย่างช้าๆ (อัตราการระบายน้ำออกเป็น 2.86 ซม./นาที) ดังภาพที่ 22 (ข.) เพื่อดูความแตกต่างของปริมาณน้ำและช่องว่างในชั้นทราย

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ก.)



ข.)

ภาพที่ 22 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของอากาศกับระดับความสูง ก.) เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงระดับน้ำอย่างรวดเร็ว ข.) เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงระดับน้ำอย่างช้าๆ

จากภาพที่ 22 จะเห็นว่าปริมาณของอากาศเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงระดับน้ำทั้ง 2 กรณีไม่แตกต่างกันมากนัก โดยปริมาณของอากาศด้านบนจะอยู่ที่ประมาณ 35% ของความพรุนทั้งหมดและจะลดลงเหลือประมาณ 10% ที่ใกล้ระดับของ capillary rise แต่ปริมาณของน้ำด้านบนจะอยู่ที่ประมาณ 60% ของความพรุนทั้งหมดและจะเพิ่มขึ้นจนถึงเกือบ 90% ที่ใกล้ระดับของ capillary rise นั่นคืออัตราการเปลี่ยนแปลงของระดับน้ำที่แตกต่างกันทั้ง 2 กรณีไม่ส่งผลต่อปริมาณของอากาศและน้ำที่อยู่ในรูพรุน แต่จะเห็นได้ว่ามีผลต่อการกระจายตัวตามแนวดิ่ง และเมื่อดูจากค่าเฉลี่ยจะพบว่ากรณีของการเปลี่ยนแปลงระดับน้ำอย่างรวดเร็วจะมีปริมาณอากาศแทรกอยู่ตามรูพรุนมากกว่ากรณีของการเปลี่ยนแปลงระดับน้ำอย่างช้าๆประมาณ 2 เปอร์เซ็นต์

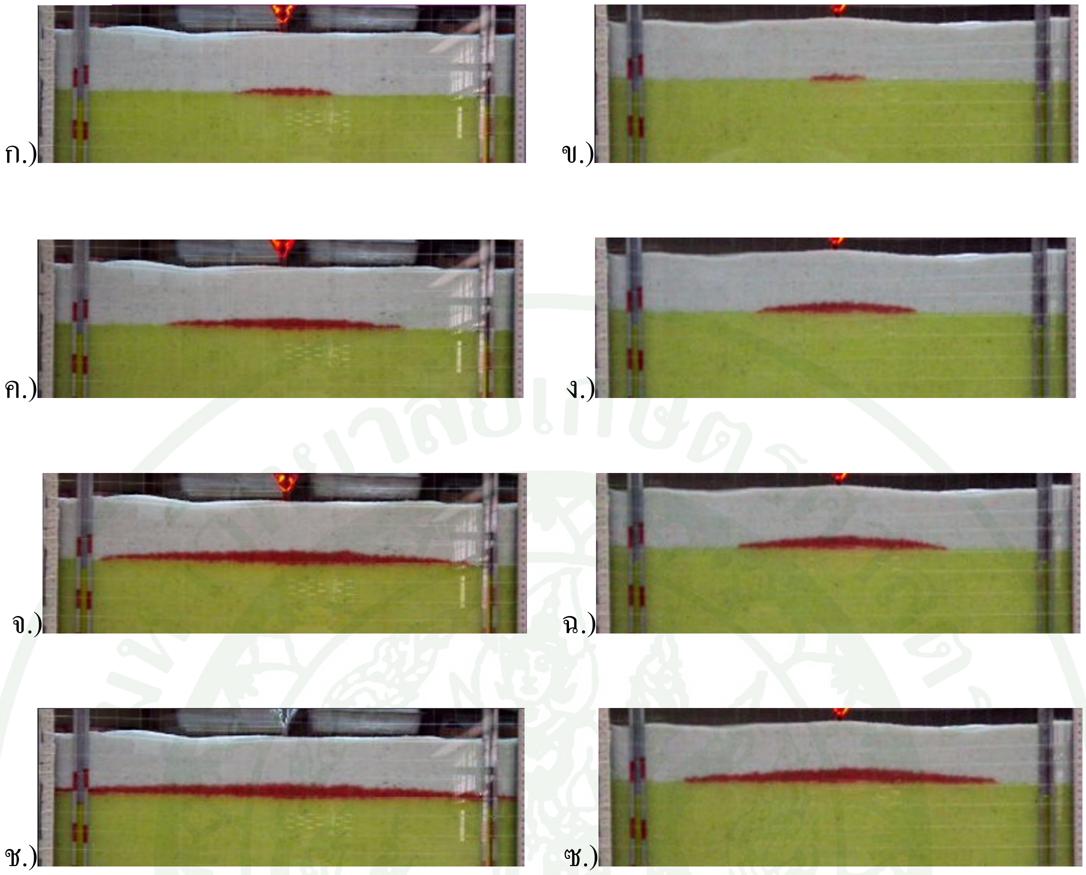
ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

2.2 ผลการศึกษาการแพร่กระจายของ LNAPL

ในส่วนของ LNAPL ได้แบ่งการศึกษาออกเป็น 2 ส่วน คือ Heptane และ Decane จากการศึกษาลักษณะสมบัติของ LNAPL ที่ใช้ พบว่าค่าความหนาแน่นของ LNAPL ทั้ง 2 ชนิดมีค่าใกล้เคียงกัน คือ Heptane มีค่าความหนาแน่น 0.68 กรัม/มล. และ Decane มีค่าความหนาแน่น 0.73 กรัม/มล. แต่ในส่วนของค่าความหนืดและแรงตึงผิวนั้นแตกต่างกันค่อนข้างมาก ดังนี้ Heptane มีค่าความหนืด 0.386 cp at 25°C และมีค่าแรงตึงผิว 20.14 mN/meters at 20°C ส่วน Decane มีค่าความหนืด 0.92 cp at 25°C และมีค่าแรงตึงผิว 31.5 mN/meters at 20°C จากลักษณะสมบัติที่แตกต่างกันของ LNAPL ทั้ง 2 ชนิด ย่อมมีผลต่อการแพร่กระจายของ LNAPL เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงระดับน้ำ ซึ่งจะกล่าวในลำดับถัดไป

โดย LNAPL แต่ละชนิดก็ได้ทำการศึกษาเช่นเดียวกับการศึกษาการเปลี่ยนแปลงความชื้นในชั้นทราย คือ การเปลี่ยนแปลงระดับน้ำอย่างรวดเร็ว (อัตราการระบายน้ำออกเป็น 6.67 ซม./นาที) และการเปลี่ยนแปลงระดับน้ำอย่างช้าๆ (อัตราการระบายน้ำออกเป็น 2.86 ซม./นาที) เมื่อมีการใส่ LNAPL ปริมาตร 200 มล. ที่เหนือระดับน้ำ พบว่า Heptane นั้นแพร่กระจายไปได้เร็วกว่า Decane ซึ่งเป็นไปตามลักษณะสมบัติของ Heptane ที่มีความหนืดน้อยกว่า Decane จึงแพร่กระจายไปได้เร็วกว่า แต่เมื่อรอจนการแพร่กระจายคงที่จะพบว่า LNAPL ทั้ง 2 ชนิดลงไปกระจายตัวอยู่ที่ผิวน้ำมีความสูงประมาณ 2 ซม. โดยที่ Decane ใช้เวลาในการแพร่กระจายมากกว่า Heptane ประมาณ 45 วินาที โดยได้แสดงภาพเปรียบเทียบทั้งกรณีของ Heptane และ Decane ดังภาพที่ 23 (ก.) – (ซ.)

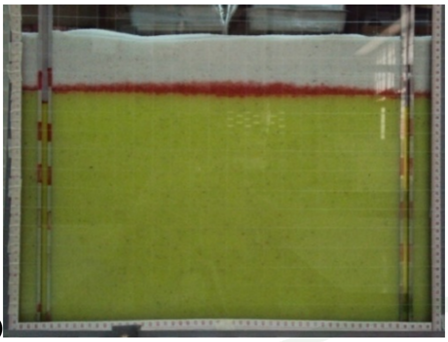
ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

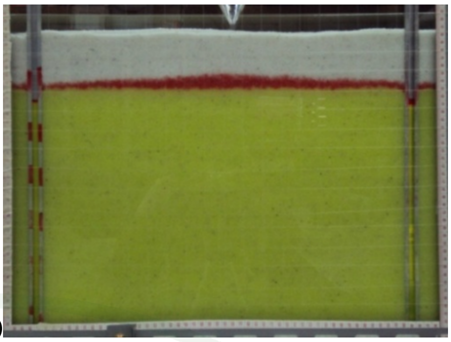


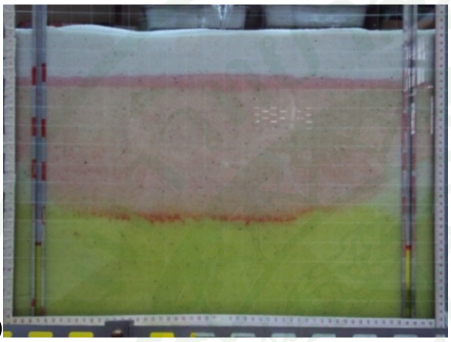
ภาพที่ 23 เปรียบเทียบการกระจายตัวของ Heptane และ Decane ขณะปล่อยลงสู่แบบจำลอง โดยที่ ก.)เป็นการแพร่กระจายของ Heptane เมื่อผ่านไป 10 วินาที ข.) เป็นการแพร่กระจายของ Decane เมื่อผ่านไป 10 วินาที ค.) เป็นการแพร่กระจายของ Heptane เมื่อผ่านไป 30 วินาที ง.) เป็นการแพร่กระจายของ Decane เมื่อผ่านไป 30 วินาที จ.) เป็นการแพร่กระจายของ Heptane เมื่อผ่านไป 60 วินาที ฉ.) เป็นการแพร่กระจายของ Decane เมื่อผ่านไป 60 วินาที ช.) เป็นการแพร่กระจายของ Heptane เมื่อผ่านไป 120 วินาที ซ.) เป็นการแพร่กระจายของ Decane เมื่อผ่านไป 120 วินาที

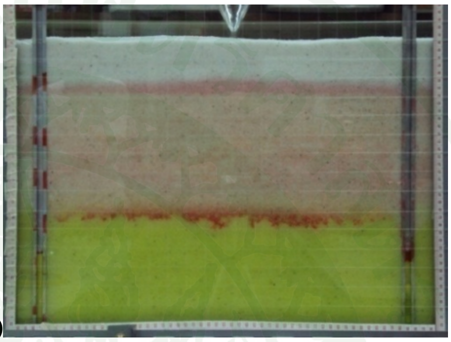
จากนั้นเมื่อมีการลดลงของระดับน้ำให้เหลือเพียง 10 ซม. LNAPL ทั้ง 2 ชนิดจะเคลื่อนตัวลงมาอย่างช้าๆ จนถึงระดับผิวน้ำ และมีบางส่วนที่แทรกอยู่ตามช่องว่างของชั้นทราย โดย Decane สามารถแพร่กระจายลงมาที่ด้านล่างได้มากกว่า Heptane ดังภาพที่ 24 (ค.) และภาพที่ 24 (ง.) จากนั้นเมื่อมีการเพิ่มระดับน้ำให้อยู่ในสภาพเดิม LNAPL ที่ค้างอยู่ในชั้นทรายก็ไม่ได้เคลื่อนที่กลับขึ้นไปที่ระดับผิวน้ำตามเดิมแต่ยังคงเหลือค้างอยู่ตามรูพรุนของชั้นทรายเหมือนกันทั้งกรณีของ Heptane และ Decane ดังภาพที่ 24 (จ.) และภาพที่ 24 (ฉ.)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์


ก.)


ข.)


ค.)


ง.)

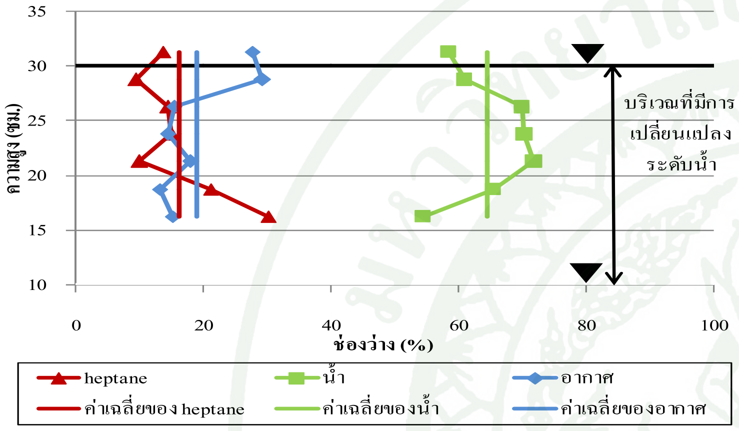
จ.)

ฉ.)

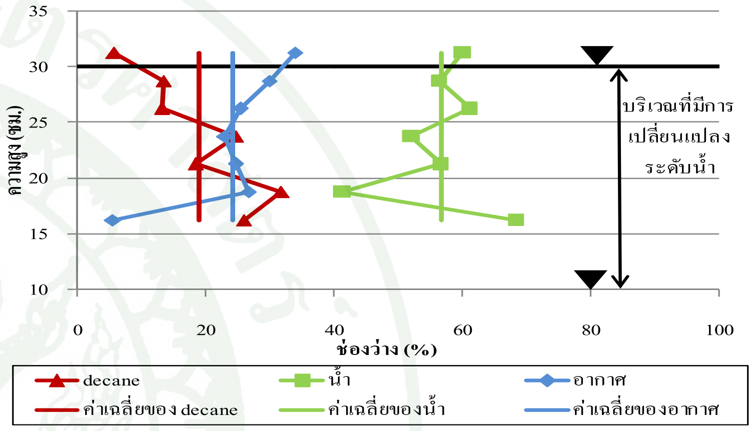
ภาพที่ 24 แสดงภาพแบบจำลอง ก.) Heptane ก่อนการเปลี่ยนแปลงระดับน้ำ ข.) Decane ก่อนการเปลี่ยนแปลงระดับน้ำ ค.) Heptane เมื่อมีการลดระดับน้ำ ง.) Decane เมื่อมีการลดระดับน้ำ จ.) Heptane เมื่อเพิ่มระดับน้ำให้อยู่ในสภาพเดิม ฉ.) Decane เมื่อเพิ่มระดับน้ำให้อยู่ในสภาพเดิม

แม้ว่าในภาพรวมจะไม่เห็นถึงความแตกต่างของการกระจายตัวของ LNAPL ทั้ง 2 ชนิดแต่จากการวิเคราะห์ภาพด้วยโปรแกรม Photoshop จะพบว่า Heptane และ Decane ที่ตกค้างอยู่ในชั้นทรายมีความแตกต่างกันดังแสดงในกราฟความสัมพันธ์ของเปอร์เซ็นต์ช่องว่างของ LNAPL อากาศและน้ำกับความสูงดังภาพที่ 25

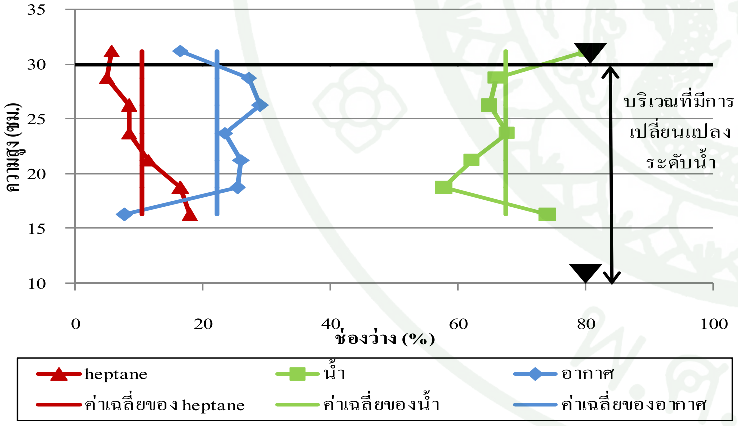
ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



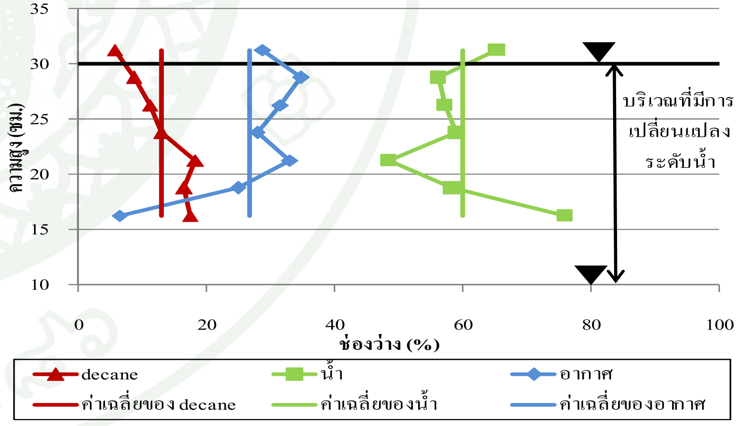
ก.)



ข.)



ค.)



ง.)

ภาพที่ 25 แสดงกราฟความสัมพันธ์ของเปอร์เซ็นต์ความพรุนของอากาศ LNAPL และน้ำกับความสูง

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

จากภาพที่ 25 ก.) heptane กรณีการเปลี่ยนแปลงระดับน้ำอย่างรวดเร็ว ข.) decane กรณีการเปลี่ยนแปลงระดับน้ำอย่างรวดเร็ว ค.) heptane กรณีการเปลี่ยนแปลงระดับน้ำอย่างช้าๆ ง.) decane กรณีการเปลี่ยนแปลงระดับน้ำอย่างช้าๆ

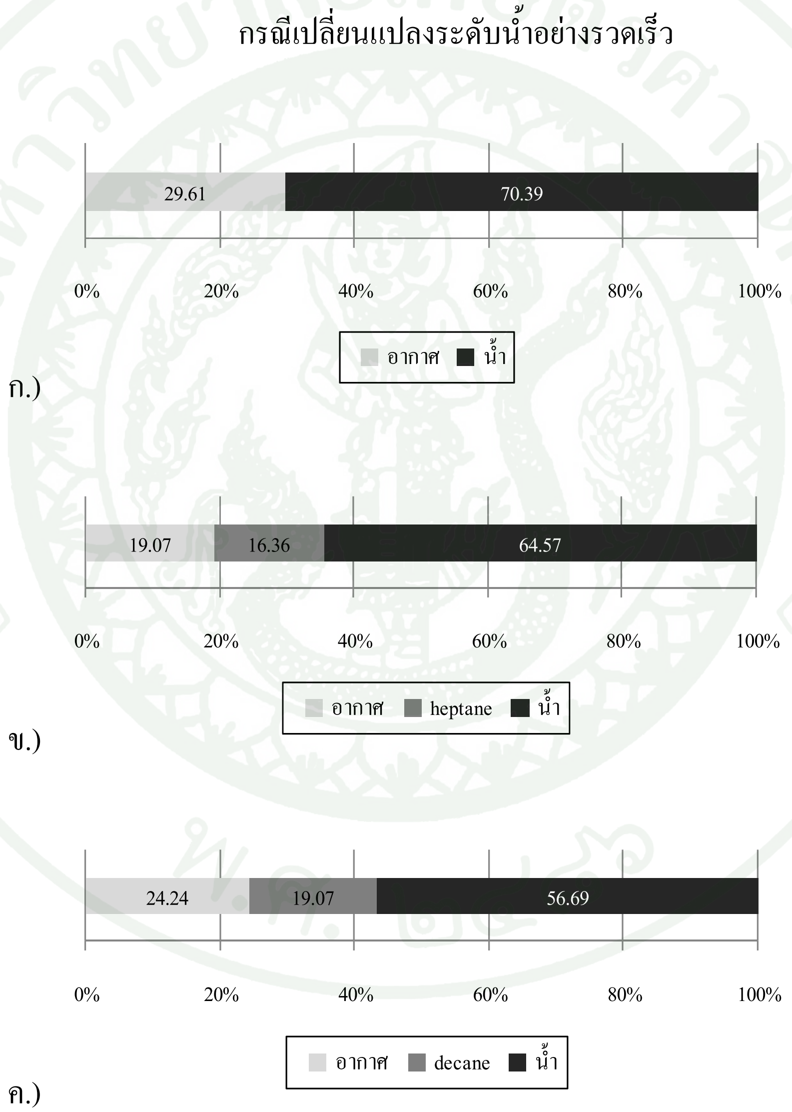
จากภาพที่ 25 ก.) และ 25ข.) จะพบว่าทั้ง Heptane และ Decane ในกรณีเปลี่ยนแปลงระดับน้ำอย่างรวดเร็ว จะมีการแพร่กระจายไปในลักษณะที่คล้ายกัน คือด้านบนจะมีปริมาณ LNAPL น้อยและค่อยๆเพิ่มมากขึ้นที่ด้านล่างตรงกันข้ามกับปริมาณของอากาศที่พบมากที่ด้านบนและน้อยลงเรื่อยๆ ที่ด้านล่าง โดยกรณีของ Decane จะมีปริมาณของ LNAPL และอากาศแทรกอยู่ตามชั้นทรายมากกว่ากรณีของ Heptane ประมาณ 3 และ 5 % ตามลำดับ แต่จะแตกต่างกันที่ปริมาณของน้ำ ที่กรณีของ Heptane น้ำค่อยๆเพิ่มขึ้นและลดลงที่ด้านล่างแต่ในกรณีของ Decane น้ำจะค่อยๆลดลงและกลับเพิ่มมากขึ้น ซึ่งเมื่อดูจากค่าเฉลี่ยจะพบว่าน้ำในกรณีของ Heptane น้อยกว่าในกรณีของ Decane ถึงประมาณ 8% และจากภาพที่ 25 ค.) และ 25 ง.) จะพบว่าทั้ง Heptane และ Decane ในกรณีเปลี่ยนแปลงระดับน้ำอย่างช้าๆ จะมีการแพร่กระจายไปในลักษณะเดียวกัน คือ LNAPL จะพบได้น้อยที่ด้านบนและเพิ่มมากขึ้นที่ด้านล่าง ตรงข้ามกับปริมาณของอากาศที่มีมากที่ด้านบนและค่อยๆน้อยลงที่ด้านล่าง ส่วนปริมาณของน้ำจะพบมากที่ด้านบนและค่อยๆลดลงตรงช่วงกลางของแบบจำลองจากนั้นจะเพิ่มขึ้นอีกครั้งที่ด้านล่าง โดยในกรณีของ Decane จะมีปริมาณของ LNAPL และอากาศแทรกอยู่ตามชั้นทรายมากกว่ากรณีของ Heptane ประมาณ 3 และ 4 % ตามลำดับ

เมื่อพิจารณา LNAPL แต่ละชนิดแยกกัน จะพบว่ากรณีการเปลี่ยนแปลงระดับน้ำอย่างรวดเร็วจะมี LNAPL แทรกอยู่ตามช่องว่างในชั้นทรายมากกว่ากรณีการเปลี่ยนแปลงระดับน้ำอย่างช้าๆ โดยที่กรณีของ Heptane การกระจายตัวของ Heptane จะคล้ายกันคือจะค่อยๆเพิ่มขึ้นที่ด้านล่างของแบบจำลอง แต่การกระจายตัวของอากาศและน้ำจะมีความแตกต่างกันคือ ในกรณีการเปลี่ยนแปลงระดับน้ำอย่างรวดเร็วปริมาณน้ำในช่องว่างจะเพิ่มมากขึ้นที่ช่วงกลางและลดลงที่ด้านล่างของแบบจำลอง และปริมาณอากาศในช่องว่างก็จะค่อยๆ ลดลง ซึ่งจะตรงกันข้ามกับกรณีของการเปลี่ยนแปลงระดับน้ำอย่างช้าๆ แต่เมื่อดูจากค่าเฉลี่ยจะเห็นว่ามีค่าไม่แตกต่างกันมากนัก ดังภาพที่ 25 ก.) และ 25 ค.) ส่วนกรณีของ Decane การกระจายตัวของ Decane อากาศและน้ำมีแนวโน้มที่เหมือนกันทั้ง 2 กรณีคือปริมาณ Decane จะค่อยๆเพิ่มขึ้นที่ด้านล่าง ปริมาณอากาศจะค่อยๆ ลดลงส่วนปริมาณน้ำจะค่อยๆลดลงและกลับเพิ่มขึ้นอีกครั้งที่ด้านล่างของแบบจำลอง โดยที่

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ปริมาณอากาศและน้ำเฉลี่ยของกรณีการเปลี่ยนแปลงระดับน้ำอย่างรวดเร็วจะน้อยกว่าในกรณีการเปลี่ยนแปลงระดับน้ำอย่างช้าๆ

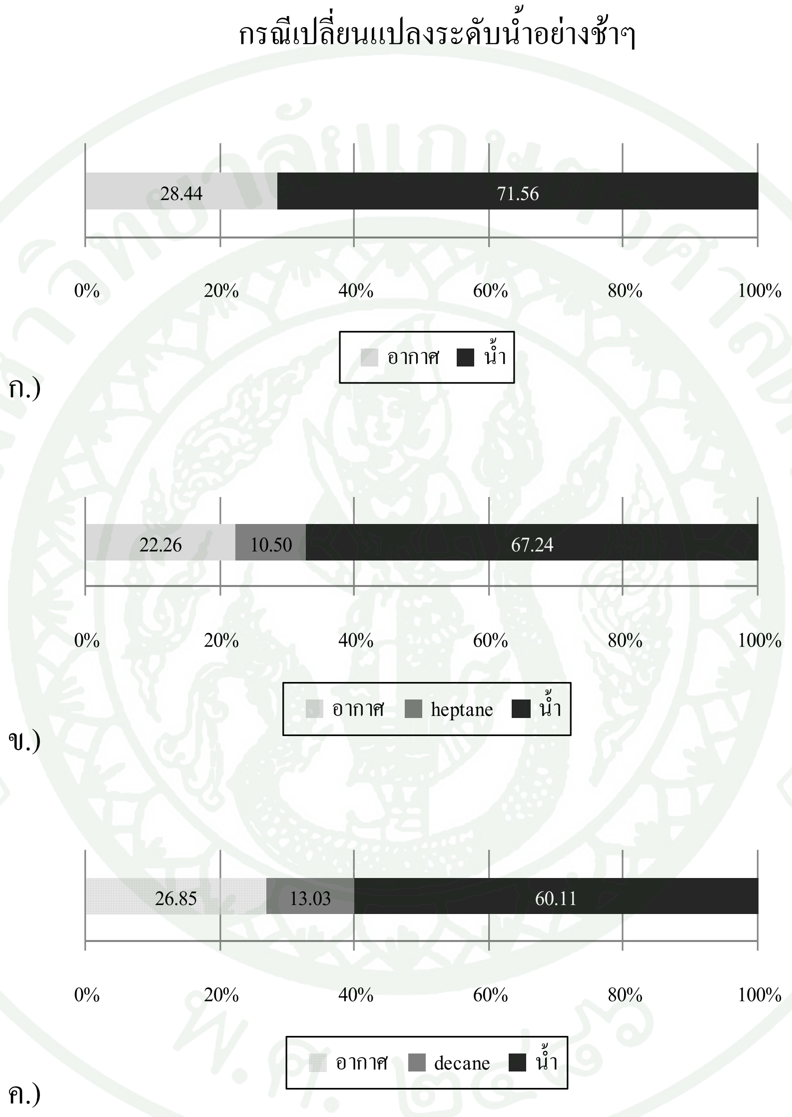
เมื่อมีการใส่ LNAPL จะพบว่า LNAPL ได้ไปรบกวนฮิสเทอริซิส (Hysteresis) โดยทำให้ปริมาณของอากาศและน้ำที่อยู่ตามช่องว่างในชั้นทรายลดลง เนื่องจาก LNAPL จะไปแทนที่อากาศและยังมีบางส่วนไปแทนที่น้ำ ดังภาพที่ 26 และภาพที่ 27



ภาพที่ 26 กราฟเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์ความพรุนกรณีการเปลี่ยนแปลงระดับน้ำอย่างรวดเร็วของ ก.) อากาศและน้ำ ข.) อากาศ น้ำและ Heptane ค.) อากาศ น้ำ และ Decane

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

จากภาพที่ 26 จะพบว่า LNAPL ทั้ง 2 ชนิดได้ไปแทนที่ของอากาศและน้ำ โดย Heptane จะไปแทนที่อากาศและน้ำคิดเป็น 32.22 และ 8.27 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ส่วน Decane จะไปแทนที่อากาศและน้ำคิดเป็น 18.14 และ 19.46 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ



ภาพที่ 27 กราฟเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์ความพรุนกรณีการเปลี่ยนแปลงระดับน้ำอย่างช้าๆ ของ ก.) อากาศและน้ำ ข.) อากาศ น้ำ และ Heptane ค.) อากาศ น้ำ และ Decane

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

จากภาพที่ 27 จะพบว่า LNAPL ทั้ง 2 ชนิดได้ไปแทนที่ของอากาศและน้ำ โดย Heptane จะไปแทนที่อากาศและน้ำคิดเป็น 21.73 และ 6.04 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ส่วน Decane จะไปแทนที่อากาศและน้ำคิดเป็น 5.59 และ 16.00 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

จากภาพที่ 26 และภาพที่ 27 จะพบว่ากรณีการเปลี่ยนแปลงระดับน้ำอย่างรวดเร็วจะมีปริมาณของ LNAPL คงค้างอยู่ในชั้นทรายมากกว่ากรณีการเปลี่ยนแปลงระดับน้ำอย่างช้าๆ ประมาณ 6 เปอร์เซ็นต์ และ Decane จะลงไปแทนที่อากาศและน้ำได้มากกว่า Heptane ประมาณ 3 เปอร์เซ็นต์ แต่ Heptane และ Decane มีแนวโน้มที่จะไปแทนที่อากาศและน้ำในลักษณะเดียวกันคือ Heptane จะลงไปแทนที่อากาศได้มากกว่า Decane แต่จะลงไปแทนที่น้ำได้น้อยกว่า Decane

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุป

จากการศึกษาการแพร่กระจายของ LNAPL ในแนวดิ่งเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของระดับน้ำโดยใช้แบบจำลองทางกายภาพ ประกอบด้วยการศึกษาการเปลี่ยนแปลงของความชื้นในชั้นทรายและการศึกษาการแพร่กระจายของ LNAPL เลือกใช้ Heptane กับ Decane เป็นตัวแทนของ LNAPL โดยมีการเปลี่ยนแปลงระดับน้ำ 2 กรณีคือ การเปลี่ยนแปลงระดับน้ำอย่างรวดเร็วที่อัตรา 6.67 ซม./นาที และการเปลี่ยนแปลงระดับน้ำอย่างช้าๆ ที่อัตรา 2.86 ซม./นาที

จากการศึกษาผลของการเปลี่ยนแปลงความชื้นในชั้นทรายพบว่าอัตราการเปลี่ยนแปลงของระดับน้ำไม่มีผลต่อการกระจายตัวของน้ำในรูพรุนตามแนวดิ่ง และจากการศึกษาการแพร่กระจายของ LNAPL ในแบบจำลองพบว่าการใส่ LNAPL มีผลต่อฮีสเทอริซิส (Hysteresis) ดังนี้ กรณีของการเปลี่ยนแปลงระดับน้ำอย่างรวดเร็ว Heptane จะไปแทนที่อากาศ 32.22 เปอร์เซ็นต์ และแทนที่น้ำ 8.27 เปอร์เซ็นต์ ส่วน Decane จะไปแทนที่อากาศ 18.14 เปอร์เซ็นต์ และแทนที่น้ำ 19.46 เปอร์เซ็นต์ และในกรณีของการเปลี่ยนแปลงระดับน้ำอย่างช้าๆ Heptane จะไปแทนที่อากาศ 21.73 เปอร์เซ็นต์ และแทนที่น้ำ 6.04 เปอร์เซ็นต์ ส่วน Decane จะไปแทนที่อากาศ 5.59 เปอร์เซ็นต์ และแทนที่น้ำ 16.00 เปอร์เซ็นต์

เมื่อพิจารณาภาพรวมจะพบว่า Decane จะเหลือเป็น LNAPL คงค้างอยู่ตามช่องว่างในชั้นทรายมากกว่า Heptane ประมาณ 3 เปอร์เซ็นต์ทั้ง 2 กรณี โดยที่ LNAPL ทั้ง 2 ชนิดจะลงไปแทนที่อากาศและน้ำ พบว่า Heptane สามารถไปแทนที่อากาศได้มากกว่า Decane ตรงกันข้ามกับ Decane ที่สามารถไปแทนที่น้ำได้มากกว่า Heptane ซึ่งเป็นไปตามลักษณะสมบัติของสารที่ Decane มีความหนาแน่นและความหนืดมากกว่า Heptane

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ข้อเสนอแนะ

1. อาจมีการศึกษาเปรียบเทียบกับทรายในธรรมชาติเพื่อดูความแตกต่างของการกระจายตัว

2. ในการเตรียมทรายก่อนทำการทดลองเมื่อล้างและอบทรายแล้วควรตั้งทิ้งไว้ให้เย็นก่อน ไม่ควรใส่ทรายในแบบจำลองขณะที่ยังร้อนเพราะเมื่อทำการทดลองจะเกิดละอองน้ำเกาะที่ผิวของแบบจำลองทำให้ถ่ายภาพได้ไม่ชัดเจน

3. อาจทำการศึกษาเพิ่มเติมโดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อเปรียบเทียบผลการศึกษา

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

กรมโรงงานอุตสาหกรรม. 2553. **โครงการประยุกต์ใช้ระบบการจัดการมลพิษดินจากการประกอบการอุตสาหกรรม** กรมโรงงานอุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม, กรุงเทพฯ.

ฉลอง บัวผัน. 2538. **น้ำบาดาล.** โอ.เอส.พริ้นติ้ง เฮ้าส์, กรุงเทพฯ.

ทวีศักดิ์ ระมิงค์วงศ์. 2546. **น้ำบาดาล**. ภาควิชาธรณีวิทยา คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, เชียงใหม่.

นิตยา หวังวงศ์วิโรจน์. 2551. **อุทกวิทยา (Hydrology)**. ด่านพุทธา, กรุงเทพฯ.

ไสว พงศ์สุวรรณ. 2528. **น้ำใต้ดิน**. ภาควิชาวิศวกรรมทรัพยากรน้ำ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

Cunningham, W.P., M.A. Cunningham and B.W. Saigo. 2003. **Environmental Science: A Global Concern**. McGraw–Hill Higher Education, New York.

Domenico, P.A. and F.W. Schwartz. 1990. **Physical and Chemical Hydrogeology.** John Wiley and Sons Inc., New York.

Fetter, C. W. 1999. **Contaminant Hydrogeology**. 2 ed. Prentice-Hall, Inc., New Jersey.

Freeze, R.A. and J.A. Cherry. 1979. **Groundwater.** Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, NJ.

Fried, J.J. 1975. **Groundwater Pollution**. Elsevier Scientific Publishing Company, Amsterdam.

Fotini, S., M. Aivalioti and E. Gidarakos. 2009. Implementation of an image analysis technique to determine LNAPL infiltration and distribution in unsaturated porous media. **Desalination.** 248(1-3): 705-715.

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

Kechavarzi, C. K., K. Soga and T.H. Illangasekare. 2005. Two-dimensional laboratory simulation of LNAPL infiltration and redistribution in the vadose zone. **Journal of Contaminant Hydrology**. **76**(3-4): 211-233.

Selker, J.S., C.K. Keller and J.T. Mccord. **Vadose Zone Processes.** Lewis Publisher**,** Washingtan D.C.

Soliman, M.M., P.E. Lamoreaux, B.A. Memon, F.A. Assaad and J.W. Lamoreaux. 1997. **Environmental Hydrogeology.** CRC Press Inc., Florida.

Tang, C.T., S. Shindo, T. Hirata and Y. Sakura. 1995. Experiment on the behavior of NAPLs in the unsatuarated-satuarated zone under the conditionsof a changing water table. **Model for assessing and monitoring groundwater quality**. 227: 157-164.

Todd, D.K. 1980. **Groundwater Hydrology**, 2^{nd} ed. John Wiley and Sons, Inc., New York.

Van Geel, P.J. and J.F. Sykes. 1994. Laboratory and model simulations of a LNAPL spill in a variably-saturated sand, 1. Laboratory experiment and image analysis techniques. **Journal of Contaminant Hydrology.** 17(1): 1-25.

RCI Labscan Limited Thailand. 2552. **Material Safety Data Sheet Heptane.** แหล่งที่มา: http://www.rcilabscan.com/modules/productview.php?product_id=1934, 14 มีนาคม 2555.

Sigma Aldrich. 2554. **Material Safety Data Sheet Decane.** แหล่งที่มา: http://www.sigmaaldrich.com/catalog/search?interface=All&term=d901&lang=en&region=TH&focus=product&N=0+220003048+219853254+219853286&mode=match%20partialmax, 14 มีนาคม 2555.

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ภาคผนวก

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ภาคผนวก ก

ข้อมูลการศึกษาการเปลี่ยนแปลงของความชื้นในชั้นทรายที่วิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Photoshop

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ก1 ปริมาณฟองอากาศและน้ำจากการศึกษาการเปลี่ยนแปลงของความชื้นในชั้นทรายเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงระดับน้ำอย่างรวดเร็ว (การทดลองครั้งที่ 1)

ระยะทางจากมุมซ้ายล่าง (cm.)		ปริมาณฟองอากาศ (pixels)	ปริมาณน้ำ (pixels)
ตามแกนนอน	ตามแกนตั้ง		
15	11.25	0	78486
25	11.25	0	68074
35	11.25	0	77344
45	11.25	0	60733
55	11.25	0	70186
15	13.75	0	70252
25	13.75	0	56130
35	13.75	0	69771
45	13.75	0	86946
55	13.75	0	67296
15	16.25	6326	56058
25	16.25	14364	66588
35	16.25	3160	50046
45	16.25	14033	45534
55	16.25	9847	44759
15	18.75	12101	53214
25	18.75	14087	39430
35	18.75	18429	31554
45	18.75	6422	61599
55	18.75	7632	52476
15	21.25	10563	35849
25	21.25	19168	35252
35	21.25	20953	43626
45	21.25	12917	54425
55	21.25	21646	47714

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ก1 (ต่อ)

ระยะทางจากมุมซ้ายล่าง (cm.) ตามแกนนอน	ตามแกนตั้ง	ปริมาณฟองอากาศ (pixels)	ปริมาณน้ำ (pixels)
15	23.75	22774	37773
25	23.75	27731	34333
35	23.75	19338	45470
45	23.75	31772	37644
55	23.75	33069	44800
15	26.25	35356	43957
25	26.25	20060	48195
35	26.25	29548	45132
45	26.25	11361	40672
55	26.25	3923	40998
15	28.75	1771	70109
25	28.75	29330	34712
35	28.75	32040	38415
45	28.75	20144	42234
55	28.75	48331	40142
15	31.25	6661	54749
25	31.25	50699	36665
35	31.25	9387	44401
45	31.25	18459	50821
55	31.25	27380	43140
15	33.75	19576	56740
25	33.75	38645	25421
35	33.75	35134	17646
45	33.75	40012	34541
55	33.75	37246	22667

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวก ก2 ปริมาณฟองอากาศและน้ำจากการศึกษาการเปลี่ยนแปลงของความชื้นในชั้นทรายเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงระดับน้ำอย่างรวดเร็ว (การทดลองครั้งที่ 2)

ระยะทางจากมุมซ้ายล่าง (cm.)		ปริมาณฟองอากาศ (pixels)	ปริมาณน้ำ (pixels)
ตามแกนนอน	ตามแกนตั้ง		
15	11.25	0	41306
25	11.25	0	42143
35	11.25	0	44423
45	11.25	0	43897
55	11.25	0	50083
15	13.75	0	44708
25	13.75	0	42654
35	13.75	0	47922
45	13.75	0	51690
55	13.75	0	48887
15	16.25	38041	28564
25	16.25	13240	39994
35	16.25	4314	41529
45	16.25	2650	41718
55	16.25	2861	43018
15	18.75	14313	41609
25	18.75	11108	37549
35	18.75	0	43639
45	18.75	6273	49379
55	18.75	9147	37757
15	21.25	20211	42244
25	21.25	30361	41504
35	21.25	27978	33549
45	21.25	16359	39170
55	21.25	14882	39767

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ก2 (ต่อ)

ระยะทางจากมุมซ้ายล่าง (cm.)		ปริมาณฟองอากาศ (pixels)	ปริมาณน้ำ (pixels)
ตามแกนนอน	ตามแกนตั้ง		
15	23.75	12821	50389
25	23.75	4841	46190
35	23.75	30767	42827
45	23.75	32188	40809
55	23.75	23705	39532
15	26.25	34668	36672
25	26.25	15193	47200
35	26.25	16902	43745
45	26.25	38293	39507
55	26.25	4474	36985
15	28.75	28245	42546
25	28.75	9302	39982
35	28.75	7015	49613
45	28.75	28671	35877
55	28.75	12101	40975
15	31.25	12990	48033
25	31.25	9244	46258
35	31.25	36588	33803
45	31.25	24210	45450
55	31.25	11628	35365
15	33.75	42322	3797
25	33.75	39878	7829
35	33.75	40121	5962
45	33.75	35914	11520
55	33.75	41178	1630

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ก3 ปริมาณฟองอากาศและน้ำจากการศึกษาการเปลี่ยนแปลงของความชื้นในชั้นทรายเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงระดับน้ำอย่างช้าๆ (การทดลองครั้งที่ 1)

ระยะทางจากมุมซ้ายล่าง (cm.)		ปริมาณฟองอากาศ (pixels)	ปริมาณน้ำ (pixels)
ตามแกนนอน	ตามแกนตั้ง		
15	11.25	0	52429
25	11.25	0	45680
35	11.25	0	44895
45	11.25	0	45653
55	11.25	0	40169
15	13.75	0	47570
25	13.75	0	42935
35	13.75	0	47340
45	13.75	0	45154
55	13.75	0	44476
15	16.25	0	52966
25	16.25	0	53755
35	16.25	0	49396
45	16.25	5550	45657
55	16.25	16009	47519
15	18.75	13921	42106
25	18.75	8223	43852
35	18.75	25256	40864
45	18.75	45262	42679
55	18.75	21191	39994
15	21.25	31031	38982
25	21.25	8432	40256
35	21.25	25579	38624
45	21.25	33185	42110
55	21.25	27538	37127

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ก3 (ต่อ)

ระยะทางจากมุมซ้ายล่าง (cm.)		ปริมาณฟองอากาศ (pixels)	ปริมาณน้ำ (pixels)
ตามแกนนอน	ตามแกนตั้ง		
15	23.75	23664	45088
25	23.75	21962	41248
35	23.75	12398	42190
45	23.75	5417	43024
55	23.75	25170	39811
15	26.25	34362	37807
25	26.25	28249	32454
35	26.25	3315	40609
45	26.25	36279	37827
55	26.25	5459	47394
15	28.75	0	39559
25	28.75	18059	40406
35	28.75	4082	38695
45	28.75	4091	43093
55	28.75	14108	41907
15	31.25	21605	36187
25	31.25	17548	41589
35	31.25	28858	28321
45	31.25	20976	40979
55	31.25	11277	39419
15	33.75	41126	1135
25	33.75	42675	3994
35	33.75	39121	1813
45	33.75	37816	11174
55	33.75	42115	1101

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ก4 ปริมาณฟองอากาศและน้ำจากการศึกษาการเปลี่ยนแปลงของความชื้นในชั้นทรายเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงระดับน้ำอย่างช้าๆ (การทดลองครั้งที่ 2)

ระยะทางจากมุมซ้ายล่าง (cm.)		ปริมาณฟองอากาศ (pixels)	ปริมาณน้ำ (pixels)
ตามแกนนอน	ตามแกนตั้ง		
15	11.25	0	41667
25	11.25	0	39530
35	11.25	0	47909
45	11.25	0	45691
55	11.25	0	48776
15	13.75	0	47995
25	13.75	0	45887
35	13.75	0	53964
45	13.75	0	47556
55	13.75	0	50458
15	16.25	0	46568
25	16.25	6462	47820
35	16.25	0	47199
45	16.25	26024	37571
55	16.25	0	45892
15	18.75	12956	30830
25	18.75	3037	50074
35	18.75	14057	45838
45	18.75	15094	46281
55	18.75	0	39394
15	21.25	9164	41569
25	21.25	9826	41507
35	21.25	9355	36153
45	21.25	32641	34078
55	21.25	6701	37313

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ก4 (ต่อ)

ระยะทางจากมุมซ้ายล่าง (cm.)		ปริมาณฟองอากาศ (pixels)	ปริมาณน้ำ (pixels)
ตามแกนนอน	ตามแกนตั้ง		
15	23.75	12357	38603
25	23.75	22887	35815
35	23.75	17286	40373
45	23.75	13136	35175
55	23.75	16677	44602
15	26.25	10964	38372
25	26.25	9261	34829
35	26.25	39736	38153
45	26.25	18951	29377
55	26.25	6739	37290
15	28.75	31296	39536
25	28.75	11912	43818
35	28.75	27231	50180
45	28.75	6921	50637
55	28.75	17096	34866
15	31.25	8085	38826
25	31.25	20914	35302
35	31.25	24707	42022
45	31.25	24426	41696
55	31.25	14657	39070
15	33.75	45431	8724
25	33.75	42236	3616
35	33.75	41253	0
45	33.75	39756	6051
55	33.75	45132	2049

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ภาคผนวก ข

ข้อมูลการศึกษาการแพร่กระจายของ LNAPL ที่วิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Photoshop

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ข1 ปริมาณของ Heptane ฟองอากาศและน้ำเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงระดับน้ำอย่างรวดเร็ว (การทดลองครั้งที่ 1)

ระยะทางจากมุมซ้ายล่าง (cm.)		Heptane (pixels)	ฟองอากาศ (pixels)	น้ำ (pixels)
ตามแกนนอน	ตามแกนตั้ง			
15	16.25	0	0	24733
20	16.25	0	0	35643
25	16.25	14093	8204	35340
30	16.25	45646	0	37191
35	16.25	6099	6609	20921
40	16.25	21993	4678	23645
45	16.25	2734	5498	39859
50	16.25	0	0	39024
55	16.25	0	6562	20659
15	18.75	4643	14733	44773
20	18.75	5085	14488	29520
25	18.75	22087	4367	32492
30	18.75	8644	6529	35605
35	18.75	13707	3604	26636
40	18.75	22175	17164	40749
45	18.75	6985	2005	22413
50	18.75	0	4121	43836
55	18.75	1838	0	35917
15	21.25	27634	23283	20202
20	21.25	1782	7219	39902
25	21.25	3202	10392	28298
30	21.25	9773	8392	33536
35	21.25	5614	7865	28290
40	21.25	6249	7193	35973
45	21.25	764	4429	37009

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ข1 (ต่อ)

ระยะทางจากมุมซ้ายล่าง (cm.) ตามแกนนอน	ตามแกนตั้ง	Heptane (pixels)	ฟองอากาศ (pixels)	น้ำ (pixels)
50	21.25	7516	2795	25656
55	21.25	7721	4849	30675
15	23.75	13140	3148	31633
20	23.75	5648	20652	39443
25	23.75	10247	1187	40439
30	23.75	15725	2498	37923
35	23.75	8660	10526	27147
40	23.75	11932	12069	32483
45	23.75	5816	9193	32499
50	23.75	8322	3037	38404
55	23.75	16592	8327	29798
15	26.25	21228	18387	39615
20	26.25	2621	16834	39435
25	26.25	9382	691	32524
30	26.25	10993	7404	37124
35	26.25	8552	6942	21619
40	26.25	14207	9620	39922
45	26.25	15311	15818	34866
50	26.25	9437	11043	37188
55	26.25	10774	6814	38171
15	28.75	6268	12548	23828
20	28.75	5804	12752	23945
25	28.75	2330	14144	23209
30	28.75	3368	1052	20077
35	28.75	12746	17952	15917
40	28.75	2204	22001	36420

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ข1 (ต่อ)

ระยะทางจากมุมซ้ายล่าง (cm.) ตามแกนนอน	ตามแกนตั้ง	Heptane (pixels)	ฟองอากาศ (pixels)	น้ำ (pixels)
45	28.75	6232	19648	26243
50	28.75	5667	11192	22671
55	28.75	6950	14957	29918
15	31.25	4177	4092	28116
20	31.25	5852	7374	26249
25	31.25	6717	25265	19563
30	31.25	5170	9214	27441
35	31.25	6234	5865	22130
40	31.25	6430	17755	25913
45	31.25	9111	12805	27896
50	31.25	3998	14138	23501
55	31.25	5152	8430	30639

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ข2 ปริมาณของ Heptane ฟองอากาศและน้ำเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงระดับน้ำอย่างรวดเร็ว (การทดลองครั้งที่ 2)

ระยะทางจากมุมซ้ายล่าง (cm.)		Heptane (pixels)	ฟองอากาศ (pixels)	น้ำ (pixels)
ตามแกนนอน	ตามแกนตั้ง			
15	16.25	392	20005	30592
20	16.25	10131	12474	30188
25	16.25	22596	15607	38095
30	16.25	3540	14000	30429
35	16.25	10781	21333	43837
40	16.25	19837	12772	34313
45	16.25	34395	7826	26162
50	16.25	4930	9788	39507
55	16.25	0	23870	49470
15	18.75	7338	6952	38635
20	18.75	6405	17746	33317
25	18.75	2799	0	51508
30	18.75	3467	8186	51728
35	18.75	5358	15952	45468
40	18.75	6480	2017	46129
45	18.75	31705	20782	47898
50	18.75	3289	28238	47700
55	18.75	1585	16981	43879
15	21.25	16994	13120	34370
20	21.25	13953	4452	42749
25	21.25	9217	0	35637
30	21.25	3692	8997	28919
35	21.25	4838	13743	40771
40	21.25	1513	8887	31398
45	21.25	3435	17002	45832

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ข2 (ต่อ)

ระยะทางจากมุมซ้ายล่าง (cm.) ตามแกนนอน	ตามแกนตั้ง	Heptane (pixels)	ฟองอากาศ (pixels)	น้ำ (pixels)
50	21.25	1050	10265	27529
55	21.25	7029	5572	37118
15	23.75	19175	28220	32173
20	23.75	13547	20917	59106
25	23.75	6110	13491	41439
30	23.75	6753	1092	50569
35	23.75	4824	10526	40236
40	23.75	3758	12069	38072
45	23.75	8517	9193	57082
50	23.75	2786	3037	48465
55	23.75	3534	8327	39257
15	26.25	10493	18387	39224
20	26.25	2516	16834	54040
25	26.25	3960	691	44108
30	26.25	4411	7404	39214
35	26.25	2531	6942	36625
40	26.25	5459	9620	41564
45	26.25	1992	15818	38341
50	26.25	4873	11043	47006
55	26.25	2323	6814	53675
15	28.75	10861	12548	36261
20	28.75	3495	12752	44180
25	28.75	3226	14144	39393
30	28.75	3769	1052	41341
35	28.75	6458	17952	33869
40	28.75	2842	22001	37589

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ข2 (ต่อ)

ระยะทางจากมุมซ้ายล่าง (cm.)		Heptane (pixels)	ฟองอากาศ (pixels)	น้ำ (pixels)
ตามแกนนอน	ตามแกนตั้ง			
45	28.75	4850	19648	48259
50	28.75	3515	11192	40961
55	28.75	1488	14957	48584
15	31.25	9403	4092	31676
20	31.25	5122	7374	42990
25	31.25	6079	25265	37307
30	31.25	5104	9214	35861
35	31.25	7031	5865	31664
40	31.25	9220	17755	34702
45	31.25	9771	12805	45502
50	31.25	6463	14138	34456
55	31.25	2243	8430	44787

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ข3 ปริมาณของ Heptane ฟองอากาศและน้ำเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงระดับน้ำอย่างช้าๆ (การทดลองครั้งที่ 1)

ระยะทางจากมุมซ้ายล่าง (cm.)		Heptane (pixels)	ฟองอากาศ (pixels)	น้ำ (pixels)
ตามแกนนอน	ตามแกนตั้ง			
15	16.25	22686	7548	34957
20	16.25	25555	10502	10424
25	16.25	15521	0	25181
30	16.25	10797	1833	24830
35	16.25	7347	4029	36407
40	16.25	26955	15969	30427
45	16.25	14438	13726	44479
50	16.25	14734	2936	37242
55	16.25	19377	2731	49116
15	18.75	21402	6160	33843
20	18.75	18007	15888	29205
25	18.75	13174	7484	30691
30	18.75	10106	8405	42572
35	18.75	12437	3412	25436
40	18.75	8858	31275	34708
45	18.75	13291	804	37122
50	18.75	20021	10801	34353
55	18.75	7607	8714	36889
15	21.25	9870	11804	28525
20	21.25	14741	22225	32004
25	21.25	10228	8820	40380
30	21.25	3076	25422	35307
35	21.25	4763	28347	36041
40	21.25	12815	22772	31701
45	21.25	14623	13823	33051

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางภผนวกที่ ข3 (ต่อ)

ระยะทางจากมุมซ้ายล่าง (cm.) ตามแกนนอน	ตามแกนตั้ง	Heptane (pixels)	ฟองอากาศ (pixels)	น้ำ (pixels)
50	21.25	3660	43107	40230
55	21.25	18422	34054	16271
15	23.75	10913	3899	28182
20	23.75	5038	8960	28355
25	23.75	4472	6991	35809
30	23.75	4639	11986	34713
35	23.75	1190	2050	46774
40	23.75	5134	21290	41397
45	23.75	5335	4591	32219
50	23.75	13225	16437	26163
55	23.75	23832	9236	18661
15	26.25	5192	2013	49815
20	26.25	1906	19327	31738
25	26.25	678	16446	22812
30	26.25	4295	13064	33538
35	26.25	5545	18689	53202
40	26.25	4195	20261	26007
45	26.25	4358	7350	33464
50	26.25	4322	15326	40778
55	26.25	1657	9513	26216
15	28.75	1657	10342	34215
20	28.75	3243	30617	38069
25	28.75	2468	26559	33982
30	28.75	3973	15061	44593
35	28.75	4026	14377	34634
40	28.75	526	4386	38239

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ข3 (ต่อ)

ระยะทางจากมุมซ้ายล่าง (cm.) ตามแกนนอน	ตามแกนตั้ง	Heptane (pixels)	ฟองอากาศ (pixels)	น้ำ (pixels)
45	28.75	3434	6574	30173
50	28.75	7322	24962	25649
55	28.75	6404	8568	29722
15	31.25	1835	4779	48339
20	31.25	1074	0	48990
25	31.25	2253	6677	39189
30	31.25	1640	0	43925
35	31.25	1628	0	48661
40	31.25	2590	6198	36115
45	31.25	1558	10559	49635
50	31.25	3159	4157	25389
55	31.25	10081	12018	40043

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ข4 ปริมาณของ Heptane ฟองอากาศและน้ำเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงระดับน้ำอย่างช้าๆ (การทดลองครั้งที่ 2)

ระยะทางจากมุมซ้ายล่าง (cm.) ตามแกนนอน	ตามแกนตั้ง	Heptane (pixels)	ฟองอากาศ (pixels)	น้ำ (pixels)
15	16.25	0	0	56100
20	16.25	0	0	51001
25	16.25	4889	0	44670
30	16.25	4121	0	55753
35	16.25	755	0	52132
40	16.25	6557	7079	34635
45	16.25	6941	0	55683
50	16.25	32730	13290	37770
55	16.25	9798	0	44960
15	18.75	3852	24117	34825
20	18.75	11185	3056	51634
25	18.75	539	36942	43960
30	18.75	2598	13516	27285
35	18.75	10218	20012	27382
40	18.75	11753	9306	32686
45	18.75	14038	22328	39804
50	18.75	13776	29246	31790
55	18.75	27460	3125	32457
15	21.25	4476	13491	42977
20	21.25	8300	28629	39159
25	21.25	7658	15185	43791
30	21.25	5010	19086	56708
35	21.25	7756	7394	33814
40	21.25	0	9376	41276
45	21.25	6030	11923	30292

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ข4 (ต่อ)

ระยะทางจากมุมซ้ายล่าง (cm.) ตามแกนนอน	ตามแกนตั้ง	Heptane (pixels)	ฟองอากาศ (pixels)	น้ำ (pixels)
50	21.25	8813	14952	37508
55	21.25	994	0	40578
15	23.75	4473	36563	39317
20	23.75	5270	5667	43346
25	23.75	4634	11078	40137
30	23.75	6718	16583	38480
35	23.75	1866	27069	41853
40	23.75	10448	17404	31338
45	23.75	7396	19498	44629
50	23.75	9509	21799	37605
55	23.75	3209	15635	54310
15	26.25	6172	15965	50176
20	26.25	1294	7387	47676
25	26.25	3005	22832	49937
30	26.25	1677	10479	46170
35	26.25	2138	20234	33970
40	26.25	2006	19233	32227
45	26.25	4328	15616	35963
50	26.25	2093	4148	52754
55	26.25	947	9841	42241
15	28.75	2211	2928	51990
20	28.75	1939	26208	42200
25	28.75	4902	10433	30569
30	28.75	6195	20686	45072
35	28.75	5160	14139	49518
40	28.75	1581	21456	36061

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ข4 (ต่อ)

ระยะทางจากมุมซ้ายล่าง (cm.) ตามแกนนอน	ตามแกนตั้ง	Heptane (pixels)	ฟองอากาศ (pixels)	น้ำ (pixels)
45	28.75	8075	31422	51545
50	28.75	7632	19258	45024
55	28.75	1819	7843	49046
15	31.25	1634	12121	54195
20	31.25	2751	17543	36285
25	31.25	596	0	38359
30	31.25	3162	26237	51403
35	31.25	495	29330	56280
40	31.25	2377	11716	53754
45	31.25	1242	10030	40359
50	31.25	1791	12454	42290
55	31.25	805	1227	53318

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ข5 ปริมาณของ Decane ฟองอากาศและน้ำเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงระดับน้ำอย่างรวดเร็ว (การทดลองครั้งที่ 1)

ระยะทางจากมุมซ้ายล่าง (cm.) ตามแกนนอน	ตามแกนตั้ง	Heptane (pixels)	ฟองอากาศ (pixels)	น้ำ (pixels)
15	16.25	0	0	50716
20	16.25	0	0	48704
25	16.25	0	0	50828
30	16.25	0	0	58317
35	16.25	19525	13374	44230
40	16.25	11027	0	53328
45	16.25	38843	2158	37760
50	16.25	27439	13853	36319
55	16.25	0	0	39063
15	18.75	581	43988	25467
20	18.75	58410	1535	42381
25	18.75	34265	43296	28487
30	18.75	12301	9405	32411
35	18.75	29045	10740	22436
40	18.75	15976	16474	48826
45	18.75	21350	5143	26025
50	18.75	24888	0	41209
55	18.75	0	16646	54843
15	21.25	3510	9118	59433
20	21.25	18945	15681	41076
25	21.25	22526	13840	36428
30	21.25	20156	22139	45995
35	21.25	31912	21570	35462
40	21.25	8432	16198	38987
45	21.25	13687	12047	40228

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ข5 (ต่อ)

ระยะทางจากมุมซ้ายล่าง (cm.) ตามแกนนอน	ตามแกนตั้ง	Heptane (pixels)	ฟองอากาศ (pixels)	น้ำ (pixels)
50	21.25	5656	35113	33058
55	21.25	3622	852	47875
15	23.75	4149	15605	34262
20	23.75	16533	3387	39647
25	23.75	21405	25673	24407
30	23.75	13420	8885	47626
35	23.75	27595	29159	21000
40	23.75	27831	9790	47313
45	23.75	13896	4184	36719
50	23.75	10736	14127	35308
55	23.75	28721	21902	37468
15	26.25	23725	6424	44348
20	26.25	10160	10483	46172
25	26.25	13897	47316	30030
30	26.25	4452	13657	52078
35	26.25	15306	40917	48284
40	26.25	12805	40764	46762
45	26.25	11521	12632	39954
50	26.25	17808	15685	39307
55	26.25	27726	25632	34655
15	28.75	37118	29607	39015
20	28.75	38955	13363	32118
25	28.75	5456	25915	36691
30	28.75	10931	21652	43564
35	28.75	7524	10017	36614
40	28.75	24961	32029	49829

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ข5 (ต่อ)

ระยะทางจากมุมซ้ายล่าง (cm.) ตามแกนนอน	ตามแกนตั้ง	Heptane (pixels)	ฟองอากาศ (pixels)	น้ำ (pixels)
45	28.75	10721	24226	36108
50	28.75	4682	10939	39914
55	28.75	19704	8964	45555
15	31.25	7591	13810	36236
20	31.25	9980	4791	43453
25	31.25	6225	29954	30536
30	31.25	2670	5386	43030
35	31.25	2836	14626	32617
40	31.25	3213	35108	29981
45	31.25	2899	28187	31385
50	31.25	2679	7684	40925
55	31.25	13479	0	31801

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ข6 ปริมาณของ Decane ฟองอากาศและน้ำเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงระดับน้ำอย่างรวดเร็ว (การทดลองครั้งที่ 2)

ระยะทางจากมุมซ้ายล่าง (cm.) ตามแกนนอน	ตามแกนตั้ง	Heptane (pixels)	ฟองอากาศ (pixels)	น้ำ (pixels)
15	16.25	17347	3400	44915
20	16.25	20485	0	37060
25	16.25	0	0	59117
30	16.25	0	0	44857
35	16.25	33406	0	35907
40	16.25	34404	11216	25070
45	16.25	29733	9266	34085
50	16.25	33945	5497	33395
55	16.25	0	0	57797
15	18.75	1268	39993	30676
20	18.75	9606	17167	45586
25	18.75	15728	38528	37038
30	18.75	33189	23651	35074
35	18.75	29948	14530	24564
40	18.75	18881	20788	31408
45	18.75	29571	20065	24631
50	18.75	65871	12286	19569
55	18.75	3722	14091	31142
15	21.25	3777	16440	35971
20	21.25	5330	5809	34520
25	21.25	4068	14151	34215
30	21.25	18139	31288	32256
35	21.25	2854	10896	40102
40	21.25	7838	11083	38188
45	21.25	1360	13891	41482

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ข6 (ต่อ)

ระยะทางจากมุมซ้ายล่าง (cm.) ตามแกนนอน	ตามแกนตั้ง	Heptane (pixels)	ฟองอากาศ (pixels)	น้ำ (pixels)
50	21.25	2571	21812	45182
55	21.25	9411	27585	30398
15	23.75	6524	46574	26369
20	23.75	9679	16930	41365
25	23.75	8480	18954	35998
30	23.75	13644	17542	29879
35	23.75	2957	0	39930
40	23.75	31857	16750	25706
45	23.75	4749	20527	33676
50	23.75	9921	7696	35709
55	23.75	6698	19780	35509
15	26.25	14033	19931	46528
20	26.25	5019	23617	31533
25	26.25	12699	18845	52430
30	26.25	9486	3052	54468
35	26.25	6298	13065	42305
40	26.25	6651	10749	37364
45	26.25	6661	2072	44772
50	26.25	17958	2274	48909
55	26.25	3575	10171	47871
15	28.75	3539	9635	44402
20	28.75	8879	24515	39057
25	28.75	4276	19389	40926
30	28.75	26754	31920	42249
35	28.75	1908	26555	44660
40	28.75	4965	19215	39661

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ข6 (ต่อ)

ระยะทางจากมุมซ้ายล่าง (cm.)		Heptane (pixels)	ฟองอากาศ (pixels)	น้ำ (pixels)
ตามแกนนอน	ตามแกนตั้ง			
45	28.75	2082	10620	47152
50	28.75	3814	264	53032
55	28.75	2996	13529	46120
15	31.25	1517	5284	51824
20	31.25	4615	18961	35595
25	31.25	5209	23883	44989
30	31.25	2872	25254	39242
35	31.25	4151	11729	43004
40	31.25	3323	36542	39226
45	31.25	4118	5266	52586
50	31.25	3819	5586	47272
55	31.25	9928	14378	40517

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ข7 ปริมาณของ Decane ฟองอากาศและน้ำเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงระดับน้ำอย่างช้าๆ (การทดลองครั้งที่ 1)

ระยะทางจากมุมซ้ายล่าง (cm.)		Heptane (pixels)	ฟองอากาศ (pixels)	น้ำ (pixels)
ตามแกนนอน	ตามแกนตั้ง			
15	16.25	0	0	44113
20	16.25	0	0	42927
25	16.25	0	0	33775
30	16.25	0	0	54990
35	16.25	779	0	40013
40	16.25	13205	0	34897
45	16.25	14625	0	32189
50	16.25	7021	25992	33622
55	16.25	0	0	34418
15	18.75	7923	29152	22881
20	18.75	4026	6135	29637
25	18.75	8316	22990	34445
30	18.75	8098	17196	41805
35	18.75	5551	16945	39148
40	18.75	6656	14257	30465
45	18.75	14574	7400	25329
50	18.75	10264	14214	47291
55	18.75	0	9978	52283
15	21.25	4632	9831	38847
20	21.25	3003	6488	34763
25	21.25	3020	34456	30685
30	21.25	5610	13973	28086
35	21.25	9547	28607	38705
40	21.25	25373	6864	23985
45	21.25	23960	3085	27914

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ข7 (ต่อ)

ระยะทางจากมุมซ้ายล่าง (cm.) ตามแกนนอน	ตามแกนตั้ง	Heptane (pixels)	ฟองอากาศ (pixels)	น้ำ (pixels)
50	21.25	8180	23639	41511
55	21.25	618	32975	29261
15	23.75	4363	13663	33440
20	23.75	13799	12966	35814
25	23.75	8395	23403	30059
30	23.75	6667	7066	30424
35	23.75	14434	60779	16335
40	23.75	12866	20237	35167
45	23.75	11407	8661	37050
50	23.75	12264	9817	28687
55	23.75	11013	9923	33810
15	26.25	2646	36830	35059
20	26.25	3851	1461	35106
25	26.25	1478	17212	34530
30	26.25	10341	11304	32373
35	26.25	12363	31501	31731
40	26.25	1814	12992	33565
45	26.25	8669	5077	35475
50	26.25	6819	16901	28219
55	26.25	7151	12897	38572
15	28.75	3976	29122	40543
20	28.75	3971	10365	39495
25	28.75	3846	19474	38847
30	28.75	13385	17369	37424
35	28.75	4164	40231	31903
40	28.75	7962	14965	34590

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ข7 (ต่อ)

ระยะทางจากมุมซ้ายล่าง (cm.) ตามแกนนอน	ตามแกนตั้ง	Heptane (pixels)	ฟองอากาศ (pixels)	น้ำ (pixels)
45	28.75	14324	17461	40198
50	28.75	7316	21744	39835
55	28.75	1918	4198	34736
15	31.25	1945	24884	37031
20	31.25	2582	32534	32303
25	31.25	10142	30873	38868
30	31.25	6134	28417	41791
35	31.25	3336	11710	45300
40	31.25	6772	14171	46517
45	31.25	2321	14123	49533
50	31.25	2690	13986	31203
55	31.25	4887	7542	41476

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ข8 ปริมาณของ Decane ฟองอากาศและน้ำเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงระดับน้ำอย่างช้าๆ (การทดลองครั้งที่ 2)

ระยะทางจากมุมซ้ายล่าง (cm.)		Heptane (pixels)	ฟองอากาศ (pixels)	น้ำ (pixels)
ตามแกนนอน	ตามแกนตั้ง			
15	16.25	0	0	52870
20	16.25	0	0	49602
25	16.25	6150	0	51257
30	16.25	32442	9768	34030
35	16.25	0	0	47795
40	16.25	13515	15241	36342
45	16.25	13162	12918	19095
50	16.25	5330	12779	26759
55	16.25	0	359	40361
15	18.75	8042	22437	29461
20	18.75	6914	12515	34664
25	18.75	3275	7873	36271
30	18.75	14809	13261	31115
35	18.75	13269	13386	32272
40	18.75	10211	26734	31062
45	18.75	13398	7580	43325
50	18.75	6009	22708	33959
55	18.75	0	12746	42962
15	21.25	9486	10524	36372
20	21.25	6824	25396	34798
25	21.25	22163	24994	30445
30	21.25	3897	29242	42038
35	21.25	1078	39708	35268
40	21.25	12033	9501	27453
45	21.25	10382	24873	28306

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ข8 (ต่อ)

ระยะทางจากมุมซ้ายล่าง (cm.) ตามแกนนอน	ตามแกนตั้ง	Heptane (pixels)	ฟองอากาศ (pixels)	น้ำ (pixels)
50	21.25	2409	22390	41559
55	21.25	1328	22708	42932
15	23.75	11868	4785	38724
20	23.75	13966	23190	36400
25	23.75	4322	8841	46282
30	23.75	5383	28147	44749
35	23.75	5344	9830	48033
40	23.75	4800	2480	44825
45	23.75	9629	10724	45761
50	23.75	4345	12393	37995
55	23.75	7673	5599	39050
15	26.25	9335	5624	44963
20	26.25	2149	20178	30386
25	26.25	4888	17624	33478
30	26.25	6032	12798	33702
35	26.25	7769	31497	40733
40	26.25	9581	25062	35510
45	26.25	5955	34175	43160
50	26.25	3635	16136	37318
55	26.25	8263	7452	38076
15	28.75	2984	21466	46935
20	28.75	2301	39136	37153
25	28.75	1716	10479	43872
30	28.75	3238	17310	35843
35	28.75	5661	11336	41031
40	28.75	2188	45413	38916

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ข8 (ต่อ)

ระยะทางจากมุมซ้ายล่าง (cm.) ตามแกนนอน	ตามแกนตั้ง	Heptane (pixels)	ฟองอากาศ (pixels)	น้ำ (pixels)
45	28.75	2233	37622	31202
50	28.75	1465	17702	39422
55	28.75	1813	16382	32846
15	31.25	2472	6415	36889
20	31.25	2555	19084	29323
25	31.25	5063	12174	30460
30	31.25	412	16131	34737
35	31.25	838	20616	40265
40	31.25	1483	25153	30703
45	31.25	951	1531	37560
50	31.25	1550	419	38857
55	31.25	1787	14940	37834

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ประวัติการศึกษา และการทำงาน

ชื่อ –นามสกุล	นางสาวชไมพร สุขธัมม์รักษา
วัน เดือน ปี ที่เกิด	27 กันยายน พ.ศ.2530
สถานที่เกิด	กรุงเทพมหานคร
ประวัติการศึกษา	พ.ศ. 2551 จบการศึกษา วศ.บ. (วิศวกรรมทรัพยากรน้ำ) สาขาวิชาวิศวกรรมทรัพยากรน้ำ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน
นำเสนอผลงานที่	งานการประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 16 (16th National Convention on Civil Engineering) วันที่ 18-20 พฤษภาคม พ.ศ. 2554 โรงแรมเดอะซายน์ พัทยา

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์