



ใบรับรองวิทยานิพนธ์

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม)

ปริญญา

วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

สาขา

ภาควิชา

เรื่อง การศึกษาความสามารถเปียกได้ของพื้นผิวสำหรับการปนเปื้อนของเหลวที่ไม่ใส่น้ำแบบผสมโดยการทดสอบอิมบิชันเรท และความสัมพันธ์ระหว่างความดันคาпилลารีและความอิ่มตัวด้วยน้ำ

Surface Wettability of Comingle NAPL Contamination by Imbibition Rate Test and Capillary Pressure – Water Saturation Relationship

นามผู้วิจัย นายกษม จันท์เนียม

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์จีมา ศรีลัมพ์, Ph.D.)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์สัญญา สิริวิทยาปกรณ์, Ph.D.)

หัวหน้าภาควิชา

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์มงคล ดำรงค์ศรี, Dr.Eng.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์กัญญา ชีระกุล, D.Agr.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ เดือน พ.ศ.

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การศึกษาความสามารถเปียกได้ของพื้นผิวสำหรับการปนเปื้อนของเหลวที่ไม่ใช่น้ำแบบผสมโดย
การทดสอบอิมบิซันเรท และความสัมพันธ์ระหว่างความดันคาпилลารีและความอิ่มตัวด้วยน้ำ

Surface Wettability of Comingle NAPL Contamination by Imbibition Rate Test and Capillary
Pressure – Water Saturation Relationship

โดย

นายกษม จันทน์เนียม

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม)

พ.ศ. 2552

กษม จันทร์เนียม 2552: การศึกษาความสามารถแยกได้ของพื้นผิวสำหรับการปนเปื้อนของเหลวที่ไม่ใช้น้ำแบบผสมโดยการทดสอบอิมมิชันเรท และความสัมพันธ์ระหว่างความดันคาปิลลารีและความอึมตัวด้วยน้ำ ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม) สาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ผู้ช่วยศาสตราจารย์ จิมา ศรีลัมพ์, Ph.D. 106 หน้า

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาความสามารถแยกได้ของพื้นผิวโดยการทดสอบอิมมิชันเรท และวิธีการหาความสัมพันธ์ระหว่างความดันคาปิลลารีและความอึมตัวด้วยน้ำ สำหรับการปนเปื้อนของเหลวที่ไม่ใช้น้ำแบบผสม ซึ่งเป็นการผสมกันระหว่าง DNAPL (Dense Nonaqueous Phase Liquid) และ LNAPL (Light Nonaqueous Phase Liquid) โดยเลือก TCE เป็นตัวแทนของ DNAPL และ โทลูอินเป็นตัวแทนของ LNAPL การทดลองแบ่งออกเป็น 3 ส่วน คือ 1.การศึกษาความอึมตัวด้วยน้ำเทียบกับเวลา 2.การศึกษาความสัมพันธ์ของความดันคาปิลลารีและความอึมตัวด้วยน้ำพร้อมกับการคำนวณหาดัชนีชี้วัดความสามารถแยกได้แบบ USBM (U.S. Bureau of Mines) 3.การศึกษาความสามารถในการซึมผ่านสัมพัทธ์และความอึมตัวด้วยน้ำ

การศึกษาความอึมตัวด้วยน้ำเทียบกับเวลาพบว่าตัวกลางที่ไม่ปนเปื้อนมีค่าความอึมตัวด้วยน้ำสูงสุดเฉลี่ยที่ 76.66% ต่างกันอย่างมีนัยสำคัญกับตัวกลางที่มีการปนเปื้อนชนิดเดียวทั้ง LNAPL และ DNAPL ที่มีค่าความอึมตัวด้วยน้ำสูงสุดเฉลี่ยที่ 84.98% และ 82.96% ตามลำดับ ส่วนการปนเปื้อนแบบผสมนั้นมีค่าความอึมตัวด้วยน้ำสูงสุดเฉลี่ยที่ 75.09% และ 73.88% เมื่อตัวกลางปนเปื้อน DNAPL แล้วปนเปื้อน LNAPL และเมื่อตัวกลางปนเปื้อน LNAPL แล้วปนเปื้อน DNAPL ตามลำดับ ซึ่งไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญกับตัวกลางที่ไม่ปนเปื้อนเมื่อพิจารณาจากสมการของลาปลาซแล้ว พบว่าความอึมตัวด้วยน้ำที่ต่างกันมีผลมาจาก แรงที่ผิวสัมผัสของๆเหลว และมุมสัมผัสที่เปลี่ยนแปลงไป จึงส่งผลให้ความสามารถแยกได้เปลี่ยนแปลงไป ของความดันคาปิลลารีและความอึมตัวด้วยน้ำพร้อมกับการคำนวณหาดัชนีชี้วัดความสามารถแยกได้แบบ USBM นั้น พบว่าความสามารถแยกได้ลดลงเมื่อมีของเหลวอีกชนิดคั่งค้างอยู่ในระบบ โดยในระบบน้ำ - LNAPL มีค่าดัชนีอยู่ที่ 1.36 แต่เมื่อทดสอบด้วยระบบน้ำ - LNAPL เมื่อมี DNAPL คั่งค้างอยู่ในระบบ มีค่าดัชนีอยู่ที่ 0.56 ส่วนในระบบน้ำ - DNAPL มีค่าดัชนีอยู่ที่ 0.395 แต่เมื่อทดสอบด้วยระบบน้ำ - DNAPL เมื่อมี LNAPL คั่งค้างอยู่ในระบบ มีค่าดัชนีอยู่ที่ -1.63 การศึกษาความสามารถในการซึมผ่านสัมพัทธ์และความอึมตัวด้วยน้ำ พบว่าความซึมผ่านได้สัมพัทธ์ของ DNAPL และ LNAPL มีค่าลดลงเมื่อซึมผ่านตัวกลางที่มี NAPL อีกชนิดคั่งค้างอยู่ในตัวกลาง

งานวิจัยนี้ทำให้ทราบว่า การปนเปื้อนแบบผสมทำให้พื้นผิวของตัวกลางมีความชอบน้ำต่ำลงเมื่อเทียบกับการปนเปื้อนชนิดเดียว ดังนั้นในการฟื้นฟูพื้นที่ที่มีการปนเปื้อนแบบผสมนั้น จึงต้องมีวิธีการและเทคนิคทางวิศวกรรมที่แตกต่างจากพื้นที่ที่มีการปนเปื้อนเพียงสารชนิดเดียว เพื่อให้ได้ประสิทธิภาพมากที่สุด

Kasama Channiam 2009: Surface Wettability of Comingle NAPL Contamination by Imbibition Rate Test and Capillary Pressure - Water Saturation Relationship. Master of Engineering (Environmental Engineering), Major Field: Environmental Engineering, Department of Environmental Engineering. Thesis Advisor: Assistant Professor Cheema Soralump, Ph.D. 106 pages.

This research studied surface wettability of comingle contamination between DNAPL (Dense Nonaqueous Phase liquid) and LNAPL (Light Nonaqueous Phase Liquid) by imbibition rate test and capillary pressure – water saturation relationship. TCE is DNAPL agent and Toluene is LNAPL agent. The experiment separated in 3 parts : air – water imbibition rates, oil – water capillary pressure curve coupled with calculation of the USBM (U.S. Bureau of Mines) wettability index and oil permeability – water saturation.

Result of the imbibition rate test at the end time showed water saturation of non exposure medium sample was 76.66%. This's a significant differentiated of 82.96% and 84.98% water saturation of DNAPL exposure medium sample and LNAPL exposure medium sample respectively. When medium sample exposed to comingle NAPL, water saturation of initially DNAPL exposure and then Toluene exposure was 75.09% and water saturation of initially LNAPL exposure and then DNAPL exposure was 73.88%, this's not a significant differentiated water saturation. From Laplace's equation found out interfacial energy and contact angle was the cause of water saturation different at the end time. Result of oil – water capillary pressure curve coupled with calculation of the USBM wettability index showed a change to less hydrophilic when the medium was exposed to comingle NAPL. USBM wettability index of water – LNAPL system was 1.36. USBM wettability index of water – LNAPL system and DNAPL residual was 0.56. USBM wettability index of water – DNAPL system was 0.395. And USBM wettability index of water – DNAPL system and LNAPL residual was -1.63. Result of relative permeability – water saturation showed decreasing permeability of DNAPL and LNAPL when NAPL residual were in medium.

Wettability changed to less hydrophilic when the contamination zone changed from one NAPL contamination to comingle NAPL contamination. So in NAPL comingle contaminated field need more methodology and engineering technic to recovery than one NAPL contamination field for the highest efficient.

Student's signature

Thesis Advisor's signature

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ประสบความสำเร็จได้ด้วยดี ทั้งนี้เนื่องจากได้รับความกรุณาเป็นอย่างดี
ยิ่งจากผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จีมา ศรลัมพ์ ประธานกรรมการที่ปรึกษา และผู้ช่วยศาสตราจารย์
ดร.สัจญา สิริวิทยาปกรณ กรรมการที่ปรึกษาวิชาเอกที่ได้ให้คำปรึกษา คำแนะนำ ในการ
ค้นคว้าวิจัยเป็นอย่างดี นอกจากนี้ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณอาจารย์ ดร.อภินิติ โชติสังกาศ ที่ได้
ให้คำแนะนำ ตลอดจนให้ความอนุเคราะห์ใช้ห้องปฏิบัติการปฐพีกลศาสตร์ในการทำงานวิจัย

วิทยานิพนธ์นี้ได้รับการสนับสนุนจากทุนพัฒนาศักยภาพในการทำงานวิจัยของอาจารย์รุ่น
ใหม่ ผู้วิจัยขอขอบคุณรุ่นพี่ปริญญาโททุกท่าน และเพื่อนร่วมรุ่นปริญญาโท เจ้าหน้าที่ภาควิชา
วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม และเจ้าหน้าที่ภาควิชาปฐพีกลศาสตร์ที่ให้ความอนุเคราะห์เครื่องมือ อุปกรณ์
และอำนวยความสะดวกต่าง ๆ ในการวิจัยครั้งนี้

สุดท้ายนี้ขอกราบของพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ และญาติพี่น้อง ที่ให้การสนับสนุนเป็นอย่างดี
ดียิ่ง และเป็นกำลังใจให้เสมอมา

กษม จันท์เนียม

มีนาคม 2552

สารบัญ

	หน้า
สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(3)
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	(5)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	3
การตรวจเอกสาร	5
อุปกรณ์และวิธีการ	31
อุปกรณ์	31
วิธีการ	35
ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง	49
สรุป	66
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	68
ภาคผนวก	71
ภาคผนวก ก ตารางบันทึกผลการทดลอง	72
ภาคผนวก ข ตัวอย่างการคำนวณ	99
ประวัติการศึกษาและการทำงาน	106

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	คุณลักษณะของโทลูอิน (Toluene) ซึ่งเป็นสารในกลุ่ม LNAPLs	17
2	คุณลักษณะของ Trichloroethylene (TCE) ซึ่งเป็นสารในกลุ่ม DNAPLs	19
3	การทดลองเพื่อศึกษาการปนเปื้อนแบบต่างๆ	35
4	ผลการทดลอง imbibition rate	51
5	ดัชนีชี้วัดความสามารถเปียกได้แบบ USBM โดยคำนวณจากความสัมพัทธ์เชิง ฮิสเทอรีซิสระหว่างความดันคาปิลลารีและความอิ่มตัวด้วยน้ำ	61
6	ผลการทดลองหาความซึมผ่านได้สัมพัทธ์ของ LNAPL	63
7	ผลการทดลองหาความซึมผ่านได้สัมพัทธ์ของ DNAPL	65

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	การจำแนกประเภทของดินของ USDA	5
2	การเกิด capillary moisture ในดิน	7
3	Constant head permeameter	10
4	variable head หรือ Falling head permeameter	11
5	pressure – saturation curves for a perchloroethylene – water system	13
6	Cohesion และ Adhesion Forces	14
7	แสดงสัมประสิทธิ์แรงตึงผิว	15
8	Capillary Effect ในกรณีที่ cohesion force มีค่าน้อยกว่า adhesion force	15
9	Capillary Effect ในกรณีที่ Cohesion force มีค่ามากกว่า adhesion force	16
10	การแพร่กระจายของสารปนเปื้อนด้วยกลไก advective ในทิศทางตามยาวและตามขวางเมื่อเทียบกับทิศทางการไหลของน้ำ	22
11	กลไกการแพร่กระจายของสารปนเปื้อน (a) advective (b) advective-diffusive	23
12	แสดง NAPL แทรกตัวระหว่างเม็ดดินและน้ำใน micromodel	24
13	แผนภาพการแทรกซึมของ LNAPL ในน้ำใต้ดิน	25
14	แผนภาพการแทรกซึมของ DNAPL ในน้ำใต้ดิน	26
15	มุมสัมผัสของ NAPL บนพื้นผิวของแข็งซึ่งล้อมรอบด้วยน้ำ	27
16	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความดันคาปิลลารี- ความอึดตัวด้วยน้ำและสมการสำหรับชี้วัดความสามารถเปียกได้	29
17	แสดงการประเมินการทดสอบ imbibition rate	30
18	ชิ้นส่วนอุปกรณ์ Tempe [®] Cell	31
19	ภาพตัด Tempe [®] Cell ที่ประกอบแล้ว	32
20	อุปกรณ์ที่ดัดแปลงมาจาก Tempe [®] Cell ผลิตจาก stainless steel	33
21	รูปแบบการติดตั้งอุปกรณ์การทดสอบ imbibition rate	36
22	แสดงชุดการทดสอบ imbibition rate	37
23	อุปกรณ์หาความสัมพันธ์ระหว่างความดันคาปิลลารี และความอึดตัวด้วยน้ำ	40

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
24	แสดงการทดลองหาความสัมพันธ์เชิงฮีสเทอรีซิสระหว่างความดันคาปิลลารีและความอิ่มตัวด้วยน้ำ	41
25	ชุดอุปกรณ์ทดสอบความซึมผ่านได้สัมพัทธ์	46
26	ผลการทดสอบ imbibition rate เฉลี่ยของทรายไม่ปนเปื้อน	49
27	ผลการทดสอบ imbibition rate ของการปนเปื้อนในลักษณะต่างๆ	50
28	กราฟแสดงความสัมพันธ์เชิงฮีสเทอรีซิสระหว่างความดันคาปิลลารีและความอิ่มตัวด้วยน้ำ โดยการทดลองด้วยระบบ LNAPL – น้ำ	54
29	กราฟแสดงความสัมพันธ์เชิงฮีสเทอรีซิสระหว่างความดันคาปิลลารีและความอิ่มตัวด้วยน้ำ โดยการทดลองด้วยระบบ DNAPL – น้ำ	56
30	กราฟแสดงความสัมพันธ์เชิงฮีสเทอรีซิสระหว่างความดันคาปิลลารีและความอิ่มตัวด้วยน้ำ ด้วยระบบ LNAPL – น้ำ เมื่อมี DNAPL ตกค้างอยู่ในตัวกลาง	58
31	กราฟแสดงความสัมพันธ์เชิงฮีสเทอรีซิสระหว่างความดันคาปิลลารี และความอิ่มตัวด้วยน้ำ ด้วยระบบ DNAPL – น้ำ เมื่อมี LNAPL ตกค้างอยู่ในตัวกลาง	60
32	ความซึมผ่านได้สัมพัทธ์ของ LNAPL ผ่านตัวกลางที่อิ่มตัวด้วยน้ำที่ระดับต่างๆ และความซึมผ่านได้สัมพัทธ์ของ LNAPL ผ่านตัวกลางที่อิ่มตัวด้วยน้ำที่ระดับต่างๆ ที่ผ่านการซึมผ่านของ DNAPL มาก่อนหน้า	62
33	ความซึมผ่านได้สัมพัทธ์ของ DNAPL ผ่านตัวกลางที่อิ่มตัวด้วยน้ำที่ระดับต่างๆ และความซึมผ่านได้สัมพัทธ์ของ DNAPL ผ่านตัวกลางที่อิ่มตัวด้วยน้ำที่ระดับต่างๆ ที่ผ่านการซึมผ่านของ LNAPL มาก่อนหน้า	64

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

°	=	องศา
°C	=	องศาเซลเซียส
%	=	เปอร์เซ็นต์
θ	=	มุมสัมผัส (contact angle)
BTEX	=	benzene, toluene, ethyl benzene and xylene
cm ²	=	ตารางเซนติเมตร
cm ³	=	ลูกบาศก์เซนติเมตร
cm/s	=	เซนติเมตรต่อวินาที
ม./วินาที	=	เมตรต่อวินาที
DNAPL	=	dense nonaqueous phase liquid
g/mol	=	กรัมต่อ โมล
LNAPL	=	light nonaqueous phase liquid
m	=	เมตร
mbar	=	มิลลิบาร์
mg/kg	=	มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม
mm	=	มิลลิเมตร
m ²	=	ตารางเมตร
m ² /s.m	=	ตารางเมตรต่อวินาที เมตร
m ³ /s	=	ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที
m/s	=	เมตรต่อวินาที
NAPL	=	nonaqueous phase liquid
N/m ²	=	นิวตันต่อตารางเมตร
Pa	=	pascal
s	=	วินาที
SiO ₂	=	silicon dioxide
TCE	=	trichloroethylene
VOCs	=	volatile organic compounds

**การศึกษาความสามารถเปียกได้ของพื้นผิวสำหรับการปนเปื้อนของเหลวที่ไม่ใช้น้ำแบบ
ผสมโดยการทดสอบอิมบิซันเรท และความสัมพันธ์ระหว่างความดันคาปิลลารีและ
ความอิมตัวด้วยน้ำ**

**Surface Wettability of Comingle NAPL Contamination by Imbibition Rate Test
and Capillary Pressure – Water Saturation Relationship**

คำนำ

ในปัจจุบัน อุตสาหกรรมและเกษตรกรรมของประเทศมีการพัฒนาไปอย่างรวดเร็ว ทำให้เกิดของเสียอันตรายขึ้นเป็นจำนวนมาก โดยที่ยังไม่มีการจัดเก็บที่ถูกต้องทำให้เกิดการรั่วไหลและปนเปื้อนสู่สิ่งแวดล้อม ซึ่งเป็นปัญหาที่สำคัญที่ทำให้เกิดอันตรายต่อสุขภาพอนามัยของผู้ที่ได้รับสารปนเปื้อนนั้น และทำให้ต้องสูญเสียงบประมาณในการดำเนินการจัดการอย่างมหาศาล

โดยทั่วไปสารปนเปื้อนที่พบบ่อยมักจะมีอยู่ในลักษณะของสารที่มีการผสมกันหลายชนิด เช่น เหตุการณ์การปนเปื้อนที่อำเภอกลางดง จังหวัดนครราชสีมา มีการปนเปื้อนของของเหลวที่ไม่ใช้น้ำ (nonaqueous phase liquid, NAPL) หลายชนิด แบ่งเป็น NAPL ที่เบากว่าน้ำ (light nonaqueous phase liquid, LNAPL) และ NAPL ที่หนักกว่าน้ำ (dense nonaqueous phase liquid, DNAPL) ซึ่งก่อให้เกิดความเสียหายต่อดิน และแหล่งน้ำใต้ดินเป็นอย่างมาก การฟื้นฟูพื้นที่ดังกล่าวต้องอาศัยหลักการเชิงวิศวกรรมและความเข้าใจในกลไกที่ควบคุมลักษณะการปนเปื้อน เช่น การเคลื่อนที่ของไหลต่างสถานะ (น้ำ อากาศในช่องว่างระหว่างเม็ดดิน ของแข็ง และ NAPL) คุณสมบัติของสารปนเปื้อน คุณสมบัติของดิน และคุณสมบัติของน้ำใต้ดิน เป็นต้น และอีกหนึ่งในกลไกควบคุมลักษณะการปนเปื้อนได้แก่ wettability หรือความสามารถเปียกได้ของพื้นผิวเมื่อมี NAPL ที่ปนเปื้อนในชั้นดินอิมตัวด้วยน้ำ ซึ่งในอดีตส่วนใหญ่เป็นการศึกษาที่พิจารณาสารปนเปื้อนเพียงชนิดเดียว (Adamson, 1982, Dane et al., 1994, Powers and Tamblin, 1995, Geel and Roy, 2002) ซึ่งอาจไม่ใกล้เคียงกับสภาพการปนเปื้อนที่เกิดขึ้นจริง

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษา wettability ของสารปนเปื้อนผสมที่ผสมระหว่าง NAPL ที่เบากว่าน้ำ (LNAPL) และ NAPL ที่หนักกว่าน้ำ (DNAPL) ซึ่งเป็นสภาพที่ใกล้เคียงกับการปนเปื้อนที่

เกิดขึ้นตามความเป็นจริง โดยใช้โทลูอินเป็นตัวแทนของ LNAPL และ trichloroethylene (TCE) เป็นตัวแทนของ DNAPL การเข้าใจ wettability ของสารปนเปื้อนผสม จะส่งผลให้เกิดการกีดกัน เทคโนโลยีและอุปกรณ์ที่เหมาะสมเพื่อให้การฟื้นฟูพื้นที่ปนเปื้อนเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ

วัตถุประสงค์

1. ศึกษาความสามารถแยกได้จากความสัมพันธ์เชิงฮิสเทอรีซิระหว่างความดันคาปิลลารีและความอิ่มตัวด้วยน้ำ, ความสามารถในการซึมผ่านสัมพัทธ์ (relative permeability) และการทดสอบ imbibition rate เมื่อมีการปนเปื้อนของเหลวที่ไม่ใช่ น้ำ (NAPL) เพียงชนิดเดียว

2. ศึกษาความสามารถแยกได้จากความสัมพันธ์เชิงฮิสเทอรีซิระหว่างความดันคาปิลลารีและความอิ่มตัวด้วยน้ำ, ความสามารถในการซึมผ่านสัมพัทธ์ (relative permeability) และการทดสอบ imbibition rate สำหรับการปนเปื้อนของเหลวที่ไม่ใช่ น้ำแบบผสม

3. ศึกษาการเปลี่ยนแปลงความสามารถแยกได้ระหว่างการปนเปื้อนของเหลวที่ไม่ใช่ น้ำแบบผสม และการปนเปื้อนของเหลวที่ไม่ใช่ น้ำ (NAPL) เพียงชนิดเดียว จากความสัมพันธ์เชิงฮิสเทอรีซิระหว่างความดันคาปิลลารีและความอิ่มตัวด้วยน้ำ, ความสามารถในการซึมผ่านสัมพัทธ์ (relative permeability) และการทดสอบ imbibition rate

ขอบเขตของการวิจัย

1. ศึกษาความสามารถแยกได้จากความสัมพันธ์เชิงฮิสเทอรีซิระหว่างความดันคาปิลลารีและความอิ่มตัวด้วยน้ำ, ความสามารถในการซึมผ่านสัมพัทธ์ (relative permeability) และการทดสอบ imbibition rate ด้วยการเปรียบเทียบความอิ่มตัวด้วยน้ำและเวลา เมื่อตัวกลางมีการปนเปื้อนของเหลวที่ไม่ใช่ น้ำ (NAPL) เพียงชนิดเดียว โดยใช้สารโทลูอินเป็นตัวแทนของสารที่ไม่ใช่ น้ำที่เบากว่าน้ำ (LNAPL) และใช้สารไตรคลอโรเอทิลีนเป็นตัวแทนของสารที่ไม่ใช่ น้ำที่หนักกว่าน้ำ (DNAPL)

2. ศึกษาความสามารถแยกได้จากความสัมพันธ์เชิงฮิสเทอรีซิระหว่างความดันคาปิลลารีและความอิ่มตัวด้วยน้ำ, ความสามารถในการซึมผ่านสัมพัทธ์ (relative permeability) และการทดสอบ imbibition rate ด้วยการเปรียบเทียบความอิ่มตัวด้วยน้ำและเวลา สำหรับตัวกลางที่มีการปนเปื้อนของเหลวที่ไม่ใช่ น้ำแบบผสม โดยการสัมผัสสารที่ไม่ใช่ น้ำที่เบากว่าน้ำ และสารที่ไม่ใช่ น้ำที่หนักกว่าน้ำ ทีละชนิด

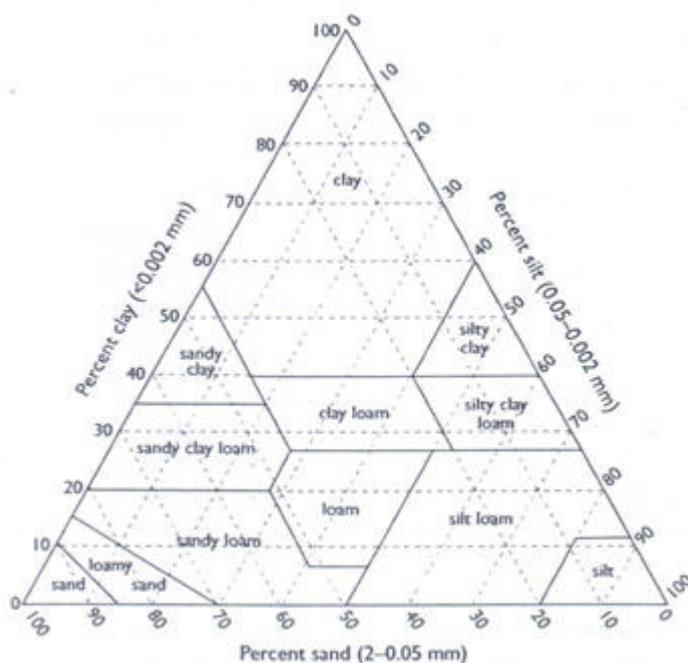
3. ศึกษาการเปลี่ยนแปลงความสามารถเปียกได้ระหว่างการปนเปื้อนของเหลวที่ไม่ใช่น้ำแบบผสม และการปนเปื้อนของเหลวที่ไม่ใช่น้ำ (NAPL) เพียงชนิดเดียว จากความสัมพันธ์เชิงฮิสเทอรีซิสระหว่างความดันคาปิลลารีและความอึมตัวด้วยน้ำ, ความสามารถในการซึมผ่านสัมพัทธ์ (relative permeability) และการทดสอบ imbibition rate ด้วยการเปรียบเทียบความอึมตัวด้วยน้ำและเวลา โดยการเปรียบเทียบความสามารถเปียกได้ของการทดลองที่มีสถานะเดียวกันแต่สภาวะต่างกัน

การตรวจเอกสาร

1. ดิน (Soil)

ดิน ความหมายในทางวิศวกรรมคือ วัสดุอะไรก็ตามที่ตกตะกอนและทับถมกันไม่แน่น เช่น กรวด (gravel), ทราย (sand), ตะกอนทราย (silt) และดินเหนียว (clay) ดินประกอบด้วยเนื้อดินหรือเม็ดดิน และช่องว่างระหว่างเม็ดดิน ซึ่งในช่องว่างอาจจะเต็มไปด้วยน้ำหรืออากาศอย่างใดอย่างหนึ่ง หรือมีทั้งน้ำและอากาศปนกัน (มณเฑียร, 2543)

การจำแนกประเภทของเม็ดดินตามขนาดของเม็ดดิน ดินจะถูกแบ่งออกเป็นพวกเม็ดดินหยาบ เช่น หิน กรวด ทราย และดินพวกเม็ดละเอียด เช่น ทราย ดินเหนียว และวัสดุแขวนลอย เป็นต้น สำหรับดินพวกเม็ดหยาบจะหาขนาดได้ด้วยวิธีร่อนผ่านตะแกรงมาตรฐานขนาดต่างๆกัน ส่วนดินพวกเม็ดละเอียดหาขนาดได้ด้วยวิธีวัดอัตราการตกตะกอนในน้ำ



ภาพที่ 1 การจำแนกประเภทของดินของ USDA

ที่มา: Hillel (1998)

สำหรับงานวิจัยนี้จะใช้ดินทราย (Ottawa Sand, SiO₂) ที่มีลักษณะเป็นผงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.58 – 0.84 มิลลิเมตร สีเทาอ่อนถึงเทาเข้ม ไม่สามารถละลายได้ ค่าความถ่วงจำเพาะ 2.65 มีมวลโมเลกุลเท่ากับ 60.08 (Fisher Scientific)

2. น้ำใต้ดิน (Ground Water)

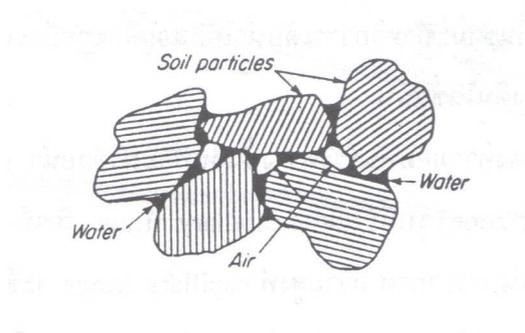
น้ำใต้ดิน หมายถึง น้ำที่มีอยู่ในชั้นดินบนพื้นผิวโลก โดยเป็นน้ำที่อยู่ในช่องว่างของชั้นดินหรือหิน ชั้นน้ำใต้ดินแบ่งออกได้เป็นแบ่งออกเป็น 2 โซน คือ

1. โซนไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ (Unsaturated zone) เรียกว่า Vadose zone โซนนี้มีอากาศและน้ำอยู่รวมกัน โดยมีอากาศแทรกอยู่ระหว่างเม็ดดิน แบ่งออกได้เป็น 3 ส่วน คือ ชั้นผิวดิน (Soil water zone) ชั้นดินช่วงกลาง (Intermediate zone) และชั้นดินชุ่มน้ำ (capillary zone)

2. โซนอิ่มตัวด้วยน้ำ (Saturated zone) เรียกว่า Phreatic zone โดยช่องว่างดินและหินจะมีน้ำแทรกอยู่เต็มไปหมด น้ำที่กักเก็บในส่วนนี้ เรียกว่า น้ำใต้ดินหรือน้ำบาดาล ความหนาและความลึกของแต่ละชั้นจะขึ้นอยู่กับชนิดและลักษณะของชั้นดินชั้นหิน ซึ่งจะแตกต่างกันไปในแต่ละพื้นที่ (ไสว, 2531)

3. ความสัมพันธ์ระหว่างดินและน้ำ (Soil – Water Relationship)

ความชื้นในดินจะอยู่ในลักษณะต่างๆกัน กล่าวคือ (1) ในลักษณะของ gravity water โดยเฉพาะในกรณีที่ช่องว่างระหว่างอนุภาคดินมีขนาดใหญ่ (2) ในลักษณะของ capillary water โดยเฉพาะในกรณีที่ช่องว่างระหว่างอนุภาคดินมีขนาดเล็ก ดังรูปที่ 1 (3) ในลักษณะของ hygroscopic moisture โดยการเคลือบคล้ายฟิล์มบางๆรอบเม็ดดิน และ (4) ในลักษณะของ water vapor



ภาพที่ 2 การเกิด capillary moisture ในดิน

ที่มา: วีระพล (2533)

เนื่องจากเม็ดดินที่เรียงตัวกันอยู่มีช่องว่างระหว่างเม็ดดิน น้ำจะแทรกเข้าไปอยู่ในช่องว่าง และเกาะติดอยู่กับเม็ดดินในลักษณะต่างๆ ด้วยแรงสองชนิดด้วยกันคือ adhesive force และ cohesive force ถ้าหากน้ำเข้าไปแทนที่อากาศจนเต็มทุกช่องว่าง ก็กล่าวได้ว่า ดินอยู่ในสภาพอิ่มตัว และน้ำที่อยู่ในช่องว่างทั้งหมดนั้นจะเป็นปริมาณสูงสุดที่ดินจะเก็บกักเอาไว้ได้หากไม่มีแรงจากภายนอกมากระทำ แต่เนื่องจากว่าสสารทุกอย่างที่อยู่บนโลกจะถูกแรงดึงดูดของโลกกระทำอยู่ตลอดเวลา รวมทั้งน้ำที่อยู่ในช่องว่างระหว่างเม็ดดินด้วย และในช่องว่างที่มีขนาดใหญ่แรง adhesive ระหว่างอนุภาคของน้ำที่อยู่ตรงกลางช่องว่างกับเม็ดดินจะน้อยกว่าในช่องว่างที่มีขนาดเล็กกว่า ดังนั้นเมื่อผลรวมของแรง cohesive และ adhesive น้อยกว่าแรงดึงดูดของโลก น้ำก็จะไหลลงสู่ที่ต่ำกว่า น้ำในดินที่ไหลด้วยสาเหตุดังกล่าวนี้ก็คือ gravity water ส่วนน้ำในช่องว่างขนาดเล็กซึ่งไม่สามารถไหลไปได้ด้วยแรงดึงดูดของโลก แต่จะมีการเคลื่อนที่ด้วยแรงดูดซับ (capillary force) น้ำที่อยู่ในสภาพดังกล่าวนี้เรียกว่า capillary water ซึ่งการเคลื่อนที่นี้จะช้ากว่ากรณี gravity water และจะมีทิศทางไปทางใดก็ได้ สำหรับน้ำที่ยึดติดแน่นกับเม็ดดินและไม่สามารถที่จะเคลื่อนที่ได้ด้วยแรงดึงดูดของโลกหรือแรงดูดซับได้เลยนั้นเรียกว่า hygroscopic water (วีระพล, 2533)

4. การเคลื่อนที่ของความชื้นในดิน (Movement of Soil Moisture)

การไหลซึมของน้ำจากผิวดินเข้าไปในดินนี้เรียกว่า การซึมผ่านผิวดิน (infiltration) ซึ่งจะแตกต่างจากการซึมลึกภายในดิน (percolation) อัตราที่น้ำบนผิวดินไหลซึมเข้าไปในดินต่อหนึ่งหน่วยเวลาเรียกว่า infiltration rate หรือ intake rate อัตราดังกล่าวนี้ขึ้นอยู่กับองค์ประกอบหลาย

อย่างด้วยกัน เช่น ความลึกของน้ำที่ขังอยู่บนผิวดิน ลักษณะ โครงสร้างของดิน เนื้อดิน อุณหภูมิของน้ำและดิน ตลอดจนความชื้นที่มีอยู่ในดิน ในตอนแรกที่มีการให้น้ำแก่ดินอัตราการซึมผ่านผิวดินจะสูง เนื่องจากผิวดินยังแห้งอยู่ จึงดูดซับน้ำไว้อย่างรวดเร็ว แต่เมื่อการให้น้ำดำเนินต่อไป ดินชั้นบนจะเริ่มอิ่มตัว อัตราการซึมผ่านผิวดินจะค่อยๆ ลดลง และในที่สุดก็จะถึงจุดหนึ่งซึ่งอัตราการซึมผ่านผิวดินมีค่าเกือบคงที่ตลอดไปจนกว่าจะหยุดการให้น้ำ ค่าที่เกือบคงที่ดังกล่าวนี้จะประมาณเท่ากับความสามารถให้น้ำซึมผ่านได้ (permeability) ของดิน (วีระพล, 2533)

5. การเคลื่อนที่ของน้ำใต้ดิน (Movement of Ground Water)

การไหลของน้ำใต้ดินจะแบ่งออกเป็น 2 ชนิด ตามลักษณะการเคลื่อนที่ของอนุภาค กล่าวคือ การไหลแบบราบเรียบ (laminar flow) อนุภาคของน้ำเคลื่อนที่ในลักษณะตามกันไปเป็นแผ่นหรือชั้นเรียบๆ โดยที่แผ่นหนึ่งเคลื่อนทับอีกแผ่นหนึ่ง ส่วนการไหลแบบปั่นป่วน (turbulent flow) อนุภาคของน้ำเคลื่อนที่ในทิศทางไม่แน่นอน โดยสามารถนำหลักการของ Darcy's law มาประยุกต์ใช้ ซึ่งเป็นกฎที่มีความสำคัญมากต่อการคำนวณการวิเคราะห์เกี่ยวกับการโยกย้ายสารปนเปื้อน (Darcy Henry, 1856)

$$q = -K \left(\frac{dh}{dl} \right) \quad (1)$$

เมื่อ	q	=	อัตราการไหลจำเพาะ [$m^2/s.m$]
	K	=	สภาพนำเชิงชลศาสตร์ (Hydraulic conductivity) [m/s]
	$-\frac{dh}{dl}$	=	ความลาดชันเชิงชลศาสตร์ [m/m]

การไหลของน้ำใต้ดินผ่านตัวกลางพรุน (Porous media) จะเป็นไปตามหลักกลศาสตร์ของไหล กล่าวคือ สภาพการไหลเกิดขึ้นจากตำแหน่งที่มีพลังงานของของไหลสูงกว่าไปยังตำแหน่งที่มีพลังงานต่ำกว่า พลังงานของของไหลจะประกอบไปด้วยพลังงานเนื่องจากระดับ (Elevation) พลังงาน เนื่องจากความดัน (Pressure) และพลังงานเนื่องจากความเร็ว (เกรียงศักดิ์, 2546)

6. ความซึมได้ของน้ำในดิน (Permeability)

เมื่อน้ำมีความดันหรือระดับต่างกันระหว่างจุดสองจุดในดิน ก็จะมีการไหลของน้ำผ่านช่องว่างเหล่านี้ ความสามารถที่น้ำไหลซึมผ่านดินได้นี้เรียกว่า ความซึมได้ของน้ำในดิน ซึ่งจะขึ้นอยู่กับอิทธิพลของขนาดของเม็ดดิน คุณสมบัติของของเหลวในช่องว่าง อัตราส่วนช่องว่างในดิน รูปร่างและการจัดเรียงตัวของช่องว่าง และระดับความอิ่มตัวของดิน สามารถอธิบายได้ด้วยสมการของ Darcy ดังนี้ (LaGrega, 2001)

$$Q = kiA \quad (2)$$

เมื่อ	Q	= อัตราการไหล [m^3/s]
	k	= ความสามารถในการไหลซึมผ่าน (hydraulic conductivity) [m/s]
	i	= ความชันทางชลศาสตร์ (hydraulic gradient) [m/m] = $\Delta H/L$
	ΔH	= ความแตกต่างของแรงดันน้ำที่เทียบเป็นความสูง [m]
	L	= ระยะทางการไหล [m]
	A	= พื้นที่หน้าตัดการไหล [m^2]

7. การหาค่าสัมประสิทธิ์ความซึมได้ของน้ำในดิน

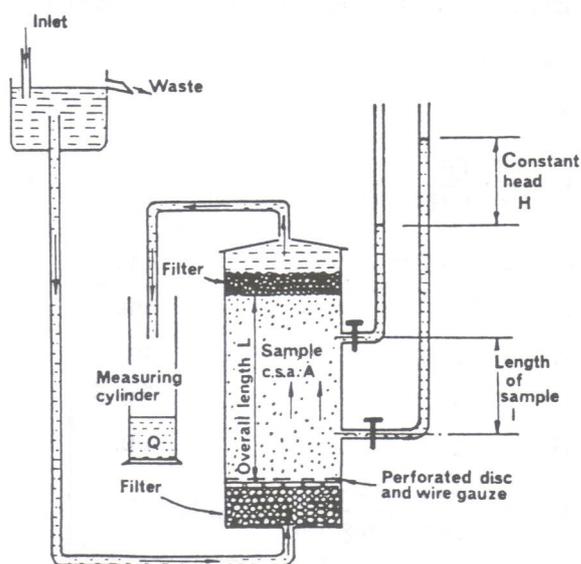
การทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์ความซึมได้ของน้ำในดินในห้องปฏิบัติการ สามารถทำได้ 2 วิธี คือ

7.1 แบบความดันน้ำคงที่ (constant head) โดยใช้เครื่องมือที่เรียกว่า Constant head permeameter ดังแสดงในรูป ทำได้โดยการปล่อยน้ำที่มีความดันคงที่ให้ไหลผ่านตัวอย่างดินที่อยู่ในหลอดใส่ตัวอย่างตลอดเวลา แล้ววัดปริมาณน้ำที่ไหลผ่านตัวอย่างดินในช่วงเวลาหนึ่ง วิธีนี้เหมาะกับดินที่มีเม็ดหยาบ เช่น กรวด ทราย

$$k = \frac{QL}{thA} \quad (3)$$

เมื่อ	Q	= ปริมาตรของน้ำที่ไหลออกจากตัวอย่างดินในเวลา t [cm^3/s]
-------	-----	---

- h = ความต่างของระดับน้ำด้านบนน้ำกับด้านท้ายน้ำ [cm]
 k = สัมประสิทธิ์การซึมผ่าน [cm/s]
 L = ความหนาของตัวอย่าง [cm]
 A = พื้นที่หน้าตัดของตัวอย่าง [cm²]
 t = เวลาที่กำหนด [s]



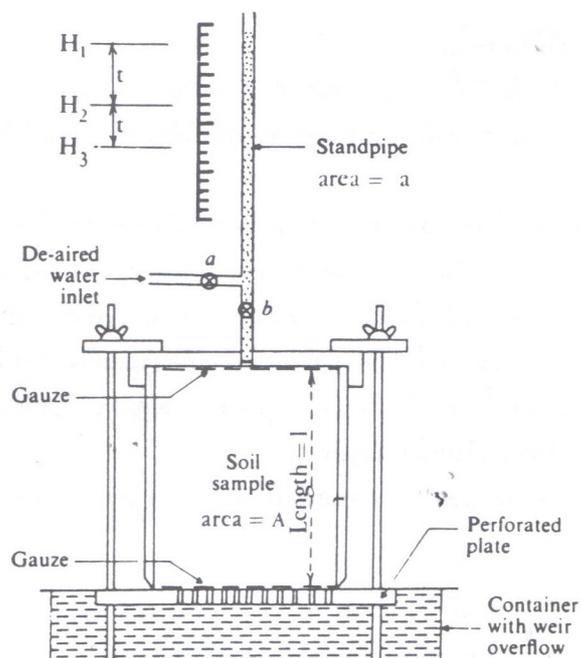
ภาพที่ 3 Constant head permeameter

ที่มา: มณฑิธร (2543)

7.2 แบบแรงดันเปลี่ยนแปลง (variable head หรือ falling head) เป็นการทดลองที่มีการลดลงของแรงดันน้ำที่เหนี่ยวนำให้เกิดการไหล ซึ่งเหมาะกับการทดลองในดินที่มีเม็ดละเอียด เช่น ตะกอนทราย ดินเหนียว เนื่องจากดินเม็ดละเอียดยอมให้น้ำซึมผ่านได้ยากและช้ากว่าดินเม็ดหยาบมาก ดังนั้นจึงไม่สามารถวัดปริมาณน้ำที่ไหลซึมออกมาได้ในช่วงเวลาที่เหมาะสมเช่นวิธี constant head โดยใช้เครื่องมือที่เรียกว่า Variable head หรือ Falling head permeameter

$$k = 2.3 \left(\frac{aL}{At} \right) \log \left(\frac{h_1}{h_2} \right) \quad (4)$$

เมื่อ	a	= พื้นที่หน้าตัดของหลอดวัดน้ำเข้าตัวอย่าง [cm^2]
	h_1	= ระดับน้ำทางต้นน้ำ ณ จุดเริ่มการทดลอง [cm]
	h_2	= ระดับน้ำทางต้นน้ำ ณ จุดสิ้นสุดการทดลอง [cm]
	L	= ความหนาของตัวอย่าง [cm]
	A	= พื้นที่หน้าตัดของตัวอย่าง [cm^2]
	t	= เวลาที่กำหนด [s]



ภาพที่ 4 variable head หรือ Falling head permeameter

ที่มา: มณเฑียร (2543)

8. ความพรุน (Porosity) และระดับความอิ่มตัว (Degree of saturation)

ความพรุน คือ อัตราส่วนระหว่างช่องว่าง (pore volume) ของดินต่อปริมาตรของดินทั้งหมด (มณเฑียร, 2543)

$$n = \frac{V_v}{V} \quad (5)$$

เมื่อ	n	= ความพรุน [-]
	V_v	= ปริมาตรของช่องว่าง [L^3]
	V	= ปริมาตรของดินทั้งหมด [L^3]

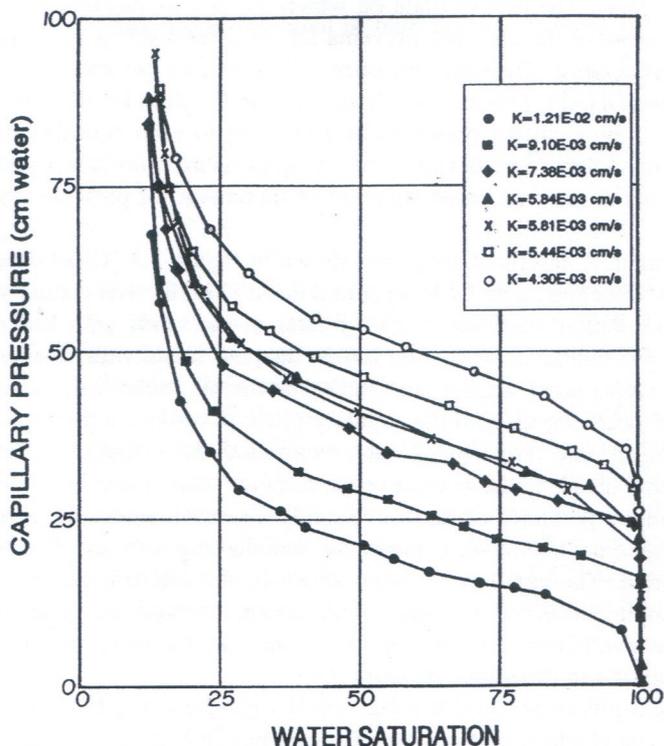
ระดับความอิ่มตัว คือ ค่าอัตราส่วนระหว่างปริมาตรของน้ำต่อปริมาตรของช่องว่างในดิน

$$S_r = \frac{V_w}{V_v} \quad (6)$$

เมื่อ	S_r	= ระดับความอิ่มตัว [-]
	V_w	= ปริมาตรของน้ำในดิน [L^3]
	V_v	= ปริมาตรของช่องว่าง [L^3]

9. ฮิสเทอรีซิส และของเหลวที่ไม่ใช่ที่ตกค้างในดิน (Hysteresis and Residual NAPL)

ฮิสเทอรีซิส หรือความไม่ซ้ารอย คือ ปรากฏการณ์ที่ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรสองตัวในรูปกราฟเส้นโค้งไม่ทับซ้อนกันสนิท เมื่อเปลี่ยนค่าตัวแปรหนึ่งในทิศทางที่เพิ่มขึ้นเปรียบเทียบกับเมื่อเปลี่ยนค่าตัวแปรในทิศทางที่ลดลง สังเกตพบในความสัมพันธ์ระหว่างระดับความชื้นในดินกับศักย์วัสดุพื้น (matric potential) โดยความสัมพันธ์ในรูปกราฟเส้นโค้งระหว่างค่าทั้งสองเมื่อดินชื้นขึ้นกับดินแห้งลงจะไม่ซ้อนทับกันสนิท เช่น ค่าศักย์วัสดุพื้นค่าใดค่าหนึ่งจะมีระดับความชื้นของดินเมื่อดินชื้นขึ้นไม่เท่ากันกับเมื่อดินกำลังแห้งลง เส้นโค้งความดันคาปิลลารี- ความอิ่มตัวด้วยน้ำ (saturation) แสดงดังภาพที่ 5 ที่ถูกวัดภายใต้เงื่อนไขความอิ่มตัวด้วยน้ำลดลง และค่าความดันคาปิลลารีเพิ่มขึ้น เป็นผลให้มีการเข้าไปของของเหลวที่ไม่ใช่ที่เข้าไปอยู่ในตัวกลางที่ก่อนหน้านี้อิ่มตัวด้วยน้ำ ปรากฏการณ์นี้เรียกว่าการระบายน้ำ และมีลักษณะเดียวกับสถานการณ์ที่เกิดขึ้นจริง ในการปนเปื้อนของเหลวที่ไม่ใช่ในแหล่งน้ำใต้ดิน วิธีหนึ่งที่จะบำบัดพื้นที่ปนเปื้อนนั้นจะต้องอาศัยการแทนที่ด้วยน้ำ ด้วยการเพิ่มความอิ่มตัวด้วยน้ำ และลดความดันคาปิลลารีนั้นก็คือการทำให้ตัวกลางเปียกน้ำนั่นเอง



ภาพที่ 5 pressure – saturation curves for a perchloroethylene – water system

ที่มา: Kueper and Frind (1991)

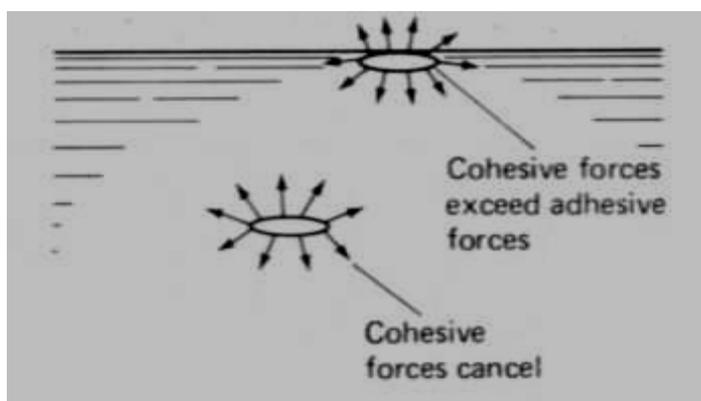
10. แรงตึงผิว (surface tension) และแรงดันคาпилลารี (capillary pressure)

แรงตึงผิว คือ แรงดึงที่เกิดขึ้นบนผิวหน้าของของเหลว เมื่อผิวหน้าของของเหลวนั้นสัมผัสกับของไหล ตัวอย่างเช่น เมื่อผิวหน้าของน้ำสัมผัสกับอากาศ การเกิดแรงตึงผิวนี้นี้สืบเนื่องมาจากแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลซึ่งแบ่งได้ 2 ชนิด คือ

- 1) แรง Cohesion คือ แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลชนิดเดียวกัน
- 2) แรง Adhesion คือ แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลต่างชนิดกัน

จากภาพที่ 6 เมื่อผิวอิสระของของเหลว (เช่น น้ำ) สัมผัสกับอากาศ บริเวณที่อยู่ใต้ผิวอิสระแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลของน้ำจะหักล้างกันหมด แต่บริเวณผิวอิสระแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุล

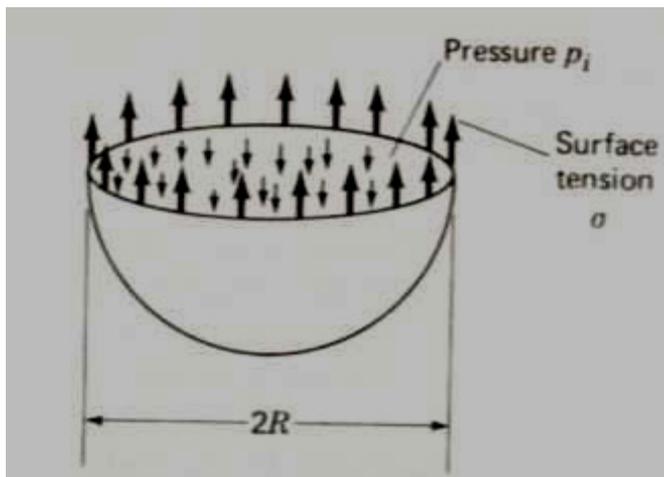
ของน้ำมีค่ามากกว่าแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลของน้ำกับโมเลกุลของอากาศ แรงลัพธ์ที่เกิดขึ้นเนื่องจากความแตกต่างระหว่าง Adhesion Force กับ Cohesion Force บริเวณผิวอิสระของของเหลวนี้ มีแนวโน้มทำให้โมเลกุลของของเหลวบริเวณผิวอิสระถูกดึงให้จมลง ดังนั้นทำให้บริเวณผิวอิสระมีความหนาแน่นของโมเลกุลสูง ผิวอิสระของของเหลวจึงมีสภาพคล้ายกับมีเยื่อบางๆ (Membrane) หุ้มอยู่ และแรงลัพธ์นี้เรียกว่า “แรงตึงผิว” แรงตึงผิวจะมีทิศทางสัมผัสกับผิวอิสระและตั้งฉากกับเส้นแสดง Membrane Section



ภาพที่ 6 Cohesion และ Adhesion Forces

ที่มา: จันทกานต์ (ม.ป.ป.)

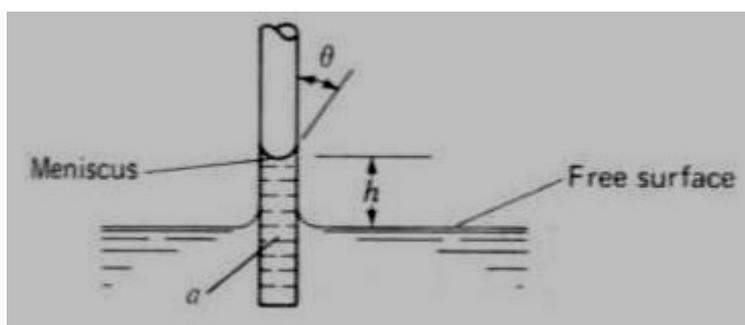
ค่าของแรงตึงผิวแสดงอยู่ในรูปของสัมประสิทธิ์แรงตึงผิว σ (Coefficient of Surface Tension, N/m) ซึ่งหมายถึง แรงต่อความยาวเส้นแสดง Membrane Section ดังแสดงในภาพที่ 7



ภาพที่ 7 แสดงสัมประสิทธิ์แรงตึงผิว

ที่มา: จันทกานต์ (ม.ป.ป.)

ในกรณีของเหลวสัมผัสกับของแข็ง เช่น หลอดแก้วจุ่มในอ่างน้ำหรืออ่างปรอท ถ้า Adhesion Force มีค่ามากกว่าระดับของของเหลวในอ่าง และผิวของของเหลวในหลอดแก้ว (Meniscus) จะมีลักษณะโค้งงายขึ้น ปรากฏการณ์นี้เรียกว่า capillary effect



ภาพที่ 8 Capillary Effect ในกรณีที่ cohesion force มีค่าน้อยกว่า adhesion force

ที่มา: จันทกานต์ (ม.ป.ป.)

พิจารณาการเกิดคาปิลลารีในหลอดแก้ว โดยสมมติให้ผิวโค้งที่เกิดขึ้นในหลอดแก้ว (Meniscus) มีลักษณะเป็นผิวของทรงกลม

จากภาพที่ 8 ให้ P_i เป็นความดันใกล้ผิวอิสระด้านที่เป็นอากาศ

P_o เป็นความดันใกล้ผิวอิสระด้านที่เป็นของเหลว

$$P_o = -\gamma h, P_i = 0 \text{ (ความดันเกจ)}$$

$$P_i - P_o = \gamma h$$

$$\text{และ } R_1 = R_2 = R$$

$$\text{จาก } r/R = \cos \theta, R = r / \cos \theta$$

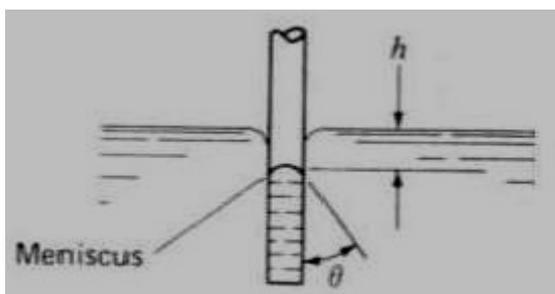
$$\text{จาก } P_i - P_o = 2\sigma/R$$

$$\text{ดังนั้น } \gamma h = 2\sigma/R$$

$$\text{หรือ } h = 2\sigma \cos \theta / \gamma R \quad (7)$$

สมการนี้ใช้ได้เฉพาะในกรณีที่หลอดแก้วมีขนาดเล็กเท่านั้น คือ $r < 2.5 \text{ mm}$. และมุม θ เรียกว่า angle of constant

Capillary effect ที่เกิดขึ้นในกรณีที่ cohesion force มีค่ามากกว่า adhesion force (กรณีหลอดแก้วจุ่มในอ่างปรอท) จะมีผลทำให้ระดับของเหลวในหลอดแก้ว มีระดับต่ำกว่าระดับของของเหลวในอ่าง และลักษณะของ Meniscus ที่เกิดขึ้นจะโค้งลง ดังแสดงในภาพที่ 9



ภาพที่ 9 Capillary Effect ในกรณีที่ Cohesion force มีค่ามากกว่า adhesion force

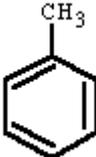
ที่มา: จันทกานต์ (ม.ป.ป.)

11. สารที่แยกตัวจากน้ำ (Nonaqueous Phase Liquids, NAPLs)

สารพวกที่แยกตัวจากน้ำนี้เป็นสารที่มีศักยภาพในการก่อให้เกิดปัญหาการปนเปื้อนในน้ำใต้ดินมาก สามารถแบ่งประเภทของสารพวกแยกตัวจากน้ำตามความหนาแน่นได้เป็น 2 ชนิด คือ สารพวกแยกตัวจากน้ำที่มีความหนาแน่นน้อยกว่าน้ำ (Light Nonaqueous Phase Liquids: LNAPLs) และสารพวกแยกตัวจากน้ำที่มีความหนาแน่นมากกว่าน้ำ (Dense Nonaqueous Phase Liquids: DNAPLs)

สารพวกแยกตัวจากน้ำที่มีความหนาแน่นน้อยกว่าน้ำ (Light Nonaqueous Phase Liquids : LNAPLs) มักจะอยู่บนผิวน้ำ ถ้าไหลผ่านบ่อน้ำตื้นจะเห็นได้ชัดเจนทำให้สามารถเก็บตัวอย่างได้ง่าย ส่วนใหญ่ได้แก่สารในกลุ่มที่มีองค์ประกอบของเชื้อเพลิงชนิดต่างๆ สารนี้มีความหนืดต่ำ มักเคลื่อนที่ในแนวคิ่งและแนวระนาบลงสู่ดินและก่อให้เกิดการปนเปื้อนของน้ำใต้ดินในชั้นดินอุ้มน้ำ (Water Saturated Zone) โดยจะอยู่ในลักษณะของบ่อที่แยกตัวจากน้ำใต้ดิน (NAPLs pools) หรือของเหลวที่แทรกตัวระหว่างเม็ดดิน (NAPLs blobs or ganglia) (Pankow and Cherry, 1996) ตัวอย่างสารในกลุ่มนี้เช่น เบนซีน, โทลูอิน และไซลีน เป็นต้น เนื่องจากสารเหล่านี้มีความหนาแน่นน้อยกว่าน้ำ เมื่อมีการปนเปื้อนในน้ำมักจะลอยอยู่ส่วนบนของชั้นน้ำใต้ดินและหากน้ำใต้ดินมีการไหลก็จะค่อยๆ กระจายแพร่ออกไปเป็นบริเวณกว้าง

ตารางที่ 1 คุณลักษณะของโทลูอิน (Toluene) ซึ่งเป็นสารในกลุ่ม LNAPLs

ประเด็น	รายละเอียด
ชื่อเรียกอื่น	methylbenzene; toluol; phenylmethane; methacide
CAS No.	108-88-3
สูตร โมเลกุล	C_7H_8
สูตร โครงสร้าง	
น้ำหนัก โมเลกุล	92.13 g/mol

ตารางที่ 1 (ต่อ)

ประเด็น	รายละเอียด
จุดเดือด	110.6 °C
คุณสมบัติ	เป็นของเหลวไม่มีสี ติดไฟง่าย มีกลิ่นคล้าย benzene
การใช้ที่ผิดกฎหมาย	ใช้เป็นตัวทำละลายในการผลิต amphetamine, cocaine, methaqualone, mecloqualone, phencyclidine, psilocin
การใช้ที่ถูกกฎหมาย	ใช้เป็นตัวทำละลายในภาคอุตสาหกรรม ผลิตวัตถุระเบิด สีย้อม สารเคลือบ ใช้ผสมน้ำมันเชื้อเพลิง ฯลฯ
หน่วยงานที่รับผิดชอบ	กรมโรงงานอุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม สำนักงานคณะกรรมการอาหารและยา กระทรวงสาธารณสุข

ที่มา: กรมควบคุมมลพิษ (ม.ป.ป.)

สารพวกแยกตัวจากน้ำที่มีความหนาแน่นมากกว่าน้ำ (Dense Nonaqueous Phase Liquids : DNAPLs) โดยทั่วไปจะจมอยู่ใต้น้ำ มีความหนืดน้อย มีแรงตึงผิวต่ำ ทำให้สามารถเคลื่อนตัวลงสู่ชั้นใต้ดินได้ง่ายกว่าน้ำ ระเหยง่ายเหมือนแก๊ส ทำให้สามารถเคลื่อนตัวไปในโซนไม่อิ่มตัว หรือชั้นบรรยากาศได้ มีความสามารถในการละลายสัมบูรณ์และความสามารถในการย่อยสลายต่ำ ทำให้สามารถอยู่ในน้ำใต้ดินและก่อให้เกิดปัญหาการปนเปื้อนน้ำใต้ดินได้เป็นเวลานาน แต่ถึงแม้การละลายน้ำใต้ดินเพียงเล็กน้อยก็เป็นปริมาณที่จะทำให้เกิดอันตรายและเกิดความเป็นพิษได้ สารนี้มีความหนาแน่นสูงกว่าน้ำคือ 1.2 - 1.7 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ทำให้สารเคลื่อนตัวลงไปรวมกันเป็นบ่อที่แยกตัวอยู่ที่ชั้นน้ำใต้ดิน แต่การเคลื่อนตัวของสารจากบ่อดังกล่าวไปตามทิศทางกรไหลของน้ำใต้ดินจะต่ำ (Pankow and Cherry, 1996) สารนี้บางชนิดเป็นสารที่มีคลอรีนเป็นองค์ประกอบ เช่น trichloroethylene, เตตระคลอโรเอทิลีน, และ 1,1,1-ไตรคลอโรอีเทน เป็นต้น ปัจจุบันมีการนำเข้ามาใช้กันอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมเนื่องจากมีคุณสมบัติในการละลาย

ไขมันจากผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมได้ดี เช่น ส่วนประกอบอิเล็กทรอนิกส์ และผลิตภัณฑ์ที่เป็นโลหะ เป็นต้น นอกจากนั้นยังนิยมนำมาใช้ผสมกับน้ำยาซักแห้ง ซึ่งจะทำให้การซักเสื้อผ้ามีประสิทธิภาพสูง เนื่องจากสารที่ใช้ในกลุ่มนี้ เป็นสารที่ใช้ในการซักล้าง ดังนั้นเมื่อนำใช้แล้ว สารทั้งหมดก็จะกลายเป็นของเสีย หากกำจัดไม่ถูกต้องแล้วก็อาจจะเป็นสารที่ก่อให้เกิดปัญหาการปนเปื้อนในน้ำใต้ดินได้มาก ดังที่เกิดขึ้นแล้วในประเทศอุตสาหกรรมหลายประเทศ

ตารางที่ 2 คุณสมบัติของ Trichloroethylene (TCE) ซึ่งเป็นสารในกลุ่ม DNAPLs

ประเด็น	รายละเอียด
ชื่ออื่น	Ethylene trichloride, 1,1,2-trichloroethene
ข้อมูลเกี่ยวกับอันตราย	อาจก่อให้เกิดผลเสียแก่ร่างกาย เป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตที่อาศัยในน้ำ อาจมีผลเสียระยะยาวต่อสถานะแวดล้อมในน้ำ สมบัติทางเคมีและกายภาพ ลักษณะ: ของเหลว สี: ไม่มีสี กลิ่น: เฉพาะตัว จุดหลอมเหลว: -86 °C จุดเดือด: 87 °C อุณหภูมิติดไฟ: 410 °C ความดันไอ: (20 °C) 77 mbar ความสามารถการละลาย: น้ำ (20 °C) เกือบไม่ละลายน้ำ อื่นๆ: อุณหภูมิสลายตัว > 110 °C

ตารางที่ 2 (ต่อ)

ประเด็น	รายละเอียด
ความเสถียรและความไวต่อปฏิกิริยา	<p>สถานะที่ต้องหลีกเลี่ยง: การให้ความร้อนสูง</p> <p>สารที่ต้องหลีกเลี่ยง: โลหะอัลคาไล, โลหะอัลคาไลน์เอิร์ธ, โลหะ ในสภาพที่เป็นผง, ไฮดรอกไซด์ของโลหะอัลคาไล, เอไมด์ของโลหะอัลคาไล, สารประกอบไฮโดรเจนกึ่งโลหะ, กรดเปอร์คลอริก, ออกซิเจน, ไฮดรอกไซด์ของโลหะอัลคาไล, ไนโตรเจนออกไซด์, โลหะเบา</p> <p>ผลิตภัณฑ์จากการสลายตัว เมื่อเกิดเพลิงไหม้: กรดไฮโดรคลอริก, ฟอสจีน, คลอรีน</p> <p>วัสดุที่ไม่เหมาะสม: พลาสติกชนิดต่างๆ</p> <p>สารเคมีในสภาพที่เป็นไอระเหยหรือแก๊ส เมื่อผสมกับอากาศ ก่อให้เกิดการระเบิดได้</p>
ข้อมูลทางพิษวิทยา	<p>พิษเฉียบพลัน: LD50 (oral, rat): 5650 mg/kg</p> <p>เมื่อสูดดม: ก่อให้เกิดการระคายเคืองของเยื่อเมือก, ใจ และ หายใจลำบาก</p>

ที่มา: กรมควบคุมมลพิษ (ม.ป.ป.)

12. กลไกการแพร่กระจายของสารปนเปื้อน

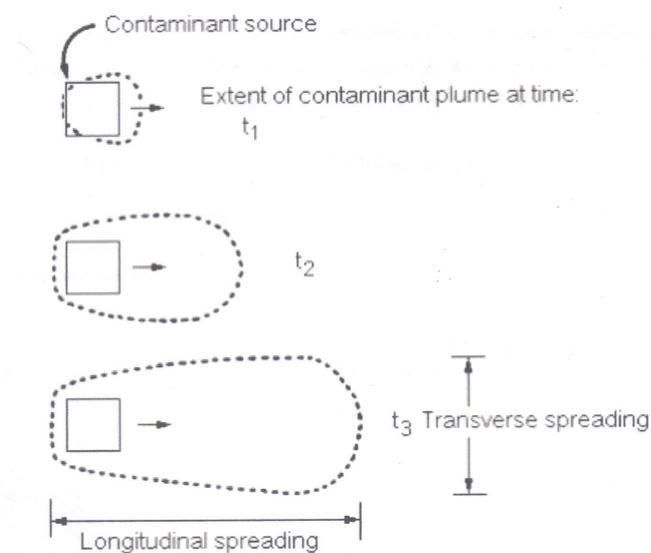
สารปนเปื้อนสามารถกระจายตัวได้ด้วยกลไกหลายประการซึ่งจะขึ้นอยู่กับชนิดของดินและสภาพแวดล้อมของระบบ กลไกที่สำคัญมีดังนี้

1. Advective transport เป็นกลไกการแพร่กระจายตัวของสารปนเปื้อนไปพร้อมกับการไหลของของเหลวผ่านดิน ซึ่งจะเกิดขึ้นได้ในอัตราเร็วหรือช้าขึ้นอยู่กับคุณสมบัติทางการไหลซึมผ่านของดิน (Hydraulic Conductivity) ในดินทรายที่มีความสามารถในการไหลซึมผ่านสูงย่อม

ทำให้เกิดการแพร่กระจายตัวของสารปนเปื้อนได้เร็ว เมื่อเทียบกับดินเหนียวซึ่งมีความสามารถในการไหลซึมผ่านต่ำอย่างมาก ภาพที่ 11 (a) แสดงลักษณะการแพร่กระจายด้วยกลไกนี้พร้อมกับการลดลงของความเข้มข้นของสารปนเปื้อน ณ แหล่งกำเนิด และความเข้มข้นของสารปนเปื้อนตามระยะทางคงที่ เพราะฉะนั้นในกรณีที่ไม่มีการไหลของของเหลว หรือมีอัตราการไหลซึมผ่านอย่างช้ามากย่อมทำให้การกระจายตัวของสารปนเปื้อนเป็นไปได้ช้าเช่นกัน

2. Diffusive transport เป็นกลไกการแพร่กระจายของสารปนเปื้อนเนื่องจากความต่างศักย์ความเข้มข้นทางเคมีของสารเคมี (สารปนเปื้อน) การกระจายตัวจะเกิดขึ้นในทิศทางจากที่ที่มีความเข้มข้นของสารเคมีสูงกว่าไปหาที่ที่มีความเข้มข้นของสารเคมีที่ต่ำกว่า โดยที่ความเข้มข้นของสารเคมีตามระยะทางจะมีค่ามากขึ้นใกล้กับที่ที่มีความเข้มข้นมาก และจะมีค่าน้อยทางด้านที่มีความเข้มข้นต่ำ กลไกนี้เป็นกลไกหลักของการแพร่กระจายตัวของสารปนเปื้อนในดินที่มีความสามารถในการซึมผ่านต่ำมาก ๆ อย่างดินเหนียวบดอัด ซึ่งจะเกิดขึ้นในอัตราที่ช้ากว่ากลไก advective

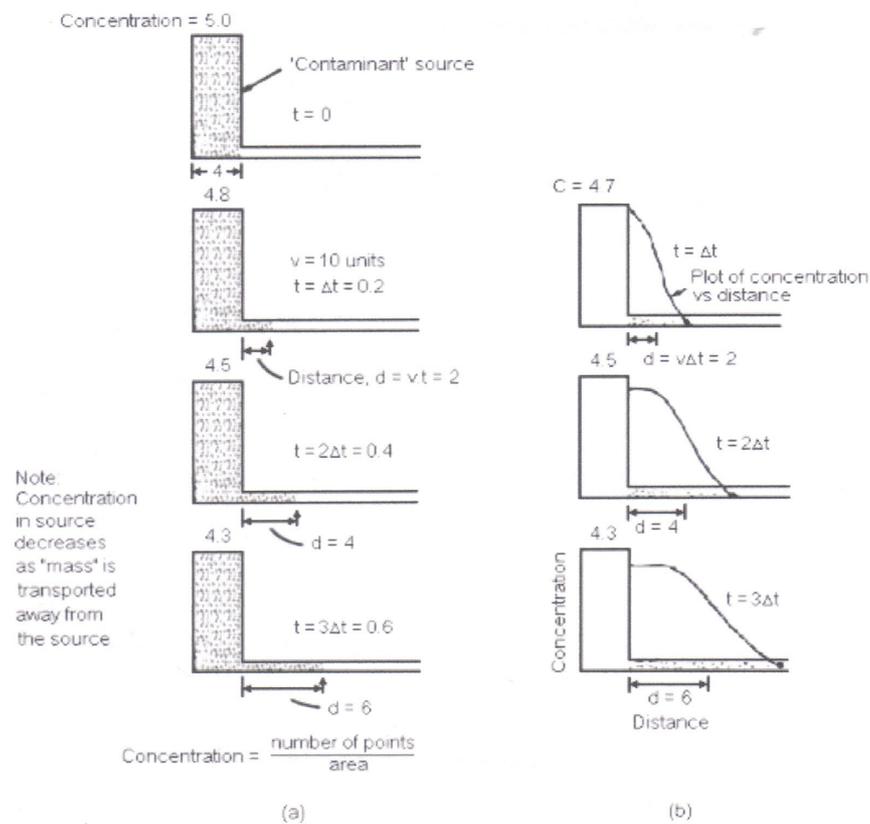
3. Advective-Diffusive transport เป็นกลไกที่เกิดร่วมกันระหว่างกลไก advective และ diffusive ดังนั้นการแพร่กระจายตัวของสารปนเปื้อนในลักษณะนี้จะมีรูปแบบที่ผสมผสานกันของกลไกทั้งสองดังกล่าว ภาพที่ 11 (b) แสดงการแพร่กระจายตัวของสารปนเปื้อนด้วยกลไก advective-diffusive ซึ่งจะมีการลดลงของความเข้มข้นของสารปนเปื้อน ณ จุดกำเนิดตามเวลา และความเข้มข้นของสารปนเปื้อนตามระยะทางจะไม่คงที่ กลไกนี้เป็นกลไกที่ใกล้เคียงกับความเป็นจริงตามธรรมชาติมากที่สุด



ภาพที่ 10 การแพร่กระจายของสารปนเปื้อนด้วยกลไก advective ในทิศทางตามยาวและตามขวางเมื่อเทียบกับทิศทางการไหลของน้ำ

ที่มา: Freeze and Cherry (1979)

4. Dispersion เมื่อการเคลื่อนตัวของสารปนเปื้อนเกิดขึ้นในขณะที่มีการไหลของของเหลวในดินอย่างรวดเร็วจะทำให้เกิดกลไกที่เรียกว่า “mechanical dispersion” กลไกนี้จึงเกี่ยวกับการผสมผสานของสารปนเปื้อนกับน้ำที่เกิดจากการแปรเปลี่ยนของความเร็วของการไหลตามตำแหน่ง หรืออาจจะกล่าวได้ว่ากลไก dispersion เป็นกลไกที่เกี่ยวกับการผสมผสานและการแพร่กระจายของสารปนเปื้อนในดินที่ไม่มีความสม่ำเสมอ (nonhomogeneity) (Freeze and Cherry, 1979)

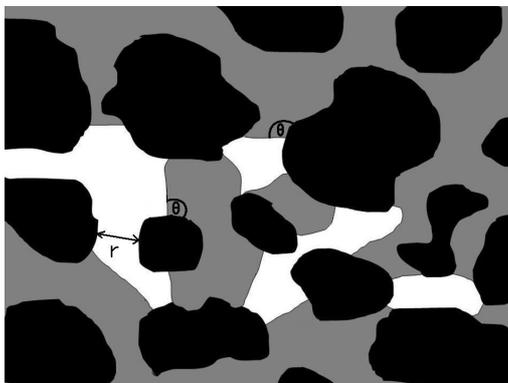


ภาพที่ 11 กลไกการแพร่กระจายของสารปนเปื้อน (a) advective (b) advective-diffusive

ที่มา: Freeze and Cherry (1979)

13. การเคลื่อนที่ของ NAPL ในน้ำใต้ดิน

LaGrega (2001) ปัญหาของการทำนายการเคลื่อนตัวของสารปนเปื้อน จะมีความซับซ้อนมากยิ่งขึ้นถ้าสารปนเปื้อนนั้นเป็น NAPL ซึ่งของเหลวที่เป็นสารประกอบอินทรีย์นั้นแสดงคุณลักษณะที่ไม่สามารถรวมตัวเป็นเนื้อเดียวกันกับน้ำได้ สารอินทรีย์นี้จึงมีความสามารถในการละลายน้ำได้น้อยมาก หรือใกล้เคียงกับสารประกอบอินทรีย์ที่ไม่ละลายน้ำ พบได้ในแหล่งน้ำใต้ดิน จะเห็นเป็นชั้นแยกตัวจากน้ำ โดยที่มีความหนาแน่นและความหนืดต่างจากน้ำ เช่น DNAPL ที่มีความหนาแน่นมากกว่าน้ำ และ LNAPL ที่มีความหนาแน่นน้อยกว่าน้ำ ภาพที่ 12 แสดงลักษณะการปนเปื้อนของ NAPL ในชั้นอิมตัวด้วยน้ำ มี NAPL (สีขา) อยู่ระหว่างช่องว่าง silicon micromodel (สีดำ) ซึ่งเป็นตัวแทนเม็ดดิน ล้อมรอบด้วยน้ำ (สีเทา)



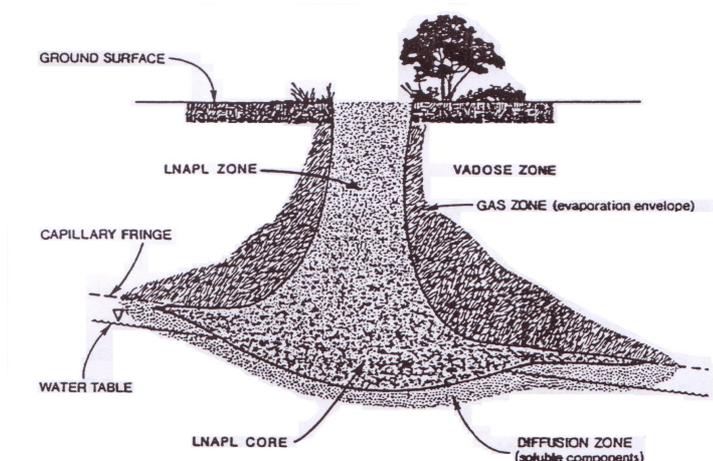
ภาพที่ 12 แสดง NAPL แทรกตัวระหว่างเม็ดดินและน้ำใน micromodel

ที่มา: Chomsurin (2003)

มีการพบ NAPL จำนวนมากในสถานที่กำจัดขยะอันตราย (Mercer and Cohen, 1990) นอกจากนั้น NAPL ยังเป็นตัวชี้วัดถึงปัญหาการปนเปื้อนซึ่งเกี่ยวข้องกับการจัดเก็บในถังใต้ดิน แม้ว่าคุณสมบัติทางเคมีและสถานที่กำจัดขยะในแต่ละสถานที่จะแตกต่างกันออกไป แต่สิ่งสำคัญที่เหมือนกันคือการเคลื่อนตัวของ NAPL

ปัจจัยในการเคลื่อนที่ของ NAPL ในน้ำใต้ดิน

- ก) ปริมาตรของ NAPL ที่ไหลลงสู่ใต้ดิน
- ข) พื้นที่ที่ NAPL แทรกซึม
- ค) ระยะเวลาในการไหลซึมลงสู่ใต้ดิน
- ง) คุณสมบัติของ NAPL
- จ) คุณสมบัติของตัวกลางที่ NAPL แทรกซึมผ่าน
- ฉ) สภาพการไหลของน้ำใต้ดิน น้ำใต้ดินมีการไหลในแนวระนาบ และการไหลขึ้นลงของระดับน้ำใต้ดิน



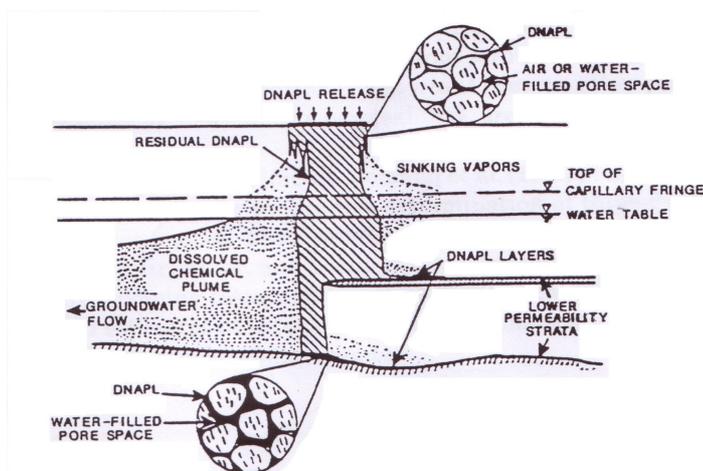
ภาพที่ 13 แผนภาพการแทรกซึมของ LNAPL ในน้ำใต้ดิน

ที่มา: Mercer and Cohen (1990)

จากภาพที่ 13 เป็นแผนภาพตัดขวางแสดงการกระจายตัวของสารเคมีอินทรีย์ในหลายสถานะซึ่งเป็นผลมาจากการรั่วไหลของ LNAPL เมื่อ LNAPL ไหลลงสู่พื้นผิวดินด้วยแรงโน้มถ่วงของโลก ทำให้ LNAPL เคลื่อนตัวลงสู่ใต้ดินไปยัง vadose zone และมีลักษณะแยกตัวจากน้ำได้อย่างชัดเจน เนื่องจากการเคลื่อนตัวของ LNAPL ในแนวตั้งประกอบกับการแพร่กระจายไปในแนวข้างที่เป็นผลมาจากแรงดันในรูเล็ก (capillary force) และช่องว่างระหว่างเม็ดดินที่มีขนาดแตกต่างกัน

กระบวนการในการเคลื่อนที่ของ LNAPL ไปสู่ vadose zone ทำให้มี LNAPL ติดค้างอยู่ในช่องว่างของอนุภาคดิน ซึ่งการที่ LNAPL มาเกาะติดอยู่นี้เป็นผลมาจากแรงตึงผิว นอกจากนี้การเคลื่อนย้ายของ LNAPL ซึ่งเป็นของเหลวที่ไม่สามารถรวมกันกับน้ำได้อาจจะมีการระเหยในรูปของไออยู่รอบ LNAPL ถ้าการรั่วไหลของ LNAPL มีปริมาณมากพอ ท้ายที่สุด LNAPL บางส่วนจะสามารถเข้าไปถึงใน unsaturated zone ได้ และ LNAPL ก็จะกระจายตัวไปในแนวข้างขนานกับขอบของ capillary fringe และอาจจะจมลงไปตามระดับน้ำใต้ดินได้อีกด้วย

การกระจายตัวของ LNAPL ขึ้นกับ ตัวของ LNAPL, น้ำ และความดันอากาศ รวมถึงการกระจายตัวของขนาดของช่องว่างในดิน ดังภาพที่ 13 เป็นชนิดของตัวกลางที่เหมือนกันที่ยอมให้ LNAPL ซึมผ่านได้ แต่ในตัวกลางที่ไม่เหมือนกัน การกระจายตัวของ LNAPL จะซับซ้อนมากกว่านี้



ภาพที่ 14 แผนภาพการแทรกซึมของ DNAPL ในน้ำใต้ดิน

ที่มา: Mercer and Cohen (1990)

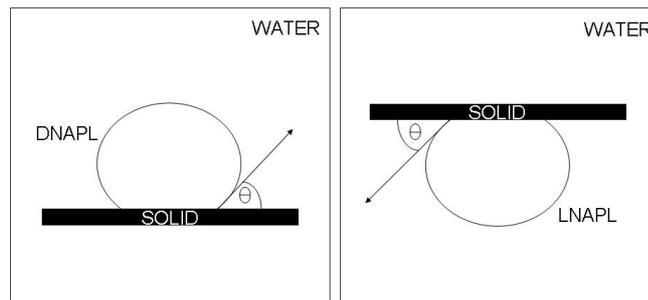
การเคลื่อนตัวของ DNAPL จะเคลื่อนตัวลงไปได้ น้ำและเคลื่อนย้ายภายใต้แรงดันและแรงโน้มถ่วงของโลก ซึ่ง DNAPL ที่พบมักจะกระจายตัวอยู่ในชั้นที่สามารถซึมผ่านได้หรือตามรอยแตก ร้าว เมื่อมี DNAPL ในปริมาณที่มากพอ DNAPL จะมีการเคลื่อนย้ายลงไปตามด้านล่างจนกระทั่งไปสัมผัสกับด้านบนของชั้นที่ไม่สามารถผ่านไปได้ จะถูกกั้นไว้และจะไหลต่อเนื่องไปภายใต้แรงดันและแรงโน้มถ่วงของโลก ดังที่ vadose zone มีปริมาณของ NAPL บางส่วนอยู่ในช่องว่างของอนุภาคดินอยู่ภายใน saturated zone ซึ่ง NAPL ที่ติดค้างอยู่ที่นี่จะทำหน้าที่เป็นแหล่งของสารเคมีที่จะไหลไปตามน้ำใต้ดิน ขึ้นกับความสามารถในการละลายน้ำของสารประกอบอินทรีย์นั้น ดังภาพที่ 14

ใน vadose zone การแทรกซึมของน้ำฝนลงมาถึงดินอาจจะละลายไอของสารอินทรีย์หรือ NAPL ที่เหลือติดค้างอยู่ในช่องว่างในดิน และทำให้เคลื่อนย้ายส่วนประกอบของสารอินทรีย์นั้นไปยังบริเวณ saturated zone ได้

14. ความสามารถเปียกได้ของพื้นผิว (Wettability of surface)

ปัจจัยหนึ่งที่ควบคุมลักษณะการปนเปื้อนคือ ความสามารถเปียกได้ของพื้นผิว ซึ่งหมายถึงความสามารถที่ของเหลวชนิดหนึ่งจะถูกดึงดูดอยู่บนพื้นผิวของแข็ง ความสามารถเปียกได้ของ

พื้นผิวสามารถวัดได้โดย 3 วิธี ได้แก่ การวัดมุมสัมผัส (contact angle), การทดสอบ imbibition rate, การหาความสัมพันธ์เชิงฮีสเทอริซิสระหว่างความดันคาปิลลารีและความอิ่มตัวด้วยน้ำ (Powers and Tamplin, 1995) ซึ่งเป็นวิธีการประเมินความสามารถเปียกได้เบื้องต้นในอุตสาหกรรมปิโตรเคมี



ภาพที่ 15 มุมสัมผัสของ NAPL บนพื้นผิวของแข็งซึ่งล้อมรอบด้วยน้ำ

ภาพที่ 15 แสดงมุมสัมผัสที่เกิดจากของเหลว 2 ชนิด กับพื้นผิวของแข็งที่เป็นผลมาจากความสมดุลที่ได้รับจากแรงตึงผิว สภาพของความสมดุลนี้ให้นิยามโดยสมการของยัง (Young's equation) (Adamson, 1982)

$$\gamma^{so} - \gamma^{sw} = \gamma^{ow} \cos \theta \quad (8)$$

เมื่อ γ =แรงตึงผิว

และ s, o, w คือ ของแข็ง, สารอินทรีย์ และน้ำ ตามลำดับ

แรงตึงผิวระหว่างของแข็งและของเหลวไม่สามารถที่จะวัดได้โดยตรง จึงเป็นการยากที่จะประยุกต์ใช้สมการนี้

ในตัวอย่างพูน การไหลของคาปิลลารีถูกใช้เป็นตัวชี้วัดความสามารถเปียกได้ ในระบบนี้ โครงสร้างของช่องว่างระหว่างตัวกลางและธรรมชาติของคาปิลลารีระหว่างของเหลวกับของเหลว ช่วยอธิบายการเข้าไปในช่องว่างระหว่างตัวกลางนั้นได้ ความสัมพันธ์นี้สามารถอธิบายได้โดยสมการของลาปลาซ (Laplace's equation) (Adamson, 1982)

$$P_c^{ow} = P^o - P^w = \frac{2\gamma^{ow} \cos \theta}{r} \quad (9)$$

เมื่อ	P_c	= ความดันคาปิลลารี
	P	= ความดันของของเหลว (o และ w คือ สารอินทรีย์ และน้ำตามลำดับ)
	r	= รัศมีของช่องว่างระหว่างตัวกลาง

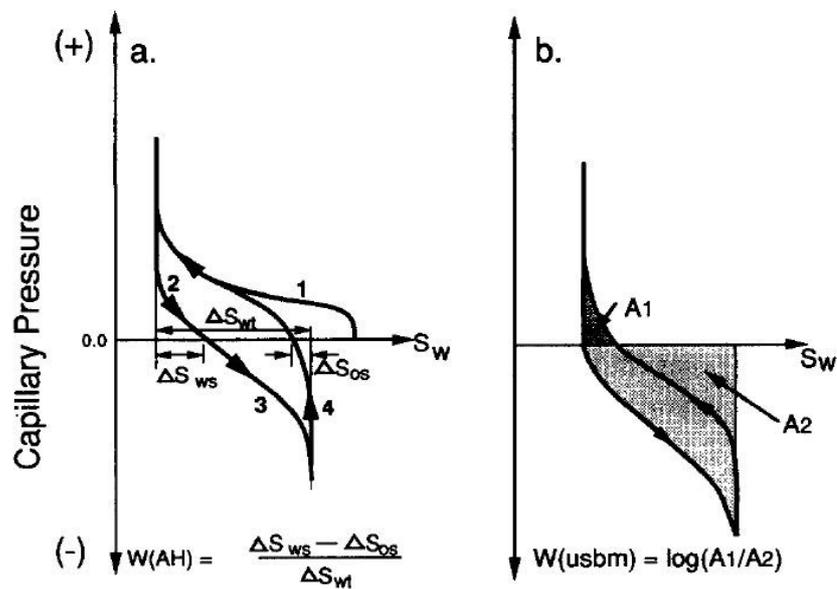
จากสมการของลาปลาซแสดงให้เห็นว่า แรงตึงผิวและมุมสัมผัสเป็นตัวชี้วัดธรรมชาติของคาปิลลารีของระบบ สมการของลาปลาซได้อธิบายว่า การเปียกของของเหลวจะเป็นการซึมเข้าไปตามธรรมชาติในช่องว่างเล็กๆระหว่างตัวกลางด้วยความดันคาปิลลารี ที่เป็นส่วนกลับระหว่างรัศมีของช่องว่างระหว่างตัวกลาง ความดันคาปิลลารีจะน้อยลง หรือเป็นลบ ถ้ามีการเติมน้ำเข้าไป

สำหรับโครงสร้างที่ซับซ้อนของทราย กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความดันคาปิลลารีและความอิ่มตัวด้วยน้ำถูกใช้แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันและปริมาณของเหลวเข้าไปในช่องว่างระหว่างตัวกลาง ความอิ่มตัวด้วยน้ำในแกนราบคืออัตราส่วนของปริมาตรของน้ำที่เติมเข้าไปในช่องว่างระหว่างตัวกลางต่อปริมาตรช่องว่างระหว่างตัวกลางทั้งหมด โครงสร้างที่ซับซ้อนของช่องว่างระหว่างตัวกลางทำให้มีผลต่อความไม่ซ้กันทับกันของกราฟ ความดันที่สูงกว่าจะทำให้เกิดการระบายของเหลวออกจากช่องว่างระหว่างตัวกลางมากกว่าจะเติมของเหลวเข้าไป (Dullien, 1979)

มุมสัมผัสที่เพิ่มขึ้นทำให้ความอิ่มตัวด้วยน้ำลดลง การเปลี่ยนแปลงนี้อธิบายได้ด้วยความสัมพันธ์ระหว่าง แรงตึงผิว และมุมสัมผัสจากสมการของลาปลาซ มุมสัมผัสช่วยอธิบายพฤติกรรมของความไม่ซ้กันทับกันของกราฟความดันคาปิลลารี การระบายน้ำมีความสัมพันธ์กับการลดลงของมุมสัมผัส ขณะที่การเติมน้ำทำให้มุมสัมผัสเพิ่มขึ้น (Dullien, 1979)

ผลประโยชน์ของความสามารถเปียกได้ทั้งจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความดันคาปิลลารีและความอิ่มตัวด้วยน้ำ และการทดสอบ imbibition rate ด้วยการเปรียบเทียบความอิ่มตัวด้วยน้ำและเวลาถูกนำมาใช้เพื่อประเมินลักษณะความสามารถเปียกได้ของระบบ (Anderson, 1986; Morrow, 1990) วิธีเหล่านี้เป็นพื้นฐานทั่วไปของความจริงที่ว่า ของเหลวจะที่เปียกเกิดการเติมของเหลวเข้าไปในตัวกลางพรุนเอง ขณะที่แรงจำเป็นสำหรับการเติมของเหลวที่ไม่เปียก สองวิธีนี้ถูกพัฒนาเพื่อใช้กราฟความดันคาปิลลารีและความอิ่มตัวด้วยน้ำ เพื่อบอกระดับการเปียกได้ของ

พื้นผิว วิธี USBM (U.S. Bureau of Mines) (Donaldson et al., 1969) เป็นพื้นฐานของหลักเทอร์โมไดนามิกที่ว่า มีความต้องการงานที่ใช้แทนที่สิ่งที่ไม่เปียกด้วยสิ่งเปียกน้อยกว่างานที่ใช้แทนที่สิ่งเปียกด้วยสิ่งที่ไม่เปียก (Anderson, 1986) Donaldson et al., 1969 แสดงให้เห็นว่างานที่ต้องการสำหรับการแทนที่ที่มีความเหมาะสมกับพื้นที่ของกราฟความดันคาปิลลารีและเส้น $P_c = 0$ ภาพที่ 16 แสดงการคำนวณดัชนี USBM ดัชนีนี้จะมามีค่าเป็นบวกเมื่อตัวกลางมีลักษณะเปียกน้ำ, มีค่าเป็นลบเมื่อตัวกลางมีลักษณะเปียกด้วยสารอินทรีย์ และเข้าใกล้ศูนย์เมื่อตัวกลางมีลักษณะเปียกแบบตรงกลาง



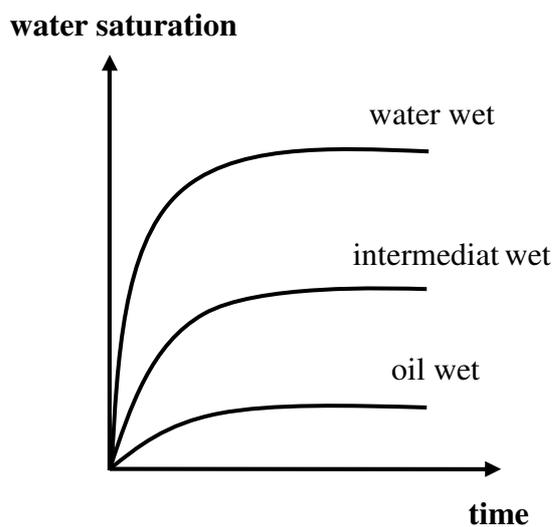
ภาพที่ 16 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความดันคาปิลลารีและความอิ่มตัวด้วยน้ำ และสมการสำหรับชี้วัดความสามารถเปียกได้: a) the Amott – Harvey (AH) method; และ b) USBM method

รูปแบบของกราฟประกอบด้วย 1 = ระบายน้ำออกครั้งที่ 1; 2 = น้ำเข้าตามธรรมชาติ; 3 = เติมน้ำเข้าด้วยแรงดัน; 4 = ระบายน้ำออกครั้งที่ 2

ที่มา: Power and Tamblin (1995)

กราฟความดันคาปิลลารีได้เกิดมาจากชุดของความสมดุลของการวัดความดันคาปิลลารี ความหมายของบทสรุปลักษณะการเปียกของตัวกลางพรุนคือการวัดอัตราการเติมน้ำที่เกิดขึ้นเองที่ความดันคาปิลลารีหนึ่ง (Anderson, 1986) ส่วนวิธีวัดอัตราการเติมน้ำด้วยการเปรียบเทียบความ

อิมตัวด้วยน้ำและเวลาเป็นวิธีที่เร็วและชี้วัดลักษณะของความสัมพันธ์ความสามารถเปียกได้ ถ้า น้ำปริมาณมากถูกเติมเข้าไปอย่างรวดเร็วในตัวอย่าง ตัวอย่างนั้นจะมีลักษณะเปียกน้ำ แสดงดัง ภาพที่ 17 แต่ถ้าปริมาณน้ำถูกเติมเข้าไปอย่างช้าๆ ตัวอย่างนั้นจะมีลักษณะเปียกสารอินทรีย์



ภาพที่ 17 แสดงการประเมินการทดสอบ imbibition rate

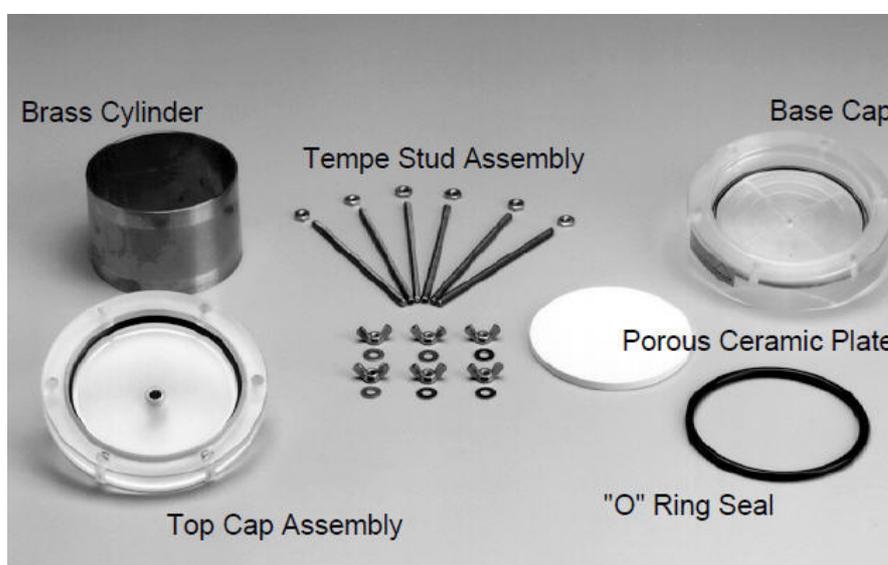
อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

อุปกรณ์ทดลองแบ่งออกเป็น 3 ส่วน

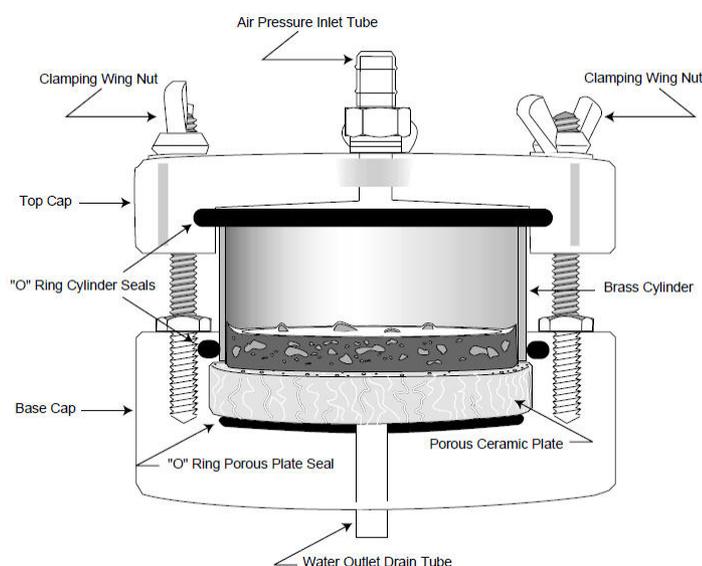
อุปกรณ์และสารเคมีที่ใช้ในการทดสอบ imbibition rate

1. Tempe[®] Cell สำหรับการทดสอบ imbibition rate (Soilmoisture Equipment Corp., U.S.A.) ภาพที่ 18 แสดงชิ้นส่วนอุปกรณ์ Tempe[®] Cell โดยแบ่งออกเป็น 3 ส่วน 1. ฝาปิดด้านบนและด้านล่างทำจากวัสดุ plexiglass มีแหวนยางรูปตัว “O” อยู่ด้านในทำหน้าที่ป้องกันการรั่วซึม 2. ทรงกระบอกทองเหลืองทำหน้าที่บรรจุตัวกลาง 3. แผ่นเซรามิก ขนาด 0.5 บาร์ ภาพที่ 19 แสดงอุปกรณ์ Tempe[®] Cell ที่ประกอบแล้ว



ภาพที่ 18 ชิ้นส่วนอุปกรณ์ Tempe[®] Cell

ที่มา: Soilmoisture Equipment Corp. (n.d.)



ภาพที่ 19 ภาพตัด Tempe[®] Cell ที่ประกอบแล้ว

ที่มา: Soilmoisture Equipment Corp. (n.d.)

2. อุปกรณ์ระบบท่อ ได้แก่ ท่อ PTFE ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.635 cm, ท่อ Tygon ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางด้านใน 0.48 cm, 3 – way ball valve ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.635 cm Swagelok รุ่น ss-43Xs4
3. เครื่องชั่งน้ำหนัก ความละเอียด 0.01 กรัม
4. ขวดแก้ว (vial) ขนาด 115 มิลลิลิตร พร้อมจุกยาง และฝาปิดอะลูมิเนียม
5. นาฬิกาจับเวลาระบบดิจิทัล
6. น้ำกลั่นปราศจากไอออน (deionized distilled water) มี pH เฉลี่ยเท่ากับ 6.82
7. สารโทลูอิน
8. สารไตรคลอโรเอทิลีน
9. ทรายชนิด Ottawa sand (Fisher Scientific[®]) ที่สะอาดและมีปริมาณสารอินทรีย์ต่ำ เม็ดทรายมีขนาดอยู่ในช่วงตะแกรงเบอร์ 20 – 30 (เส้นผ่านศูนย์กลาง 0.58 – 0.84 มิลลิเมตร) ค่าความถ่วงจำเพาะ 2.65 มีมวลโมเลกุลเท่ากับ 60.08
10. ตู้อบไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส
11. ปุ่มดูดอากาศ สายยางดูดอากาศ และภาชนะทนแรงดัน สำหรับไล่อากาศออกจากแผ่นเซรามิก

อุปกรณ์และสารเคมีที่ใช้ในการหาความสัมพันธ์เชิงฮีสเทอรีซิสระหว่างความดันคาปิลลารี และความอืดตัวด้วยน้ำ

1. อุปกรณ์ที่ดัดแปลงมาจาก Tempe[®] Cell ผลิตจาก stainless steel โดยแบ่งออกเป็น 3 ส่วน
 1. ฝาปิดด้านบนและด้านล่างทำจากวัสดุ stainless steel มีแหวนยางรูปตัว “O” อยู่ด้านในทำหน้าที่ป้องกันการรั่วซึม
 2. ทรงกระบอก stainless steel ทำหน้าที่บรรจุตัวกลาง แสดงดังภาพที่ 20



ภาพที่ 20 อุปกรณ์ที่ดัดแปลงมาจาก Tempe[®] Cell ผลิตจาก stainless steel

2. อุปกรณ์ระบบท่อ ได้แก่ ท่อ PTFE ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.635 cm, ท่อ Tygon ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางด้านใน 0.48 cm, 3 - way ball valve ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.635 cm Swagelok รุ่น ss-43Xs4
3. เครื่องชั่งน้ำหนัก ความละเอียด 0.01 กรัม
4. กระบอกตวง ขนาด 100 มิลลิลิตร
5. กระดาษกรอง ขนาด 8 ไมโครเมตร
6. PTFE membrane ขนาด 0.45 ไมโครเมตร
7. น้ำกลั่นปราศจากไอออน (deionized distilled water) มี pH เฉลี่ยเท่ากับ 6.82
8. สารโทลูอิน
9. สารไตรคลอโรเอทธีลีน

10. ทรายชนิด Ottawa sand (Fisher Scientific[®]) ที่สะอาดและมีปริมาณสารอินทรีย์ต่ำ เม็ดทรายมีขนาดอยู่ในช่วงตะแกรงเบอร์ 20 – 30 (เส้นผ่านศูนย์กลาง 0.58 – 0.84 มิลลิเมตร) ค่าความถ่วงจำเพาะ 2.65 มีมวลโมเลกุลเท่ากับ 60.08

11. ตลับเมตร อ่าน ได้ละเอียด 0.05 มิลลิเมตร

อุปกรณ์และสารเคมีที่ใช้ในการหาความซึมผ่านได้สัมพัทธ์

1. อุปกรณ์ที่ดัดแปลงมาจาก Tempe[®] Cell ผลิตจาก stainless steel โดยแบ่งออกเป็น 3 ส่วน
1. ฝาปิดด้านบนและด้านล่างทำจากวัสดุ stainless steel มีแหวนยางรูปตัว “O” อยู่ด้านในทำหน้าที่ป้องกันการรั่วซึม 2. ทรงกระบอก stainless steel ทำหน้าที่บรรจุตัวกลาง

2. บิวเรต

3. PTFE membrane ขนาด 0.45 ไมโครเมตร

4. นาฬิกาจับเวลาระบบดิจิตอล

5. น้ำกลั่นปราศจากไอออน(deionized distilled water) มี pH เฉลี่ยเท่ากับ 6.82

6. สารโทลูอิน

7. สารไตรคลอโรเอทธีลีน

8. ทรายชนิด Ottawa sand (Fisher Scientific[®]) ที่สะอาดและมีปริมาณสารอินทรีย์ต่ำ เม็ดทรายมีขนาดอยู่ในช่วงตะแกรงเบอร์ 20 – 30 (เส้นผ่านศูนย์กลาง 0.58 – 0.84 มิลลิเมตร) ค่าความถ่วงจำเพาะ 2.65 มีมวลโมเลกุลเท่ากับ 60.08

9. ตู้อบไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส

วิธีการ

วิธีการทดลองแบ่งออกเป็น 3 ส่วน

วิธีการทดลองส่วนที่ 1 การทดสอบ imbibition rate

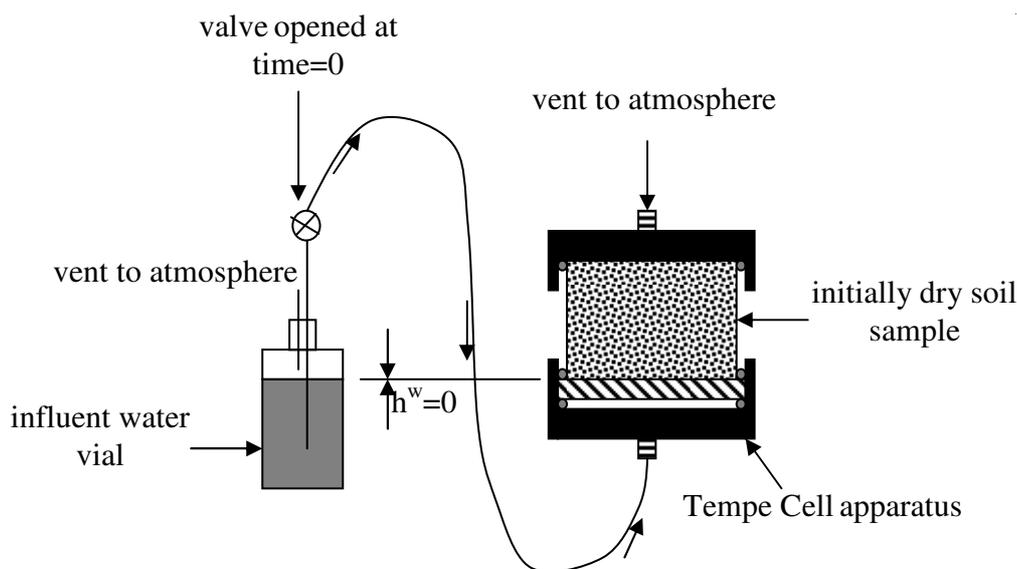
การทดลองนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อ: หาค่าความสามารถเปียกได้ของพื้นผิวด้วยวิธีการที่รวดเร็วเชิงเปรียบเทียบด้วยวิธีการวัดความอึมตัวด้วยน้ำเทียบกับเวลา

การทดลองนี้ได้พัฒนามาจาก Powers and Tamblin, 1995 โดยการจัดเตรียมตัวอย่างตัวกลางปนเปื้อนนั้น จะใช้ Ottawa sand เป็นตัวกลาง และทำให้ตัวกลางได้รับการปนเปื้อนเสมือนการปนเปื้อนใต้ผิวดิน ซึ่งส่วนมากในระบบใต้ผิวดินตัวกลางจะมีความชื้นอยู่ก่อนที่จะมีการปนเปื้อน ดังนั้นพื้นผิวของตัวกลางจึงต้องถูกทำให้มีความชื้นก่อนที่จะได้รับสารปนเปื้อน โดยนำตัวกลางบรรจุลงในขวดทึบแสง แล้วเติมน้ำ 15% (ปริมาตรน้ำ/ปริมาตรช่องว่าง) จากนั้นแล้วจึงเติม NAPL โดยการฉีดให้ค่อยๆ ไหลขึ้นจากด้านล่างขึ้นด้านบน แล้วปิดขวดให้แน่นบ่มทิ้งไว้เป็นเวลา 14-60 วัน เพื่อให้เกิดการดูดซับระหว่างตัวกลางกับสารปนเปื้อน โดยช่วงเวลา 14-60 วันนี้เป็นช่วงเวลาที่ NAPL มีการเปลี่ยนแปลงมุมสัมผัสกับผิวตัวกลางน้อยมาก เมื่อครบกำหนดแล้วนำตัวกลางมาล้างน้ำเพื่อกำจัด NAPL ส่วนเกินออก แล้วนำตัวกลางทิ้งไว้ให้แห้งที่อุณหภูมิห้องจนตัวกลางมีน้ำหนักใกล้เคียงกับน้ำหนักก่อนการปนเปื้อน การทดลองแต่ละแบบแสดงดังตารางที่ 1

ตารางที่ 3 การทดลองเพื่อศึกษาการปนเปื้อนแบบต่างๆ

ตัวอย่างที่	ลักษณะการปนเปื้อน
1	ไม่มีการปนเปื้อน
2	ความชื้น 15% ปนเปื้อน LNAPL
3	ความชื้น 15% ปนเปื้อน DNAPL
4	ความชื้น 15% ปนเปื้อนครั้งที่1 ด้วย LNAPL ครั้งที่2 ด้วย DNAPL
5	ความชื้น 15% ปนเปื้อนครั้งที่1 ด้วย DNAPL ครั้งที่2 ด้วย LNAPL

การติดตั้งอุปกรณ์การทดสอบ imbibition rate นั้นจะทำการติดตั้ง Tempe[®] Cell เข้ากับ ขวดบรรจุน้ำ ที่มีระดับของผิวน้ำอยู่ในระดับเดียวกับผิวนของแผ่นเซรามิกของ Tempe[®] Cell (ก่อนที่จะบรรจุแผ่นเซรามิกลงไปนั้นจะต้องทำให้แผ่นเซรามิกอิ่มตัวด้วยน้ำด้วยอุปกรณ์ดูดอากาศ) โดยมีวาล์วคอยควบคุมการเข้า - ออกของน้ำ แสดงดังภาพที่ 21



ภาพที่ 21 รูปแบบการติดตั้งอุปกรณ์การทดสอบ imbibition rate

การทดสอบ imbibition rate จะทดสอบในสภาวะที่ประกอบด้วยอากาศ และน้ำ ภาพที่ 22 ตัวกลางที่แห้งจะถูกบรรจุลงกระบอกเก็บตัวอย่างดิน ซึ่งวางอยู่บนแผ่นเซรามิก ใน Tempe[®] Cell ทำการชั่งน้ำหนักขวดบรรจุน้ำในขณะที่ปิดวาล์วก่อนเริ่มการทดลอง เมื่อเริ่มทดลองให้เปิดวาล์วแล้ว เริ่มจับเวลาทันที จากนั้นทำการชั่งน้ำหนักขวดบรรจุน้ำอย่างสม่ำเสมอจนครบ 300 นาที มวลของ น้ำที่หายไปจากขวดบรรจุน้ำจะถูกนำมาใช้คำนวณค่าความอิ่มตัวด้วยน้ำในตัวอย่างทรายเทียบกับ เวลา โดยการทดลองนี้จะทำการทดลองทั้งหมด 3 ครั้ง

สำหรับการคำนวณในการทดลองนี้ อธิบายได้ดังต่อไปนี้

ความอิ่มตัวด้วยน้ำ (S_w) คำนวณจากสมการที่ 6
$$S_r = \frac{V_w}{V_v}$$

$$\text{โดย } V_w = \frac{(\text{มวลของน้ำที่เวลาใดๆ} - \text{มวลของน้ำที่เวลาเริ่มต้น})}{\text{ความหนาแน่นน้ำ}}$$

$$V_v = \text{ปริมาตรของช่องว่างในตัวกลาง } 23.794 \text{ cm}^3$$



ภาพที่ 22 แสดงชุดการทดสอบ imbibition rate

1. การจัดเตรียมตัวกลางที่ไม่ปนเปื้อน

ตัวกลางที่ใช้ในการทดลอง เป็นทราย Ottawa sand ที่ทราบคุณลักษณะทางเคมี และฟิสิกส์ (Ottawa Sand, SiO_2) ที่มีลักษณะเป็นผงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.58 – 0.84 มิลลิเมตร สีเทาอ่อน ถึงเทาเข้ม ไม่สามารถละลายได้ ค่าความถ่วงจำเพาะ 2.65 มีมวลโมเลกุลเท่ากับ 60.08 (Fisher Scientific) นำมาผ่านการอบไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 16 ชั่วโมง

2. การจัดเตรียมตัวกลางที่มีการปนเปื้อน LNAPL

ตัวกลางที่ใช้ในการทดลอง เป็นทราย Ottawa sand ที่ทราบคุณลักษณะทางเคมี และฟิสิกส์ นำมาผ่านการอบไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 16 ชั่วโมง ซึ่งนำหนักตัวกลาง

แล้วบรรจุลงไปในขวดทึบแสง เติมน้ำ 15% (ปริมาตรน้ำ/ปริมาตรช่องว่าง) จากนั้นแล้วจึงเติม LNAPL โดยให้สารโทลูอินเป็นตัวแทนของ LNAPL โดยฉีดให้ค่อยๆไหลขึ้นจากด้านล่างขึ้นด้านบน แล้วปิดขวดให้แน่นบ่มทิ้งไว้เป็นเวลา 14-60 วัน เมื่อครบกำหนดแล้วนำตัวกลางมาล้างน้ำเพื่อกำจัดโทลูอินส่วนเกินออก แล้วนำตัวกลางทิ้งไว้ให้แห้งที่อุณหภูมิห้องจนตัวกลางมีน้ำหนักไม่เกิน 15 % ของตัวกลางก่อนการปนเปื้อน

3. การจัดเตรียมตัวกลางที่มีการปนเปื้อน DNAPL

ตัวกลางที่ใช้ในการทดลอง เป็นทราย Ottawa sand ที่ทราบคุณลักษณะทางเคมี และฟิสิกส์ นำมาผ่านการอบไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 16 ชั่วโมง ซึ่งน้ำหนักตัวกลางแล้วบรรจุลงไปในขวดทึบแสง เติมน้ำ 15% (ปริมาตรน้ำ/ปริมาตรช่องว่าง) จากนั้นแล้วจึงเติม DNAPL โดยให้สารไตรคลอโรเอทิลีนเป็นตัวแทนของ DNAPL โดยฉีดให้ค่อยๆไหลขึ้นจากด้านล่างขึ้นด้านบน แล้วปิดขวดให้แน่นบ่มทิ้งไว้เป็นเวลา 14-60 วัน เมื่อครบกำหนดแล้วนำตัวกลางมาล้างน้ำเพื่อกำจัดไตรคลอโรเอทิลีนส่วนเกินออก แล้วนำตัวกลางทิ้งไว้ให้แห้งที่อุณหภูมิห้องจนตัวกลางมีน้ำหนักไม่เกิน 15 % ของตัวกลางก่อนการปนเปื้อน

4. การจัดเตรียมตัวกลางที่มีการปนเปื้อนครั้งที่ 1 ด้วย LNAPL และครั้งที่ 2 ด้วย DNAPL

ตัวกลางที่ใช้ในการทดลอง เป็นทราย Ottawa sand ที่ทราบคุณลักษณะทางเคมี และฟิสิกส์ นำมาผ่านการอบไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 16 ชั่วโมง ซึ่งน้ำหนักตัวกลางแล้วบรรจุลงไปในขวดทึบแสง เติมน้ำ 15% (ปริมาตรน้ำ/ปริมาตรช่องว่าง) จากนั้นแล้วจึงเติม LNAPL โดยให้สารโทลูอินเป็นตัวแทนของ LNAPL โดยฉีดให้ค่อยๆไหลขึ้นจากด้านล่างขึ้นด้านบน แล้วปิดขวดให้แน่นบ่มทิ้งไว้เป็นเวลา 14-60 วัน เมื่อครบกำหนดแล้วนำตัวกลางมาล้างน้ำเพื่อกำจัดโทลูอินส่วนเกินออก แล้วนำตัวกลางทิ้งไว้ให้แห้งที่อุณหภูมิห้องจนตัวกลางมีน้ำหนักไม่เกิน 15 % ของตัวกลางก่อนการปนเปื้อน หลังจากนั้นนำตัวกลางที่มีการปนเปื้อนครั้งที่ 1 ด้วย LNAPL มาทำการปนเปื้อนครั้งที่ 2 ด้วย DNAPL โดยนำตัวกลางไปชั่งน้ำหนัก แล้วบรรจุลงไปในขวดทึบแสง เติมน้ำ 15% (ปริมาตรน้ำ/ปริมาตรช่องว่าง) จากนั้นแล้วจึงเติม DNAPL โดยให้สารไตรคลอโรเอทิลีนเป็นตัวแทนของ DNAPL โดยฉีดให้ค่อยๆไหลขึ้นจากด้านล่างขึ้นด้านบน แล้วปิดขวดให้แน่นบ่มทิ้งไว้เป็นเวลา 14-60 วัน เมื่อครบกำหนดแล้วนำตัวกลางมาล้างน้ำเพื่อกำจัดไตร

คลอโรเอทีลินส่วนเกินออก แล้วนำตัวกลางทิ้งไว้ให้แห้งที่อุณหภูมิห้องจนตัวกลางมีน้ำหนักไม่เกิน 15 % ของตัวกลางก่อนการปนเปื้อน

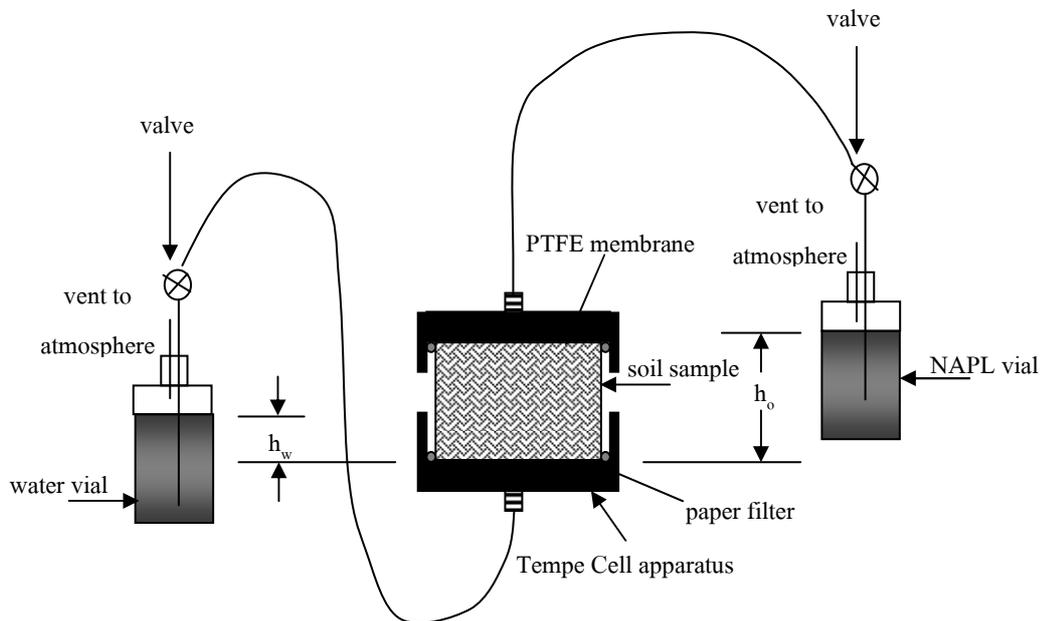
5. การจัดเตรียมตัวกลางที่มีการปนเปื้อนครั้งที่ 1 ด้วย DNAPL และครั้งที่ 2 ด้วย LNAPL

ตัวกลางที่ใช้ในการทดลอง เป็นทราย Ottawa sand ที่ทราบคุณลักษณะทางเคมี และฟิสิกส์ นำมาผ่านการอบไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 16 ชั่วโมง ซึ่งน้ำหนักตัวกลางแล้วบรรจุลงไปในขวดทึบแสง เติมน้ำ 15% (ปริมาตรน้ำ/ปริมาตรช่องว่าง) จากนั้นแล้วจึงเติม DNAPL โดยให้สารไตรคลอโรเอทีลินเป็นตัวแทนของ DNAPL โดยฉีดให้ค่อยๆ ไหลขึ้นจากด้านล่างขึ้นด้านบน แล้วปิดขวดให้แน่นบ่มทิ้งไว้เป็นเวลา 14-60 วัน เมื่อครบกำหนดแล้วนำตัวกลางมาล้างน้ำเพื่อกำจัดไตรคลอโรเอทีลินส่วนเกินออก แล้วนำตัวกลางทิ้งไว้ให้แห้งที่อุณหภูมิห้องจนตัวกลางมีน้ำหนักไม่เกิน 15 % ของตัวกลางก่อนการปนเปื้อน หลังจากนั้นนำตัวกลางที่มีการปนเปื้อนครั้งที่ 1 ด้วย DNAPL มาทำการปนเปื้อนครั้งที่ 2 ด้วย LNAPL โดยนำตัวกลางไปซึ่งน้ำหนัก แล้วบรรจุลงไปในขวดทึบแสง เติมน้ำ 15% (ปริมาตรน้ำ/ปริมาตรช่องว่าง) จากนั้นแล้วจึงเติม LNAPL โดยให้สารโทลูอินเป็นตัวแทนของ LNAPL โดยฉีดให้ค่อยๆ ไหลขึ้นจากด้านล่างขึ้นด้านบน แล้วปิดขวดให้แน่นบ่มทิ้งไว้เป็นเวลา 14-60 วัน เมื่อครบกำหนดแล้วนำตัวกลางมาล้างน้ำเพื่อกำจัดโทลูอินส่วนเกินออก แล้วนำตัวกลางทิ้งไว้ให้แห้งที่อุณหภูมิห้องจนตัวกลางมีน้ำหนักไม่เกิน 15 % ของตัวกลางก่อนการปนเปื้อน

วิธีการทดลองส่วนที่ 2 การหาความสัมพันธ์เชิงฮิสเทอรีซิสระหว่างความดันคาปิลลารี และความอึมตัวด้วยน้ำ

การทดลองนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อ: หาความสามารถเปียกได้ของพื้นผิว เจึงเปรียบเทียบกับ การหาความสัมพันธ์ระหว่างความดันคาปิลลารีกับความอึมตัวด้วยน้ำ

การทดลองนี้ได้พัฒนามาจาก Powers and Tamblin, 1995 โดยการประดิษฐ์อุปกรณ์ที่พัฒนามาจากอุปกรณ์ Tempe[®] Cell ด้วยวัสดุ stainless steel มีกระดาดกรองอยู่ส่วนล่างของเซลล์ เพื่อใช้เป็นทางผ่านของน้ำ ขณะที่ด้านบนมี PTFE membrane อยู่เพื่อให้เป็นทางผ่านของ NAPL แสดงดังภาพที่ 23 การทดลองนี้จะได้กราฟความดันคาปิลลารีเปรียบเทียบกับความอึมตัวด้วยน้ำ เพื่อใช้ในการหาดัชนีชี้วัดความสามารถเปียกได้ของตัวกลาง



ภาพที่ 23 อุปกรณ์หาความสัมพันธ์ระหว่างความดันคาปิลลารี และความอิ่มตัวด้วยน้ำ

ขั้นตอนการทดลองโดยทั่วไปได้มีการพัฒนามาจาก Wilson et al. (1990) โดยการวัดมวลที่เข้าแทนที่ การทดลองนั้นเริ่มต้นจากการนำตัวกลางที่แห้งมาบรรจุลงในเซลล์แล้วเติมน้ำเข้าไปในตัวกลางให้อิ่มตัวด้วยน้ำ 100% จากนั้นต่ออุปกรณ์ท่อเข้าที่ส่วนบนและส่วนล่างของเซลล์ โดยส่วนบนนั้นต่อท่อเข้ากับภาชนะบรรจุ NAPL ส่วนท่อที่ต่อเข้าทางด้านล่างนั้นต่อเข้ากับภาชนะบรรจุ น้ำ ความดันคาปิลลารีถูกควบคุมด้วยการขยับขึ้น – ลงของภาชนะบรรจุ น้ำและภาชนะบรรจุ NAPL ความอิ่มตัวด้วยน้ำจะถูกวัดจากการเปลี่ยนแปลงของมวลของน้ำที่อยู่ในภาชนะบรรจุ น้ำ เพื่อให้มั่นใจว่าไม่มีการสูญเสียมวลของน้ำ และ NAPL ออกสู่บรรยากาศ จึงได้จัดทำภาชนะที่มีลักษณะเช่นเดียวกับภาชนะที่ใช้บรรจุของเหลวในการทดลองส่วนนี้อีกชุด เพื่อควบคุมการสูญเสียจากการระเหยของของเหลวในภาชนะที่ต่อเข้ากับเซลล์วัดความดันคาปิลลารี แสดงดังภาพที่ 24



ภาพที่ 24 แสดงการทดลองหาความสัมพันธ์เชิงฮีสเทอรีซิสระหว่างความดันคาปิลลารีและความอิมตัวด้วยน้ำ

สำหรับการคำนวณในการทดลองนี้ อธิบายได้ดังต่อไปนี้

ความดันคาปิลลารี คำนวณจากสมการที่ (9) $P_c^{ow} = P^o - P^w$

โดย
$$P_c = \frac{(h_o \rho_o - h_w \rho_w)g}{\rho_w g}$$

$$P_c = h_o(\rho_o / \rho_w) - h_w$$

$$P_c = h_o \gamma_o - h_w$$

เมื่อ γ = ความตึงจำเพาะของของเหลว

ความอิมตัวด้วยน้ำ (S_w) คำนวณจากสมการที่ 6 $S_r = \frac{V_w}{V_v}$

$$\text{โดย } V_w = \frac{(\text{มวลของน้ำที่ขณะทดลอง} - \text{มวลของน้ำที่เริ่มต้นทดลอง})}{\text{ความหนาแน่นน้ำ}}$$

$$V_v = \text{ปริมาตรของช่องว่างในตัวกลาง } 23.794 \text{ cm}^3$$

1. การหาความสัมพันธ์เชิงฮีสเทอรีซิสระหว่างความดันคาปิลลารี และความอิ่มตัวด้วยน้ำ ด้วยระบบ LNAPL – น้ำ

อุปกรณ์วัดความดันคาปิลลารีที่บรรจุตัวกลางอิ่มตัวด้วยน้ำ 100% จะถูกเชื่อมต่อเข้ากับภาชนะบรรจุน้ำทางส่วนล่างของเซลล์ ส่วนทางด้านบนนั้นถูกต่อเชื่อมกับภาชนะบรรจุ LNAPL ซึ่งใช้โทลูอินเป็นตัวแทน ในการทดลองนี้จะแบ่งการทดลองออกเป็น 4 ส่วน เริ่มจาก ระบายน้ำออกครั้งที่ 1 โดยการปรับระดับความสูงของขวดบรรจุ LNAPL และขวดบรรจุน้ำ จนค่าความดันคาปิลลารีสูงขึ้นและไม่สามารถระบายน้ำออกได้ จากนั้นให้น้ำเข้าโดยการปรับระดับความสูงของขวดบรรจุ LNAPL และขวดบรรจุน้ำ จนความดันมีค่าต่ำลงและน้ำไม่สามารถเข้าไปในเซลล์ได้ และสุดท้ายระบายน้ำออกอีกครั้งเป็นครั้งที่ 2 โดยการปรับระดับความสูงของขวดบรรจุ LNAPL และขวดบรรจุน้ำ การนำน้ำเข้าไปในเซลล์ และระบายออกจากเซลล์โดยการปรับระดับความสูงของขวดบรรจุ LNAPL และขวดบรรจุน้ำ นั้นอาศัยแรงดันที่เกิดจากการขยับขึ้น – ลงของภาชนะบรรจุของเหลวทั้ง 2 ชนิดอย่างช้าๆ จนระดับของของเหลวในภาชนะหยุดนิ่ง แล้วจึงวัดระดับความสูงของของเหลวทั้งสองเพื่อนำมาคำนวณหาความดันคาปิลลารี และนำภาชนะบรรจุของเหลวมาชั่งน้ำหนักเพื่อใช้มวลของของเหลวคำนวณหาระดับความอิ่มตัวด้วยน้ำ (ปริมาตรของเหลว/ปริมาตรช่องว่าง) สุดท้ายนำผลการทดลองที่ได้ไปสร้างกราฟความสัมพันธ์เชิงฮีสเทอรีซิสระหว่างความดันคาปิลลารี และความอิ่มตัวด้วยน้ำ ด้วยระบบ LNAPL – น้ำ เพื่อคำนวณหาพื้นที่ใต้กราฟ แล้วนำมาวิเคราะห์หาค่าดัชนีวัดความสามารถเปียกได้แบบ USBM

2. การหาความสัมพันธ์เชิงฮีสเทอรีซิสระหว่างความดันคาปิลลารี และความอิ่มตัวด้วยน้ำ ด้วยระบบ DNAPL – น้ำ

อุปกรณ์วัดความดันคาปิลลารีที่บรรจุตัวกลางอิ่มตัวด้วยน้ำ 100% จะถูกเชื่อมต่อเข้ากับภาชนะบรรจุน้ำทางส่วนล่างของเซลล์ ส่วนทางด้านบนนั้นถูกต่อเชื่อมกับภาชนะบรรจุ DNAPL ซึ่งใช้ไตรคลอโรเอทิลีนเป็นตัวแทน ในการทดลองนี้จะแบ่งการทดลองออกเป็น 4 ส่วน เริ่มจาก ระบายน้ำออกครั้งที่ 1 โดยการปรับระดับความสูงของขวดบรรจุ DNAPL และขวดบรรจุน้ำ จนค่า

ความดันคาปิลลารีสูงขึ้นและไม่สามารถระบายออกได้ จากนั้นให้น้ำเข้าโดยการปรับระดับความสูงของขดบรรจุ DNAPL และขดบรรจุ น้ำ จนความดันมีค่าต่ำลงและน้ำไม่สามารถเข้าไปในเซลล์ได้ และสุดท้ายระบายน้ำออกอีกครั้งเป็นครั้งที่ 2 โดยการปรับระดับความสูงของขดบรรจุ DNAPL และขดบรรจุ น้ำ การนำน้ำเข้าไปในเซลล์ และระบายออกจากเซลล์โดยการปรับระดับความสูงของขดบรรจุ DNAPL และขดบรรจุ น้ำ นั้นอาศัยแรงดันที่เกิดจากการขยับขึ้น – ลงของภาชนะบรรจุของเหลวทั้ง 2 ชนิดอย่างช้าๆ จนระดับของของเหลวในภาชนะหยุดนิ่ง แล้วจึงวัดระดับความสูงของของเหลวทั้งสองเพื่อนำมาคำนวณหาความดันคาปิลลารี และนำภาชนะบรรจุของเหลวมาชั่งน้ำหนักเพื่อคำนวณหาระดับความอึดตัวด้วยน้ำ (ปริมาตรของเหลว/ปริมาตรช่องว่าง) สุดท้ายนำผลการทดลองที่ได้ไปสร้างกราฟความสัมพันธ์เชิงฮิสเทอรีซิสระหว่างความดันคาปิลลารี และความอึดตัวด้วยน้ำ ด้วยระบบ DNAPL – น้ำ เพื่อคำนวณหาพื้นที่ใต้กราฟ แล้วนำมาวิเคราะห์ดัชนีชี้วัดความสามารถเปียกได้แบบ USBM

3. การหาความสัมพันธ์เชิงฮิสเทอรีซิสระหว่างความดันคาปิลลารี และความอึดตัวด้วยน้ำ ด้วยระบบ LNAPL – น้ำ เมื่อมี DNAPL ตกค้างอยู่ในตัวกลาง

ในการทดลองชุดนี้จะทำการทดลองใน 2 ระบบ ทั้งระบบ LNAPL – น้ำ และ DNAPL – น้ำ ใช้ตัวกลางเดียวกัน โดยเริ่มจากระบบ DNAPL – น้ำ แล้วตามด้วยระบบ LNAPL – น้ำ เมื่อเริ่มการทดลองอุปกรณ์วัดความดันคาปิลลารีที่บรรจุตัวกลางอึดตัวด้วยน้ำ 100% จะถูกเชื่อมต่อเข้ากับภาชนะบรรจุ น้ำ ทางส่วนล่างของเซลล์ ส่วนทางด้านบนนั้นถูกต่อเชื่อมกับภาชนะบรรจุ DNAPL ซึ่งใช้ไตรคลอโรเอทิลีนเป็นตัวแทน ในการทดลองนี้จะแบ่งการทดลองออกเป็น 4 ส่วน เริ่มจากระบายน้ำออกครั้งที่ 1 โดยการปรับระดับความสูงของขดบรรจุ DNAPL และขดบรรจุ น้ำ จนค่าความดันคาปิลลารีสูงขึ้นและไม่สามารถระบายออกได้ จากนั้นให้น้ำเข้าโดยการปรับระดับความสูงของขดบรรจุ DNAPL และขดบรรจุ น้ำ จนความดันมีค่าต่ำลงและน้ำไม่สามารถเข้าไปในเซลล์ได้ และสุดท้ายระบายน้ำออกอีกครั้งเป็นครั้งที่ 2 โดยการปรับระดับความสูงของขดบรรจุ DNAPL และขดบรรจุ น้ำ การนำน้ำเข้าไปในเซลล์ และระบายออกจากเซลล์โดยการปรับระดับความสูงของขดบรรจุ DNAPL และขดบรรจุ น้ำ นั้นอาศัยแรงดันที่เกิดจากการขยับขึ้น – ลงของภาชนะบรรจุของเหลวทั้ง 2 ชนิดอย่างช้าๆ จนระดับของของเหลวในภาชนะหยุดนิ่ง แล้วจึงวัดระดับความสูงของของเหลวทั้งสองเพื่อนำมาคำนวณหาความดันคาปิลลารี และนำภาชนะบรรจุของเหลวมาชั่งน้ำหนักเพื่อคำนวณหาระดับความอึดตัวด้วยน้ำ (ปริมาตรของเหลว/ปริมาตรช่องว่าง) สุดท้ายนำผลการทดลองที่ได้ไปสร้างกราฟความสัมพันธ์เชิงฮิสเทอรีซิสระหว่างความดัน

คาปิลลารี และความอึดตัวด้วยน้ำ ด้วยระบบ DNAPL – น้ำ เพื่อคำนวณหาพื้นที่ได้กราฟ แล้วนำมาวิเคราะห์หาค่าดัชนีชี้วัดความสามารถเปียกได้แบบ USBM จากนั้นทำการถอดอุปกรณ์ท่อที่เชื่อมต่อกับภาชนะบรรจุ DNAPL แล้วนำท่อมาต่อเชื่อมกับภาชนะบรรจุ LNAPL โดยให้โทลูอินเป็นตัวแทนของ LNAPL ต่อเข้ากับเซลล์วัดความดัน แล้วเริ่มการทดลองต่อ โดยเริ่มทำการระบายน้ำออกครั้งที่ 1 โดยการปรับระดับความสูงของขวดบรรจุ LNAPL และขวดบรรจุ น้ำ จนค่าความดันคาปิลลารีสูงขึ้นและไม่สามารถระบายออกได้ จากนั้นให้นำน้ำเข้าโดยการปรับระดับความสูงของขวดบรรจุ LNAPL และขวดบรรจุ น้ำ จนความดันมีค่าต่ำลงและน้ำไม่สามารถเข้าไปในเซลล์ได้ และสุดท้ายระบายน้ำออกอีกครั้งเป็นครั้งที่ 2 โดยการปรับระดับความสูงของขวดบรรจุ LNAPL และขวดบรรจุ น้ำ การนำน้ำเข้าไปในเซลล์ และระบายออกจากเซลล์โดยการปรับระดับความสูงของขวดบรรจุ LNAPL และขวดบรรจุ น้ำ นั้นอาศัยแรงดันที่เกิดจากการขยับขึ้น – ลงของภาชนะบรรจุของเหลวทั้ง 2 ชนิดอย่างช้าๆ จนระดับของของเหลวในภาชนะหยุดนิ่ง แล้วจึงวัดระดับความสูงของของเหลวทั้งสองเพื่อนำมาคำนวณหาความดันคาปิลลารี และนำภาชนะบรรจุของเหลวมาชั่งน้ำหนักเพื่อคำนวณหาระดับความอึดตัวด้วยน้ำ (ปริมาตรของเหลว/ปริมาตรช่องว่าง) สุดท้ายนำผลการทดลองที่ได้ไปสร้างกราฟความสัมพันธ์เชิงฮิสเทอรีซิสระหว่างความดันคาปิลลารี และความอึดตัวด้วยน้ำ ด้วยระบบ LNAPL – น้ำ เมื่อมี DNAPL ตกค้างอยู่ในตัวกลางเพื่อคำนวณหาพื้นที่ได้กราฟ แล้วนำมาวิเคราะห์หาค่าดัชนีชี้วัดความสามารถเปียกได้แบบ USBM

4. การหาความสัมพันธ์เชิงฮิสเทอรีซิสระหว่างความดันคาปิลลารี และความอึดตัวด้วยน้ำ ด้วยระบบ DNAPL – น้ำ เมื่อมี LNAPL ตกค้างอยู่ในตัวกลาง

ในการทดลองชุดนี้จะทำการทดลองใน 2 ระบบ ทั้งระบบ LNAPL – น้ำ และ DNAPL – น้ำ ใช้ตัวกลางเดียวกัน โดยเริ่มจากระบบ LNAPL – น้ำ แล้วตามด้วยระบบ DNAPL – น้ำ เมื่อเริ่มการทดลองอุปกรณ์วัดความดันคาปิลลารีที่บรรจุตัวกลางอึดตัวด้วยน้ำ 100% จะถูกเชื่อมต่อเข้ากับภาชนะบรรจุ น้ำ ทางส่วนล่างของเซลล์ ส่วนทางด้านบนนั้นถูกต่อเชื่อมกับภาชนะบรรจุ LNAPL ซึ่งใช้โทลูอินเป็นตัวแทน ในการทดลองนี้จะแบ่งการทดลองออกเป็น 4 ส่วน เริ่มจาก ระบายน้ำออกครั้งที่ 1 โดยการปรับระดับความสูงของขวดบรรจุ LNAPL และขวดบรรจุ น้ำ จนค่าความดันคาปิลลารีสูงขึ้นและไม่สามารถระบายออกได้ จากนั้นให้นำน้ำเข้าโดยการปรับระดับความสูงของขวดบรรจุ LNAPL และขวดบรรจุ น้ำ จนความดันมีค่าต่ำลงและน้ำไม่สามารถเข้าไปในเซลล์ได้ และสุดท้ายระบายน้ำออกอีกครั้งเป็นครั้งที่ 2 โดยการปรับระดับความสูงของขวดบรรจุ LNAPL และขวดบรรจุ น้ำ การนำน้ำเข้าไปในเซลล์ และระบายออกจากเซลล์โดยการปรับระดับความสูงของขวด

บรรจุน้ำ LNAPL และขุดบรรจุน้ำ น้ำออสัยแรงดันที่เกิดจากการขยับขึ้น – ลงของภาชนะบรรจุน้ำของเหลวทั้ง 2 ชนิดอย่างช้าๆ จนระดับของของเหลวในภาชนะหยุดนิ่ง แล้วจึงวัดระดับความสูงของของเหลวทั้งสองเพื่อนำมาคำนวณหาความดันคาปิลลารี และนำภาชนะบรรจุน้ำของเหลวมาชั่งน้ำหนักเพื่อกำหนดหาระดับความอึดตัวด้วยน้ำ (ปริมาตรของเหลว/ปริมาตรช่องว่าง) สุดท้ายนำผลการทดลองที่ได้ไปสร้างกราฟความสัมพันธ์เชิงฮิสเทอรีซิสระหว่างความดันคาปิลลารี และความอึดตัวด้วยน้ำ ด้วยระบบ LNAPL – น้ำ เพื่อกำหนดหาพื้นที่ใต้กราฟ แล้วนำมาวิเคราะห์ด้วยวิธีวัดความสามารถเปียกได้แบบ USBM จากนั้นทำการถอดอุปกรณ์ท่อที่เชื่อมต่อกับภาชนะบรรจุน้ำ LNAPL แล้วนำท่อมาต่อเชื่อมกับภาชนะบรรจุน้ำ DNAPL โดยให้ไตรคลอโรเอทิลีนเป็นตัวแทนของ DNAPL ต่อเข้ากับเซลล์วัดความดัน แล้วเริ่มการทดลองต่อ โดยเริ่มทำการระบายน้ำออกครั้งที่ 1 โดยการปรับระดับความสูงของขุดบรรจุน้ำ DNAPL และขุดบรรจุน้ำ จนค่าความดันคาปิลลารีสูงขึ้นและไม่สามารถระบายออกได้ จากนั้นให้นำน้ำเข้าโดยการปรับระดับความสูงของขุดบรรจุน้ำ DNAPL และขุดบรรจุน้ำ จนความดันมีค่าต่ำลงและน้ำไม่สามารถเข้าไปในเซลล์ได้ และสุดท้ายระบายน้ำออกอีกครั้งเป็นครั้งที่ 2 โดยการปรับระดับความสูงของขุดบรรจุน้ำ DNAPL และขุดบรรจุน้ำ การนำน้ำเข้าไปในเซลล์ และระบายออกจากเซลล์โดยการปรับระดับความสูงของขุดบรรจุน้ำ DNAPL และขุดบรรจุน้ำ น้ำออสัยแรงดันที่เกิดจากการขยับขึ้น – ลงของภาชนะบรรจุน้ำของเหลวทั้ง 2 ชนิดอย่างช้าๆ จนระดับของของเหลวในภาชนะหยุดนิ่ง แล้วจึงวัดระดับความสูงของของเหลวทั้งสองเพื่อนำมาคำนวณหาความดันคาปิลลารี และนำภาชนะบรรจุน้ำของเหลวมาชั่งน้ำหนักเพื่อกำหนดหาระดับความอึดตัวด้วยน้ำ (ปริมาตรของเหลว/ปริมาตรช่องว่าง) สุดท้ายนำผลการทดลองที่ได้ไปสร้างกราฟความสัมพันธ์เชิงฮิสเทอรีซิสระหว่างความดันคาปิลลารี และความอึดตัวด้วยน้ำ ด้วยระบบ DNAPL – น้ำ เมื่อมี LNAPL ตกค้างอยู่ในตัวกลางเพื่อกำหนดหาพื้นที่ใต้กราฟ แล้วนำมาวิเคราะห์ด้วยวิธีวัดความสามารถเปียกได้แบบ USBM

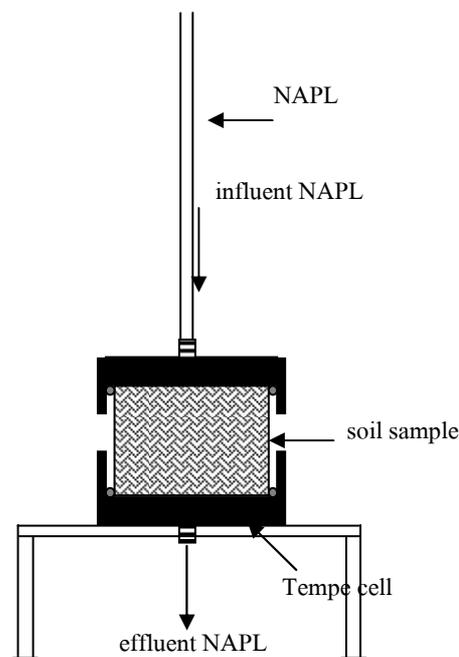
วิธีการทดลองส่วนที่ 3 การหาความซึมผ่านได้สัมพัทธ์

โดยการประดิษฐ์อุปกรณ์ที่พัฒนามาจากอุปกรณ์ Tempe[®] Cell ด้วยวัสดุ stainless steel มี PTFE membrane อยู่ที่ส่วนล่าง และส่วนบนของเซลล์เพื่อให้เป็นทางผ่านของ NAPL ที่บรรจุน้ำอยู่ในบิวเรต แสดงดังภาพที่ 25 การทดลองนี้จะได้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความซึมผ่านได้สัมพัทธ์ของ NAPL เปรียบเทียบกับความอึดตัวด้วยน้ำของตัวกลางที่ระดับต่างๆ

สำหรับการคำนวณในการทดลองนี้ ใช้สมการการคำนวณจากสมการที่ (4)

$$k = 2.3 \left(\frac{aL}{At} \right) \log \left(\frac{h_1}{h_2} \right)$$

- เมื่อ a = พื้นที่หน้าตัดของหลอดวัดน้ำเข้าตัวอย่าง [cm^2]
 h_1 = ระดับน้ำทางต้นน้ำ ณ จุดเริ่มการทดลอง [cm]
 h_2 = ระดับน้ำทางต้นน้ำ ณ จุดสิ้นสุดการทดลอง [cm]
 L = ความหนาของตัวอย่าง [cm]
 A = พื้นที่หน้าตัดของตัวอย่าง [cm^2]
 t = เวลาที่กำหนด [s]



ภาพที่ 25 ชุดอุปกรณ์ทดสอบความซึมผ่านได้สัมพัทธ์

1. ความซึมผ่านได้สัมพัทธ์ของ LNAPL ผ่านตัวกลางที่อิ่มตัวด้วยน้ำที่ระดับต่างๆ

นำตัวกลางที่ผ่านการอบที่ 105 องศาเซลเซียส บรรจุลงในเซลล์วัดความดันคาปิลลารี เติมน้ำลงในตัวกลางแล้วคนผสมกับตัวกลาง กำหนดให้เติมน้ำลงในตัวกลางเพื่อให้ตัวกลางอิ่มตัวด้วย

น้ำที่ระดับ 0%, 25%, 50%, 75% และ 100% แล้วปล่อยให้ LNAPL ที่ใช้โทลูอินเป็นตัวแทน ที่บรรจุอยู่ในบิวเรต ไหลผ่านเซลล์แล้วจับเวลา สุดท้ายนำมาผลการทดลองมาเขียนกราฟความซึมผ่านได้สัมพัทธ์เทียบกับความอิ่มตัวด้วยน้ำ

2. ความซึมผ่านได้สัมพัทธ์ของ DNAPL ผ่านตัวกลางที่อิ่มตัวด้วยน้ำที่ระดับต่างๆ

นำตัวกลางที่ผ่านการอบที่ 105 องศาเซลเซียส บรรจุลงในเซลล์วัดความดันคาปิลลารี เติมน้ำลงในตัวกลางแล้วคนผสมกับตัวกลาง กำหนดให้เติมน้ำลงในตัวกลางเพื่อให้ตัวกลางอิ่มตัวด้วยน้ำที่ระดับ 0%, 25%, 50%, 75% และ 100% แล้วปล่อยให้ DNAPL ที่ใช้ไตรคลอโรเอทิลีนเป็นตัวแทน ที่บรรจุอยู่ในบิวเรต ไหลผ่านเซลล์แล้วจับเวลา สุดท้ายนำมาผลการทดลองมาเขียนกราฟความซึมผ่านได้สัมพัทธ์เทียบกับความอิ่มตัวด้วยน้ำ

3. ความซึมผ่านได้สัมพัทธ์ของ LNAPL ผ่านตัวกลางที่อิ่มตัวด้วยน้ำที่ระดับต่างๆ ที่ผ่านการซึมผ่านของ DNAPL มาก่อนหน้า

นำตัวกลางที่ผ่านการอบที่ 105 องศาเซลเซียส บรรจุลงในเซลล์วัดความดันคาปิลลารี เติมน้ำลงในตัวกลางผสมกับตัวกลาง กำหนดให้เติมน้ำลงในตัวกลางเพื่อให้ตัวกลางอิ่มตัวด้วยน้ำที่ระดับ 0%, 25%, 50%, 75% และ 100% แล้วปล่อยให้ LNAPL ที่ใช้โทลูอินเป็นตัวแทน ที่บรรจุอยู่ในบิวเรต ไหลผ่านเซลล์แล้วจับเวลา จากนั้นนำตัวกลางชุดเดิมมาทดสอบการซึมผ่านด้วย DNAPL ที่ใช้ไตรคลอโรเอทิลีนเป็นตัวแทน ไหลผ่านเซลล์พร้อมกับจับเวลา สุดท้ายนำมาผลการทดลองมาเขียนกราฟความซึมผ่านได้สัมพัทธ์เทียบกับความอิ่มตัวด้วยน้ำ

4. ความซึมผ่านได้สัมพัทธ์ของ DNAPL ผ่านตัวกลางที่อิ่มตัวด้วยน้ำที่ระดับต่างๆ ที่ผ่านการซึมผ่านของ LNAPL มาก่อนหน้า

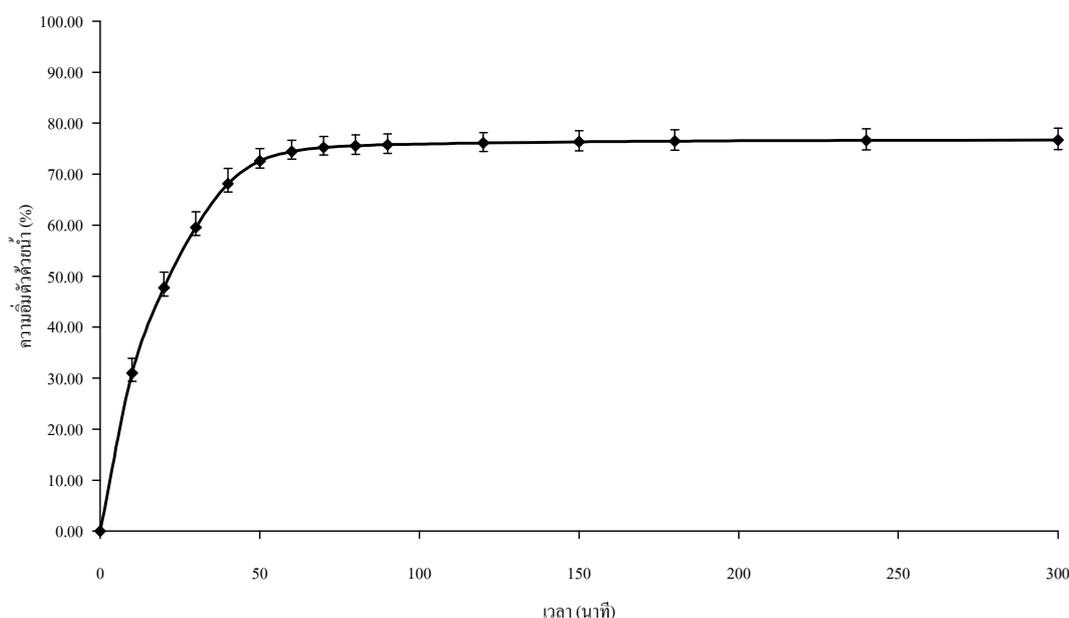
นำตัวกลางที่ผ่านการอบที่ 105 องศาเซลเซียส บรรจุลงในเซลล์วัดความดันคาปิลลารี เติมน้ำลงในตัวกลางผสมกับตัวกลาง กำหนดให้เติมน้ำลงในตัวกลางเพื่อให้ตัวกลางอิ่มตัวด้วยน้ำที่ระดับ 0%, 25%, 50%, 75% และ 100% แล้วปล่อยให้ DNAPL ที่ใช้ไตรคลอโรเอทิลีนเป็นตัวแทน ที่บรรจุอยู่ในบิวเรต ไหลผ่านเซลล์แล้วจับเวลา จากนั้นนำตัวกลางชุดเดิมมาทดสอบการซึมผ่านด้วย

LNAPL ที่ให้โทลูอินเป็นตัวแทนไหลผ่านเซลล์พร้อมกับจับเวลา สุดท้ายนำผลการทดลองมาเขียนกราฟความซึมผ่านได้สัมพันธ์กับความอิ่มตัวด้วยน้ำ

ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

ผลและวิจารณ์การทดลองส่วนที่ 1 การทดสอบ imbibition rate

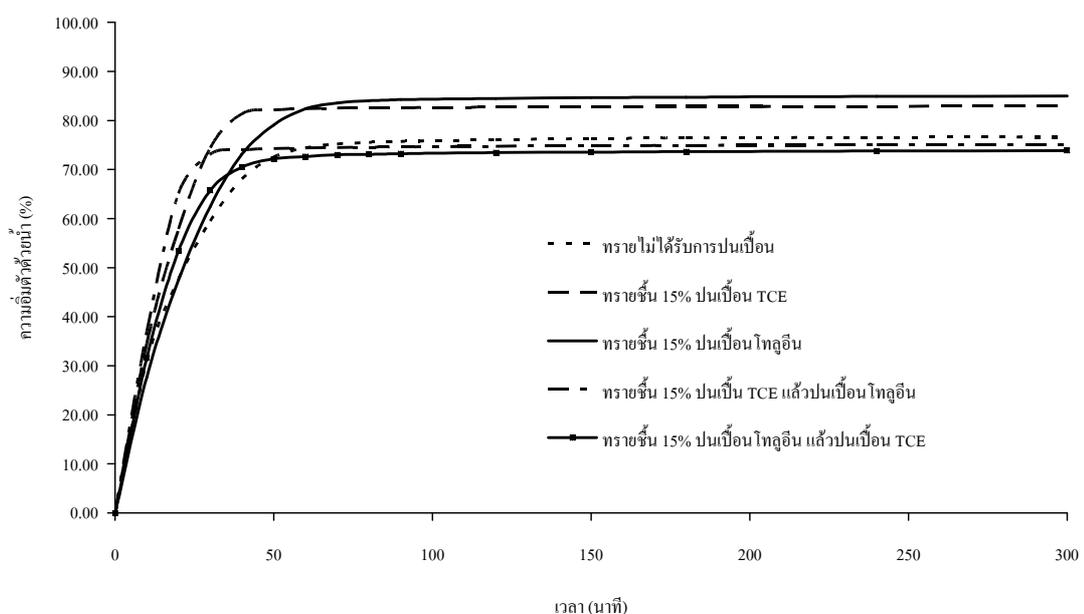
การทดสอบ imbibition rate เป็นการทดลองที่ให้ผลเฉพาะสำหรับตัวกลางและของเหลวที่ใช้ในการทดสอบนั้น จึงเป็นการทดสอบเชิงเปรียบเทียบกับการทดลองอ้างอิง ในการทดสอบ imbibition rate นี้ เพื่อให้ได้ผลการทดลองที่ถูกต้อง จึงได้ทำการทดลองซ้ำทั้งหมด 3 ครั้งในแต่ละรูปแบบการทดลอง โดยใช้การทดลองของตัวกลางที่ไม่ปนเปื้อนเป็นการทดลองอ้างอิงเพื่อเปรียบเทียบความแม่นยำทางสถิติ จากการทดลองพบว่าเมื่อทดลองกับตัวกลางไม่ปนเปื้อนจะมีค่าความอิมมัตว์ด้วยน้ำสูงสุดเฉลี่ยเท่ากับ $76.66 \pm 2.12\%$ โดยมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเฉลี่ยตลอดช่วงการทดลองเท่ากับ 2.03% ดังภาพที่ 26



ภาพที่ 26 ผลการทดสอบ imbibition rate เฉลี่ยของทรายไม่ปนเปื้อน

จากการทดสอบ imbibition rate ที่การปนเปื้อนในรูปแบบต่างๆ จะได้ผลการทดลอง ดังแสดงในภาพที่ 27 ซึ่งเป็นการเปรียบเทียบระหว่างความอิมมัตว์ด้วยน้ำเฉลี่ยกับเวลา เมื่อพิจารณาในช่วง 50 นาทีแรกของการทดลอง จะพบว่าความอิมมัตว์ด้วยน้ำของตัวกลางที่ไม่ได้รับการปนเปื้อน

จะมีค่าต่ำที่สุด โดยตัวกลางที่ได้รับการปนเปื้อน TCE แล้วปนเปื้อน โทลูอินมีค่าความอึมตัวด้วย น้ำสูงสุด ตามด้วยตัวกลางที่ปนเปื้อน TCE อย่างเดียว จากนั้นเป็นตัวกลางที่ปนเปื้อน โทลูอิน แล้วปนเปื้อน TCE และสุดท้ายเป็นตัวกลางที่ปนเปื้อน โทลูอินอย่างเดียว ทำให้สามารถสรุปได้ว่า ตัวกลางที่ปนเปื้อน DNAPL ก่อน LNAPL มี imbibition rate มากกว่าตัวกลางที่ปนเปื้อน LNAPL ก่อน DNAPL และตัวกลางที่ปนเปื้อนแบบผสมเมื่อปนเปื้อนสารชนิดใดก่อนก็จะมี imbibition rate สูงกว่าตัวกลางที่ปนเปื้อนสารชนิดนั้นเพียงสารเดียว และตัวกลางที่ไม่มีการปนเปื้อนจะมี imbibition rate ต่ำกว่าตัวกลางที่มีการปนเปื้อน และเมื่อพิจารณา imbibition rate ด้วยสมการของลาปลาซจะพบว่า มุมสัมผัสระหว่างพื้นผิวและของเหลว และแรงที่ผิวสัมผัสระหว่างของเหลวเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดความแตกต่างของ imbibition rate



ภาพที่ 27 ผลการทดสอบ imbibition rate ของการปนเปื้อนในลักษณะต่างๆ

เมื่อการทดลองเข้าสู่สมดุลจนตัวอย่างทรายมีสภาพอึมตัวคงที่แล้ว พบว่าการปนเปื้อนในแต่ละแบบจะมีค่าความอึมตัวด้วยน้ำไม่เท่ากัน ค่าความอึมตัวด้วยน้ำของตัวกลางปนเปื้อน โทลูอินมีค่าเฉลี่ยสูงสุดที่ระดับ $84.98 \pm 1.87\%$ มากกว่าตัวกลางปนเปื้อน TCE ที่อึมตัวด้วยน้ำที่ $82.96 \pm 1.93\%$ ซึ่งมากกว่าค่าความอึมตัวด้วยน้ำของตัวกลางที่ไม่มีการปนเปื้อนด้วยค่าความอึมตัวด้วยน้ำที่ $76.66 \pm 2.12\%$ ซึ่งต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ และตัวกลางที่ไม่มีการปนเปื้อนยังมีความอึมตัวด้วยน้ำ

มากกว่าค่าความอึมตัวด้วยน้ำของตัวกลางปนเปื้อน TCE ก่อนแล้วจึงปนเปื้อน Toluene ที่ $75.09 \pm 3.11\%$ ซึ่งไม่ต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ เช่นเดียวกับค่าความอึมตัวด้วยน้ำของตัวกลางปนเปื้อน Toluene ก่อนแล้วจึงปนเปื้อน TCE มีค่า $73.88 \pm 1.21\%$ จากสมการของลาปลาซพบว่าตัวกลางที่อึมตัวด้วยน้ำน้อยจะมีความดันคาปิลลารีสูงกว่าตัวกลางที่อึมตัวด้วยน้ำมาก ทำให้สามารถเรียงลำดับความดันคาปิลลารีจากมากไปน้อยได้ โดยตัวกลางที่ปนเปื้อนโทลูอินก่อน แล้วปนเปื้อน TCE จะมีความดันคาปิลลารีมากกว่าตัวกลางที่ปนเปื้อน TCE ก่อน แล้วปนเปื้อนโทลูอิน ตามด้วยตัวกลางที่ไม่มีการปนเปื้อน และตัวกลางปนเปื้อน TCE โดยตัวกลางปนเปื้อนโทลูอินมีความดันคาปิลลารีต่ำที่สุด

ตารางที่ 4 ผลการทดลอง imbibition rate

ตัวอย่าง ที่	ลักษณะการ ปนเปื้อน	S_w สูงสุด เฉลี่ย $\pm SD$ (%)	แรงระหว่าง ผิวสัมผัส (mN/m)	มุม สัมผัส ($^{\circ}$)	การวิเคราะห์ wettability
1	ทรายไม่ได้รับการ ปนเปื้อน	76.66 ± 2.12	^a น้ำ-อากาศ = 72	^b 110.1	-
2	ทรายชั้น 15% ปนเปื้อน TCE	82.96 ± 1.93	^a TCE-น้ำ = 38	ไม่มี ข้อมูล	ต่างอย่างมี นัยสำคัญกับ ทรายไม่ ปนเปื้อน
3	ทรายชั้น 15% ปนเปื้อน โทลูอิน	84.98 ± 1.87	^c โทลูอิน-น้ำ = 36.1	ไม่มี ข้อมูล	ต่างอย่างมี นัยสำคัญกับ ทรายไม่ ปนเปื้อน
4	ทรายชั้น 15% ปนเปื้อน TCE ก่อน แล้วปนเปื้อน โทลู อิน	75.09 ± 3.11	ไม่มีข้อมูล	ไม่มี ข้อมูล	ไม่ต่างอย่างมี นัยสำคัญกับ ทรายไม่ ปนเปื้อน

ตารางที่ 4 (ต่อ)

ตัวอย่าง ที่	ลักษณะการ ปนเปื้อน	S _w สูงสุด เฉลี่ย ±SD (%)	แรงระหว่าง ผิวสัมผัส (mN/m)	มุม สัมผัส (°)	การวิเคราะห์ wettability
5	ทรายขึ้น 15% ปนเปื้อนโทลูอี นก่อนแล้วปนเปื้อน TCE	73.88±1.21	ไม่มีข้อมูล	ไม่มี ข้อมูล	ไม่ต่างอย่างมี นัยสำคัญกับ ทรายไม่ ปนเปื้อน

ที่มา: a Dane *et al* (1994)

b Amirfazli *et al* (1998)

c Guy *et al* (1996)

จากตารางที่ 4 เมื่อพิจารณาโดยใช้สมการของลาปลาซ จะพบว่าการทดลองนี้เป็นไปตามทฤษฎีของลาปลาซ เมื่อรัศมีคาปิลลารีไม่มีผลกระทบกับการเปลี่ยนแปลงของความดันคาปิลลารีจากการบรรจุตัวกลางในลักษณะเดิมทุกตัวอย่าง ดังนั้นสิ่งที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของความดันคาปิลลารีจึงประกอบด้วยแรงที่ผิวสัมผัสระหว่างของเหลวและมุมสัมผัสระหว่างพื้นผิวและของเหลว ซึ่งแรงระหว่างผิวสัมผัสที่ลดลงมีผลให้ความดันคาปิลลารีเพิ่มขึ้นส่งผลให้ความอึดตัวด้วยน้ำมีค่าสูงขึ้นดังเช่นการทดลองที่ 1, 2 และ 3 ในส่วนของมุมสัมผัสเมื่อมุมสัมผัสลดลงทำให้ความดันคาปิลลารีสูงขึ้นจึงส่งผลให้ความอึดตัวด้วยน้ำมีค่าสูงขึ้นเช่นกัน จึงสามารถสรุปได้ว่า การปนเปื้อนแบบผสมทำให้แรงที่ผิวสัมผัสระหว่างของเหลวและมุมสัมผัสระหว่างพื้นผิวและของเหลวเปลี่ยนแปลงไป เป็นเหตุให้ความดันคาปิลลารีเพิ่มสูงขึ้นความอึดตัวด้วยน้ำจึงลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับ การปนเปื้อนเชิงเดี่ยว ส่งผลให้ความสามารถเปียกได้มีการเปลี่ยนแปลงไปกลายเป็นสามารถเปียกน้ำได้น้อยลง

ผลและวิจารณ์การทดลองส่วนที่ 2 การหาความสัมพันธ์เชิงฮีสเทอรีซิสระหว่างความดันคาปิลลารี และความอิ่มตัวด้วยน้ำ

1. การหาความสัมพันธ์เชิงฮีสเทอรีซิสระหว่างความดันคาปิลลารี และความอิ่มตัวด้วยน้ำ ด้วยระบบ LNAPL – น้ำ

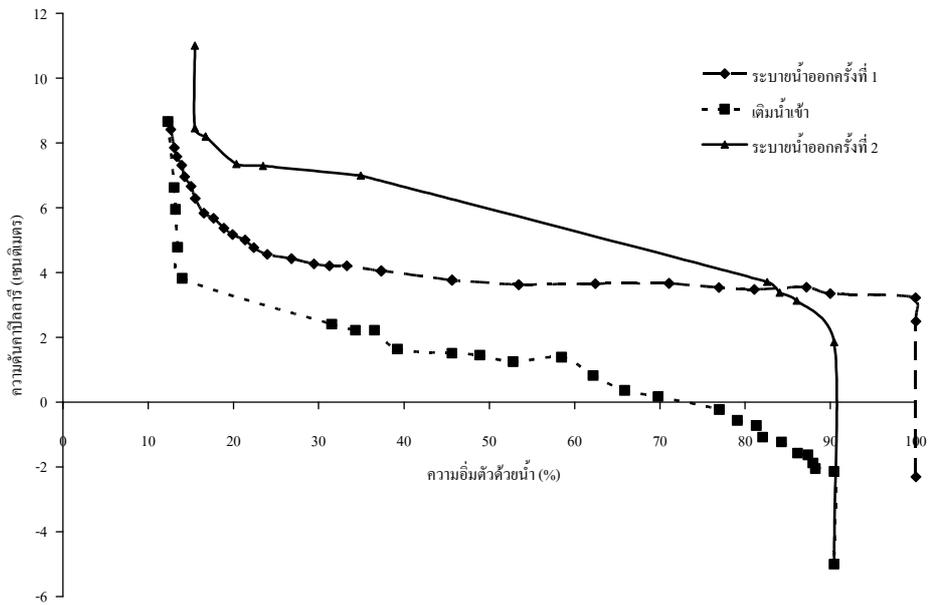
การทดลองเริ่มต้นจากตัวกลางที่มีความอิ่มตัวด้วยน้ำ 100% จากนั้นทำการระบายน้ำออก จากตัวกลางครั้งแรกโดยใช้แรงดันจากสาร โทลูอิน แล้วทำการเติมน้ำเข้าสู่ตัวกลาง และสุดท้ายทำการระบายน้ำออกเป็นครั้งที่ 2 ด้วยแรงดันจากสาร โทลูอิน

จากภาพที่ 28 ที่เส้นกราฟระบายน้ำออกครั้งที่ 1 ความอิ่มตัวด้วยน้ำเริ่มต้นจาก 100% ที่ความดันคาปิลลารี 2.49 เซนติเมตร จากนั้นความอิ่มตัวด้วยน้ำได้ลดลงไปเรื่อยๆ พร้อมกับความดันคาปิลลารีที่เพิ่มขึ้น จนสุดท้ายถึงความดันคาปิลลารีที่ไม่สามารถระบายน้ำได้ที่ 8.41 เซนติเมตร และมีความอิ่มตัวด้วยน้ำที่เหลืออยู่ในตัวกลาง 12.67%

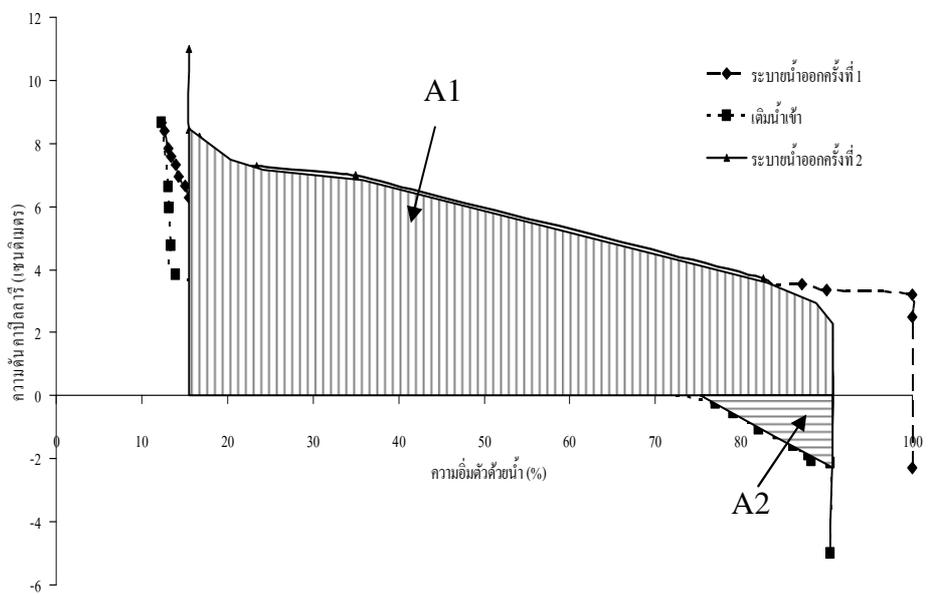
ที่เส้นกราฟเติมน้ำเข้า ความอิ่มตัวด้วยน้ำเริ่มต้นจาก 12.67% ที่ความดันคาปิลลารี 8.41 เซนติเมตร จากนั้นเมื่อเติมน้ำเข้าสู่ตัวกลาง ความอิ่มตัวด้วยน้ำจึงเพิ่มขึ้นจนถึงระดับสูงสุดที่ 90.42% ที่ความดันคาปิลลารี -2.14 เซนติเมตร สามารถหาพื้นที่ใต้กราฟ (A2) ได้ 18.10 cm^2

ที่เส้นกราฟระบายน้ำออกครั้งที่ 2 ความอิ่มตัวด้วยน้ำเริ่มต้นจาก 90.42% ที่ความดันคาปิลลารี 1.85 เซนติเมตร จากนั้นความอิ่มตัวด้วยน้ำได้ลดลงไปเรื่อยๆ พร้อมกับความดันคาปิลลารีที่เพิ่มขึ้น จนสุดท้ายถึงความดันคาปิลลารีที่ไม่สามารถระบายน้ำได้ที่ 8.45 เซนติเมตร และมีความอิ่มตัวด้วยน้ำที่เหลืออยู่ในตัวกลาง 15.48% สามารถหาพื้นที่ใต้กราฟ (A1) ได้ 419.81 cm^2

จากการทดลองนี้ได้ค่าดัชนี USBM = $\log (A1/A2) = 1.36$



a



b

ภาพที่ 28 a) กราฟแสดงความสัมพันธ์เชิงฮีสเทอรีซิสระหว่างความดันคาปิลลารีและความอิ่มตัวด้วยน้ำ โดยการทดลองด้วยระบบ LNAPL - น้ำ

b) พื้นที่ใต้กราฟ A1 และ A2 จากภาพที่ 28a

2. การหาความสัมพันธ์เชิงสถิติระหว่างความดันคาปิลลารี และความอิ่มตัวด้วยน้ำ ด้วยระบบ DNAPL – น้ำ

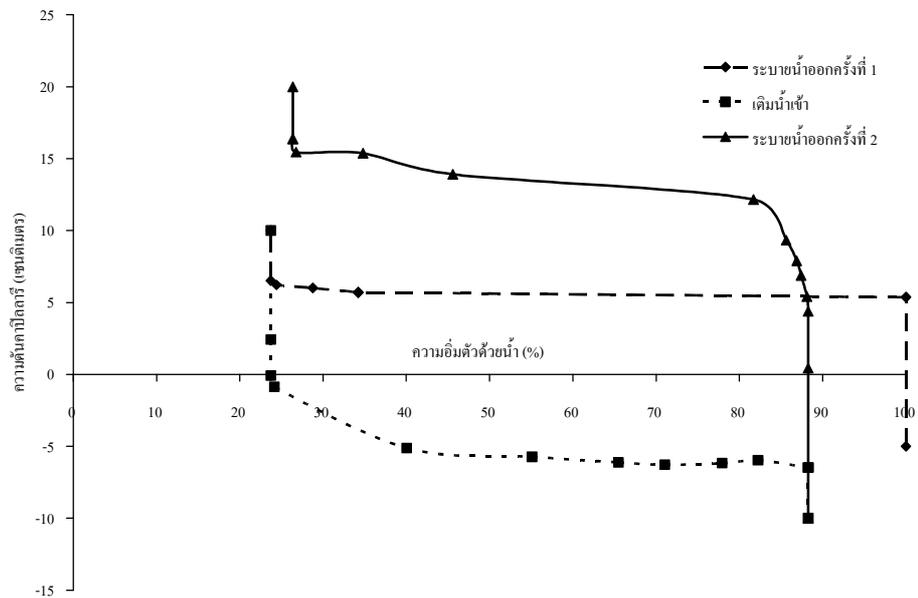
การทดลองเริ่มต้นจากตัวกลางที่มีความอิ่มตัวด้วยน้ำ 100% จากนั้นทำการระบายน้ำออก จากตัวกลางครั้งแรกโดยใช้แรงดันจากสารไตรคลอโรเอทิลีน แล้วทำการเติมน้ำเข้าสู่ตัวกลาง และสุดท้ายทำการระบายน้ำออกเป็นครั้งที่ 2 ด้วยแรงดันจากสารไตรคลอโรเอทิลีน

จากภาพที่ 29 ที่เส้นกราฟระบายน้ำออกครั้งที่ 1 ความอิ่มตัวด้วยน้ำเริ่มต้นจาก 100% ที่ความดันคาปิลลารี 5.36 เซนติเมตร จากนั้นความอิ่มตัวด้วยน้ำได้ลดลงไปเรื่อยๆ พร้อมกับความดันคาปิลลารีที่เพิ่มขึ้น จนสุดท้ายถึงความดันคาปิลลารีที่ไม่สามารถระบายน้ำได้ที่ 6.52 เซนติเมตร และมีความอิ่มตัวด้วยน้ำที่เหลืออยู่ในตัวกลาง 23.72%

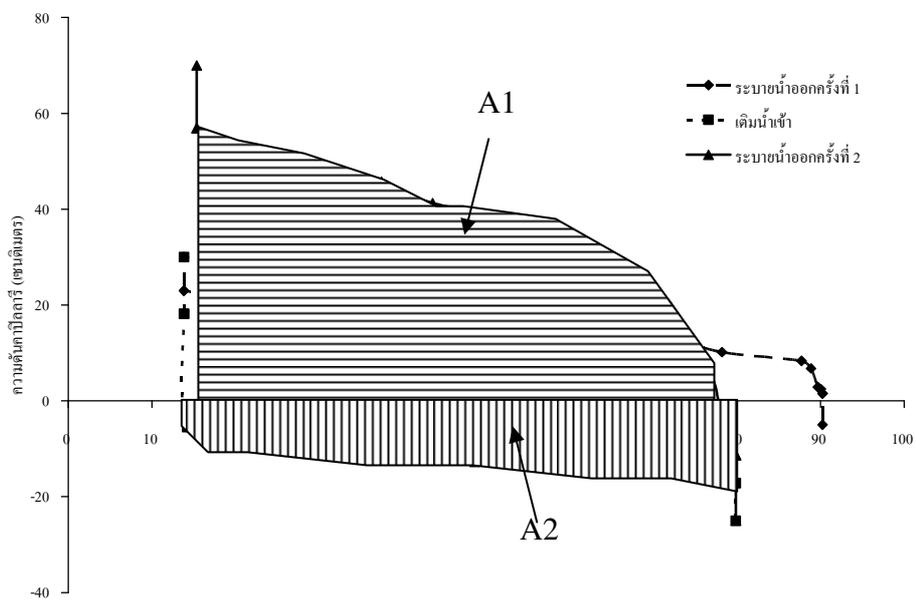
ที่เส้นกราฟเติมน้ำเข้า ความอิ่มตัวด้วยน้ำเริ่มต้นจาก 23.72% ที่ความดันคาปิลลารี 2.41 เซนติเมตร จากนั้นความอิ่มตัวด้วยน้ำได้เพิ่มขึ้นไปเรื่อยๆ พร้อมกับความดันคาปิลลารีที่ลดลงจนสุดท้ายถึงความดันคาปิลลารีที่ไม่สามารถระบายน้ำได้ที่ -6.49 เซนติเมตร และมีความอิ่มตัวด้วยน้ำที่เหลืออยู่ในตัวกลาง 88.27% สามารถหาพื้นที่ใต้กราฟ (A2) ได้ 327.56 cm^2

ที่เส้นกราฟระบายน้ำออกครั้งที่ 2 ความอิ่มตัวด้วยน้ำเริ่มต้นจาก 88.27% ที่ความดันคาปิลลารี 0.43 เซนติเมตร จากนั้นความอิ่มตัวด้วยน้ำได้ลดลงไปเรื่อยๆ พร้อมกับความดันคาปิลลารีที่เพิ่มขึ้น จนสุดท้ายถึงความดันคาปิลลารีที่ไม่สามารถระบายน้ำได้ที่ 16.38 เซนติเมตร และมีความอิ่มตัวด้วยน้ำที่เหลืออยู่ในตัวกลาง 26.37% สามารถหาพื้นที่ใต้กราฟ (A1) ได้ 814.31 cm^2

จากการทดลองนี้ได้ค่าดัชนี USBM = $\log (A1/A2) = 0.395$



a



b

ภาพที่ 29 a) กราฟแสดงความสัมพันธ์เชิงฮิสเทอรีซิสระหว่างความดันคาปิลลารีและความอิ่มตัวด้วยน้ำ โดยการทดลองด้วยระบบ DNAPL - น้ำ
 b) พื้นที่ใต้กราฟ A1 และ A2 จากภาพที่ 29a

3. การหาความสัมพันธ์เชิงสถิติระหว่างความดันคาปิลลารี และความอิ่มตัวด้วยน้ำ ด้วยระบบ LNAPL – น้ำ เมื่อมี DNAPL ตกค้างอยู่ในตัวกลาง

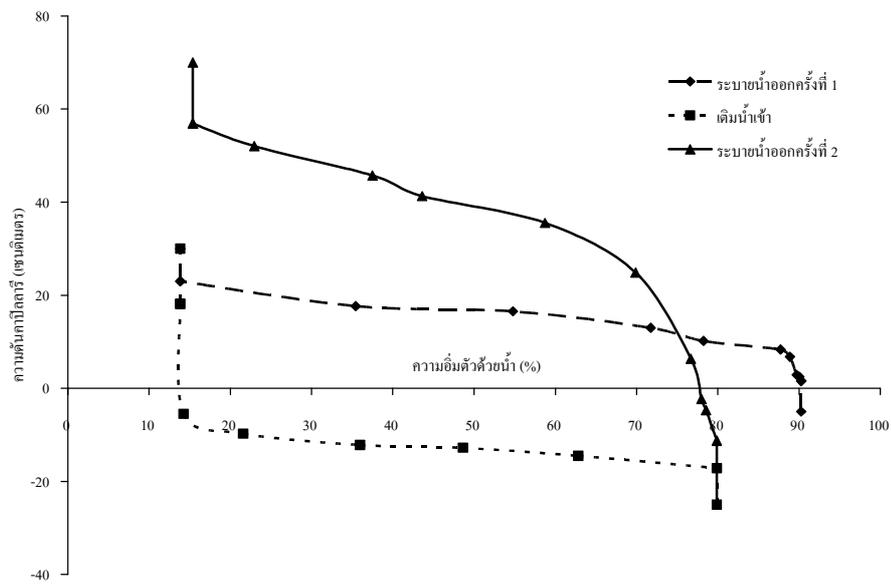
การทดลองในส่วนนี้เป็นการทดลองที่ต่อจากการทดลองหาความสัมพันธ์ระหว่างความดันคาปิลลารี และความอิ่มตัวด้วยน้ำในระบบ DNAPL – น้ำ โดยเริ่มต้นมีสารไตรคลอโรเอทิลีนตกค้างในตัวกลาง 9.75% ความอิ่มตัวด้วยน้ำเริ่มต้นที่ 90.25% จากนั้นทำการระบายน้ำออกจากตัวกลางครั้งแรกโดยใช้แรงดันจากสารโทลูอิน แล้วทำการเติมน้ำเข้าสู่ตัวกลาง และสุดท้ายทำการระบายน้ำออกเป็นครั้งที่ 2 ด้วยแรงดันจากสารโทลูอิน

จากภาพที่ 30 ที่เส้นกราฟระบายน้ำออกครั้งที่ 1 ความอิ่มตัวด้วยน้ำเริ่มต้นจาก 90.25% ที่ความดันคาปิลลารี 1.58 เซนติเมตร จนความดันคาปิลลารีมีค่าเพิ่มขึ้นถึง 1.58 เซนติเมตร จากนั้นความอิ่มตัวด้วยน้ำได้ลดลงไปเรื่อยๆ พร้อมกับความดันคาปิลลารีที่เพิ่มขึ้น จนสุดท้ายถึงความดันคาปิลลารีที่ไม่สามารถระบายน้ำได้ที่ 23.51 เซนติเมตร และมีความอิ่มตัวด้วยน้ำที่เหลืออยู่ในตัวกลาง 13.84%

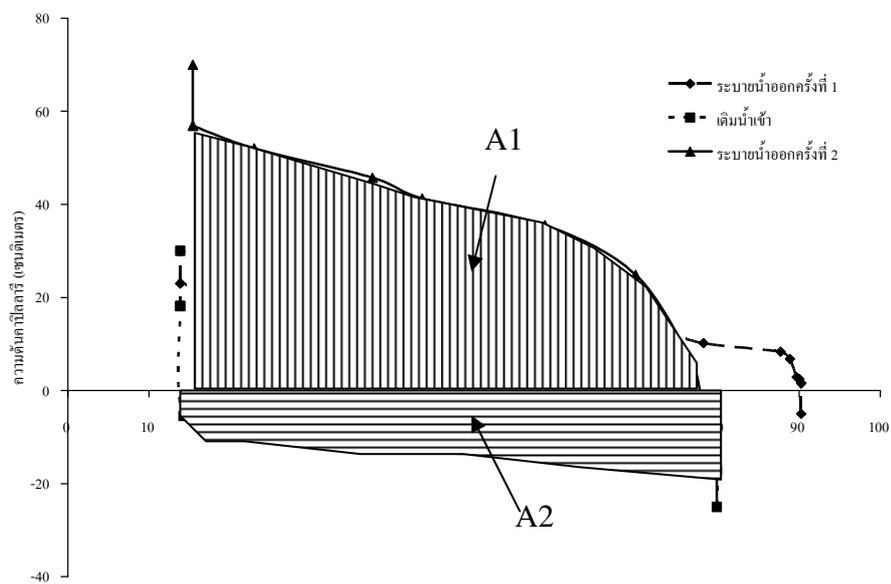
ที่เส้นกราฟเติมน้ำเข้า ความอิ่มตัวด้วยน้ำเริ่มต้นจาก 13.84% ที่ความดันคาปิลลารี 18.14 เซนติเมตร จากนั้นเมื่อเติมน้ำเข้าสู่ตัวกลาง ความอิ่มตัวด้วยน้ำจึงเพิ่มขึ้นจนถึงระดับสูงสุดที่ 79.87% ที่ความดันคาปิลลารี -17.15 เซนติเมตร สามารถหาพื้นที่ใต้กราฟ (A2) ได้ 760.15 cm^2

ที่เส้นกราฟระบายน้ำออกครั้งที่ 2 ความอิ่มตัวด้วยน้ำเริ่มต้นจาก 79.87% ที่ความดันคาปิลลารี -11.29 เซนติเมตร จากนั้นความอิ่มตัวด้วยน้ำได้ลดลงไปเรื่อยๆ พร้อมกับความดันคาปิลลารีที่เพิ่มขึ้น จนสุดท้ายถึงความดันคาปิลลารีที่ไม่สามารถระบายน้ำได้ที่ 57.40 เซนติเมตร และมีความอิ่มตัวด้วยน้ำที่เหลืออยู่ในตัวกลาง 15.40% สามารถหาพื้นที่ใต้กราฟ (A1) ได้ 2418.73 cm^2

จากการทดลองนี้ได้ค่าดัชนี USBM = $\log (A1/A2) = 0.50$ เมื่อตัวกลางอยู่ในระบบ LNAPL – น้ำ และเมื่อมี DNAPL ตกค้างอยู่ในตัวกลาง



a



b

ภาพที่ 30 a) กราฟแสดงความสัมพันธ์เชิงฮิสเทอรีซิสระหว่างความดันคาปิลลารีและความอิ่มตัวด้วยน้ำ ด้วยระบบ LNAPL – น้ำ เมื่อมี DNAPL ตกค้างอยู่ในตัวกลาง
 b) พื้นที่ใต้กราฟ A1 และ A2 จากภาพที่ 30a

4. การหาความสัมพันธ์เชิงสถิติระหว่างความดันคาปิลลารี และความอิ่มตัวด้วยน้ำ ด้วยระบบ DNAPL – น้ำ เมื่อมี LNAPL ตกค้างอยู่ในตัวกลาง

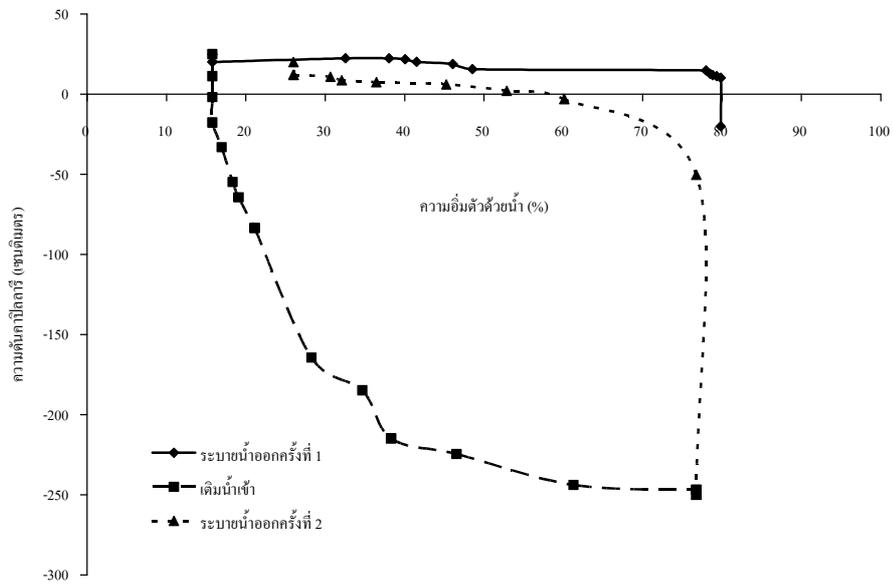
การทดลองในส่วนนี้เป็นการทดลองที่ต่อจากการทดลองหาความสัมพันธ์ระหว่างความดันคาปิลลารี และความอิ่มตัวด้วยน้ำในระบบ LNAPL – น้ำ โดยเริ่มต้นมีสารโทลูอินตกค้างอยู่ในตัวกลาง 20.17% ความอิ่มตัวด้วยน้ำเริ่มต้นที่ 79.83% จากนั้นทำการระบายน้ำออกจากตัวกลางครั้งแรกโดยใช้แรงดันจากสารไตรคลอโรเอทิลีน แล้วทำการเติมน้ำเข้าสู่ตัวกลาง และสุดท้ายทำการระบายน้ำออกเป็นครั้งที่ 2 ด้วยแรงดันจากสารไตรคลอโรเอทิลีน

จากภาพที่ 31 ที่เส้นกราฟระบายน้ำออกครั้งที่ 1 ความอิ่มตัวด้วยน้ำเริ่มต้นจาก 79.83% ที่ความดันคาปิลลารี 10.25 เซนติเมตร จากนั้นความอิ่มตัวด้วยน้ำได้ลดลงไปเรื่อยๆ พร้อมกับความดันคาปิลลารีที่เพิ่มขึ้น จนสุดท้ายถึงความดันคาปิลลารีที่ไม่สามารถระบายน้ำได้ที่ 20.18 เซนติเมตร และมีความอิ่มตัวด้วยน้ำที่เหลืออยู่ในตัวกลาง 15.78%

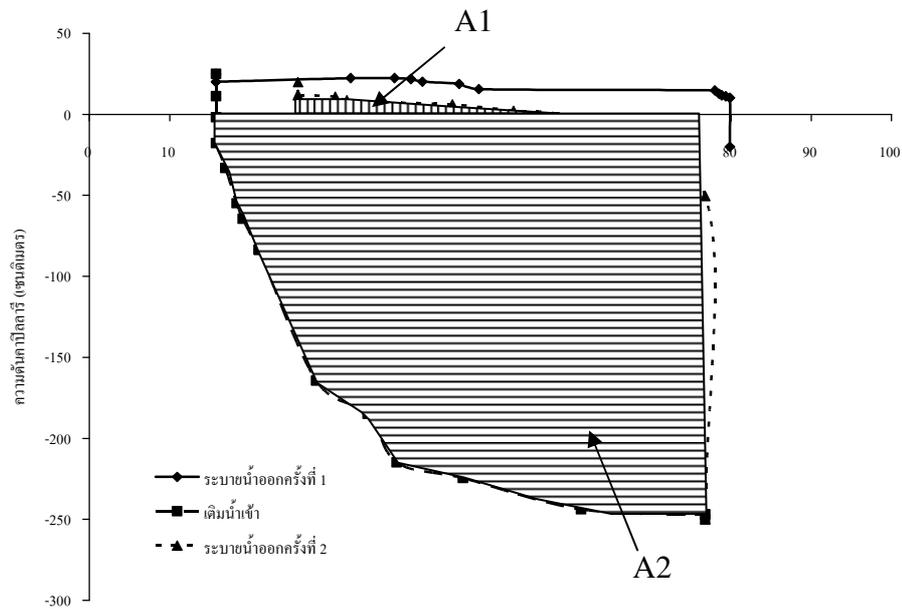
ที่เส้นกราฟเติมน้ำเข้า ความอิ่มตัวด้วยน้ำเริ่มต้นจาก 15.78% ที่ความดันคาปิลลารี 11.24 เซนติเมตร จากนั้นเมื่อเติมน้ำเข้าสู่ตัวกลาง ความอิ่มตัวด้วยน้ำจึงเพิ่มขึ้นจนถึงระดับสูงสุดที่ 76.76% ที่ความดันคาปิลลารี -246.89 เซนติเมตร สามารถหาพื้นที่ใต้กราฟ (A2) ได้ 8252.19 cm^2

ที่เส้นกราฟระบายน้ำออกครั้งที่ 2 ความอิ่มตัวด้วยน้ำเริ่มต้นจาก 76.76% ที่ความดันคาปิลลารี -50.27 เซนติเมตร จากนั้นความอิ่มตัวด้วยน้ำได้ลดลงไปเรื่อยๆ พร้อมกับความดันคาปิลลารีที่เพิ่มขึ้น จนสุดท้ายถึงความดันคาปิลลารีที่ไม่สามารถระบายน้ำได้ที่ 12.05 เซนติเมตร และมีความอิ่มตัวด้วยน้ำที่เหลืออยู่ในตัวกลาง 25.99% สามารถหาพื้นที่ใต้กราฟ (A1) ได้ 192.86 cm^2

จากการทดลองนี้ได้ค่าดัชนี USBM = $\log(A1/A2) = -1.63$ เมื่อตัวกลางอยู่ในระบบ DNAPL – น้ำ และเมื่อมี LNAPL ตกค้างอยู่ในตัวกลาง



a



b

ภาพที่ 31 a) กราฟแสดงความสัมพันธ์เชิงฮีสเทอรีซิสระหว่างความดันคาปิลลารี และความอิ่มตัวด้วยน้ำ ด้วยระบบ DNAPL – น้ำ เมื่อมี LNAPL ตกค้างอยู่ในตัวกลาง
 b) พื้นที่ใต้กราฟ A1 และ A2 จากภาพที่ 31a

การทดลองหาความสามารถแยกได้โดยใช้การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความดันคาปิลลารี กับความอิ่มตัวด้วยน้ำ โดยการวิเคราะห์ร่วมกับดัชนีชี้วัดความสามารถแยกได้แบบยูเอสบีเอ็ม ได้ผลสรุปดังตารางที่ 5

ตารางที่ 5 ดัชนีชี้วัดความสามารถแยกได้แบบ USBM โดยคำนวณจากความสัมพันธ์เชิงฮิสเทอริซิสระหว่างความดันคาปิลลารีและความอิ่มตัวด้วยน้ำ

ลักษณะระบบการทดลอง	USBM Index
1. น้ำ-โทลูอิน	1.36
2. น้ำ-ไตรคลอโรเอทิลีน	0.395
3. น้ำ-ไตรคลอโรเอทิลีน (เมื่อมีโทลูอินตกค้างอยู่ในตัวกลาง)	-1.63
4. น้ำ-โทลูอิน (เมื่อมีไตรคลอโรเอทิลีนตกค้างอยู่ในตัวกลาง)	0.50

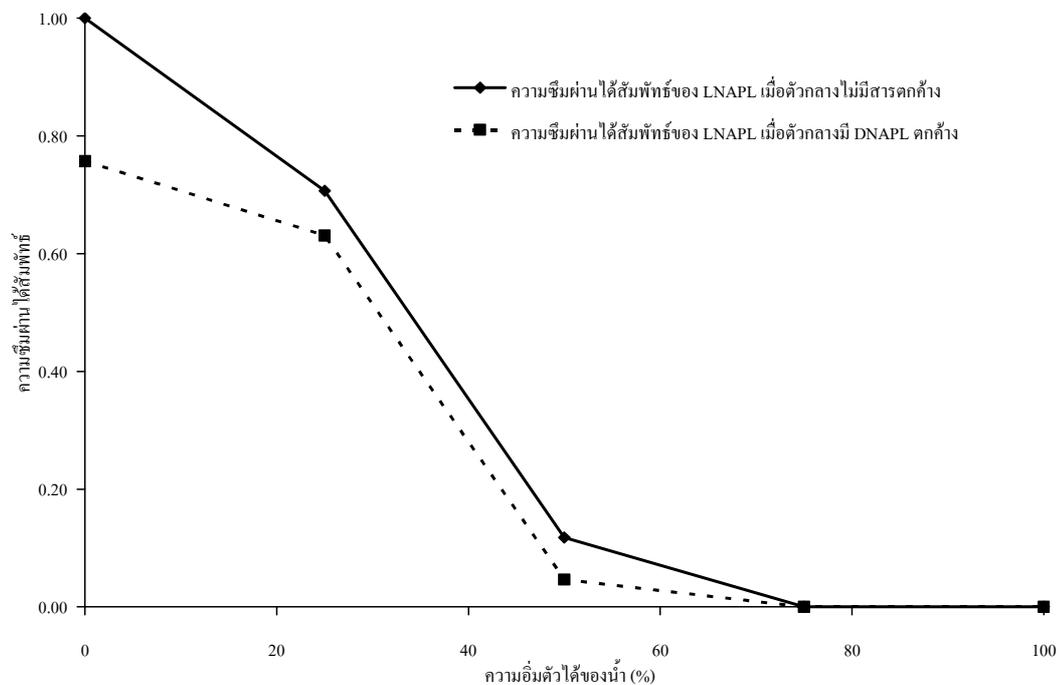
เมื่อทำการวิเคราะห์โดยการใช้การเปรียบเทียบดัชนีชี้วัดที่ได้จากการทดลองที่ใช้ระบบการทดลองชนิดเดียวกัน แต่มีสารที่ตกค้างอยู่ในตัวกลางและที่ไม่มีตกค้างอยู่ในตัวกลาง พบว่า ระบบน้ำ-โทลูอิน มีค่า USBM Index = 1.36 และ ระบบน้ำ-โทลูอิน (เมื่อมีไตรคลอโรเอทิลีนตกค้างอยู่ในตัวกลาง) มีค่า USBM Index = 0.50 ค่าดัชนีที่ลดลงแสดงให้เห็นว่า มีความชอบน้ำลดลง ส่วนระบบน้ำ-ไตรคลอโรเอทิลีน มีค่า USBM Index = 0.395 และระบบน้ำ-ไตรคลอโรเอทิลีน (เมื่อมีโทลูอินตกค้างอยู่ในตัวกลาง) มีค่า USBM Index = -1.63 ดัชนีที่มีค่าลดลงแสดงให้เห็นว่า มีความชอบน้ำลดลง ซึ่งผลการทดลองนี้ได้ไปสอดคล้องกับการทดสอบอัตราการเติมน้ำที่ว่า ความสามารถแยกได้จะมีค่าเปลี่ยนแปลงไปเป็นชอบน้ำลดลง เมื่อมีการปนเปื้อนแบบผสมระหว่าง LNAPL และ DNAPL

ผลและวิจารณ์การทดลองส่วนที่ 3 การหาความซึมผ่านได้สัมพัทธ์

1. ความซึมผ่านได้สัมพัทธ์ของ LNAPL ผ่านตัวกลางที่อิ่มตัวด้วยน้ำที่ระดับต่างๆ และ ความซึมผ่านได้สัมพัทธ์ของ LNAPL ผ่านตัวกลางที่อิ่มตัวด้วยน้ำที่ระดับต่างๆ ที่ผ่านการซึมผ่านของ DNAPL มาก่อนหน้า

จากภาพที่ 32 ที่เส้นกราฟความซึมผ่านได้สัมพัทธ์ของ LNAPL เมื่อตัวกลางไม่มีสารตกค้างพบว่า ที่ความอิ่มตัวด้วยน้ำ 0% มีค่าความซึมผ่านได้สัมพัทธ์อยู่ที่ 1.00 เมื่อเพิ่มความอิ่มตัวด้วยน้ำของ ตัวกลางนั้น มีผลทำให้ค่าความซึมผ่านได้สัมพัทธ์มีค่าลดลง และค่าความซึมผ่านได้สัมพัทธ์มีค่า เท่ากับ 0 เมื่อความอิ่มตัวด้วยน้ำมีค่าตั้งแต่ 75% ขึ้นไป

ที่เส้นกราฟความซึมผ่านได้สัมพัทธ์ของ LNAPL เมื่อตัวกลางมี DNAPL ตกค้าง พบว่า ที่ ความอิ่มตัวด้วยน้ำ 0% มีค่าความซึมผ่านได้สัมพัทธ์อยู่ที่ 0.76 เมื่อเพิ่มความอิ่มตัวด้วยน้ำของ ตัวกลางนั้น มีผลทำให้ค่าความซึมผ่านได้สัมพัทธ์มีค่าลดลง และค่าความซึมผ่านได้สัมพัทธ์มีค่า เท่ากับ 0 เมื่อความอิ่มตัวด้วยน้ำมีค่าตั้งแต่ 75% ขึ้นไป



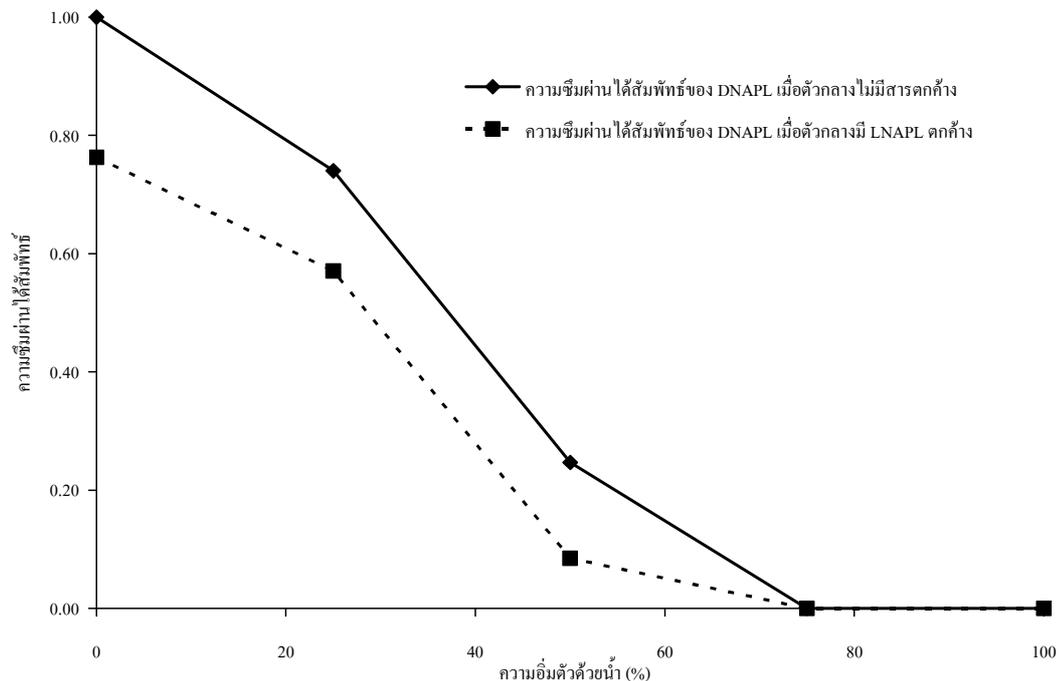
ภาพที่ 32 ความซึมผ่านได้สัมพัทธ์ของ LNAPL ผ่านตัวกลางที่อิ่มตัวด้วยน้ำที่ระดับต่างๆ และ ความซึมผ่านได้สัมพัทธ์ของ LNAPL ผ่านตัวกลางที่อิ่มตัวด้วยน้ำที่ระดับต่างๆ ที่ผ่านการซึมผ่านของ DNAPL มาก่อนหน้า

ตารางที่ 6 ผลการทดลองความซึมผ่านได้สัมพัทธ์ของ LNAPL

การทดลอง	ความอิ่มตัวได้ของน้ำ (%)				
	0	25	50	75	100
ความซึมผ่านได้สัมพัทธ์ของ LNAPL เมื่อ ตัวกลางไม่มีสารตกค้าง	1.00	0.71	0.12	0.00	0.00
ความซึมผ่านได้สัมพัทธ์ของ LNAPL เมื่อ ตัวกลางมี DNAPL ตกค้าง	0.76	0.63	0.05	0.00	0.00

จากตารางที่ 6 และภาพที่ 31 ความซึมผ่านได้สัมพัทธ์ของ LNAPL ผ่านตัวกลางที่อิ่มตัวด้วยน้ำที่ระดับต่างๆ ที่ผ่านการซึมผ่านของ DNAPL มาก่อนหน้า มีค่าน้อยกว่าความซึมผ่านได้สัมพัทธ์ของ LNAPL เมื่อตัวกลางไม่มีสารตกค้าง ซึ่งให้เห็นว่า เมื่อมีการปนเปื้อน DNAPL ก่อน จะทำให้การเคลื่อนที่ของ LNAPL มีการเปลี่ยนแปลงเป็นช้าลงไปจากการปนเปื้อน LNAPL เพียงอย่างเดียว

2. ความซึมผ่านได้สัมพัทธ์ของ DNAPL ผ่านตัวกลางที่อิ่มตัวด้วยน้ำที่ระดับต่างๆ และความซึมผ่านได้สัมพัทธ์ของ DNAPL ผ่านตัวกลางที่อิ่มตัวด้วยน้ำที่ระดับต่างๆ ที่ผ่านการซึมผ่านของ LNAPL มาก่อนหน้า



ภาพที่ 33 ความซึมผ่านได้สัมพัทธ์ของ DNAPL ผ่านตัวกลางที่อิ่มตัวด้วยน้ำที่ระดับต่างๆ และ ความซึมผ่านได้สัมพัทธ์ของ DNAPL ผ่านตัวกลางที่อิ่มตัวด้วยน้ำที่ระดับต่างๆ ที่ผ่านการซึมผ่านของ LNAPL มาก่อนหน้า

จากภาพที่ 33 ที่เส้นกราฟความซึมผ่านได้สัมพัทธ์ของ DNAPL เมื่อตัวกลางไม่มีสารตกค้างพบว่า ที่ความอิ่มตัวด้วยน้ำ 0% มีค่าความซึมผ่านได้สัมพัทธ์อยู่ที่ 1.00 เมื่อเพิ่มความอิ่มตัวด้วยน้ำของตัวกลางนั้น มีผลทำให้ค่าความซึมผ่านได้สัมพัทธ์มีค่าลดลง และค่าความซึมผ่านได้สัมพัทธ์มีค่าเท่ากับ 0 เมื่อความอิ่มตัวด้วยน้ำมีค่าตั้งแต่ 75% ขึ้นไป

ที่เส้นกราฟความซึมผ่านได้สัมพัทธ์ของ LNAPL เมื่อตัวกลางมี DNAPL ตกค้าง พบว่า ที่ความอิ่มตัวด้วยน้ำ 0% มีค่าความซึมผ่านได้สัมพัทธ์อยู่ที่ 0.76 เมื่อเพิ่มความอิ่มตัวด้วยน้ำของตัวกลางนั้น มีผลทำให้ค่าความซึมผ่านได้สัมพัทธ์มีค่าลดลง และค่าความซึมผ่านได้สัมพัทธ์มีค่าเท่ากับ 0 เมื่อความอิ่มตัวด้วยน้ำมีค่าตั้งแต่ 75% ขึ้นไป

ตารางที่ 7 ผลการทดลองหาความซึมผ่านได้สัมพัทธ์ของ DNAPL

การทดลอง	ความอิ่มตัวได้ของน้ำ (%)				
	0	25	50	75	100
ความซึมผ่านได้สัมพัทธ์ของ DNAPL เมื่อ ตัวกลางไม่มีสารตกค้าง	1.00	0.74	0.25	0.00	0.00
ความซึมผ่านได้สัมพัทธ์ของ DNAPL เมื่อ ตัวกลางมี LNAPL ตกค้าง	0.76	0.57	0.08	0.00	0.00

จากตารางที่ 7 และภาพที่ 32 ความซึมผ่านได้สัมพัทธ์ของ DNAPL ผ่านตัวกลางที่อิ่มตัวด้วยน้ำที่ระดับต่างๆ ที่ผ่านการซึมผ่านของ LNAPL มาก่อนหน้า มีค่าน้อยกว่าความซึมผ่านได้สัมพัทธ์ของ DNAPL เมื่อตัวกลางไม่มีสารตกค้าง ซึ่งให้เห็นว่า เมื่อมีการปนเปื้อน LNAPL ก่อน จะทำให้การเคลื่อนที่ของ DNAPL มีการเปลี่ยนแปลงเป็นช้าลงไปจากการปนเปื้อน LNAPL เพียงอย่างเดียว

สรุป

จากการศึกษาความสามารถเปียกได้ของพื้นผิวด้วยการทดสอบ imbibition rate, วิธีการหาความสัมพันธ์ระหว่างความดันคาปิลลารีและความอิ่มตัวด้วยน้ำ และความสามารถในการซึมผ่านสัมพัทธ์สำหรับการปนเปื้อนของเหลวที่ไม่ใช้น้ำแบบผสม สามารถสรุปผลการทดลองได้ดังนี้

1. การหาความสามารถเปียกได้ของพื้นผิวด้วยการทดสอบ imbibition rate

การทดสอบ imbibition rate นั้นตัวกลางที่ไม่ปนเปื้อนมีค่าความอิ่มตัวด้วยน้ำสูงสุดเฉลี่ยที่ $76.66 \pm 2.12\%$ ซึ่งต่างกันอย่างมีนัยสำคัญกับตัวกลางที่มีการปนเปื้อนเพียงชนิดเดียวทั้ง LNAPL และ DNAPL ที่มีค่าความอิ่มตัวด้วยน้ำสูงสุดเฉลี่ยที่ $84.98 \pm 1.87\%$ และ $82.96 \pm 1.93\%$ ตามลำดับ แต่เมื่อเทียบกับตัวกลางที่มีการปนเปื้อนแบบผสมนั้นพบว่าไม่ต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ โดยตัวกลางปนเปื้อน DNAPL แล้วปนเปื้อน LNAPL มีค่าความอิ่มตัวด้วยน้ำสูงสุดเฉลี่ยที่ $75.09 \pm 3.11\%$ และเมื่อตัวกลางปนเปื้อน LNAPL แล้วปนเปื้อน DNAPL มีค่าความอิ่มตัวด้วยน้ำสูงสุดเฉลี่ยที่ $73.88 \pm 1.21\%$ ตามลำดับ ซึ่งเมื่อพิจารณาจากสมการของลาปลาซแล้ว พบว่าแรงที่ผิวสัมผัสของๆเหลว และมุมสัมผัสที่เปลี่ยนแปลงไป เป็นผลทำให้ความอิ่มตัวด้วยน้ำสูงสุดเฉลี่ยเปลี่ยนแปลง จึงส่งผลให้ความสามารถเปียกได้เปลี่ยนแปลงไปด้วย

2. การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความดันคาปิลลารีและความอิ่มตัวด้วยน้ำพร้อมกับการคำนวณหาดัชนีชี้วัดความสามารถเปียกได้แบบ USBM

ในการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความดันคาปิลลารีและความอิ่มตัวด้วยน้ำพร้อมกับการคำนวณหาดัชนีชี้วัดความสามารถเปียกได้แบบ USBM นั้น พบว่าในระบบน้ำ-LNAPL มีค่าดัชนีอยู่ที่ 1.36 แต่เมื่อทดสอบด้วยระบบน้ำ-LNAPL เมื่อมี DNAPL ตกค้างอยู่ในระบบ มีค่าดัชนีอยู่ที่ 0.56 แสดงให้เห็นว่าความสามารถเปียกได้ลดลงเมื่อมีการปนเปื้อนแบบผสม ส่วนในระบบน้ำ- DNAPL ที่มีค่าดัชนีอยู่ที่ 0.395 แต่เมื่อทดสอบด้วยระบบน้ำ- DNAPL เมื่อมี LNAPL ตกค้างอยู่ในระบบ มีค่าดัชนีอยู่ที่ -1.63 แสดงให้เห็นว่าความสามารถเปียกได้ลดลงเช่นเดียวกันเมื่อมีการปนเปื้อนแบบผสม

3. การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความซึมผ่านได้สัมพัทธ์และความอิ่มตัวด้วยน้ำ

การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างความซึมผ่านได้สัมพัทธ์และความอิ่มตัวด้วยน้ำพบว่า ความซึมผ่านได้สัมพัทธ์มีค่าลดลงเมื่อความอิ่มตัวด้วยน้ำมีค่าเพิ่มขึ้นทั้งการซึมผ่านของ LNAPL เมื่อตัวกลางมีการตกค้างของ DNAPL และไม่มีการตกค้างของ DNAPL โดยความซึมผ่านได้สัมพัทธ์มีค่าเป็นศูนย์เมื่อความอิ่มตัวด้วยน้ำมีค่าตั้งแต่ 75% ขึ้นไป และการซึมผ่านของ DNAPL เมื่อตัวกลางมีการตกค้างของ LNAPL และไม่มีการตกค้างของ LNAPL โดยความซึมผ่านได้สัมพัทธ์มีค่าเป็นศูนย์เมื่อความอิ่มตัวด้วยน้ำมีค่าตั้งแต่ 75% ขึ้นไป

4. ความสัมพันธ์ระหว่างความดันคาปิลลารี – การอิ่มตัวด้วยน้ำ – ความสามารถในการซึมผ่านสัมพัทธ์สำหรับการปนเปื้อนของเหลวที่ไม่ใช้น้ำแบบผสม

เมื่อความอิ่มตัวด้วยน้ำในระบบมีค่า 100% ส่งผลให้สารอินทรีย์ไม่สามารถซึมผ่านตัวกลางได้ จำเป็นต้องใช้แรงดันที่สูงขึ้นเพื่อลดความอิ่มตัวด้วยน้ำลงเพื่อทำให้เกิดช่องว่างในตัวกลาง สารอินทรีย์จึงสามารถซึมผ่านตัวกลางได้ แต่เมื่อในระบบมีสารอินทรีย์อีกชนิดตกค้างอยู่ร่วมกับน้ำในระบบ ทำให้เกิดความกีดขวางกันขึ้นในตัวกลาง ความซึมผ่านได้ลดลง เป็นผลให้การลดความอิ่มตัวด้วยน้ำลงทำได้ยากขึ้น

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

กรมควบคุมมลพิษ. ม.ป.ป. คู่มือการระงับอุบัติภัยจากวัตถุอันตราย (Emergency Guidebook).

เกรียงศักดิ์ อุดมสินโรจน์. 2546. ของเสียอันตราย (Hazardous waste). พิมพ์ครั้งที่ 1.

ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยรังสิต, กรุงเทพฯ.

คณะกรรมการจัดทำปทานุกรมปฐพีวิทยา. 2541. ปทานุกรมปฐพีวิทยา.

สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. กรุงเทพฯ.

จันทกานต์ ทวีกุล. ม.ป.ป. กลศาสตร์ของไหล 1.

มณเฑียร กังสสิเทียม. 2543. กลศาสตร์ของดินด้านวิศวกรรม. พิมพ์ครั้งที่ 9.

สมาคมศิษย์เก่าวิศวกรรมชลประทานในพระบรมราชูปถัมภ์, กรุงเทพฯ.

วีระพล แต่สมบัติ. 2533. หลักอุทกวิทยา (Principal of Hydrology). พิมพ์ครั้งที่ 1.

ฟิสิกส์เซ็นเตอร์, กรุงเทพฯ.

ไสว พงษ์สุวรรณ. 2531. น้ำใต้ดิน (Groundwater). ภาควิชาวิศวกรรมทรัพยากรน้ำ

มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

Adamson, A.W. 1982. **Physical of Chemistry of Sursace**. 4th ed. Wiley, New York.

Amirfazli, A., D. Chatain and A.W. Neumann. 1998. Drop size dependence of contact angles for liquid tin on silica surface: line tension and its correlation with solid-liquid interfacial tension. **Colloids and Surfaces** (142): 183-188.

Anderson, W.G. 1986. **Wettability literature survey, Part 2: Wettability Measurements**. J. Pet. Technol.

- Chomsurin, C. 2003. **Analysis of pore-scale nonaqueous phase liquid dissolution in etched silicon pore network.** Ph.D. thesis, University of Illinois at Urbana Champaign.
- Dane, J.H., Oostrom, M. and Missildine, B.C. 1994. **Determination of Capillary Pressure-Saturation Curves Involving TCE, Water and Air for a Sand and a Sandy Clay Loam.** United States Environmental Protection Agency.
- Donaldson, E.C., Thomas, R.D. and Lorenz, P.B. 1969. **Wettability Determination and Its Effect on Recovery Efficiency.** Soc. Pet. Eng. J.
- Fisher Scientific. **Material Safety Data Sheet.** Fair Lawn, NJ.
- Freeze, R.A. and J.A. Cherry. 1979. **Groundwater.** Prentice-Hall, Inc., New Jersey.
- Guy, D.W., Crawford, R.J. and Mainwaring, D.E. 1996. **The Wetting Behaviour of Several Organic Liquids in Water on Coal Surfaces.** Elsevier Science Publishers.
- Hsai-Yang and John L.D. 2006. **Introductory Geotechnical Engineering.** Taylor & Francis, New York.
- Hillel, D. 1998. **Environmental Soil Physics.** Academic Press, San Diego, CA.
- Kueper, B.H. and Frind, E.O. 1991. **Two-Phase Flow in Heterogeneous Porous Media, 2. Model Application.** Water Resource Research.
- LaGrega, M.D., Buckingham, P.L. and Evans, J.C. 2001. **Hazardous Waste Management.** 2nd edition. McGraw-Hill Inc, New York.

- Mercer, J.W. and R.M. Cohen. 1990. A Review of Immiscible Fluids in the Subsurface: Properties, Models, Characterization and Remediation, **Journal of Contaminant Hydrology**.
- Morrow, N.R. 1990. Wettability and Its Effect on Oil Recovery, **Journal of Petroleum Technology**.
- Pankow, J.F. and Cherry, J.A. 1996. **Dense Chlorinated Solvents and Other DNAPLs in Groundwater**. Waterloo press, Oregon, USA.
- Soilmoisture Equipment Corporation (SEC). 2003. **Commercial Publications**. SEC, Santa Barbara, USA.
- Powers, S.E. and Tamplin, M.E. 1995. **Wettability of Porous Media after Exposure to Synthetic Gasolines**. Elsevier Science B.V., USA.
- Van Geel, P.J. and Roy, S.D. 2002. A Proposed Model to Include a Residual NAPL Saturation in a Hysteretic Capillary Pressure–Saturation Relationship. **Journal of Contaminant Hydrology**. Elsevier Science Publishers.
- Wilson, J.L., Conrad, S.H., Mason, W.R., Peplinski, W. and Hagan, E. 1990. **Laboratory Investigations of Residual Organic Liquids**. R.S. Kerr Environ. Res. Lab., Ada, OK, EPA.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก
ตารางบันทึกผลการทดลอง

ตารางบันทึกผลการทดลอง

ตารางผนวกที่ ก1 ผลการทดสอบอัตราการเติมน้ำ เมื่อตัวกลางไม่ได้รับการปนเปื้อน

เวลา (นาท)	การทดลองครั้งที่ 1			การทดลองครั้งที่ 2			การทดลองครั้งที่ 3			ความ อึดตัวด้วย น้ำเฉลี่ย (%)	ส่วน เบี่ยงเบน มาตรฐาน (%)
	น้ำหนักที่ วัดได้ (กรัม)	น้ำหนักน้ำที่ หายไป (กรัม)	ความอึดตัว ด้วยน้ำ (%)	น้ำหนักที่ วัดได้ (กรัม)	น้ำหนักน้ำ ที่หายไป (กรัม)	ความ อึดตัวด้วย น้ำ (%)	น้ำหนักที่ วัดได้ (กรัม)	น้ำหนักน้ำที่ หายไป (กรัม)	ความ อึดตัวด้วย น้ำ (%)		
0	361.90	0.00	0.00	361.90	0.00	0.00	361.90	0.00	0.00	0.00	0.00
10	353.84	8.06	33.87	354.91	6.99	29.38	354.83	7.07	29.71	30.99	2.50
20	349.81	12.09	50.81	359.90	11.00	46.23	350.93	10.97	46.10	47.71	2.68
30	347.01	14.89	62.58	348.11	13.79	57.96	348.09	13.81	58.04	59.53	2.64
40	344.98	16.92	71.11	346.08	15.72	66.49	346.03	15.87	66.70	68.10	2.61
50	344.05	17.85	75.02	344.89	17.01	71.49	344.97	16.93	71.15	72.55	2.14
60	343.67	18.23	76.62	344.37	17.53	73.67	344.55	17.35	72.92	74.40	1.96
70	343.50	18.40	77.33	344.14	17.76	74.64	344.36	17.54	73.72	75.23	1.88
80	343.42	18.48	77.67	344.05	17.85	75.02	344.32	17.58	73.88	75.52	1.94

ตารางผนวกที่ ก1 (ต่อ)

เวลา (นาที)	การทดลองครั้งที่ 1			การทดลองครั้งที่ 2			การทดลองครั้งที่ 3			ความ อึดตัวด้วย น้ำเฉลี่ย (%)	ส่วน เบี่ยงเบน มาตรฐาน (%)
	น้ำหนักที่ วัดได้ (กรัม)	น้ำหนักที่ หายไป (กรัม)	ความอึดตัว ด้วยน้ำ (%)	น้ำหนักที่ วัดได้ (กรัม)	น้ำหนักที่ หายไป (กรัม)	ความ อึดตัวด้วย น้ำ (%)	น้ำหนักที่ วัดได้ (กรัม)	น้ำหนักที่ หายไป (กรัม)	ความ อึดตัวด้วย น้ำ (%)		
90	343.37	18.53	77.88	343.98	17.92	75.31	344.28	17.62	74.05	75.75	1.95
120	343.31	18.59	78.13	343.88	18.02	75.73	344.19	17.71	74.43	76.10	1.88
150	343.23	18.67	78.47	343.83	18.07	75.94	344.16	17.74	74.56	76.32	1.98
180	343.18	18.72	78.68	343.81	18.09	76.03	344.14	17.76	74.64	76.45	2.05
240	343.13	18.77	78.89	343.78	18.12	76.15	344.12	17.78	74.72	76.59	2.12
300	343.11	18.79	78.97	343.77	18.13	76.20	344.10	17.80	74.81	76.66	2.12

ตารางผนวกที่ ก2 ผลการทดสอบอัตราการเติมน้ำ เมื่อตัวกลางได้รับการปนเปื้อน DNAPL

เวลา (นาท)	การทดลองครั้งที่ 1			การทดลองครั้งที่ 2			การทดลองครั้งที่ 3			ความ อิ่มตัวด้วย น้ำเฉลี่ย (%)	ส่วน เบี่ยงเบน มาตรฐาน (%)
	น้ำหนักที่ วัดได้ (กรัม)	น้ำหนักที่ หายไป (กรัม)	ความ อิ่มตัวด้วย น้ำ (%)	น้ำหนักที่ วัดได้ (กรัม)	น้ำหนักที่ ที่หายไป (กรัม)	ความ อิ่มตัวด้วย น้ำ (%)	น้ำหนักที่ วัดได้ (กรัม)	น้ำหนักที่ หายไป (กรัม)	ความ อิ่มตัวด้วย น้ำ (%)		
	0	361.90	0.00	0.00	361.90	0.00	0.00	361.90	0.00		
10	354.29	7.61	31.98	353.00	8.90	37.40	353.73	8.17	34.34	34.57	2.72
20	348.98	12.92	54.30	347.42	14.48	60.86	348.00	13.90	58.42	57.86	3.32
30	345.08	16.82	70.69	343.35	18.55	77.96	344.11	17.79	74.77	74.47	3.64
40	343.07	18.83	79.14	341.94	19.96	83.89	342.61	19.29	81.07	81.37	2.39
50	342.78	19.12	80.36	341.86	20.04	84.22	342.41	19.49	81.91	82.16	1.94
60	342.72	19.18	80.61	341.82	20.08	84.39	342.31	19.59	82.33	82.44	1.89
70	342.70	19.20	80.69	341.79	20.11	84.52	342.28	19.62	82.46	82.56	1.92
80	342.69	19.21	80.73	341.78	20.12	84.56	342.27	19.63	82.50	82.60	1.92

ตารางผนวกที่ ก2 (ต่อ)

เวลา (นาท)	การทดลองครั้งที่ 1			การทดลองครั้งที่ 2			การทดลองครั้งที่ 3			ความอึดตัว ด้วยน้ำ เฉลี่ย (%)	ส่วน เบี่ยงเบน มาตรฐาน (%)
	น้ำหนักที่ วัดได้ (กรัม)	น้ำหนักที่ ที่หายไป (กรัม)	ความอึดตัว ด้วยน้ำ (%)	น้ำหนักที่ วัดได้ (กรัม)	น้ำหนักที่ ที่หายไป (กรัม)	ความอึดตัว ด้วยน้ำ (%)	น้ำหนักที่ วัดได้ (กรัม)	น้ำหนักที่ ที่หายไป (กรัม)	ความอึดตัว ด้วยน้ำ (%)		
90	342.68	19.22	80.78	341.77	20.13	84.60	342.26	19.64	82.54	82.64	1.91
120	342.66	19.24	80.86	341.75	20.15	84.68	342.23	19.67	82.67	82.74	1.91
150	342.65	19.25	80.90	341.74	20.16	84.73	342.21	19.69	82.75	82.79	1.92
180	342.65	19.25	80.90	341.73	20.17	84.77	342.19	19.71	82.84	82.84	1.94
240	342.64	19.26	80.94	341.72	20.18	84.81	342.16	19.74	82.96	82.90	1.94
300	342.63	19.27	80.99	341.71	20.19	84.85	342.14	19.76	83.05	82.96	1.93

ตารางผนวกที่ ก3 ผลการทดสอบอัตราการเติมน้ำ เมื่อตัวกลางได้รับการปนเปื้อน LNAPL

เวลา (นาท)	การทดลองครั้งที่ 1			การทดลองครั้งที่ 2			การทดลองครั้งที่ 3			ความ อิ่มตัวด้วย น้ำเฉลี่ย (%)	ส่วน เบี่ยงเบน มาตรฐาน (%)
	น้ำหนักที่ วัดได้ (กรัม)	น้ำหนักน้ำที่ หายไป (กรัม)	ความ อิ่มตัวด้วย น้ำ (%)	น้ำหนักที่ วัดได้ (กรัม)	น้ำหนักน้ำ ที่หายไป (กรัม)	ความ อิ่มตัวด้วย น้ำ (%)	น้ำหนักที่ วัดได้ (กรัม)	น้ำหนักน้ำที่ หายไป (กรัม)	ความ อิ่มตัวด้วย น้ำ (%)		
0	361.90	0.00	0.00	361.90	0.00	0.00	361.90	0.00	0.00	0.00	0.00
10	354.28	7.62	32.02	355.70	6.20	26.06	355.90	6.00	25.22	27.77	3.71
20	348.88	13.02	54.72	351.32	10.58	44.46	351.59	10.31	43.33	47.50	6.28
30	344.82	17.08	71.78	347.89	14.01	58.88	348.38	13.52	56.82	62.49	8.11
40	342.56	19.34	81.28	345.26	16.64	69.93	345.67	16.23	68.21	73.14	7.10
50	342.00	19.90	83.63	343.32	18.58	78.09	343.92	17.98	75.57	79.10	4.12
60	341.90	20.00	84.05	342.12	19.78	83.13	342.89	19.01	79.89	82.36	2.19
70	341.88	20.02	84.14	341.68	20.22	84.98	342.49	19.41	81.58	83.57	1.77
80	341.84	20.06	84.31	341.52	20.38	85.65	342.37	19.53	82.08	84.01	1.80

ตารางผนวกที่ ก3 (ต่อ)

เวลา (นาที)	การทดลองครั้งที่ 1			การทดลองครั้งที่ 2			การทดลองครั้งที่ 3			ความอึดตัว ด้วยน้ำ เฉลี่ย (%)	ส่วน เบี่ยงเบน มาตรฐาน (%)
	น้ำหนักที่ วัดได้ (กรัม)	น้ำหนักที่ ที่หายไป (กรัม)	ความอึดตัว ด้วยน้ำ (%)	น้ำหนักที่ วัดได้ (กรัม)	น้ำหนักที่ ที่หายไป (กรัม)	ความอึดตัว ด้วยน้ำ (%)	น้ำหนักที่ วัดได้ (กรัม)	น้ำหนักที่ ที่หายไป (กรัม)	ความอึดตัว ด้วยน้ำ (%)		
90	341.83	20.07	84.35	341.46	20.44	85.90	342.27	19.63	82.50	84.25	1.70
120	341.81	20.09	84.43	341.36	20.54	86.32	342.20	19.70	82.79	84.51	1.77
150	341.80	20.10	84.48	341.32	20.58	86.49	342.16	19.74	82.96	84.64	1.77
180	341.79	20.11	84.52	341.27	20.63	86.70	342.13	19.77	83.09	84.77	1.82
240	341.77	20.13	84.60	341.23	20.67	86.87	342.10	19.80	83.21	84.89	1.85
300	341.76	20.14	84.64	341.20	20.70	87.00	342.08	19.82	83.30	84.98	1.87

ตารางผนวกที่ ก4 ผลการทดสอบอัตราการเติมน้ำ เมื่อตัวกลางได้รับการปนเปื้อน DNAPL ก่อน
แล้วปนเปื้อน LNAPL

เวลา (นาท)	การทดลองครั้งที่ 1			การทดลองครั้งที่ 2			การทดลองครั้งที่ 3			ความ อิ่มตัวด้วย น้ำเฉลี่ย (%)	ส่วน เบี่ยงเบน มาตรฐาน (%)
	น้ำหนักที่ วัดได้ (กรัม)	น้ำหนักน้ำที่ หายไป (กรัม)	ความ อิ่มตัวด้วย น้ำ (%)	น้ำหนักที่ วัดได้ (กรัม)	น้ำหนักน้ำ ที่หายไป (กรัม)	ความ อิ่มตัวด้วย น้ำ (%)	น้ำหนักที่ วัดได้ (กรัม)	น้ำหนักน้ำที่ หายไป (กรัม)	ความ อิ่มตัวด้วย น้ำ (%)		
	0	361.90	0.00	0.00	361.90	0.00	0.00	361.90	0.00		
10	353.01	8.89	37.36	352.74	9.61	38.50	353.55	8.35	35.09	36.98	1.74
20	345.92	15.98	67.16	347.27	14.63	61.49	346.02	15.88	66.74	65.13	3.16
30	343.65	18.25	76.70	345.20	16.70	70.19	344.64	17.26	72.54	73.14	3.30
40	343.45	18.45	77.54	344.99	16.91	71.07	344.42	17.48	73.46	74.02	3.27
50	343.39	18.51	77.79	344.94	16.96	71.28	344.33	17.57	73.84	74.30	3.28
60	343.38	18.52	77.83	344.89	17.01	71.49	344.30	17.60	73.97	74.43	3.19
70	343.36	18.54	77.92	344.88	17.02	71.53	344.28	17.62	74.05	74.50	3.22
80	343.35	18.55	77.96	344.85	17.05	71.66	344.27	17.63	74.09	74.57	3.18

ตารางผนวกที่ ก4 (ต่อ)

เวลา (นาท)	การทดลองครั้งที่ 1			การทดลองครั้งที่ 2			การทดลองครั้งที่ 3			ความอึดตัว ด้วยน้ำ เฉลี่ย (%)	ส่วน เบี่ยงเบน มาตรฐาน (%)
	น้ำหนักที่ วัดได้ (กรัม)	น้ำหนักที่ ที่หายไป (กรัม)	ความอึดตัว ด้วยน้ำ (%)	น้ำหนักที่ วัดได้ (กรัม)	น้ำหนักที่ ที่หายไป (กรัม)	ความอึดตัว ด้วยน้ำ (%)	น้ำหนักที่ วัดได้ (กรัม)	น้ำหนักที่ ที่หายไป (กรัม)	ความอึดตัว ด้วยน้ำ (%)		
90	343.34	18.56	78.00	344.83	17.07	71.74	344.26	17.64	74.14	74.63	3.16
120	343.31	18.59	78.13	344.80	17.10	71.87	344.22	17.68	74.30	74.77	3.16
150	343.29	18.61	78.21	344.78	17.12	71.95	344.20	17.70	74.39	74.85	3.16
180	343.28	18.62	78.26	344.76	17.14	72.03	344.18	17.72	74.47	74.92	3.14
240	343.36	18.64	78.34	344.73	17.17	72.16	344.16	17.74	74.56	75.02	3.12
300	343.24	18.66	78.42	344.71	17.19	72.25	344.15	17.75	74.60	75.09	3.11

ตารางผนวกที่ ก5 ผลการทดสอบอัตราการเติมน้ำ เมื่อตัวกลางได้รับการปนเปื้อน LNAPL ก่อน
แล้วปนเปื้อน DNAPL

เวลา (นาท)	การทดลองครั้งที่ 1			การทดลองครั้งที่ 2			การทดลองครั้งที่ 3			ความ อิ่มตัวด้วย น้ำเฉลี่ย (%)	ส่วน เบี่ยงเบน มาตรฐาน (%)
	น้ำหนักที่ วัดได้ (กรัม)	น้ำหนักน้ำที่ หายไป (กรัม)	ความ อิ่มตัวด้วย น้ำ (%)	น้ำหนักที่ วัดได้ (กรัม)	น้ำหนักน้ำ ที่หายไป (กรัม)	ความ อิ่มตัวด้วย น้ำ (%)	น้ำหนักที่ วัดได้ (กรัม)	น้ำหนักน้ำที่ หายไป (กรัม)	ความ อิ่มตัวด้วย น้ำ (%)		
	0	361.90	0.00	0.00	361.90	0.00	0.00	361.90	0.00		
10	354.68	7.22	30.34	353.48	8.42	35.39	354.95	6.95	29.21	31.65	3.29
20	349.80	12.10	50.85	347.77	14.13	59.38	349.98	11.92	50.10	53.44	5.15
30	347.54	14.36	60.35	344.68	17.22	72.37	346.55	15.35	64.51	65.74	6.10
40	345.87	16.03	67.37	344.34	17.56	73.80	345.17	16.73	70.31	70.49	3.22
50	344.96	16.94	71.19	344.29	17.61	74.01	344.93	16.97	71.32	72.17	1.59
60	344.67	17.23	72.41	344.28	17.62	74.05	344.88	17.02	71.53	72.66	1.28
70	344.51	17.39	73.09	344.26	17.64	74.14	344.82	17.08	71.78	73.00	1.18
80	344.45	17.45	73.34	344.25	17.65	74.18	344.81	17.09	71.82	73.11	1.20

ตารางผนวกที่ ก5 (ต่อ)

เวลา (นาท)	การทดลองครั้งที่ 1			การทดลองครั้งที่ 2			การทดลองครั้งที่ 3			ความอึดตัว ด้วยน้ำ เฉลี่ย (%)	ส่วน เบี่ยงเบน มาตรฐาน (%)
	น้ำหนักที่ วัดได้ (กรัม)	น้ำหนักน้ำ ที่หายไป (กรัม)	ความอึดตัว ด้วยน้ำ (%)	น้ำหนักที่ วัดได้ (กรัม)	น้ำหนักน้ำ ที่หายไป (กรัม)	ความอึดตัว ด้วยน้ำ (%)	น้ำหนักที่ วัดได้ (กรัม)	น้ำหนักน้ำ ที่หายไป (กรัม)	ความอึดตัว ด้วยน้ำ (%)		
90	344.39	17.51	73.59	344.24	17.66	74.22	344.78	17.12	71.95	73.25	1.17
120	344.29	17.61	74.01	344.21	17.69	74.35	344.75	17.15	72.08	73.48	1.22
150	344.26	17.64	74.14	344.19	17.71	74.43	344.73	17.17	72.16	73.58	1.24
180	344.24	17.66	74.22	344.17	17.73	74.51	344.71	17.19	72.25	73.66	1.23
240	344.21	17.69	74.35	344.14	17.76	74.64	344.67	17.23	72.41	73.80	1.21
300	344.19	17.71	74.43	344.12	17.78	74.72	344.65	17.25	72.50	73.88	1.21

ตารางผนวกที่ ก6 ผลการทดสอบความสัมพันธ์ระหว่างความดันคาปีลลารี และความอิ่มตัวด้วยน้ำ ระบบน้ำ – LNAPL เมื่อระบายน้ำออกจากระบบครั้งที่ 1

ความสูงน้ำ (cm)	ความสูง LNAPL (cm)	ความดันคาปีลลารี (cm)	น้ำหนักน้ำที่วัด ได้ (กรัม)	ความอิ่มตัว ด้วยน้ำ (%)
130.60	137.10	2.49	200.00	100.00
130.70	138.05	3.22	200.72	96.97
131.00	138.55	3.35	202.38	90.00
131.10	138.90	3.55	203.05	87.18
131.40	139.16	3.48	204.50	81.09
131.55	139.40	3.54	205.49	76.93
131.75	139.60	3.51	206.88	71.09
131.80	139.85	3.67	206.88	71.09
132.20	140.03	3.66	208.49	62.43
132.50	140.60	3.62	211.08	53.43
132.80	141.10	3.76	212.94	45.62
133.10	141.80	4.06	214.91	37.34
133.30	142.00	4.04	214.91	37.34
133.30	142.20	4.21	215.87	33.30
133.40	142.32	4.21	216.36	31.24

ตารางผนวกที่ ก6 (ต่อ)

ความสูงน้ำ (cm)	ความสูง LNAPL (cm)	ความดันคาปิลลารี (cm)	น้ำหนักน้ำที่วัด ได้ (กรัม)	ความอิ่มตัว ด้วยน้ำ (%)
133.50	142.50	4.27	216.79	29.44
133.71	142.93	4.43	217.42	26.79
133.71	143.08	4.56	218.09	23.97
133.78	143.40	4.77	218.47	22.38
133.86	143.76	5.00	218.71	21.37
133.90	144.00	5.17	219.06	19.90
133.96	144.30	5.37	219.30	18.89
134.00	144.70	5.68	219.59	17.67
134.10	145.00	5.83	219.86	16.53
134.00	145.40	6.28	220.10	15.52
134.05	145.90	6.66	220.22	15.02
134.10	146.30	6.96	220.40	14.26
134.10	146.70	7.31	220.48	13.93
134.10	147.00	7.57	220.61	13.38
134.18	147.42	7.85	220.69	13.05
134.12	148.00	8.41	220.78	12.67

ตารางผนวกที่ ก7 ผลการทดสอบความสัมพันธ์ระหว่างความดันคาปีลลารี และความอิ่มตัวด้วย
น้ำ ระบบน้ำ – LNAPL เมื่อเติมน้ำเข้าระบบ

ความสูงน้ำ (cm)	ความสูง LNAPL (cm)	ความดันคาปีลลารี (cm)	น้ำหนักน้ำที่วัด ได้ (กรัม)	ความอิ่มตัว ด้วยน้ำ (%)
134.18	148.35	8.66	220.78	12.67
134.18	146.00	6.62	220.69	13.05
134.16	145.20	5.95	220.65	13.21
134.16	143.85	4.78	220.59	13.47
134.12	142.70	3.82	220.46	14.01
133.45	140.30	2.41	216.29	31.54
133.30	139.90	2.22	215.63	34.31
133.25	139.85	2.22	215.10	36.54
131.10	139.00	1.64	214.46	39.23
132.80	138.50	1.51	212.94	45.62
132.60	138.20	1.45	212.16	48.89
132.45	137.80	1.25	211.23	52.80
132.35	137.50	1.39	209.88	58.48
132.10	136.90	0.82	209.00	62.18
132.00	136.25	0.36	208.12	65.87

ตารางผนวกที่ ก7 (ต่อ)

ความสูงน้ำ (cm)	ความสูง LNAPL (cm)	ความดันคาปิลลารี (cm)	น้ำหนักน้ำที่วัด ได้ (กรัม)	ความอิ่มตัว ด้วยน้ำ (%)
131.80	135.80	0.17	207.19	69.78
131.50	135.00	-0.23	205.48	76.97
131.40	134.50	-0.56	204.98	79.07
131.30	134.20	-0.72	204.45	81.30
131.40	133.90	-1.08	204.27	82.05
131.20	133.50	-1.23	203.74	84.28
131.20	133.10	-1.57	203.29	86.17
131.00	132.80	-1.63	203.01	87.35
130.90	132.40	-1.88	202.87	87.94
130.90	132.20	-2.05	202.80	88.23
130.90	132.10	-2.14	202.28	90.42

ตารางผนวกที่ ก8 ผลการทดสอบความสัมพันธ์ระหว่างความดันคาปีลลารี และความอิ่มตัวด้วยน้ำ ระบบน้ำ – LNAPL เมื่อระบายน้ำออกจากระบบครั้งที่ 2

ความสูงน้ำ (cm)	ความสูง LNAPL (cm)	ความดันคาปีลลารี (cm)	น้ำหนักน้ำที่วัดได้ (กรัม)	ความอิ่มตัวด้วยน้ำ (%)
130.90	136.70	1.85	202.28	90.42
131.00	138.30	3.13	203.32	86.05
131.10	138.70	3.38	203.80	84.03
131.20	139.20	3.71	204.14	82.60
133.20	145.30	6.99	215.48	34.94
133.60	146.10	7.29	218.21	23.47
133.80	146.40	7.35	218.95	20.36
133.90	147.50	8.20	219.81	16.74
134.00	147.90	8.45	220.11	15.48

ตารางผนวกที่ ก9 ผลการทดสอบความสัมพันธ์ระหว่างความดันคาปิลลารี และความอิ่มตัวด้วยน้ำ ระบบน้ำ – DNAPL (มี LNAPL ตกค้างในระบบ) เมื่อระบายน้ำออกจากระบบครั้งที่ 1

ความสูงน้ำ (cm)	ความสูง LNAPL (cm)	ความดันคาปิลลารี (cm)	น้ำหนักน้ำที่วัดได้ (กรัม)	ความอิ่มตัวด้วยน้ำ (%)
131.30	130.65	10.25	204.80	79.83
131.25	131.30	11.25	204.92	79.32
131.25	131.70	11.84	205.04	78.82
131.30	132.26	12.61	205.11	78.52
131.35	133.80	14.82	205.24	77.98
132.60	135.20	15.62	212.24	48.56
132.60	137.40	18.84	212.83	46.08
132.80	138.50	20.25	213.92	41.50
132.80	139.60	21.86	214.26	40.07
133.00	140.10	22.40	214.74	38.05
133.15	140.20	22.39	216.05	32.55
133.90	139.20	20.18	220.04	15.78

ตารางผนวกที่ ก10 ผลการทดสอบความสัมพันธ์ระหว่างความดันคาปีตลารี และความอิ่มตัวด้วยน้ำ ระบบน้ำ – DNAPL (มี LNAPL ตกค้างในระบบ) เมื่อเติมน้ำเข้าระบบ

ความสูงน้ำ (cm)	ความสูง LNAPL (cm)	ความดันคาปีตลารี (cm)	น้ำหนักน้ำที่วัดได้ (กรัม)	ความอิ่มตัวด้วยน้ำ (%)
133.90	133.10	11.24	220.04	15.78
133.90	124.20	-1.80	220.04	15.78
133.90	113.40	-17.62	220.04	15.78
133.80	102.75	-33.12	219.76	16.95
133.80	87.90	-54.87	219.43	18.34
133.75	81.40	-64.34	219.25	19.10
133.60	68.20	-83.53	218.77	21.11
159.30	30.56	-164.37	217.07	28.26
173.20	26.10	-184.80	215.54	34.69
202.80	25.80	-214.84	214.68	38.30
209.20	23.50	-224.61	212.72	46.54
228.00	23.20	-243.85	209.21	61.29
232.80	24.40	-246.89	205.53	76.76

ตารางผนวกที่ ก11 ผลการทดสอบความสัมพันธ์ระหว่างความดันคาปิลลารี และความอิ่มตัวด้วยน้ำ ระบบน้ำ – DNAPL (มี LNAPL ตกค้างในระบบ) เมื่อระบายน้ำออกจากระบบครั้งที่ 2

ความสูงน้ำ (cm)	ความสูง LNAPL (cm)	ความดันคาปิลลารี (cm)	น้ำหนักน้ำที่วัดได้ (กรัม)	ความอิ่มตัวด้วยน้ำ (%)
135.00	91.86	-50.27	205.53	76.76
135.50	124.42	-3.07	209.48	60.16
135.70	128.18	2.23	211.22	52.85
135.90	131.00	6.16	213.02	45.28
136.02	132.00	7.51	215.12	36.45
136.15	132.90	8.70	216.16	32.08
138.60	136.12	10.96	216.50	30.65
138.80	137.00	12.05	217.61	25.99

ตารางผนวกที่ ก12 ผลการทดสอบความสัมพันธ์ระหว่างความดันคาปิลลารี และความอิ่มตัวด้วยน้ำ ระบบน้ำ – DNAPL เมื่อระบายน้ำออกจากจากระบบครั้งที่ 1

ความสูงน้ำ (cm)	ความสูง LNAPL (cm)	ความดันคาปิลลารี (cm)	น้ำหนักน้ำที่วัดได้ (กรัม)	ความอิ่มตัวด้วยน้ำ (%)
118.00	118.23	5.36	200.00	100.00
120.40	120.10	5.70	215.66	34.19
120.60	120.45	6.01	216.95	28.76
120.75	120.70	6.23	217.99	24.39
120.90	121.00	6.52	218.15	23.72

ตารางผนวกที่ ก13 ผลการทดสอบความสัมพันธ์ระหว่างความดันคาปิลลารี และความอิ่มตัวด้วยน้ำ ระบบน้ำ – DNAPL เมื่อเติมน้ำเข้าระบบ

ความสูงน้ำ (cm)	ความสูง LNAPL (cm)	ความดันคาปิลลารี (cm)	น้ำหนักน้ำที่วัดได้ (กรัม)	ความอิ่มตัวด้วยน้ำ (%)
120.90	118.20	2.41	218.15	23.72
120.90	116.50	-0.08	218.15	23.72
120.90	115.96	-0.87	218.05	24.14
120.70	112.92	-5.12	214.27	40.03
120.60	112.43	-5.74	210.68	55.11
120.50	112.10	-6.12	208.21	65.50
118.90	110.90	-6.28	206.89	71.04
118.80	110.90	-6.18	205.25	77.94
118.60	110.90	-5.98	204.23	82.22
118.60	110.55	-6.49	202.79	88.27

ตารางผนวกที่ ก14 ผลการทดสอบความสัมพันธ์ระหว่างความดันคาปิลลารี และความอิ่มตัวด้วยน้ำ ระบบน้ำ – DNAPL เมื่อระบายน้ำออกจากระบบครั้งที่ 2

ความสูงน้ำ (cm)	ความสูง LNAPL (cm)	ความดันคาปิลลารี (cm)	น้ำหนักน้ำที่วัดได้ (กรัม)	ความอิ่มตัวด้วยน้ำ (%)
118.20	115.00	0.43	202.79	88.27
118.20	117.70	4.38	202.79	88.27
118.20	118.40	5.41	202.83	88.11
118.20	119.40	6.87	202.99	87.43
118.20	120.10	7.90	203.12	86.89
118.23	121.10	9.33	203.42	85.63
118.32	123.10	12.17	204.36	81.68
119.80	125.30	13.91	212.95	45.57
120.40	126.70	15.37	215.52	34.77
120.90	127.10	15.45	217.43	26.75
121.00	127.80	16.38	217.52	26.37

ตารางผนวกที่ ก15 ผลการทดสอบความสัมพันธ์ระหว่างความดันคาปิลลารี และความอิ่มตัวด้วยน้ำ ระบบน้ำ – LNAPL (มี DNAPL ตกค้างในระบบ) เมื่อระบายน้ำออกจากระบบครั้งที่ 1

ความสูงน้ำ (cm)	ความสูง LNAPL (cm)	ความดันคาปิลลารี (cm)	น้ำหนักน้ำที่วัดได้ (กรัม)	ความอิ่มตัวด้วยน้ำ (%)
118.00	121.50	1.58	202.32	90.25
118.00	122.50	2.45	202.37	90.04
118.00	123.00	2.88	202.45	89.70
118.00	125.70	5.22	202.65	88.86
118.00	129.30	8.34	202.92	87.73
118.50	132.00	10.18	205.18	78.23
118.70	135.50	13.01	206.73	71.72
119.50	140.80	16.80	210.76	54.78
120.30	143.10	17.99	215.36	35.45
121.10	150.40	23.51	220.50	13.84

ตารางผนวกที่ ก16 ผลการทดสอบความสัมพันธ์ระหว่างความดันคาปิลลารี และความอิ่มตัวด้วยน้ำ ระบบน้ำ – LNAPL (มี DNAPL ตกค้างในระบบ) เมื่อเติมน้ำเข้าระบบ

ความสูงน้ำ (cm)	ความสูง LNAPL (cm)	ความดันคาปิลลารี (cm)	น้ำหนักน้ำที่วัดได้ (กรัม)	ความอิ่มตัวด้วยน้ำ (%)
121.10	144.20	18.14	220.50	13.84
121.10	116.91	-5.49	220.40	14.26
120.90	111.76	-9.75	218.66	21.58
120.45	108.43	-12.18	215.24	35.95
120.00	107.22	-12.78	212.22	48.64
119.55	104.69	-14.52	208.84	62.85
118.95	100.96	-17.15	204.79	79.87

ตารางผนวกที่ ก17 ผลการทดสอบความสัมพันธ์ระหว่างความดันคาปิลลารี และความอิ่มตัวด้วยน้ำ ระบบน้ำ – LNAPL (มี DNAPL ตกค้างในระบบ) เมื่อระบายน้ำออกจากระบบครั้งที่ 2

ความสูงน้ำ (cm)	ความสูง LNAPL (cm)	ความดันคาปิลลารี (cm)	น้ำหนักน้ำที่วัดได้ (กรัม)	ความอิ่มตัวด้วยน้ำ (%)
117.80	106.40	-11.29	204.79	79.87
117.80	114.00	-4.71	205.10	78.57
117.80	116.80	-2.29	205.24	77.98
117.80	126.80	6.37	205.55	76.67
117.50	147.79	24.85	207.17	69.87
119.30	162.60	35.88	209.82	58.73
119.85	169.47	41.28	213.42	43.60
120.10	174.91	45.74	214.87	37.51
120.90	183.11	52.04	218.33	22.96
121.50	190.00	57.40	220.13	15.40

ตารางผนวกที่ ก18 ผลการทดลองความซึมผ่านได้ของ LNAPL

ชนิดของ ตัวกลาง	$S_w = 0 \%$			$S_w = 25 \%$			$S_w = 50 \%$					
	t (s)	H1 (cm)	H2 (cm)	K (cm/s)	t (s)	H1 (cm)	H2 (cm)	K (cm/s)	t (s)	H1 (cm)	H2 (cm)	K (cm/s)
ตัวกลางไม่ ปนเปื้อน	60	41.00	36.00	1.43×10^{-4}	60	41.00	37.40	1.01×10^{-4}	60	41.00	40.40	1.62×10^{-5}
	60	36.00	31.70	1.40×10^{-4}	60	37.40	34.20	0.99×10^{-4}	60	40.40	39.80	1.65×10^{-5}
	60	31.70	28.00	1.37×10^{-4}	60	34.20	31.30	0.98×10^{-4}	60	39.80	39.20	1.67×10^{-5}
ตัวกลาง ปนเปื้อน	60	41.00	37.10	1.10×10^{-4}	60	41.00	37.80	8.96×10^{-5}	60	39.00	36.86	6.22×10^{-5}
	60	37.10	33.70	1.06×10^{-4}	60	37.80	34.90	8.80×10^{-5}	60	36.86	34.76	6.47×10^{-5}
DNAPL	60	33.70	30.70	1.03×10^{-4}	60	34.90	32.24	8.74×10^{-5}	60	34.76	32.70	6.74×10^{-5}

ตารางผนวกที่ ก18 (ต่อ)

ชนิดของ ตัวกลาง	$S_w = 75 \%$			$S_w = 100 \%$				
	t (s)	H1 (cm)	H2 (cm)	K (cm/s)	t (s)	H1 (cm)	H2 (cm)	K (cm/s)
ตัวกลางไม่ ปนเปื้อน	60	41.00	41.00	0.00	60	41.00	41.00	0.00
	60	41.00	41.00	0.00	60	41.00	41.00	0.00
	60	41.00	41.00	0.00	60	41.00	41.00	0.00
ตัวกลาง ปนเปื้อน	60	41.00	41.00	0.00	60	41.00	41.00	0.00
	60	41.00	41.00	0.00	60	41.00	41.00	0.00
DNAPL	60	41.00	41.00	0.00	60	41.00	41.00	0.00

ตารางผนวกที่ ก19 ผลการทดลองความซึมผ่านได้ของ DNAPL

ชนิดของ ตัวกลาง	$S_w = 0 \%$			$S_w = 25 \%$			$S_w = 50 \%$					
	t (s)	H1 (cm)	H2 (cm)	K (cm/s)	t (s)	H1 (cm)	H2 (cm)	K (cm/s)	t (s)	H1 (cm)	H2 (cm)	K (cm/s)
ตัวกลางไม่ ปนเปื้อน	60	39.00	31.70	2.29×10^{-4}	60	41.00	36.20	1.37×10^{-4}	60	41.00	39.40	1.62×10^{-5}
	60	31.70	25.60	2.35×10^{-4}	60	36.20	32.20	1.29×10^{-4}	60	39.40	37.80	1.65×10^{-5}
	60	25.60	20.60	2.32×10^{-4}	60	32.20	28.70	1.27×10^{-4}	60	37.80	36.40	1.67×10^{-5}
ตัวกลาง ปนเปื้อน	60	41.00	34.70	1.84×10^{-4}	60	41.00	37.30	1.04×10^{-4}	60	41.00	40.44	1.52×10^{-5}
	60	34.70	29.60	1.75×10^{-4}	60	37.30	34.06	1.00×10^{-4}	60	40.44	39.90	1.48×10^{-5}
LNAPL	60	29.60	25.30	1.73×10^{-4}	60	34.06	31.10	1.00×10^{-4}	60	39.90	39.36	1.50×10^{-5}

ตารางผนวกที่ ก19 (ต่อ)

ชนิดของ ตัวกลาง	$S_w = 75 \%$			$S_w = 100 \%$				
	t (s)	H1 (cm)	H2 (cm)	K (cm/s)	t (s)	H1 (cm)	H2 (cm)	K (cm/s)
ตัวกลางไม่ ปนเปื้อน	60	41.00	41.00	0.00	60	41.00	41.00	0.00
	60	41.00	41.00	0.00	60	41.00	41.00	0.00
	60	41.00	41.00	0.00	60	41.00	41.00	0.00
ตัวกลาง ปนเปื้อน	60	41.00	41.00	0.00	60	41.00	41.00	0.00
	60	41.00	41.00	0.00	60	41.00	41.00	0.00
LNAPL	60	41.00	41.00	0.00	60	41.00	41.00	0.00

ภาคผนวก ข
ตัวอย่างการคำนวณ

1. ปริมาตรของช่องว่างระหว่างตัวกลางทราย (V_v) ที่บรรจุอยู่ใน Tempe[®] Cell

ปริมาตรของทรงกระบอกบรรจุตัวอย่าง ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5.37 cm สูง 3 cm

$$= \pi \times (5.37/2)^2 \times 3 = 67.945 \text{ cm}^3$$

ทรายที่ใช้ในการทดลอง มีความหนาแน่น 2.65 g/cm³ บรรจุอยู่ในทรงกระบอกบรรจุตัวอย่าง 117 g ดังนั้นทรายที่บรรจุอยู่ในทรงกระบอกบรรจุตัวอย่างจะมีปริมาตร

$$= 117 / 2.65 = 44.151 \text{ cm}^3$$

ดังนั้นช่องว่างระหว่างตัวกลางทรายจะมีปริมาตร

$$= 67.945 - 44.151 = 23.794 \text{ cm}^3$$

2. ปริมาณน้ำที่เติมลงในตัวกลาง

ในการทดลองส่วนที่ 1 เติมความชื้น (S_w) 15% ลงในตัวกลางทรายที่มีปริมาตรของช่องว่างระหว่างตัวกลาง 23.794 cm³ ดังนั้นจะต้องใช้น้ำ

$$= (15/100) \times 23.794 = 3.569 \text{ cm}^3$$

คิดเป็นน้ำหนักน้ำ 3.569 g (น้ำมีความหนาแน่น 1 g/cm³)

ในการทดลองส่วนที่ 2 เติมความชื้น (S_w) 100% ลงในตัวกลางทรายที่มีปริมาตรของช่องว่างระหว่างตัวกลาง 23.794 cm³ ดังนั้นจะต้องใช้น้ำ

$$= (100/100) \times 23.794 = 23.794 \text{ cm}^3$$

คิดเป็นน้ำหนักน้ำ 23.794 g (น้ำมีความหนาแน่น 1 g/cm³)

ในการทดลองส่วนที่ 3 เติมความชื้น (S_w) 0%, 25%, 50%, 75%, 100% ลงในตุ๊กกลางทรายที่มี ปริมาตรของช่องว่างระหว่างตุ๊กกลาง 23.794 cm^3 ดังนั้นจะต้องใช้น้ำ

$$\text{ที่ } S_w = 0\%, \quad = \quad (0/100) \times 23.794 \quad = \quad 0 \text{ cm}^3$$

คิดเป็นน้ำหนักน้ำ 0 g (น้ำมีความหนาแน่น 1 g/cm^3)

$$\text{ที่ } S_w = 25\%, \quad = \quad (25/100) \times 23.794 \quad = \quad 5.949 \text{ cm}^3$$

คิดเป็นน้ำหนักน้ำ 5.949 g (น้ำมีความหนาแน่น 1 g/cm^3)

$$\text{ที่ } S_w = 50\%, \quad = \quad (50/100) \times 23.794 \quad = \quad 11.897 \text{ cm}^3$$

คิดเป็นน้ำหนักน้ำ 11.897 g (น้ำมีความหนาแน่น 1 g/cm^3)

$$\text{ที่ } S_w = 75\%, \quad = \quad (75/100) \times 23.794 \quad = \quad 17.846 \text{ cm}^3$$

คิดเป็นน้ำหนักน้ำ 17.846 g (น้ำมีความหนาแน่น 1 g/cm^3)

$$\text{ที่ } S_w = 100\%, \quad = \quad (100/100) \times 23.794 \quad = \quad 23.794 \text{ cm}^3$$

คิดเป็นน้ำหนักน้ำ 23.794 g (น้ำมีความหนาแน่น 1 g/cm^3)

3. การทดสอบ imbibition rate

การคำนวณหาความอิ่มตัวด้วยน้ำ น้ำหนักน้ำที่วัดได้เมื่อเวลา 0 นาที เท่ากับ 361.90 g เมื่อเวลาผ่านไป 10 นาที น้ำหนักน้ำที่วัดได้เท่ากับ 353.84 g เพราะฉะนั้นมีน้ำเข้าไปในตุ๊กกลางทราย

$$= \quad \text{ปริมาณน้ำที่เวลา 0 นาที} - \text{ปริมาณน้ำที่เวลาใดๆ}$$

$$= 361.90 - 353.84 = 8.06 \text{ g}$$

คิดเป็นความอิมตัวด้วยน้ำ

$$= \text{น้ำที่เข้าไปในตัวกลางทราย/ปริมาตรช่องว่างระหว่างตัวกลาง}$$

$$= (8.06/23.794) \times 100 = 33.87\%$$

4. การหาความสัมพันธ์เชิงฮีสเทอรีซิสระหว่างความดันคาปิลลารีและความอิมตัวด้วยน้ำ

ที่ระดับความสูงอ้างอิง ($Z=0$) 107.20 cm จากระดับพื้นผิวห้องทดลอง น้ำหนักน้ำที่ขวดบรรจุน้ำวัดได้ 202.72 g ความสูงของระดับน้ำในขวดบรรจุน้ำวัดได้ 130.70 cm จากระดับพื้นผิวห้องทดลอง ความสูงของระดับ LNAPL ในขวดบรรจุ LNAPL วัดได้ 138.05 cm จากระดับพื้นผิวห้องทดลอง ความถ่วงจำเพาะของ LNAPL มีค่าเท่ากับ 0.866 ช่วงเริ่มต้นการทดลองวัดน้ำหนักในขวดบรรจุน้ำได้ 200.00 g และขณะนั้นตัวกลางมีความอิมตัวด้วยน้ำ 100% ปริมาตรของช่องว่างระหว่างตัวกลางทั้งหมดเท่ากับ 23.794 cm^3 น้ำมีความหนาแน่น 1 g/cm^3

$$\text{ความดันคาปิลลารีมีค่าเท่ากับ } P_c^{ow} = P^o - P^w$$

$$\text{โดย } P_c = \frac{(h_o \rho_o - h_w \rho_w)g}{\rho_w g}$$

$$P_c = h_o(\rho_o / \rho_w) - h_w$$

$$P_c = h_o \gamma_o - h_w$$

$$= [(138.05 - 107.20) \times 0.866] - 130.70$$

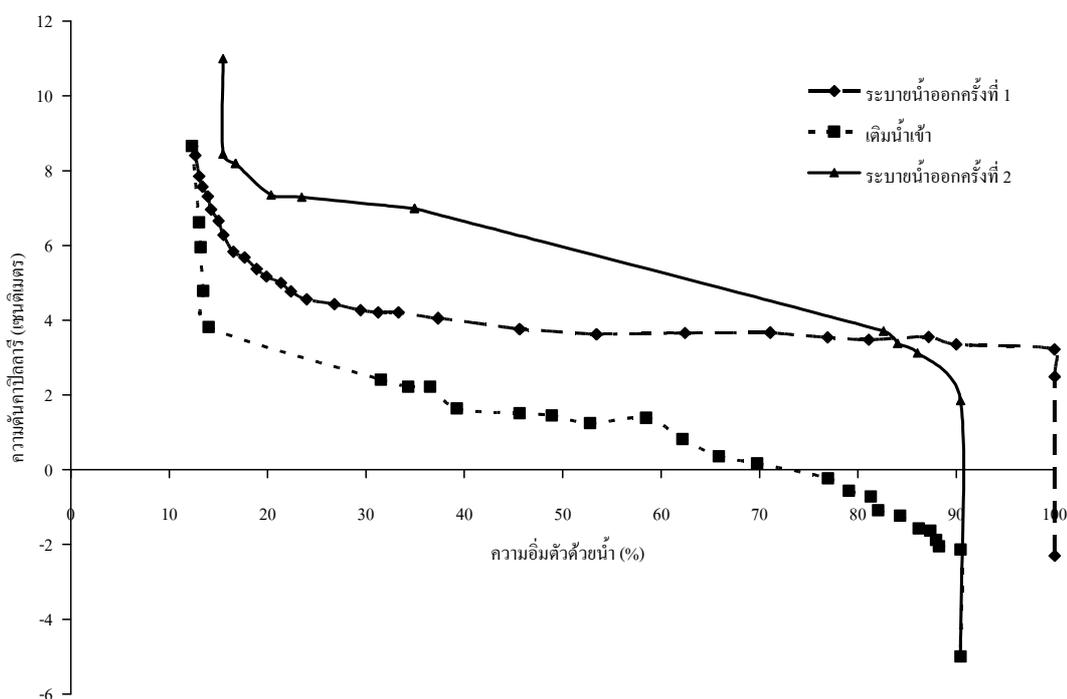
$$= 3.22 \text{ cm}$$

$$\begin{aligned}
 & \text{ความอึดตัวด้วยน้ำ คำนวณจาก ปริมาณน้ำที่เหลืออยู่ในตัวกลาง} \\
 & = \text{ปริมาณน้ำในตัวกลางที่เวลาเริ่มต้น} - \text{ปริมาณน้ำที่เปลี่ยนแปลงไปในขอบบรรจุน้ำ} \\
 & = 23.794 - (202.72 - 200.00) = 21.074 \text{ cm}^3
 \end{aligned}$$

คิดเป็นความอึดตัวด้วยน้ำของตัวกลาง

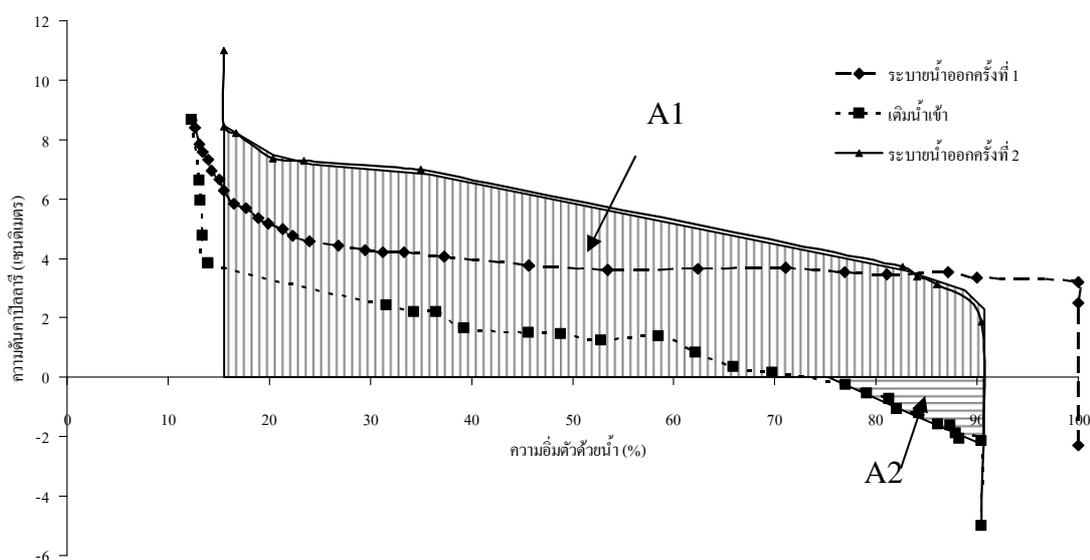
$$\begin{aligned}
 & = \text{ปริมาณน้ำที่เหลืออยู่ในตัวกลาง/ปริมาณช่องว่างระหว่างตัวกลาง} \\
 & = (21.074 / 23.794) \times 100 = 96.97\%
 \end{aligned}$$

การกำหนดหาดัชนีชี้วัดความสามารถเปียกได้แบบ USBM



ภาพผนวกที่ ข1 กราฟแสดงความสัมพันธ์เชิงฮิสเทอรีซิสระหว่างความดันคาปิลลารีและความอึดตัวด้วยน้ำ โดยการทดลองด้วยระบบ LNAPL – น้ำ

จากภาพผนวกที่ ข1 กราฟแสดงความสัมพันธ์เชิงฮิสเทอริซิระหว่างความดันคาปิลลารีและความอิ่มตัวด้วยน้ำ โดยการทดลองด้วยระบบ LNAPL – น้ำ นำมาหาพื้นที่ A1 จากพื้นที่ที่อยู่ระหว่างพื้นที่ที่ได้กราฟเส้นระบายน้ำออกครั้งที่ 2 และพื้นที่เหนือค่าความดันคาปิลลารีเท่ากับ 0 ส่วนพื้นที่ A2 หาได้จากพื้นที่ที่อยู่ระหว่างพื้นที่เหนือเส้นกราฟเติมน้ำเข้า และพื้นที่ใต้ค่าความดันคาปิลลารีเท่ากับ 0 แสดงดังภาพผนวกที่ ข2



ภาพผนวกที่ ข2 กราฟแสดงการหาพื้นที่ A1 และ A2 ของความสัมพันธ์เชิงฮิสเทอริซิระหว่างความดันคาปิลลารีและความอิ่มตัวด้วยน้ำ โดยทดลองด้วยระบบ LNAPL – น้ำ

$$\text{พื้นที่ A1} = 419.81 \text{ cm}^2, \quad \text{A2} = 18.10 \text{ cm}^2$$

$$\text{ดัชนี USBM} = \log(A1/A2) = \log(419.81/18.10)$$

$$= 1.36$$

5. การหาความซึมผ่านได้ของของเหลว

$$k = 2.3 \left(\frac{aL}{At} \right) \log \left(\frac{h_1}{h_2} \right)$$

เมื่อ a = พื้นที่หน้าตัดของหลอดวัดน้ำเข้าตัวอย่าง [cm^2]

h_1 = ระดับน้ำทางต้นน้ำ ณ จุดเริ่มการทดลอง [cm]

h_2 = ระดับน้ำทางต้นน้ำ ณ จุดสิ้นสุดการทดลอง [cm]

L = ความหนาของตัวอย่าง [cm]

A = พื้นที่หน้าตัดของตัวอย่าง [cm^2]

t = เวลาที่กำหนด [s]

จากพื้นที่หน้าตัดของหลอดวัดของเหลวเข้าตัวอย่าง เท่ากับ 0.5 cm^2 ระดับของเหลวในหลอดวัดของเหลว ณ จุดเริ่มการทดลอง เท่ากับ 41.00 cm หลังจากนั้นเวลาผ่านไป 60 วินาที ระดับของเหลวในหลอดวัดของเหลว ณ เวลานั้น เท่ากับ 36.00 cm ตัวอย่างมีความหนา 3 cm พื้นที่หน้าตัดของตัวอย่าง เท่ากับ 22.648 cm^2

ความซึมผ่านได้สัมพัทธ์ของของเหลวจะมีค่า

$$= 2.3 \times [(0.5 \times 3)/(22.648 \times 60)] \times \log (41.00/36.00)$$

$$= 1.43 \times 10^{-4} \text{ cm/s}$$

ประวัติการศึกษา และการทำงาน

ชื่อ –นามสกุล	กยม จันทร์เนียม
วัน เดือน ปี ที่เกิด	22 ธันวาคม 2525
สถานที่เกิด	พิษณุโลก
ประวัติการศึกษา	วศ.บ. (ชลประทาน) มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วศ.บ. (โยธา) มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ตำแหน่งหน้าที่การงานปัจจุบัน	วิศวกร 3
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	สำนักงานประปาสุโขมวิท การประปานครหลวง
ผลงานดีเด่นและรางวัลทางวิชาการ	-
ทุนการศึกษาที่ได้รับ	ทุนพัฒนาศักยภาพในการทำงานวิจัยของอาจารย์รุ่นใหม่ ประจำปีงบประมาณ 2550