



ใบรับรองวิทยานิพนธ์

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม)

ปริญญา

วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

สาขา

ภาควิชา

เรื่อง การศึกษาความสามารถเปียกได้ของ NAPL บนพื้นผิวหินปูน โดยการวัดมุมสัมผัสและส่วนโค้งฮิสเทอรีซิส

Wettability Study of NAPL and Limestone Surface by Measuring Contact Angles and Hysteresis Curves

นามผู้วิจัย นายเพชร วงศ์ธานี

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

ประธานกรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์จันทิมา ศรีสัมพันธ์, Ph.D.)

กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์สัญญา สิริวิทยาปกรณ์, Ph.D.)

หัวหน้าภาควิชา

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์มงคล ดำรงค์ศรี, Dr.Eng.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์กัญจนา ชีระกุล, D.Agr.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ เดือน พ.ศ.

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การศึกษาความสามารถเปียกได้ของ NAPL บนพื้นผิวหินปูน โดยการวัดมุมสัมผัสและส่วนโค้งฮิส-
เทอรีซิส

Wettability Study of NAPL and Limestone Surface by Measuring Contact Angles and Hysteresis
Curves

โดย

นายเพชร วงศ์ธานี

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม)

พ.ศ. 2553

พพร วงศ์ธานี 2553: การศึกษาความสามารถเปียกได้ของ NAPL บนพื้นผิวหินปูน โดยการวัดมุมสัมผัสและส่วนโค้งฮิสเทอรีซิส ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม) สาขา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ผู้ช่วยศาสตราจารย์จิม่า ศรีถัมพ์, Ph.D. 199 หน้า

จากการรายงานการปนเปื้อน NAPL ในชั้นใต้ดินหินปูน ณ ต.กลางดง อ.ปากช่อง จ.นครราชสีมา งานวิจัยนี้ได้อ้างอิงถึงการศึกษาความสามารถเปียกได้ (wettability) ในชั้นตัวกลางที่มีการปนเปื้อน โดยใช้ หินปูนเป็นตัวแทนของชั้นตัวกลาง สารโทลูอินเป็นตัวแทนสาร LNAPL และสาร TCE เป็นตัวแทนสาร DNAPL ตามลำดับ การประเมินความสามารถเปียกได้ในชั้นตัวกลางทำการวิจัย 2 ส่วนการทดลองได้แก่ การหา ความสัมพันธ์ความดันคาปิลลารี-ความอึดตัวด้วยน้ำและคำนวณดัชนี USBM จำนวน 4 รูปแบบการทดลอง ได้แก่ ระบบตัวกลางที่ได้รับความดันสารโทลูอินกับน้ำ ระบบตัวกลางที่ได้รับความดันสาร TCE กับน้ำ ระบบ ตัวกลางที่ได้รับความดันสาร TCE กับน้ำก่อนได้รับความดันสารโทลูอินกับน้ำ และระบบตัวกลางที่ได้รับความ ดันสารโทลูอินกับน้ำก่อนได้รับความดันสาร TCE กับน้ำ และการศึกษาความสามารถเปียกได้โดยการวัดมุม สัมผัสของสาร TCE บนพื้นผิวหินปูนภายใต้ระบบปนเปื้อน NAPL เพียงชนิดเดียว ซึ่งล้อมรอบด้วยน้ำใต้ดิน จำลอง และระบบปนเปื้อน NAPL แบบผสม ซึ่งล้อมรอบสารละลายโทลูอินที่มีปริมาณมากกว่าค่าการละลายได้ สูงสุด จากนั้นถ่ายภาพมุมและวัดมุมโดยโปรแกรม AutoCad

ผลการศึกษาประเมินความสามารถเปียกได้โดยการวิเคราะห์ดัชนี USBM 2 วัฏจักรจากส่วนโค้งฮิส เทอรีซิส พบว่าระบบความดันสารโทลูอินกับน้ำ ชีวัดได้ว่าชอบเปียกแบบผสม (neutral wet) ($USBM_1 \text{ index}$, $USBM_2 \text{ index} = 0.12, 0.22$) ระบบได้รับความดัน TCE กับน้ำก่อนได้รับความดันสารโทลูอินและน้ำ ชีวัดได้ว่า ชอบเปียกผสม (neutral wet) ($USBM_1 \text{ index}$, $USBM_2 \text{ index} = 1.99, -0.06$) ระบบความดัน TCE กับน้ำ ชีวัดได้ ว่าชอบเปียกน้ำอย่างมาก (strongly water wet) ($USBM_1 \text{ index}$, $USBM_2 \text{ index} = 1.17, 1.54$) และระบบได้รับ ความดันโทลูอินกับน้ำก่อนได้รับความดัน TCE กับน้ำ ชีวัดได้ว่าชอบเปียกน้ำมากขึ้น (strongly water wet) ($USBM_1 \text{ index}$, $USBM_2 \text{ index} = 0.30, 1.71$) ขณะที่ผลการวัดมุมสัมผัสเริ่มต้นของหยด TCE บนพื้นผิวหินปูน ในระบบการปนเปื้อนสาร NAPL ชนิดเดียวซึ่งล้อมรอบด้วยน้ำ ชีวัดว่าระบบชอบเปียกน้ำอย่างมาก (ช่วงค่ามุม สัมผัส 23.16 - 33.16 องศา) และมุมสัมผัสสุดท้ายชีวัดชอบเปียกผสม (ช่วงค่ามุมสัมผัส 53.85 - 92.22 องศา) และพื้นที่หยด TCE มีมวลลดลง เนื่องจากการถ่ายเทมวล TCE สู่ขอบเขตติดต่อโดยรอบ ส่วนผลการวัดมุม สัมผัสหยด TCE บนพื้นผิวหินปูนในระบบปนเปื้อน NAPL ผสมซึ่งล้อมรอบด้วยสารละลายโทลูอินมากกว่า solubility มีค่ามุมสัมผัสเริ่มต้นชีวัดชอบเปียกน้ำอย่างมาก (ช่วงค่ามุมสัมผัส 24.42 - 70.23 องศา) และค่ามุม สัมผัสสุดท้าย ชีวัดชอบเปียกผสม (ช่วงค่ามุมสัมผัส 79.68 - 125.70 องศา) โดยมีการถ่ายเทมวล TCE สู่ขอบเขต ติดต่อด้านโดยรอบน้อยมาก เนื่องจากการจำลองระบบปิดด้วยตัวมันเอง

Phachara Wongthanee 2010: Wettability Study of NAPL and Limestone Surface by Measuring Contact Angles and Hysteresis Curves. Master of Engineering (Environmental Engineering), Major Field: Environmental Engineering, Department of Environmental Engineering. Thesis Advisor: Assistant Professor Cheema Soralump, Ph.D. 199 pages.

According to contamination of NAPL (nonaqueous phase liquid) substance in limestone subsurface at Tambol Klangdong, Parkchong, Nakornrachasima province, this research was aimed to study the wettability in contaminated subsurface. This study used crystalline limestone as porous media. Toluene and TCE represented LNAPL and DNAPL substances, respectively. Changes in wettability were conducted by USBM index base on NAPL-water hysteresis curve and visualization of contact angles from contact angle cell experiment. Hysteresis curve was measured under the change between capillary pressure of -NAPL and water saturation in different situation; toluene and water system, TCE and water system, toluene –TCE and water system, TCE-toluene and water system in the media. Imaging the contact angle was done beneath the contamination of single NAPL, which was surrounded with imitated groundwater, and mixed NAPL, which was covered with exceeded solubility of toluene as closed system.

By analysing 2 cycles of USBM index from hysteresis curve, the result of the wettability assessment in porous media that the toluene-water system (USBM index₁, USBM index₂ = 0.12, 0.22), and the TCE-and toluene-water pressure system, respectively were neutral wet (USBM index₁ = 1.99, USBM index₂ = -0.06). Whereas only TCE-water system (USBM index₁ = 1.17, USBM index₂ = 1.54), and toluene-and TCE-water system, respectively were strongly water wet (USBM index₁ = 0.30, USBM index₂ = 1.71). The advancing contact angles of TCE on limestone surface with single NAPL contamination surrounding with groundwater were measured during 23.16 to 33.16 degrees and the receding contact angles were ranged in 53.85 to 92.22 degrees that change was toward neutral wet within 480 hours. The advancing contact angles of mixed NAPL contamination surrounding with exceeded toluene solubility were measured during 24.42 to 70.23 degrees and the receding contact angles were measured during 79.68 to 125.70 degrees that identified as neutral wet in 720 hours. And area of -TCE was hardly decreased because of adaptation to closed system by itself.

Student's signature

Thesis Advisor's signature

กิตติกรรมประกาศ

ขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จีมา ศรีลัมพ์ ประธานกรรมการที่ปรึกษา
วิทยานิพนธ์หลัก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สัญญา สิริวิทยาปกรณ์ กรรมการที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม
ที่ได้ให้ความเมตตา ให้คำปรึกษาในการเรียน การค้นคว้าวิจัย ตลอดจนการนำบทความไปเผยแพร่
ในการประชุมวิชาการ The 35th Congress on Science and Technology of Thailand รวมไปถึง
เสียสละเวลาตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์จนกระทั่งเสร็จสมบูรณ์ นอกจากนี้ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ
รองศาสตราจารย์ สุเทพ สิริวิทยาปกรณ์ ประธานการสอบ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เขมรัฐ
โอสถาพันธุ์ ผู้ทรงคุณวุฒิภายนอก ที่ได้กรุณาให้คำชี้แนะอันมีประโยชน์แก่ผู้วิจัย อีกทั้งได้กรุณา
ตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น ขอขอบพระคุณคุณรัฐธรรม วิสโพรและ
คุณสิริศาสตร์ ยังแสนภู ที่ได้ให้ความกรุณาสอนการใช้โปรแกรม autocad ให้คำชี้แนะแนวทางการ
วิจัย รวมถึงให้การปรึกษาอย่างเป็นกันเอง

ขอกราบขอบพระคุณทุนพัฒนาศักยภาพในการทำงานวิจัยของอาจารย์รุ่นใหม่
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ที่ให้การสนับสนุนงบประมาณในการทำวิจัย ขอกราบขอบพระคุณห้าง
หุ้นส่วนจำกัดโกวิทปูนขาว จ.สระบุรี ที่ให้ความอนุเคราะห์หินปูนขนาด 20-30 mesh เพื่อใช้ใน
การทำวิจัย ขอกราบขอบพระคุณบุคลากรภาควิชาวิศวกรรมปฐพี มก. ที่เอื้อเฟื้อ อุปกรณ์เครื่องมือ
ต่างๆในการทำวิจัย โดยเฉพาะอย่างยิ่ง พี่นก พี่หน่อง พี่สัน ปุ้ม ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการ
ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม มก. ที่ช่วยเสียสละเวลาในการชี้แนะแนวทางการทำวิจัย ขอขอบคุณ
เพื่อน พี่ น้องภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมทุกคน เพื่อนพี่น้องชมรมคุณก มข. เพื่อนพี่น้ององค์การ
บัณฑิตวิทยาลัยรุ่นที่ 20 มก.ทุกท่าน โดยเฉพาะที่ร้อยตรีวิวัฒน์ แสงเพชรที่ช่วยไปส่งรับหินปูน
ด้วยกัน ขอขอบคุณเพื่อนนันทวัฒน์ วรรณศรี วิศวกรโยธา ที่ช่วยแนะนำการใช้โปรแกรม Autocad

คุณค่าแห่งความดีและคุณประโยชน์อันพึงได้รับจากวิทยานิพนธ์เล่มนี้ ผู้วิจัยขอบพระคุณ
อาจารย์ผู้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ทุกท่าน คุณพ่อคำมูล คุณแม่ลัดดาวัลย์ วงศ์ธานี ที่ส่งเสริม
สนับสนุนการศึกษา ให้การดูแลและเป็นกำลังสำคัญในการศึกษาวิจัย รวมไปถึงน้องชายที่น่ารัก ที่
มอบกำลังใจให้พี่คนนี้เสมอมา

พชร วงศ์ธานี

กุมภาพันธ์ 2553

สารบัญ

	หน้า
สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(5)
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	(13)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	3
การตรวจเอกสาร	5
อุปกรณ์และวิธีการ	57
อุปกรณ์	57
วิธีการ	59
ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง	68
สรุปและข้อเสนอแนะ	142
สรุป	142
ข้อเสนอแนะ	143
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	145
ภาคผนวก	152
ภาคผนวก ก กราฟมาตรฐานและการคำนวณ	153
ภาคผนวก ข ตารางบันทึกผลการทดลอง	159
ประวัติการศึกษาและการทำงาน	199

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	Soil types and particle sizes	5
2	ลำดับค่าความพรุนของชั้นตัวกลาง	13
3	คุณสมบัติของทรายออกตาวา	24
4	คุณสมบัติของหินปูนและปูนขาว	28
5	แสดงการเปรียบเทียบความเข้มข้นทั้งหมดของสารประกอบคาร์บอนระหว่างระบบเปิดและระบบปิด	31
6	ประเภทของส่วนประกอบอินทรีย์ที่ละลายน้ำในน้ำใต้ดิน	48
7	สรุปผลการทดลองอัตราการเติมน้ำในรูปแบบต่างๆ	69
8	สรุปผลการทดลองความสัมพันธ์ความดันคาปิลลารีและความอิ่มตัวด้วยน้ำจำนวน 4 รูปแบบการทดลอง	96
9	ดัชนีบ่งชี้ความสามารถเปียกได้แบบ USBM ในชั้นตัวกลางหินปูนโดยคำนวณจากความสัมพันธ์ระหว่างความดันคาปิลลารีและความอิ่มตัวด้วยน้ำ	98
10	มุมสัมผัสเริ่มต้น (advancing contact angle) และมุมสัมผัสสุดท้าย (receding contact angle) ของการทดลองวัดมุมสัมผัส TCE บนพื้นผิวหินปูน ซึ่งล้อมรอบด้วยน้ำใต้ดินจำลอง (DDD water)	117
11	มุมสัมผัสเริ่มต้น (advancing contact angle) และมุมสัมผัสสุดท้าย (receding contact angle) ของการทดลองวัดมุมสัมผัส TCE บนพื้นผิวหินปูน ซึ่งล้อมรอบด้วยสารละลายโทลูอีนที่มีปริมาณมากกว่าค่าการละลายได้สูงสุด	137

ตารางผนวกที่

ก1	การคำนวณหาความหนาแน่นหินปูน ต.กลางดง อ.ปากช่อง จ.นครราชสีมา โดยใช้วิธีการทดลองแรงลอยตัวในน้ำ (Buoyancy techniques)	155
ก2	การวิเคราะห์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (Sieve analysis) ชั้นตัวกลางรูพรุนหินปูน ต. กลางดง อ. ปากช่อง จ.นครราชสีมา	156

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางผนวกที่		หน้า
ข1	ผลการทดสอบอัตราการเติมน้ำที่ค่า pH 4.9 ในชั้นตัวกลางที่ได้รับการปนเปื้อนสาร NAPL รูปแบบต่างๆ	159
ข2	ผลการทดสอบอัตราการเติมน้ำที่ค่า pH 6.7 ในชั้นตัวกลางที่ได้รับการปนเปื้อนสาร NAPL รูปแบบต่างๆ	160
ข3	ผลการทดสอบอัตราการเติมน้ำที่ค่า pH 8.0 ในชั้นตัวกลางที่ได้รับการปนเปื้อนสาร NAPL รูปแบบต่างๆ	161
ข4	ผลการทดสอบอัตราการเติมน้ำ ในชั้นตัวกลางที่ไม่ได้รับการปนเปื้อนสาร NAPL ที่มีการเปลี่ยนแปลงค่า pH	162
ข5	ผลการทดสอบอัตราการเติมน้ำ ในชั้นตัวกลางที่ได้รับการปนเปื้อนสาร LNAPL ที่มีการเปลี่ยนแปลงค่า pH	163
ข6	ผลการทดสอบอัตราการเติมน้ำ ในชั้นตัวกลางที่ได้รับการปนเปื้อนสาร DNAPL ที่มีการเปลี่ยนแปลงค่า pH	164
ข7	ผลการทดสอบอัตราการเติมน้ำ ในชั้นตัวกลางที่ได้รับการปนเปื้อนสาร LNAPL ก่อน ต่อมาทำการปนเปื้อนด้วยสาร DNAPL ที่มีการเปลี่ยนแปลงค่า pH	165
ข8	ผลการทดสอบอัตราการเติมน้ำ ในชั้นตัวกลางที่ได้รับการปนเปื้อนสาร DNAPL ก่อนต่อมาทำการปนเปื้อนด้วยสาร LNAPL ที่มีการเปลี่ยนแปลงค่า pH	166
ข9	ผลการทดลองส่วนโค้งไฮสเทอรีซิสหาความสัมพันธ์ระหว่างความดันคาปิลลารีและความอิ่มตัวด้วยน้ำในกระบวนการระบายน้ำและการเติมน้ำเข้าออกชั้นตัวกลางหินปูน ในระบบแรงดันสารโทลูอิน และน้ำ	167
ข10	ผลการทดลองส่วนโค้งไฮสเทอรีซิสหาความสัมพันธ์ระหว่างความดันคาปิลลารีและความอิ่มตัวด้วยน้ำในกระบวนการระบายน้ำและการเติมน้ำเข้าออกชั้นตัวกลางหินปูน ในระบบแรงดันสารไตรคลอโรเอธิลีน และน้ำ	170

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางผนวกที่	หน้า
ข11 ผลการทดลองส่วนโค้งฮิสเทอรีซิสหาความสัมพันธ์ระหว่างความดันคาปิลลารีและความอิ่มตัวด้วยน้ำในกระบวนการระบายน้ำและการเติมน้ำเข้าออกชั้นตัวกลางหินปูน ในระบบได้รับแรงดันสารโทลูอินก่อนได้รับสารไตรคลอโรเอธิลีนและน้ำ	174
ข12 ผลการทดลองส่วนโค้งฮิสเทอรีซิสหาความสัมพันธ์ระหว่างความดันคาปิลลารีและความอิ่มตัวด้วยน้ำในกระบวนการระบายน้ำและการเติมน้ำเข้าออกชั้นตัวกลางหินปูน ในระบบได้รับแรงดันสารไตรคลอโรเอธิลีนก่อนได้รับสารโทลูอินและน้ำ	178
ข13 ผลการทดลองวัดมุมสัมผัสระหว่างสาร TCE บนพื้นผิวหินปูน ล้อมรอบด้วยน้ำใต้ดินจำลอง ฐาน 1	181
ข14 ผลการทดลองวัดมุมสัมผัสระหว่างสาร TCE บนพื้นผิวหินปูน ล้อมรอบด้วยน้ำใต้ดินจำลอง ฐาน 2	183
ข15 ผลการทดลองวัดมุมสัมผัสระหว่างสาร TCE บนพื้นผิวหินปูน ล้อมรอบด้วยน้ำใต้ดินจำลอง ฐาน 3	185
ข16 ผลการทดลองวัดมุมสัมผัสระหว่างสาร TCE บนพื้นผิวหินปูน ล้อมรอบด้วยสารละลายโทลูอินเกินค่าความสามารถละลายได้สูงสุด ฐาน 1	186
ข17 ผลการทดลองวัดมุมสัมผัสระหว่างสาร TCE บนพื้นผิวหินปูน ล้อมรอบด้วยสารละลายโทลูอินเกินค่าความสามารถละลายได้สูงสุด ฐาน 2	189
ข18 ผลการทดลองวัดมุมสัมผัสระหว่างสาร TCE บนพื้นผิวหินปูน ล้อมรอบด้วยสารละลายโทลูอินเกินค่าความสามารถละลายได้สูงสุด ฐาน 3	191

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	U.S. Department of agriculture soil classification chart	6
2	Schematic showing the behavior and distribution of (a) LNAPL and (b) DNAPL in the subsurface	7
3	การจัดแบ่งชั้นใต้ดิน	14
4	การกระจายตัวของแรงดันและการสูญเสียเฮดในการไหลผ่านคอลัมน์ทราย	15
5	ข้อมูลการแพร่ของสาร TCE ที่ละลายในการทับถมของดินเหนียวที่ไม่เป็นสัดส่วน ภายใต้การสะสมตัวของเฟสสาร TCE อย่างอิสระ ความสามารถละลายได้ของสาร TCE เท่ากับ 1100 mg/L; ซึ่งน้ำมันไม่มีกระบวนการซับ (sorption)	19
6	ไดอะแกรมแสดงการสนับสนุนของโมเลกุลการแพร่และกลไกการกระจายตัวของ ความ เข้มข้นทางด้านหน้าในคอลัมน์ด้วยขั้นตอนการฉีดสารเข้าไป	19
7	ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณและอัตราส่วนของสัมประสิทธิ์การกระจายในแนว ยาวและสัมประสิทธิ์ของโมเลกุลการแพร่ในคอลัมน์ทรายที่มีขนาดเท่ากัน	20
8	ผลกระทบของการกระจายในการเคลื่อนที่ของสารปนเปื้อน	22
9	การเคลื่อนที่ของความเข้มข้นสาร โดยวิธีการพา (advection) เท่านั้น (a) แหล่ง ต่อเนื่อง (b) เป็นลูก	23
10	ผลกระทบการกระจายและการหน่วงในเคลื่อนที่ของสารปนเปื้อนจากแหล่ง ต่อเนื่อง: (a) ความเข้มข้นสัมพันธ์เปรียบเทียบกับวิธีการพาเท่านั้น; (b) รูปแบบ ของพุ่ม (plume)	23
11	ความเข้มข้นโดยรวมของสารประกอบคาร์บอเนต (C_{T,CO_3}) เทียบกับเปลี่ยนแปลง ค่า pH ในระบบเปิดที่อุณหภูมิ 25 °C	31
12	ความเข้มข้นโดยรวมของสารประกอบคาร์บอเนต (C_{T,CO_3}) เทียบกับการ เปลี่ยนแปลงค่า pH ในระบบปิดที่อุณหภูมิ 25 °C	32
13	การวัดส่วนโค้งแรงดันคาปิลลารี-ค่าความอึดด้วยน้ำสำหรับระบบสารเปอร์คลอรีน เอทีลิน- น้ำ	34
14	ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันคาปิลลารี-ความอึดด้วยน้ำแสดงภาวะไฮสเทรีซิส	35

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
15	มุมสัมผัสสำหรับเฟสหยดสารอินทรีย์ในน้ำ: (a) ระบบเปียกน้ำด้วยทิศทางแสดง ความ สัมพันธ์ระหว่างพลังงานแรงตึงผิว (Young's equation) และ (b) เงื่อนไขการ เปียกด้วยเฟสสารอินทรีย์	37
16	มุมสัมผัสของ NAPL บนพื้นผิวของแข็งเป็น strongly water-wet ล้อมรอบด้วยน้ำ	38
17	มุมสัมผัสของ NAPL บนพื้นผิวของแข็งที่เป็น strongly oil-wet ล้อมรอบด้วยน้ำ	38
18	ฮิสเทอรีซิสของมุมสัมผัส	39
19	หยดของเหลวที่เอียงจากระนาบด้วยมุม α	40
20	ส่วนโค้งแรงดันคาปิลลารี-ค่าความอิ่มตัวด้วยน้ำและสมการสำหรับค่าดัชนี ความสามารถเปียกได้โดย (a) วิธี Amott-Harvey และ (b) วิธี USBM อนุกรมของ กราฟส่วนโค้งประกอบด้วย 1 = primary drainage; 2 = spontaneous imbibition; 3 = forced imbibition; และ 4 = secondary drainage.	42
21	ผลจากการทดสอบอัตราการเติมน้ำเทียบกับเวลา สามารถบ่งชี้ลักษณะการเปียกได้ 3 รูปแบบในชั้นตัวกลางรูพรุน	43
22	(a) แรงตึงระหว่างผิวสำหรับระบบ PCE-น้ำ-ควอดซ์ ที่ประกอบด้วยกรดออกทา โนอิกและโดเดซิลเอมีนในบทบาทค่า pH (ด้านบน) (b) มุมสัมผัสสถอดยสำหรับ ระบบ PCE-น้ำ-ควอดซ์ ที่ประกอบด้วยกรดออกทาโนอิกและโดเดซิลเอมีนใน บทบาทค่า pH (ด้านล่าง)	54
23	กราฟส่วนโค้งแรงดันคาปิลลารีระบายน้ำครั้งแรกสำหรับระบบ PCE-น้ำ-ทราย ออกตาว่า ที่มีการแปรเปลี่ยนค่า pH และความเข้มข้นของกรดออกทาโนอิก โดยรวม	55
24	แรงตึงระหว่างผิวระหว่าง o-xylene และ น้ำ และบทบาทของความเข้มข้นกรดออก ทาโนอิกโดยรวม โดยปริมาตรของเฟสของเหลวที่ค่า pH 3 ค่า คือ pH 3, pH 6.5, pH 8.6 โดยใช้ช่วงค่าความเชื่อมั่นที่ 95 % สำหรับทั้งการวัดพื้นผิวและแรงตึง ระหว่างผิว	56
25	แผนผังวิธีวิจัยการทดลอง	59

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
26	วิธีการทดสอบอัตราการเติมน้ำ	62
27	อุปกรณ์การทดสอบอัตราการเติมน้ำ (Imbibition rate test) (Soil moisture equipment)	63
28	อุปกรณ์การทดสอบส่วนโค้งฮิสเทอรีซิส (Pc-Sw curves)	64
29	อุปกรณ์เซลล์วัดมุมสัมผัส ในรูปแบบการทดลองหยด TCE บนพื้นผิวหินปูน ล้อมรอบด้วยน้ำใต้ดินจำลอง ซึ่งได้ทำการทดลองทั้งหมด 3 ซ้ำ (3 ฐานการทดลอง)	65
30	แสดงผลการวัดมุมสัมผัสโดยใช้โปรแกรม Autocad version 2005 ซึ่งกำหนดให้มุม θ_1 เป็นผลการวัดมุมสัมผัสซ้าย และมุม θ_2 เป็นผลการวัดมุมสัมผัสขวา	66
31	อุปกรณ์เซลล์วัดมุมสัมผัส ในรูปแบบการทดลองหยด TCE บนพื้นผิวหินปูน ล้อมรอบด้วยสารละลายไทลูอินที่มีปริมาณมากเกินกว่าค่าการละลายได้สูงสุด ซึ่งได้ทำการทดลองทั้งหมด 3 ซ้ำ (3 ฐานการทดลอง)	67
32	กราฟแสดงความสัมพันธ์อัตราการเติมน้ำทุกรูปแบบการทดลองเทียบกับการเปลี่ยนแปลงเวลา 300 นาที	74
33	กราฟแสดงความสัมพันธ์อัตราการเติมน้ำรูปแบบการทดลองค่า pH 4.9 ในชั้นตัวกลางที่มีการปนเปื้อนสารรูปแบบต่างๆ เทียบกับเวลา 300 นาที	75
34	กราฟแสดงความสัมพันธ์อัตราการเติมน้ำรูปแบบการทดลองค่า pH 6.7 ในชั้นตัวกลางที่มีการปนเปื้อนสารรูปแบบต่างๆ เทียบกับเวลา 300 นาที	76
35	กราฟแสดงความสัมพันธ์อัตราการเติมน้ำรูปแบบการทดลองค่า pH 8.0 ในชั้นตัวกลางที่มีการปนเปื้อนสารรูปแบบต่างๆ เทียบกับเวลา 300 นาที	77
36	กราฟแสดงความสัมพันธ์อัตราการเติมน้ำรูปแบบการทดลองชั้นตัวกลางที่ไม่ได้รับการปนเปื้อนสาร NAPL ที่ค่า pH ต่างๆ เทียบกับเวลา 300 นาที	78

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
37	ความสัมพันธ์อัตราการเติมน้ำในชั้นตัวกลางที่ได้รับการปนเปื้อนสาร DNAPL ก่อนจากนั้นได้รับการปนเปื้อนด้วยสาร LNAPL ที่ค่า pH ต่างๆ เทียบกับเวลา 300 นาที	79
38	ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเติมน้ำในชั้นตัวกลางที่ได้รับการปนเปื้อนสาร LNAPL เพียงชนิดเดียว ที่ค่า pH ต่างๆ เทียบกับเวลา 300 นาที	80
39	ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเติมน้ำในชั้นตัวกลางที่ได้รับการปนเปื้อนสาร DNAPL เพียงชนิดเดียว ที่ค่า pH ต่างๆ เทียบกับเวลา 300 นาที	81
40	ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเติมน้ำในชั้นตัวกลางที่ได้รับการปนเปื้อนสาร LNAPL ก่อน ต่อมาได้รับการปนเปื้อนด้วยสาร DNAPL ที่ค่า pH ต่างๆ เทียบกับเวลา 300 นาที	81
41	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันคาปิลลารีและความอิ่มตัวด้วยน้ำ โดยการทดลองด้วยระบบ LNAPL-น้ำ-LNAPL-น้ำ	86
42	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันคาปิลลารีและความอิ่มตัวด้วยน้ำ โดยการทดลองด้วยระบบ DNAPL-น้ำ-DNAPL-น้ำ	89
43	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันคาปิลลารีและความอิ่มตัวด้วยน้ำ ด้วยระบบ DNAPL-น้ำ-LNAPL-น้ำ	92
44	ความสัมพันธ์ระหว่างความดันคาปิลลารี และความอิ่มตัวด้วยน้ำ ด้วยระบบ LNAPL-น้ำ-DNAPL-น้ำ	95
45	การทดลองวัดมุมสัมผัสเริ่มต้น ณ เวลาชั่วโมงที่ 0 ของหยด TCE บนพื้นผิวหินปูน ซึ่งล้อมรอบด้วยน้ำใต้ดินจำลอง ทั้ง 3 ฐาน	102
46	การทดลองวัดมุมสัมผัสที่เวลาต่าง ๆ กัน ของหยด TCE บนพื้นผิวหินปูน ซึ่งล้อมรอบด้วยน้ำใต้ดินจำลอง ฐาน 1	103
47	ทดลองวัดมุมสัมผัสที่เวลาต่าง ๆ กัน ของหยด TCE บนพื้นผิวหินปูน ซึ่งล้อมรอบด้วยน้ำใต้ดินจำลอง ฐาน 2	104

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
48	การทดลองวัดมุมสัมพัทธ์ที่เวลาต่าง ๆ กัน ของหยด TCE บนพื้นผิวหินปูน ซึ่งล้อมรอบด้วยน้ำใต้ดินจำลอง ฐาน 3	105
49	กราฟแสดงการหามุมสัมพัทธ์สลายตัว DNAPL ที่กระทำบนพื้นผิวหินปูนและมีน้ำล้อมรอบเทียบกับการเปลี่ยนแปลงทุกช่วงเวลาในฐานที่ 1	106
50	กราฟแสดงการหามุมสัมพัทธ์สลายตัว DNAPL ที่กระทำบนพื้นผิวหินปูนและมีน้ำล้อมรอบเทียบกับเวลา 16 ชั่วโมงในฐานที่ 1	107
51	กราฟแสดงการหามุมสัมพัทธ์สลายตัว DNAPL ที่กระทำบนพื้นผิวหินปูนและมีน้ำล้อมรอบเทียบกับเวลาหลังจากผ่านไป 16 ชั่วโมงแรกจนเสร็จสิ้นการทดลองในฐานที่ 1	107
52	กราฟแสดงการหามุมสัมพัทธ์สลายตัว DNAPL ที่กระทำบนพื้นผิวหินปูนและมีน้ำล้อมรอบเทียบกับการเปลี่ยนแปลงทุกช่วงเวลาในฐานที่ 2	109
53	กราฟแสดงการหามุมสัมพัทธ์สลายตัว DNAPL ที่กระทำบนพื้นผิวหินปูนและมีน้ำล้อมรอบเทียบกับเวลา 16 ชั่วโมงในฐานที่ 2	109
54	กราฟแสดงการหามุมสัมพัทธ์สลายตัว DNAPL ที่กระทำบนพื้นผิวหินปูนและมีน้ำล้อมรอบเทียบกับเวลาหลังจากผ่านไป 16 ชั่วโมงแรกจนถึงชั่วโมงที่ 288 ในฐานที่ 2	110
55	กราฟแสดงการหามุมสัมพัทธ์สลายตัว DNAPL ที่กระทำบนพื้นผิวหินปูนและมีน้ำล้อมรอบเทียบกับเวลาหลังจากผ่านไปชั่วโมงที่ 288 จนเสร็จสิ้นการทดลองในฐานที่ 2	110
56	กราฟแสดงการหามุมสัมพัทธ์สลายตัว DNAPL ที่กระทำบนพื้นผิวหินปูนและมีน้ำล้อมรอบเทียบกับการเปลี่ยนแปลงทุกช่วงเวลาในฐานที่ 3	111
57	กราฟแสดงการหามุมสัมพัทธ์สลายตัว DNAPL ที่กระทำบนพื้นผิวหินปูนและมีน้ำล้อมรอบเทียบกับเวลา 16 ชั่วโมงในฐานที่ 3	112
58	กราฟแสดงการหามุมสัมพัทธ์สลายตัว DNAPL ที่กระทำบนพื้นผิวหินปูนและมีน้ำล้อมรอบเทียบกับเวลาหลังจากผ่านไป 16 ชั่วโมงแรกจนถึงชั่วโมงที่ 408 ในฐานที่ 3	112
59	กราฟแสดงการหามุมสัมพัทธ์สลายตัว DNAPL ที่กระทำบนพื้นผิวหินปูนและมีน้ำล้อมรอบเทียบกับเวลาหลังจากผ่านไปชั่วโมงที่ 408 จนเสร็จสิ้นการทดลองในฐานที่ 3	113

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
60	กราฟแสดงการหาพื้นที่เฉลี่ยหาคสาร DNAPL บนพื้นผิวหินปูนและที่ล้อมรอบด้วยน้ำใต้ดินจำลองเทียบกับการเปลี่ยนแปลงทุกช่วงเวลา	114
61	กราฟแสดงการหาพื้นที่เฉลี่ยหาคสาร DNAPL บนพื้นผิวหินปูนและที่ล้อมรอบด้วยน้ำใต้ดินจำลองเทียบกับการเปลี่ยนแปลงช่วงเวลา 16 ชั่วโมงแรก	115
62	กราฟแสดงการหาพื้นที่เฉลี่ยหาคสาร DNAPL บนพื้นผิวหินปูนและที่ล้อมรอบด้วยน้ำใต้ดินจำลองเทียบกับการเปลี่ยนแปลงหลังผ่าน 16 ชั่วโมงแรก จนเสร็จสิ้นการทดลอง	115
63	ลักษณะการเปลี่ยนแปลงขนาดของมุมสัมผัสบนพื้นผิวของแข็ง	116
64	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันคาปิลลารีกับมุมสัมผัสของหาคสาร TCE บนพื้นผิวหินปูน ซึ่งล้อมรอบด้วยน้ำ ฐานที่ 1	120
65	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันคาปิลลารีกับมุมสัมผัสของหาคสาร TCE บนพื้นผิวหินปูน ซึ่งล้อมรอบด้วยน้ำ ฐานที่ 2	120
66	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันคาปิลลารีกับมุมสัมผัสของหาคสาร TCE บนพื้นผิวหินปูน ซึ่งล้อมรอบด้วยน้ำ ฐานที่ 3	121
67	การทดลองวัดมุมสัมผัสเริ่มต้น ณ เวลาชั่วโมงที่ 0 ของหาค TCE บนพื้นผิวหินปูน ซึ่งล้อมรอบด้วยสารละลายโทลูอินที่มีปริมาณเกินกว่าค่า ความสามารถละลายได้สูงสุด ทั้ง 3 ฐาน	123
68	การทดลองวัดมุมสัมผัสที่เวลาต่าง ๆ กัน ของหาค TCE บนพื้นผิวหินปูน ซึ่งล้อมรอบด้วยสารละลายโทลูอิน ฐาน 1	124
69	การทดลองวัดมุมสัมผัสที่เวลาต่าง ๆ กัน ของหาค TCE บนพื้นผิวหินปูน ซึ่งล้อมรอบด้วยสารละลายโทลูอิน ฐาน 2	125
70	การทดลองวัดมุมสัมผัสที่เวลาต่าง ๆ กัน ของหาค TCE บนพื้นผิวหินปูน ซึ่งล้อมรอบด้วยสารละลายโทลูอิน ฐาน 3	126

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
71	กราฟแสดงการหามุมสัมพัทธ์สหายดสาร TCE ที่กระทำบนพื้นผิวหินปูนที่ล้อมรอบด้วยสารละลายโทลูอินเกินค่าการละลายได้สูงสุดเทียบกับการเปลี่ยนแปลงทุกช่วงเวลาใน ฐานที่ 1	127
72	กราฟแสดงการหามุมสัมพัทธ์สหายดสาร TCE ที่กระทำบนพื้นผิวหินปูนที่ล้อมรอบด้วยสารโทลูอินเกินค่าการละลายได้สูงสุดเทียบกับช่วงเวลา 16 ชั่วโมงแรกในฐานที่ 1	128
73	กราฟแสดงการหามุมสัมพัทธ์สหายดสาร TCE ที่กระทำบนพื้นผิวหินปูนที่ล้อมรอบด้วยสารละลายโทลูอินเกินค่าการละลายได้สูงสุดเทียบกับเวลาหลังผ่าน 16 ชั่วโมงแรกจนเสร็จสิ้นการทดลองในฐานที่ 1	128
74	กราฟแสดงการหามุมสัมพัทธ์สหายดสาร TCE ที่กระทำบนพื้นผิวหินปูนที่ล้อมรอบด้วยสารละลายโทลูอินเกินค่าการละลายได้สูงสุดเทียบกับการเปลี่ยนแปลงทุกช่วงเวลาใน ฐานที่ 2	130
75	กราฟแสดงการหามุมสัมพัทธ์สหายดสาร TCE ที่กระทำบนพื้นผิวหินปูนที่ล้อมรอบด้วยสารโทลูอินเกินค่าการละลายได้สูงสุดเทียบกับช่วงเวลา 16 ชั่วโมงแรกในฐานที่ 2	131
76	กราฟแสดงการหามุมสัมพัทธ์สหายดสาร TCE ที่กระทำบนพื้นผิวหินปูนที่ล้อมรอบด้วยสารละลายโทลูอินเกินค่าการละลายได้สูงสุดเทียบกับเวลาหลังผ่าน 16 ชั่วโมงแรกจนเสร็จสิ้นการทดลองในฐานที่ 2	131
77	กราฟแสดงการหามุมสัมพัทธ์สหายดสาร TCE ที่กระทำบนพื้นผิวหินปูนที่ล้อมรอบด้วยสารละลายโทลูอินเกินค่าการละลายได้สูงสุดเทียบกับการเปลี่ยนแปลงทุกช่วงเวลาใน ฐานที่ 3	133
78	กราฟแสดงการหามุมสัมพัทธ์สหายดสาร TCE ที่กระทำบนพื้นผิวหินปูนที่ล้อมรอบด้วยสารโทลูอินเกินค่าการละลายได้สูงสุดเทียบกับช่วงเวลา 16 ชั่วโมงแรกในฐานที่ 3	133

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
79	กราฟแสดงการหามุมสัมพัทธ์ของหอยดสาร TCE ที่กระทำบนพื้นผิวหินปูนที่ล้อมรอบด้วยสารละลายโทลูอินเกินค่าการละลายได้สูงสุดเทียบกับเวลาหลังผ่าน 16 ชั่วโมงแรกจนเสร็จสิ้นการทดลองในฐานที่ 3	134
80	กราฟแสดงการหาพื้นที่เฉลี่ยของหอยดสาร TCE บนพื้นผิวหินปูนที่ล้อมรอบด้วยสารละลายโทลูอินเกินค่าการละลายได้สูงสุดเทียบกับการเปลี่ยนแปลงทุกช่วงเวลา	135
81	กราฟแสดงการหาพื้นที่เฉลี่ยของหอยดสาร TCE บนพื้นผิวหินปูนที่ล้อมรอบด้วยสารละลายโทลูอินเกินค่าการละลายสูงสุดเทียบการเปลี่ยนแปลงช่วงเวลา 16 ชั่วโมงแรก	136
82	กราฟแสดงการหาพื้นที่เฉลี่ยของหอยดสาร TCE บนพื้นผิวหินปูนที่ล้อมรอบด้วยสารละลายโทลูอินเกินค่าการละลายสูงสุดเทียบกับการเปลี่ยนแปลงเวลาหลังผ่าน 16 ชั่วโมงแรกจนเสร็จสิ้นการทดลอง	136
83	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันคาปิลลารีกับมุมสัมพัทธ์ของหอยดสาร TCE บนพื้นผิวหินปูน ซึ่งล้อมรอบด้วยสารละลายโทลูอิน ฐานที่ 1	140
84	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันคาปิลลารีกับมุมสัมพัทธ์ของหอยดสาร TCE บนพื้นผิวหินปูน ซึ่งล้อมรอบด้วยสารละลายโทลูอิน ฐานที่ 2	141
85	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันคาปิลลารีกับมุมสัมพัทธ์ของหอยดสาร TCE บนพื้นผิวหินปูน ซึ่งล้อมรอบด้วยสารละลายโทลูอิน ฐานที่ 3	141
ภาพผนวกที่		
ก1	กราฟแสดงผลการทดลอง Sieve Analysis ของชั้นตัวกลางหินปูนขนาด 20-30 mesh	157

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

NAPL	=	nonaqueous phase liquid
DNAPL	=	dense nonaqueous phase liquid
LNAPL	=	light nonaqueous phase liquid
TCE	=	trichloroethylene
θ	=	มุมสัมผัส (contact angle)
μL	=	ไมโครลิตร
mL	=	มิลลิลิตร
VOCs	=	volatile organic compounds
FID	=	flame ionization detector
P_c	=	Capillary pressure
mm^2	=	ตารางมิลลิเมตร
BTEX	=	benzene, toluene, ethyl benzene and xylene
N/m^2	=	นิวตันต่อตารางเมตร
$^{\circ}\text{C}$	=	องศาเซลเซียส
mg/L	=	มิลลิกรัมต่อลิตร
g/mol	=	กรัมต่อโมล
M	=	โมลาร์
cm	=	เซนติเมตร
mm	=	มิลลิเมตร
cm/pixel	=	เซนติเมตรต่อจุดภาพ
$^{\circ}$	=	องศา
%	=	เปอร์เซ็นต์
Pa	=	pascal

การศึกษาความสามารถเปียกได้ของ NAPL บนพื้นผิวหินปูน โดยการวัดมุมสัมผัสและ ส่วนโค้งฮิสเทอรีซิส

Wettability Study of NAPL and Limestone Surface by Measuring Contact Angles and Hysteresis Curves

คำนำ

ณ ปัจจุบันนี้ ปัญหาต่างๆในสิ่งแวดล้อมแวดล้อมเริ่มก่อตัวขึ้นมาอย่างมากมายทั่วโลก ทั้งในการปลดปล่อยสารปนเปื้อนออกมาในรูปของเฟสต่างๆ เช่น ในรูปของแก๊ส ของเหลว ของแข็ง เป็นต้น ซึ่งเป็นผลพลอยได้มาจากการดำเนินการของโรงงานอุตสาหกรรม การเกษตรกรรม รวมไปถึงของเสียที่ออกมาโดยปราศจากการบำบัดอย่างถูกต้องในหน่วยงานต่างๆ ย่อมส่งผลอย่างร้ายแรงต่อสิ่งแวดล้อมและสิ่งมีชีวิตใหญ่ๆที่มีส่วนเกี่ยวข้องอย่างมาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งสารฮาโลโหีนิก สารประกอบอินทรีย์ต่างๆ เพราะว่าสารปนเปื้อนเหล่านี้ เป็นสารที่สามารถสลายตัวได้ยากในสิ่งแวดล้อม ทำให้มีช่วงอายุที่จะปนเปื้อนในสิ่งแวดล้อมต่างๆ ได้อย่างยาวนาน ก่อให้เกิดปัญหาขึ้นมาเช่น อาจเกิดการเปลี่ยนแปลงทางนิเวศวิทยา หรือแม้แต่ส่งผลกระทบต่อมนุษย์จากการอุปโภคและบริโภคได้

เป็นความสำคัญอย่างยิ่งต่อการศึกษาวิจัยสารปนเปื้อนเหล่านี้ที่มักจะอยู่ในรูปของการปนเปื้อนผสมกันของสารหลายชนิด ซึ่งอาจจะผสมกันในแบบเนื้อเดียวกัน หรือในแบบเนื้อผสมก็ได้ขึ้นอยู่กับลักษณะคุณสมบัติของสารปนเปื้อนที่ผสมนั้นๆ เนื่องด้วยมีการรั่วไหลของสารปนเปื้อนลงสู่พื้นดินในพื้นที่เอกชน ซึ่งตั้งอยู่ในหมู่บ้านปางอโศก ต.กลางดง อ.ปากช่อง จังหวัดนครราชสีมา สารปนเปื้อนเป็นของเหลวที่ไม่ใช่ น้ำ (nonaqueous phase liquid, NAPL) หลายชนิดแบ่งเป็น NAPL ที่เบากว่าน้ำ (light nonaqueous phase liquid, LNAPL) และ NAPL ที่หนักกว่าน้ำ (dense nonaqueous phase liquid, DNAPL) ซึ่งในการฟื้นฟูสารเหล่านี้ จะต้องใช้องค์ความรู้และหลักการทางวิทยาศาสตร์และทางวิศวกรรมเข้ามาวิเคราะห์ถึงพฤติกรรมของสารปนเปื้อน เพื่อที่จะทำให้เราสามารถทำนายแนวโน้มในการฟื้นฟูได้อย่างถูกต้องแม่นยำมากขึ้น ยกตัวอย่างเช่น องค์ความรู้ทางกายภาพ-เคมีของสารปนเปื้อน องค์ความรู้ในการเลือกวิธีฟื้นฟูได้อย่างเหมาะสมและคุ้มค่ากับงบประมาณที่ได้ลงทุนไป รวมไปถึงองค์ความรู้เกี่ยวกับแนวทางการติดตามการเคลื่อนที่ของสารว่าเป็นอย่างไรหลังจากมีการรั่วไหลของสารเหล่านั้นลงสู่พื้นดิน เป็นต้น

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาพฤติกรรมของสาร NAPL โดยอ้างอิงกับสถานการณ์การปนเปื้อนในพื้นที่จริง โดยมีการจำลองพื้นผิวชั้นน้ำใต้ดินเป็นหินปูนที่มีอายุยุคเพอร์เมียนซึ่งสามารถพบได้จากพื้นที่จริง มาทำการทดลองศึกษาความสัมพันธ์เชิงฮิสเทอรีซิสระหว่างแรงดันคาปิลลารีและค่าความอิมตัวด้วยน้ำของสาร NAPL ที่กระทำต่อชั้นตัวกลางหินปูน รวมไปถึงการศึกษาการวัดมุมสัมผัสของสาร NAPL ที่มีต่อพื้นผิวหินปูน และทำการศึกษาการทดสอบค่า pH ที่ส่งผลกระทบต่อพฤติกรรมสาร NAPL โดยวิธีการทดสอบอัตรา Imbibition ดังนั้นในการวิจัยเรื่องนี้ มีวัตถุประสงค์เพื่อใช้เป็นข้อมูลสำคัญในการอนุมานถึงสถานการณ์สภาพแวดล้อมชั้นใต้ดินที่มีการปนเปื้อน และสามารถเพิ่มความเหมาะสมในการเลือกเทคโนโลยีในการฟื้นฟูพื้นที่ปนเปื้อนได้ต่อไป

คำสำคัญ (keywords) ความสามารถในการเปียกได้ (wettability), ของเหลวที่ไม่ใช่น้ำ (nonaqueous phase liquid, NAPL), มุมสัมผัส (contact angle, θ), ส่วนโค้งฮิสเทอรีซิส (Hysteresis curve)

วัตถุประสงค์

วัตถุประสงค์หลักของการศึกษานี้คือ การศึกษาความสามารถเปียกได้ของพื้นผิวหินปูน โดยมีวัตถุประสงค์ย่อยดังต่อไปนี้

1. ศึกษาการแปรเปลี่ยนค่า pH ที่ส่งผลกระทบต่อ การทดสอบอัตราการเติมน้ำ ในชั้น ตัวกลางทรายออกตาวา (Ottawa sand) ที่มีการปนเปื้อนสาร NAPL ในรูปแบบต่างๆ
2. เพื่อศึกษาความสามารถเปียกได้ (wettability) เชิงฮิสเทอรีซิส (Hysteresis) ในชั้น ตัวกลางโดยมีกลไกดังนี้
 - 2.1 กลไกความสัมพันธ์เชิงฮิสเทอรีซิสระหว่างความดันคาปิลลารีกับความอิมมิดว ด้วยน้ำในชั้นตัวกลางหินปูน
 - 2.2. กลไกการวัดมุมสัมผัสและหาพื้นที่หยดสาร DNAPL ที่เกาะติดบนพื้นผิว หินปูนภายใต้ระบบที่ล้อมรอบด้วยน้ำใต้ดินจำลองและล้อมรอบด้วยสารละลายโทลูอิน

ขอบเขตของการวิจัย

1. การศึกษาค่า pH จากวิธีการทดสอบอัตราการเติมน้ำเป็นการศึกษาเพิ่มเติมต่อจาก งานวิจัยของกษม (2009)
2. วิธีการทดสอบอัตราการเติมน้ำและวิธีการหาส่วน ไค้งฮิสเทอรีซิสใช้อุปกรณ์ Tempe cell จากบริษัท soil moisture equipment
3. เซลล์วัดมุมสัมผัสประดิษฐ์ขึ้นเองจากอุปกรณ์สเตนเลส สตีล เบอร์ 304 โดยมีขนาด $8 \times 18 \times 6 \text{ cm}^3$ เพื่อใช้ในการถ่ายภาพดิจิทัลวัดมุมสัมผัส โดยใช้โปรแกรม photoshop cs4 และ Autocad (version 2005)

4. หินปูน (Crystalline limestone) เพื่อจำลองสถานการณ์การปนเปื้อนจริง ในพื้นที่ ต.กลางดง อ.ปากช่อง จ.นครราชสีมา
5. สารเคมีที่ใช้ในการทดลองเพื่อเป็นตัวแทนสารกลุ่ม LNAPL คือ สารโทลูอีน และเป็นตัวแทนสารกลุ่ม DNAPL คือ สารไตรคลอเอธิลีน (TCE)
6. สารบัฟเฟอร์ที่ใช้ในการปรับค่า pH ในชั้นตัวกลางได้แก่ ไดโทแทสเซียมไฮโดรเจนฟอสเฟต (K_2HPO_4), น้ำกลั่น (Distilled water), โซเดียมอะซิเตด (CH_3COONa)

การตรวจเอกสาร

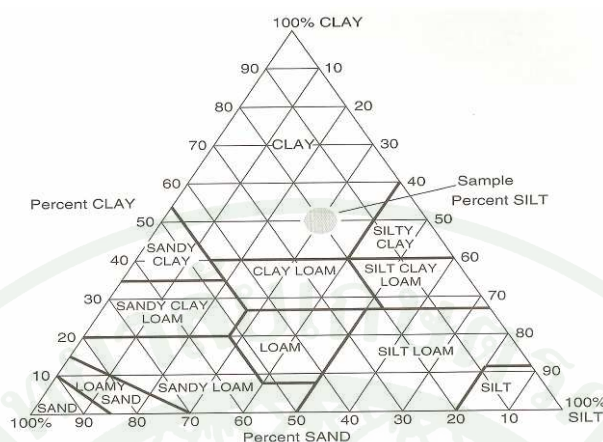
1. ดิน (Soil) และชนิดของดิน (Type of soils)

ดินจะมีส่วนผสมของสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์เป็นองค์ประกอบอยู่ ซึ่งสามารถใช้ในการแบ่งประเภทของดินอย่างหยาบได้ ขณะที่ส่วนประกอบของเนื้อดินก็จะประกอบไปด้วยส่วนที่เป็นช่องว่าง (space or pore) ซึ่งจะมีอิทธิพลโดยตรงต่อความพรุนของดิน และส่วนที่เป็นอนุภาคเม็ดดิน (grain) ซึ่งอนุภาคเม็ดดินใช้ในการจำแนกชนิดของดินได้ ยกตัวอย่างเช่น ดินทราย ดินร่วน ปนทราย ดินร่วน ดินเหนียว เป็นต้น การกำหนดขนาดการกระจายตัวของเม็ดดิน ในตารางที่ 1 ได้รับข้อมูลจากคณะเกษตรศาสตร์ ประเทศสหรัฐอเมริกา และในภาพที่ 1 แสดงสามเหลี่ยมการผสมชนิดของดินเหนียว ดินร่วน ดินทราย ซึ่งสามารถจำแนกดินชนิดใหม่ตามคุณสมบัติที่เกิดขึ้นได้ และใช้ในการออกแบบต่อกระบวนการต่างๆ เช่น กระบวนการฝังกลบขยะมูลฝอย (sanitary landfill) ฯลฯ

ตารางที่ 1 Soil types and particle sizes

ชนิดของดิน	เทอมที่ใช้ในการอธิบาย	ขนาด	ตัวอย่างขนาดที่ใกล้กัน
เม็ดดินหยาบ	หินกรวด	76 mm หรือ ใหญ่กว่า	ผลงุ่นหรือผลส้ม
	กรวดขนาดเล็กหยาบ	76 – 19 mm	ผลมันฮ่อหรือผลงุ่น
	ทรายขนาดเล็กละเอียด	19 – 5 mm	ถั่ว
	ทรายหยาบ	5 – 2 mm	เกลือหิน (เกลือหยาบ)
	ทรายหยาบปานกลาง	2 – 0.4 mm	การเปิดหน้าจ่อ
เม็ดดินละเอียด	ทรายละเอียด	0.4 – 0.074 mm	เกลือเม็ดเล็กๆหรือ
	ดินร่วน หรือ	ระดับโมเลกุลขนาดเล็ก	น้ำตาลทราย
	ดินเหนียว	ถึงเล็กมาก	
สารอินทรีย์	ถ่านเลนร่วน หรือ ฝุ่นธุลีที่ปนเปื้อนด้วยมูลสัตว์		วัตถุดิบพืชผักที่ถูกย่อยสลาย

ที่มา: Pinder and Celia. (2006)



ภาพที่ 1 U.S. Department of agriculture soil classification chart

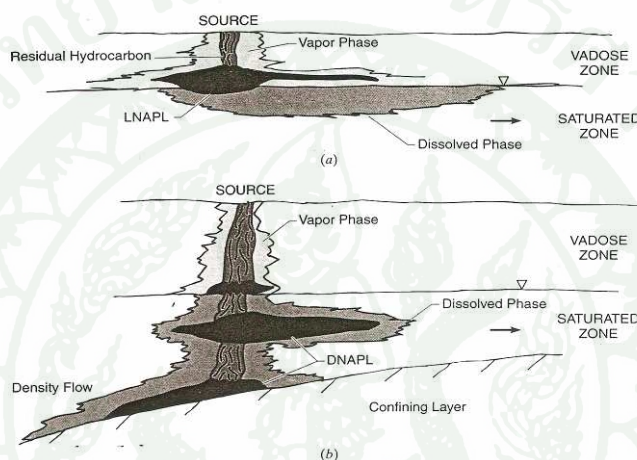
ที่มา: Pinder and Celia. (2006)

2. การเคลื่อนที่ของสารในชั้นใต้ดิน (Movement of Soil Moisture)

เมื่อหยคน้ำมันตกลงบนพื้นดินหรือบนพื้นน้ำ ก็จะมีกระบวนการเปลี่ยนรูปทั้งทางด้านกายภาพ ด้านเคมี และด้านชีวภาพเกิดขึ้น กระบวนการนี้จะส่งผลกระทบต่อหยคน้ำมันที่ตกลงบนพื้นดินและเคลื่อนย้ายต่อไปผ่านสิ่งแวดล้อมชั้นดินต่างๆ ซึ่งอาจจะเรียกได้ว่า “พฤติกรรม” ในการเคลื่อนย้ายของน้ำมันในชั้นใต้ดิน จะพึ่งพาหลายปัจจัย รวมไปถึงปริมาตรของการรั่วไหลของน้ำมัน ระยะเวลาการซึมผ่านชั้นดิน พื้นที่ของการซึมผ่านชั้นดิน คุณสมบัติของน้ำมัน คุณสมบัติของดินหรือชั้นพื้นผิวทางธรณีวิทยา และอัตราการไหลกลับไหลกลับไปในชั้นใต้ดิน เป็นต้น นอกจากนี้ความหนาแน่นหรือแรงโน้มถ่วงจำเพาะ ก็มีความสำคัญในการใช้บ่งชี้ชนิดน้ำมันในชั้นใต้ดินได้ เฟสของเหลวที่ไม่ละลายน้ำ (Nonaqueous-phase liquids, NAPL) จะแทรกอยู่ชั้นใต้ดินและแบ่งได้ 2 ชนิด ตามภาพที่ 3 คือ Light NAPL (LNAPLs) ซึ่งจะมีมีความหนาแน่นเบากว่าน้ำ ขณะที่ Dense NAPL (DNAPLs) จะเป็นน้ำมันที่มีความหนาแน่นหนักกว่าน้ำ

ชนิดของ LNAPLs ได้แก่ กลุ่มของน้ำมันดิบ กลุ่มของน้ำมันเชื้อเพลิง กลุ่มของตัวทำละลายมาตรฐาน กลุ่มของน้ำมันจากแร่ธาตุ เป็นต้น ความหนาแน่นของสารกลุ่มนี้จะอยู่ในช่วง 0.6-1.0 g/ml

ขณะที่ในสาร DNAPLs แบ่งชั้นได้ค่อนข้างกว้างตามคุณสมบัติทางเคมี เช่น ความหนาแน่น ความหนืด ความสามารถในการละลายน้ำ DNAPL ส่วนใหญ่จะมีตัวทำละลายเป็นสารประกอบคลอรีน ตัวอย่างเช่น Trichloroethylene (TCE), Tetrachloroethylene (PCE) เป็นต้น นอกจากนี้ยังมีสารกลุ่มอื่นๆ เช่น creosote (coal tar) เช่น polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) หรือกลุ่มสาร polynuclear aromatic hydrocarbons (PNAs) ตัวอย่างเช่น anthracene, Chrysene, Fluorene, Naphthalene, phenanthrene, pyrene เป็นต้น (Lehr *et al.*, 2002)



ภาพที่ 2 Schematic showing the behavior and distribution of (a) LNAPL and (b) DNAPL in the subsurface

ที่มา: Lehr *et al.* (2003)

การเคลื่อนย้ายของ NAPL ได้รับอิทธิพลอย่างมากจากแรงโน้มถ่วงของโลก และถ้าจะวิเคราะห์ดูการเคลื่อนที่ของ NAPL แต่ละชนิด จะเห็นว่าการเคลื่อนที่ย้ายของ LNAPL จะพึ่งพาความชันของระดับน้ำใต้ดินค่อนข้างมาก ส่วนการเคลื่อนย้ายของ DNAPL จะพึ่งพาลักษณะของชั้นดินเป็นส่วนใหญ่ โดยเฉพาะอย่างยิ่งการกระจายในส่วน of โซนความสามารถในการซึมผ่านต่ำ ในการกระจายตัวของ DNAPL ซึ่งถึงแม้ว่าความลาดชันของระดับน้ำจะไหลไปตามแนวราบ แต่ DNAPL ยังคงเคลื่อนที่ซึมลงไปในแนวดิ่งของชั้นใต้ดิน ส่วนในการกระจายตัวของ LNAPL จะลอยอยู่บนระดับน้ำใต้ดิน (water table) และจะแพร่กระจายไปตามความลาดของระดับน้ำ (hydraulic gradient) (Lagrega *et al.*, 1994) ส่วนตัวแทนของสาร NAPL ที่พบได้บ่อยได้แก่

Trichloroethylene (TCE : C_2HCl_3) มีจุดหลอมเหลวที่ $-84.8^{\circ}C$ มีจุดเดือดที่ $86.7^{\circ}C$ มีค่าความถ่วงจำเพาะ 1.4649 มีความสามารถระเหยออกที่ความดันไอ 20 มิลลิเมตรปรอท ที่ $0^{\circ}C$ มีความหนาแน่นไอเท่ากับ 4.53 สามารถละลายน้ำได้ 1.1 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ $25^{\circ}C$ และสามารถละลายได้ด้วย chloroform, diethyl ether, ethanol สารนี้ใช้ในงานชักล้าง งานล้างไขมันออกจากผิวโลหะ ใช้ในโรงงานผลิตยาง ใช้ผลิตยาฆ่าโรค เป็นส่วนประกอบในของเหลวเพื่อวัตถุประสงค์ต่างๆ เช่น น้ำยาเครื่องปรับอากาศ เพื่อแลกเปลี่ยนความร้อน เป็นก๊าซไม่มีสี มีกลิ่นคล้าย chloroform ทำให้ระคายเคืองตาเมื่อมีความเข้มข้นประมาณ 160 มิลลิกรัมต่อลิตร ถ้ามีมากกว่า 400 มิลลิกรัมต่อลิตร จะรู้สึกไม่พอใจสร้างความรำคาญ ถ้ามีมากถึง 800 มิลลิกรัมต่อลิตร จะรู้สึกป่วย และถ้ามีมากถึง 2000 มิลลิกรัมต่อลิตร จะมีความเป็นพิษรุนแรง (เกรียงศักดิ์, 2546)

โทลูอิน (Toluene : C_7H_8) มีจุดหลอมเหลวที่ $-95^{\circ}C$ มีจุดเดือด $110.6^{\circ}C$ มีจุดวาบไฟ $4.4^{\circ}C$ มีค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 0.866 มีความสามารถระเหยออกได้ ณ ความดันไอ 36.7 มิลลิเมตรปรอท ณ $30^{\circ}C$ มีความหนาแน่นไอเท่ากับ 3.14 มีความสามารถละลายน้ำได้ 0.067% น้ำหนัก/น้ำหนัก ณ $23.5^{\circ}C$ และสามารถละลายได้ด้วย ethanol, chloroform, acetone, diethyl ether, carbon disulfide, glacial acetic acid เป็นของเหลวไม่มีสี ใช้เป็นสารเติมปนเบนซิน ทำยาฆ่าโรค ทำสีย้อม ทำน้ำหอม ทำสีทาบ้าน ทำเรซิน ทำยาง ทำน้ำมันแลคเกอร์ ทำน้ำยาล้างจาน เป็นส่วนประกอบของยางมะตอย สามารถพบได้ในคว้นบุหรี่ ไอเสียรถยนต์ สารนี้ไม่ถูกดูดซับด้วยดินหรือตะกอนมากนัก ถ้าโทลูอินถูกระเหยหรือกระจายออกไปทั่วบรรยากาศ จะถูกกำจัดได้ด้วยแสงอาทิตย์ และพบว่าโทลูอินสามารถถูกกำจัดได้ด้วยวิธีชีวภาพ (เกรียงศักดิ์, 2546)

นอกจากนี้ในการไหลซึมของน้ำจากผิวดินเข้าไปในชั้นใต้ดิน ก็จะใช้กลไกเดียวกันกับการไหลของสารที่เรียกว่า การซึมผ่านผิวดิน (infiltration) ซึ่งจะแตกต่างจากการซึมลึกภายในดิน (percolation) อัตราที่น้ำบนผิวดินไหลซึมเข้าไปในดินต่อหนึ่งหน่วยเวลาเรียกว่า infiltration rate หรือ intake rate อัตราดังกล่าวนี้ขึ้นอยู่กับองค์ประกอบหลายอย่างด้วยกัน เช่น ความลึกของน้ำที่ขังอยู่บนผิวดิน ลักษณะโครงสร้างของดิน เนื้อดิน อุณหภูมิของน้ำและดิน ตลอดจนความชื้นที่มีอยู่ในดิน ในตอนแรกที่มีการให้น้ำแก่ดินอัตราการซึมผ่านผิวดินจะสูง เนื่องจากผิวดินยังแห้งอยู่ จึงดูดซับน้ำไว้อย่างรวดเร็ว แต่เมื่อการให้น้ำดำเนินต่อไป ดินชั้นบนจะเริ่มอิ่มตัว อัตราการซึมผ่านผิวดินจะค่อยๆ ลดลง และในที่สุดก็จะถึงจุดหนึ่งซึ่งอัตราการซึมผ่านผิวดินมีค่าเกือบคงที่ตลอดไปจนกว่าจะหยุดการให้น้ำ ค่าที่เกือบคงที่ดังกล่าวนี้จะประมาณเท่ากับความสามารถให้น้ำซึมผ่านได้ (permeability) ของดิน (วีระพล, 2533)

3. ความหนาแน่น (Density)

หน่วยความหนาแน่นและความถ่วงจำเพาะเป็นคุณสมบัติที่มีความสำคัญมาก เพราะจะทราบได้ชัดเจนว่าสารปนเปื้อนมีน้ำหนักมากกว่าหรือเบากว่าน้ำ หรือมีน้ำหนักมากกว่าหรือเบากว่าอากาศ เมื่อพิจารณาสารปนเปื้อนที่อยู่ในรูปน้ำจะใช้ค่าความหนาแน่น ซึ่งมีหน่วย กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร หรือ กรัมต่อมิลลิลิตร และถ้าอยู่ในรูปของแข็งจะใช้หน่วย กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ถ้าใช้ค่าที่ไม่มีหน่วยคือค่าความถ่วงจำเพาะ (specific gravity) (เกรียงศักดิ์, 2546) ค่าความหนาแน่น (D) มีสมการดังนี้

$$D = \frac{M}{V} \quad (1)$$

เมื่อ D = ความหนาแน่นของสารอันตราย (kg/m^3)
 M = มวลของสารอันตราย (kg)
 V = ปริมาตรของสารอันตราย (m^3)

ค่าความถ่วงจำเพาะ (specific gravity, S) เขียนสมการได้ดังนี้

$$S = \frac{M_s}{M_w} \quad (2)$$

เมื่อ S = ค่าความถ่วงจำเพาะ (-)
 M_s = น้ำหนักของสารปนเปื้อน (g)
 M_w = น้ำหนักของน้ำที่มีปริมาตรเท่าสารปนเปื้อน (g)

4. ความสามารถของแรงดันขับเคลื่อนน้ำ (Hydraulic Conductivity) และความสามารถในการซึมผ่านได้ของของไหลในดิน (Permeability)

กระบวนการไหลของของไหลผ่านชั้นรูพรุน จะต้องมีความดันขับเคลื่อนของไหลไปข้างหน้า และจำเป็นที่จะต้องชนะแรงเสียดทานระหว่างของไหลและอนุภาคของชั้นตัวกลางรูพรุน ทิศทางการไหลในช่องว่างจากแหล่งหนึ่งไปอีกแหล่งหนึ่งที่มีระดับต่ำกว่า ซึ่งกลไกการไหลนี้

เกี่ยวข้องกับพลังงานต่อหน่วยมวลของไหลจากที่สูงกว่าไปที่ต่ำกว่า กลไกของพลังงานที่มีทิศทางการไหล อาจนิยามถึงพลังงานศักย์ของของไหลสำหรับการไหลผ่านชั้นตัวกลางที่กำลังจะทำงาน จากคำอธิบายข้างต้น อาจเรียกว่า ความสามารถในการขับเคลื่อนน้ำ (Hydraulic conductivity) หรือบางครั้งก็อาจเรียกอีกชื่อว่า ค่าสัมประสิทธิ์ของการซึมผ่านได้ (coefficient of permeability, K) โดยมีสมการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์ในการซึมผ่านได้ของสารดังนี้

$$K = \frac{k\rho g}{\mu} \quad (3)$$

เมื่อ k = ค่าความจำเพาะ หรือ ความสามารถในการซึมผ่านภายใน (m/s)
 ρ = ความหนาแน่นของของไหล (kg/m³)
 μ = ค่าความหนืดจลน์ (kg/ms)
 g = ค่าความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก (m/s²)

จากสมการนี้สามารถใช้อธิบายถึงความสัมพันธ์ระหว่างแรงขับเคลื่อนและแรงต้านทานการไหลของสารภายในชั้นรูพรุนได้ หรือสามารถพิจารณาการไหลผ่านชั้นตัวกลางรูพรุนจากสมการที่ 4 ได้ดังนี้ (Freeze and Cherry, 1979)

$$Q = KiA \quad (4)$$

เมื่อ Q = อัตราการไหล (m³/s)
 k = ความสามารถในการไหลซึมผ่าน (hydraulic conductivity) (m/s)
 i = ความชันทางชลศาสตร์ (hydraulic gradient) (m/m) = $\Delta H/L$
 ΔH = ความแตกต่างของแรงดันน้ำที่เทียบเป็นความสูง (m)
 L = ระยะทางการไหล (m)
 A = พื้นที่หน้าตัดการไหล (m²)

ดังนั้นถ้าจะกล่าวถึงคุณสมบัติของความสามารถในการซึมผ่านได้ของสารชนิดหนึ่ง จะบ่งชี้ถึงสารที่อยู่ในเฟสของเหลว เคลื่อนที่ผ่านชั้นตัวกลางรูพรุน ส่วนปัจจัยบางอย่างที่ส่งผลต่อคุณสมบัติความสามารถในการซึมผ่าน ได้แก่ ความหนาแน่น ระดับความอิ่มตัว อุณหภูมิ ชนิดของไหลที่สามารถซึมผ่านได้ ความลาดชันทางชลศาสตร์ และขนาดของอนุภาครูพรุนที่กระจายกัน

เป็นต้น (Lagrega *et al.*, 1994) นอกจากนี้กลไกสำคัญที่ส่งผลต่อการลดความสามารถในการซึมผ่านได้ในชั้นตัวกลางรูปพรุนของอิมัลชัน เนื่องมาจากกลไก 2 ชนิดคือ

1. กลไกเกิดกระบวนการตึง (straining) โดยจะอ้างอิงถึงการอุดตันของรูโดยขนาดหยดน้ำมันที่มีขนาดใหญ่กว่าชั้นตัวกลางรูปพรุน

2. กลไกการสกัดกั้น (interception) จะอ้างอิงการสะสมของหยดน้ำมันบนพื้นผิวชั้นตัวกลางรูปพรุนโดยความหลากหลายของแรงทางกายภาพ และกระบวนการนี้จะมีขนาดน้ำมันเล็กกว่าขนาดของรูพรุน (Soo and Radke, 1984)

5. ความพรุน (porosity) และระดับความอิ่มตัว (Saturation)

ค่าความพรุนของดินเป็นค่าที่บ่งชี้ถึงปริมาตรช่องว่างภายในชั้นดิน ยิ่งมีความพรุนมากก็จะมีช่องว่างภายในชั้นดินมากขึ้นด้วย ความหมายของความพรุน คือ ปริมาตรรวมของช่องว่างในหินหรือดินเป็นเปอร์เซ็นต์ของปริมาตรทั้งหมด ส่วนปริมาณน้ำในดินเชิงปริมาตร ค่านี้เป็นค่าที่แสดงปริมาณน้ำในดิน ถ้าชั้นดินที่ตั้งอยู่ในระบบน้ำใต้ดินจะทำให้เกิดความอิ่มตัวด้วยน้ำและเมื่อคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ จะมีค่าเท่ากับ 100 เปอร์เซ็นต์ (เกรียงศักดิ์, 2546) โครงสร้างของดินจะประกอบด้วย 3 เฟสคือ ดิน (เฟสของแข็ง) น้ำ (เฟสของเหลว) อากาศ (เฟสของแก๊ส) การหาระดับความอิ่มตัวซึ่งหมายถึงค่าอัตราส่วนระหว่างปริมาตรของน้ำต่อปริมาตรของช่องว่างในดิน สามารถหาได้จากสมการดังนี้

$$S_r = \frac{V_w}{V_v} \quad (5)$$

เมื่อ	S_r	=	ระดับความอิ่มตัว (-)
	V_w	=	ปริมาตรของน้ำในดิน (L^3)
	V_v	=	ปริมาตรของช่องว่างในดิน (L^3)

ส่วนการหาปริมาตรทั้งหมดในชั้นดิน ณ แหล่งใดแหล่งหนึ่ง สามารถเขียนสมการได้ดังนี้

$$V_t = V_v + V_s \quad (6)$$

เมื่อ V_t = ปริมาตรทั้งหมด (L^3)
 V_v = ปริมาตรของช่องว่างทั้งหมด (L^3)
 V_s = ปริมาตรของดินทั้งหมด (L^3)

และถ้าใช้ในเทอมของความพรุน, n , จะให้ความหมายเป็นเปอร์เซ็นต์ดังนี้

$$n = \frac{V_v}{V_t} \times 100 \% \quad (7)$$

เมื่อ n = ความพรุน (-)

ความสูงของแรงคาปิลลารี (Capillary fringe) เมื่อเทียบกับช่องว่างขนาดที่แตกต่างกันไปในชั้นดิน (ความพรุน) ความสูงของแรงคาปิลลารีจะน้อยเมื่อเกิดการแทรกซึมในช่องว่างขนาดใหญ่มาก น้ำในโซนนี้จะไม่ค่อยมีการไหลลงแต่จะมีการถูกยึดด้วยแรงคาปิลลารี เรียกโซนนี้ว่า โซนคาปิลลารี (Capillary zone) ดังนั้นอัตราส่วนของระดับความอิ่มตัวด้วยน้ำจะมีค่าเกือบเท่ากับ 1 (Fetter, 1999) ตารางที่ 2 แสดงความหลากหลายของวัสดุชั้นตัวกลางทางธรณีวิทยา โดยชั้นหินจะมีความพรุนต่ำกว่าดิน ความพรุน (n) มีบทบาทสำคัญต่อการควบคุมอิทธิพลของความสามารถในการขับเคลื่อนน้ำหรือความสามารถในการซึมผ่านได้ของน้ำ (K) ซึ่งชั้นตัวกลางที่มีความพรุนสูงก็จะมีความสามารถในการซึมผ่านได้สูงเช่นกัน แต่กฎนี้ก็ไม่ได้เป็นแบบตายตัว กล่าวคือจากการศึกษาดินที่เป็นดินเหนียว ปกติจะมีความพรุนมากกว่าทรายหรือดินที่มีกรวดเป็นส่วนมาก แต่กลับมีความสามารถในการซึมผ่านได้ต่ำกว่า เป็นต้น (Freeze and Cherry, 1979)

ตารางที่ 2 ลำดับค่าความพรุนของชั้นตัวกลาง

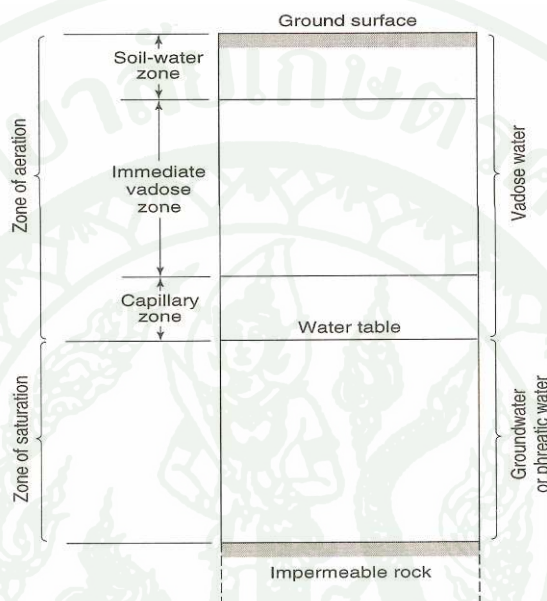
ชนิดชั้นตัวกลาง	เปอร์เซ็นต์ความพรุน (%)
1. สิ่งที่ทับถมอย่างไม่แข็งแรง	
กรวด	25-40
ทราย	25-50
โคลนเลนหรือตะกอน	35-50
ดินเหนียว	40-70
2. หิน	
สัดส่วนของหินภูเขาไฟ	พ.ค.-50
หินปูนชนิดคาสต์ (Karst limestone)	พ.ค.-50
หินทราย	พ.ค.-30
หินปูน, โดโลไมต์	0-20
เปลือกหอย	0-10
สัดส่วนของหินผลึก	0-10
หินผลึกอัดแน่น	0-5

ที่มา: Freeze and Cherry (1979)

6. วัฏจักรของน้ำและการเคลื่อนที่ผ่านชั้นใต้ดิน

ตลอดวัฏจักรของน้ำ (hydrologic cycle) (Todd and Mays, 2005) หลังจากที่มีน้ำรวมตัวควบแน่น แล้วตกลงมาบนพื้นดิน (precipitation) อาจมีกระบวนการซึมผ่านเข้าไปในชั้นใต้ดิน (infiltration) หรืออาจมีกระบวนการระเหยขึ้นสู่บรรยากาศ (evaporation) สำหรับน้ำผิวดินหรือน้ำที่เอ่อล้นบนผิวดิน (surface runoff) ของเหลวที่มีกระบวนการซึมเข้าไปภายในชั้นใต้ผิวดิน และเกิดการไหลไปในโซนที่เรียกว่า โซนไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ (unsaturated zone or vadose zone) ของเหลวในโซนนี้อาจมีการซึมผ่านต่อไปได้จนถึงโซนอิ่มตัวด้วยน้ำ (saturated zone) หรือเรียกว่าโซนชั้นน้ำใต้ดิน (groundwater zone) โดยเส้นที่แบ่งเขตทั้งสองนี้คือระดับน้ำใต้ดิน (water table) ซึ่งมีความดันเท่ากับความดันบรรยากาศ (Domenico, 1990) ดังภาพที่ 3 (Todd and Mays, 2005) และบางส่วนอาจมีการยึดเกาะกับเม็ดดิน สร้างความชื้นในดินขึ้นมา ก่อนที่จะมีการระเหยสู่ชั้นบรรยากาศโดยผ่าน

ตัวกลางของพืชหรือสัตว์ก่อน (evapotranspiration) ของเหลวเมื่อมีการเคลื่อนที่เข้าสู่โซนอิ่มตัวด้วยน้ำในชั้นใต้ดิน จะมีการไหลจากพื้นที่ระดับพลังงานทางชลศาสตร์สูง (High hydraulic head) ไปยังพื้นที่ระดับพลังงานทางชลศาสตร์ต่ำกว่า (lower hydraulic head) โดยจะมีกลไกการไหลไปแทรกซึมอยู่ตามระบบชั้นน้ำใต้ดินต่างๆ (Lagrega *et al.*, 1994)

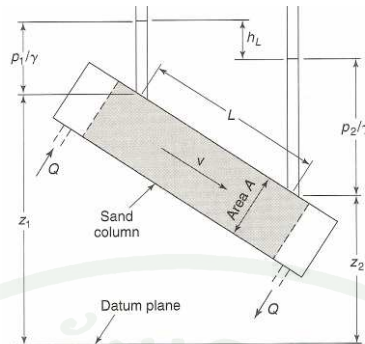


ภาพที่ 3 การจัดแบ่งชั้นใต้ดิน

ที่มา: Todd and Mays (2005)

7. กฎของดาร์ซี (Darcy's law)

ในการหาอัตราการไหลในน้ำใต้ดินจะใช้กฎของดาร์ซี (Darcy's law) จากการทดลอง จะมีการหาอัตราการไหลของน้ำ (Q) ผ่านท่อไซลินเดอร์ (cylinder tube) ในพื้นที่หน้าตัดของท่อ (A) โดยในท่อจะบรรจุชั้นตัวกลางรูพรุนคือ ทรายและมีเครื่องมือที่ใช้วัดแรงดันของน้ำ (piezometer) ในความยาวของคอลัมน์ทราย (L) ดังแสดงในภาพที่ 4



ภาพที่ 4 การกระจายตัวของแรงดันและการสูญเสียเฮดในการไหลผ่านคอลัมน์ทราย

ที่มา: Todd and Mays (2005)

พลังงานรวมในท่อทั้งหมดที่ของไหลไหลผ่าน เขียนได้จากสมการดังนี้

$$\frac{P_1}{\gamma} + \frac{v_1^2}{2g} + z_1 = \frac{P_2}{\gamma} + \frac{v_1^2}{2g} + z_2 + h_L \quad (8)$$

เมื่อ P = แรงดัน (Pa or N/m^2)
 γ = น้ำหนักจำเพาะของน้ำ (N/m^3)
 v = ความเร็วของการไหล (m/s)
 g = ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก (m/s^2)
 z = ระดับความสูง (m)
 h_L = ค่าสูญเสียพลังงาน (m)

จากสมการที่ 8 เมื่อให้ความเร็วในชั้นตัวกลางรูพรุนที่มีน้อยมาก ดังนั้นทำให้ไม่มีการคิดค่าพลังงานความเร็ว (velocity heads) ทำให้เขียนสมการใหม่ได้ดังนี้

$$h_L = \left(\frac{P_1}{\gamma} + z_1 \right) - \left(\frac{P_2}{\gamma} + z_2 \right) \quad (9)$$

ดังนั้นค่าสูญเสียพลังงาน (head loss) คือพลังงานที่สูญเสียไปในชั้นตัวกลางรูพรุน (ทราย) เนื่องจากแรงเสียดทาน ที่ทำให้เกิดการแปรรูปพลังงานความร้อนสูญหายไป และเมื่อเขียน

สมการตามกฎการวัดของดาร์ซี (Darcy's law) โดยแสดงความเป็นสัดส่วนค่าประมาณของ $Q \sim h_L$ และ $Q \sim 1/L$ พร้อมทั้งนำค่าคงที่ (K) เพิ่มเข้าไปในสมการจะได้

$$Q = -KA \frac{h_L}{L} \quad (10)$$

และอาจแสดงในเทอม

$$Q = -KA \frac{dh_L}{dl} \quad (11)$$

หรือสมการทั่วไป

$$v = \frac{Q}{A} = -K \frac{dh}{dl} \quad (12)$$

เมื่อ v = Darcy velocity or specific discharge ($\text{m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{s}$)
 K = hydraulic conductivity constant or permeability constant
 $\frac{dh}{dl}$ = hydraulic gradient

*เครื่องหมายลบ บ่งชี้ถึงทิศทางการไหลของน้ำใน ส่วนการลดลงของพลังงาน

นอกจากนี้แล้วยังมีการนำเอาสมการกฎดาร์ซีไปประยุกต์หารูปแบบการไหลของน้ำใต้ดินว่าเป็นการไหลแบบราบเรียบ (laminar flow) หรือการไหลแบบปั่นป่วน (turbulent flow) ซึ่งตามกฎของดาร์ซี เชื่อว่าในช่องว่างรูพรุนจะเป็นการไหลแบบราบเรียบ ในส่วนที่มีการไหลในเส้นท่อ หรือในส่วนที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาดใหญ่ จะมีการใช้สมการเรย์โนลด์ นัมเบอร์ (Reynold number) แบ่งแยกรูปแบบการไหลว่าเป็น การไหลแบบราบเรียบ หรือการไหลแบบปั่นป่วน ดังนั้นสมการของเรย์โนลด์ นัมเบอร์ สามารถอนุมานใช้สร้างข้อจำกัดการไหลที่อธิบายโดยสมการของดาร์ซีได้ เขียนสมการเรย์โนลด์ นัมเบอร์ได้ดังนี้

$$N_R = \frac{\rho v D}{\mu} \quad (13)$$

เมื่อ	v	=	ความเร็ว (m / s)
	D	=	เส้นผ่าศูนย์กลาง (m)
	μ	=	ความหนืดจลน์ (kg/ms)
	ρ	=	ความหนาแน่นของของไหล (kg/m ³)
	N_R	=	ค่าเรย์โนลด์ นัมเบอร์ (-)

จากการทดลองเกณฑ์การวัดอัตราการไหลในชั้นตัวกลางรูพรุน ตามกฎของดาร์ซี การไหลของน้ำใต้ดินโดยทั่วไป จะเป็นการไหลแบบราบเรียบ ($N_R < 1$) แต่ถ้าเป็นการไหลแบบปั่นป่วน ($N_R > 10$) ผลลัพธ์ก็คือมีค่าแรงเฉื่อย (inertial forces) เพิ่มขึ้น เกิดกระแสน้ำหมุนวน มีความเร็วเพิ่มขึ้นกระจายไปตามช่องต่างๆ และจะมีการสูญเสียพลังงานมาก การไหลแบบปั่นป่วนส่วนมากจะเกิดในเส้นผ่านศูนย์กลางของช่องขนาดใหญ่เช่น ในแหล่งน้ำใต้ดินที่มีช่องเปิดกว้างมาก เป็นต้น (Todd and Mays, 2005) อย่างไรก็ตามเกณฑ์การแบ่งการไหลแบบต่าง ๆ นั้น อาจมีค่าแปรเปลี่ยนได้ตามความเหมาะสม จะพบว่าค่าของเรย์โนลด์ นัมเบอร์ที่ไหลผ่านชั้นตัวกลางรูพรุนจากการไหลแบบราบเรียบ เป็นการไหลแบบปั่นป่วน มีค่าแปรผันอยู่ในช่วง 1-12 ขณะที่กฎการไหลในน้ำใต้ดินของดาร์ซียังมีค่าเท่าเดิม ซึ่งการไหลแบบราบเรียบมีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับ 1 ($N_R \leq 1$) (Harr, 1962)

8. กลไกการเคลื่อนย้ายของสารปนเปื้อน

การเคลื่อนย้ายของสารปนเปื้อน ผ่านชั้นตัวกลางรูพรุน โดยจะขึ้นอยู่กับอิทธิพลทางสิ่งแวดล้อมและชนิดของตัวกลางที่สารปนเปื้อนผ่าน จะมีการพิจารณากลไกอัตราการเปลี่ยนแปลงของตัวละลายดังนี้

8.1 Diffusion transport

การเคลื่อนย้ายของสารปนเปื้อนที่ละลายในชั้นใต้ดินจะมีการเคลื่อนที่ด้วยความเข้มข้นของสารมากไปสู่ความเข้มข้นของสารน้อย เรียกกระบวนการนี้ว่า การแพร่ (Diffusion transport) หรือการเคลื่อนย้ายตามความเข้มข้นของสารปนเปื้อน (Concentration gradient) (Fetter, 1999) การ

แพร่ผ่านจะเกิดขึ้นเมื่อไม่เกิดการเคลื่อนที่แบบไปเป็นก้อน (bulk hydraulic movement) และจะมีกลไกที่สอดคล้องกับกระบวนการกระจายสาร (Dispersion mechanism) (Freeze and Cherry, 1979)

มวลสารที่เกิดกระบวนการแพร่ผ่านพื้นที่หน้าตัดหนึ่งต่อหน่วยเวลา จะสามารถคำนวณหาความเข้มข้นที่เปลี่ยนแปลงอย่างเหมาะสม (concentration gradient) ได้ดังสมการ Fick's first law

$$F = -D \frac{dC}{dx} \quad (14)$$

เมื่อ F = อัตราการเปลี่ยนแปลงของมวลสาร (mass flux) ($\text{kg}/\text{m}^2\text{s}$)

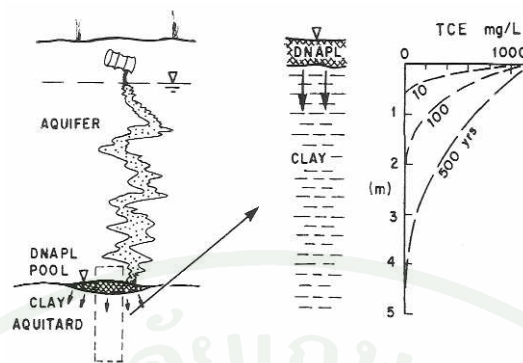
D = สัมประสิทธิ์การแพร่ผ่าน (m^2/s)

C = ความเข้มข้นตัวถูกละลาย (kg/m^3)

dC/dx = ความเข้มข้นที่เปลี่ยนแปลงไปตามความลาด ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}/\text{m}$)

x = ระยะทางความลาด (m)

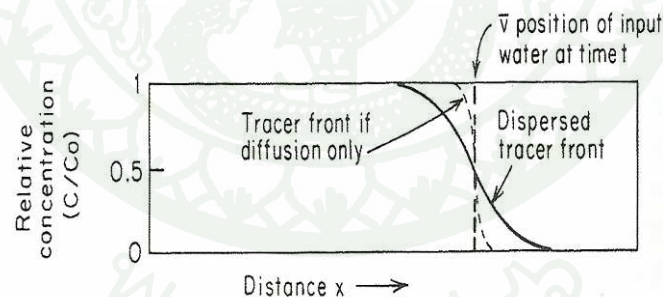
ในโซนที่มีความสามารถในการซึมผ่านได้ต่ำ จะเกิดการเคลื่อนย้ายของโมเลกุลสารปนเปื้อนที่ละลายน้ำด้วยกลไกการแพร่ ยกตัวอย่างเช่นการสะสมสาร DNAPL ซึ่งไม่ได้เป็นสัดส่วนกับชั้นดินเหนียวหรือชั้นดินโคลน การแพร่ผ่านของสารปนเปื้อนที่ละลายน้ำจะเกิดภายในชั้นนี้ เพราะมีอัตราการเคลื่อนที่ผ่านช้ามากสำหรับสาร DNAPL จากภาพที่ 5



ภาพที่ 5 ข้อมูลการแพร่ของสาร TCE ที่ละลายในการทับถมของดินเหนียวที่ไม่เป็นสัดส่วนภายใต้การสะสมตัวของเฟสสาร TCE อย่างอิสระ ความสามารถละลายได้ของสาร TCE เท่ากับ 1100 mg/L; ซึ่งน้ำมันไม่มีกระบวนการจับ (sorption)

ที่มา: Pankow and Cherry (1996)

นอกจากนี้กราฟข้างล่างแสดงการสนับสนุนการเคลื่อนที่แพร่ผ่านของโมเลกุลต่อการกระจายของความเข้มข้นสาร ณ ความเร็วต่ำ การแพร่ผ่านจะเป็นตัวสนับสนุนสำคัญต่อการกระจาย



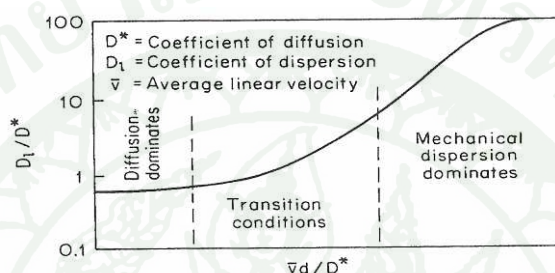
ภาพที่ 6 ไดอะแกรมแสดงการสนับสนุนของโมเลกุลการแพร่และกลไกการกระจายตัวของความเข้มข้นทางด้านหน้าในคอลัมน์ด้วยขั้นตอนการฉีดสารเข้าไป

ที่มา: Freeze and Cherry (1979)

ดังนั้นค่าสัมประสิทธิ์ของการกระจายการเคลื่อนที่ของเหลวจะเท่ากับค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ผ่าน ($D_l = D^*$)

เมื่อ D^* = Coefficient of diffusion
 D_l = Coefficient of dispersion

ณ ความเร็วสูง จะเกิดกลไกการผสมระหว่างกระบวนการแพร่และกระบวนการกระจาย ซึ่ง
 จะแสดงออกมาในส่วนของการกระจายมากกว่าเมื่อมีอัตราการกระจายมากขึ้น ($D_l = \alpha_l \bar{v}$)
 ดังภาพที่ 7



ภาพที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณและอัตราส่วนของสัมประสิทธิ์การกระจายในแนวยาวและ
 สัมประสิทธิ์ของโมเลกุลการแพร่ในคอลัมน์ทรายที่มีขนาดเท่ากัน

ที่มา: Freeze and Cherry (1979)

8.2 Dispersion transport

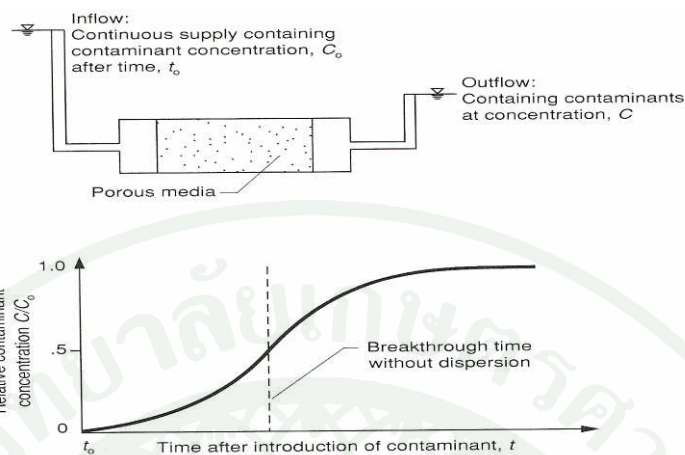
รูปแบบการเคลื่อนที่ของน้ำใต้ดินอีกลักษณะคือ กลไกการกระจายของสารปนเปื้อน (mechanism of dispersion) โดยมีพฤติกรรมกระจายและผสมตามเส้นทางการไหลในน้ำใต้ดิน กลไกนี้มีสาเหตุมาจากการผสมระหว่างกลไกการพาของไหลและกลไกการแพร่ของโมเลกุล เนื่องจากอิทธิพลของพลังงานจลน์และอุณหภูมิของอนุภาคสารปนเปื้อน กระบวนการแพร่ของสารปนเปื้อน ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของกระบวนการกระจายสารปนเปื้อนที่สำคัญ โดยมีเงื่อนไขที่ขึ้นอยู่กับอัตราเร็วระดับต่ำ

กลไกกระบวนการกระจายสารปนเปื้อน มีสาเหตุมาจาก 3 กลไกด้วยกันคือ โดยเริ่มต้นเกิดในแต่ละตัวกลางรูพรุน เพราะการเคลื่อนที่ของโมเลกุลที่มีความเร็วแตกต่างกัน ณ จุดต่างๆของรูพรุนเนื่องจากแรงเฉื่อยของของไหล ที่ขึ้นอยู่กับความขรุขระของพื้นผิวในรูพรุน ส่วนกลไกที่

สองนั้น จะมีสาเหตุมาจากความแตกต่างระหว่างขนาดของรูพรุนตามเส้นทางการไหลของโมเลกุลน้ำซึ่งเป็นตัวทำละลาย เพราะว่าเกิดความแตกต่างของพื้นผิวและความขรุขระอย่างสัมพันธ์ต่อปริมาตรของน้ำในช่องรูพรุนแต่ละรู ช่องรูที่แตกต่างกันจะมีความเร็วของกลุ่มก้อนของไหลแตกต่างกันด้วย กลไกสุดท้ายของสาเหตุการเกิดกระบวนการกระจายสารปนเปื้อน จะเกี่ยวข้องกับความสัมพันธ์ความคดเคี้ยว (tortuosity), ช่องทางที่มีการแตกกิ่งก้านสาขา (branching) และช่องรูพรุนที่มีลักษณะปลิกย่อยต่างๆที่กระจายทั่วไปด้วย การกระจายของตัวถูกละลายหรือการกระจายของสารปนเปื้อนนั้น ส่วนใหญ่จะเป็นไปตามทิศทางการไหลตามแนวยาว หรือเรียกว่ากระบวนการกระจายตามแนวยาว (longitudinal dispersion) นอกจากนี้ยังมีกระบวนการกระจายตามแนวตั้งฉากต่อการไหล เรียกว่า กระบวนการกระจายตามแนวขวาง (transverse dispersion)

กระบวนการกระจายสารปนเปื้อนเป็นกระบวนการผสมอย่างมีคุณภาพ ซึ่งจะส่งผลต่อการเกิดการไหลแบบปั่นป่วน (turbulence flow) ในพื้นผิวน้ำ สำหรับชั้นตัวกลางรูพรุน ความเร็วเชิงเส้นตรงโดยเฉลี่ยและกระบวนการกระจายสารปนเปื้อนตามแนวยาวจะมีความสัมพันธ์กันมาก กระบวนการกระจายสารปนเปื้อนตามแนวยาว เป็นกระบวนการที่อาศัยโมเลกุลน้ำและโมเลกุลของตัวถูกละลาย ซึ่งในบางเส้นทางจะเคลื่อนที่ได้เร็วกว่าความเร็วเชิงเส้นตรงโดยเฉลี่ย แต่บางเส้นทางก็มีการเคลื่อนที่ได้ช้ามาก (Freeze and Cherry, 1979)

จากการทดลองของคาร์ซี แสดงภาพที่ 8 เกี่ยวกับรูปแบบการปนเปื้อนของสารในลักษณะอย่างต่อเนื่องและมีความเข้มข้นเหมือนกันนั้น ในเทอมมีแหล่งสารปนเปื้อนต่อเนื่องและสาธิตการปล่อยสารปนเปื้อน ซึ่งเทียบได้กับสถานการณ์สารปนเปื้อนรั่วไหลเล็กน้อยจากถังในชั้นใต้ดิน ซึ่งอาจทำการตรวจสอบไม่ได้ การทดลองนี้สามารถทำได้โดยการเติมความเข้มข้นของสารปนเปื้อนลงไป ในคอลัมน์ แล้วทำการวัดเทียบกับการใช้เวลาเคลื่อนที่ของสารปนเปื้อนตามความลาดของคอลัมน์ ซึ่งมีชั้นตัวกลางขวางการไหลของสารอยู่ กลไกการกระจายตัวของสารปนเปื้อนจะเกิดขึ้น และทำการวัดสารปนเปื้อนตรงจุดไหลออกจากคอลัมน์ เรียกว่าจุดเบรกทรู (Breakthrough) ในกราฟ Breakthrough curve อย่างไรก็ตาม ณ เวลาจุดวัดสารปนเปื้อนครั้งแรกจะมีความเข้มข้น (C) ต่ำกว่าส่วนของสารปนเปื้อนที่เดิมเข้าไปเสมอ (C_0) ตามภาพที่ 8 ซึ่งอธิบายได้เป็นผลกระทบของกระบวนการกระจายสารปนเปื้อน เมื่อเทียบกับเวลา ซึ่ง ณ จุดเบรกทรู สามารถวัดการไหลออกมาจากคอลัมน์ได้เร็วกว่าความเร็วจากการรั่วไหลเชิงเส้นตรงโดยเฉลี่ย และถ้าเป็นกระบวนการกระจายจะสังเกตได้ว่าสามารถตรวจพบสารที่ออกมาจากคอลัมน์ก่อนจุดเบรกทรู (Breakthrough) เมื่อเทียบกับกระบวนการพาสารปนเปื้อน (Advection) (Lagrega *et al.*, 1994)

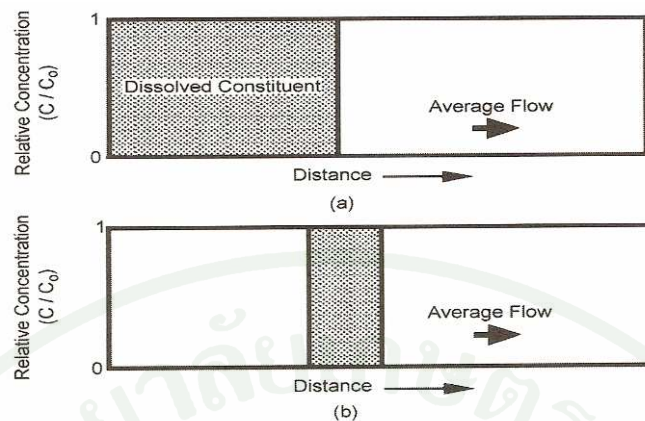


ภาพที่ 8 ผลกระทบของการกระจายในการเคลื่อนที่ของสารปนเปื้อน

ที่มา: Lagrega *et al.* (1994)

8.3 Advection transport

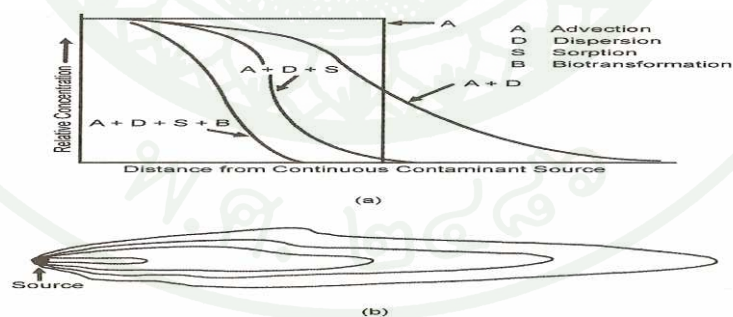
กระบวนการพาสารปนเปื้อน เป็นการเคลื่อนย้ายสารปนเปื้อนเนื่องมาจากการไหลของน้ำใต้ดิน ซึ่งอาจมาจากอัตราการเคลื่อนที่กับแหล่งสารปนเปื้อน (plume) (Sellers, 1998) ทิศทางและอัตราการเคลื่อนย้ายสารปนเปื้อนจะเกิดขึ้นพร้อมกับการไหลในน้ำใต้ดิน ดังนั้นเกิดการเรียนรู้บางอย่างที่เกี่ยวกับรูปแบบของการไหลน้ำใต้ดินโดยอัตโนมัติซึ่งอ้างอิงถึงนิยามที่เรียกว่ากระบวนการพาสารปนเปื้อน (Advection process) พิจารณาได้จากภาพที่ 9 (Boulding and Ginn, 2004)



ภาพที่ 9 การเคลื่อนที่ของความเข้มข้นสารโดยวิธีการพา (advection) เท่านั้น (a) แหล่งต่อเนื่อง (b) เป็นตุ๊ก

ที่มา: U.S. EPA. (1987a)

อย่างไรก็ตามในกระบวนการเคลื่อนย้ายสารปนเปื้อนมักมีความเกี่ยวข้องกันเสมอ โดยจะขึ้นอยู่กับปัจจัยอื่นๆเป็นสำคัญ อาทิเช่น อัตราเร็วไหลของน้ำ ขนาดและลักษณะพื้นฐานของตัวกลางรูพรุน ลักษณะจำเพาะของของไหล เป็นต้น ในภาพที่ 10 จะแสดงกลไกการเคลื่อนย้ายสารปนเปื้อนที่ปะปนกันหลายรูปแบบโดยสัมพันธ์กับระยะทางการไหล (Boulding and Ginn, 2004)



ภาพที่ 10 ผลกระทบการกระจายและการหน่วงในเคลื่อนที่ของสารปนเปื้อนจากแหล่งต่อเนื่อง: (a) ความเข้มข้นสัมพันธ์เปรียบเทียบกับวิธีการพาเท่านั้น; (b) รูปแบบของพุ่ม (plume)

ที่มา: U.S. EPA. (1987a)

9. ลักษณะของชั้นตัวกลางที่ใช้ในการทดลอง

9.1 ทรายออตตาวา (Ottawa sand)

ชั้นตัวกลางรูปพรุนที่เลือกมาใช้ในการทดลองคือทรายออตตาวา (Ottawa sand) ซึ่งเกิดขึ้นในธรรมชาติ ทรายชนิดนี้เกิดจากแร่ซิลิคอนไดออกไซด์ (SiO_2) หรือที่เรียกว่าแร่ควอตซ์ โดยมีความบริสุทธิ์ประมาณ 99 % จากแหล่งออตตาวา (Ottawa, IL) ทรายชนิดนี้ถูกใช้ประโยชน์ในการทดลองเป็นส่วนใหญ่ เพราะนอกจากมีความบริสุทธิ์ค่อนข้างสูงแล้ว ยังมีคุณสมบัติตามที่ต้องการคือขนาดเล็กเม็ดกลม เส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ $250\text{ }\mu\text{m}$ และมีความหนาแน่นเท่ากับ $2650\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ซึ่งจะทำให้เกิดสภาพความพรุนที่เป็นแบบเดียวกันกล่าวคือ มีขนาดช่องว่างระหว่างเม็ดทรายช่วงการบรรจุทรายค่อนข้างเท่ากัน (Velea et al., 2000) การศึกษางานวิจัยที่ได้ทำการเลือกใช้ทรายออตตาวา ซึ่งได้กล่าวลักษณะจำเพาะของทรายชนิด C778 Ottawa sand (20–30 mesh) (US Silica Company, Ottawa, Illinois) โดยใช้เป็นชั้นตัวกลางรูปพรุนเพิ่มเติมดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 คุณสมบัติของทรายออตตาวา

คุณสมบัติ	
สูตรโครงสร้างทางเคมี	SiO_2
โครงสร้าง	สะอาด ไม่มั่งคั่ง (unconsolidated)
ขนาดตะแกรง (mesh) (μm)	600-840
เส้นผ่านศูนย์กลางเม็ดทรายโดยเฉลี่ย (μm)	720
ความหนาแน่นทั้งก้อน (bulk density) (g/cm^3)	1.74
ความหนาแน่นอนุภาค (particle density) (g/cm^3)	2.82
ความพรุน, $\emptyset$	0.33 ± 0.006
ความสามารถในการซึมผ่านได้ (m^2), k	2.305×10^{-10}

ที่มา: US Silica Company, Ottawa, Illinois

การวัดความพรุนของทรายออตตาวาถูกตัดสินใจโดยการหยดของเหลว 3 ชนิด (น้ำ, แอลกอฮอล์ 97%, โทลูอิน 99%) เพื่อการวัดความพรุนของตัวกลางและการวัดเฟสความอิมตัวของ

การเป็ยกและไม่เป็ยกบนของแข็งโดยการใช้ระบบยิงผ่านของรังสีแกมมาเจือจาง (Ishakoglu and Baytas, 2005) ขณะที่การวัดความสามารถในการซึมผ่านได้ของของเหลว 3 ชนิด ทำนายได้จากสมการ Carman–Ergun equation ซึ่งจะได้ค่าในตารางที่ 3 (Lago and Araujo, 2001)

$$k = \frac{\phi^3 d^2}{180(1-\phi)^2} \quad (15)$$

เมื่อ k = permeability of the porous medium (m^2)
 d = the grain diameter of porous medium (m)
 ϕ = equivalent ratio (-)

9.2 หินปูน (limestone)

รัชฎา (2540) ได้รายงานความหมายหินปูนคือ ชั้นหินหรือตะกอน (Secondary Rocks) ทุกชนิดที่ประกอบด้วยสารประกอบแคลเซียมคาร์บอเนตมากกว่า 50 % โดยน้ำหนัก ได้แก่แร่ประกอบหินที่เรียกว่าแร่แคลไซต์ ($CaCO_3$) และแร่โดโลไมต์ ($CaMg(CO_3)_2$) หรืออาจมีแร่สองชนิดนี้ร่วมกันโดยมีแร่แคลไซต์มากกว่าแร่โดโลไมต์ หินปูนที่มีค่าในเชิงพาณิชย์จะมีแร่แคลไซต์มากกว่า 90 %

หินปูนทั่วไปอาจมีเนื้อแน่น หรืออาจประกอบด้วยผลึกหยาบ หรือเม็ดไขปลา (Oolite) อาจมีสิ่งปะปนอื่นๆ เช่น เชิร์ต (Chert) ทราช ทราชแป้ง ดิน และซากดึกดำบรรพ์ หรืออาจเป็นชั้นหินบางๆ มีรูพรุน

9.2.1 การกำเนิดหินปูน

- ก. เกิดจากการตกตะกอนของการสะสมตัวของหินปูนที่ถูกพัดพามากขึ้นแผ่นดิน
- ข. เกิดจากการตกตะกอนทางเคมี (Chemical Precipitation)
- ค. เกิดจากการตกตะกอนของซากพืชซากสัตว์ หรือซากเปลือกหอย

หินปูนในประเทศไทยแบ่งออกได้เป็น 3 กลุ่มใหญ่ตามอายุทางธรณีวิทยาได้แก่ หินปูนยุค ออร์โดวิเชียน (Ordovician) หินปูนยุคเพอร์เมียน (Permian) และหินปูนยุคไทรแอสสิกและยุคจูแรสสิก (Triassic and Jurassic)

ขณะที่กลุ่มตัวอย่างหินปูนที่ใช้ในการทดลอง จะใช้หินปูนยุคเพอร์เมียน ซึ่งเป็นหินปูนที่พบกระจายตัวอย่างกว้างขวางทั่วประเทศ เช่น บริเวณภาคตะวันตก ภาคเหนือ ติดต่อกลอดถึงภาคใต้ ภาคกลาง และภาคตะวันออกและบริเวณขอบที่ราบสูง จากบริเวณจังหวัดเลยลงมาเพชรบูรณ์ สระบุรี ด้านตะวันตกของนครราชสีมา ลงไปถึงปราจีนบุรี จันทบุรี และตราด มีอายุในหินปูนยุคเพอร์เมียนช่วงล่างถึงช่วงกลาง โดยทั่วไปจะประกอบด้วยชั้นหินปูนเกือบตลอดลำดับชั้นหิน

หินปูนยุคเพอร์เมียนนี้ มีชื่อเรียกทั่วไปว่า ห่มหินราชบุรี โดยมากใช้เรียกหินปูนที่พบทางภาคตะวันตกลงไปถึงภาคใต้ ส่วนหินปูนที่ปรากฏตามบริเวณของที่ราบสูงโคราช นิยมเรียกว่า ห่มหินสระบุรี ส่วนที่ปรากฏอยู่ทางภาคเหนือมีชื่อเรียกอื่นๆอีกหลายชื่อ

ห่มหินราชบุรี เกิดในสภาพแวดล้อมบริเวณที่ราบขานชลา (Platform) ของทะเลตื้นตั้งแต่ส่วนที่เป็นทะเลเปิดถึงบริเวณที่เป็นทะเลสาป (lagoon) โดยมีการรุกเข้าและถดถอยของน้ำทะเลอยู่เสมอ โดยสภาพเช่นนี้จึงเกิดหินปูนเป็นชั้นๆถึงชั้นหนามาก และมีชั้นหินดินดานและหินทรายอยู่ตอนล่าง ลักษณะของการลำดับชั้นหินของห่มหินราชบุรี ช่วงล่างอยู่ติดกับชั้นหินดินดาน และชั้นหินทรายนี้บางแห่งจะพบเป็นเนื้อโคลิไมติกถึงโคโลไมต์ ช่วงกลางจะเป็นหินปูนเป็นชั้นหนามากซึ่งเป็นหินปูนคุณภาพดี ส่วนช่วงล่างจะพบชั้นหินปูนที่มีเนื้อโคลิไมต์อีก

ห่มหินสระบุรี เป็นกลุ่มหินปูนที่เกิดในสภาพแวดล้อมหลายแบบ เช่น basin plain, basin margin, outer platform, inner platform, restrict platform, และ marginal marine เป็นต้น พื้นที่ที่เป็นเนื้อหินหินปูน (carbonate facies) จะพบอยู่บริเวณด้านตะวันตก ส่วนพื้นที่ที่เป็นเนื้อหินทรายซิลิกา สลับเนื้อปูน (Siliciclastic-carbonate facies) จะพบอยู่ในบริเวณตอนกลาง และพื้นที่ที่เป็นเนื้อหินปูนสลับเนื้อทรายซิลิกา (Carbonate-clastic facies) จะพบบริเวณด้านตะวันออกสุดของแถบ Phetchabun fold belt เมื่อพิจารณาถึงการลำดับชั้นหินตามแนวตั้งแล้วจะพบว่าพื้นที่ที่เป็นเนื้อหินปูนเป็นชั้นถึงชั้นหนา จะพบอยู่ในช่วงล่างถัดขึ้นมา ช่วงกลางส่วนใหญ่จะเป็นชั้นหินเนื้อทรายซิลิกา สลับชั้นหินปูนบางๆ สำหรับช่วงบนสุดจะเป็นชั้นเนื้อหินปูน มีชั้นหินทราย หรือเนื้อซิลิกาเป็นกระเปาะแทรกสลับอยู่

หินปูนยุคเพอร์เมียนในบางพื้นที่พบเป็นเนื้อหินโดโลมิติกไลม์สโตนและแร่โดโลไมต์ สาเหตุจากการแปรสภาพของส่วนประกอบที่เรียกว่า diagenesis จากการทับถมตัวและการเคลื่อนไหวของเปลือกโลก (tectonics) โดยเฉพาะบริเวณภาคตะวันตก หรือบริเวณแนวรอยเลื่อน (fault) ขนาดใหญ่ เช่น แนวรอยเลื่อนเจดีย์สามองค์ แนวรอยเลื่อนระนอง-ชุมพร แนวรอยเลื่อนคลองมรุข (กระบี่-สุราษฎร์ธานี) เป็นต้น นอกจากนี้ บริเวณที่มีหินอัคนีจำพวกหินแกรนิตแทรกขึ้นมาสัมผัสกับหินปูนยุคนี้ทำให้เกิดการแปรสภาพเป็นหินอ่อนกลายเป็นหินอุตสาหกรรมมีค่าอีกด้วย หินปูนยุคเพอร์เมียน เป็นหินปูนที่มีศักยภาพเชิงเศรษฐกิจสูงที่สุด เนื่องจากปรากฏกระจายตัวอย่างกว้างขวางตามพื้นที่ต่างๆเกือบทั่วประเทศ รวมทั้งมีหน่วยหินปูนคุณภาพดีที่เป็นชั้นหนาถึงหนามากปรากฏอยู่ในลำดับชั้นหินโดยทั่วไปอยู่หลายช่วง

จากการศึกษาพื้นที่ปนเปื้อน ซึ่งเป็นพื้นที่ของบริษัทเอกชนตั้งอยู่ในหมู่บ้านปางอโศก ต.กลางดง อ.ปากช่อง จ.นครราชสีมา โดยได้มีการตรวจพบการลักลอบฝังกลบกากอุตสาหกรรม เมื่อวันที่ 9 กันยายน พ.ศ. 2547 ซึ่งก่อนหน้านั้นได้มีเพลิงไหม้ รวมไปถึงการระเบิดที่มีสาเหตุมาจากถังเก็บของเสียบรรจุไฮดรอลิกไฮโดรไฟฟ้าน้ำมันจำนวนมาก ต่อมาจึงส่งผลต่อการไหลซึมลงสู่ชั้นใต้ดินและชั้นน้ำใต้ดินได้ในที่สุด จากการตรวจสอบการปนเปื้อนในดิน น้ำใต้ดิน และน้ำผิวดิน พบสารอินทรีย์ระเหย (VOCs) เกินมาตรฐานคุณภาพน้ำใต้ดิน โดยเฉพาะสารเบนซีน (Benzene), สารไตรคลอโรเอธิลีน (TCE) และสารเตตระคลอโรเอธิลีน (PCE) เป็นต้น การปนเปื้อนของสารเคมีอันตรายดังกล่าวได้ตรวจพบในพื้นที่ลุ่มน้ำย่อยซับตะเคียน ในบางบริเวณของภูเขาหินปูน ซึ่งจัดอยู่ในหมวดหินเขาขาด พบหน้าผาหินปูนที่มีรอยแตกจำนวนมาก จากการแปลภาพถ่ายทางอากาศร่วมกับแผนที่ภูมิประเทศ การสำรวจหินโพล์ และวัดแนวการวางตัวของหินสามารถวัดทิศทางการวางตัวของแนวรอยแตกของหินในพื้นที่ลุ่มน้ำย่อยซับตะเคียนได้ จำนวน 262 แนว และวิเคราะห์มุมมองของการวางตัวพบว่าทิศทางการวางตัวหลักของรอยแตกมี 2 แนวคือ แนวตะวันออกเฉียงใต้-ตะวันตกเฉียงเหนือ และแนวตะวันออกเฉียงเหนือ-ตะวันตกเฉียงใต้ โดยมีค่าเฉลี่ยส่วนใหญ่อยู่ในแนว 26 องศา ความลึกของหินปูนที่อนุมานได้จากข้อมูลทางโครงสร้างของหินเพื่อทำแบบจำลองความลึกในระดับไม่เกิน 400 เมตร ความหนาของดินที่ปิดทับหินปูนประมาณ 12 เมตร ความลึกของรอยแตกหลักที่ให้น้ำมี 2 ระดับ ได้แก่ 20-30 เมตร และ 45-50 เมตร ส่วนการดำเนินการตรวจวัดค่าจากบ่อน้ำบาดาลและบ่อสังเกตการณ์ที่เจาะเพิ่มเติมจำนวน 33 บ่อ ได้แก่ Electrical Conductivity (EC), Total Dissolved Solids (TDS) ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) และอุณหภูมิ จำนวน 3 ครั้ง ในช่วงต้นฤดูฝน ฤดูฝน และฤดูแล้ง คุณภาพตลอดพื้นที่เป็นน้ำจืด (TDS น้อยกว่า 700 มก./ล.) ความเป็นกรด-ด่าง มีค่าในช่วง 6.5-7.8 (กรมทรัพยากรน้ำบาดาล, 2550)

9.2.2 คุณสมบัติทางกายภาพ

รูปผลึกอยู่ในระบบ Hexagonal พบเกิดเป็นผลึกหลายรูปแบบและเป็นผลึกที่ซับซ้อนมาก มีรอยแตกเรียบที่สมบูรณ์ 3 ด้าน แต่ละด้านไม่ตั้งฉากกัน เมื่อเคาะหรือสีกัดออกมาจะแตกออกมาเหมือนสี่เหลี่ยมขนมเปียกปูนอยู่เสมอ ความแข็ง 3 ถ.พ. 2.7 มีความวาวคล้ายแก้วหรือด้านเหมือนดิน (Earthy) มีหลายสี เช่น สีขาวจนถึงสีเทาเข้ม ขึ้นกับมลทินต่างๆที่ปะปนอยู่

ตารางที่ 4 คุณสมบัติของหินปูนและปูนขาว

คุณสมบัติของหินปูนและปูนขาว	
โครงสร้างโมเลกุล	CaCO_3
มวลโมเลกุล	100.087 g/mol
ลักษณะที่ปรากฏให้เห็น	แป้งขาวเนื้อละเอียด
ความหนาแน่น	2.71 g/cm ³ (calcite) 2.83 g/cm ³ (aragonite)
จุดหลอมเหลว	825 °C (calcite) 1339 °C (aragonite)
จุดเดือด	ย่อยสลายได้
ความสามารถในการละลายน้ำ	.00015 mol/L (25°C)
ความสามารถในการละลายของผลิตภัณฑ์, K_{sp}	4.8×10^{-9}
ความสามารถในการละลายในกรดเจือจาง	ละลายได้
Structure	
โครงสร้างผลึก	Trigonal
กลุ่มช่องว่าง (space group)	32/m

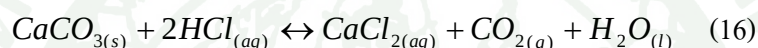
ที่มา: http://en.wikipedia.org/wiki/Calcium_carbonate

9.2.3 คุณสมบัติทางเคมี

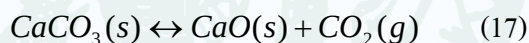
โดยทั่วไปหินปูนประกอบด้วยแคลเซียมออกไซด์ (CaO) 22-56 %, แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) 0-21 %, เหล็กออกไซด์ (Fe₂O₃) 3 % สูตรเคมี CaCO₃ ประกอบด้วย CaO 56.0 % และ CO₂ 44.0 %

แคลเซียมคาร์บอเนตจะมีการเปลี่ยนแปลงเกิดแคลเซียมคาร์บอเนตในรูปแบบอื่นๆ ได้แก่

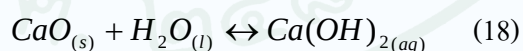
1. เมื่อทำปฏิกิริยากับกรดแก่ ทำให้เกิดการปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์ออกมดังสมการ



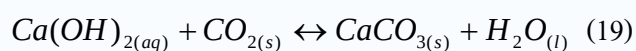
2. เมื่อปฏิกิริยาของแคลเซียมคาร์บอเนตมีการปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์ โดยใช้ความร้อนมากกว่า 840°C (ในกรณีของแคลเซียมคาร์บอเนต) จะได้ผลิตภัณฑ์เกิดแคลเซียมออกไซด์ โดยมีชื่อเรียกทั่วไปคือ ปูนสุก หรือปูนขาว (ที่ยังไม่ผสมน้ำ) ด้วยปฏิกิริยาเอนทัลปี 178kJ/mole ดังสมการ



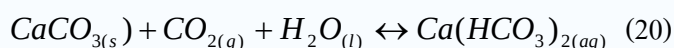
นอกจากนี้ทางเลือกของแคลเซียมออกไซด์ เมื่อได้ทำปฏิกิริยากับน้ำ อาจช่วยกำจัดความกระด้างในน้ำ เพราะเมื่อแคลเซียมออกไซด์ละลายน้ำ จะได้ผลิตภัณฑ์เป็นแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ซึ่งไม่ละลายน้ำ ดังสมการ



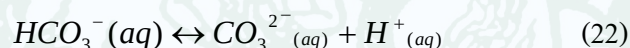
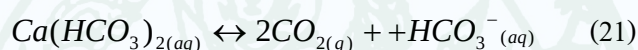
และเมื่อเราปล่อยให้แคลเซียมไฮดรอกไซด์ทำปฏิกิริยากับคาร์บอนไดออกไซด์อีกครั้งก็จะได้หินปูนแคลเซียมคาร์บอเนตออกมาเหมือนเดิม ดังสมการ



แต่เมื่อแคลเซียมคาร์บอเนตจะทำปฏิกิริยากับน้ำ ซึ่งถูกทำให้อิ่มตัวด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ เกิดผลิตภัณฑ์เป็นแคลเซียมไบคาร์บอเนตที่ละลายน้ำ ดังปฏิกิริยา



แต่แคลเซียมไฮโดรเจนคาร์บอเนตเมื่อถูกทิ้งไว้เป็นเวลานาน น้ำเกิดการระเหยออกไป พร้อมแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ทำให้สามารถกลับมาเป็นหินปูนอีกครั้ง ปฏิกิริยานี้เป็นปฏิกิริยาสำคัญที่ทำให้เกิดการกร่อนของภูเขาหินปูน ทำให้อาจมีการเกิดโครงสร้างที่เรียกว่าถ้ำหินปูนได้ และนำไปสู่การเกิดค่าความกระด้างในน้ำ ซึ่งส่งผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิตต่างๆที่อยู่ในน้ำต่อไปดังสมการ



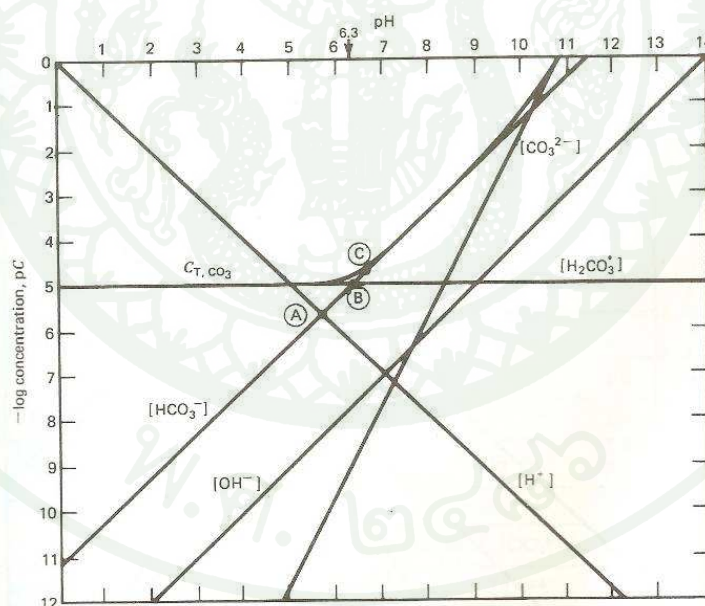
การพิจารณาค่าความเข้มข้นสารประกอบคาร์บอเนตเมื่อเทียบกับค่า pH ในน้ำ สามารถพิจารณาได้จากระบบเปิดและระบบปิดดังแสดงในภาพที่ 11 และ ภาพที่ 12 โดยอนุมาณสารประกอบกรดคาร์บอนิก (H_2CO_3^*) เป็นตัวแทนสารประกอบกรดคาร์บอนิกรวมกับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ($\text{H}_2\text{CO}_{3(aq)} + \text{CO}_{2(aq)}$) และชั้นบรรยากาศปกติจะมีปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ เท่ากับ $10^{-3.5}$ atm จากตารางการเปรียบเทียบขององค์ประกอบทั้งหมดของสารประกอบคาร์บอเนตและค่า pH ทั้งในระบบเปิดและระบบปิด แสดงในตารางที่ 5

ตารางที่ 5 แสดงการเปรียบเทียบความเข้มข้นทั้งหมดของสารประกอบคาร์บอเนต ระหว่างระบบเปิดและระบบปิด

Solution	Closed System (Fig. 4-17)						C_{T,CO_3}
	$[H^+]$	$[OH^-]$	$[H_2CO_3^*]$	$[HCO_3^-]$	$[CO_3^{2-}]$	pH	
$10^{-5} M H_2CO_3^*$	$10^{-5.7}$	$10^{-8.3}$	$10^{-5.1}$	$10^{-5.7}$	$10^{-10.4}$	5.7	$10^{-5.0}$
$10^{-5} M NaHCO_3$	$10^{-7.6}$	$10^{-6.4}$	$10^{-6.4}$	10^{-5}	$10^{-7.6}$	7.6	$10^{-5.0}$
$10^{-5} M Na_2CO_3$	10^{-9}	10^{-5}	$10^{-7.6}$	10^{-5}	$10^{-6.3}$	9.0	$10^{-5.0}$

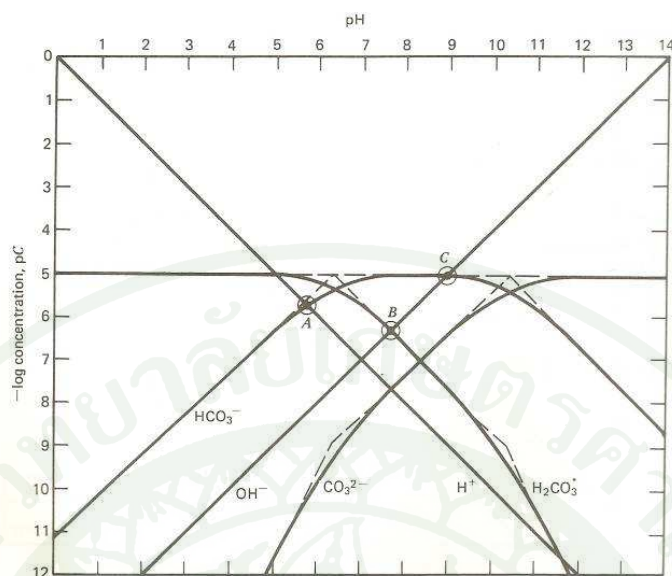
Solution	Open System						C_{T,CO_3}
	$[H^+]$	$[OH^-]$	$[H_2CO_3^*]$	$[HCO_3^-]$	$[CO_3^{2-}]$	pH	
$10^{-5} M H_2CO_3^*$	$10^{-5.7}$	$10^{-8.3}$	10^{-5}	$10^{-5.7}$	$10^{-10.4}$	5.7	$10^{-4.9}$
$10^{-5} M NaHCO_3$	$10^{-6.3}$	$10^{-7.7}$	10^{-5}	10^{-5}	$10^{-9.5}$	6.3	$10^{-4.7}$
$10^{-5} M Na_2CO_3$	$10^{-6.7}$	$10^{-7.3}$	10^{-5}	$10^{-4.7}$	$10^{-8.3}$	6.6	$10^{-4.5}$

ที่มา: Snoeyink and Jenkins (1980)



ภาพที่ 11 ความเข้มข้นโดยรวมของสารประกอบคาร์บอเนต (C_{T,CO_3}) เทียบกับการเปลี่ยนแปลงค่า pH ในระบบเปิดที่อุณหภูมิ 25 °C

ที่มา: Snoeyink and Jenkins (1980)



ภาพที่ 12 ความเข้มข้นโดยรวมของสารประกอบคาร์บอเนต (C_{T,CO_3}) เทียบกับการเปลี่ยนแปลงค่า pH ในระบบปิดที่อุณหภูมิ 25 °C

ที่มา: Snoeyink and Jenkins (1980)

10. คุณสมบัติของเซรามิก (Ceramic property)

เซรามิกที่ใช้ในการทดลองอัตราการซึมผ่านของน้ำ (Imbibition rate) จะเลือกใช้รหัสผลิตภัณฑ์ 1430B0.5M2 จากบริษัทซอยด์ มอยซ์เจอร์ (Soil moisture company) ซึ่งมีน้ำหนัก 0.05 ปอนด์ (0.02 kgs) และเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 6.03 เซนติเมตร การออกแบบเซรามิก จะออกแบบตามความเหมาะสมของชุดอุปกรณ์ 1400 Tempe pressure cells ส่วนลักษณะของเซรามิกถูกพัฒนามาจากตัวของอะลูมินา (alumina body) ที่ได้รับความร้อนสูง คุณสมบัติของเซรามิกนั้นได้แก่

1. ลักษณะความพรุนในระดับดีเยี่ยม
2. มีความเฉื่อยต่อสารละลายส่วนใหญ่
3. ความแข็งแรงทั้งภายนอกและภายใน

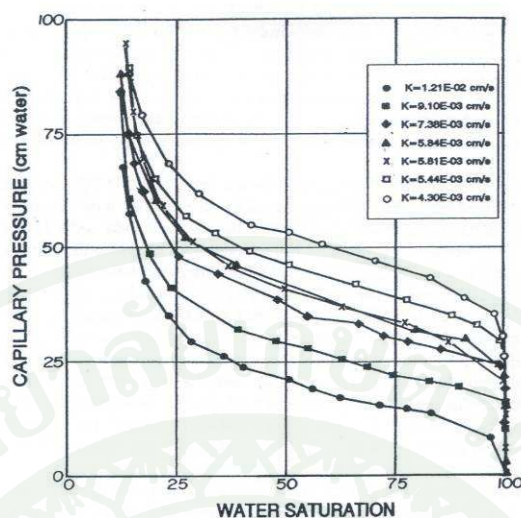
ข้อแนะนำเซรามิกชิ้นนี้จะต้องมีความแตกต่างความดันของอากาศต่ำ กล่าวคือไม่เกิน 0.5 บาร์ (Bar) หรือประมาณ 7.25 ไซน์ (psi) ความดันของฟองอากาศประมาณ 7.5 - 9 ไซน์ พร้อมกับ

ค่าประสิทธิภาพพรมเท่ากับ 6.0 ไมครอน (micron), ค่าการซึมผ่านได้ของน้ำประมาณ 0.0000311 เซนติเมตรต่อวินาที (cm/sec), หรือสามารถวัดความพรมได้ประมาณ 50 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร รวมไปถึงค่าการไหลผ่านแผ่นเซรามิกเท่ากับ 0.25 นิ้วของแผ่นเซรามิก หรือเท่ากับ 180 มิลลิเมตรต่อชั่วโมงต่อพื้นที่สี่เหลี่ยมหน่วยเซนติเมตร (ml/hr/sqcm) (ประมาณ 14.7 ไซน์) คุณสมบัติของวัสดุอะลูมินาอีกหนึ่งข้อที่สำคัญคือ จะไม่มีการแลกเปลี่ยนไอออนหรือกำจัดไอออนแร่ธาตุ

11. ผลกระทบของฮิสเทอรีซิส (Hysteresis)

ในการรักษาสภาพความชื้นในดิน จะมีความแตกต่างเนื่องจากหลายปัจจัย ทำให้เนื้อดินอาจเปียกและแห้งได้หรือเป็นภาวการณ์ความไม่แน่นอนของการเปียกบนพื้นผิว ซึ่งผลกระทบอย่างนี้เรียกว่า ฮิสเทอรีซิส (Hysteresis) ค่าความแปรผันความชื้นจะขึ้นอยู่กับปัจจัยคุณสมบัติทางกายภาพของดิน เช่น ความพรม ลักษณะเนื้อดิน องค์ประกอบสารเคมีในดิน แรงดันคาпилลารี เป็นต้น (Boulding and Ginn, 2003) ส่วนในการเปลี่ยนแปลงแรงดันคาпилลารี (capillary pressure) ความสามารถซึมผ่านได้ของน้ำอย่างสัมพัทธ์ (relative permeability) จะเป็นตัวแทนสอดคล้องกับสถานะความอิ่มตัวโดยขึ้นอยู่กับชั้นตัวกลางในแบบฮิสเทอรีซิสด้วย ซึ่งเกี่ยวข้องกับการซึมผ่านของน้ำ (imbibition) หรือระบายน้ำ (draining) ของของไหลได้

สถานะแรงดันคาпилลารีแบบฮิสเทอรีซิสนี้จะมีความเกี่ยวข้องกับของไหลที่ไม่เปียกน้ำ เกาะติดอยู่และก่อให้เกิดความแตกต่างของมุมสัมผัส (contact angle) ในระดับความเปียกที่หลากหลายได้ (Mercer and Cohen, 1990) กราฟส่วนโค้งระหว่างแรงดันคาпилลารีและความอิ่มตัวในภาพที่ 13 ถูกวัดภายใต้เงื่อนไขเกี่ยวกับเรื่องความอิ่มตัวของน้ำลดลง แต่แรงดันคาпилลารีมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นผลมาจากการรุกรานของ DNAPL ภายในชั้นตัวกลางที่อิ่มตัวด้วยน้ำ ปรากฏการณ์เช่นนี้เรียกว่าการระบายน้ำ และสอดคล้องกับสถานการณ์การปนเปื้อนของสาร DNAPL ในน้ำใต้ดิน เมื่อเวลานานขึ้นอาจจะมีการเคลื่อนที่ของสาร DNAPL ออกจากแหล่งนั้น ซึ่งเป็นผลมาจากการแทนที่ของน้ำ โดยเรียกกระบวนการนี้ว่า การเปียกของน้ำ (wetting) หรือกลไกการซึมผ่านของน้ำ



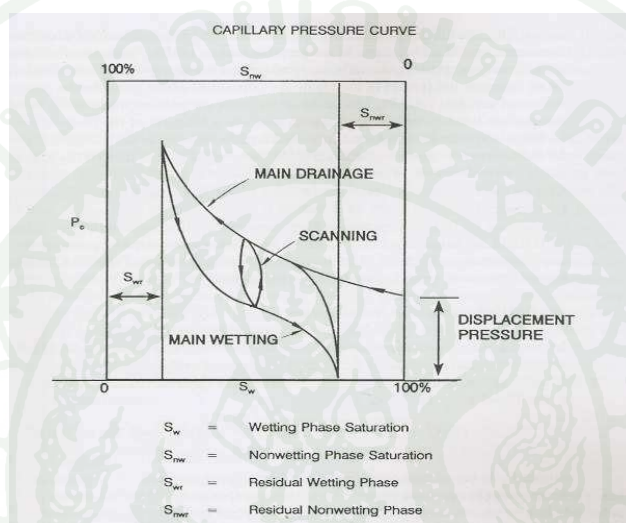
ภาพที่ 13 การวัดส่วนโค้งแรงดันคาปิลลารี-ค่าความอิ่มตัวน้ำสำหรับระบบสารเปอร์คลอรีนเอทิลีน-น้ำ

ที่มา: Kueper and Frind (1991b)

ในภาพที่ 13 จะแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันคาปิลลารีและสถานะความอิ่มตัวของน้ำเป็นผลให้เกิดกระบวนการที่เรียกว่า “ฮิสเทอรีซิส” ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่าสถานะความอิ่มตัวของน้ำที่แรงดันคาปิลลารีโดยเฉพาะนั้น จะมีช่วงค่ากระบวนการเปียกน้อยกว่าช่วงค่ากระบวนการระบายน้ำ ความสำคัญของแรงดันคาปิลลารีโดยเฉพาะนั้นเป็นเหตุผลสนับสนุนหลักความจริงเกี่ยวกับ ความอิ่มตัวของน้ำสูงสุด (Maximum water saturation, S_m) ซึ่งเป็นความสำเร็จของกระบวนการเปียกน้ำ แต่อย่างน้อยก็ต่ำกว่าองศาของกระบวนการทั้งหมด ขณะที่ปริมาณความอิ่มตัวของ DNAPL ที่ตกค้างอยู่ (residual DNAPL saturation) คือมีค่าเท่ากับ $1-S_m$ DNAPL ที่ตกค้างอยู่จะอยู่ในรูปของบล็อบ (Blobs) และฟิงเกอร์หรือแองเกลีย (fingers or ganglia) ของ DNAPL ซึ่งจะถูกแยกออกหรือไม่ได้ขึ้นอยู่กับส่วนของของเหลว DNAPL หลัก โดย DNAPL ที่ตกค้างจะถูกล้อมรอบด้วยน้ำนั่นเอง (Pankow and Cherry, 1996)

มีการทำวิจัยศึกษามากมายเกี่ยวกับฮิสเทอรีซิสกับการเปียกได้และสังเกตโดยมุมสัมผัสที่ทำมุมกับแรงดึงระหว่างผิว (interface) หรืออาจเรียกว่าเป็นการทำมุมระหว่างพื้นผิวของแข็งที่สัมผัสกับของไหล ซึ่งอาจจะเป็นแบบ มุมสัมผัสก้าวหน้า (advancing contact angle, θ_a) หรือมุมสัมผัสถอยกลับ (retreating contact angle, θ_r)

ถดถอย (receding contact angle, θ_r) คุณสมบัติการเปียกของพื้นผิวที่มีส่วนผสมแตกต่างกันเป็นสาเหตุของการเกิดฮิสเทอรีซิสได้ (Israelachvili, 1991) และพื้นผิวที่มีส่วนผสมกันในทางธรณีวิทยาจะมีผลสามารถทำนายการเกิดฮิสเทอรีซิสในมุมสัมผัสได้ (Robin and Koci, 1996) นอกจากนี้มีรายงานว่า การเกิดฮิสเทอรีซิสมีความสัมพันธ์กับความเร็วของแรงดึงระหว่างผิว (Rose and Heins, 1962)



ภาพที่ 14 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันคาปิลลารี-ความอิ่มตัวด้วยน้ำแสดงภาวะฮิสเทอรีซิส

ที่มา: Pankow and Cherry (1996)

12. ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดึงระหว่างผิว แรงดันคาปิลลารี มุมสัมผัส ต่อความสามารถที่จะเปียกได้ (Wettability)

พื้นผิวระหว่างของไหลที่ไม่ผสมกัน 2 ชนิดมีขอบเขตติดต่อกันด้วยแรงดึง ซึ่งคล้ายกับว่ามีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างชั้นบางๆ แรงดึงนี้เรียกว่า แรงดึงระหว่างผิว (interfacial tension) แรงดึงระหว่างผิวนั้น มีสาเหตุมาจากแรงดึงดูดซึ่งกันและกันของของไหลไม่ที่ผสมกัน 2 ชนิด แรงดึงระหว่างผิวโดยทั่วไปจะแสดงในหน่วยแรงต่อหน่วยความยาว แต่ก็สามารถแสดงในหน่วยพลังงานต่อพื้นที่ได้เช่นกัน แรงดึงระหว่างผิวมีคุณสมบัติซึ่งยอมให้ของไหลที่ไม่ผสมกัน 2 ชนิดยังคงเชื่อมต่อกันได้ที่ระดับแรงดันแตกต่างกัน ค่าของแรงดึงระหว่างผิวอยู่ในช่วงประมาณตั้งแต่ 20-50 ไดน์ / เซนติเมตร

สำหรับของไหล 2 ชนิดคือ น้ำและNAPL (Mercer and Cohen, 1990) เมื่อเวลาผ่านไป อาจจะมีการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติแรงดึงดูดระหว่างผิวได้ ของไหลที่มีแรงดึงดูดอย่างมากสำหรับของแข็งนั้น เรียกว่า ของไหลที่ชอบเปียกน้ำ (wetting fluid) และถ้ามีแรงดึงดูดน้อยต่อของแข็ง จะเรียกว่า ของไหลไม่ชอบเปียกน้ำ (non-wetting fluid) ของไหลที่ชอบเปียกนั้นจะแพร่กระจายไปอย่างอิสระบนของแข็ง นอกจากนี้ความสัมพันธ์แรงดึงดูดระหว่างของไหลที่ไม่ผสมกัน 2 ชนิดบนพื้นผิวของแข็ง จะเป็นที่เข้าใจกันในความหมายของ “มุมสัมผัส” (Contact angle) หรือมุมเปียก (wetting angle) ซึ่งเป็นมุมระหว่างพื้นผิวของของไหลที่ไม่ผสมกัน 2 ชนิดกับพื้นผิวของแข็ง มุมสัมผัสถูกสร้างโดยของไหล 2 สถานะและพื้นผิวของแข็ง ซึ่งเป็นผลมาจากกลไกความสมดุลที่ได้รับท่ามกลางแรงดึงดูดระหว่างผิว (Dullien, 1979) สภาพสมดุลดังกล่าวให้นิยามโดยสมการของ Young's equation (Adamson, 1982):

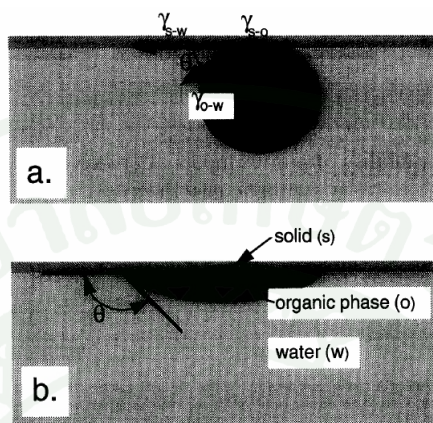
$$\gamma^{so} - \gamma^{sw} = \gamma^{ow} \cos \theta \quad (25)$$

เมื่อ γ = แรงดึงดูดระหว่างผิว (N/m)
 S = ของแข็ง
 O = น้ำมัน
 W = น้ำ
 θ = มุมสัมผัส

ซึ่งจะเชื่อมต่อกันระหว่างเฟสของแข็ง เฟสสารอินทรีย์ (น้ำมัน) และเฟสน้ำ โดยทั่วไปแล้ว $\theta \leq 90^\circ$ พื้นผิวของแข็งจะเปียกด้วยน้ำ และถ้า $\theta \geq 90^\circ$ จะเป็นการชอบเปียกด้วยสารละลายอินทรีย์ได้แก่ น้ำมัน NAPL เป็นต้น (Ishakoglu and Baytas, 2005)

ในส่วนความสามารถที่จะเปียกได้ (wettability) จะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติทางเคมีของของไหล และองค์ประกอบของพื้นผิวของแข็ง เป็นต้น ความสามารถในการที่จะเปียกได้ เป็นหนึ่งในคุณสมบัติของระบบซึ่งมีอิทธิพลต่อกระบวนการแรงดันคาปิลลารีระหว่างการเคลื่อนที่ของสารหลายสถานะผ่านชั้นตัวกลางรูพรุน (Donaldson *et al.*, 1969) คุณสมบัตินี้สามารถอธิบายแนวโน้มของของไหลที่แพร่กระจายไปตามพื้นผิวของแข็งและจะปรากฏในรูปของไหลที่ไม่สามารถผสมกันได้ (Crocker and Marchin, 1988) และปริมาณส่วนที่มากจะสามารถบ่งชี้การวัดขนาดของมุมสัมผัสได้ จากกฎเกณฑ์การวัดมุมสัมผัสได้ประมาณ 0° จะสามารถอธิบายได้ว่าเฟสพื้นผิวของแข็งที่

ชอบเปียกด้วยน้ำมากที่สุด ขณะที่การวัดมุมสัมผัสได้ประมาณ 180° จะสามารถอธิบายได้ว่าเฟสพื้นผิวของแข็งชอบเปียกด้วยน้ำมันมากที่สุด ตามภาพที่ 15 (Power and Tamblin, 1995)



ภาพที่ 15 มุมสัมผัสสำหรับเฟสหยดสารอินทรีย์ในน้ำ: (a) ระบบเปียกน้ำด้วยทิศทางแสดงความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานแรงตึงผิว (Young's equation) และ (b) เงื่อนไขการเปียกด้วยเฟสสารอินทรีย์

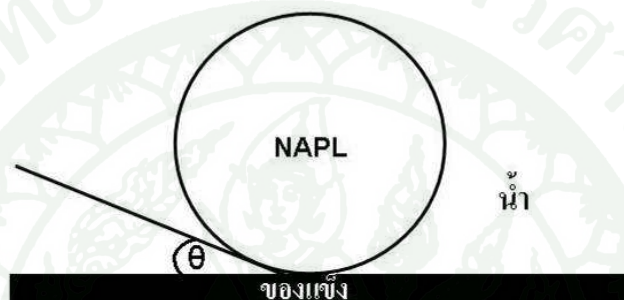
ที่มา: Power and Tamblin (1995)

ปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับมุมสัมผัส ซึ่งยอมให้ของไหลหนึ่งมีความสัมพันธ์ต่อความแตกต่างของแรงดันระหว่างผิว โดยไม่ใช่แค่แรงตึงระหว่างผิวของของไหลและลักษณะทางภูมิศาสตร์ระหว่างพื้นผิวเท่านั้น นอกจากนี้ยังเกี่ยวข้องกับสภาพทางภูมิศาสตร์ของตำแหน่งระหว่างพื้นผิวของไหลบนของแข็งด้วย

ภายใต้ผิวของเหลวจะมีแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลที่เท่ากันทุกทิศทางแต่บริเวณพื้นที่ผิวสัมผัสกับของแข็งหรือของไหลอื่นๆ โมเลกุลของของเหลวจะได้รับแรงภายในซึ่งเป็นแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลของของเหลวด้วยกันไม่เท่ากับแรงภายนอกซึ่งเป็นแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลของของเหลวกับโมเลกุลของของแข็งหรือของไหลอื่นๆ ของเหลวส่วนมากจะยึดเกาะอยู่กับของแข็งแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลของของเหลวกับของแข็ง (adhesive force) ขึ้นอยู่กับสภาพของผิวที่สัมผัส ถ้า adhesive force มากกว่าแรงดึงดูดระหว่างอนุภาคของของเหลวด้วยกัน (cohesive force) ของเหลวก็จะกระจายตัวออกและทำให้ผิวที่สัมผัสเปียก แต่หาก cohesive force มากกว่า ของเหลวจะติดกันแน่นเป็นหยดเล็ก ๆ จะไม่ทำให้ผิวที่สัมผัสเปียก

โดยการแผ่ของของเหลวดังกล่าวสามารถพิจารณาได้จากมุมสัมผัส (contact angle, θ) wettability นั้นอาจแบ่งได้เป็น (Xu *et al.*, 2006)

- 1) เปียกน้ำหรือ strongly water-wet, $\theta < 65^\circ$ ดังภาพที่ 16
- 2) เปียกผสมหรือ intermediate wet, $65^\circ < \theta < 105^\circ$
- 3) เปียกน้ำมันหรือ strongly oil-wet, $\theta > 105^\circ$ ดังภาพที่ 17



ภาพที่ 16 มุมสัมผัสของ NAPL บนพื้นผิวของแข็งที่เป็น strongly water-wet ล้อมรอบด้วยน้ำ

ที่มา: จิรายุ (2008)

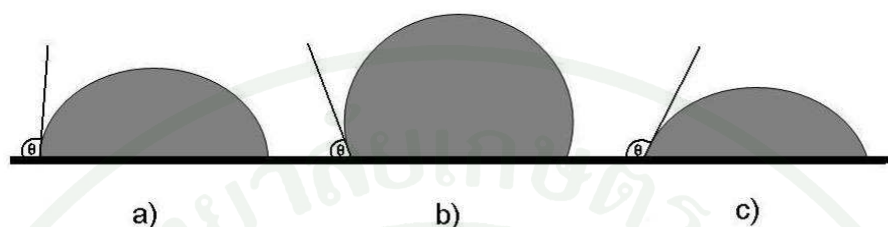


ภาพที่ 17 มุมสัมผัสของ NAPL บนพื้นผิวของแข็งที่เป็น strongly oil-wet ล้อมรอบด้วยน้ำ

ที่มา: จิรายุ (2008)

อิทธิพลของมุมสัมผัสดังแสดงในภาพที่ 18 เมื่อหยดของของเหลวที่อยู่บนผิวระนาบแนวนอน (horizontal) มุมสัมผัสจะเกิดขึ้นในระนาบที่อยู่ระหว่าง 3 เฟส เมื่อเพิ่มปริมาตรของของเหลวลงในหยดเดิม ลักษณะของหยดที่เกิดขึ้นจะมีความสูงเพิ่มขึ้น แต่ฐานยังมีความยาวเท่าเดิม ดังภาพที่ 18 b) จึงทำให้มุมสัมผัสมีค่าน้อยลง หลังจากนั้นลดปริมาตรของเหลวในหยดเดิม

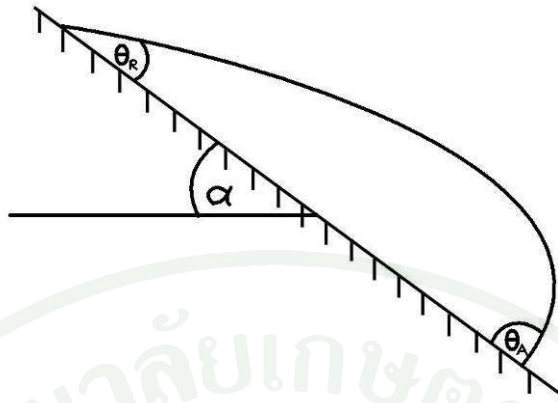
ภาพที่ 18 a) โดยที่ความยาวของฐานยังเท่าเดิม แต่หยดของเหลวแบนลง ดังนั้นมุมสัมผัสจึงมากกว่าหยดเดิม ดังภาพที่ 18 c)



ภาพที่ 18 อีสเทอรีซิสของมุมสัมผัส

ที่มา: Bikerman (1970)

จากงานวิจัยของ Bikerman (1970) มุมสัมผัสที่ได้รับการเพิ่มปริมาตรของหยด เรียกว่า advancing contact angles และจะใช้สัญลักษณ์ θ_A เมื่อปริมาตรของเหลวเพิ่มขึ้น ทำให้หยดของเหลวนั้นกระจายตัวออก โดยปกติจะเกิดจากการกระแทก การกระชาก ทำให้เส้นที่อยู่บนระนาบระหว่าง 3 เฟส ที่แท้จริงเกิดการเปลี่ยนโดยล้าเข้าไปในระหว่างผิวของของแข็งกับอากาศ ทำให้เกิดของเหลวกระจายออกบนผิวของแข็ง ซึ่งเกิดอย่างรวดเร็วจะเรียกว่าเป็น maximum advancing angle และมุมสัมผัสที่มีการลดปริมาตรของหยด เรียกว่า receding contact angles ใช้สัญลักษณ์ θ_R หยดของเหลวจะแบนลงหรือหดในทันที และมุมสัมผัสที่เกิดขึ้นนี้เรียกว่า minimum receding contact angle ดังแสดงในภาพที่ 19



ภาพที่ 19 หยอดของเหลวที่เอียงจากระนาบด้วยมุม α

ที่มา: Bikerman (1970)

สารละลายอินทรีย์ (DNAPL) เป็นของไหลที่ไม่ชอบเปียกน้ำ ดังนั้นในชั้นหินอุ้มน้ำจะมีสาร DNAPL ครอบคลุมในช่องเปิดขนาดใหญ่ ขณะที่น้ำมีแนวโน้มปกคลุมส่วนของแข็งและครอบคลุมในช่องเปิดขนาดเล็ก ความแตกต่างระหว่างแรงดันของของไหลที่ไม่ชอบเปียกน้ำ และแรงดันของของไหลที่ชอบเปียกด้วยน้ำ เรียกว่า แรงดันคาปิลลารี (capillary pressure, P_c) ในชั้นตัวกลางรูพรุน การเคลื่อนที่ไปตามแรงคาปิลลารี ถูกใช้เป็นตัวชี้วัดความสามารถที่จะเปียกได้ ในระบบโครงสร้างของรูพรุนและธรรมชาติแรงดันคาปิลลารีกระทำร่วมกันระหว่างของไหลกับของไหลเอง ซึ่งอธิบายของไหลที่ไหลเข้าไปในช่องว่างรูพรุน ความสัมพันธ์อันนี้สามารถอธิบายได้โดยสมการทางคณิตศาสตร์สมการ Laplace equation เพื่อที่จะดูเรื่องโครงสร้างรูคาปิลลารี (Adamson, 1982) ดังนี้

$$P_c = \Delta P = P_o - P_w = \frac{2\gamma^{ow} \cos \theta}{r} \quad (26)$$

- เมื่อ P_o = แรงดันคาปิลลารีของของไหลที่ไม่ชอบเปียกน้ำ (Pa)
 P_w = แรงดันคาปิลลารีของของไหลที่ชอบเปียกน้ำ (Pa)
 γ = แรงตึงระหว่างผิวของของไหลบนของพื้นผิวของแข็ง (N/m)
 r = รัศมีของรูคาปิลลารี (m)

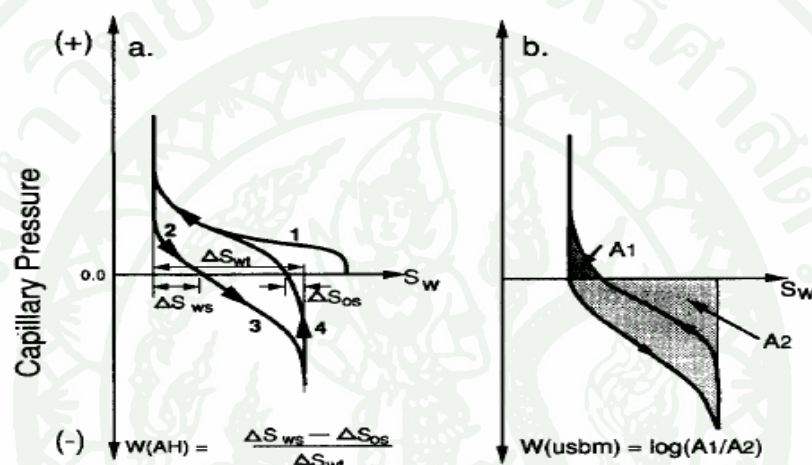
ปรากฏการณ์แรงดันคาปิลลารีจะมีการพึ่งพาแรงดึงดูดระหว่างผิวด้วย (Power and Tamblin, 1995) ทั้งแรงดึงดูดระหว่างผิวและมุมสัมผัสจะมีบทบาทสำคัญในบ่งชี้ธรรมชาติของระบบแรงดันคาปิลลารี สมการลาพลาซซ์จะอ้างถึงของไหลที่ชอบเปียกน้ำที่มีกระบวนการซึมเข้าได้เองภายในรูพรุนเล็กๆด้วยแรงดันคาปิลลารีค่อนข้างมาก ซึ่งสามารถทำนายได้ว่าแรงดันคาปิลลารีจะเป็นส่วนกลับของรัศมีของรู

สำหรับโครงสร้างรูพรุนที่ซับซ้อนของชั้นทราย กราฟส่วนโค้งระหว่างแรงดันคาปิลลารีและความอิ่มตัวของน้ำถูกใช้เป็นตัวแทนแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันและความชื้นภายในช่องว่างรูพรุน โดยของไหลแต่ละชนิด ดังภาพที่ 20a ความอิ่มตัวของน้ำ (S_w) จะเขียนในแกน X โดยมีความหมายคือ ปริมาตรของน้ำที่เติมเต็มในรูพรุนต่อปริมาตรของช่องรูพรุนทั้งหมด โครงสร้างรูพรุนที่ซับซ้อน เป็นสาเหตุของการเกิดกราฟส่วนโค้งในสภาวะความไม่แน่นอนสูง (highly hysteretic) ความต้องการแรงดันในการใช้ระบายน้ำ (wetting fluid) จากรูพรุนจะสูงกว่าการซึมผ่านของของไหลในช่องว่างรูเดียวกัน (Dullien, 1979)

จากค่าของมุมสัมผัสและกราฟส่วนโค้งระหว่างแรงดันคาปิลลารี-ความอิ่มตัวของน้ำ สามารถทำนายได้ว่า น้ำจะมีการซึมผ่านได้เองภายในชั้นตัวกลางที่มีรูพรุน ขณะที่แรงดันเป็นสิ่งจำเป็นต่อการซึมผ่านของของไหลที่ไม่เปียกน้ำ (nonwetting fluid) วิธีการอธิบาย แรงดันคาปิลลารี-ความอิ่มตัวด้วยน้ำ เพื่อบ่งชี้ปริมาณการเปียก ซึ่งพัฒนาในการใช้ไดอะแกรมความอิ่มตัว-แรงดันคาปิลลารี มี 2 วิธี คือ วิธี USBM (U.S. Bureau of mines) (Donaldson et al., 1969) จะใช้หลักพื้นฐานของ thermodynamics เป็นหลัก ซึ่งเป็นพลังงานที่ต้องการเพื่อการแทนที่เฟสที่ไม่เปียกน้ำด้วยเฟสที่เปียกน้ำจะมีค่าน้อยกว่าพลังงานที่ต้องการแทนที่เฟสที่เปียกน้ำด้วยเฟสที่ไม่เปียกน้ำ (Anderson, 1986) พลังงานที่ต้องการสำหรับการแทนที่สัดส่วนอย่างพอเหมาะของพื้นที่ระหว่างกราฟส่วนโค้งแรงดันคาปิลลารี และ เส้น $P_c = 0$ (Donaldson et al., 1969) ในรูปที่ 20b อธิบายการคำนวณดัชนี USBM ดัชนีตัวนี้จะมีค่าเป็นบวกถ้าตัวกลางรูพรุนชอบเปียกน้ำ ส่วนถ้าค่าเป็นลบ จะบ่งชี้ถึงตัวกลางที่ชอบเปียกสารอินทรีย์ และถ้าค่าเข้าใกล้ศูนย์ จะเป็นเงื่อนไขการเปียกที่เป็นกลางสำหรับวิธีของ Amott (Amott-Harvey method) จะถูกใช้วัดค่าความอิ่มตัวในเฟสของน้ำ หลังจากมีทั้งกลไกการเกิดขึ้นเองและกลไกการใช้แรงดันซึมซับน้ำเข้าไป

กราฟส่วนโค้งแรงดันคาปิลลารีเกิดจากการวัดลำดับความสมดุลครอบคลุมช่วงแรงดันคาปิลลารีในเงื่อนไขการเปียกของชั้นตัวกลางรูพรุนจะวัดอัตราการเคลื่อนที่กลับไปกลับมา

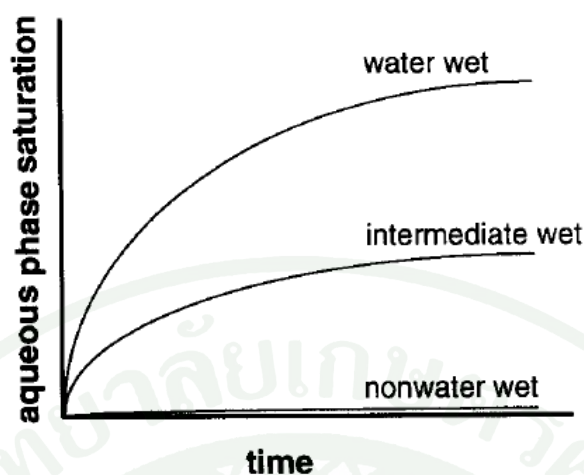
(dynamic rate) ของการซึมผ่านของน้ำที่เกิดขึ้นเอง ณ แรงดันคาปิลลารีหนึ่ง (Anderson, 1986) วิธีของอัตราการซึมผ่านของน้ำจะวัดได้ค่อนข้างเร็ว ซึ่งเป็นตัวบ่งชี้ทางคุณภาพที่สัมพันธ์ของความสามารถที่เปียกได้ ถ้ามีปริมาณของน้ำจำนวนมาก การซึมผ่านจะเกิดอย่างรวดเร็วภายในชั้นตัวกลางนั้นเป็นผลให้เกิดการชอบเปียกน้ำ ความแตกต่างของทั้งความหนืดของของไหลและแรงดึงดูดระหว่างผิว อาจมีความยุ่งยากในการเปรียบเทียบของอัตราการซึมผ่านของน้ำสำหรับตัวอย่างที่ผสมสัดส่วนสารอินทรีย์เข้าไปด้วย (Power and Tamblin, 1995)



ภาพที่ 20 ส่วนโค้งแรงดันคาปิลลารี-ค่าความอิ่มตัวด้วยน้ำและสมการสำหรับค่าดัชนีความสามารถเปียกได้โดย (a) วิธี Amott-Harvey และ (b) วิธี USBM อนุกรมของกราฟส่วนโค้งประกอบด้วย 1 = primary drainage; 2 = spontaneous imbibition; 3 = forced imbibition; และ 4 = secondary drainage.

ที่มา: Power and Tamblin (1995)

กราฟความดันคาปิลลารีได้เกิดมาจากชุดของความสมดุลของการวัดความดันคาปิลลารี ความหมายของบทสรุปลักษณะการเปียกของตัวกลางรูพรุนคือการวัดอัตราการเติมน้ำที่เกิดขึ้นเองที่ความดันคาปิลลารีหนึ่ง (Anderson, 1986) ส่วนวิธีการทดสอบอัตราการเติมน้ำเป็นวิธีวัดความสามารถเปียกได้เชิงคุณภาพ ถ้าน้ำปริมาณมากถูกเติมเข้าไปอย่างรวดเร็วในตัวกลาง ตัวกลางนั้นจะมีลักษณะชอบเปียกน้ำ (Water wet) แสดงดังภาพที่ 21 แต่ถ้าปริมาณน้ำถูกเติมเข้าไปอย่างช้าๆ ตัวกลางนั้นจะมีลักษณะเปียกสารอินทรีย์ (Oil wet)



ภาพที่ 21 ผลจากการทดสอบอัตราการเติมน้ำเทียบกับเวลา สามารถบ่งชี้ลักษณะการเปียกได้ 3 รูปแบบในชั้นตัวกลางรูพรุน

ที่มา: Power and Tamblin (1995)

13. การวิเคราะห์ห้มุมสัมผัสจากภาพ (Image analysis)

กล้องดิจิทัลเป็นกล้องถ่ายรูปที่ไม่ต้องใช้ฟิล์ม ภาพที่ถ่ายได้จะถูกบันทึกไว้ในรูปแบบดิจิทัลโดยวงจรอิเล็กทรอนิกส์ภายในกล้อง อยู่ในรูปแบบของไฟล์ภาพซึ่งสามารถส่งผ่านไปยังคอมพิวเตอร์เพื่อนำไปพิมพ์ออกมาเป็นภาพ หรือตกแต่งภาพด้วยโปรแกรมต่าง ๆ เช่น โปรแกรม Adobe Photoshop

13.1 กล้องดิจิทัลมี 2 แบบ คือ

13.1.1 กล้องดิจิทัล compact คือกล้องชนิดพกพาที่ไม่สามารถเปลี่ยนเลนส์ได้ เป็นกล้องที่ออกแบบให้ใช้งานได้ง่าย ไม่มีความซับซ้อน เป็นระบบอัตโนมัติหรือมีฟังก์ชันช่วยเหลือ

13.1.2 กล้องดิจิทัล SLR (single lens reflex) เป็นกล้องดิจิทัลที่สามารถถอดเปลี่ยนเลนส์ได้ และเป็นกล้องที่ผู้ใช้งานจะต้องมีความรู้ในการถ่ายภาพดีพอสมควร เนื่องจากมีฟังก์ชันการทำงานที่ซับซ้อนมากกว่ากล้องดิจิทัล compact อีกทั้งยังให้ผู้ใช้สามารถปรับตั้งค่าต่าง ๆ เองได้ตาม

ต้องการ รูปร่างของกล้องค่อนข้างใหญ่ เนื่องจากขนาดของอุปกรณ์รับรู้ภาพใหญ่กว่ากล้องดิจิทัล compact และยังคงรองรับเลนส์และฟังก์ชันการทำงานที่ซับซ้อนด้วย

13.2 อุปกรณ์รับรู้ภาพ (image sensor) เป็นส่วนสำคัญของกล้องดิจิทัลและทำให้กล้องดิจิทัลมีความแตกต่างจากกล้องถ่ายรูปรุ่นก่อน ซึ่งทำหน้าที่เหมือนฟิล์ม อุปกรณ์รับรู้ภาพนี้เป็นไมโครชิปที่มีความไวต่อแสง โดยจะแปลงแสงที่รับมาให้เป็นสัญญาณทางไฟฟ้า ทำให้ได้ข้อมูลในรูปแบบไฟล์ดิจิทัล บนพื้นผิวของอุปกรณ์รับรู้ภาพจะถูกแบ่งย่อยเป็นส่วนเล็ก ๆ ที่เรียกว่า จุดภาพ (pixel) ถ้าจำนวนพิกเซลมาก ภาพก็จะมีความละเอียดมากแต่ก็จะทำให้ปริมาณข้อมูลของภาพมากขึ้นด้วย

จำนวนพิกเซลของภาพสามารถคำนวณได้จากการนำจำนวนพิกเซลตามแนวตั้งคูณด้วยจำนวนพิกเซลตามแนวนอน เช่น ภาพขนาด 3008×2000 พิกเซล นั่นคือความละเอียด (resolution) ประมาณ 6 ล้านพิกเซล

อุปกรณ์บันทึกภาพ Ricoh รุ่น R10 ถูกนำมาใช้ในการทดลองถ่ายภาพมุมสัมผัส มีค่าความละเอียด 10.3 ล้านพิกเซล โดยมีขนาดภาพละเอียดสูงสุด 3648×2736 พิกเซล และมีค่าความละเอียด 0.035 เซนติเมตรต่อพิกเซล (28.346 พิกเซลต่อเซนติเมตร) มีระยะมาโคร 1 เซนติเมตรทำการถ่ายภาพ มีระยะโฟกัส 30 เซนติเมตร มีระยะไวด์ 28 มิลลิเมตร มีระยะเทเล 200 มิลลิเมตร

อุปกรณ์รับรู้ภาพที่ใช้เป็นส่วนใหญ่มี 2 ชนิดคือ (อรวินท์, 2549)

1) CCD (charge couple device) การทำงานของ CCD เมื่อชุดของ CCD รับแสงมาแล้วจะมีการแปลงอนุภาคแสงเป็นประจุไฟฟ้าก่อน ซึ่งจะได้สัญญาณเป็นแบบ analog (ความสม่ำเสมอของสัญญาณสูง ทำให้คุณภาพของภาพดี) หลังจากนั้นจึงส่งต่อไปยังหน่วยประมวลผลซึ่งจะทำการแปลงสัญญาณจาก analog ไปเป็นสัญญาณ digital และจัดการเรื่องภาพต่อไป จะเห็นได้ว่าที่ตัว CCD สามารถรับแสงได้เต็มที่เพราะมีเพียงตัวรับแสงและตัวผ่านสัญญาณเท่านั้น ตามหลักการแล้ว CCD จึงให้คุณภาพภาพที่ดี อย่างไรก็ตามกระบวนการในการนำ CCD ไปใช้จะซับซ้อนกว่า เนื่องจากต้องมีแผงวงจรของหน่วยประมวลผลอีกส่วนหนึ่ง และยังใช้ไฟมากกว่ารวมถึงมีราคาสูง

2) CMOS (complementary metal oxide semiconductor) ใช้เทคโนโลยีเดียวกับการทำวงจรอิเล็กทรอนิกส์ในซีพียู (หน่วยประมวลผลกลาง) ของคอมพิวเตอร์ โดยในแต่ละ pixel ของ CMOS นอกจากจะประกอบไปด้วยตัวรับแสงแล้ว ยังมีส่วนที่ซับซ้อนซึ่งใช้ประมวลผลและแปลงสัญญาณจาก analog ให้เป็นสัญญาณ digital ด้วย จึงทำให้พื้นที่ส่วนรับแสงน้อยลงและความสม่ำเสมอของสัญญาณไม่ดีนัก ดังนั้นก่อนหน้านี้ CMOS จึงใช้อยู่ในกล้องคุณภาพต่ำ แต่ปัจจุบันนี้มีการปรับปรุงเพิ่มเติมในหลาย ๆ ส่วนจนกระทั่ง CMOS เข้ามาอยู่ในกล้องรุ่นใหญ่ ๆ ด้วยปัจจัยหลายด้าน เช่น ใช้ไฟฟ้าน้อยกว่า CCD, ราคาถูกกว่า, ส่งผ่านข้อมูลได้เร็วกว่าและทำให้ออกแบบภายในกล้องได้ง่ายกว่า

13.3 ทางยาวโฟกัส (focal length) เลนส์ถ่ายภาพจะมีตัวเลขบอกทางยาวโฟกัส เช่น 14 มม., 28 มม., 35 มม. (มิลลิเมตร) เป็นตัวเลขที่บอกถึงมุมรับภาพที่ตกกระทบลงบนฟิล์ม เลนส์ที่มีตัวเลขทางยาวโฟกัสน้อยก็จะมีมุมรับภาพที่กว้าง และเลนส์ที่มีตัวเลขทางยาวโฟกัสมากก็จะมีมุมรับภาพที่แคบลง โดยทางยาวโฟกัสของเลนส์จะแบ่งออกเป็น 3 กลุ่มคือ (ศุภสิทธิ์, 2546)

1) เลนส์มุมกว้าง (wide angle lens) คือเลนส์ที่สามารถถ่ายภาพได้มุมมองกว้าง ได้แก่ เลนส์ที่มีทางยาวโฟกัสสั้น ๆ หากเทียบกับเลนส์ของกล้องใช้ฟิล์มคือ ตั้งแต่ทางยาวโฟกัสน้อยกว่า 35 มม. ลงมาจะเป็นเลนส์มุมกว้าง เลนส์กลุ่มนี้นิยมนำไปถ่ายภาพทิวทัศน์

2) เลนส์ธรรมดา (normal lens) คือเลนส์ที่มีมุมมองใกล้เคียงกับสายตามนุษย์ หากเปรียบเทียบกับเลนส์ที่ใช้กับกล้องใช้ฟิล์มแล้วจะเท่ากับเลนส์ทางยาวโฟกัส 50 มม. จะใกล้เคียงกับสายตามนุษย์ที่สุด

3) เลนส์ถ่ายไกล (telephoto lens) สามารถถ่ายภาพที่อยู่ไกล ให้ดูเหมือนอยู่ใกล้ได้ นิยมนำไปถ่ายภาพสัตว์และภาพกีฬา เลนส์ถ่ายไกลนี้จะมีทางยาวโฟกัสเทียบกับกล้องใช้ฟิล์มตั้งแต่ 85 มม. ขึ้นไป

4) เลนส์มาโคร (macro lens) เป็นเลนส์ที่ออกแบบให้สามารถถ่ายภาพในระยะใกล้มาก ๆ ได้เป็นพิเศษ อาจใกล้มากขนาด 1-2 ซม. จากวัตถุที่ถ่าย โดยเลนส์ที่สามารถถ่ายภาพระยะใกล้ได้ มักจะเป็นเลนส์กลุ่ม wide ไปจนถึง normal

13.4 ISO (international organization for standardization)

ค่า ISO คือค่าความไวแสงที่ฟิล์มสามารถรับแสงได้ซึ่งถ้าค่า ISO มีตัวเลขมาก ฟิล์มก็จะสามารถรับแสงได้มากขึ้น เร็วขึ้น ทำให้สามารถถ่ายภาพในที่ที่มีแสงน้อยได้ดียิ่งขึ้น เช่น ในที่ร่มในห้อง แต่จะตรงข้ามกันกับความละเอียดของภาพ เพราะถ้าค่า ISO มาก จะมี grain หรือเม็ดสีในภาพที่มีขนาดใหญ่ เมื่อเวลาขยายภาพให้ใหญ่ขึ้นจะทำให้เห็นภาพนั้นแตก เนื่องจาก grain ที่ไม่ละเอียด

14. ปฏิกิริยาการกระบวนกรซับ (Sorption) และกระบวนการหน่วง (Retardation)

การซับ (Sorption) เป็นกระบวนการที่ของไหลถูกจับไว้โดยอนุภาคที่เป็นของแข็งหรือของเหลว การซับจะมีอยู่ 3 ชนิดที่มีการดูดซับได้แก่

1. ตัวดูดซับ (sorbent) เช่น ถ่านคาร์บอนกัมมันต์ (Activated carbon)
2. สารปนเปื้อนที่ถูกดูดซับ (Sorbate) เช่น สารเคมีปนเปื้อน
3. ตัวทำละลาย (Solvent) เช่น น้ำ เป็นต้น

แรงที่เกิดขึ้นทำให้มีการดูดซับขึ้นได้แก่ 4 แรงคือ แรงดึงดูดทางไฟฟ้า (Electrostatic forces), แรงวานเดอร์วาลส์ (van der waals forces), แรงพันธะโควาเลนต์ (Covalent bonds), แรงพันธะไฮโดรเจน (Hydrogen bonding) เป็นต้น

การซับมีรูปแบบได้ 2 ลักษณะคือ

1. การดูดซึม (Absorption) คือ การดูดซึมสารชนิดหนึ่งเข้าไปในสารอีกชนิดหนึ่ง เช่น การดูดซึมด้วยจุลชีพ

2. การดูดติดผิว (Adsorption) คือ การเกาะติดของก๊าซหรือสารละลายบนพื้นผิวของของแข็ง เช่น การดูดติดผิวด้วยถ่านคาร์บอนกัมมันต์ เป็นต้น (เกรียงศักดิ์, 2546) การดูดติดผิวมีกลไกที่สำคัญบนพื้นผิวของแข็งซึ่งมีการเชื่อมต่อระหว่างแก๊สและของเหลว โดยจะปกคลุมพื้นผิวของแข็งด้วยชั้นบางๆของโมเลกุลหรือไอออน ชั้นบางๆนี้จะยึดติดพื้นผิวของแข็งด้วยแรงทาง

กายภาพหรือด้วยแรงทางเคมี ปรากฏการณ์เช่นนี้เรียกว่าการเกิดกระบวนการดูดติดผิว (Adsorption process) หนึ่งชนิดของกระบวนการดูดติดผิวจะเกี่ยวข้องกับแรงพันธะเคมีระหว่างไอออนที่เรียกว่ากระบวนการดูดติดผิวเชิงเคมี (chemisorption) รวมไปถึงการแทนที่ของไอออนที่ถูกดูดซับโดยไอออนในสารละลายที่เรียกในเทอมของ กระบวนการแลกเปลี่ยนไอออน (ion exchange process) ดังนั้นกระบวนการจับจะประกอบไปด้วย กระบวนการดูดติดผิวทั่วไป กระบวนการดูดติดผิวเชิงเคมี กระบวนการแลกเปลี่ยนไอออน นอกจากนี้ยังรวมถึงกระบวนการดูดซึม ดังที่กล่าวไปแล้ว เป็นต้น (Fetter, 1999)

ในส่วนกระบวนการหน่วงเป็นปรากฏการณ์เพื่อทำให้ไอออนที่ละลายน้ำหรือสารประกอบต่างๆยึดเกาะกับอนุภาคดิน กระบวนการหน่วงจะขึ้นอยู่กับชนิดของดินและสารปนเปื้อนที่ละลายน้ำ (Pinder and Celia, 2006)

กระบวนการปลักการดูดติดผิว (desorption) เป็นปรากฏการณ์ตรงข้ามกับกระบวนการดูดติดผิว ซึ่งสามารถเกิดขึ้นได้เมื่อความเข้มข้นของตัวละลายลดลง และกระบวนการปลักการดูดติดผิวจะใช้ระยะเวลานานกว่ากระบวนการดูดติดผิว (Lagrega *et al.*, 1994)

กระบวนการแลกเปลี่ยนไอออน (Ion exchange process) เป็นกระบวนการที่มีความสัมพันธ์ระหว่างพื้นผิวและอนุภาคคอลลอยด์ที่มีประจุไฟฟ้า ดังนั้นประจุบนพื้นผิวเป็นผลของ

1. ความไม่สมบูรณ์หรือการแทนที่ระหว่างประจุด้วยโครงร่างผลึกตาข่ายหรือ
2. ปฏิกริยาการแตกตัวทางเคมีที่อนุภาคบนพื้นผิว

การแทนที่ประจุเป็นสาเหตุมาจากผลรวมประจุบวกหรือประจุลบบนโครงร่างผลึกตาข่าย ความไม่สมดุลของประจุจะถูกชดเชยโดยการสะสมของประจุไอออนตรงกันข้ามบนพื้นผิว เรียกว่าเคาเตอร์เรียน (Counterions) เคาเตอร์เรียนจะประกอบด้วยชั้นที่ถูกดูดติดด้วยส่วนประกอบที่สามารถเกิดการเปลี่ยนแปลงได้ ไอออนในชั้นนี้จะถูกเปลี่ยนแปลงสำหรับไอออนอื่นๆที่เตรียมไว้แล้ว ซึ่งความไม่สมดุลของประจุไฟฟ้าในโครงร่างผลึกตาข่ายเนื่องจากเกิดการแลกเปลี่ยนและแทนที่ประจุเดียวกันของธาตุหรือสารประกอบคนละชนิดไปเรื่อยๆจนเกิดความสมดุลขึ้น (ไม่มีการแลกเปลี่ยนเกิดขึ้น) (Freeze and Cherry, 1979) ชนิดของการแลกเปลี่ยนไอออนสามารถเกิดการ

เปลี่ยนแปลงทางเคมีของน้ำได้ ในธรรมชาติจะมีปฏิกิริยาการทำน้ำอ่อน ซึ่งแคลเซียมไอออน (Ca^{2+}) และแมกนีเซียมไอออน (Mg^{2+}) ในน้ำจะมีการแลกเปลี่ยนกับโซเดียมไอออน (Na^+) ที่ดูดซับอยู่บนพื้นผิวดินเหนียว (Schwartz and Zhang, 2003)

15. ระบบทางเคมี

15.1 ระบบสารอนินทรีย์ในน้ำใต้ดิน

น้ำ มีคุณสมบัติเป็นตัวทำละลายที่ดีสำหรับเกลือไอออนและสารอนินทรีย์บางชนิด ในส่วนของระบบสารอนินทรีย์นั้น จะเป็นระบบประจุที่ประกอบด้วย ประจุบวกซึ่งเรียกว่า ไอออนบวก (cation) จำนวนของโมเลกุลน้ำจะมีแรงดึงดูดไปล้อมรอบประจุบวก ทำให้ประจุบวกแต่ละชนิดมีขนาดต่างกัน ส่วนสารที่มีค่าประจุลบมากกว่าประจุบวกหรือเป็นประจุลบ (anion) ซึ่งทั้งสองประจุจะมีแรงดึงดูดซึ่งกันและกัน ความเข้มข้นของแข็งที่ละลายน้ำ (Total dissolved solids, TDS) ในน้ำใต้ดิน จะถูกวัดโดยน้ำหนักของแข็งที่เหลือจากน้ำที่ผ่านกระบวนการกรองมาแล้วและมีการระเหยจนแห้ง หน่วยที่ใช้ในการวัดค่า TDS คือ มิลลิกรัมต่อลิตร หรือกรัมต่อลูกบาศก์เมตร แต่สามารถวัดเทียบกับค่าความนำไฟฟ้าในหน่วยของ ซีเมนส์ (S) หรือ ไมโครซีเมนส์ (μS) ได้เช่นกัน ตารางที่ 4 จำแนกชนิดสารอนินทรีย์ ซึ่งสามารถพบได้บ่อยในน้ำใต้ดิน

ตารางที่ 6 ประเภทของส่วนประกอบอนินทรีย์ที่ละลายน้ำในน้ำใต้ดิน

สารประกอบหลัก (มากกว่า 5 mg/L)	ไบคาร์บอเนต ซัลเฟต แคลเซียม คลอไรด์ โซเดียม ซัลเฟต แมกนีเซียม กรดคาร์บอนิก
สารประกอบรอง (0.01-10.0 mg/L)	โบรอน ไนเตรต คาร์บอเนต โพแทสเซียม ฟลูออไรด์ สตรอนเชียม เหล็ก
สารประกอบที่มีส่วนน้อย (น้อยกว่า 0.1 mg/L)	อะลูมิเนียม ทองแดง แบเรียม แบริลเลียม บิสมัท โบรไมด์ แคดเมียม โครเมียม โคบอลต์ พลวง ทอง ลิเทียม แมงกานีส ฯลฯ

ที่มา: Davis and De Wiest (1966)

ความเข้มข้นของสารอินทรีย์ในน้ำใต้ดิน ถูกควบคุมโดยธาตุต่างๆที่เป็นส่วนประกอบของดินและหินผ่านกลไกทางเคมี เช่น ความสามารถในการละลายน้ำ กลไกการดูดติดผิว (Freeze and Cherry, 1979) ส่วนการวิเคราะห์สารไอออนนั้น จะพิจารณาคุณสมบัติทางกายภาพ คือ พีเอช อุณหภูมิ ค่าความสามารถในการนำไฟฟ้าได้ ปฏิกริยาออกซิเดชัน-รีดักชัน (Testa, 1993)

15.2 ระบบสารอินทรีย์ในน้ำใต้ดิน

สารประกอบอินทรีย์ โดยทั่วไปจะมีธาตุคาร์บอน (C), ธาตุไฮโดรเจน (H), และธาตุออกซิเจน (O) เป็นองค์ประกอบหลัก จากการศึกษาในชั้นใต้ดินจะพบว่ามีสารอินทรีย์ที่ละลายน้ำได้ เช่น กรดฟัลวิกและกรดฮิวมิก เป็นต้น

สารประกอบอินทรีย์แบ่งได้เป็น 2 กลุ่มหลักดังนี้

1. สารประกอบอินทรีย์ที่ไม่ใช่ฮิวมิก ซึ่งมีความสามารถในการละลายน้ำค่อนข้างมาก น้ำหนักโมเลกุลต่ำและไวต่อเกิดกระบวนการเมตาบอลิซึมของจุลินทรีย์ได้แก่ กลุ่มของสารประกอบไฮโดรคาร์บอนทั้งหลาย รวมทั้งกลุ่มของอนุพันธ์ของไฮโดรคาร์บอน เช่น กลุ่มของแอลกอฮอล์ กลุ่มของกรดอินทรีย์ กลุ่มของเอสเทอร์ เป็นต้น

2. สารประกอบอินทรีย์ที่เป็นสารฮิวมิก ซึ่งจะมีความสามารถในการละลายน้ำได้น้อย น้ำหนักโมเลกุลสูงและสัมพันธ์กับความต้านทานของกระบวนการย่อยของกลุ่มจุลินชีพ

สารประกอบฮิวมิก ถูกประกอบขึ้นด้วยระบบทางชีวภาพ ความสามารถรักษาไว้ซึ่งรูปแบบของมันเมื่อถูกความร้อนสูง (Refractory) สารประกอบฮิวมิกจะถูกแบ่งเป็น 3 กลุ่มใหญ่ (Boulding and Ginn, 2004) คือ

1. กรดฮิวมิก (Humic acids) (ไม่ละลายน้ำที่พีเอช < 2)
2. กรดฟัลวิก (fulvic acids) (ละลายน้ำได้ที่พีเอชทุกระดับ)
3. สารฮิวมิน (Humins) (ไม่มีการละลายน้ำ)

สารประกอบอโรแมติกจะมีคุณสมบัติคือล้อยด์และโครงสร้างพื้นฐานเป็นอนุพันธ์ของอะโรมาติกและวงแหวนเฮเทอโรไซคลิก (six-membered aromatic and heterocyclic rings) ซึ่งอาจรวมถึงสารประกอบเบนซีน (Benzene), แนฟทาลิน (Naphthalene) และแอนทราซีน (Anthracene) (Manaskaya and Drozdova, 1968)

15.3 ความสามารถในการละลายน้ำ (solubility)

ความสามารถละลายน้ำของสารประกอบเลี้ยงอันตรายมีความสำคัญมาก ถ้ามีสารปนเปื้อนละลายน้ำได้มาก ก็จะทำให้กระจายไปทั่วบริเวณ เช่น สารเมทานอล (Methanol), เอทานอล (Ethanol), อะซีโตน (Acetone), กรดอะซิติก (Acetic acid), เอทิลีนกลัยคอล (Ethylene glycol), ฟอรัลดีไฮด์ (Formaldehyde) ซึ่งเป็นสารที่ละลายน้ำได้มาก ความสามารถในการละลายน้ำจะมีความเกี่ยวข้องกับตัวทำละลาย (solvent) และตัวละลาย (solute) การละลายน้ำได้ของสารประกอบเลี้ยงอันตรายซึ่งเป็นตัวละลาย จะสัมพันธ์กับสภาพความอึดตัวของสารละลายและการเกิดตะกอนจากปฏิกิริยาในสารละลาย (precipitate) สำหรับปัจจัยของความสามารถละลายน้ำนั้นมีหลายประการอาทิเช่น สารที่ไม่ชอบน้ำ (hydrophobic substance) สารที่ชอบน้ำ (hydrophilic) ความสามารถในการละลายน้ำจะแปรผกผันกับความสามารถของกระบวนการจับ อุณหภูมิ (โดยพบว่าอัตราการเปลี่ยนแปลงพีเอชของสารปนเปื้อนและปฏิกิริยาการละลายเพิ่มสูงขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น (Valentine, 1986)) สารอินทรีย์บางชนิด (เมื่อรวมตัวกับโลหะจะช่วยให้โลหะนี้ละลายน้ำได้มากขึ้น) สารมีขั้วของทั้งสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลของตัวทำละลายกับตัวละลาย (โดยจะมีแรงสำคัญอยู่ 3 ชนิดคือ แรงวาลเคอร์วาลต์ แรงพันธะไฮโดรเจน แรงระหว่างขั้ว (dipole-dipole interactions)) ขนาดและรูปร่างของโมเลกุล สารพวกฮาโลเจน ซึ่งจะไปลดความสามารถในการละลายน้ำของสารประกอบอินทรีย์ที่มีสารพวกฮาโลเจนอยู่ (เกรียงศักดิ์, 2546)

15.4 ระบบกรด-เบส ระบบบัฟเฟอร์

กรดมีแนวโน้มที่เพิ่มความเข้มข้นไฮโดรเจนไอออนในสารละลาย ขณะที่เบสจะเพิ่มความเข้มข้นไฮดรอกไซด์ไอออนในสารละลาย กรดแก่และเบสแก่ (strong acids and bases) จะมีการแตกตัวของไอออนอย่างสมบูรณ์ในสารละลายเจือจางและส่วนใหญ่จะเป็นสารอนินทรีย์ ขณะที่กรดอ่อนและเบสอ่อน (weak acids and bases) จะแตกตัวได้น้อยในสารละลาย และยังคงมีโมเลกุล

ที่ไม่ได้แตกตัวเหลืออยู่มาก ปฏิกิริยาเช่นนี้เป็นปฏิกิริยาไม่สมบูรณ์ ไอออนที่ได้มีความโน้มเอียงที่จะรวมกลับมาเป็นกรดหรือเบสเดิม ส่วนมากจะเป็นสารอินทรีย์ และการแตกตัวของกรดอ่อนหรือเบสอ่อนจัดเป็นปฏิกิริยาสมดุลตัวอย่างเช่นการแตกตัวเป็นไอออนของกรดแอซีติก (CH_3COOH) เป็นดังนี้



และมีค่าคงที่การแตกตัว โดยใช้สัญลักษณ์เป็น K_a จะได้

$$K_a = \frac{[\text{H}_3\text{O}^+][\text{CH}_3\text{COO}^-]}{[\text{CH}_3\text{COOH}]} \quad (28)$$

ในส่วนของการแตกตัวของเบสอ่อนก็เช่นเดียวกับกรดอ่อน และมีค่าคงที่การแตกตัว (K_b) เช่นเดียวกัน การแตกตัวของสารละลายกรดและเบสโดยส่วนมากจะมีตัวทำละลายคือน้ำ โดยที่น้ำเป็นสารโมเลกุลมีขั้ว ส่งผลให้มีการแตกตัวให้ไฮโดรเจนไอออน (H^+) หรือเรียกว่าไฮโดรเนียมไอออน (H_3O^+) และไฮดรอกซิลไอออน (OH^-) ดังสมการที่ 29



จากสมการนี้ สามารถเขียนค่าคงที่สมดุลของน้ำได้ดังนี้

$$\frac{[\text{H}^+][\text{OH}^-]}{\text{H}_2\text{O}} = K_w \quad (30)$$

และเมื่อให้น้ำ (H_2O) มีค่าคงที่เท่ากับ 1 ดังนั้นผลิตภัณฑ์ไอออนของน้ำจะได้

$$[\text{H}^+][\text{OH}^-] = K_w = 10^{-14} \text{ ที่อุณหภูมิ } 25^\circ \text{C} \quad (31)$$

ดังนั้นเมื่อพิจารณาจากสมการเคมีที่ 31 พบว่า $[\text{H}^+] = [\text{OH}^-] = 10^{-7}$ ซึ่งเมื่อทำให้อยู่ในรูปของค่าพีเอช จะได้สมการดังนี้

$$pH = -\log[H^+] \text{ or } pH = \log \left[\frac{1}{[H^+]} \right] \quad (32)$$

ในสารละลายกรดอ่อนเบสอ่อนก็สามารถทำเป็น pK_a , pK_b ได้เช่นกัน

$$pK_a = -\log K_a \quad (33)$$

ดังนั้น เมื่อประยุกต์สมการที่ 33 ในรูปของพีเอช

$$pH + pOH = pK_w = 14 \quad (34)$$

จะได้ค่าพีเอชเท่ากับ 7 ซึ่งพิจารณาค่านี้อยู่ในสภาพความเป็นกลางสำหรับน้ำ ช่วงของค่าพีเอชคือ 0 - 14 ค่าพีเอชที่ต่ำกว่า 7 จะมีสภาพความเป็นกรดหรือมีความเข้มข้นของไฮโดรเจน ไอออนมากกว่าไฮดรอกไซด์ ไอออน และทำให้ตัวทำละลายหรือน้ำอยู่ในสภาพความเป็นกรดนั่นเอง ส่วนค่าพีเอชที่มากกว่า 7 จะเรียกในเทอมของ สภาพความเป็นเบส (Sawyer et al., 2003)

การเพิ่มไฮโดรเนียมไอออน (H_3O^+) หรือดึงไฮโดรเนียมไอออนออกจากสารละลาย จะทำให้สารละลายมีพีเอชเปลี่ยนไป ลักษณะเช่นนี้เป็นระบบของปฏิกิริยาระหว่างกรดและเบส ซึ่งระบบการเปลี่ยนแปลงพีเอชมีผลกระทบต่อความเป็นและความตายของสิ่งมีชีวิตและสิ่งแวดล้อมเป็นอย่างยิ่ง การที่สิ่งแวดล้อมหรือสิ่งมีชีวิตสามารถดำรงชีพอยู่ได้หรือสถานะเปลี่ยนแปลงน้อยมาก เพราะว่ามีระบบควบคุมพีเอชให้มีการเปลี่ยนแปลงพีเอชน้อยที่สุดจากการเพิ่มกรดหรือเบสเข้าไป โดยเรียกระบบนี้ว่า ระบบบัฟเฟอร์ (Buffer system) โดยมีสมการดังนี้

$$pH = pK_a + \log \frac{\text{salt ion or anion}}{\text{acid}} \quad (35)$$

ดังนั้นหากกล่าวถึงระบบบัฟเฟอร์หรือสารละลายบัฟเฟอร์ คือสารละลายที่ประกอบด้วย (สมพงษ์, 2542)

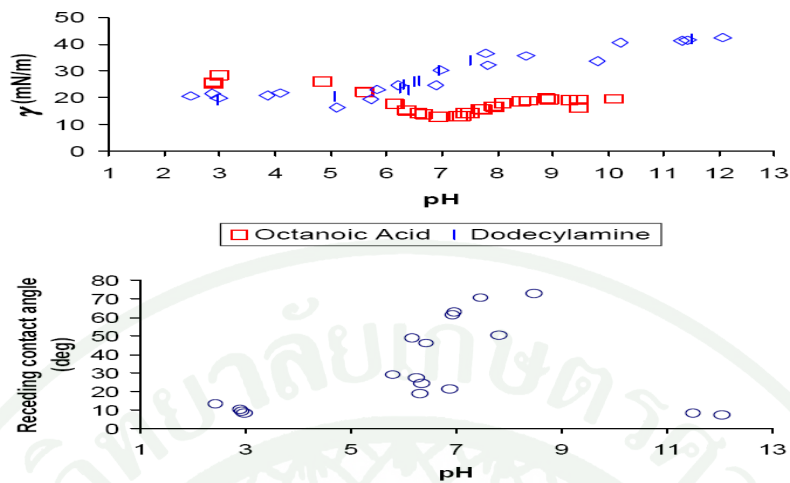
1. กรดอ่อนกับเกลือของกรดนั้น หรือ
2. เบสอ่อนกับเกลือของเบสนั้น หรือ

3. กรดอ่อนกับคู่เบสของกรดนั้น หรือ
4. เบสอ่อนกับคู่กรดของเบสนั้น

การทำหน้าที่บัฟเฟอร์จะมีประสิทธิภาพมาก ถ้าค่าพีเอชของบัฟเฟอร์นั้นอยู่ใกล้เคียงกับค่าพีเอช เมื่อความเข้มข้นของแอนไอออนกับของกรดเท่ากัน ($\text{pH} = \text{pK}_a$) ความเข้มข้นของคู่บัฟเฟอร์ทั้งสองไม่ควรแตกต่างกันมากนัก (กฤษณา, 2529; ทบวงมหาวิทยาลัย, 2526)

ผลการทดลองหนึ่งจากอีกหลายงานวิจัย ที่บ่งชี้ผลกระทบของพีเอชสามารถอธิบายได้ตามภาพที่ 22a และ 22b คุณสมบัติแรงดึงดูดระหว่างผิวถูกวัดได้ (γ, θ) ซึ่งเป็นตัวแทนในการทำงานของค่าพีเอชจากการเพิ่มกรดออกทานอิก (Octanoic acid, OA) และ สารละลายโดเดซิลเอมีน (Dodecylamine, DDA) (มีการปรับพีเอชโดยการเติมสารลดแรงดึงดูดผิวที่มีการปรับค่าพีเอชจากกรดไฮโดรคลอริก (Hydrochloric acid, HCl) และสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium hydroxide, NaOH))

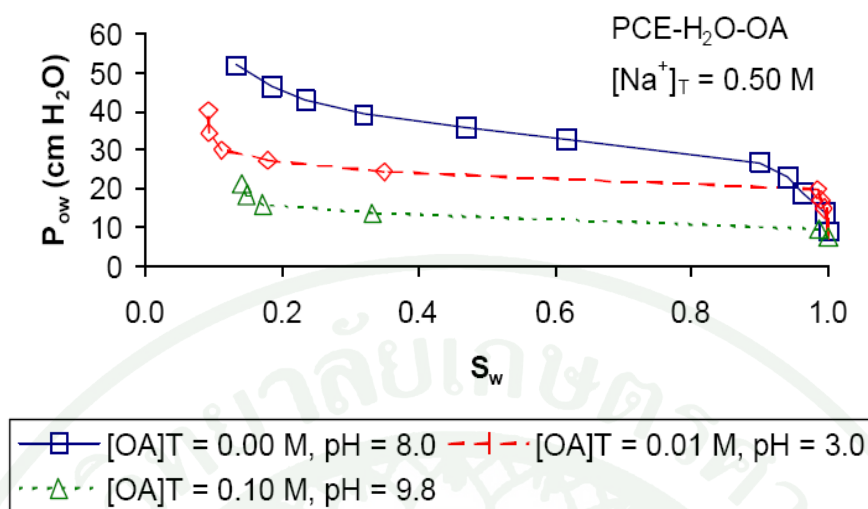
สารละลายโดเดซิลเอมีน และ กรดออกทานอิก จะเป็นตัวควบคุมการเปลี่ยนแปลงกรด-เบสหรือใช้ปรับพีเอชในสารละลายทั่วไป ผลก็คือจะมีการเปลี่ยนแปลงต่อแรงดึงดูดผิว และ/หรือความสามารถที่จะเปียกได้ในระบบนี้ เมื่อเริ่มใช้สารที่เป็นกลางกล่าวคือ สารละลายโดเดซิลเอมีน ($\text{pH} > 10.6$) และ กรดออกทานอิก ($\text{pH} < 4.8$) จะมีการเปลี่ยนแปลงอย่างเล็กน้อยต่อคุณสมบัติแรงดึงดูดผิว ซึ่งสังเกตได้จากสัดส่วนความชอบของสารละลายโดเดซิลเอมีนและกรดออกทานอิกภายในสาร NAPL ในทางตรงกันข้ามการสร้างประจุบวก (cationic form) ของสารละลายโดเดซิลเอมีน ($\text{pH} < 10.6$) จะถูกดูดซับในส่วนของควอตซ์ (quartz) รวมทั้งเกิดแรงดึงดูดระหว่างน้ำ-NAPL การเปลี่ยนแปลงความสามารถที่จะเปียกได้ จากการเปียกน้ำไปสู่สถานะการเปียกที่เป็นกลาง (หรือเปียกแบบผสม) แต่ถ้ามีการสร้างประจุลบของกรดออกทานอิก ($\text{pH} > 4.8$) จะมีการถูกดูดซับต่อแรงดึงดูดระหว่างพื้นผิวของ น้ำ-NAPL เท่านั้น แต่แรงดึงดูดผิวของ NAPL-น้ำ อยู่ในระดับต่ำเช่นกัน รวมถึงแรงดึงดูดผิวอยู่ในระดับต่ำมากประมาณ 50 % (Abriola and Demond, 2000)



ภาพที่ 22 (a) แรงตึงระหว่างผิวสำหรับระบบ PCE-น้ำ-ควอตซ์ ที่ประกอบด้วยกรดออกทานอิก และโดเดซิลเอมีนในบทบาทค่า pH (ด้านบน) (b) มุมสัมผัสถดถอยสำหรับระบบ PCE-น้ำ-ควอตซ์ ที่ประกอบด้วยกรดออกทานอิกและโดเดซิลเอมีนในบทบาทค่า pH (ด้านล่าง)

ที่มา: Abriola and Demond (2000)

ต่อจากนั้นเมื่อเริ่มพิจารณาค่า pH ที่มากกว่าค่า pK_a กรดออกทานอิกจะมีการสร้างรูปแบบเป็นประจุลบ ดังนั้นกรดออกทานอิกยังคงอยู่ในเฟสของเหลวที่ละลายน้ำ (aqueous phase) โดยตัวของกรดออกทานอิกมีอิทธิพลต่อแรงตึงระหว่างผิวอย่างมาก พฤติกรรมเหล่านี้จะสะท้อนออกมาในภาพที่ 23 เรื่องความสัมพันธ์แรงดันคาปิลลารีในกระบวนการระบายน้ำขั้นแรก (Primary drainage) (Abriola and Demond, 2000)



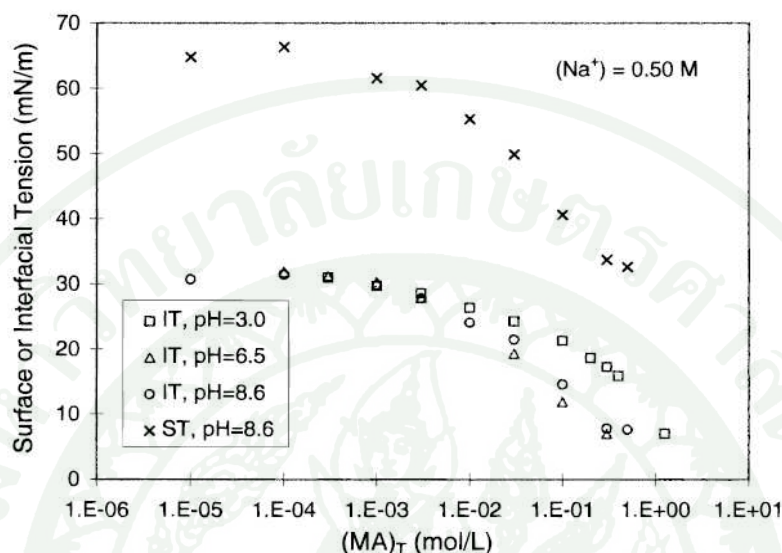
ภาพที่ 23 กราฟส่วนโค้งแรงดันคาปิลลารีระบายน้ำครั้งแรกสำหรับระบบ PCE-น้ำ-ทรายออกตาว่าที่มีการแปรเปลี่ยนค่า pH และความเข้มข้นของกรดออกทาโนอิกโดยรวม

ที่มา: Abriola and Demond (2000)

การเปลี่ยนแปลงค่า pH ในชั้นทราย พบว่าในสิ่งแวดล้อมทั่วไปจะมีค่า pH ประมาณ 6.7 ซึ่งสามารถบ่งชี้ว่าชั้นทรายนี้มีสภาพเป็นกลาง แต่เมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงความเป็นกรด-เบสชั้นทรายจะมีการเลือกใช้ค่า pH เท่ากับ 4.9 และ 8.5 ในการทดลองเรื่องนี้ โดยมีการใช้สารไฮโดรเจนฟอสเฟต (H₃PO₄) เท่ากับ 0.3 M และ โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) เท่ากับ 0.1 M เป็นตัวปรับ pH ในชั้นทราย (Vivas *et al.*, 2006)

ในระบบโอไซลีน (o-xylene) และน้ำ ซึ่งจะทำให้การวัดแรงดึงระหว่างผิว ในภาพที่ 24 จะอธิบายถึงค่าของแรงดึงระหว่างผิวจะขึ้นอยู่กับสารประกอบอินทรีย์โอไซลีนและน้ำ โดยทั้งคู่จะเกี่ยวข้องกับค่า pH และปริมาณของกรดออกทาโนอิกทั้งหมด (Total mass balance, (MA)_T) ที่ละลายในน้ำ เมื่อปริมาณความเข้มข้นของกรดออกทาโนอิกมากกว่า 0.01 M จะทำให้แรงดึงระหว่างผิวที่วัด ณ ค่า pH สูงและค่า pH กลางจะมีค่าต่ำกว่าเมื่อวัดที่ค่า pH ต่ำ ในปริมาณความเข้มข้นที่เหมือนกัน แรงดึงระหว่างผิวเป็นค่าคงที่อย่างสัมพันธ์ที่ปริมาณของกรดออกทาโนอิกทั้งหมดมากกว่า 0.3 M ซึ่งเป็นค่าแนะนำของความเข้มข้นวิกฤติของไมเซลล์ (critical micelle concentration, cmc) ในภาพที่ 24 จะมีการพลอตเส้นกราฟของแรงดึงผิวในเฟสสารละลายน้ำจาก

ตัวอย่าง 2 ของเหลวข้างต้นที่ค่า pH เท่ากับ 8.6 ซึ่งจากเส้นกราฟทั้งหมดในภาพนี้ จะมีค่าลดลงเมื่อปริมาณความเข้มข้นของกรดออกทานอิกทั้งหมดเพิ่มขึ้น เป็นต้น (Lord D.L. *et al*, 1997)



ภาพที่ 24 แรงตึงระหว่างผิวระหว่าง o-xylene และ น้ำ และบทบาทของความเข้มข้นกรดออกทานอิกโดยรวม โดยปริมาตรของเฟสของเหลวที่ค่า pH 3 ค่า คือ pH 3, pH 6.5, pH 8.6 โดยใช้ช่วงค่าความเข้มข้นที่ 95 % สำหรับการวัดพื้นผิวและแรงตึงระหว่างผิว

ที่มา: Lord D.L. *et al*. (1997)

Schellenberg *et al*. (1984) ได้ทำการศึกษาสารประกอบอินทรีย์ที่มีขั้วในสิ่งแวดล้อมทั่วไปพบว่าได้แก่ กลุ่มของเอมีน กลุ่มคาร์บอกซิลิก กลุ่มฟีนอล ที่ทำหน้าที่กำหนดค่า pH ในชั้นใต้ดินได้ การดูดซับของไอออนสปีชีส์สารเคมีในชั้นใต้ดินนั้น สามารถทำนายได้ว่ากลุ่มของสารประกอบเคมีที่มีขั้วบวกจะมีการดูดซับได้ดีกว่าสารประกอบเคมีที่มีขั้วลบ เพราะชั้นใต้ดินโดยทั่วไปจะแสดงค่าประจุลบ ต่อมา มีการสำรวจค่า pH จากชั้นน้ำใต้ดินจำนวน 24,921 พื้นที่ ซึ่งสามารถจัดเงื่อนไขค่า pH ได้ 3 ค่า คือ pH 4.9, 6.7 และ 8.0 (U.S. EPA., 1992a)

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

1. อุปกรณ์และสารเคมีวิธีการทดสอบอัตราการเติมน้ำ (Imbibition rate test) ระหว่างความอิ่มตัวด้วยน้ำเทียบการเปลี่ยนแปลงตามเวลา

- 1.1 เซลล์ทดลองการเติมน้ำ (Tempe cell) จากบริษัท soil moisture equipment corp. จำกัด
- 1.2 ทรายที่มีการรับรองคุณสมบัติความบริสุทธิ์ทางเคมีฟิสิกส์ (Ottawa sand)
- 1.3 โทลูอิน จากบริษัท Panreac Quimica Sau ความบริสุทธิ์ 99.5 % ขนาด 2.5 ลิตร
- 1.4 ไตรคลอโรเอทิลีน จากบริษัท Asia Pacific specialty Chemical Limited ความบริสุทธิ์ 99 % ขนาด 2.5 ลิตร
- 1.5 เครื่องชั่ง จากบริษัท A&D Co.,LTD. รุ่น EK-610i
- 1.6 น้ำกลั่นที่ปราศจากไอออน (Deionized water)
- 1.7 กรดไฮโดรคลอริก (HCl) จากบริษัท J.T. Baker SOLUSORB จำกัด
- 1.8 โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) จากบริษัท Ajax finechem ความบริสุทธิ์ 99.0-101.0 %
- 1.9 เครื่อง pH meter จากบริษัท Denver instrument รุ่น 215
- 1.10 สารละลายเกลือโซเดียมอะซิเตท (CH_3COONa)
- 1.11 สารละลายบัฟเฟอร์ไดโพแทสเซียมไฮโดรเจนฟอสเฟต (K_2HPO_4) จากบริษัท Ajax finechem ความบริสุทธิ์ 99.0 -101.0 %
- 1.12 สายยางไทกอน (Tygon) ซึ่งสามารถทนการกัดกร่อนของสารอินทรีย์ได้ จากบริษัท Masterflex L/S pump heads จำกัด
- 1.13 น้ำยา Isopropanol จากบริษัท J.T. Baker SOLUSORB จำกัด

2. อุปกรณ์และสารเคมีการทดลองหาความสัมพันธ์ระหว่างความดันคาปิลลารีและความอิ่มตัวด้วยน้ำ ด้วยกลไกการระบายน้ำและการเติมน้ำเข้าสู่ชั้นตัวกลางหินปูน

- 2.1 เซลล์วัดความดัน จากบริษัท soil moisture equipment corp. จำกัด

2.2 ครอบขวดขนาด 100 มิลลิลิตร

2.3 สายยางไทกอน (Tygon) ซึ่งสามารถทนการกัดกร่อนของสารอินทรีย์ได้จาก

บริษัท Masterflex L/S pump heads จำกัด

2.4 โทลูอิน จากบริษัท Panreac Quimica Sau ความบริสุทธิ์ 99.5 % ขนาด 2.5 ลิตร

2.5 ไตรคลอโรเอทิลีน จากบริษัท Asia Pacific specialty Chemical Limited ความบริสุทธิ์ 99 % ขนาด 2.5 ลิตร

2.6 เครื่องชั่ง จากบริษัท A&D Co.,LTD. รุ่น EK-610i

2.7 น้ำกลั่นปราศจากไอออน ค่า pH 7.0

2.8 หินปูน (crystalline limestone) ได้รับมาจาก หจก. โกวิทหินปูน อ. เฉลิมพระเกียรติ จ.สระบุรี

2.9 น้ำยา Isopropanol จากบริษัท J.T. Baker SOLUSORB จำกัด

3. อุปกรณ์และสารเคมีการทดลองวัดมุมสัมผัส (contact angle) ของสาร TCE บนพื้นผิวหินปูน ภายใต้ระบบการปนเปื้อนด้วยสาร NAPL เพียงชนิดเดียวและระบบการปนเปื้อนด้วยสาร NAPL แบบผสม

3.1 เซลล์วัดมุมสัมผัส (contact angle cell) ทำจากวัสดุสแตนเลส สตีล เบอร์ 304 รูปทรงสี่เหลี่ยม ขนาด $6 \times 8 \times 18$ ลูกบาศก์เซนติเมตร

3.2 เข็มฉีดยา gas tight syringe ของ Hamilton รุ่น 1750 TLL 500 μ L SYR REV M

3.3 กล้องถ่ายภาพดิจิทัล (RICOH รุ่น R10, AF MACRO 10 mm)

3.4 น้ำยา Isopropanol จากบริษัท J.T. Baker SOLUSORB จำกัด

3.5 น้ำกลั่นปราศจากอากาศ (DDD water; distilled, deionized, degassed water)

3.6 หินปูน (crystalline limestone) จากพื้นที่การปนเปื้อนจริงใน ต.กลางดง อ.ปากช่อง

จ. นครราชสีมา

3.7 ปั๊มสุญญากาศ (vacuum pump)

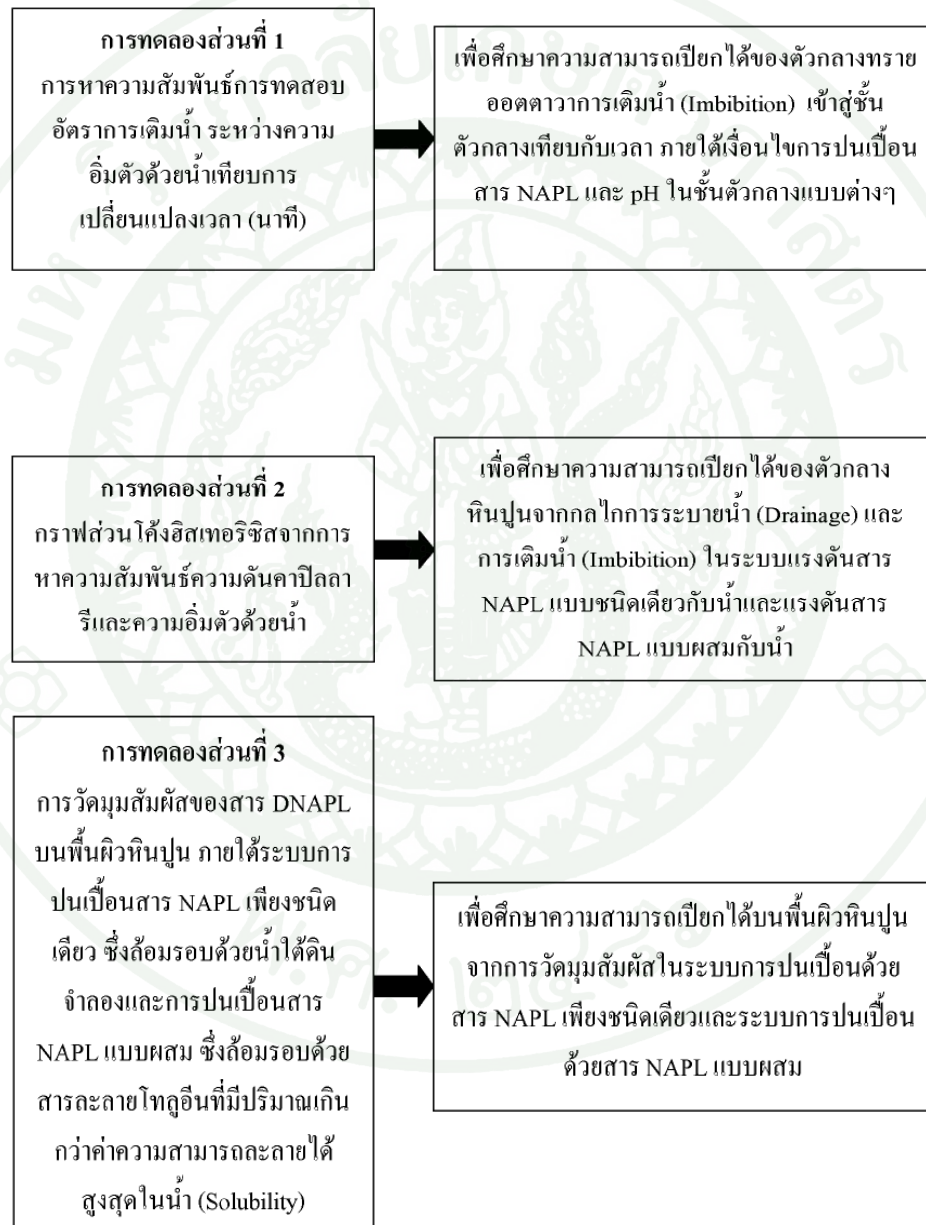
3.8 คอมพิวเตอร์ บริษัทเจินฟง 2000 จำกัด

3.9 ขาดังกล้อง บริษัท fancier จำกัด รุ่น FT66-1

3.10 คอมพิวเตอร์และโปรแกรม Autocad version 2005

วิธีการ

วิธีการทดลองความสามารถเปียกได้ในชั้นตัวกลางหินปูน แบ่งเป็น 2 ส่วนดังแสดงในภาพที่ 25



ภาพที่ 25 แผนผังวิธีวิจัยการทดลอง

วิธีการทดลองส่วนที่ 1 การทดสอบอัตราการเติมน้ำ (Imbibition rate test) สามารถทำการทดลองได้ดังนี้

1.1 ขั้นตอนการเตรียมสารละลายบัฟเฟอร์ที่มีค่า pH แตกต่างกัน โดยทำการอ้างอิงค่า pH มาจากฐานข้อมูลการสำรวจ pH น้ำใต้ดินจำนวน 24,921 พื้นที่ในอเมริกา ซึ่งสามารถจำแนกค่า pH ได้ 3 ค่า คือ pH 4.9, 6.7 และ 8.0 (U.S. EPA., 1992a) จากนั้นทำการปนเปื้อน NAPL รูปแบบต่างๆ

1.1.1 การเตรียมบัฟเฟอร์ที่มีค่า pH เท่ากับ 4.9 โดยเลือกใช้สารละลายเกลือโซเดียมอะซิเตท (CH_3COONa) เป็นสารละลายบัฟเฟอร์ ซึ่งมีค่า pK_a เท่ากับ 4.74 ต่อจากนั้นปรับค่า pH ที่ต้องการด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) เพียงพอ

1.1.2 การเตรียมสารละลายบัฟเฟอร์ที่มีค่า pH เท่ากับ 8.0 โดยเลือกใช้สารละลายบัฟเฟอร์ไดโพรเทสโซเดียมไฮโดรเจนฟอสเฟต (K_2HPO_4) เป็นสารละลายบัฟเฟอร์ ซึ่งมีค่า pK_a เท่ากับ 7.20 ต่อจากนั้นปรับค่า pH ที่ต้องการด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เพียงพอ

1.1.3 นำรูปแบบสารละลายบัฟเฟอร์ที่เตรียมไว้ไปปนเปื้อนกับทรายออกตาว่าที่ความชื้น 15 % (v/v) (Power and Tamblin, 1995) ดังนี้

- ทำการปนเปื้อนด้วยบัฟเฟอร์กรดที่มีค่า pH 4.9 ปริมาณ 15 % (v/v) ในชั้นตัวกลาง ซึ่งใช้บัฟเฟอร์โซเดียมอะซิเตท เพื่อให้ชั้นตัวกลางมีสถานะความเป็นกรด

- เติมน้ำกลั่น (Distilled water) ที่มีค่า pH 6.7 ปริมาณ 15 % (v/v) ในชั้นตัวกลาง เพื่อให้ชั้นตัวกลางมีสถานะความเป็นกลาง

- ทำการปนเปื้อนด้วยบัฟเฟอร์เบสที่มีค่า pH 8.0 15 % (v/v) ในชั้นตัวกลาง ซึ่งใช้บัฟเฟอร์ไดโพรเทสโซเดียมไฮโดรเจนฟอสเฟต เพื่อให้ชั้นตัวกลางมีสถานะ ความเป็นเบส

1.1.4 ชั้นตัวกลางที่ได้รับการปนเปื้อนด้วยรูปแบบ pH ต่างๆ แล้วนำมาปนเปื้อน NAPL (ซึ่งมีการใช้สารโทลูอิน เป็นตัวแทนกลุ่ม LNAPL และมีการใช้สาร TCE แทนกลุ่ม DNAPL) ด้วยรูปแบบแตกต่างกันดังนี้

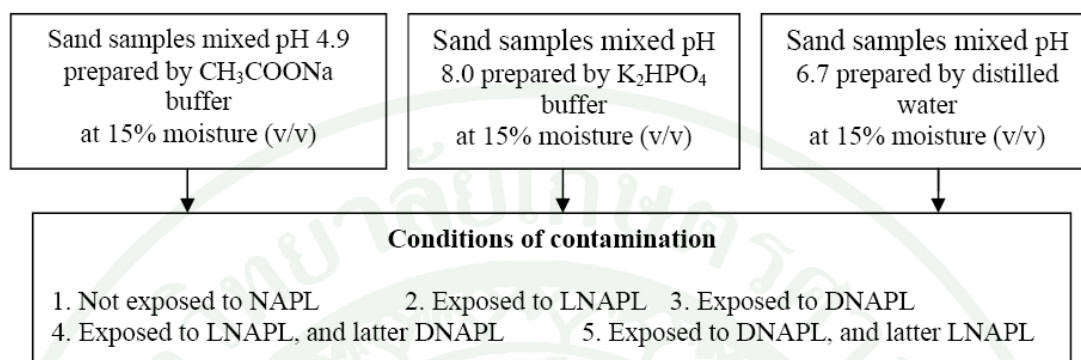
- ขั้นตอนการดำเนินงานที่ปรับค่า pH ต่างๆได้รับการป้อนด้วย LNAPL เพียงชนิดเดียว ซึ่งมี 3 รูปแบบการทดลองคือ ขั้นตอนการป้อน LNAPL ที่มีสภาพความเป็นกรด ขั้นตอนการป้อน LNAPL ที่มีสภาพความเป็นกลาง และขั้นตอนการป้อน LNAPL ที่มีสภาพความเป็นเบส

- ขั้นตอนการทดลองที่ปรับค่า pH ต่างๆได้รับการปนเปื้อนด้วย DNAPL เพียงชนิดเดียว ซึ่งมี 3 รูปแบบการทดลองคือ ขั้นตอนการทดลองที่ 1 ได้รับการปนเปื้อน DNAPL ที่มีสภาพความเป็นกรด ขั้นตอนการทดลองที่ 2 ได้รับการปนเปื้อน DNAPL ที่มีสภาพความเป็นกลาง และขั้นตอนการทดลองที่ 3 ได้รับการปนเปื้อน DNAPL ที่มีสภาพความเป็นเบส

- ขั้นตอนการปนเปื้อนด้วย DNAPL ที่ได้รับพิจารณาแล้วมี 3 รูปแบบการทดลองคือ ขั้นตอนการปนเปื้อนด้วย DNAPL ก่อน ต่อจากนั้นได้รับการปนเปื้อนด้วย LNAPL ที่มีสภาพความเป็นกรด ขั้นตอนการปนเปื้อนด้วย LNAPL ก่อน ต่อจากนั้นได้รับการปนเปื้อนด้วย DNAPL ที่มีสภาพความเป็นกลาง และขั้นตอนการปนเปื้อนด้วย LNAPL ก่อน ต่อจากนั้นได้รับการปนเปื้อนด้วย DNAPL ที่มีสภาพความเป็นเบส

- ขั้นตอนการบำบัดน้ำเสียด้วยวิธีนี้ จะนำน้ำเสียมาปรับค่า pH ให้เป็นกลางก่อน จากนั้นทำการปนเปื้อนด้วย DNAPL ซึ่งมี 3 รูปแบบการทดลองคือ ขั้นตอนการปนเปื้อนด้วย DNAPL ก่อน จากนั้นจึงทำการปนเปื้อนด้วย LNAPL ที่มีสภาพความเป็นกรด ขั้นตอนที่สามคือการปนเปื้อนด้วย DNAPL ก่อน จากนั้นจึงทำการปนเปื้อนด้วย LNAPL ที่มีสภาพความเป็นกลาง และขั้นตอนสุดท้ายคือการปนเปื้อนด้วย DNAPL ก่อน จากนั้นจึงทำการปนเปื้อนด้วย LNAPL ที่มีสภาพความเป็นเบส

โดยรูปแบบการทดลองทั้งหมดทำการทดลองรูปแบบละ 3 ซ้ำ เพื่อมีความน่าเชื่อถือในผลการทดลองมากขึ้น และแสดงรูปแบบการทดลองดังภาพที่ 26



ภาพที่ 26 แผนการทดสอบอัตราการเติมน้ำ

1.1.5 นำชั้นตัวกลางที่ได้รับการปนเปื้อนรูปแบบต่างๆจากข้อ 1.1.4 ปิดขวดให้แน่นด้วยแผ่นพาราฟิล์ม และหุ้มด้วยฟอยด์ เก็บไว้ในที่มืดเป็นเวลา 14 – 60 วัน (Power and Tamblin, 1995) เพื่อให้ชั้นตัวกลางอิ่มตัวด้วยรูปแบบการปนเปื้อนด้วยสารต่างๆ

1.1.6 เมื่อครบกำหนดเวลาการเก็บชั้นตัวกลางจำลองตามข้อ 1.1.5 จากนั้นปล่อยให้ชั้นตัวกลางแห้งที่อุณหภูมิห้อง เพื่อให้สารละลายที่ผสมนั้นเคลือบหรือฝังตัวเข้าไปในช่องว่างรูพรุนของเม็ดทราย

1.1.7 บรรจุชั้นตัวกลางจำลองที่ตากแห้งในอุปกรณ์เซลล์วัดความดัน (tempe cell) แล้วต่อสายยางเข้ากับขวดบรรจุน้ำกลั่นปราศจากไอออน ซึ่งวางอยู่บนเครื่องชั่ง

1.1.8 อ่านค่าน้ำหนักน้ำอย่างสม่ำเสมอเป็นเวลาไม่น้อยกว่า 5 ชั่วโมง

1.1.9 คำนวณค่าปริมาณการเติมน้ำจากค่าน้ำหนักน้ำที่ลดลง

1.1.10 ทำการทดลอง 3 ซ้ำ ในแต่ละรูปแบบการทดลอง



ภาพที่ 27 อุปกรณ์การทดสอบอัตราการเติมน้ำ (Imbibition rate test) (Soil moisture equipment)

วิธีการทดลองส่วนที่ 2 การหา capillary pressure – saturation curve เพื่อหาความสัมพันธ์ของอัตราการเติมน้ำ-ระบายน้ำที่เกิดขึ้นเองที่ความดันคาปิลลารีค่าหนึ่ง โดยมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

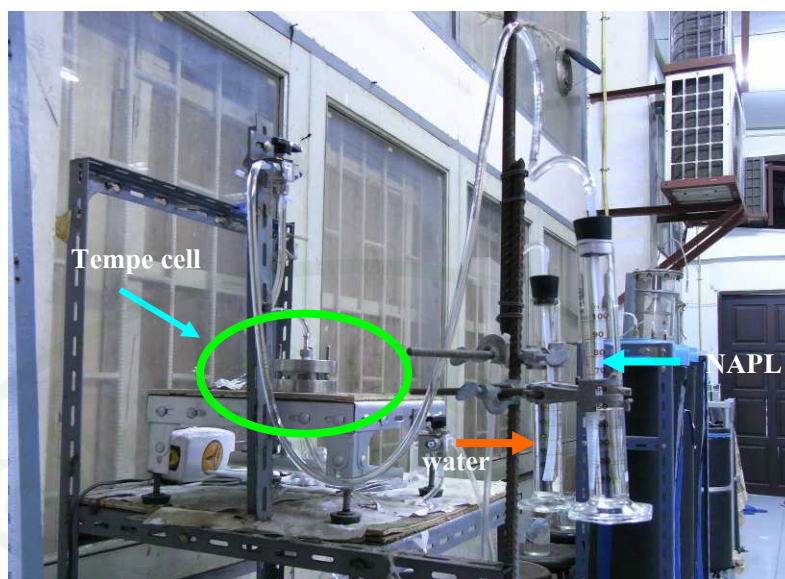
2.1 เตรียมหินปูนบดขนาดร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 30 (0.59 mm) ปริมาตร 97.50 ลูกบาศก์เซนติเมตร

2.2 บรรจุหินปูนบดลงในเซลล์วัดความดันที่ทำด้วยสแตนเลสสตีล

2.3 ด้านล่างของเซลล์จะต่อเชื่อมด้วยสายยางเข้ากับกระบอกตวงบรรจุน้ำกลั่น

2.4 ด้านบนของเซลล์จะต่อเชื่อมด้วยสายยางกับกระบอกตวงบรรจุสาร NAPL

2.5 คำนวณ water saturation จากค่าน้ำหนักน้ำที่ลดลง อ่านค่าความสูงน้ำและความสูงของ NAPL จากกระบอกตวงนำมาคำนวณความดันคาปิลลารี ในหน่วยเซนติเมตร จากสมการลาปลาซ (Laplace equation) ในสมการที่ 26 แล้วนำมาพล็อตกราฟหาความสัมพันธ์ของส่วนโค้งฮิสเทอรีซิสจากกลไกการระบายน้ำและการเติมน้ำ เพื่อคำนวณหาพื้นที่ใต้กราฟหาดัชนี USBM ประเมินความสามารถเปียกได้ต่อไป



ภาพที่ 28 อุปกรณ์การทดสอบส่วนโค้งฮิสเทอรีซิส (Pc-Sw curves)

วิธีการทดลองส่วนที่ 3 การวัดคุณสมบัติของสาร TCE บนพื้นผิวหินปูน ในระบบการปนเปื้อนสาร NAPL เพียงสารเดียว ซึ่งล้อมรอบด้วยน้ำใต้ดินจำลองและระบบการปนเปื้อนสาร NAPL แบบผสม ซึ่งล้อมรอบด้วยสารละลายโทลูอีนที่มีปริมาณเกินกว่าค่าความสามารถการละลายได้ในน้ำสูงสุด (Solubility)

3.1 การทดลองวัดคุณสมบัติของหยดสาร TCE บนพื้นผิวหินปูน ภายใต้ระบบการปนเปื้อนของสาร NAPL เพียงชนิดเดียว ซึ่งล้อมรอบด้วยน้ำ

3.1.1 นำน้ำกลั่นมาเตรียมน้ำปราศจากอากาศ (Degassed Deionized water)

3.1.2 ทำการแช่แผ่นหินปูนให้อิ่มตัวด้วยน้ำใต้ดินจำลองในกล่องเซลล์สแตนเลสเป็นเวลา 2-3 วัน

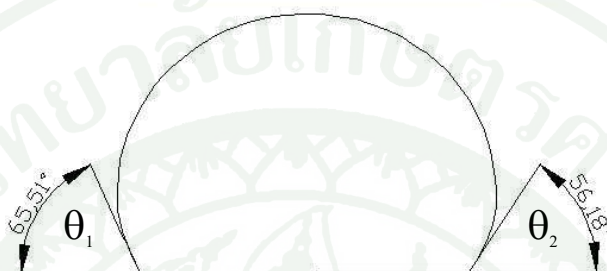
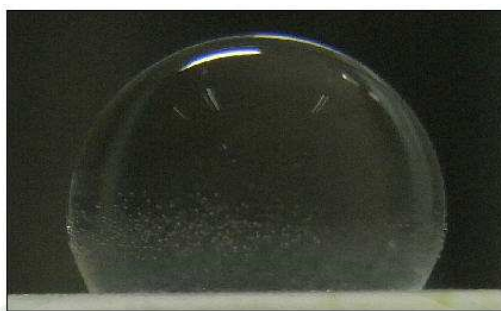
3.1.3 ใช้ gas tight syringe หยด TCE ขนาด 150 μL ลงบนแผ่นหินปูนภายในเซลล์วัดคุณสมบัติ ซึ่งบรรจุน้ำใต้ดินจำลองปริมาตร 860 mL โดยใช้น้ำกลั่นที่ปราศจากไอออนและแก๊ส (DDD water; distilled, deionized, degassed water) เป็นการทดลองวัดคุณสมบัติของ TCE บนแผ่นหินปูน ในกรณีที่มีการปนเปื้อน DNAPL เพียงสารเดียวคือ TCE

3.1.4 ถ่ายภาพการเปลี่ยนแปลงของมูมัมผัสเมื่อเวลาเปลี่ยนไป โดยถ่ายภาพมูมัมผัสที่เกิดขึ้นในตอนเริ่มต้นและทุก 1 ชั่วโมง เป็นเวลา 16 ชั่วโมง หลังจากนั้นถ่ายภาพทุก 24 ชั่วโมง จนกระทั่งมวลของ NAPL ลดลงจนเหลือน้อยมากและมูมัมผัสค่อนข้างคงที่ และการถ่ายภาพมูมัมผัสทุกภาพจะถ่ายจากทางด้านหน้าของเซลล์วัดมูมัมผัส ทำให้ภาพที่ได้เป็นภาพที่มาจากด้านเดียวกัน ซึ่งได้ทำการทดลอง จำนวน 3 ฐาน สื่อความหมายถึงลักษณะทำการทดลอง 3 ชั่วโมง ดังแสดงในภาพที่ 29



ภาพที่ 29 อุปกรณ์เซลล์วัดมูมัมผัส ในรูปแบบการทดลองหยด TCE บนพื้นผิวหินปูน ล้อมรอบด้วยน้ำใต้ดินจำลอง ซึ่งได้ทำการทดลองทั้งหมด 3 ชั่วโมง (3 ฐานการทดลอง)

3.1.5 ทำการคำนวณค่ามูมัมผัสซ้ายและมูมัมผัสขวาดังแสดงในภาพที่ 30 รวมไปถึงค่าพื้นที่หยดสาร TCE จากโปรแกรม Autocad เวอร์ชัน 2005 และบันทึกผลการทดลอง



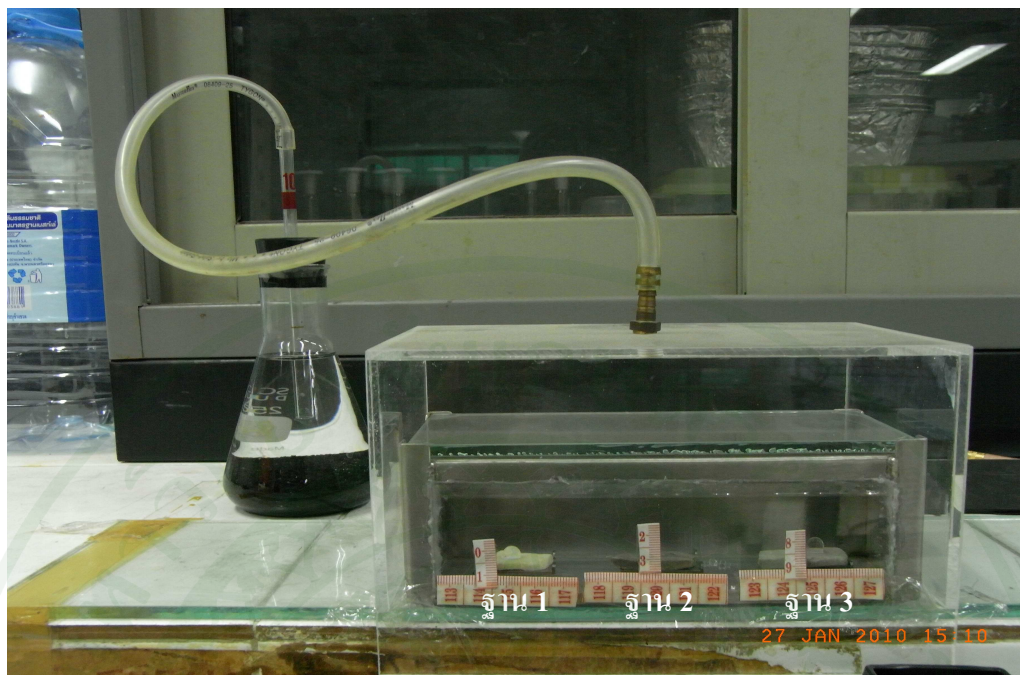
ภาพที่ 30 แสดงผลการวัดมุมสัมผัสโดยใช้โปรแกรม Autocad version 2005 ซึ่งกำหนดให้มุม θ_1 เป็นผลการวัดมุมสัมผัสซ้าย และมุม θ_2 เป็นผลการวัดมุมสัมผัสขวา

3.2 การทดลองวัดมุมสัมผัสระหว่าง TCE บนพื้นผิวหินปูน ภายใต้ระบบสาร NAPL แบบผสม ซึ่งล้อมรอบด้วยสารละลายโทลูอินที่มากกว่าปริมาณละลายได้น้ำสูงสุด (Solubility)

3.2.1 นำน้ำกลั่นมาเตรียมน้ำปราศจากอากาศ (Degassed Deionized water)

3.2.2 ทำการแช่แผ่นหินปูนซึ่งวางอยู่บนแท่นกลางเซลล์วัดมุมสัมผัสให้อิ่มตัวด้วยสารละลายโทลูอินในกล่องเซลล์สเตนเลส เป็นเวลา 2-3 วัน

3.2.3 ใช้ gas tight syringe หยด TCE ขนาด 150 μL ลงบนพื้นผิวหินปูนภายในเซลล์วัดมุมสัมผัส ซึ่งบรรจุสารละลายโทลูอิน ปริมาตร 860 mL เป็นการทดลองวัดมุมสัมผัสของ TCE บนพื้นผิวหินปูน ในกรณีที่มีการปนเปื้อนสาร NAPL แบบผสม ซึ่งล้อมรอบด้วยสารละลายโทลูอินในปริมาณมากกว่าค่าความสามารถการละลายได้สูงสุด เพื่อสร้างระบบปิด (Closed system) ซึ่งได้ทำการทดลอง จำนวน 3 ฐาน สื่อความหมายถึงลักษณะทำการทดลอง 3 ซ้ำ ดังแสดงในภาพที่



ภาพที่ 31 อุปกรณ์เซลล์วัดมัมสัมผัส ในรูปแบบการทดลองหยด TCE บนพื้นผิวหินปูน ล้อมรอบด้วยสารละลายโทลูอินที่มีปริมาณมากเกินกว่าค่าการละลายได้สูงสุด ซึ่งได้ทำการทดลองทั้งหมด 3 ชั่วโมง (3 ฐานการทดลอง)

3.2.4 ถ่ายภาพการเปลี่ยนแปลงของมัมสัมผัสเมื่อเวลาเปลี่ยนไป โดยถ่ายภาพมัมสัมผัสที่เกิดขึ้นในตอนเริ่มต้นและทุก 1 ชั่วโมง เป็นเวลา 16 ชั่วโมง หลังจากนั้นถ่ายภาพทุก 24 ชั่วโมง จนกระทั่งมวลของ NAPL ลดลงจนเหลือน้อยมากและมัมสัมผัสค่อนข้างคงที่ และการถ่ายภาพมัมสัมผัสทุกภาพจะถ่ายจากทางด้านหน้าของเซลล์วัดมัมสัมผัส ทำให้ภาพที่ได้เป็นภาพที่มาจากด้านเดียวกัน

3.2.5 ทำการคำนวณค่ามัมสัมผัสซ้ายและมัมสัมผัสขวาดังแสดงในภาพที่ 30 รวมไปถึงค่าพื้นที่หยดสาร TCE จากโปรแกรม Autocad เวอร์ชัน 2005 และบันทึกผลการทดลอง

ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

ผลและวิจารณ์การทดลองส่วนที่ 1 การทดสอบอัตราการเติมน้ำ (Imbibition rate) ในรูปแบบการทดลองที่มีการปนเปื้อนด้วยสาร NAPL และมีการปรับค่า pH ในชั้นตัวกลางทรายออกตาแบบต่างๆ

ในการทดสอบอัตราการเติมน้ำเข้าสู่ชั้นตัวกลางนั้น เพื่อให้ได้ผลที่ถูกต้อง ควรมีการทำการทดลองซ้ำทั้งหมด 3 ซ้ำ ในแต่ละรูปแบบการทดลอง โดยนำมาเปรียบเทียบชั้นตัวกลางที่ปรับสภาพค่า pH ต่างๆ และไม่ได้รับการปนเปื้อนด้วยสาร NAPL อย่างไรก็ตามอัตราการเติมน้ำจะมีการเปลี่ยนแปลงเสมอเมื่อชั้นตัวกลางเปลี่ยนไป หรือของเหลวเปลี่ยนไป (กษม, 2009)

จากตารางที่ 7 แสดงผลการทดลองรวม 15 รูปแบบ ซึ่งได้ทำการเรียงลำดับค่าความอิ่มตัวด้วยน้ำเฉลี่ยสุดท้ายมากที่สุดไปน้อยที่สุดและแสดงการเปรียบเทียบผลการทดลองชั้นตัวกลางที่มีการปนเปื้อน NAPL เทียบกับชั้นตัวกลางที่ไม่มีการปนเปื้อน NAPL ในรูปแบบการปรับสภาพชั้นตัวกลางด้วยค่า pH เดียวกัน พบว่า ชั้นตัวกลางที่ไม่มีการปนเปื้อน NAPL แต่มีการปรับสภาพชั้นตัวกลางด้วยค่า pH ต่างๆ (pH 4.9, pH 8.0, pH 8.0) จะมีค่าความอิ่มตัวด้วยน้ำมาก โดยเฉพาะชั้นตัวกลางที่มีการปรับสภาพเป็นกลาง (pH 6.7) จะมีความอิ่มตัวด้วยน้ำมากที่สุดเท่ากับ 78.35 ± 2.02 % ส่วนชั้นตัวกลางที่มีการปนเปื้อน NAPL จะมีค่าความอิ่มตัวด้วยน้ำลดลง โดยเฉพาะชั้นตัวกลางที่ปรับสภาพเป็นกรดและปนเปื้อน TCE เพียงชนิดเดียว จะมีค่าความอิ่มตัวด้วยน้ำต่ำที่สุดเท่ากับ 41.40 ± 1.23 % ดังแสดงในตารางที่ 7 และเมื่อทำการเปรียบเทียบกับผลการทดลองของกษม (2552) ในรูปแบบการทดลองเดียวกัน กล่าวคือชั้นตัวกลางที่ปรับสภาพความเป็นกลาง (pH 6.7) พบว่าชั้นตัวกลางที่ไม่มีการปนเปื้อน NAPL จะมีค่าความอิ่มตัวด้วยน้ำไม่มีความแตกต่างกัน ในขณะที่รูปแบบชั้นตัวกลางที่ปนเปื้อน NAPL (รูปแบบปนเปื้อน โทลูอินเพียงชนิดเดียว รูปแบบปนเปื้อน TCE เพียงชนิดเดียว รูปแบบปนเปื้อน โทลูอินก่อนปนเปื้อน TCE และรูปแบบปนเปื้อน TCE ก่อนปนเปื้อน โทลูอิน) จะมีค่าความอิ่มตัวด้วยน้ำต่ำกว่าอย่างมีนัยสำคัญ (significant > 15 %) ซึ่งสามารถแปลผลได้ว่าชอบเปียกน้ำน้อยลงหรือพื้นผิวมีสภาพของไฮโดรโฟบิกมากขึ้น (hydrophobic)

ตารางที่ 7 สรุปผลการทดลองอัตราการเติมน้ำในรูปแบบต่างๆ

รูป แบบ ที่	ลักษณะการปนเปื้อน	Sw เฉลี่ย (%) ± SD, กษม (2552)	Sw เฉลี่ย (%) ± SD	แรงดึง ระหว่างผิว (mN/m)	มุมสัมผัส (°)	การวิเคราะห์ wettability เทียบกับชั้นตัวกลางที่ ปรับสภาพค่า pH และ ไม่มีการปนเปื้อน เดียวกัน
1	ชั้นตัวกลางปรับสภาพเป็นกลาง (pH 6.7) และไม่ได้ ปนเปื้อน NAPL	76.31±2.02	77.95±0.23	น้ำ-อากาศ = 72	^b 110.1	-
2	ชั้นตัวกลางที่ปรับสภาพความเป็นเบส (pH 8.0) และ ไม่มีการปนเปื้อน NAPL	-	76.21±1.67	ไม่มีข้อมูล	ไม่มี ข้อมูล	-
3	ชั้นตัวกลางที่ปรับสภาพความเป็นกรด (pH 4.9) และ ไม่มีการปนเปื้อน NAPL	-	72.23±1.53	ไม่มีข้อมูล	ไม่มี ข้อมูล	-
4	ชั้นตัวกลางที่ปรับสภาพความเป็นเบส (pH 8.0) และ ปนเปื้อนสารโทลูอินเพียงชนิดเดียว	-	67.99±1.63	ไม่มีข้อมูล	ไม่มี ข้อมูล	ไม่มีความแตกต่างกัน

ตารางที่ 7 (ต่อ)

รูป แบบ ที่	ลักษณะการปนเปื้อน	Sw เฉลี่ย (%) ± SD, กษม (2552)	Sw เฉลี่ย (%) ± SD	แรงดึง ระหว่างผิว (mN/m)	มุมสัมผัส (°)	การวิเคราะห์ wettability เทียบกับชั้นตัวกลางที่ ปรับสภาพค่า pH และ ไม่มีการปนเปื้อน เดียวกัน
5	ชั้นตัวกลางที่ปรับสภาพความเป็นกลาง (pH 6.7) และปนเปื้อนโทลูอินก่อนปนเปื้อนด้วยสาร TCE	73.61±1.21	60.42±1.21	ไม่มีข้อมูล	ไม่มี ข้อมูล	ต่ำกว่าอย่างมีนัยสำคัญ
6	ชั้นตัวกลางที่ปรับสภาพความเป็นเบส (pH 8.0) และปนเปื้อนสาร TCE เพียงชนิดเดียว	-	57.42±1.74	ไม่มีข้อมูล	ไม่มี ข้อมูล	ต่ำกว่าอย่างมีนัยสำคัญ
7	ชั้นตัวกลางที่ปรับสภาพความเป็นกรด (pH 4.9) และปนเปื้อนด้วยสาร โทลูอินก่อนปนเปื้อนด้วยสาร TCE	-	57.04±0.49	ไม่มีข้อมูล	ไม่มี ข้อมูล	ต่ำกว่าอย่างมีนัยสำคัญ
8	ชั้นตัวกลางที่ปรับสภาพความเป็นกลาง (pH 6.7) และปนเปื้อนด้วยสาร TCE เพียงชนิดเดียว	82.81±1.92	56.93±2.95	^a TCE-น้ำ = 38	ไม่มี ข้อมูล	ต่ำกว่าอย่างมีนัยสำคัญ

ตารางที่ 7 (ต่อ)

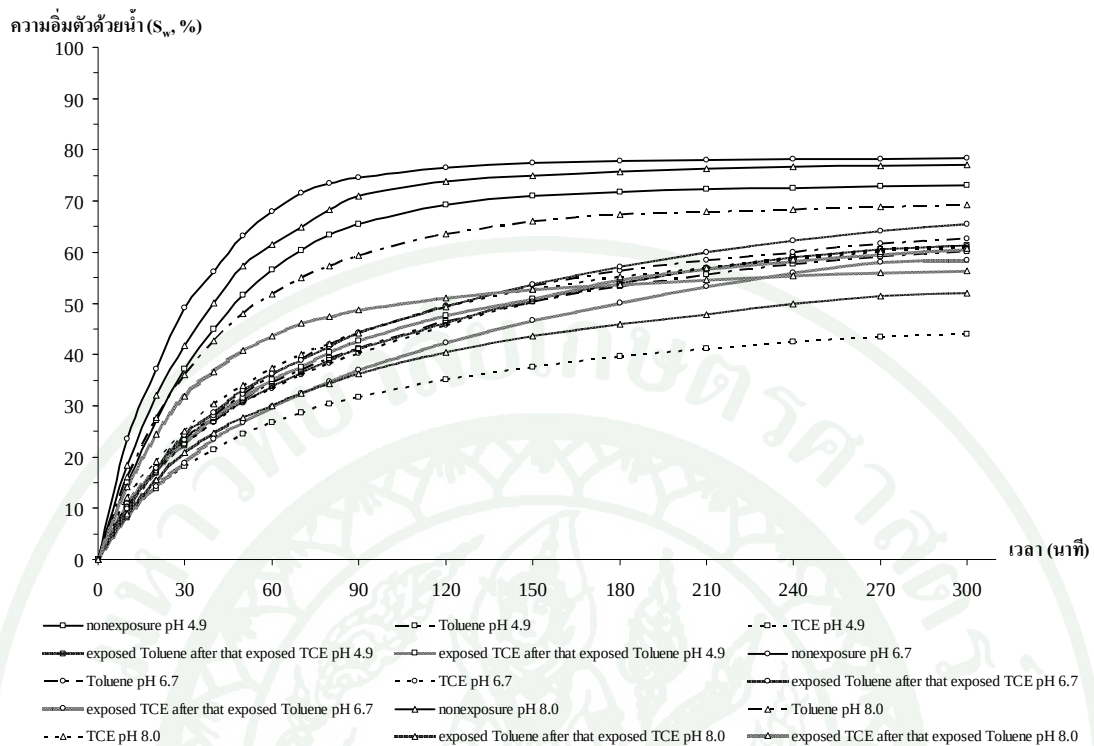
รูป แบบ ที่	ลักษณะการปนเปื้อน	Sw เฉลี่ย (%) ± SD, กษม (2552)	Sw เฉลี่ย (%) ± SD	แรงดึง ระหว่างผิว (mN/m)	มุมสัมผัส (°)	การวิเคราะห์ wettability เทียบกับชั้นตัวกลางที่ ปรับสภาพค่า pH และ ไม่มีการปนเปื้อน เดียวกัน
9	ชั้นตัวกลางที่ปรับสภาพความเป็นกรด (pH 4.9) และ ปนเปื้อน TCE ก่อนปนเปื้อน โทลูอิน	-	56.78±3.30	ไม่มีข้อมูล	ไม่มี ข้อมูล	ต่ำกว่าอย่างมีนัยสำคัญ
10	ชั้นตัวกลางที่ปรับสภาพความเป็นกลาง (pH 6.7) และปนเปื้อน โทลูอินเพียงชนิดเดียว	84.68±1.79	56.17	โทลูอิน-น้ำ = 36.1	ไม่มี ข้อมูล	ต่ำกว่าอย่างมีนัยสำคัญ
11	ชั้นตัวกลางที่ปรับสภาพความเป็นกรด (pH 4.9) และ ปนเปื้อน โทลูอินเพียงชนิดเดียว	-	56.04±3.52	ไม่มีข้อมูล	ไม่มี ข้อมูล	ต่ำกว่าอย่างมีนัยสำคัญ
12	ชั้นตัวกลางที่ปรับสภาพความเป็นเบส (pH 8.0) และ ปนเปื้อน TCE ก่อนปนเปื้อน โทลูอิน	-	54.78±0.42	ไม่มีข้อมูล	ไม่มี ข้อมูล	ต่ำกว่าอย่างมีนัยสำคัญ

ตารางที่ 7 (ต่อ)

รูป แบบ ที่	ลักษณะการปนเปื้อน	Sw เฉลี่ย (%) ± SD, กษม (2552)	Sw เฉลี่ย (%) ± SD	แรงดึง ระหว่างผิว (mN/m)	มุมสัมผัส (°)	การวิเคราะห์ wettability เทียบกับชั้นตัวกลางที่ ปรับสภาพค่า pH และ ไม่มีการปนเปื้อน เดียวกัน
13	ชั้นตัวกลางที่ปรับสภาพความเป็นกลาง (pH 6.7) และปนเปื้อน TCE ก่อนปนเปื้อนโทลูอิน	74.88±3.14	53.79±2.51	ไม่มีข้อมูล	ไม่มี ข้อมูล	ต่ำกว่าอย่างมีนัยสำคัญ
14	ชั้นตัวกลางที่ปรับสภาพความเป็นเบส (pH 8.0) และปนเปื้อนโทลูอินก่อนปนเปื้อน TCE	-	48.46±3.03	ไม่มีข้อมูล	ไม่มี ข้อมูล	ต่ำกว่าอย่างมีนัยสำคัญ
15	ชั้นตัวกลางที่ปรับสภาพความเป็นกรด (pH 4.9) และปนเปื้อน TCE เพียงชนิดเดียว	-	41.40±1.23	ไม่มีข้อมูล	ไม่มี ข้อมูล	ต่ำกว่าอย่างมีนัยสำคัญ

ที่มา: ^a Dane *et al.* (1994); ^b Amirfazli *et al.* (1998); ^c Guy *et al.* (1996)

ภาพที่ 32 แสดงกราฟผลการทดลองรวมทุกรูปแบบการทดลอง ซึ่งได้ทำการวิเคราะห์ถึง อัตราการเติมน้ำในช่วงความอิ่มตัวด้วยน้ำมีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นตามเวลา (90 นาทีแรก) พบว่า ความอิ่มตัวด้วยน้ำในชั้นตัวกลางที่มีการปรับสภาพ pH ต่างๆและไม่ได้รับการปนเปื้อน NAPL จะมีอัตราการเติมน้ำสูงสุด ในขณะที่ชั้นตัวกลางที่ปรับสภาพ pH ต่างๆ และมีการปนเปื้อน NAPL เพียงชนิดเดียว พบว่าในช่วง 90 นาทีแรก ชั้นตัวกลางที่ปรับสภาพเป็นเบส (pH 8.0) และได้รับการปนเปื้อนด้วย LNAPL เพียงชนิดเดียว จะมีอัตราการเติมน้ำสูงที่สุด ส่วนชั้นตัวกลางที่ปรับสภาพ pH ต่างๆ และมีการปนเปื้อน NAPL แบบผสม จะพบว่าในช่วง 90 นาทีแรก ชั้นตัวกลางที่ปรับสภาพเป็นเบส (pH 8.0) และได้รับการปนเปื้อนจาก DNAPL ก่อนได้รับการปนเปื้อนจาก LNAPL จะมีอัตราการเติมน้ำสูงที่สุด อย่างไรก็ตามชั้นตัวกลางที่มีการปนเปื้อน NAPL ยังคงมีอัตราการเติมน้ำต่ำกว่าชั้นตัวกลางที่ไม่มีการปนเปื้อน NAPL เมื่อพิจารณาช่วงอัตราการเติมน้ำส่วนใหญ่ในชั้นตัวกลางช่วงเวลา 90 นาทีแรกโดยทั่วไปจะอยู่ในช่วง 55-65 % ขณะที่ในชั้นตัวกลางที่มีอัตราการเติมน้ำต่ำที่สุดในช่วงเวลา 90 นาทีแรกคือ ชั้นตัวกลางที่ปรับสภาพเป็นกรด (pH 4.9) และมีการปนเปื้อน DNAPL เพียงชนิดเดียว ส่วนอัตราการเติมน้ำหลังจากช่วง 90 นาทีแรก ซึ่งเป็นช่วงการเติมน้ำเข้าสู่ชั้นตัวกลางอยู่ในสภาพสมดุลหรือสภาพความอิ่มตัวคงที่แล้ว คือช่วงเวลา 90-300 นาที รูปแบบชั้นตัวกลางที่ปรับสภาพด้วยค่า pH ต่างๆ แต่ไม่มีการปนเปื้อน NAPL ยังคงมีค่าความอิ่มตัวด้วยน้ำสูงสุด

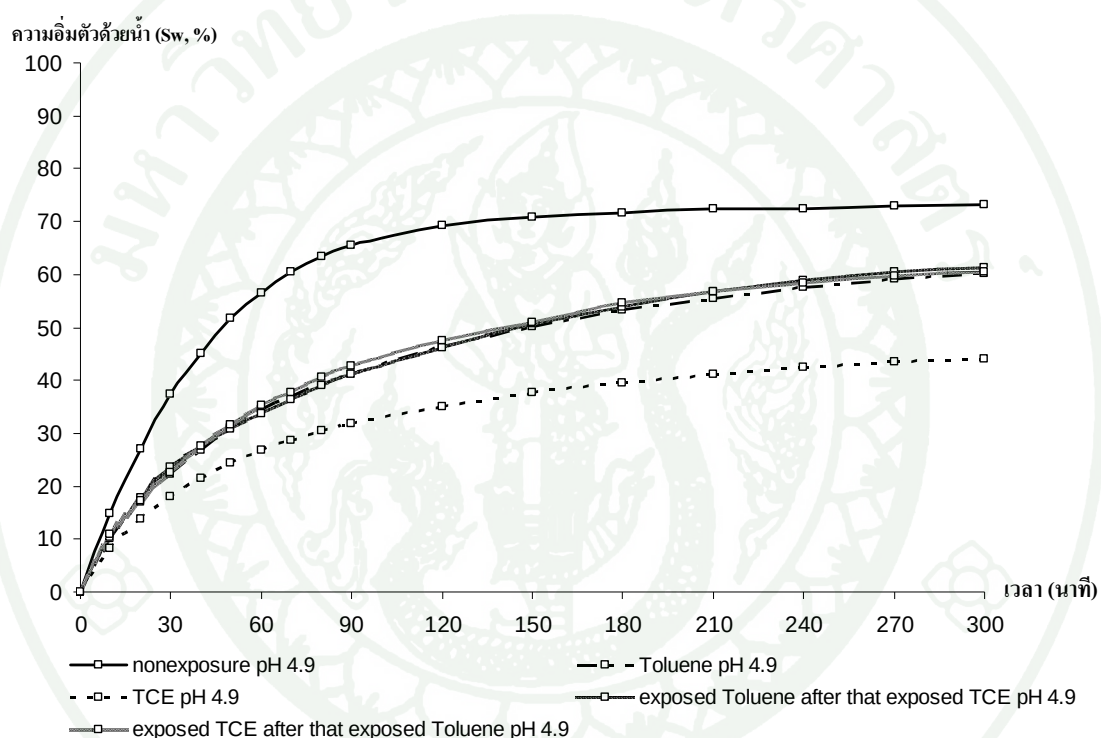


ภาพที่ 32 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเติมน้ำเทียบกับการเปลี่ยนแปลงเวลา 300 นาที

1.2 ในการศึกษาเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างค่าความอิ่มตัวด้วยน้ำเมื่อเวลาเปลี่ยนแปลงไปของชั้นตัวกลางที่ปรับสภาพด้วยค่า pH เดียวกันและได้รับการปนเปื้อนด้วยสาร NAPL ในรูปแบบต่างๆ แสดงรายละเอียดดังนี้

1.2.1 รูปแบบชั้นตัวกลางที่ปรับสภาพเป็นกรด (pH 4.9) เดียวกัน ชั้นตัวกลางที่ได้รับการปนเปื้อนด้วย NAPL จะมีค่าความอิ่มตัวด้วยน้ำต่ำกว่าชั้นตัวกลางที่ไม่ได้รับการปนเปื้อนด้วย NAPL อย่างมีนัยสำคัญ เมื่อเข้าสู่สภาพสมดุลการเติมน้ำ ชั้นตัวกลางที่ได้รับการปนเปื้อน NAPL ยังคงมีค่าความอิ่มตัวด้วยน้ำต่ำกว่าชั้นตัวกลางที่ไม่ได้รับการปนเปื้อนด้วย NAPL อย่างมีนัยสำคัญ (significant > 15 %) โดยชั้นตัวกลางที่ไม่มีการปนเปื้อน NAPL จะมีความอิ่มตัวด้วยน้ำเฉลี่ยสูงสุด นาทีที่ 300 เท่ากับ 73.11 ± 1.14 % ขณะที่ชั้นตัวกลางที่ได้รับการปนเปื้อนด้วยสาร TCE เพียงชนิดเดียว จะมีค่าความอิ่มตัวด้วยน้ำเฉลี่ยนาทีที่ 300 เท่ากับ 44.12 ± 1.10 % ขณะที่ชั้นตัวกลางรูปแบบอื่น จะมีความอิ่มตัวด้วยน้ำอยู่ในช่วง 60.16-61.34 % ดังแสดงในภาพที่ 33

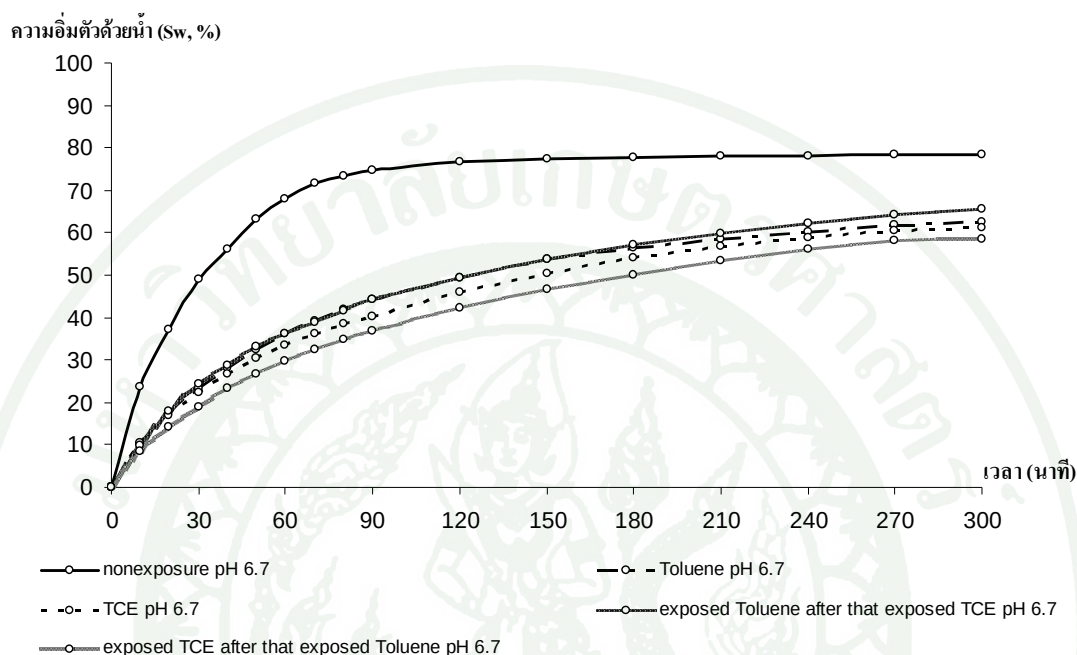
จากการผลการทดลองชั้นตัวกลางที่ปรับสภาพความเป็นกรด (pH 4.9) พบว่าค่า pH มีผลกระทบต่อกลุ่มของสาร DNAPL ในแง่ของการดูดซับ กล่าวคือ ไฮโดรเจนไอออน (H^+) จะส่งผลให้สาร TCE เกาะติดพื้นผิวชั้นตัวกลางได้มากขึ้น ทำให้รัศมีช่องว่างในชั้นตัวกลางแคบลง จึงจำเป็นต้องใช้แรงดันคาปิลลารีมากต่อการเติมน้ำเข้าสู่ชั้นตัวกลาง รวมไปถึงอาจมีกลไกการถ่ายเทมวลสาร TCE เข้าสู่ น้ำ จึงทำให้มีความหนืดมากขึ้น การเติมน้ำเข้าสู่ชั้นตัวกลางจึงยากมากขึ้น จึงเป็นผลทำให้ค่าความอิ่มตัวด้วยน้ำต่ำกว่าชั้นตัวกลางอื่นๆ อย่างมีนัยสำคัญ



ภาพที่ 33 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเติมน้ำในชั้นตัวกลางที่มีการปนเปื้อนสาร NAPL รูปแบบต่างๆ ที่ค่า pH 4.9 เทียบกับเวลา 300 นาที

1.2.2 รูปแบบชั้นตัวกลางที่ปรับสภาพเป็นกลาง (pH 6.7) เดียวกัน และได้รับการปนเปื้อน NAPL รูปแบบต่างๆ จะพบว่าชั้นตัวกลางที่ไม่ได้รับการปนเปื้อน NAPL จะมีอัตราการเติมน้ำและค่าอิ่มตัวด้วยน้ำสูงกว่าชั้นตัวกลางที่ได้รับการปนเปื้อน NAPL รูปแบบต่างๆ อย่างมีนัยสำคัญ (significant > 15 %) โดยเมื่อเข้าสู่ภาวะสมดุลจะมีค่าความอิ่มตัวด้วยน้ำเฉลี่ยนาที่ที่ 300 เท่ากับ 78.35 % ขณะที่เมื่อเปรียบเทียบค่าความอิ่มตัวด้วยน้ำในชั้นตัวกลางที่ปนเปื้อน NAPL

รูปแบบต่างๆ พบว่าไม่มีความแตกต่างกัน โดยมีค่าความอิ่มตัวด้วยน้ำเฉื่อยนาที่ที่ 300 อยู่ในช่วง 58.47-65.49 % ดังแสดงในภาพที่ 34



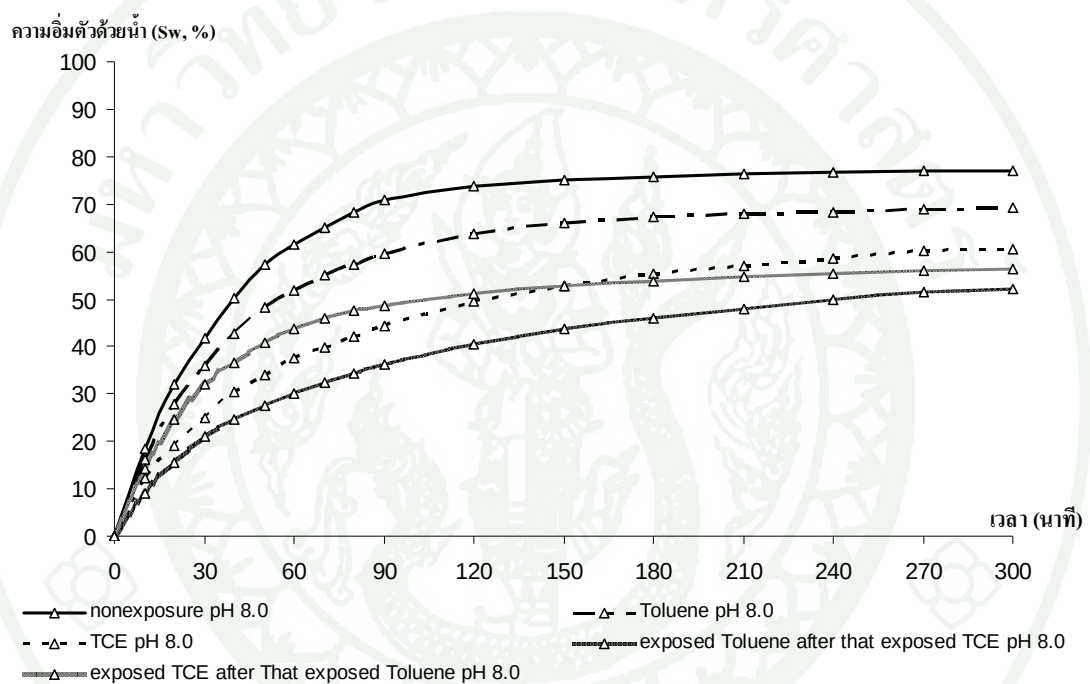
ภาพที่ 34 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเติมน้ำในชั้นตัวกลางที่มีการปนเปื้อนสาร NAPL รูปแบบต่างๆ ที่ค่า pH 6.7 เทียบกับเวลา 300 นาที

1.2.3 รูปแบบชั้นตัวกลางที่ปรับสภาพเป็นเบส (pH 8.0) เดียวกัน พบว่าชั้นตัวกลางที่มีการปนเปื้อน NAPL รูปแบบต่างๆ มีค่าความอิ่มตัวด้วยน้ำเฉื่อยนาที่ที่ 300 ต่ำกว่าชั้นตัวกลางที่ไม่ปนเปื้อน NAPL อย่างมีนัยสำคัญ (significant > 15 %) โดยจะมีความอิ่มตัวด้วยน้ำเฉื่อยนาที่ที่ 300 อยู่ในช่วง 52.00-60.64 % ขณะที่ชั้นตัวกลางที่มีการปนเปื้อนโทลูอินเพียงชนิดเดียวจะไม่มีแตกต่างจากชั้นตัวกลางที่ไม่มีการปนเปื้อน NAPL โดยมีความอิ่มตัวด้วยน้ำเฉื่อยนาที่ที่ 300 เท่ากับ 69.17 % ส่วนชั้นตัวกลางที่ไม่มีการปนเปื้อน NAPL จะมีความอิ่มตัวด้วยน้ำเฉื่อยนาที่ที่ 300 เท่ากับ 77.01 % ดังแสดงในภาพที่ 35

จากผลการทดลองชั้นตัวกลางที่ปรับสภาพเป็นเบส (pH 8.0) พบว่าไฮดรอกไซด์ไอออน (OH⁻) ส่งผลกระทบท่อกลุ่ม NAPL ในแง่ของการดูดซับพื้นผิวได้ยาก โดยเฉพาะชั้นตัวกลางที่

ปนเปื้อน NAPL เพียงชนิดเดียว จึงเป็นผลทำให้ค่าความอิ่มตัวด้วยน้ำมีค่าสูงกว่าชั้นตัวกลางที่ปรับสภาพเป็นกรด (pH 4.9)

ขณะที่ชั้นตัวกลางได้รับการปนเปื้อน NAPL แบบผสม ทั้งในรูปแบบชั้นตัวกลางปรับสภาพเป็นกรด (pH 4.9) และชั้นตัวกลางปรับสภาพเป็นเบส (8.0) ค่าความอิ่มตัวด้วยน้ำมีค่าไม่แตกต่างกัน โดยมีช่วงเปอร์เซ็นต์ความอิ่มตัวด้วยน้ำเฉลี่ยนาที่ที่ 300 เท่ากับ 52.00-61.34 %



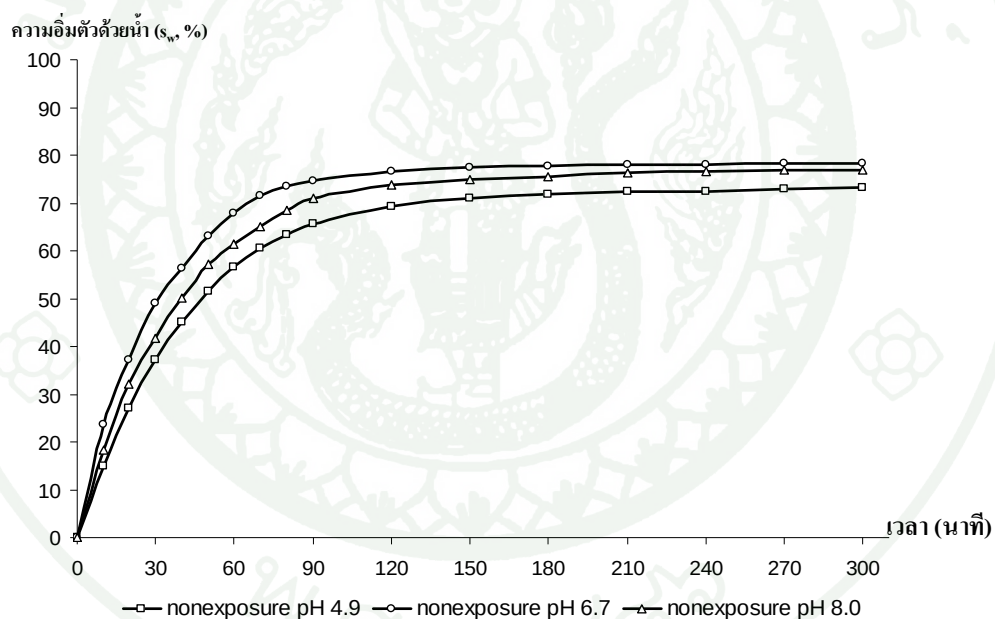
ภาพที่ 35 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเติมน้ำในชั้นตัวกลางที่มีการปนเปื้อนสาร NAPL รูปแบบต่างๆ ที่ค่า pH 8.0 เทียบกับเวลา 300 นาที่

1.3 ผลการศึกษาเปรียบเทียบค่าความอิ่มตัวด้วยน้ำของรูปแบบชั้นตัวกลางปรับสภาพด้วยค่า pH ต่างๆ แต่มีการปนเปื้อนสาร NAPL ชนิดเดียวกัน

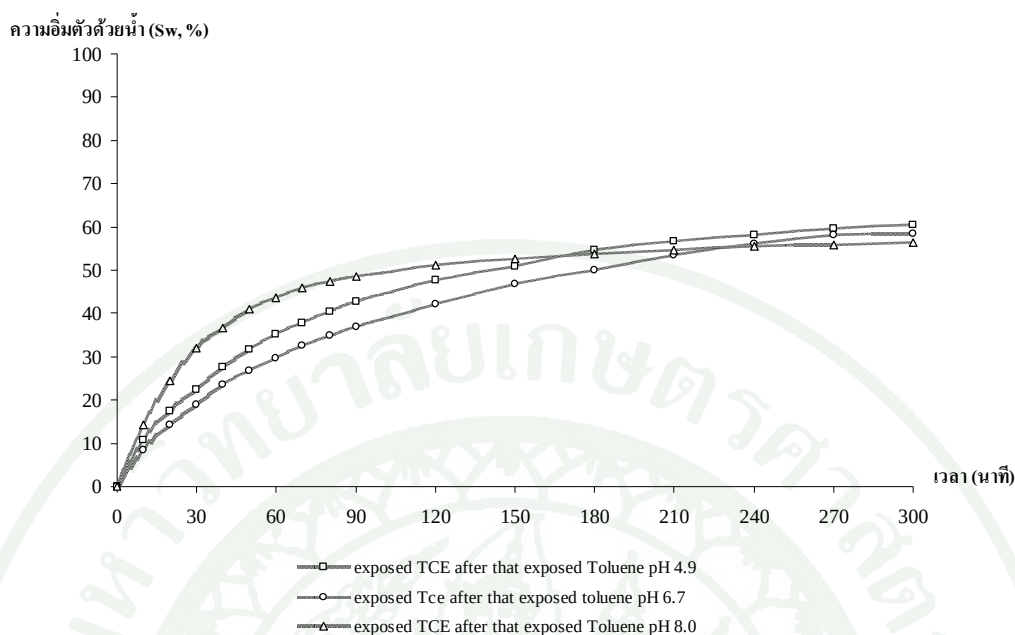
1.3.1 รูปแบบชั้นตัวกลางที่มีค่าความอิ่มตัวด้วยน้ำไม่มีความแตกต่างกัน

- รูปแบบชั้นตัวกลางที่ไม่มีการปนเปื้อน NAPL เดียวกัน จะพบว่าชั้นตัวกลางที่ปรับสภาพด้วยค่า pH ต่างๆ (pH 4.9, pH 6.7, pH 8.0) มีค่าความอิ่มตัวด้วยน้ำไม่มีความแตกต่างกัน ดังแสดงในภาพที่ 36 โดยมีค่าความอิ่มตัวด้วยน้ำเฉลี่ยสุดท้ายอยู่ในช่วง 73-78 %

- รูปแบบชั้นตัวกลางที่ได้รับการปนเปื้อนด้วยสาร TCE และต่อมาได้รับการปนเปื้อนด้วยสารโทลูอิน พบว่าชั้นตัวกลางที่ปรับสภาพด้วยค่า pH ต่างๆ (pH 4.9, pH 6.7, pH 8.0) มีค่าความอิ่มตัวด้วยน้ำไม่มีความแตกต่างกัน ดังแสดงในภาพที่ 37 โดยมีค่าความอิ่มตัวด้วยน้ำเฉลี่ยสุดท้ายอยู่ในช่วง 57-66 %



ภาพที่ 36 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเติมน้ำในชั้นตัวกลางที่ไม่ได้รับการปนเปื้อนสาร NAPL ที่ค่า pH ต่างๆเทียบกับเวลา 300 นาที



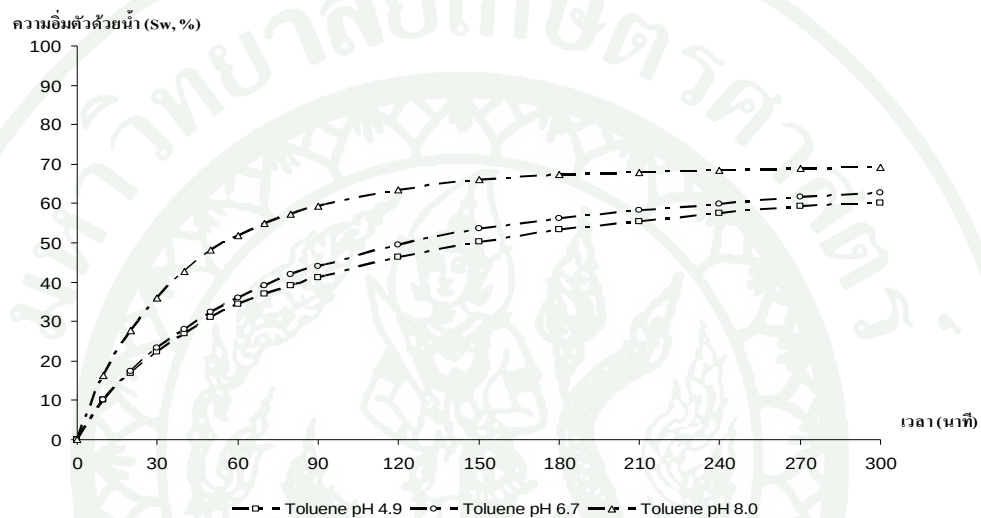
ภาพที่ 37 ความสัมพันธ์อัตราการเติมน้ำในชั้นตัวกลางที่ได้รับการปนเปื้อนสาร DNAPL ก่อน จากนั้นได้รับการปนเปื้อนด้วยสาร LNAPL ที่ค่า pH ต่างๆ เทียบกับเวลา 300 นาที

1.3.2 รูปแบบชั้นตัวกลางที่มีค่าความอิ่มตัวด้วยน้ำแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ

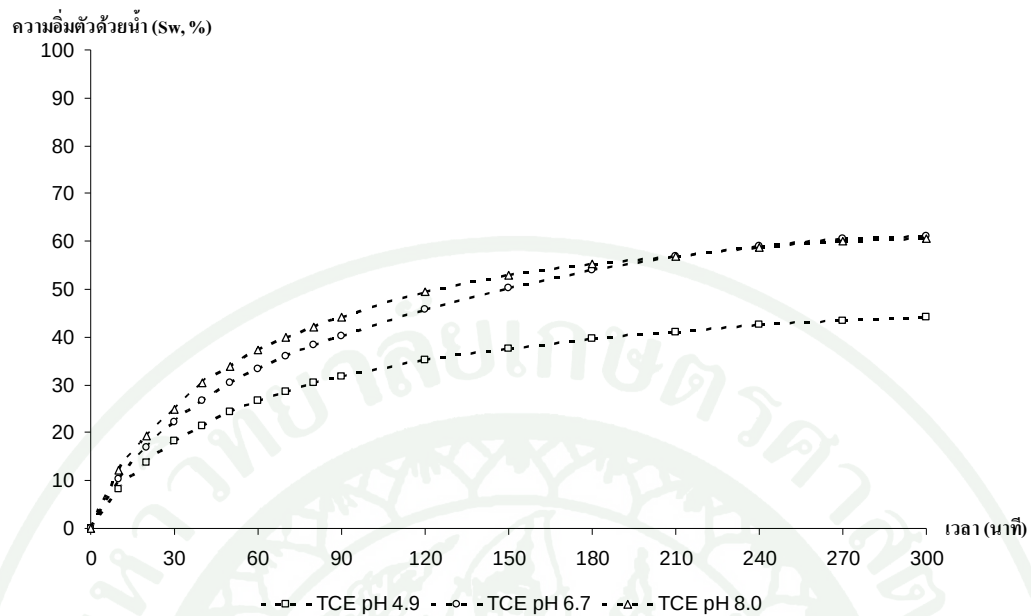
- รูปแบบชั้นตัวกลางที่ได้รับการปนเปื้อนด้วยสาร โทลูอินเพียงชนิดเดียว จะพบว่าชั้นตัวกลางที่ปรับสภาพด้วยกรด (pH 4.9) มีค่าความอิ่มตัวด้วยน้ำเฉลี่ยนาที่ที่ 300 เท่ากับ 60.16 % ซึ่งมีค่าต่ำกว่าชั้นตัวกลางทั้งสองรูปแบบ (pH 6.7, pH 8.0) อย่างมีนัยสำคัญ โดยชั้นตัวกลางที่ปรับสภาพเป็นกลาง (pH 6.7) และชั้นตัวกลางที่ปรับสภาพเป็นเบส (pH 8.0) มีค่าความอิ่มตัวด้วยน้ำเฉลี่ยนาที่ที่ 300 เท่ากับ 62.58 % และ 69.17 % ตามลำดับ ดังแสดงในภาพที่ 38

- รูปแบบชั้นตัวกลางที่ได้รับการปนเปื้อนด้วยสาร TCE เพียงชนิดเดียว พบว่าชั้นตัวกลางที่ปรับสภาพความเป็นกลาง (pH 6.7) และชั้นตัวกลางที่ปรับสภาพความเป็นเบส (pH 8.0) มีค่าความอิ่มตัวด้วยน้ำไม่แตกต่างกัน โดยมีค่าความอิ่มตัวด้วยน้ำอยู่ในช่วง 60.64-61.08 % แต่รูปแบบชั้นตัวกลางทั้ง 2 รูปแบบมีค่าความอิ่มตัวด้วยน้ำสูงกว่ารูปแบบชั้นตัวกลางที่ปรับสภาพความเป็นกรด (pH 4.9) อย่างมีนัยสำคัญ (significant > 15 %) โดยรูปแบบชั้นตัวกลางที่ปรับสภาพความเป็นกรดมีค่าความอิ่มตัวด้วยน้ำเท่ากับ 44.12 % ดังแสดงในภาพที่ 39

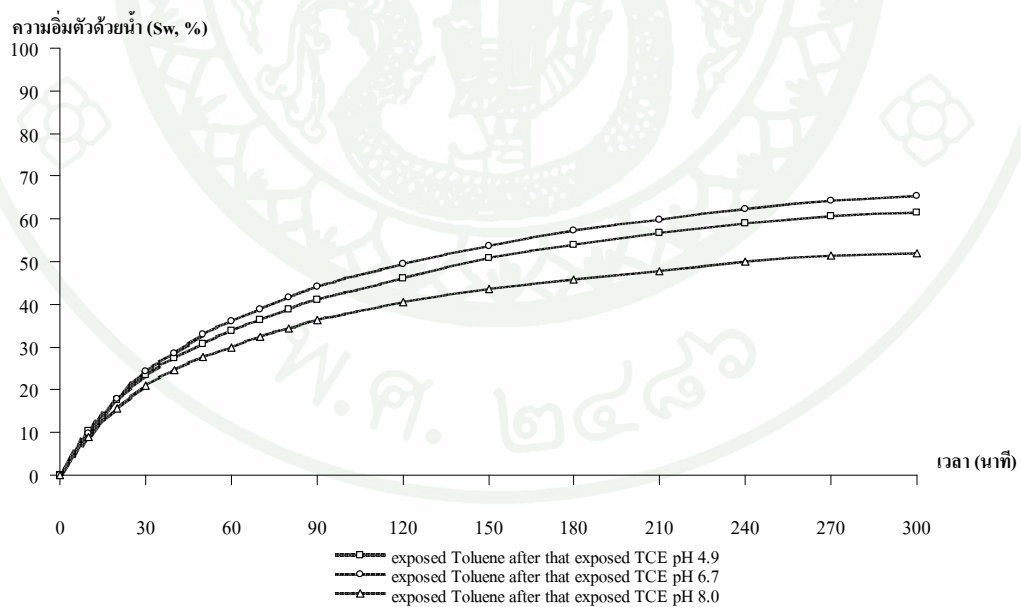
- รูปแบบชั้นตัวกลางที่ได้รับการปนเปื้อนด้วยสารโทลูอิน ต่อมาได้รับสาร TCE พบว่าชั้นตัวกลางที่ปรับสภาพความเป็นกลาง (pH 6.7) และเป็นกรด (pH 4.9) มีค่าความอิ่มตัวด้วยน้ำไม่แตกต่างกัน โดยมีค่าความอิ่มตัวด้วยน้ำอยู่ในช่วง 61.34-65.49 % และทั้ง 2 รูปแบบชั้นตัวกลางมีความอิ่มตัวด้วยน้ำสูงกว่ารูปแบบชั้นตัวกลางที่ปรับสภาพความเป็นเบส (pH 8.0) อย่างมีนัยสำคัญ (significant > 15 %) โดยมีความอิ่มตัวด้วยน้ำเท่ากับ 52.00 % ดังแสดงในภาพที่ 40



ภาพที่ 38 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเติมน้ำในชั้นตัวกลางที่ได้รับการปนเปื้อนสาร LNAPL เพียงชนิดเดียว ที่ค่า pH ต่างๆเทียบกับเวลา 300 นาที



ภาพที่ 39 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเติมน้ำในชั้นตัวกลางที่ได้รับการปนเปื้อนสาร DNAPL เพียงชนิดเดียว ที่ค่า pH ต่างๆเทียบกับเวลา 300 นาที



ภาพที่ 40 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเติมน้ำในชั้นตัวกลางที่ได้รับการปนเปื้อนสาร LNAPL ก่อน ต่อมาได้รับการปนเปื้อนด้วยสาร DNAPL ที่ค่า pH ต่างๆ เทียบกับเวลา 300 นาที

จากสมการลาปลาซจะพบว่า แรงดึงระหว่างผิวของเฟส 3 เฟสและมุมสัมผัสบนพื้นผิวเม็ดทรายในชั้นตัวกลางเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดความแตกต่างของการทดสอบอัตราการเติมน้ำ โดยเมื่อทำการทดลองในชั้นตัวกลางที่มีลักษณะและคุณสมบัติเดียวกันและมีการบรรจุในอุปกรณ์เซลล์วัดความดันแบบเดียวกัน รัศมีคาปิลลารีจะไม่มีผลกระทบต่อ การเปลี่ยนแปลงความดันคาปิลลารีในชั้นตัวกลางได้ แต่สิ่งที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงความดันคาปิลลารีในชั้นตัวกลางคือแรงดึงระหว่างผิวของของเหลวที่มีขอบเขตติดต่อกันและมุมสัมผัสของของเหลวที่กระทำบนพื้นผิวเม็ดทราย ซึ่งแรงดึงระหว่างผิวของของเหลวที่มีค่าลดลง จะส่งผลให้ความดันคาปิลลารีลดลง ทำให้ค่าความอิ่มตัวด้วยน้ำเพิ่มขึ้น ขณะที่ของสามมุมสัมผัสลดลง ทำให้ผลของค่า cosine เพิ่มขึ้น เป็นผลให้ความดันคาปิลลารีเพิ่มสูงขึ้น จึงมีอัตราการเติมน้ำเข้าสู่ชั้นตัวกลางได้ยากมากขึ้น ทำให้มีค่าความอิ่มตัวด้วยน้ำน้อยลง

ในชั้นตัวกลางที่ปรับสภาพค่า pH ต่างๆ และไม่ปนเปื้อน NAPL จะมีค่าความอิ่มตัวด้วยน้ำมากที่สุด ในขณะที่ชั้นตัวกลางที่ปรับสภาพเป็นกรด (pH 4.9) ชั้นตัวกลางที่มีการปนเปื้อน NAPL เพียงชนิดเดียวจะมีค่าความอิ่มตัวด้วยน้ำต่ำกว่าชั้นตัวกลางที่มีการปนเปื้อน NAPL แบบผสม ในขณะที่ชั้นตัวกลางที่ปรับสภาพเป็นเบส (pH 8.0) ชั้นตัวกลางที่มีการปนเปื้อน NAPL แบบผสมจะมีค่าความอิ่มตัวด้วยน้ำต่ำกว่าชั้นตัวกลางที่มีการปนเปื้อน NAPL เพียงชนิดเดียว เป็นต้น จากการวิจัยของ denekas et al. (1959) ได้ทำการวิจัยของน้ำมันดิบ พบว่า กรดอินทรีย์จะส่งผลต่อความสามารถชอบเปียกได้น้ำได้น้อยลงของชั้นตัวกลางหินทราย แต่จะไม่มีผลกระทบในหินปูน ขณะที่ Brown and Neustadter (1980) ได้ทำการศึกษาค่า pH ต่ำ จะส่งผลต่อความสามารถชอบเปียกน้ำมันได้มากขึ้น และเมื่อค่า pH มากกว่า 2 จะส่งเสริมให้ธาตุซิลิกาที่มีความสามารถชอบเปียกน้ำได้มากขึ้น (Parks et al., 1962; Anderson, 1986)

สาเหตุความแตกต่างกันของผลการทดลองในบางรูปแบบการทดลอง เนื่องมาจากปัจจัยจำนวนการทดลองเมื่อเทียบกับวัสดุการกระจายน้ำ (ceramic) 1 อัน รวมไปถึงประสบการณ์และเทคนิควิธีการทำการทดลองในเชิงลึกที่มีรายละเอียดแตกต่างกัน

อย่างไรก็ตามผลการวิจัยนำร่องในครั้งนี้ เป็นประโยชน์ต่อกรณีการศึกษาวิจัยความสามารถเปียกได้อื่นๆต่อไป เนื่องจากสภาพแวดล้อมในพื้นที่ชั้นใต้ดินแต่ละพื้นที่ มีความแตกต่างกันออกไป ดังนั้นสาเหตุการเกิดปรากฏการณ์ความสามารถเปียกได้ในชั้นใต้ดินจะขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่าง รวมไปถึงการเปลี่ยนแปลงทางระบบทางเคมีในชั้นใต้ดินด้วย การพยายามศึกษาการเปลี่ยนแปลงค่า pH จึงเป็นปัจจัยหนึ่งที่จำลองสถานการณ์การเปลี่ยนแปลงทางเคมีเพื่อให้ใกล้เคียง

กับสภาพความเป็นจริง ผลการทดลองดังกล่าวยังสามารถใช้ในการเปรียบเทียบวิธีการทดลองอัตรา
การเติมน้ำรูปแบบอื่นหรือเปรียบเทียบกับผลการทดลองความสามารถเปียกได้ โดยใช้วิธีการวัด
รูปแบบการทดลองในลักษณะที่ต่างออกไป เช่นการหาส่วนโค้งฮิสเทอรีซิส การวัดมุมสัมผัส เป็น
ต้น



ผลและวิจารณ์การทดลองส่วนที่ 2 การหาความสัมพันธ์ระหว่างความดันคาปิลลารี และความอิ่มตัวด้วยน้ำในชั้นตัวกลางหินปูน

1. การหาความสัมพันธ์ระหว่างความดันคาปิลลารี และความอิ่มตัวด้วยน้ำ ด้วยระบบ LNAPL – น้ำ

เมื่อเริ่มต้นทำการทดลอง โดยให้ชั้นตัวกลางรูปทรงแปดเหลี่ยมซึ่งได้แก่หินปูนขนาด 0.48 mm อิ่มตัวด้วยน้ำ 100 % หลังจากนั้นทำการระบายน้ำออกจากชั้นตัวกลางในครั้งแรก โดยสารไหลอินทรีย์ ซึ่งเป็นตัวแทนของกลุ่มสาร LNAPL ที่ใช้ในการทดลอง ต่อจากนั้นทำการเติมน้ำเข้าสู่ชั้นตัวกลางรูปทรงแปดเหลี่ยมอีกครั้งหนึ่ง ส่งผลต่อการดันสาร LNAPL ออกจากชั้นตัวกลางรูปทรงแปดเหลี่ยม เป็นขั้นตอนการเติมน้ำครั้งที่ 1 ในขั้นตอนต่อมาได้ทำการระบายน้ำโดยสาร LNAPL อีกครั้ง เป็นขั้นตอนการระบายน้ำครั้งที่ 2 สุดท้ายทำการเติมน้ำเข้าสู่ชั้นตัวกลาง ซึ่งเป็นขั้นตอนการเติมน้ำครั้งที่ 2

ภาพที่ 41-44 เป็นการแสดงลักษณะฮิสเทอรีซิสที่เกิดขึ้นเมื่อมีการระบายน้ำและกระบวนการเติมน้ำซ้ำๆกันในระบบชั้นใต้ดิน กล่าวคือ การระบายน้ำและการเติมน้ำแต่ละครั้ง ค่าความอิ่มตัวด้วยน้ำ (S_w) มีการเปลี่ยนแปลงตามค่าระดับความดันคาปิลลารี

ภาพที่ 41 แสดงเส้นกราฟการระบายน้ำออกครั้งที่ 1 มีค่าความอิ่มตัวด้วยน้ำเริ่มต้น 100 % ที่ความดันคาปิลลารี 0.46 เซนติเมตร เมื่อมีการเพิ่มค่าความดันคาปิลลารีของสารไหลอินทรีย์จนถึงระดับ 2.10 เซนติเมตร จะทำให้ค่าความอิ่มตัวด้วยน้ำค่อยๆลดลง ที่ระดับความดันคาปิลลารีมากกว่า 2.10 เซนติเมตร ถึง 7.10 เซนติเมตร ซึ่งเป็นความดันคาปิลลารีสุดท้ายที่สามารถระบายน้ำได้น้อย จะส่งผลให้ค่าความอิ่มตัวด้วยน้ำลดลงอย่างรวดเร็ว จนมีค่าความอิ่มตัวด้วยน้ำที่เหลือในชั้นตัวกลางเท่ากับ 44.75 % สามารถหาพื้นที่ใต้กราฟการระบายครั้งที่ 1 (A1) ได้เท่ากับ 260.74 เซนติเมตร และหาจุดความดันสารไหลอินทรีย์เข้าสู่ชั้นตัวกลาง (Entry pressure) เท่ากับ 2.0 เซนติเมตร

เส้นกราฟการเติมน้ำเข้าสู่ชั้นตัวกลางครั้งที่ 1 มีความดันคาปิลลารีเริ่มต้น 7.10 เซนติเมตร และมีค่าความอิ่มตัวด้วยน้ำ 44.75 % และเมื่อลดระดับความดันคาปิลลารีลงจนถึง -1.17 เซนติเมตร จะเริ่มมีการเติมน้ำเข้าสู่ชั้นตัวกลางอย่างช้าๆ ซึ่งมีค่าความอิ่มตัวด้วยน้ำเท่ากับ 48.32 % ต่อจากนั้นเมื่อลดระดับความดันคาปิลลารีลงเรื่อยๆ จะสังเกตเห็นว่ามีกระบวนการเติมน้ำเข้าสู่ชั้นตัวกลางมากขึ้นจนถึงระดับความดันคาปิลลารีสุดท้ายที่มีความสามารถเติมน้ำเข้าสู่ชั้นตัวกลางได้น้อยมาก

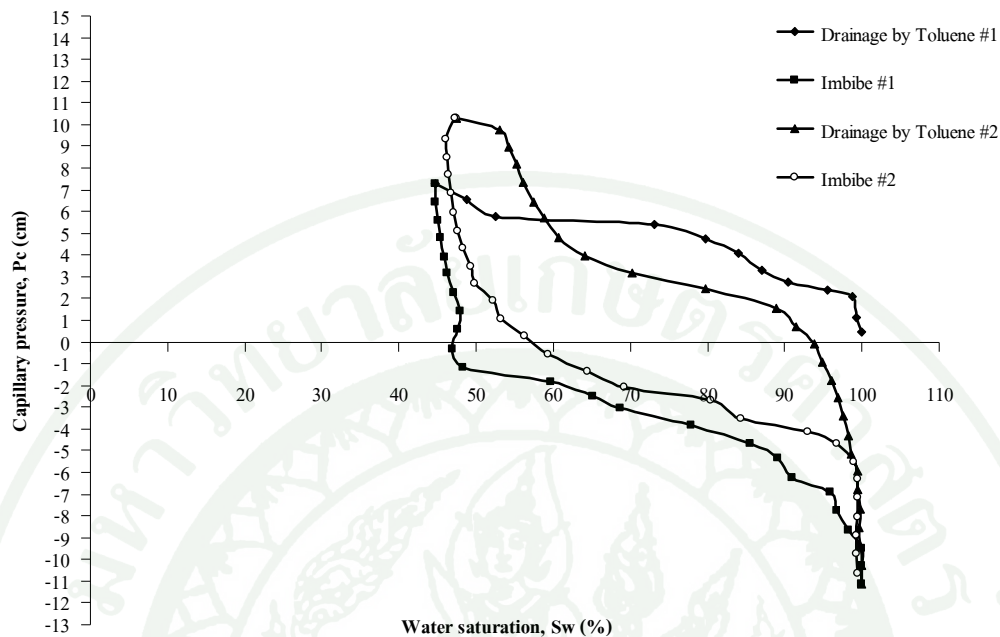
เท่ากับ -11.12 เซนติเมตร และมีค่าความอิ่มตัวด้วยน้ำเท่ากับ 100.12 % สามารถหาพื้นที่ใต้กราฟการเติมน้ำเข้าสู่ชั้นตัวกลางครั้งที่ 1 (A2) ได้เท่ากับ 199.92 เซนติเมตร

จากกระบวนการระบายน้ำและการเติมน้ำเข้าสู่ชั้นตัวกลางครั้งที่ 1 ได้ค่าดัชนี USBM เท่ากับ 0.12 แสดงว่าตัวกลางมีความสามารถชอบเปียกผสม (*neutral wet*) เมื่อตัวกลางอยู่ในระบบ LNAPL – น้ำ

ที่เส้นกราฟระบายน้ำออกจากชั้นตัวกลางครั้งที่ 2 ความอิ่มตัวด้วยน้ำเริ่มต้น 100.12 % ที่ความดันคาปิลลารีเริ่มต้น -11.13 เซนติเมตร เมื่อทำการเพิ่มค่าความดันคาปิลลารีจนถึงระดับ -4.30 เซนติเมตร จะมีกระบวนการระบายน้ำเป็นอย่างช้าๆ โดยมีค่าความอิ่มตัวด้วยน้ำเท่ากับ 98.26 % หลังจากนั้นเมื่อเพิ่มระดับความดันคาปิลลารีมากขึ้น จะส่งผลให้มีการระบายน้ำได้มากขึ้นเช่นกัน จนถึงระดับความดันคาปิลลารีสุดท้ายที่มีความสามารถระบายน้ำได้น้อยมากที่สุดที่ 10.29 เซนติเมตร จะมีค่าความอิ่มตัวด้วยน้ำลดลงในชั้นตัวกลางเหลือเท่ากับ 47.41 % สามารถหาพื้นที่ใต้กราฟการระบายครั้งที่ 2 (A1) ได้เท่ากับ 195.94 เซนติเมตรและหาจุดความดันของสารโทลูอินเข้าสู่ชั้นตัวกลาง (Entry pressure) เท่ากับ 1.2 เซนติเมตร

ที่เส้นกราฟการเติมน้ำเข้าครั้งที่ 2 ค่าความอิ่มตัวด้วยน้ำเริ่มต้น 47.41 % ที่ระดับความดันคาปิลลารี 10.29 เซนติเมตร เมื่อเริ่มทำการลดระดับความดันคาปิลลารีลงจนถึง 5.09 เซนติเมตร จะพบว่ายังมีการระบายน้ำออกได้อีกเล็กน้อย อาจมีสาเหตุมาจากการเว้นช่วงเวลาทำการทดลองนานเกินไป จึงส่งผลต่อการระบายน้ำออกอย่างต่อเนื่องอีกเล็กน้อย แต่เมื่อลดระดับความดันคาปิลลารีให้มีค่าน้อยกว่า 5.09 เซนติเมตร ก็มีการเริ่มกระบวนการเติมน้ำเข้าตามเดิม จนถึงค่าระดับความดันคาปิลลารีสุดท้ายเท่ากับ -10.63 เซนติเมตร ซึ่งเป็นระดับความดันคาปิลลารีที่มีความสามารถในการเติมน้ำเข้าสู่ชั้นตัวกลางได้น้อยมาก โดยมีค่าความอิ่มตัวที่ระดับน้ำเท่ากับ 99.51 % สามารถหาพื้นที่ใต้กราฟการเติมน้ำเข้าสู่ชั้นตัวกลางครั้งที่ 2 (A2) เท่ากับ 116.92 เซนติเมตร

จากกระบวนการระบายน้ำและการเติมน้ำเข้าสู่ชั้นตัวกลางครั้งที่ 2 ได้ค่าดัชนี USBM เท่ากับ 0.22 แสดงว่าตัวกลางมีความสามารถเปียกได้แบบ เปียกผสม (*neutral wet*) แต่มีความสามารถชอบเปียกน้ำได้มากขึ้น เมื่อตัวกลางอยู่ในระบบ LNAPL – น้ำ



ภาพที่ 41 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันคาปิลลารีและความอิ่มตัวด้วยน้ำ โดยการทดลองด้วยระบบ LNAPL-น้ำ-LNAPL-น้ำ

2. การหาความสัมพันธ์ระหว่างความดันคาปิลลารี และความอิ่มตัวด้วยน้ำ ด้วยระบบ DNAPL – น้ำ

กระบวนการเกิดฮิสเทอรีซิสระหว่างสาร TCE และน้ำ มีดังนี้

- การทดลองเริ่มต้น ชั้นตัวกลางที่มีความอิ่มตัวด้วยน้ำ 100 %
- การระบายน้ำครั้งที่ 1 โดยใช้แรงดันจากสาร TCE
- การเติมน้ำเข้าสู่ชั้นตัวกลางครั้งที่ 1
- การระบายน้ำครั้งที่ 2 โดยใช้แรงดันจากสาร TCE
- การเติมน้ำเข้าสู่ชั้นตัวกลางครั้งที่ 2

ภาพที่ 42 เส้นกราฟการระบายน้ำครั้งที่ 1 มีค่าความอิ่มตัวด้วยน้ำเริ่มต้น 100 % ที่ระดับความดันคาปิลลารี -2.00 เซนติเมตร ในช่วงการเพิ่มระดับความดันคาปิลลารี -2.00 ถึง 22.40 เซนติเมตร จะมีการระบายน้ำได้ค่อนข้างยาก ซึ่งในระดับความดันคาปิลลารี 22.40 เซนติเมตร มีค่า

ความอิ่มตัวด้วยน้ำเท่ากับ 92.83 % แต่หลังจากการเพิ่มระดับความดันคาปิลลารีมากขึ้น ก็จะเริ่มมีค่าความอิ่มตัวด้วยน้ำลดลงเป็นอย่างมาก ซึ่งก็ทำให้มีการระบายน้ำได้อย่างรวดเร็วมากขึ้น จนถึงระดับความดันคาปิลลารี 30.39 เซนติเมตร ซึ่งเป็นความดันคาปิลลารีที่มีความสามารถในการระบายน้ำได้น้อยมากจะมีค่าความอิ่มตัวด้วยน้ำของชั้นตัวกลางลดลงเหลือเท่ากับ 65.32 % และสามารถหาพื้นที่ใต้กราฟการระบายครั้งที่ 1 (A1) ได้เท่ากับ 782.57 เซนติเมตร และหาจุดความดันสาร TCE เข้าสู่ชั้นตัวกลาง (Entry pressure) เท่ากับ 21.9 เซนติเมตร

เส้นกราฟการเติมน้ำเข้าสู่ชั้นตัวกลางครั้งที่ 1 ค่าความอิ่มตัวด้วยน้ำเริ่มจาก 65.32 % ที่ระดับความดันคาปิลลารี 30.39 เซนติเมตร เมื่อทำการลดระดับความดันคาปิลลารีลงไปถึงระดับความดันคาปิลลารี 1.49 เซนติเมตร จะสังเกตเห็นว่ามีการเติมน้ำเข้าสู่ชั้นตัวกลางได้ค่อนข้างยากและน้อยมาก โดยมีค่าความอิ่มตัวด้วยน้ำเท่ากับ 75.55 % นั่นเป็นเพราะว่าเกิดการปนเปื้อนและถ่ายเทสาร TCE กับชั้นน้ำในชั้นตัวกลาง ส่งผลให้ของเหลวผสมชนิดนี้มีการเกาะติดบนพื้นผิวในชั้นตัวกลางมากขึ้น ทำให้รัศมีในช่องว่างชั้นตัวกลางที่มีน้ำแทรกอยู่มีขนาดเล็กลง กระบวนการระบายน้ำและการเติมน้ำจึงเป็นไปได้ยาก (Schwille, 1988; Thomas, 1982) นอกจากนี้อาจมีสาเหตุมาจากการเปลี่ยนแปลงความหนืดและแรงตึงระหว่างผิวของของเหลวผสมในชั้นตัวกลาง (Anderson, 1986) ดังนั้นจำเป็นต้องลดระดับแรงดันคาปิลลารีมากขึ้นเพื่อให้เกิดการเติมน้ำเข้าสู่ชั้นตัวกลางได้ดีขึ้น และเมื่อลดระดับความดันคาปิลลารีลงไปถึงความดันคาปิลลารีสุดท้ายที่มีการเติมน้ำได้น้อยมากเท่ากับ -7.86 เซนติเมตร จะพบว่ามีค่าความอิ่มตัวด้วยน้ำ 100 % และสามารถหาพื้นที่ใต้กราฟการเติมน้ำเข้าสู่ชั้นตัวกลางครั้งที่ 1 (A2) ได้เท่ากับ 52.46 เซนติเมตร

จากกระบวนการระบายน้ำและการเติมน้ำเข้าสู่ชั้นตัวกลางครั้งที่ 1 ได้ค่าดัชนี USBM เท่ากับ 1.17 แสดงว่าตัวกลางมีความสามารถชอบเปียกน้ำอย่างมาก (*strongly water wet*) เมื่อตัวกลางอยู่ในระบบ DNAPL – น้ำ

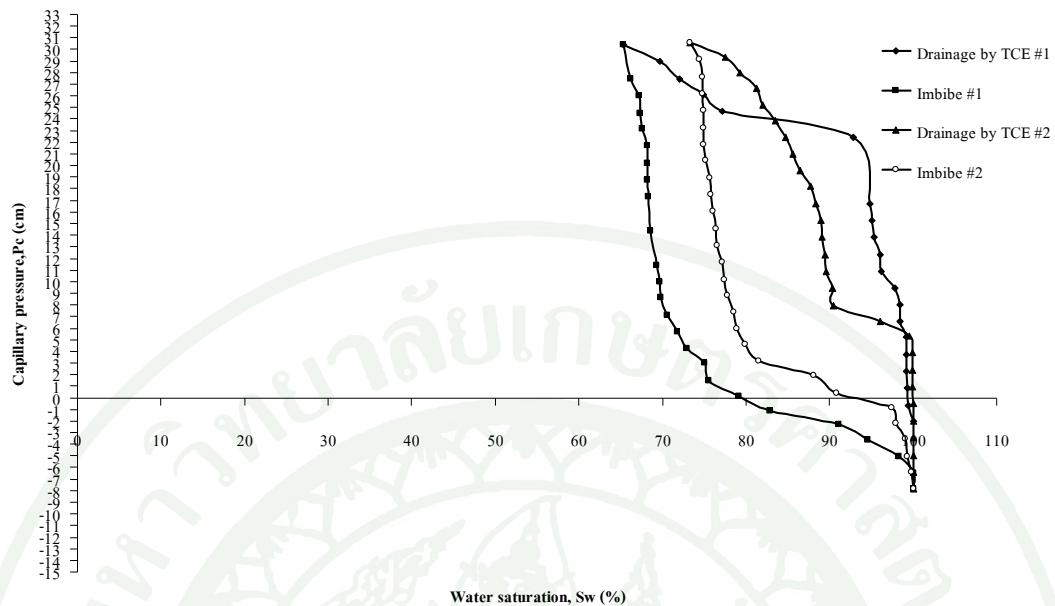
เส้นกราฟการระบายน้ำครั้งที่ 2 ระดับความดันคาปิลลารีเริ่มต้นเท่ากับ -7.86 เซนติเมตร มีค่าความอิ่มตัวด้วยน้ำเริ่มต้น 100 % เมื่อทำการเพิ่มระดับความดันคาปิลลารีจนถึงระดับความดันคาปิลลารี 5.32 เซนติเมตร จะยังคงมีการลดลงของค่าความอิ่มตัวด้วยน้ำในชั้นตัวกลางน้อยมาก หรือกล่าวได้ว่าการระบายน้ำได้ค่อนข้างยาก โดยที่ระดับนี้มีค่าความอิ่มตัวด้วยน้ำเท่ากับ 99.54% แต่เมื่อเพิ่มค่าความดันคาปิลลารีมากขึ้นจนถึงระดับความดันคาปิลลารี 7.95 เซนติเมตร จะมีค่าความอิ่มตัวด้วยน้ำลดลงอย่างมาก โดยเป็นช่วงเดียวที่มีการระบายน้ำได้ดีที่สุดในเส้นกราฟนี้ ซึ่งมี

ค่าความอิ่มตัวด้วยน้ำเท่ากับ 90.48 % หลังจากนั้นกลไกระบายน้ำกลับเข้าสู่ช่วงที่ระบายน้ำได้ยาก เช่นเดิม ถึงแม้ว่าจะมีการเพิ่มระดับความดันคาปิลลารีมากถึง 30.59 เซนติเมตรแล้วก็ตาม และถือว่าเป็นระดับความดันคาปิลลารีสุดท้ายที่มีความสามารถในการระบายน้ำได้น้อยมาก ค่าความอิ่มตัวด้วยน้ำที่ระดับความดันค่านี้เท่ากับ 73.29 % และสามารถหาพื้นที่ใต้กราฟการระบายครั้งที่ 2 (A1) ได้เท่ากับ 477.09 เซนติเมตรและหาจุดความดันของสาร TCE เข้าสู่ชั้นตัวกลาง (Entry pressure) เท่ากับ 5.5 เซนติเมตร

เส้นกราฟการเติมน้ำครั้งที่ 2 ระดับความดันคาปิลลารีเริ่มต้น 73.29 เซนติเมตร มีค่าความอิ่มตัวด้วยน้ำ 73.29 % เมื่อลดระดับความดันคาปิลลารีลงจนถึง 3.16 เซนติเมตร ก็ยังคงมีการเติมน้ำได้ค่อนข้างยากเช่นเดียวกัน โดยมีค่าความอิ่มตัวด้วยน้ำเท่ากับ 81.56 % แต่หลังจากลดระดับความดันคาปิลลารีลงไปอีกจนได้ระดับความดันคาปิลลารี -7.86 เซนติเมตร ซึ่งเป็นระดับความดันสุดท้ายที่มีความสามารถในการเติมน้ำได้น้อยมาก และมีค่าความอิ่มตัวด้วยน้ำเท่ากับ 100 % และสามารถหาพื้นที่ใต้กราฟการเติมน้ำเข้าสู่ชั้นตัวกลางครั้งที่ 2 (A2) เท่ากับ 13.64 เซนติเมตร

จากกระบวนการระบายน้ำและการเติมน้ำเข้าสู่ชั้นตัวกลางครั้งที่ 2 ได้ค่าดัชนี USBM เท่ากับ 1.54 แสดงว่าตัวกลางมีความสามารถชอบเปียกน้ำอย่างมาก (*strongly water wet*) และมีความสามารถชอบเปียกน้ำได้มากขึ้นจากวงจรฮีสเทอรีซิสเดิม เมื่อตัวกลางอยู่ในระบบ DNAPL – น้ำ

จากผลการทดลองความสัมพันธ์ฮีสเทอรีซิสระหว่างความดันคาปิลลารีและค่าความอิ่มตัวด้วยน้ำของการใช้แรงดันสาร NAPL เพียงชนิดเดียว พบว่า สารกลุ่ม LNAPL จะมีการระบายน้ำและการเติมน้ำเข้าสู่ชั้นตัวกลางได้ดีกว่าสารกลุ่ม DNAPL ซึ่งอาจมีการเกาะติดบนพื้นผิวชั้นตัวกลาง ส่งผลให้รัศมีช่องว่างรูพรุนชั้นตัวกลางแคบ ทำให้จำเป็นต้องเพิ่มแรงดันคาปิลลารี (กลไกการระบายน้ำ) และลดแรงดันคาปิลลารี (กลไกการเติมน้ำ) มากกว่าสารกลุ่ม LNAPL เมื่อเปรียบเทียบจากค่าความอิ่มตัวด้วยน้ำค่าเดียวกัน เป็นต้น



ภาพที่ 42 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันคาปิลลารีและความอิ่มตัวด้วยน้ำในระบบ DNAPL-น้ำ
-DNAPL-น้ำ

3. การหาความสัมพันธ์ระหว่างความดันคาปิลลารี และความอิ่มตัวด้วยน้ำ ด้วยระบบ DNAPL-LNAPL – น้ำ เมื่อชั้นตัวกลางมีการปนเปื้อนสาร DNAPL ก่อนได้รับการปนเปื้อนด้วยสาร LNAPL

กระบวนการเกิดฮิสเทอรีซิสระหว่างการได้รับแรงดันสาร TCE ก่อนได้รับแรงดันสาร โทลูอิน และน้ำ มีดังนี้

- การทดลองเริ่มต้น ชั้นตัวกลางที่มีความอิ่มตัวด้วยน้ำ 100 %
- การระบายน้ำครั้งที่ 1 โดยใช้แรงดันจากสาร TCE (เกิดการปนเปื้อนสาร TCE ในชั้นตัวกลาง)
- การเติมน้ำเข้าสู่ชั้นตัวกลางครั้งที่ 1
- การระบายน้ำครั้งที่ 2 โดยใช้แรงดันจากสาร โทลูอิน (เกิดการปนเปื้อนแบบผสมในชั้นตัวกลาง)
- การเติมน้ำเข้าสู่ชั้นตัวกลางครั้งที่ 2

ภาพที่ 43 เส้นกราฟการระบายน้ำครั้งที่ 1 โดยใช้แรงดันคาปิลลารีจากสาร TCE ซึ่งเริ่มทำการทดลองจากค่าความอิ่มตัวด้วยน้ำเริ่มต้น 100 % ที่ระดับความดันคาปิลลารี -7.76 เซนติเมตร ในกราฟส่วนโค้งช่วงแรกกล่าวคือช่วงระดับความดันคาปิลลารี -7.76 ถึง 5.32 เซนติเมตร จะพบว่าการระบายน้ำได้ค่อนข้างยาก โดยที่ระดับความดันคาปิลลารี 5.32 เซนติเมตร มีค่าความอิ่มตัวด้วยน้ำเท่ากับ 98.78 % ต่อจากนั้นเมื่อเพิ่มระดับความดันคาปิลลารีมากขึ้น ก็จะมีค่าความอิ่มตัวด้วยน้ำในตัวกลางลดลงมากด้วยเช่นเดียวกัน จนถึงระดับความดันคาปิลลารี 17.27 เซนติเมตร ซึ่งเป็นค่าความดันคาปิลลารีสุดท้ายที่มีความสามารถในการระบายน้ำได้น้อยมาก จะมีค่าความอิ่มตัวด้วยน้ำเท่ากับ 27.75 % และสามารถหาพื้นที่ใต้กราฟการระบายครั้งที่ 1 (A1) ได้เท่ากับ 864.56 เซนติเมตร และหาจุดความดันของสาร TCE เข้าสู่ชั้นตัวกลาง (Entry pressure) เท่ากับ 12.4 เซนติเมตร

ที่เส้นกราฟการเติมน้ำเข้าสู่ตัวกลางครั้งที่ 1 มีค่าความอิ่มตัวด้วยน้ำเริ่มต้น 27.75 % ที่ระดับความดันคาปิลลารีเริ่มต้น 17.27 เซนติเมตร เมื่อทำการลดระดับความดันคาปิลลารี ก็จะเริ่มมีการเติมน้ำเข้าสู่ชั้นตัวกลาง แต่ทุกช่วงระดับความดันคาปิลลารีที่ลดลงการเติมน้ำเข้าสู่ชั้นตัวกลางเป็นไปได้ค่อนข้างยาก อาจเนื่องมาจากการปนเปื้อนของสาร TCE ซึ่งเป็นการเพิ่มความหนืดและแรงตึงระหว่างผิวในของเหลวที่แทรกตัวอยู่ระหว่างชั้นตัวกลางมากขึ้น รวมไปถึงเกิดการเกาะติดกับพื้นผิวเม็ดหินปูนในชั้นตัวกลางมากขึ้น จึงทำให้เกิดการเติมน้ำเข้าสู่ชั้นตัวกลางได้ยาก ซึ่งระดับความดันคาปิลลารี -7.59 เซนติเมตร ซึ่งเป็นระดับความดันสุดท้ายที่มีความสามารถในการเติมน้ำได้น้อยมาก จะมีค่าความอิ่มตัวด้วยน้ำเท่ากับ 59.89 % และสามารถหาพื้นที่ใต้กราฟการเติมน้ำเข้าสู่ชั้นตัวกลางครั้งที่ 1 (A2) ได้เท่ากับ 8.86 เซนติเมตร

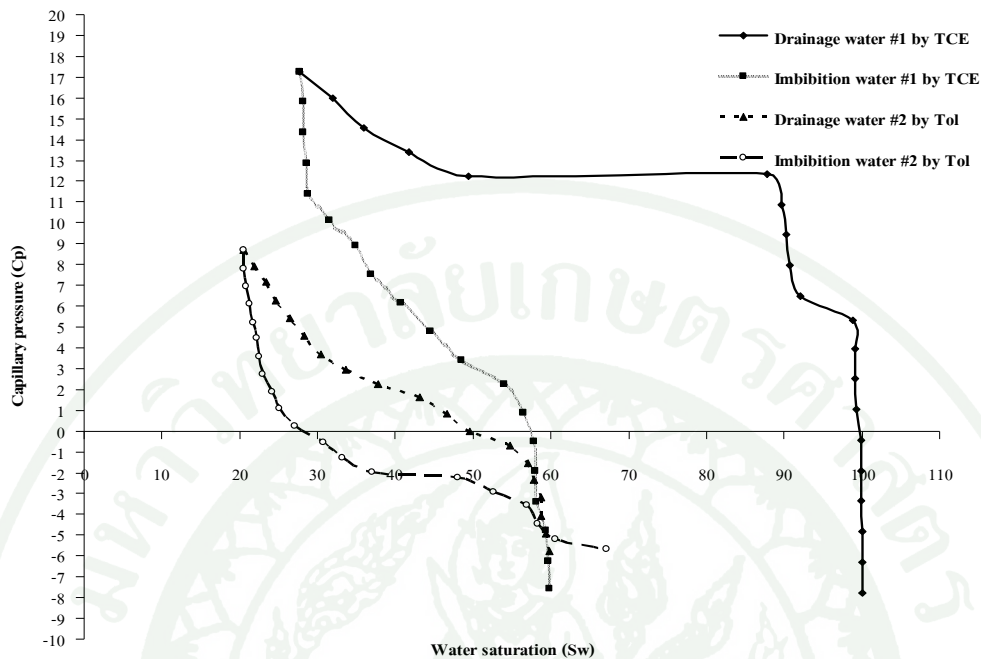
จากกระบวนการระบายน้ำและการเติมน้ำเข้าสู่ชั้นตัวกลางครั้งที่ 1 ได้ค่าดัชนี USBM เท่ากับ 1.99 แสดงว่าตัวกลางมีความสามารถชอบเปียกน้ำอย่างมาก (*strongly water wet*) เมื่อตัวกลางอยู่ในระบบ DNAPL-น้ำ- LNAPL – น้ำ

ที่เส้นกราฟการระบายน้ำครั้งที่ 2 โดยใช้แรงดันจากสารโทลูอิน ทำการทดลองจากค่าความอิ่มตัวด้วยน้ำเริ่มต้น 59.89 % ที่ระดับความดันคาปิลลารีเริ่มต้น -5.80 เซนติเมตร นั้นแสดงว่ามีการตกค้างของสาร TCE ในชั้นตัวกลางเท่ากับ 40.11 % และเมื่อทำการเพิ่มระดับความดันคาปิลลารีมากขึ้นจากการใช้สารโทลูอินดันน้ำออกจากตัวกลาง ส่งผลให้ค่าความอิ่มตัวด้วยน้ำลดลงอย่างมาก โดยค่าความอิ่มตัวด้วยน้ำจะเริ่มลดลงอย่างมากเมื่อมีการเพิ่มค่าระดับความดันคาปิลลารีตั้งแต่ -1.57 เซนติเมตรเป็นต้นไป จนถึงค่าระดับความดันคาปิลลารี 8.69 เซนติเมตร ซึ่งเป็นค่าความดันคาปิลลารี

สุดท้ายที่มีความสามารถในการระบายน้ำได้น้อยมาก และมีค่าความอิ่มตัวด้วยน้ำเท่ากับ 20.51 % และสามารถหาพื้นที่ใต้กราฟการระบายครั้งที่ 2 (A1) ได้เท่ากับ 96.99 เซนติเมตรและหาจุดความดันของสารโทลูอินเข้าสู่ชั้นตัวกลาง (Entry pressure) เท่ากับ 0.8 เซนติเมตร

ที่กราฟส่วนโค้งการเติมน้ำครั้งที่ 2 มีค่าความอิ่มตัวด้วยน้ำเริ่มต้นเท่ากับ 20.51 % และมีค่าระดับความดันคาปิลลารีเริ่มต้นเท่ากับ 8.69 เซนติเมตร เมื่อทำการลดระดับความดันคาปิลลารีลง จะทำให้มีการเติมน้ำเข้าสู่ชั้นตัวกลางได้มากขึ้นเมื่อเทียบกับอัตราการเติมน้ำของสารไตรคลอโรเอทิลีน (เส้นกราฟการเติมน้ำครั้งที่ 1) จนถึงระดับความดันคาปิลลารี -5.66 เซนติเมตร เป็นระดับความดันสุดท้ายที่มีความสามารถในการเติมน้ำได้น้อยมาก และมีค่าความอิ่มตัวด้วยน้ำเท่ากับ 67.22 เซนติเมตร และสามารถหาพื้นที่ใต้กราฟการเติมน้ำเข้าสู่ชั้นตัวกลางครั้งที่ 2 (A2) เท่ากับ 110.45 เซนติเมตร

จากกระบวนการระบายน้ำและการเติมน้ำเข้าสู่ชั้นตัวกลางครั้งที่ 2 ได้ค่าดัชนี *USBM* เท่ากับ -0.06 แสดงว่าตัวกลางมีความสามารถชอบเปียกผสม (*neutral wet*) มากขึ้น เมื่อตัวกลางอยู่ในระบบ DNAPL-น้ำ-LNAPL – น้ำ ซึ่งเส้นกราฟการระบายน้ำครั้งที่ 2 ถือว่าเป็นเส้นกราฟการปนเปื้อนแบบผสมของสาร NAPL ทั้งสองชนิด



ภาพที่ 43 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันคาปิลลารีและความอิ่มตัวด้วยน้ำ ด้วยระบบ DNAPL-น้ำ-LNAPL-น้ำ

4. การหาความสัมพันธ์ระหว่างความดันคาปิลลารี และความอิ่มตัวด้วยน้ำ ด้วยระบบ LNAPL-DNAPL – น้ำ เมื่อชั้นตัวกลางมีการปนเปื้อนสาร LNAPL ก่อนได้รับการปนเปื้อนด้วยสาร DNAPL

กระบวนการเกิดฮิสเทอรีซิสระหว่างการได้รับแรงดันสาร TCE ก่อนได้รับแรงดันสาร โทลูอิน และน้ำ มีดังนี้

- การทดลองเริ่มต้น ชั้นตัวกลางที่มีความอิ่มตัวด้วยน้ำ 100 %
- การระบายน้ำครั้งที่ 1 โดยใช้แรงดันจากสาร โทลูอิน (เกิดการปนเปื้อนสาร TCE ในชั้นตัวกลาง)
- การเติมน้ำเข้าสู่ชั้นตัวกลางครั้งที่ 1
- การระบายน้ำครั้งที่ 2 โดยใช้แรงดันจากสาร TCE (เกิดการปนเปื้อนแบบผสมในชั้นตัวกลาง)
- การเติมน้ำเข้าสู่ชั้นตัวกลางครั้งที่ 2

ภาพที่ 44 เส้นกราฟการระบายน้ำครั้งที่ 1 โดยใช้แรงดันคาปิลลารีจากสารโทลูอิน ซึ่งมีค่าความอิ่มตัวด้วยน้ำเริ่มต้น 100 % ที่ระดับความดันคาปิลลารี -4.60 เซนติเมตร ต่อจากนั้นทำการเพิ่มระดับความดันคาปิลลารีโดยมีการใช้แรงดันจากสารโทลูอิน ส่งผลให้มีการค่าความอิ่มตัวด้วยน้ำลดลงอย่างต่อเนื่องจนถึงระดับความดันคาปิลลารีสุดท้ายที่มีความสามารถในการระบายน้ำออกได้น้อยมากเท่ากับ 8.99 เซนติเมตร และมีค่าความอิ่มตัวด้วยน้ำลดลงเหลืออยู่ในชั้นตัวกลาง 34.52 % และสามารถหาพื้นที่ใต้กราฟการระบายครั้งที่ 1 (A1) ได้เท่ากับ 273.45 เซนติเมตร และหาจุดความดันของสารโทลูอินเข้าสู่ชั้นตัวกลาง (Entry pressure) เท่ากับ 3.9 เซนติเมตร

ที่เส้นกราฟส่วนโค้งการเติมน้ำครั้งที่ 1 ซึ่งมีค่าความอิ่มตัวด้วยน้ำเริ่มต้นเท่ากับ 34.52 % และระดับความดันคาปิลลารี 8.99 เซนติเมตร จากนั้นทำการลดระดับความดันคาปิลลารีลงจนทำให้ค่าความอิ่มตัวด้วยน้ำในชั้นตัวกลางเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง ซึ่งมีการดันสารโทลูอินออกจากชั้นตัวกลางพร้อมกันไปด้วย ณ ระดับความดันคาปิลลารี -4.90 เซนติเมตร ซึ่งเป็นความดันสุดท้ายที่มีความสามารถในการเติมน้ำได้น้อยมาก จะมีค่าความอิ่มตัวสูงสุดเท่ากับ 84.16 % และสามารถหาพื้นที่ใต้กราฟการเติมน้ำเข้าสู่ชั้นตัวกลางครั้งที่ 1 (A2) ได้เท่ากับ 137.73 เซนติเมตร

จากกระบวนการระบายน้ำและการเติมน้ำเข้าสู่ชั้นตัวกลางครั้งที่ 1 ได้ค่าดัชนี USBM เท่ากับ 0.30 แสดงว่าตัวกลางมีความสามารถชอบเปียกผสม (neutral wet) เมื่อตัวกลางอยู่ในระบบ LNAPL -น้ำ-DNAPL- น้ำ

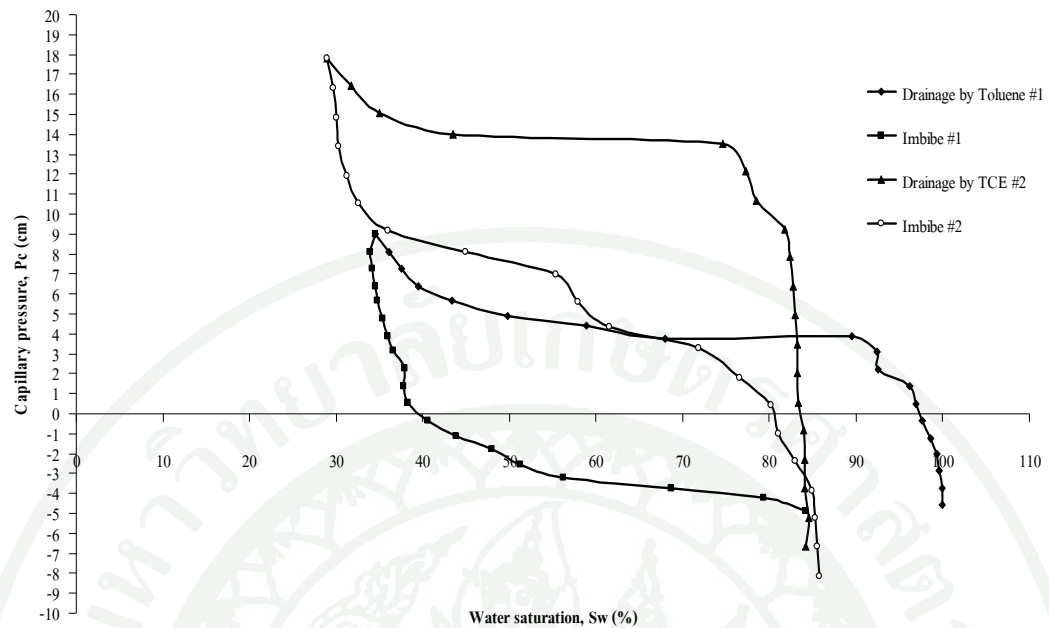
ที่เส้นกราฟระบายน้ำครั้งที่ 2 ซึ่งมีค่าความอิ่มตัวด้วยน้ำเริ่มต้นเท่ากับ 84.16 % ณ ระดับความดันคาปิลลารีเริ่มต้น -6.69 เซนติเมตร นั้นแสดงว่ามีการตกค้างของสารโทลูอินในชั้นตัวกลางเท่ากับ 15.84 % ในขั้นตอนการเติมน้ำขั้นที่ 1 และเมื่อทำการเปลี่ยนสาร NAPL เพื่อใช้ในการระบายน้ำครั้งที่ 2 เป็นสาร TCE เป็นผลทำให้เส้นกราฟเส้นนี้เป็นเส้นที่มีการปนเปื้อนแบบผสมเกิดขึ้น จากนั้นทำการเพิ่มระดับความดันคาปิลลารีมากขึ้น จะทำให้มีค่าความอิ่มตัวด้วยน้ำลดลง แต่ในช่วงกราฟส่วนโค้งช่วงแรกเป็นช่วงที่ระบายน้ำได้ค่อนข้างยาก เนื่องมาจากการที่มีสาร TCE เข้าไปปนเปื้อนของเหลวและแทรกซึมอยู่ในช่องว่างชั้นตัวกลาง เป็นผลให้มีความหนืดและการเกาะติดพื้นผิวชั้นตัวกลางมากขึ้น ดังนั้นกราฟช่วงแรก (ที่ค่าระดับความดันคาปิลลารี เริ่มต้น -6.69 ถึง 9.22 เซนติเมตร) เป็นช่วงที่ยากลำบากในการระบายน้ำ และที่ระดับความดันคาปิลลารี 9.22 เซนติเมตร จะมีค่าความอิ่มตัวด้วยน้ำเท่ากับ 81.81 % ซึ่งถือว่าแทบไม่มีค่าความอิ่มตัวด้วยน้ำลดลง

เลย แต่ในกราฟช่วงที่สองหรือเมื่อมีการเพิ่มค่าระดับความดันคาปิลลารี มากกว่า 9.22 เซนติเมตร ค่าความอิ่มตัวด้วยก็เริ่มมีการลดลงมากขึ้นเรื่อยๆ จนถึงระดับความดันคาปิลลารี 17.77 เซนติเมตร ซึ่งเป็นค่าความดันสุดท้ายที่มีความสามารถในการระบายน้ำได้น้อยมาก และมีค่าความอิ่มตัวด้วยน้ำเหลืออยู่ในชั้นตัวกลางเท่ากับ 28.48 % และสามารถหาพื้นที่ใต้กราฟการระบายครั้งที่ 2 (A1) ได้เท่ากับ 740.28 เซนติเมตรและหาจุดความดันของสาร TCE เข้าสู่ชั้นตัวกลาง (Entry pressure) เท่ากับ 13.5 เซนติเมตร

ที่เส้นกราฟส่วนโค้งการเติมน้ำครั้งที่ 2 มีค่าความอิ่มตัวด้วยน้ำเริ่มต้น 28.48 % ที่ระดับความดันคาปิลลารีเริ่มต้น 17.77 เซนติเมตร ต่อจากนั้นได้ทำการเติมน้ำเข้าสู่ชั้นตัวกลาง พร้อมทั้งมีการผลักดันสาร TCE ออกจากชั้นตัวกลาง จนถึงระดับความดันคาปิลลารี -8.16 เซนติเมตร ซึ่งเป็นค่าระดับความดันสุดท้ายที่มีความสามารถในการเติมน้ำเข้าสู่ชั้นตัวกลางได้น้อยมาก จะมีค่าความอิ่มตัวด้วยน้ำเท่ากับ 85.78 % และสามารถหาพื้นที่ใต้กราฟการเติมน้ำเข้าสู่ชั้นตัวกลางครั้งที่ 2 (A2) เท่ากับ 14.47 เซนติเมตร

จากกระบวนการระบายน้ำและการเติมน้ำเข้าสู่ชั้นตัวกลางครั้งที่ 2 ได้ค่าดัชนี USBM เท่ากับ 1.71 แสดงว่าตัวกลางมีความสามารถชอบเปียกน้ำอย่างมาก (*Strongly water wet*) และมีความสามารถชอบเปียกน้ำเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับวงจรฮีสเทอรีซิสเดิมในระบบ LNAPL -น้ำ-DNAPL-น้ำ ซึ่งเส้นกราฟการระบายน้ำครั้งที่ 2 ถือว่าเป็นเส้นกราฟการปนเปื้อนแบบผสมของสาร NAPL ทั้งสองชนิด

ผลการทดลองส่วนโค้งฮีสเทอรีซิสของสาร NAPL ผสม พบว่าเมื่อชั้นตัวกลางมีการปนเปื้อนด้วยสาร TCE มากขึ้น จะส่งผลให้มีการเติมน้ำและการระบายน้ำในชั้นตัวกลางได้ค่อนข้างยากเมื่อเปรียบเทียบกับชั้นตัวกลางที่มีการปนเปื้อนสารโทลูอิน เนื่องจากความหนืดของของเหลวในชั้นตัวกลางที่เพิ่มขึ้น รวมไปถึงการเกาะติดบนพื้นผิวชั้นตัวกลางหินปูนมากนั่นเอง ดังแสดงในภาพที่ 43 และภาพที่ 44



ภาพที่ 44 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันคาปิลลารี และความอิ่มตัวด้วยน้ำ ด้วยระบบ LNAPL-น้ำ-DNAPL – น้ำ

จากผลการทดลองหาความสัมพันธ์แรงดันคาปิลลารีและความอิ่มตัวด้วยน้ำทั้ง 4 รูปแบบสามารถสรุปรายละเอียดพารามิเตอร์ต่างๆลงในตารางที่ 8

ตารางที่ 8 สรุปผลการทดลองความสัมพัทธ์ความดันคาปิลลารีและความอิ่มตัวด้วยน้ำ 4 รูปแบบการทดลอง

พารามิเตอร์ / รูปแบบการทดลอง	รูปแบบที่ 1 (LNAPL-น้ำ-LNAPL-น้ำ)	รูปแบบที่ 2 (DNAPL-น้ำ-DNAPL-น้ำ)	รูปแบบที่ 3 (LNAPL-น้ำ-DNAPL-น้ำ)	รูปแบบที่ 4 (DNAPL-น้ำ-LNAPL-น้ำ)
1.) 1 st entry pressure	2.0 cm	21.9 cm	3.9 cm	12.4 cm
2.) 2 nd entry pressure	1.2 cm	5.5 cm	13.5 cm	0.8 cm
3.) 1 st residual water saturation	46.00 %	65.32 %	34.00 %	27.75 %
4.) 2 nd residual water saturation	44.90 %	73.29 %	29.00 %	20.51 %
5.) 1 st drainage (A1)	260.74 cm	782.57 cm	273.45 cm	864.56 cm
6.) 1 st imbibition (A2)	199.92 cm	52.46 cm	137.73 cm	8.86 cm
7.) 2 nd drainage (A1)	195.94 cm	477.09 cm	740.28 cm	96.99 cm
8.) 2 nd imbibition (A2)	116.92 cm	13.64 cm	14.47 cm	110.45 cm

ตารางที่ 8 (ต่อ)

พารามิเตอร์ / รูปแบบการทดลอง	รูปแบบที่ 1 (LNAPL-น้ำ-LNAPL-น้ำ)	รูปแบบที่ 2 (DNAPL-น้ำ-DNAPL-น้ำ)	รูปแบบที่ 3 (LNAPL-น้ำ-DNAPL-น้ำ)	รูปแบบที่ 4 (DNAPL-น้ำ-LNAPL-น้ำ)
9.) 1 st USBM index	0.12	1.17	0.30	1.99
wettability ใน cycle ที่ 1	(neutral wet)	(strongly water wet)	(neutral wet)	(strongly water wet)
10.) 2 nd USBM index	0.22	1.54	1.71	-0.06
wettability ใน cycle ที่ 2	(neutral wet)	(strongly water wet)	(strongly water wet)	(neutral wet)

การทดลองหาความสามารถเปียกได้โดยใช้การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความดันคาปิลลารี กับความอึดตัวด้วยน้ำ เปรียบเทียบกับการทดลองของ กษม (2552) โดยทำการวิเคราะห์เปรียบเทียบดัชนีชี้วัดความสามารถเปียกได้แบบ USBM ได้ผลสรุปดังตารางที่ 9

ตารางที่ 9 ดัชนีบ่งชี้ความสามารถเปียกได้แบบ USBM ในชั้นตัวกลางทราย (กษม, 2552) และ หินปูนโดยคำนวณจากความสัมพันธ์ระหว่างความดันคาปิลลารีและความอึดตัวด้วยน้ำ

เงื่อนไขระบบการทดลอง	USBM index, กษม (2552)	USBM index
1. ความดันคาปิลลารีในชั้นตัวกลางที่อึดตัวด้วยน้ำ และสาร โทลูอิน	1.36	-0.01
2. ความดันคาปิลลารีในชั้นตัวกลางที่อึดตัวด้วยน้ำ และสาร TCE	0.395	0.83
3. ความดันคาปิลลารีในชั้นตัวกลางที่อึดตัวด้วยน้ำ โดยได้รับแรงดันที่เกิดการปนเปื้อนด้วยสาร TCE ก่อนได้รับแรงดันที่เกิดการปนเปื้อนด้วยสาร โทลูอิน	0.50	0.74
4. ความดันคาปิลลารีในชั้นตัวกลางที่อึดตัวด้วยน้ำ โดยได้รับแรงดันที่เกิดการปนเปื้อนด้วยสาร โทลูอิน ก่อนได้รับแรงดันที่เกิดการปนเปื้อนด้วย TCE	-1.63	1.04

เมื่อทำการวิเคราะห์ผลการทดลองในระบบชั้นตัวกลางเดียวกัน ซึ่งมีการได้รับการปนเปื้อนสาร NAPL ต่างกัน กล่าวคือ มีการปนเปื้อนของสาร NAPL เพียงชนิดเดียวและมีการปนเปื้อนของสาร NAPL แบบผสม พบว่าค่าดัชนี USBM ซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวบ่งชี้ความสามารถในการเปียกของสารในชั้นตัวกลาง กล่าวคือถ้าค่าดัชนี USBM มีค่ามากกว่า 0 จนเข้าใกล้ค่า 1 สามารถบ่งชี้ได้ว่าพื้นผิวของชั้นตัวกลางชนิดนั้นชอบเปียกด้วยน้ำ (water wetting) ขณะที่ค่าดัชนี USBM มีค่าเข้าใกล้ค่า 0 สามารถบ่งชี้ได้ว่าพื้นผิวของชั้นตัวกลางนั้นชอบเปียกผสม (Neutral wetting) หรือชอบเปียกแบบสัดส่วน (Fractional wetting) แต่ถ้าค่าดัชนี USBM มีค่าเข้าใกล้ -1 สามารถบ่งชี้ได้ว่าพื้นผิวของชั้นตัวกลางนั้นชอบเปียกด้วยน้ำมัน (Oil wetting) (L.M. Miriam, 2005 and Anderson W.G, 1986)

จากผลการทดลองค่าดัชนี USBM ในชั้นตัวกลางหินปูนที่มีการปนเปื้อนของสารโทลูอินเพียงชนิดเดียวมีค่าดัชนี USBM เท่ากับ -0.01 ซึ่งสามารถบ่งชี้ได้ว่าพื้นผิวในชั้นตัวกลางหินปูนเงื่อนไขนี้ชอบเปียกแบบผสม ซึ่งเมื่อทำการเปรียบเทียบค่าดัชนี USBM ในชั้นตัวกลางที่มีการปนเปื้อนสาร NAPL แบบผสมในเงื่อนไขการทดลองที่ 3 ซึ่งมีค่าดัชนี USBM เท่ากับ 0.74 บ่งชี้ว่าพื้นผิวหินปูนมีความสามารถเปียกน้ำได้มากขึ้น ดังนั้นบ่งชี้ได้ว่าเมื่อชั้นตัวกลางมีการปนเปื้อนสาร NAPL แบบผสมจะทำให้ชั้นตัวกลางมีความสามารถเปียกน้ำได้มากกว่าชั้นตัวกลางที่มีการปนเปื้อนด้วยสาร NAPL เพียงชนิดเดียว ซึ่งมีความสอดคล้องกันกับผลการทดลองค่าดัชนี USBM ในชั้นตัวกลางที่มีการปนเปื้อนด้วยสารไตรคลอโรเอธิลีนเพียงชนิดเดียว ซึ่งมีค่าดัชนี USBM เท่ากับ 0.83 สามารถบ่งชี้ได้ว่าพื้นผิวชั้นตัวกลางชอบเปียกด้วยน้ำ และเมื่อทำการเปรียบเทียบกับผลการทดลองค่าดัชนี USBM ในชั้นตัวกลางที่มีการปนเปื้อนสาร NAPL แบบผสมในเงื่อนไขการทดลองที่ 4 ซึ่งมีค่าดัชนี USBM เท่ากับ 1.04 พบว่าพื้นผิวมีความสามารถชอบเปียกน้ำได้มากขึ้น

เมื่อทำการเปรียบเทียบกับผลการทดลองค่าดัชนี USBM ของพื้นผิวชั้นตัวกลางทรายออกตาวา (Ottawa sand) (กษม, 2552) ที่มีการปนเปื้อนสาร NAPL เพียงชนิดเดียว ได้แก่ สารโทลูอินและสารไตรคลอโรเอธิลีน พบว่าในรูปแบบการปนเปื้อนสารโทลูอินเพียงชนิดเดียว ค่าดัชนี USBM ในชั้นตัวกลางหินปูนมีค่าน้อยกว่าค่าดัชนี USBM ในชั้นตัวกลางทรายออกตาวา ซึ่งมีค่าดัชนี USBM เท่ากับ 1.36 ทำให้สามารถชี้วัดได้ว่ามีพื้นผิวทรายออกตาวามีความสามารถชอบเปียกน้ำอย่างมาก (Strongly water wet) ขณะที่พื้นผิวชั้นตัวกลางหินปูนมีความสามารถชอบเปียกแบบผสมหรือแบบสัดส่วนมากกว่า ส่วนในเงื่อนไขการปนเปื้อนสาร TCE เพียงชนิดเดียว ค่าดัชนี USBM ในชั้นตัวกลางหินปูนมีค่ามากกว่าค่าดัชนีคาปิลลารีในชั้นตัวกลางทรายออกตาวา ดังนั้นสามารถชี้วัดได้ว่าในชั้นตัวกลางหินปูนที่มีการปนเปื้อนด้วยสาร TCE เพียงชนิดเดียวจะมีความสามารถชอบเปียกน้ำมากกว่าชั้นตัวกลางทรายออกตาวาที่มีการปนเปื้อนด้วยสาร TCE เพียงชนิดเดียว ซึ่งมีค่าดัชนี USBM เท่ากับ 0.395 โดยสามารถชี้วัดถึงแนวโน้มที่มีการชอบเปียกแบบผสม (neutral wet) มากกว่าความสามารถชอบเปียกด้วยน้ำ เป็นต้น

ส่วนผลการทดลองหาค่าดัชนี USBM ทั้ง 2 ชั้นตัวกลางที่มีการปนเปื้อนแบบผสม นั่นคือชั้นตัวกลางหินปูนและชั้นตัวกลางทรายออกตาวา จะใช้การเปรียบเทียบความชันในเส้นกราฟการระบายน้ำครั้งที่ 2 เป็นหลัก เนื่องจากวิธีการทดลองที่คลาดเคลื่อนจนไม่สามารถจะเปรียบเทียบค่าดัชนี USBM ได้โดยตรง ดังนั้นจึงทำการพิจารณาเส้นกราฟการปนเปื้อนในชั้นตัวกลางแบบผสม ซึ่งก็คือเส้นกราฟการระบายน้ำครั้งที่ 2 เมื่อทำการพิจารณาเส้นกราฟความดันคาปิลลารีเทียบกับค่า

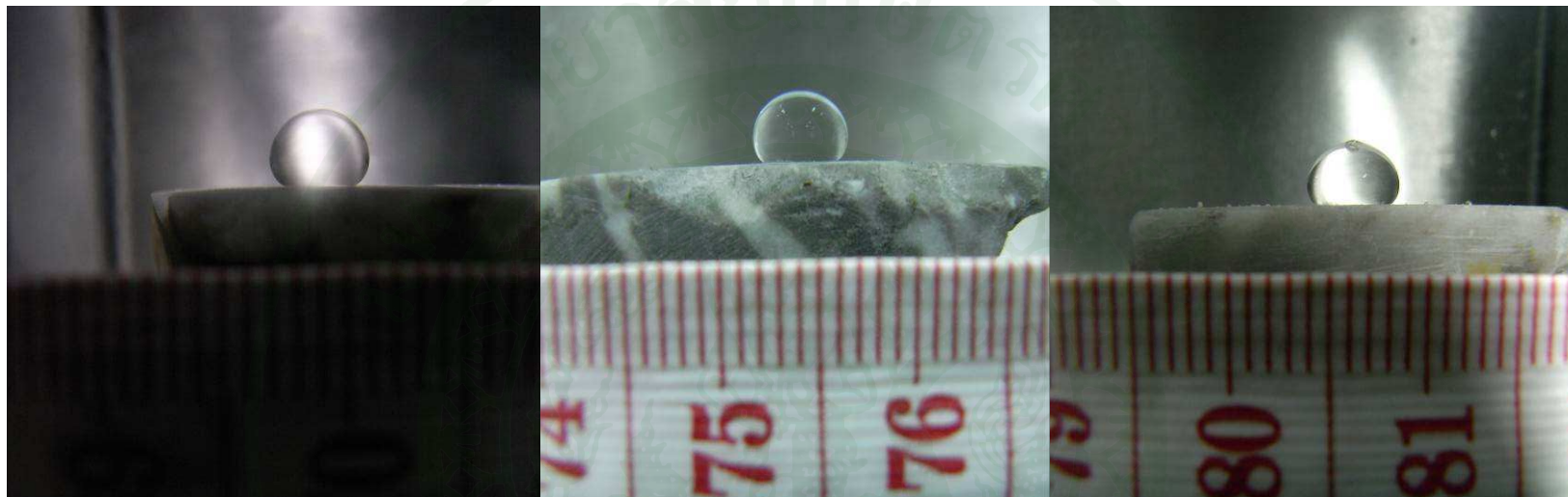
ความอิ่มตัวด้วยน้ำ ในชั้นตัวกลางที่มีการปนเปื้อนแบบผสมทั้ง 2 ตัวกลาง ที่มีสาร LNAPL ตกค้าง ในชั้นตัวกลางก่อนได้รับแรงดันจากสาร DNAPL หรือรูปแบบการทดลองที่ 4 จะพบว่าช่วงความชันเส้นกราฟช่วงแรกทั้งสองชั้นตัวกลางมีแนวโน้มไปในแนวทางเดียวกัน (เอียงขนานไปตามแกน Y) กล่าวคือมีความสามารถในการระบายน้ำได้ค่อนข้างยาก แต่หลังจากนั้นก็เริ่มมีการระบายน้ำได้ดีขึ้นเมื่อเพิ่มระดับความดันคาปิลลารีมากขึ้น ขณะที่ชั้นตัวกลางที่มีการปนเปื้อนแบบผสมที่มีสาร DNAPL ตกค้างในชั้นตัวกลางก่อนได้รับแรงดันจากสาร LNAPL หรือรูปแบบการทดลองที่ 3 จะพบว่า ตลอดช่วงความชันของเส้นกราฟการระบายน้ำครั้งที่ 2 ทั้งสองชั้นตัวกลางเป็นไปในทำนองเดียวกัน กล่าวคือ ความชันตลอดช่วงเส้นกราฟส่วนโค้งจะลาดเอียงไปตามแนวแกนความอิ่มตัวด้วยน้ำ (แกน X) นั้นแสดงให้เห็นว่ามีความสามารถในการระบายน้ำได้ดีกว่า ชั้นตัวกลางที่มีการปนเปื้อนแบบผสม โดยมีสาร LNAPL ตกค้างในชั้นตัวกลางก่อนได้รับแรงดันจากสาร DNAPL หรือเงื่อนไขแผนการทดลองที่ 4 เป็นต้น

มีการรายงานความสามารถเปียกได้บนพื้นผิวต่างๆคือ พื้นผิวที่ธาตุน้ำมันเป็นส่วนประกอบหลักเช่น ถ่าน แกรไฟต์ เป็นต้น พื้นผิวที่มีองค์ประกอบของธาตุซิลเฟอร์เป็นองค์ประกอบหลัก พื้นผิวทัลค์ พื้นผิวทัลค์ที่มีลักษณะคล้ายซิลิเกต จะมีช่วงความความสามารถชอบเปียกแบบผสมหรือแบบสัดส่วนถึงการชอบเปียกด้วยน้ำมัน ในทางตรงกันข้ามพื้นผิววัสดุทั่วไปในชั้นหินกักก้นน้ำ เช่น แร่ควอตซ์ สารประกอบคาร์บอเนต และสารประกอบซิลเฟต จะมีความชอบเปียกน้ำอย่างมาก (W.G. Anderson, 1987)

ผลและวิจารณ์การทดลองส่วนที่ 3 การทดลองวัดมุมสัมพัทธ์ระหว่างสาร DNAPL บนพื้นผิวหินปูน ภายใต้ระบบสาร NAPL ปนเปื้อนเพียงชนิดเดียว ซึ่งล้อมรอบด้วยน้ำใต้ดินจำลอง และระบบสาร NAPL ปนเปื้อนแบบผสม ซึ่งล้อมรอบด้วยสารละลายโทลูอินที่มีปริมาณมากกว่าค่าความสามารถละลายได้สูงสุด

1. การทดลองการวัดมุมสัมพัทธ์ระหว่างหยดสาร TCE บนพื้นผิวหินปูนภายใต้ระบบสาร NAPL ปนเปื้อนเพียงชนิดเดียว ซึ่งล้อมรอบด้วยน้ำใต้ดินจำลอง

การทดลองการวัดมุมสัมพัทธ์จากการถ่ายภาพแบบมาโคร (Macro photography) ของหยดสาร DNAPL ที่ปนเปื้อนเกาะติดบนพื้นผิวหินปูน ซึ่งล้อมรอบด้วยน้ำใต้ดินจำลอง จะปรากฏภาพถ่ายดังแสดงในภาพที่ 45 ซึ่งเป็นภาพถ่ายของหยดสาร TCE เริ่มต้นเกาะติดบนพื้นผิวหินปูน โดยทำการทดลอง 3 ฐาน หลังจากนั้นทำการบันทึกภาพของหยดสาร TCE ที่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลาโดยทำการถ่ายภาพทุก 1 ชั่วโมง เป็นเวลา 16 ชั่วโมงของวันที่ 1 และทำการถ่ายภาพหยดสาร TCE บนพื้นผิวหินปูนต่อเนื่องทุกวันจนกระทั่งหยดสาร TCE มีมวลลดน้อยลงและมีค่ามุมสัมพัทธ์ค่อนข้างคงที่ สาเหตุมวลสาร TCE ลดลงเกิดจากการถ่ายเทมวลสารกับขอบเขตการติดต่อโดยรอบในระบบกล่าวคือ มีการถ่ายเทมวลสารเข้าสู่ น้ำใต้ดินจำลองและแทรกซึมตามรูพรุนของพื้นผิวหินปูน รวมไปถึงการถ่ายเทออกชั้นอากาศภายในเซลล์และนอกเซลล์วัดมุมสัมพัทธ์ การทดลองนี้มีระยะเวลาทำการทดลองในแต่ละฐานไม่เท่ากันเนื่องจากสภาพพื้นผิวหินปูนที่มีลักษณะความพรุน ความขรุขระไม่เท่ากัน ซึ่งเกิดจากการขุดผิวด้วยเครื่องมืออย่างง่าย แต่ทั้งนี้ทั้งนั้นสามารถอ้างอิงได้ว่าจากพื้นผิวหินปูนในชั้นใต้ดินสภาพจริง ก็ย่อมต้องมีพื้นผิวหินปูนในแต่ละแห่งแตกต่างกัน จากผลการทดลองเทียบกับระยะเวลาการทดลอง พบว่าในฐานที่ 1 ใช้เวลาทำการทดลอง 14 วัน โดยวันที่ 14 มีมวลสารเหลือน้อยมาก ในฐานที่ 2 ใช้เวลาทำการทดลอง 16 วัน โดยวันที่ 16 มีมวลสารเหลือน้อยมาก และในฐานที่ 3 ใช้เวลาทำการทดลอง 19 วัน โดยวันที่ 19 มีมวลสารเหลือน้อยมาก ซึ่งฐานที่ 1 ได้ทำการแสดงภาพการทดลองมุมสัมพัทธ์ที่เปลี่ยนแปลงไปตามระยะเวลาในภาพที่ 46 ฐานที่ 2 ได้ทำการแสดงภาพการทดลองมุมสัมพัทธ์ที่เปลี่ยนแปลงไปตามระยะเวลาในภาพที่ 47 และฐานที่ 3 ได้ทำการแสดงภาพการทดลองมุมสัมพัทธ์ที่เปลี่ยนแปลงไปตามระยะเวลาในภาพที่ 48 ตามลำดับ

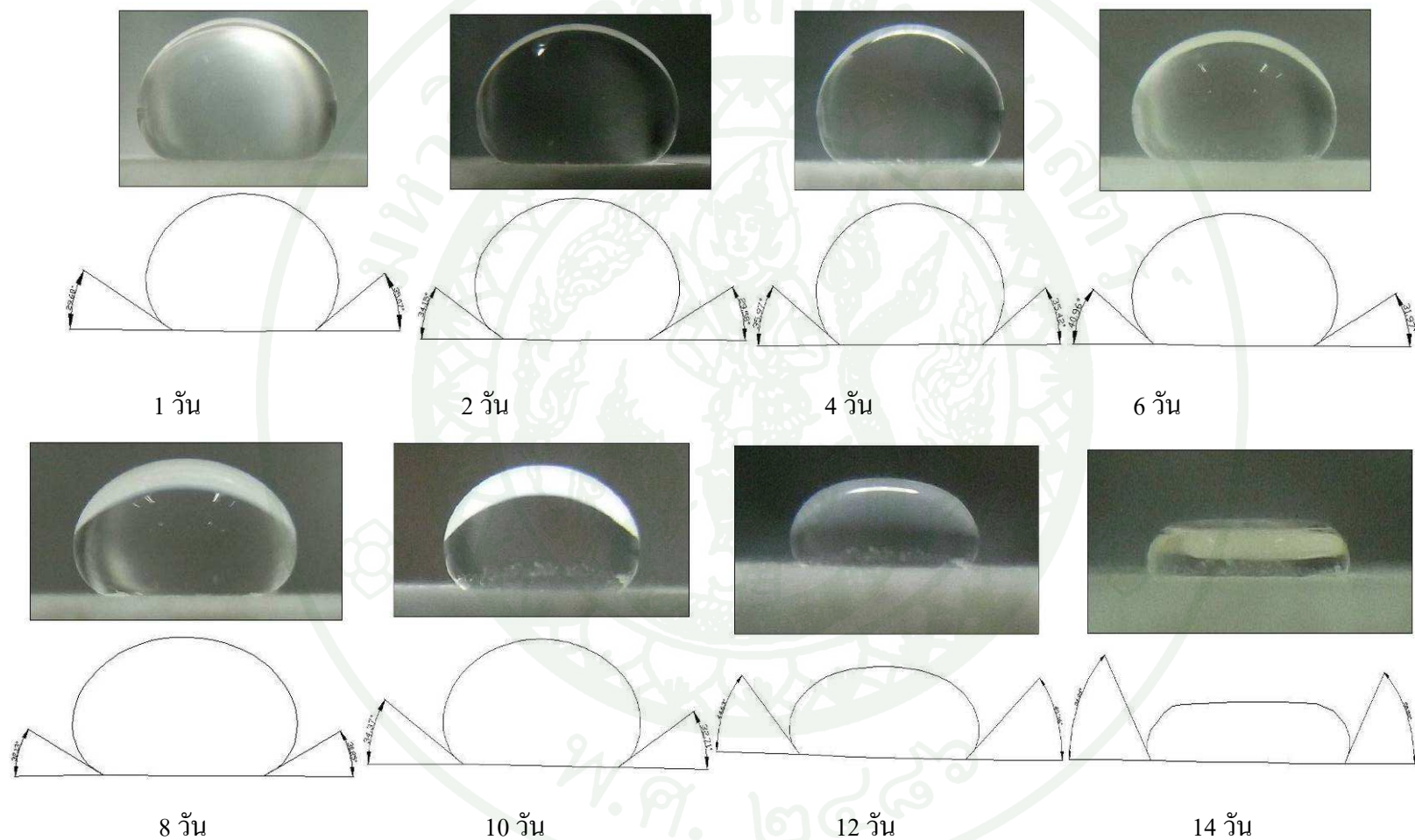


ฐาน 1

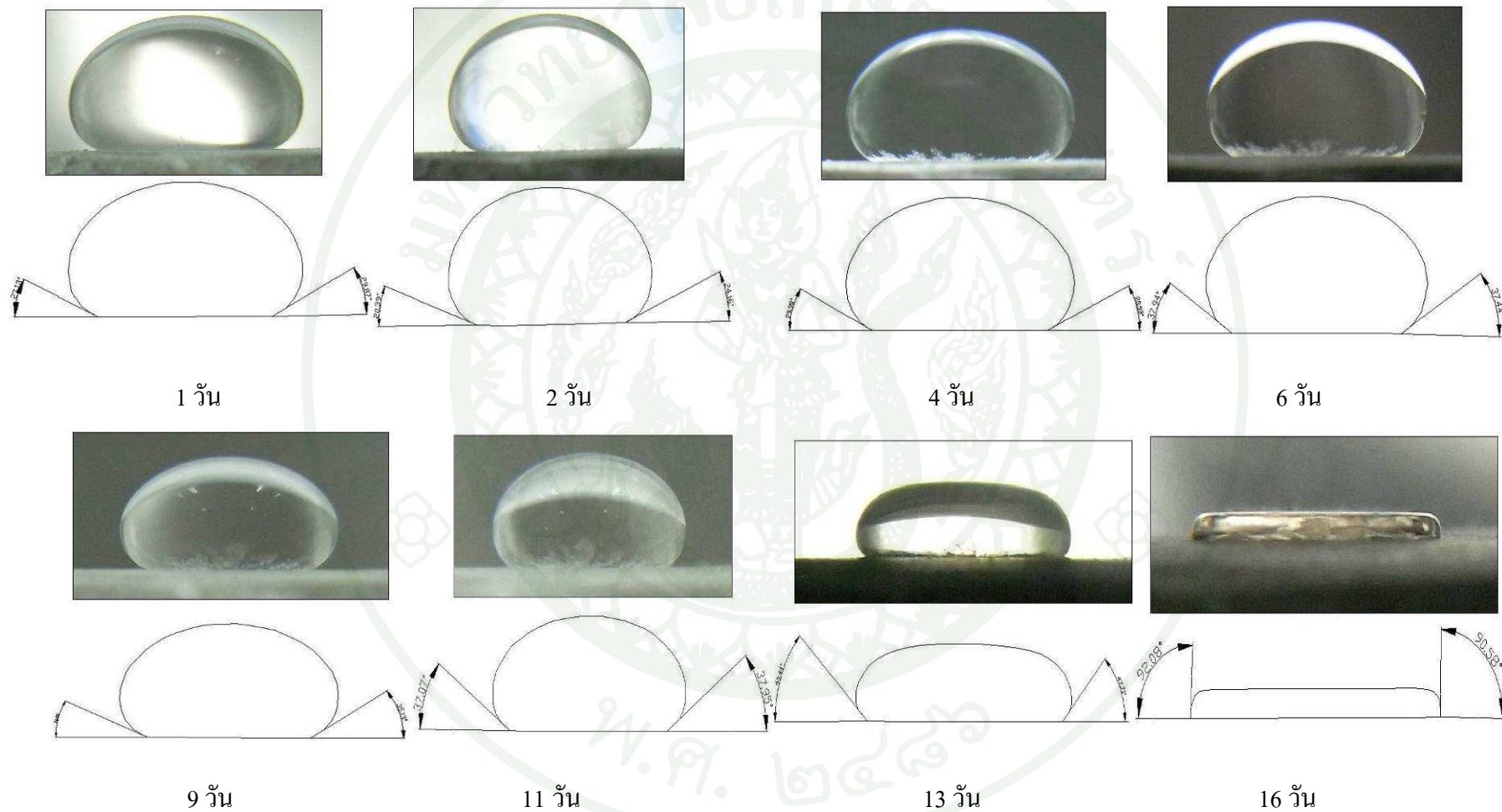
ฐาน 2

ฐาน 3

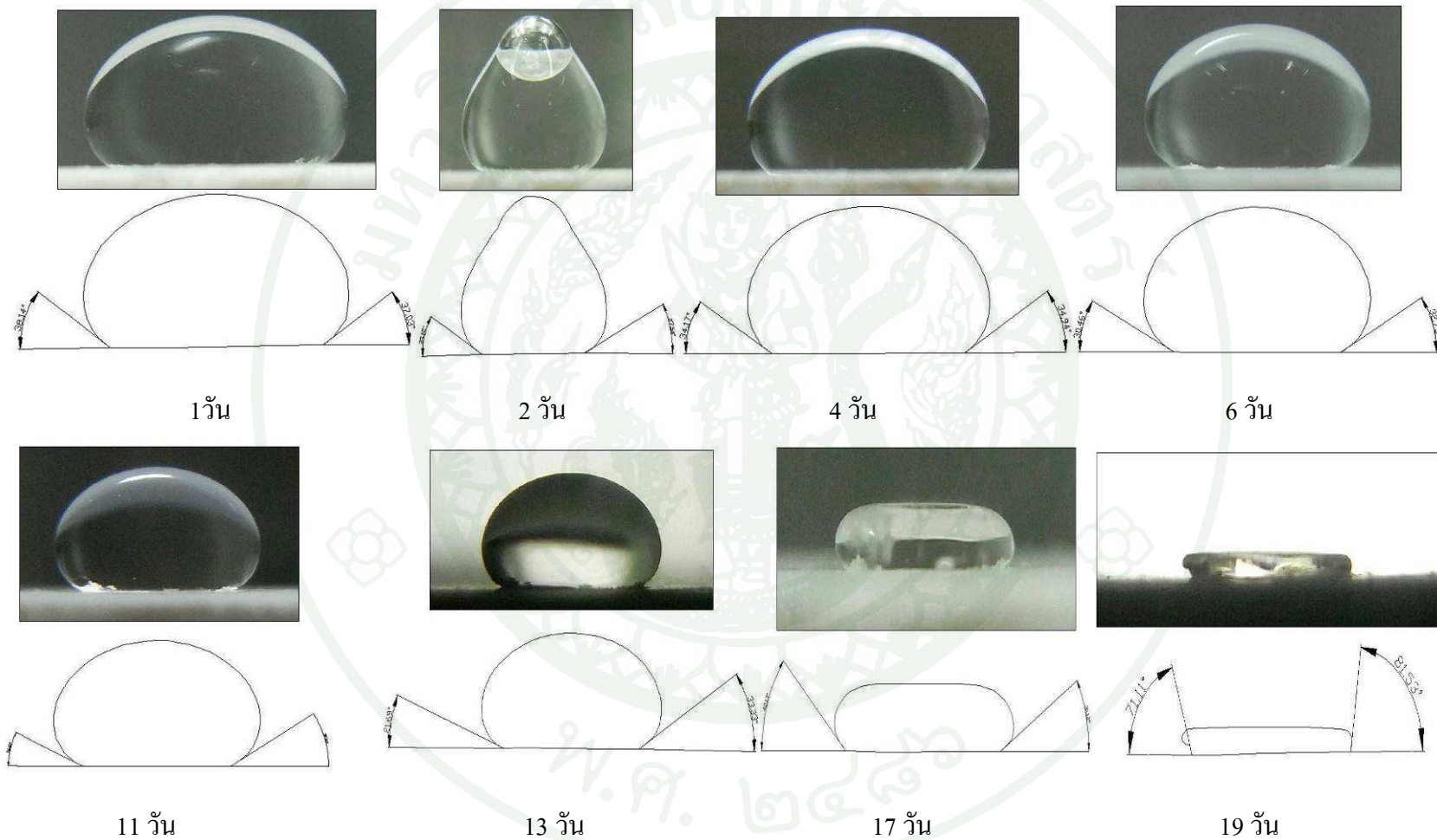
ภาพที่ 45 การทดลองวัดมุมสัมผัสเริ่มต้น ณ เวลาชั่วโมงที่ 0 ของหยด TCE บนพื้นผิวหินปูน ซึ่งล้อมรอบด้วยน้ำใต้ดินจำลอง ทั้ง 3 ฐาน



ภาพที่ 46 การทดลองวัดมุมสัมผัสที่เวลาต่าง ๆ กัน ของหยด TCE บนพื้นผิวหิโนปุน ซึ่งล้อมรอบด้วยน้ำใต้ดินจำลอง ฐาน 1

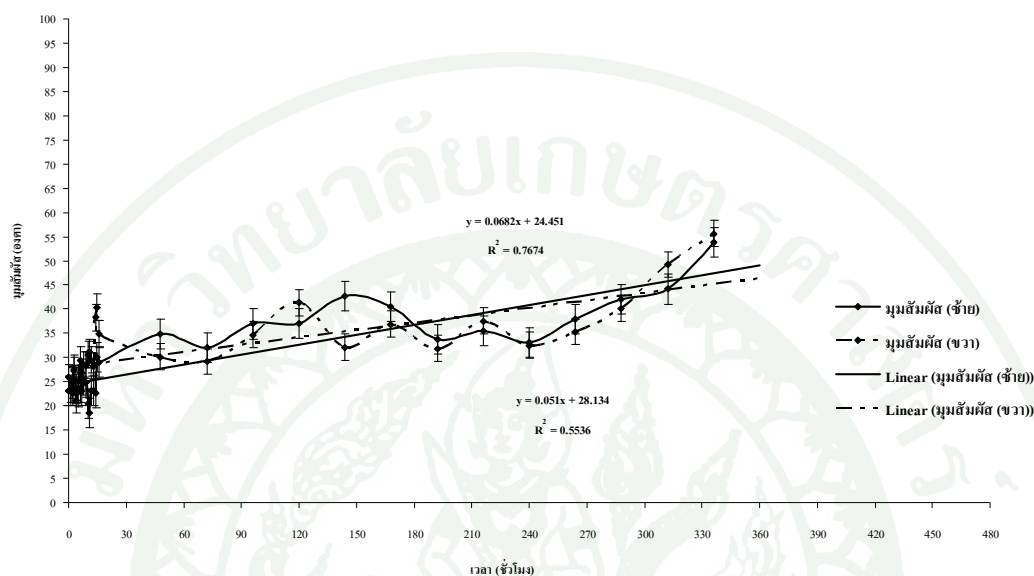


ภาพที่ 47 การทดลองวัดมุมสัมผัสที่เวลาต่าง ๆ กัน ของหยด TCE บนพื้นผิวหินปูน ซึ่งล้อมรอบด้วยน้ำใต้ดินจำลอง ฐาน 2

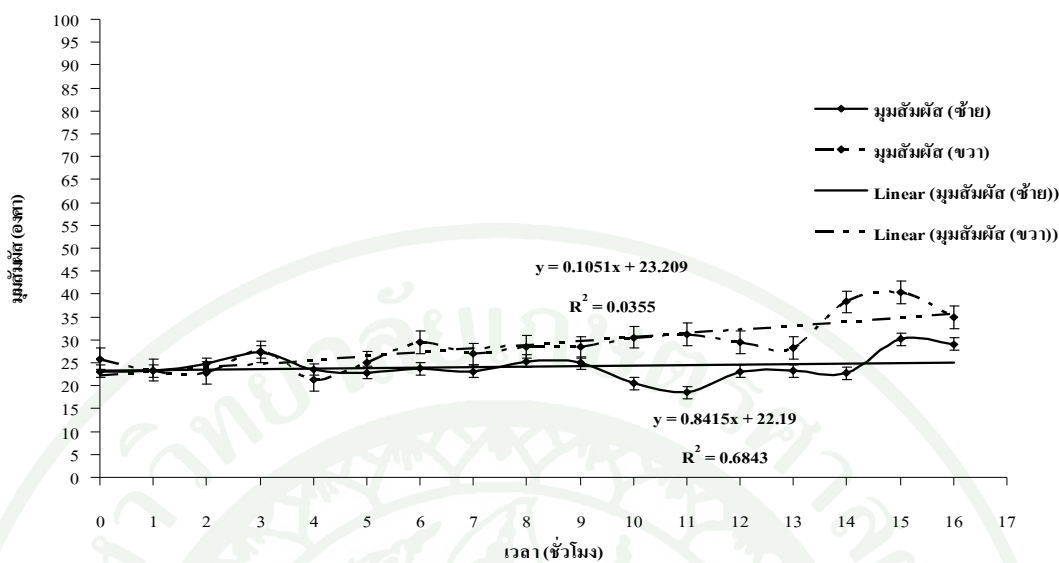


ภาพที่ 48 การทดลองวัดมุมสัมผัสที่เวลาต่าง ๆ กัน ของหยด TCE บนพื้นผิวหินปูน ซึ่งล้อมรอบด้วยน้ำใต้ดินจำลอง ฐาน 3

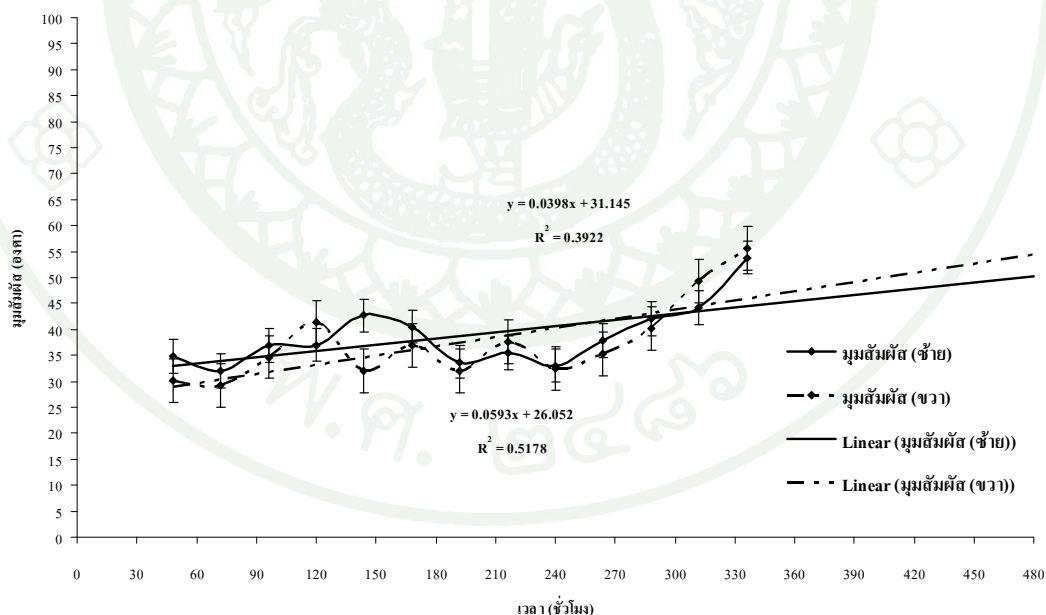
เมื่อทำการพล็อตกราฟระหว่างมุมสัมผัสของหยดสาร TCE บนพื้นผิวหินปูนที่เปลี่ยนแปลงไปเทียบกับทุกช่วงเวลาทำการทดลองซึ่งล้อมรอบด้วยน้ำใต้ดินจำลอง แสดงในภาพที่ 49



ภาพที่ 49 กราฟแสดงการหามุมสัมผัสของหยดสาร DNAPL ที่กระทำบนพื้นผิวหินปูนและมีน้ำล้อมรอบเทียบกับการเปลี่ยนแปลงทุกช่วงเวลาในฐานที่ 1



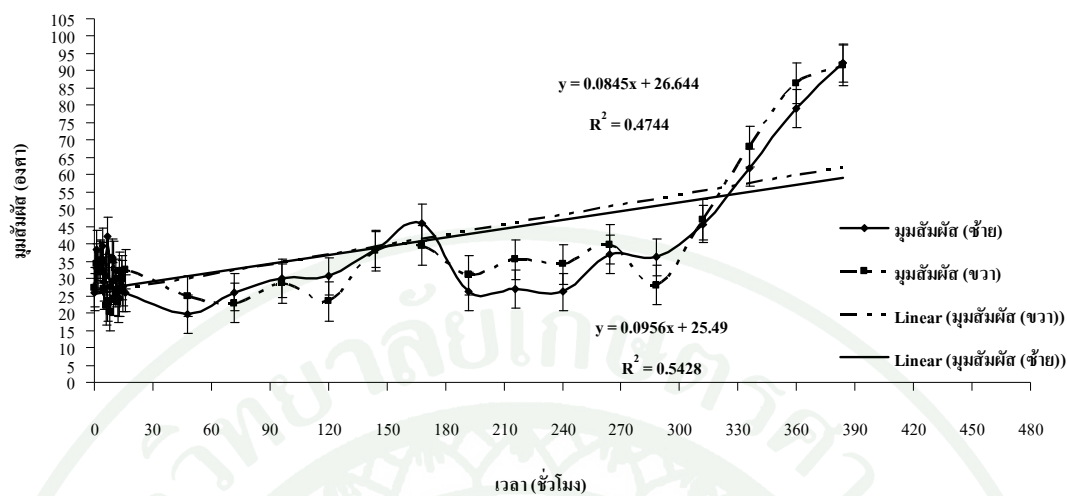
ภาพที่ 50 กราฟแสดงการหามุมสัมพัทธ์สหายสาร DNAPL ที่กระทำบนพื้นผิวหินปูนและมีน้ำล้อมรอบเทียบกับเวลา 16 ชั่วโมงในฐานะที่ 1



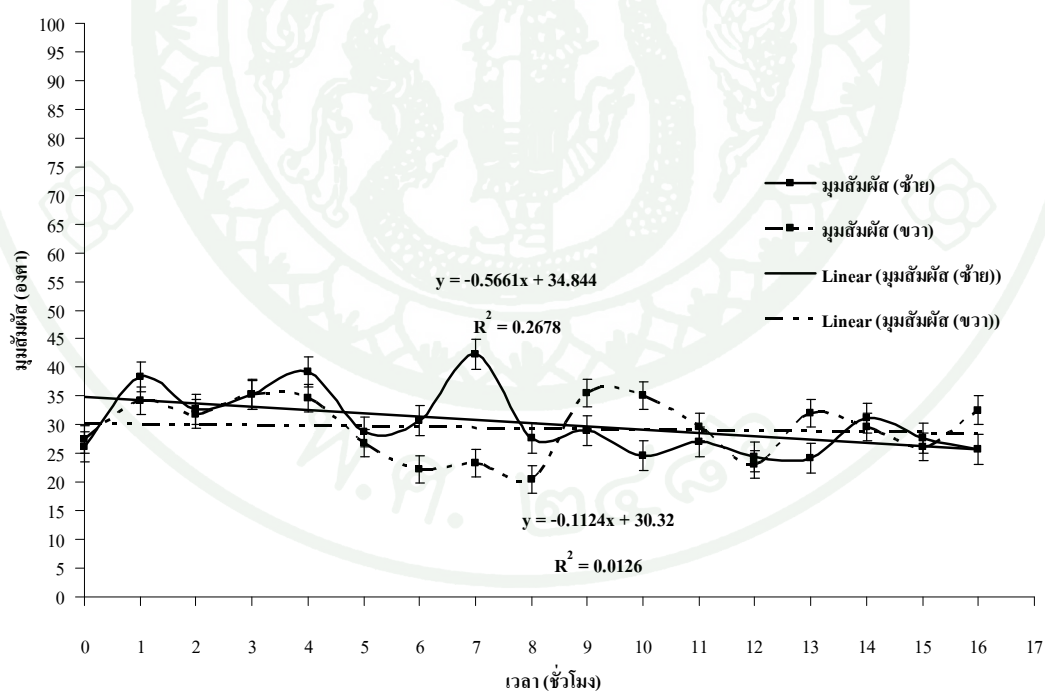
ภาพที่ 51 กราฟแสดงการหามุมสัมพัทธ์สหายสาร DNAPL ที่กระทำบนพื้นผิวหินปูนและมีน้ำล้อมรอบเทียบกับเวลาหลังจากผ่านไป 16 ชั่วโมงแรกจนเสร็จสิ้นการทดลองในฐานะที่ 1

จากผลการทดลองในการวัดมุมสัมพัทธ์ของหยดสาร TCE บนพื้นผิวหินปูน โดยมีการล้อมรอบด้วยน้ำใต้ดินจำลองฐานที่ 1 ดังแสดงกราฟการวัดมุมสัมพัทธ์บนพื้นผิวหินปูนโดยรวมในภาพที่ 49 และพบว่า ณ ภาพถ่ายชั่วโมงแรกของการเริ่มสัมพัทธ์ของหยดสาร TCE จะทำมุมแหลมกับพื้นผิวหินปูน และมีค่ามุมสัมพัทธ์ด้านซ้ายเท่ากับ 23.14 องศา ขณะที่ค่ามุมสัมพัทธ์ด้านขวาเริ่มต้นมีค่าเท่ากับ 25.84 องศา ซึ่งมีค่ามุมสัมพัทธ์ชี้วัดถึงความสามารถชอบเปียกน้ำอย่างมาก (strongly water wet) ในช่วงเริ่มต้น เมื่อเวลาผ่านไป ณ ช่วงเวลา 16 ชั่วโมงแรกในภาพที่ 50 หยดสาร TCE บนพื้นผิวหินปูนยังคงมีมุมสัมพัทธ์เปลี่ยนแปลงน้อยมากโดยมีค่ามุมสัมพัทธ์ ณ เวลา ชั่วโมงที่ 16 มีค่ามุมสัมพัทธ์ด้านซ้าย 29.05 องศา และมีค่ามุมสัมพัทธ์ด้านขวา 34.93 องศา ซึ่งเมื่อทำการหาค่าความชันในกราฟช่วงนี้จะมีค่าน้อยกว่า 1 จากนั้นเมื่อทำการถ่ายภาพหยดสาร TCE ทุกวันจนเสร็จสิ้นการทดลองในฐานนี้ ดังแสดงในภาพที่ 51 ก็ยังคงมีแนวโน้มผลการทดลองเช่นเดิม นั่นคือ มีการเปลี่ยนแปลงของมุมสัมพัทธ์ทั้งสองด้านน้อยมาก จากภาพถ่าย ณ เวลา ชั่วโมงที่ 336 จะมีค่ามุมสัมพัทธ์ด้านซ้ายเท่ากับ 53.85 องศา ขณะที่ค่ามุมสัมพัทธ์ทางด้านขวาเท่ากับ 55.66 องศา สามารถชี้วัดได้ว่าพื้นผิวหินปูนมีความสามารถชอบเปียกน้ำได้น้อยลง (water wet)

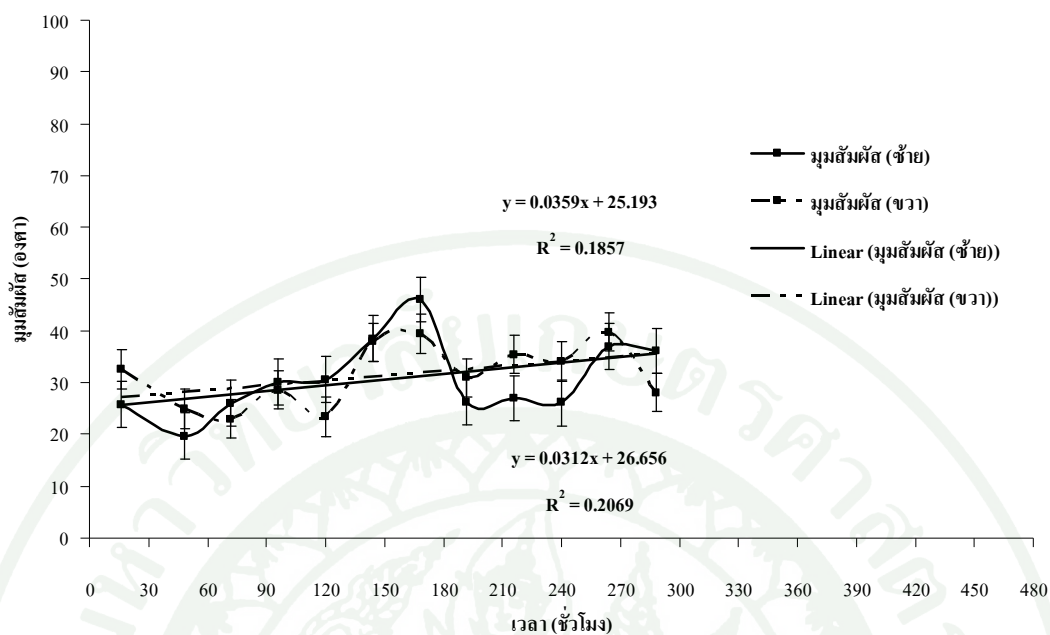
จากผลการทดลองระบบเดียวกันในฐานที่ 2 กล่าวคือถูกล้อมรอบด้วยน้ำใต้ดินจำลองและมีการปนเปื้อนสาร NAPL เพียงชนิดเดียวคือหยดสาร TCE จะสามารถแปลผลการทดลองดังแสดงไว้ในภาพที่ 52 ซึ่งเป็นผลการทดลองวัดมุมสัมพัทธ์ทุกช่วงเวลาทำการทดลอง โดยชั่วโมงที่ 0 มีค่ามุมสัมพัทธ์เริ่มต้นด้านซ้ายเท่ากับ 26.05 องศา และค่ามุมสัมพัทธ์เริ่มต้นด้านขวาเท่ากับ 27.45 องศา ซึ่งชี้วัดได้ว่าในตอนเริ่มต้นของการทดลองพื้นผิวหินปูนมีความสามารถชอบเปียกน้ำอย่างมาก (strongly water wet) แต่เมื่อเวลาผ่านไป จะสังเกตเห็นได้ว่าเส้นกราฟมุมสัมพัทธ์ทั้งสองด้านของหยดสาร TCE มีค่ามุมเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด และเมื่อวิเคราะห์ช่วงเวลา 16 ชั่วโมงแรก จะเห็นได้ว่ากราฟมีความชันลดลงเล็กน้อย แสดงให้เห็นว่าพื้นผิวหินปูนยังคงชอบเปียกน้ำอย่างมาก โดยมีค่ามุมสัมพัทธ์ซ้ายและขวา ณ ชั่วโมงที่ 16 เท่ากับ 25.75 องศา และ 32.77 องศา ตามลำดับ ซึ่งชี้วัดได้ว่ามีความสามารถชอบเปียกน้ำอย่างมาก (Strongly water wet) ดังแสดงในภาพที่ 53 แต่เมื่อเวลาผ่านไปมวลสาร TCE เริ่มมีการถ่ายเทเข้าสู่ น้ำใต้ดินที่ล้อมรอบและฟิล์มของน้ำที่เคลือบบนหินปูนมากขึ้น เป็นผลทำให้มุมสัมพัทธ์มีค่ามากขึ้นด้วย ดังแสดงในภาพที่ 54 ซึ่งกราฟจะมีค่าความชันเป็นเพิ่มขึ้น และในภาพที่ 55 แสดงกราฟการวัดมุมสัมพัทธ์จนเสร็จสิ้นการทดลองกล่าวคืออยู่ในช่วงเวลา 288-384 ชั่วโมงจะมีค่ามุมสัมพัทธ์ซ้ายและขวา ณ ชั่วโมงที่ 384 เท่ากับ 92.22 องศา และ 91.57 องศา ตามลำดับ สามารถชี้วัดได้ว่ามีความสามารถในการเปียกแบบผสม (neutral wet)



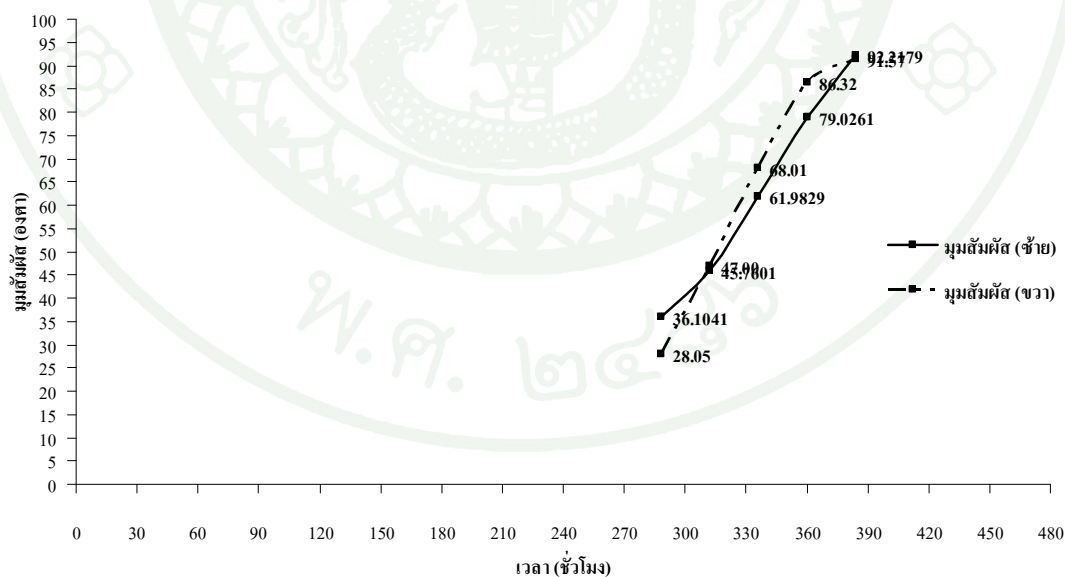
ภาพที่ 52 กราฟแสดงการหาปริมาณสาร DNAPL ที่กระทำบนพื้นผิวหินปูนและมีน้ำล้อมรอบเทียบกับการเปลี่ยนแปลงทุกช่วงเวลาในฐานที่ 2



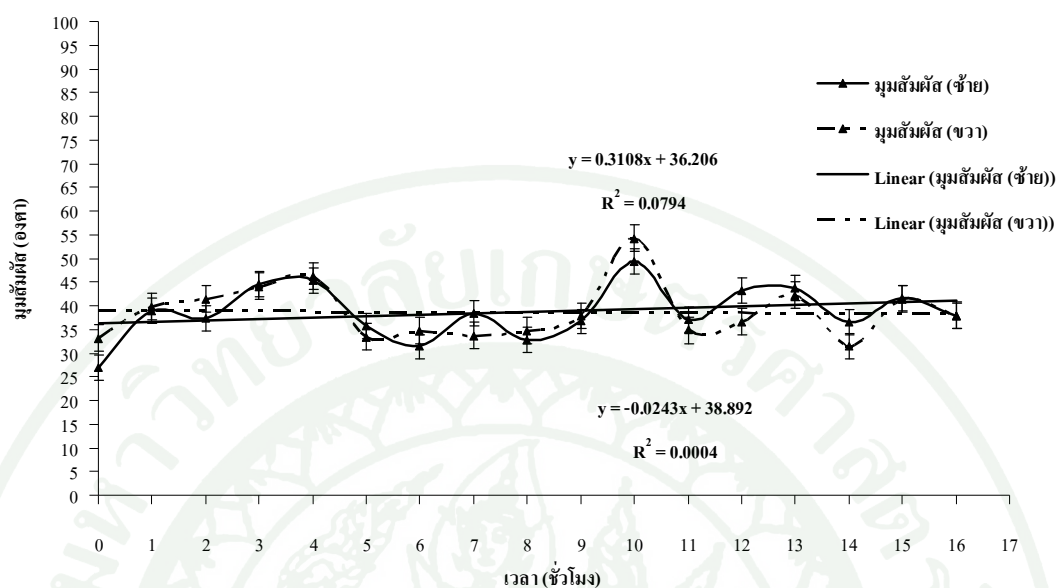
ภาพที่ 53 กราฟแสดงการหาปริมาณสาร DNAPL ที่กระทำบนพื้นผิวหินปูนและมีน้ำล้อมรอบเทียบกับเวลา 16 ชั่วโมงแรกในฐานที่ 2



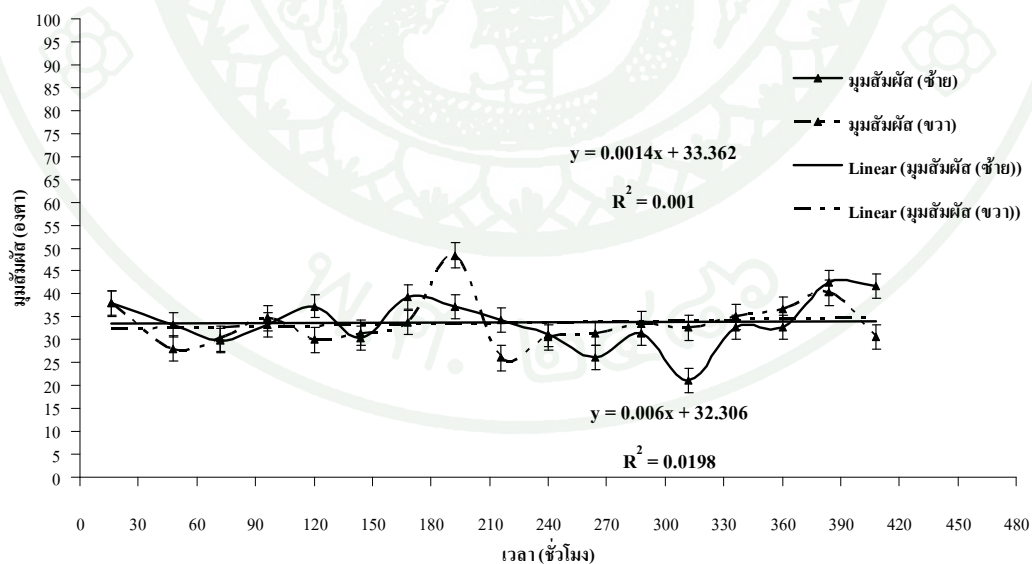
ภาพที่ 54 กราฟแสดงการหาปริมาณสาร DNAPL ที่กระทำบนพื้นผิวหินปูนและมีน้ำล้อมรอบเทียบกับเวลาหลังจากผ่านไป 16 ชั่วโมงแรกจนถึงชั่วโมงที่ 288 ในฐานที่ 2



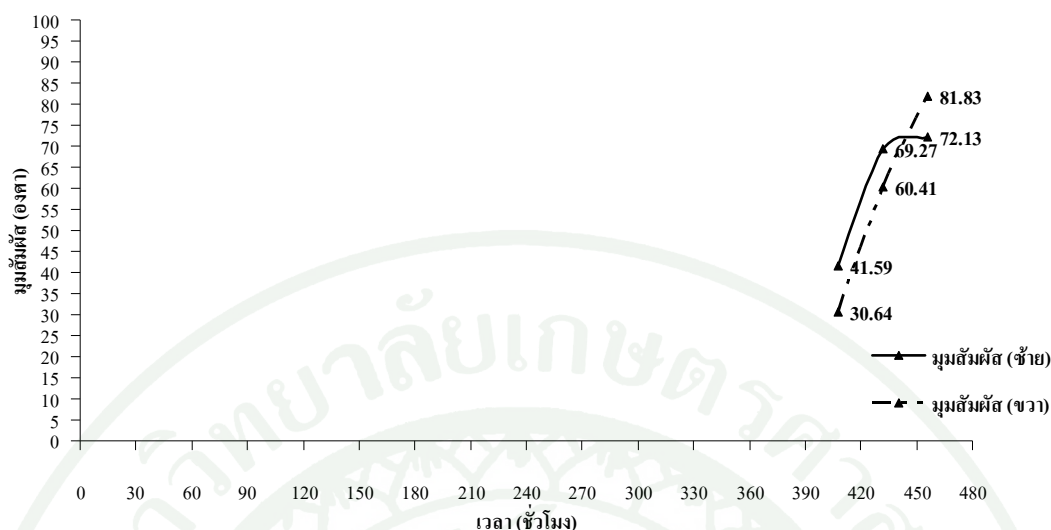
ภาพที่ 55 กราฟแสดงการหาปริมาณสาร DNAPL ที่กระทำบนพื้นผิวหินปูนและมีน้ำล้อมรอบเทียบกับเวลาหลังจากผ่านไปชั่วโมงที่ 288 จนเสร็จสิ้นการทดลองในฐานที่ 2



ภาพที่ 57 กราฟแสดงการหาปริมาณ DNAPL ที่กระทำบนพื้นผิวหินปูนและมีน้ำล้อมรอบเทียบกับเวลา 16 ชั่วโมงในฐานที่ 3

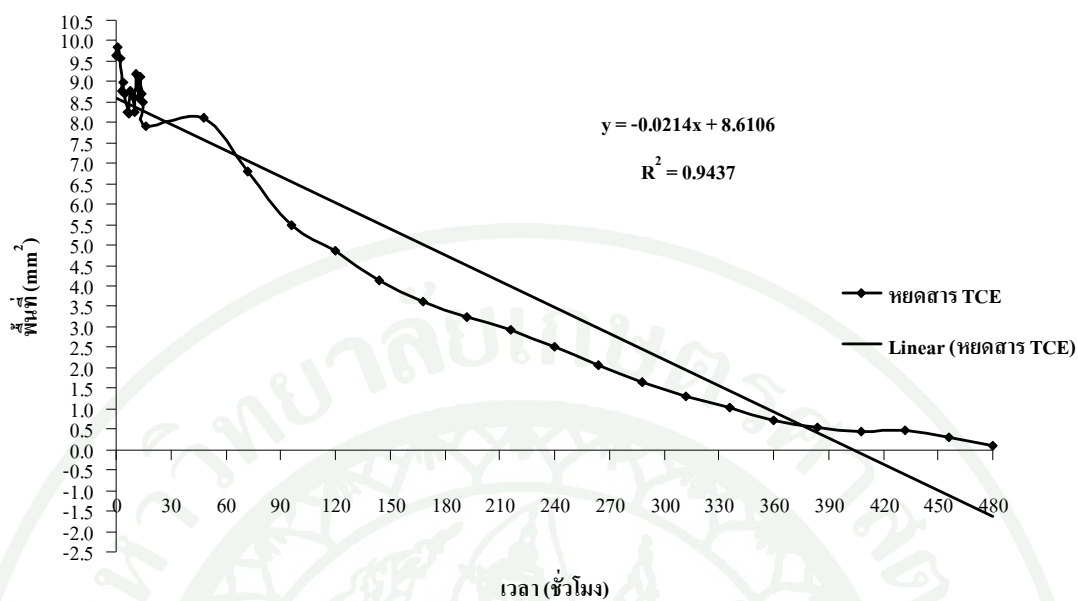


ภาพที่ 58 กราฟแสดงการหาปริมาณ DNAPL ที่กระทำบนพื้นผิวหินปูนและมีน้ำล้อมรอบเทียบกับเวลาหลังจากผ่านไป 16 ชั่วโมงแรกจนถึงชั่วโมงที่ 408 ในฐานที่ 3

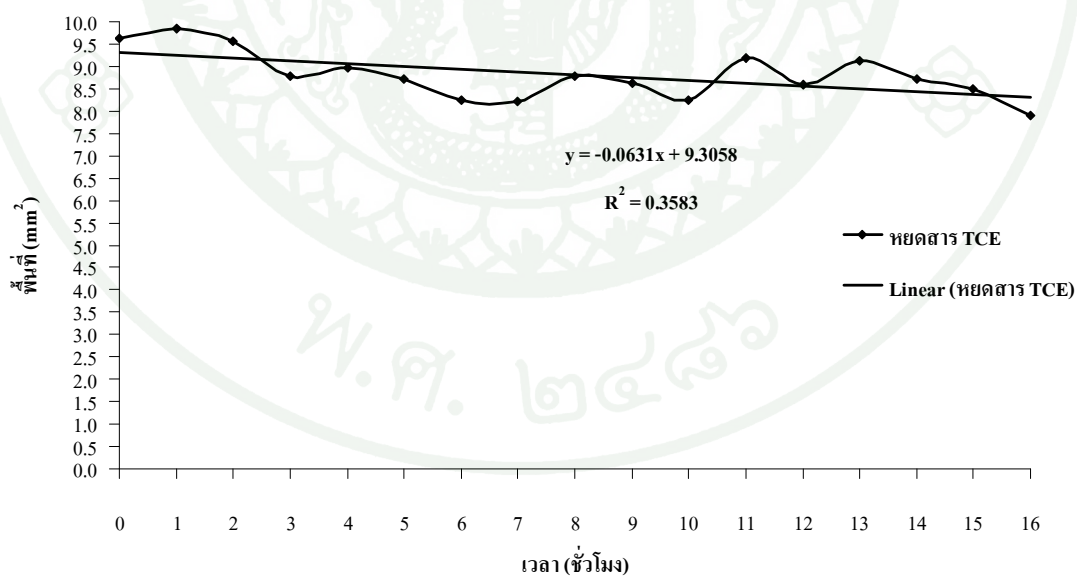


ภาพที่ 59 กราฟแสดงการหา มูมสัมผัส หายขาดสาร DNAPL ที่กระทำบนพื้นผิวหินปูนและมีน้ำ ล้อมรอบเทียบกับเวลาหลังผ่านชั่วโมงที่ 408 จนเสร็จสิ้นการทดลองในฐานที่ 3

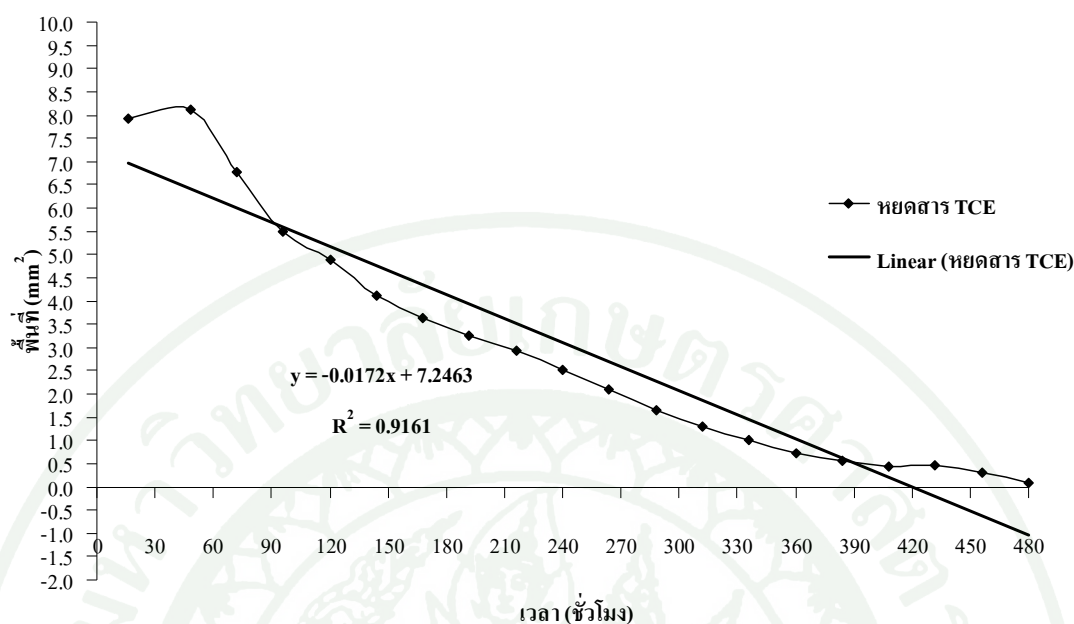
เมื่อทำการวัดพื้นที่เฉลี่ยของหายขาดสาร TCE เทียบกับทุกเวลาการทดลอง ดังแสดงในภาพที่ 60 จะพบว่าเส้นกราฟมีแนวโน้มลดลงสู่เข้าสู่แนวแกน X นั้นหมายความว่า หายขาดสาร TCE มีการสูญเสียมวลสารเนื่องมาจากการถ่ายเทมวลสารสู่ขอบเขตติดต่อโดยรอบเช่น น้ำใต้ดินจำลองที่ ล้อมรอบหายขาดสาร TCE และรูพรุนของพื้นผิวหินปูน รวมไปถึงชั้นอากาศที่อยู่ในเซลล์และนอก เซลล์วัดมูมสัมผัสได้ เริ่มต้นการทดลองสามารถวัดพื้นที่ของหายขาดสาร TCE ได้เท่ากับ 9.62 mm^2 จากนั้นเมื่อทำการแสดงรายละเอียดในแต่ละช่วงเวลา พบว่าในช่วงเวลา 16 ชั่วโมงแรก มีแนวโน้ม การสูญเสียมวลสาร TCE สู่พื้นที่ติดต่อโดยรอบน้อยมาก ดังแสดงให้เห็นได้จากภาพที่ 61 โดยมี พื้นที่เฉลี่ย ณ ชั่วโมงที่ 16 เท่ากับ 7.91 mm^2 หลังจากทำการทดลองผ่านเวลาชั่วโมงที่ 16 เส้นกราฟ ลดลงและเข้าสู่แกน X มากขึ้น ซึ่งแต่ละชั่วโมงจะมีการเปลี่ยนแปลงค่าพื้นที่ตลอดเวลา การหา พื้นที่หายขาดสาร TCE หลังจากผ่านชั่วโมงที่ 16 ไปจนกระทั่งเสร็จสิ้นการทดลอง ณ ชั่วโมงที่ 480 จะ พบว่าเหลือมวลสารน้อยมากเท่ากับ 0.09 mm^2 ดังแสดงให้เห็นจากภาพที่ 62



ภาพที่ 60 การหาพื้นที่เฉลี่ยหอยดสาร DNAPL บนพื้นผิวหินปูนและมีน้ำล้อมรอบเทียบกับการเปลี่ยนแปลงทุกช่วงเวลา

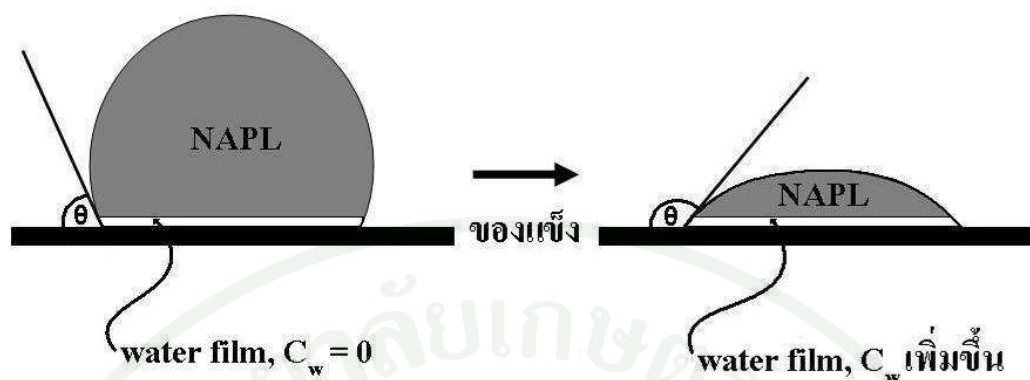


ภาพที่ 61 การหาพื้นที่เฉลี่ยหอยดสาร DNAPL บนพื้นผิวหินปูนและมีน้ำล้อมรอบเทียบกับการเปลี่ยนแปลงช่วงเวลา 16 ชั่วโมงแรก



ภาพที่ 62 การหาพื้นที่เฉลี่ยของ DNAPL บนพื้นผิวหินปูนและมีน้ำล้อมรอบเทียบกับการเปลี่ยนแปลงเวลาหลังจากผ่านไป 16 ชั่วโมงแรกจนเสร็จสิ้นการทดลอง

จากทฤษฎี film สามารถอธิบายกระบวนการเปลี่ยนแปลงมวลสัมพัทธ์จากการเกาะติดของสาร NAPL บนพื้นผิวหินปูนได้ โดยในตอนเริ่มต้นพื้นผิวหินปูนจะมีฟิล์มน้ำ (water film) มาเคลือบอยู่ ซึ่งมีความเข้มข้นของสาร NAPL เป็นศูนย์ และเมื่อเวลาผ่านไปเกิดการละลายหรือการถ่ายเทมวลสารของหยดสาร NAPL เข้าไปแทรกตัวอยู่ในน้ำ ทำให้ค่าความเข้มข้นของสาร NAPL ซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวละลายในน้ำได้ลดลงบริเวณ water film (C_w) มากขึ้น พร้อมกับมีแรงดึงดูดระหว่างอนุภาคของของเหลวกับของแข็ง (Adhesion force) มากกว่าแรงดึงดูดระหว่างอนุภาคของของเหลวด้วยกัน (Cohesive force) ดังนั้นสาร NAPL จึงแผ่บนพื้นผิวหินปูนได้มากขึ้น (จิรายุ, 2009) ดังแสดงในภาพที่ 63



ภาพที่ 63 ลักษณะการเปลี่ยนแปลงขนาดของมุมสัมผัสบนพื้นผิวของแข็ง

ที่มา: จิรายุ (2009)

มุมสัมผัสในตอนเริ่มต้นเป็นมุมสัมผัสแบบก้าวหน้า (Advancing contact angle) เทียบได้กับมุมของหยดสาร NAPL รุกเข้าไปยังโครงข่ายรูพรุน (pore network) ของหินปูน และเมื่อเวลาผ่านไปมวลของหยดสาร NAPL ลดลงเนื่องจากเกิดการถ่ายเทมวลไปสู่ น้ำใต้ดิน อากาศ รวมถึงแทรกซึมละลายน้ำอยู่ในช่องว่างรูพรุนหินปูน ทำให้เกิดมุมสัมผัสขณะที่มวลลดลงนี้เป็นมุมสัมผัสแบบถดถอย (receding contact angle) และเมื่อพิจารณาค่ามุมสัมผัสสุดท้ายของสาร NAPL ซึ่งเกาะติดบนพื้นผิวหินปูนนั้นมีค่าเพิ่มขึ้น ดังตารางที่ 10

ตารางที่ 10 มุมสัมผัสเริ่มต้น (advancing contact angle) และมุมสัมผัสสุดท้าย (receding contact angle) ของการทดลองวัดมุมสัมผัส TCE บนพื้นผิวหินปูน ซึ่งล้อมรอบด้วยน้ำได้ดินจำลอง (DDD water)

ระบบ	มุมสัมผัสเริ่มต้น (advancing contact angle), องศา			มุมสัมผัสสุดท้าย (receding contact angle), องศา	
	ฐาน	ซ้าย	ขวา	ซ้าย	ขวา
1. หยดสาร TCE บนพื้นผิวหินปูน ล้อมรอบด้วยน้ำ	1	23.14	25.84	53.85	55.66
	2	26.05	27.45	92.22	91.57
	3	27.05	33.16	72.13	81.83
1.1 มุมสัมผัสเฉลี่ย (องศา)		25.41	28.82	72.73	76.35
1.2 มุมสัมผัสเฉลี่ยรวม (องศา)		27.12		74.54	
1.3 wettability assessment		strongly water wet		neutral wet	
3. หยดสาร TCE บนแผ่นซิลิกอน ล้อมรอบด้วยน้ำ (จิรายุ, 2009)	เฉลี่ย	63.9		157.6	
4. หยดสาร TCE บนแผ่นควอตซ์ ล้อมรอบด้วยน้ำ (จิรายุ, 2009)	เฉลี่ย	45.7		162.0	

ผลการทดลองจากตารางที่ 10 เมื่อทำการเปรียบเทียบพื้นผิววัตถุ 3 พื้นผิว ซึ่งได้นำมาใช้ในการหาค่ามุมสัมผัส ได้แก่ พื้นหินปูน พื้นผิวซิลิกอน (จิรายุ, 2009) และพื้นผิวควอตซ์ (จิรายุ, 2009) พบว่าเมื่อทำการถ่ายภาพพร้อมกับวัดมุมสัมผัสเริ่มต้นของหยดสาร TCE พื้นผิวหินปูนจะมีความสามารถชอบเปียกน้ำ (strongly water wet) มากกว่าพื้นผิวควอตซ์และพื้นผิวซิลิกอนตามลำดับ และเมื่อทำการทดลองจนถึงการวัดมุมสัมผัสแบบถดถอย พื้นผิวหินปูนมีความสามารถชอบเปียกผสม (neutral wet) แต่มีสัดส่วนความชอบเปียกน้ำมากกว่าชอบเปียกน้ำมัน ขณะที่พื้นผิวควอตซ์และพื้นผิวซิลิกอนจะมีความสามารถชอบเปียกด้วยน้ำมันอย่างมาก (NAPL wet) โดยมีค่ามุมสัมผัสสุดท้ายสูงถึง 162.0 องศา และ 157.6 องศา ตามลำดับ

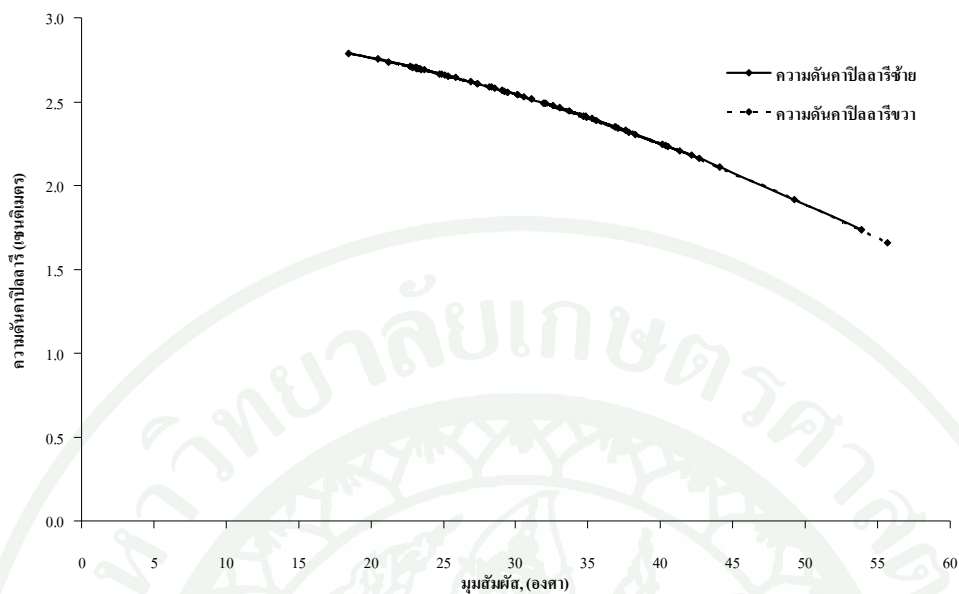
และเมื่อเปรียบเทียบผลการทดลองหาความสัมพันธ์ความสามารถเปียกได้ของ DNAPL บนพื้นผิวหินปูนในชั้นตัวกลางหินปูน โดยใช้วิธีการทดลองหาความสัมพันธ์ระหว่างความดันคาปิลลารีและความอึดตัวด้วยน้ำจากการทดลอง 2 วัฏจักรระหว่างกลไกการระบายน้ำและการเติมน้ำของสาร DNAPL กับน้ำ ดังแสดงผลการทดลองในตารางที่ 8 และวิธีการวัดมุมสัมผัสของหยดสาร DNAPL บนพื้นผิวหินปูน ดังแสดงผลการทดลองในตารางที่ 10 พบว่า ผลการทดลองทั้งสองวิธี มีความสัมพันธ์ในเชิงวิเคราะห์ผลสอดคล้องกัน กล่าวคือ เมื่อทำการคำนวณค่าดัชนี USBM ทั้ง 2 วัฏจักร จากพื้นที่ใต้กราฟ ซึ่งเกิดจากกลไกการระบายน้ำและการเติมน้ำของระบบชั้นตัวกลาง ได้รับความดันจากสาร TCE กับน้ำ (ระบบการทดลอง TCE-น้ำ-TCE-น้ำ) โดยมีค่าดัชนี $USBM_1$ เท่ากับ 1.17 และดัชนี $USBM_2$ เท่ากับ 1.54 สามารถชี้วัดได้ว่าพื้นผิวหินปูนมีความสามารถชอบเปียกน้ำได้มากขึ้น (strongly water wet) ขณะที่ทำการทดลองวัดมุมสัมผัสเริ่มต้น ($\theta < 27.12^\circ$) จนกระทั่งถึงการทดลองวัดมุมสัมผัสสุดท้ายที่มีการเปลี่ยนแปลงไปตามเวลา พบว่าพื้นผิวหินปูนมีแนวโน้มชอบเปียกแบบผสม แต่มีความชอบเปียกน้ำมากกว่าชอบเปียกน้ำมัน ($\theta < 74.54^\circ$) ดังนั้นวิธีการประเมินความสามารถเปียกได้ทั้ง 2 วิธี มีผลให้พื้นผิวหินปูนมีความชอบเปียกน้ำมากกว่าความชอบเปียกน้ำมัน (hydrophilic surface) และจากการวิเคราะห์ในเรื่องการบำบัดสาร NAPL ออกจากชั้นตัวกลาง จะพบว่าการบำบัดสาร TCE เป็นสิ่งที่ทำได้ยากกว่าการบำบัดสารโทลูอิน จากการพิจารณาใช้ความดันคาปิลลารีของสาร TCE ในการระบายน้ำมากกว่าความดันคาปิลลารีของสารโทลูอิน ซึ่งระดับความดันคาปิลลารีสุดท้ายในการระบายน้ำออกจากชั้นตัวกลางมีค่าประมาณ 30 เซนติเมตร และเทียบกับผลการวัดมุมสัมผัส มีผลทำให้พื้นผิวหินปูนชอบเปียกน้ำ โดยมิต้องสามารถสัมผัสน้อยกว่า 90 องศา ($\theta < 90^\circ$)

นอกจากนี้ได้ทำการทดลองหาความสัมพันธ์ระหว่างความดันคาปิลลารีกับมุมสัมผัสจากสมการลาปลาซในสมการที่ 26 ของหยดสาร TCE บนพื้นผิวหินปูนภายใต้ระบบการปนเปื้อนสาร NAPL เพียงชนิดเดียว ซึ่งถูกล้อมรอบด้วยน้ำได้ดินจำลอง จำนวน 3 ฐานการทดลอง ดังแสดงผลการทดลองตามภาพที่ 64 ซึ่งเป็นผลการทดลองการฐานที่ 1 ภาพที่ 65 ซึ่งเป็นผลการทดลองฐานที่ 2 ภาพที่ 66 ซึ่งเป็นผลการทดลองฐานที่ 3 ตามลำดับ

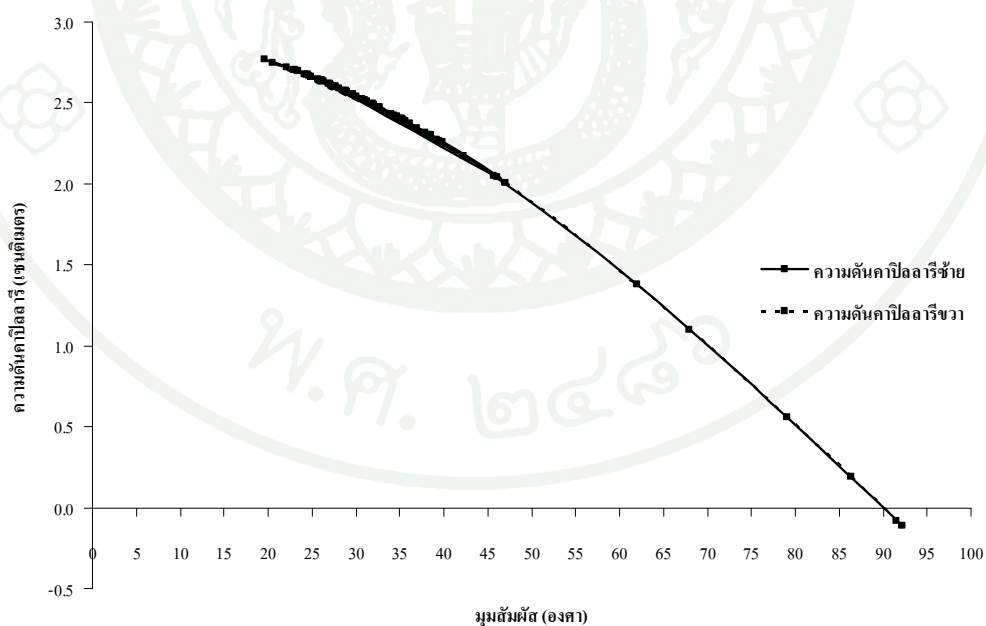
จากผลการทดลองพบว่ามีผลไปในแนวทางเดียวกันทั้ง 3 การทดลอง ซึ่งความดันคาปิลลารีสัมพันธ์กับมุมสัมผัส ในความสัมพันธ์กับค่ามุม cosine โดยความดันคาปิลลารีแปรผันตรงกับค่ามุม cosine ของมุมสัมผัส ดังนั้นเมื่อมุมสัมผัสมีค่ามากขึ้นทำให้ cosine มีค่าน้อยลง ส่งผลให้ความดันคาปิลลารีจึงมีค่าลดลง จนกระทั่งมุมสัมผัสมากกว่า 90 องศา จึงทำให้ค่า cosine เป็นลบ และทำให้

ความดันคาปิลลารีมีค่าเป็นลบ ในช่วงที่ความดันคาปิลลารีเป็นลบ คือความดันที่มวลของ NAPL ลดลงและแผ่ลงบนพื้นผิวมากขึ้น ซึ่งในพื้นที่จริงที่มีการปนเปื้อน NAPL ในน้ำใต้ดิน ขณะที่สาร NAPL เกาะติดอยู่กับอนุภาคเม็ดดินและมีการถ่ายเทมวลสาร NAPL กับชั้นดินไม่อึดตัวและ เนื่องจากการไหลของน้ำใต้ดินในชั้นอึดตัวด้วยน้ำมีค่ามากขึ้น จะทำให้สาร NAPL ที่ติดอยู่กับ อนุภาคเม็ดดินจะมีมวลลดลง ส่งผลให้มุมสัมผัสระหว่าง NAPL กับผิวดินมีค่ามากขึ้น ดังนั้นความ ดันคาปิลลารีจึงมีค่าลดลง ทำให้น้ำสามารถไหลผ่านช่องว่างเม็ดดินได้ง่ายขึ้น และ NAPL ซึ่งติดอยู่ บนพื้นผิวดินถูกชะไปกับน้ำที่ไหลผ่านช่องว่างในดินได้มากขึ้น (จิรายุ, 2009) ในกรณีพื้นผิวหินปูน พบว่าจะมีการชะล้างได้ยากกว่า พื้นผิวซิลิโคน รวมทั้งพื้นผิวควอตซ์ เนื่องจากค่ามุมสัมผัสที่ เปลี่ยนแปลงไปตามเวลาการทดลอง ยังคงบ่งชี้ถึงพื้นผิวหินปูนมีความสามารถชอบเปียกน้ำใน สัดส่วนที่มากกว่าการชอบเปียกแบบน้ำมันกล่าวคือมีค่ามุมสัมผัสประมาณ 90 องศา ($0\sim90^\circ$) ซึ่งมี ผลไปในแนวทางเดียวกันทั้ง 3 ฐานการทดลอง

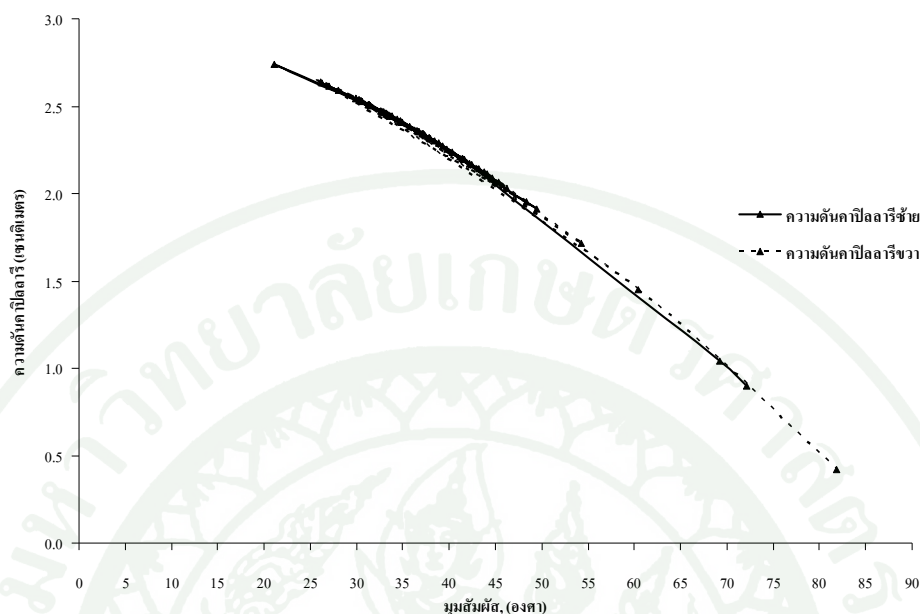
ส่วนผลการทดลองความดันคาปิลลารีกับมุมสัมผัสทั้ง 3 ฐานการทดลอง พบว่า ฐานการ ทดลองที่ 1 มีค่าความดันคาปิลลารีสุดท้ายมากกว่า ฐานการทดลองที่ 3 และฐานการทดลองที่ 2 ตามลำดับ อาจมีสาเหตุจากสภาพความขรุขระของพื้นผิวหินปูนที่มีความแตกต่างกันในระดับสเกล ขนาดเล็กมาก (micro scale) นอกจากนี้อาจมีความหลากหลายของสภาพพื้นที่ที่เลือกหินปูนมาทำ การทดลอง ถึงแม้จะเป็นบริเวณเดียวกัน แต่ก็ย่อมมีการเปลี่ยนแปลงของแต่ละพื้นที่ไม่เหมือนกัน ซึ่งทำให้เกิดความแตกต่างกันของผลการทดลองทั้ง 3 ฐาน แต่มีแนวโน้มไปในแนวทางเดียวกัน โดยฐานที่ 1 ณ เวลาทำการทดลองชั่วโมงที่ 336 มีค่าความดันคาปิลลารี 1.73 เซนติเมตร ที่มุมสัมผัส ทางด้านซ้าย และมีค่าความดันคาปิลลารี 1.66 เซนติเมตร ที่มุมสัมผัสทางด้านขวา ฐานที่ 2 ณ เวลา ทำการทดลองชั่วโมงที่ 384 มีค่าความดันคาปิลลารี -0.11 เซนติเมตร ที่มุมสัมผัสทางด้านซ้าย และมี ค่าความดันคาปิลลารี -0.08 เซนติเมตร ที่มุมสัมผัสทางด้านขวา ส่วนฐานที่ 3 ณ เวลาทำการทดลอง ชั่วโมงที่ 456 มีค่าความดันคาปิลลารี 0.90 เซนติเมตร ที่มุมสัมผัสทางด้านซ้าย และมีค่าความดัน คาปิลลารี 0.42 เซนติเมตร ที่มุมสัมผัสทางด้านขวา



ภาพที่ 64 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันคัปิลลารีกับมม.สัมพัทธ์ของหยดสาร TCE บนพื้นผิวหินปูน ซึ่งล้อมรอบด้วยน้ำ ฐานที่ 1



ภาพที่ 65 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันคัปิลลารีกับมม.สัมพัทธ์ของหยดสาร TCE บนพื้นผิวหินปูน ซึ่งล้อมรอบด้วยน้ำ ฐานที่ 2



ภาพที่ 66 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของ TCE ในดินกับ TCE ในน้ำบนพื้นที่ปนเปื้อน ซึ่งล้อมรอบด้วยน้ำ ฐานที่ 3

2. การทดลองการวัดความเข้มข้นของ TCE บนพื้นที่ปนเปื้อนภายใต้ระบบสาร NAPL ปนเปื้อนผสม ซึ่งล้อมรอบด้วยสารละลายโทลูอีนที่มีปริมาณมากกว่าค่าการละลายได้สูงสุด

การทดลองการวัดความเข้มข้นจากการถ่ายภาพแบบมาโคร (Macro photography) ของหยดสาร DNAPL ที่ปนเปื้อนเกาะติดบนพื้นผิวหินปูน ซึ่งล้อมรอบด้วยสารละลายโทลูอีนที่มีปริมาณมากกว่าค่าการละลายได้สูงสุด จะปรากฏภาพถ่ายดังแสดงในภาพที่ 67 ซึ่งเป็นภาพถ่ายของหยดสาร TCE เริ่มต้นเกาะติดบนพื้นผิวหินปูน โดยทำการทดลอง 3 ฐาน หลังจากนั้นทำการบันทึกภาพของหยดสาร TCE ที่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลาโดยการถ่ายภาพทุก 1 ชั่วโมง เป็นเวลา 16 ชั่วโมงของวันที่ 1 และทำการถ่ายภาพหยดสาร TCE บนพื้นผิวหินปูนต่อเนื่องทุกวันจนกระทั่งหยดสาร TCE มีมวลลดน้อยลงและมีค่าความเข้มข้นของ TCE ลดลงเกิดจากการถ่ายเทมวลสารต่อขอบเขตการติดต่อโดยรอบในระบบกล่าวคือ มีการถ่ายเทมวลสารเข้าสู่ได้น้ำจาลอง ซึ่งมีการละลายของสารโทลูอีนปนเปื้อนอยู่ในปริมาณที่เกินค่าความอิ่มตัวของสาร และแทรกซึมตามรูพรุนของพื้นผิวหินปูน การทดลองนี้มีระยะเวลาทำการทดลองในแต่ละฐานเท่ากัน กล่าวคือใช้เวลาทำการทดลองจนเสร็จสิ้นการทดลอง 30 วัน เนื่องมาจากระบบการทดลองถูกปรับให้เข้าสู่

สภาวะระบบปิด (Closed system) ด้วยการเติมสารละลายโทลูอินมากเกินไปที่จะลอยอยู่บนผิวหน้า น้ำใต้ดินจำลอง ทำให้อัตราการระเหยของสาร TCE ซึ่งล้อมรอบล้อมรอบสารละลายโทลูอิน ถ่ายเทออกสู่อากาศภายในระบบการทดลองมีน้อยมาก แต่ก็ยังคงมีการถ่ายเทมวลสารเข้าสู่สารละลายโทลูอินเช่นเดิม เพื่อรักษาสมดุลกฎการแพร่ผ่าน ขณะที่พื้นผิวหินปูนย่อมมีสภาพความพรุน ความขรุขระที่แตกต่างกัน ซึ่งเกิดจากการขัดถูพื้นผิวด้วยเครื่องมืออย่างง่าย แต่ทั้งนี้ทั้งนั้นสามารถอ้างอิงได้ว่าจากพื้นที่ผิวหินปูนในชั้นใต้ดินสภาพจริง ก็ย่อมต้องมีพื้นผิวหินปูนในแต่ละแห่งแตกต่างกันด้วยเช่นกัน จากผลการทดลองการเปลี่ยนแปลงมุมสัมผัสเทียบกับระยะเวลาการทดลองในฐานที่ 1 แสดงในภาพที่ 68 ส่วนผลการทดลองการเปลี่ยนแปลงมุมสัมผัสเทียบกับระยะเวลาการทดลองในฐานที่ 2 แสดงในภาพที่ 69 และผลการทดลองการเปลี่ยนแปลงมุมสัมผัสเทียบกับระยะเวลาการทดลองในฐานที่ 3 แสดงในภาพที่ 70 ตามลำดับ

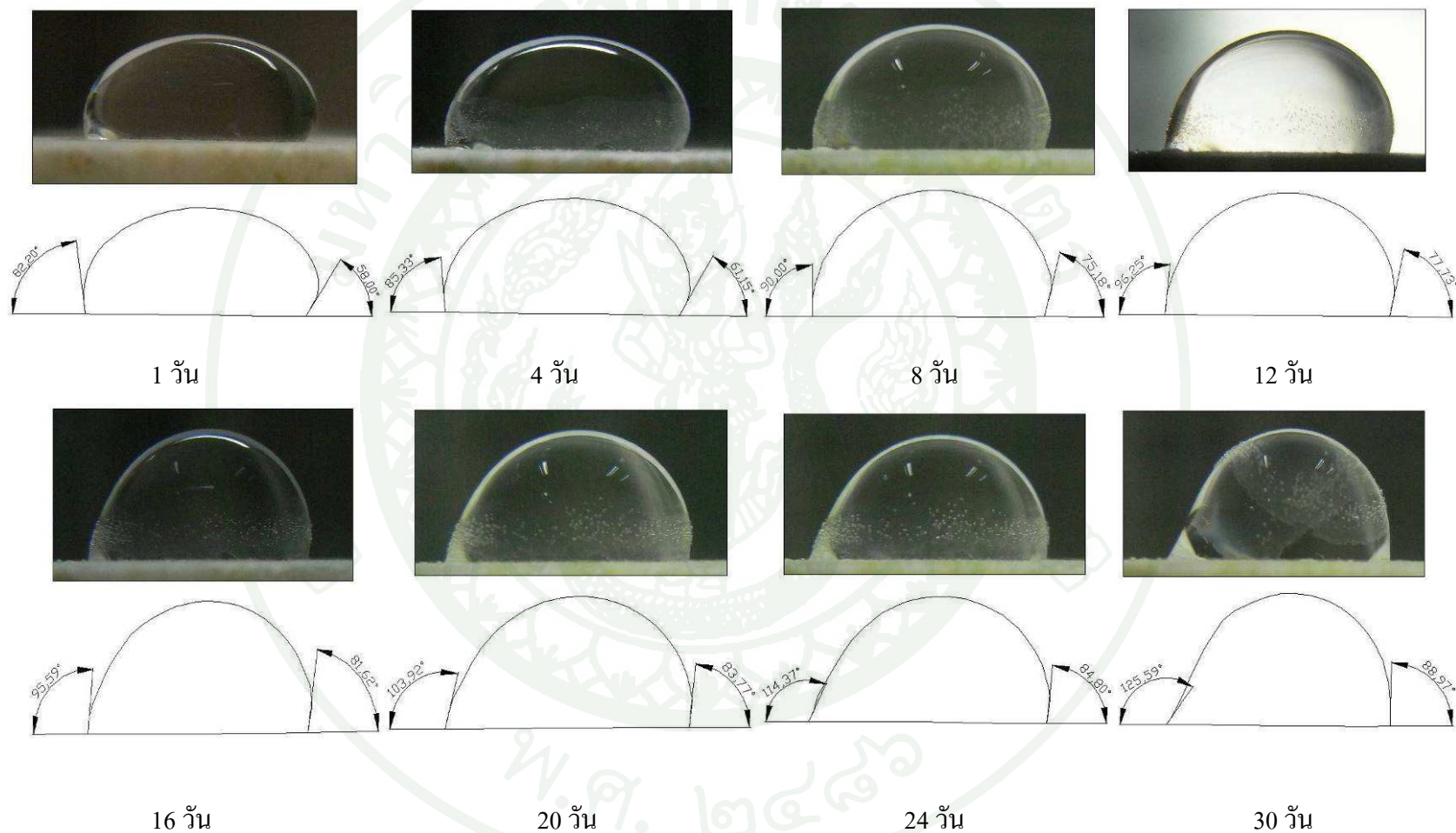


ฐาน 1

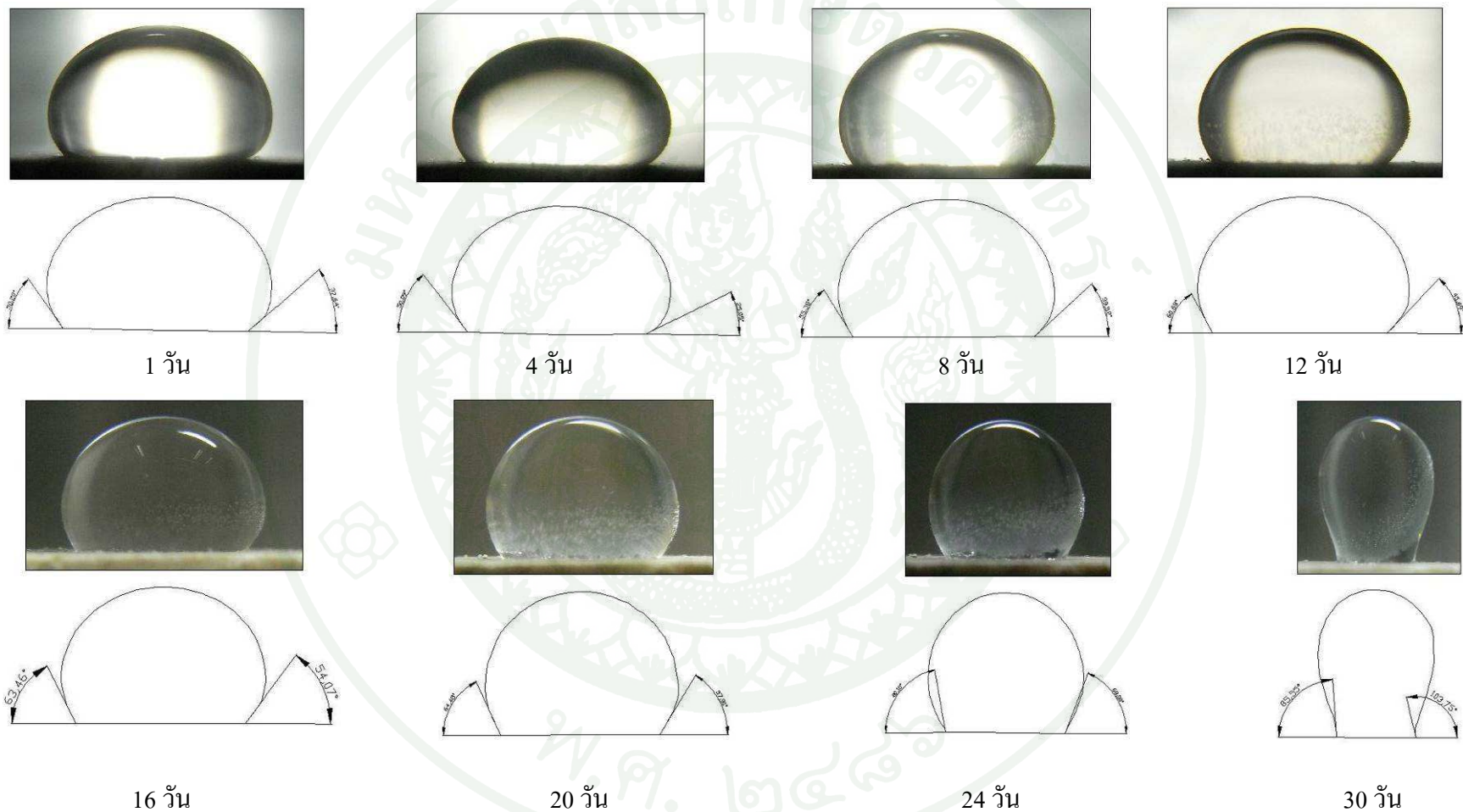
ฐาน 2

ฐาน 3

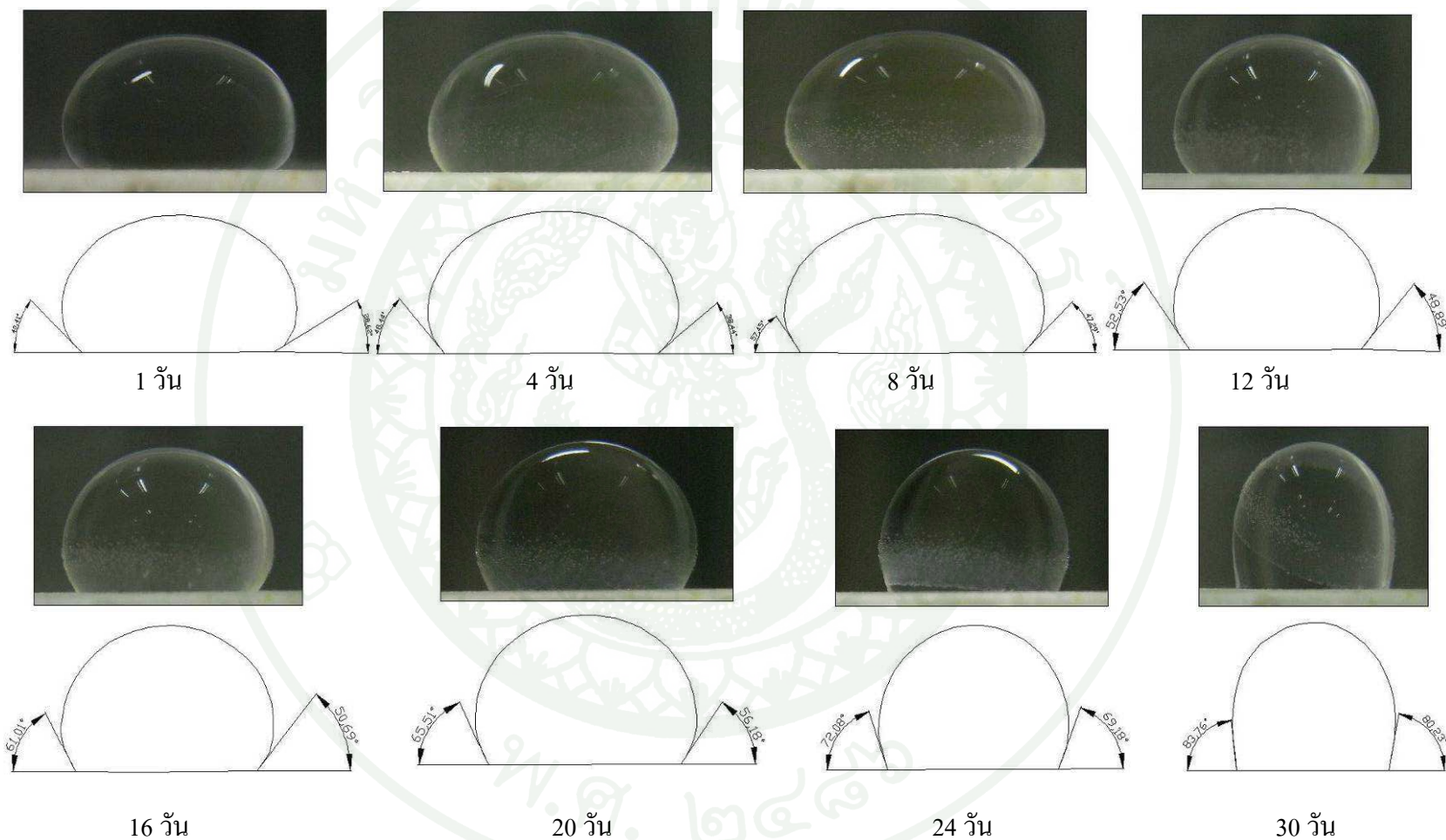
ภาพที่ 67 การทดลองวัดมุมสัมผัสเริ่มต้น ณ เวลาชั่วโมงที่ 0 ของหยด TCE บนพื้นผิวหินปูน ซึ่งล้อมรอบด้วยสารละลายไทลูอินที่มีปริมาณเกินกว่าค่า ความสามารถละลายได้สูงสุด ทั้ง 3 ฐาน



ภาพที่ 68 การทดลองวัดมุมสัมผัสที่เวลาต่าง ๆ กัน ของหยด TCE บนพื้นผิวพอลิอิมิดีน ซึ่งล้อมรอบด้วยสารละลายโทลูอีน ฐาน 1

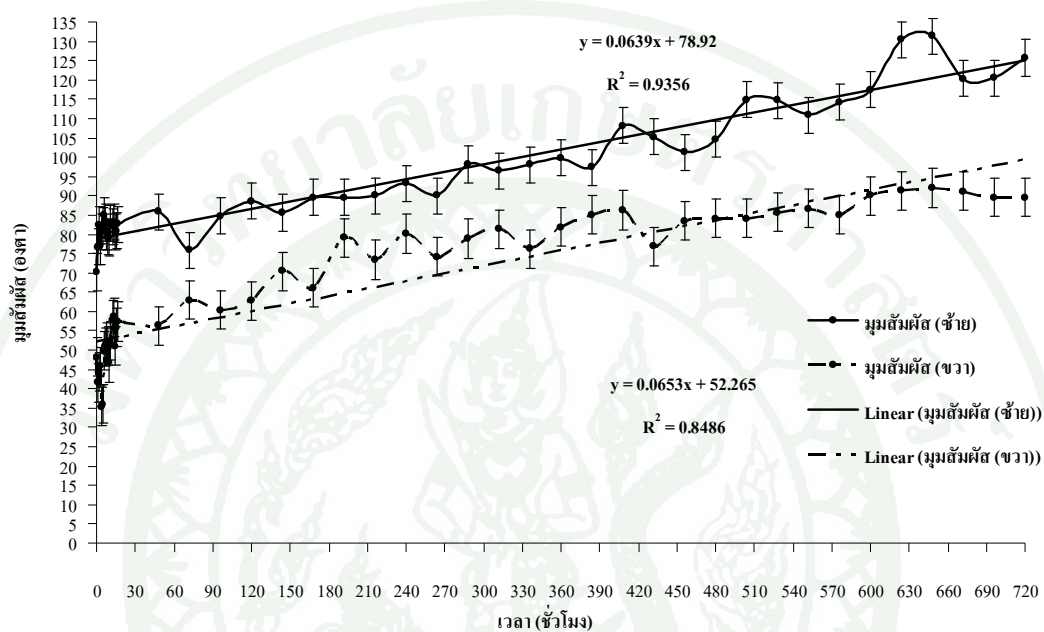


ภาพที่ 69 การทดลองวัดมุมสัมผัสที่เวลาต่าง ๆ กัน ของหยด TCE บนพื้นผิวพินิปูน ซึ่งล้อมรอบด้วยสารละลายโทลูอิน ฐาน 2

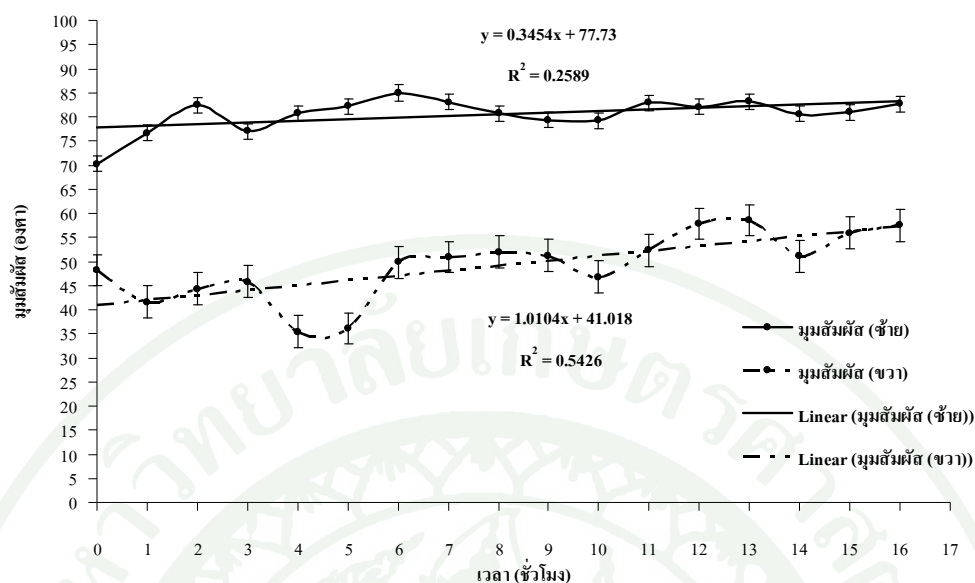


ภาพที่ 70 การทดลองวัดมุมสัมผัสที่เวลาต่าง ๆ กัน ของหยด TCE บนพื้นผิวพินาปอน ซึ่งล้อมรอบด้วยสารละลายโทลูอิน ฐาน 3

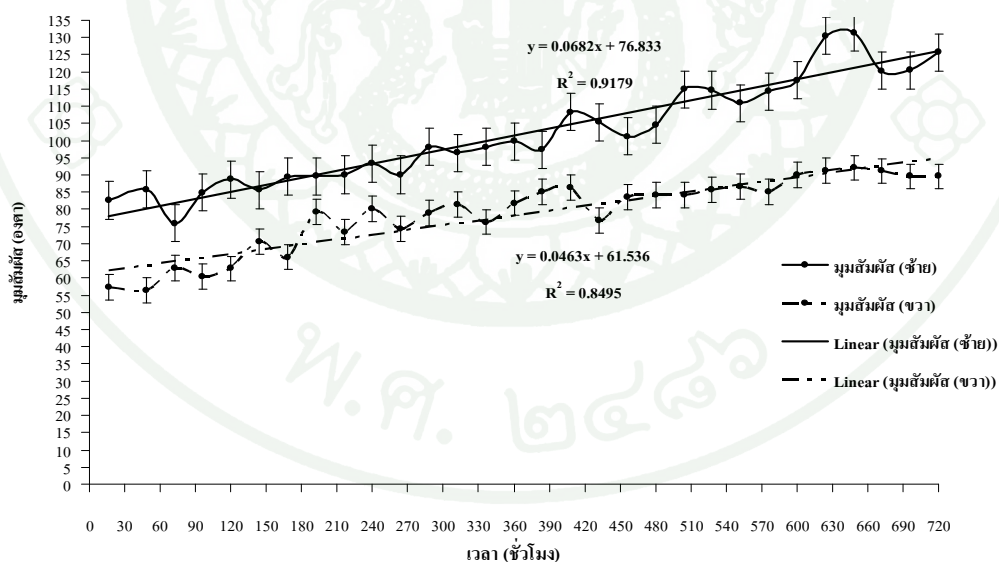
เมื่อทำการพล็อตกราฟระหว่างมูมสัมพัทธ์ของหยดสาร TCE บนพื้นผิวหินปูนที่เปลี่ยนแปลงไปในฐานที่ 1 เทียบกับทุกช่วงเวลาทำการทดลอง ภายใต้ระบบล้อมรอบด้วยสารละลายโทลูอีนที่มีปริมาณมากกว่าค่าการละลายได้สูงสุด ดังแสดงในภาพที่ 71



ภาพที่ 71 กราฟแสดงการหามูมสัมพัทธ์ของหยดสาร TCE ที่กระทำบนพื้นผิวหินปูนที่ล้อมรอบด้วยสารละลายโทลูอีนเกินค่าการละลายได้สูงสุดเทียบกับการเปลี่ยนแปลงทุกช่วงเวลาในฐานที่ 1



ภาพที่ 72 กราฟแสดงการหาปริมาณสัณฐาน TCE ที่กระทำบนพื้นผิวหินปูนที่ล้อมรอบด้วยสารโทลูอินเกินค่าการละลายได้สูงสุดเทียบกับช่วงเวลา 16 ชั่วโมงแรกในฐานะที่ 1

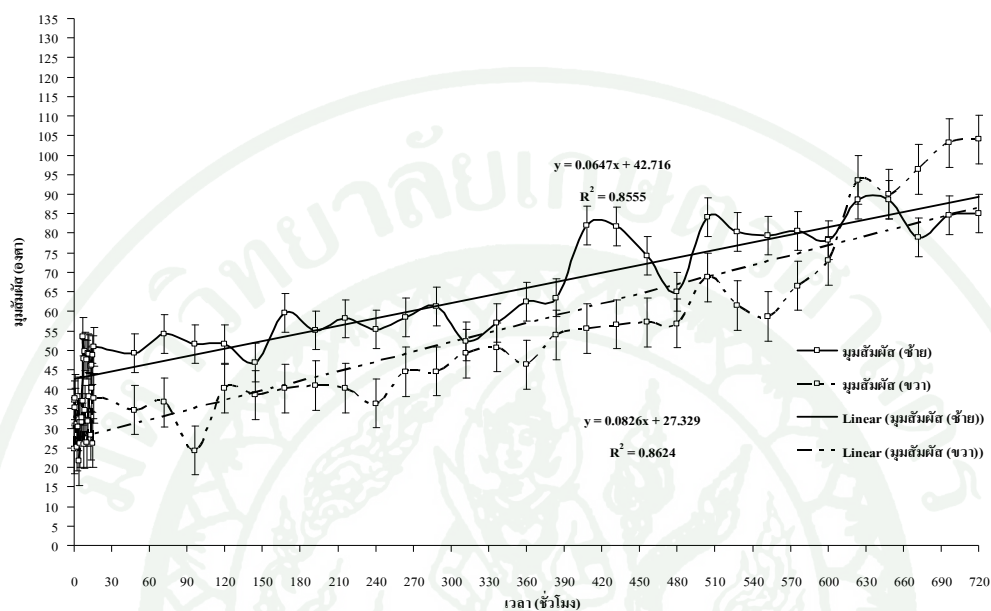


ภาพที่ 73 กราฟแสดงการหาปริมาณสัณฐาน TCE ที่กระทำบนพื้นผิวหินปูนที่ล้อมรอบด้วยสารละลายโทลูอินเกินค่าการละลายได้สูงสุดเทียบกับเวลาหลังจากผ่านไป 16 ชั่วโมงแรกจนเสร็จสิ้นการทดลองในฐานะที่ 1

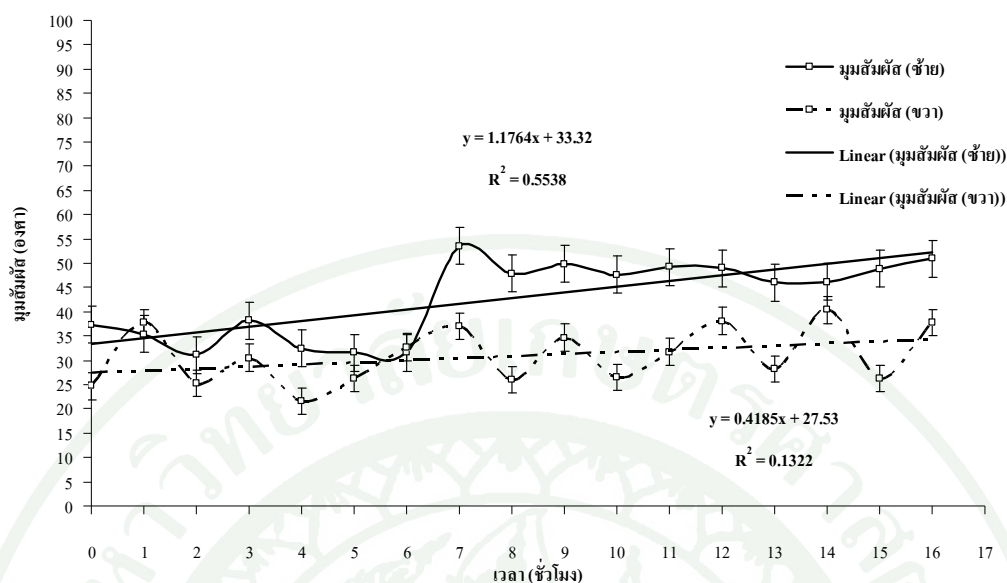
จากผลการทดลองการวัดมุมสัมผัสของหยดสาร TCE บนพื้นผิวหินปูน ที่ล้อมรอบด้วยสารละลายโทลูอินปริมาณมากกว่าค่าการละลายได้สูงสุดในฐานที่ 1 ดังแสดงในภาพที่ 71 ซึ่งเป็นกราฟแสดงค่ามุมสัมผัสทุกช่วงเวลาทำการทดลอง พบว่า ณ ชั่วโมงที่ 0 การเริ่มต้นสัมผัสของหยดสาร TCE จะมีค่ามุมสัมผัสเริ่มต้นด้านซ้าย 70.23 องศา และค่ามุมสัมผัสเริ่มต้นด้านขวา 48.14 องศา ซึ่งมีค่ามุมสัมผัสชี้วัดถึงพื้นผิวมีความสามารถชอบเปียกน้ำ (water wet) เมื่อเวลาผ่านไป ณ ช่วงเวลา 16 ชั่วโมงแรกในภาพที่ 72 หยดสาร TCE บนพื้นผิวหินปูนยังคงมีมุมสัมผัสเปลี่ยนแปลงน้อยมากโดยมีค่ามุมสัมผัส ณ เวลา ชั่วโมงที่ 16 มีค่ามุมสัมผัสด้านซ้าย 82.61 องศา และมีค่ามุมสัมผัสด้านขวา 57.42 องศา ซึ่งเมื่อทำการหาค่าความชันเส้นกราฟช่วงนี้จะมีค่าน้อยกว่า 1 ในค่ามุมสัมผัสด้านซ้าย และมีค่าความชันเท่ากับ 1 ในค่ามุมสัมผัสด้านขวา นั่นคือกราฟจะมีแนวโน้มขนานไปแนวแกน X จากนั้นเมื่อทำการถ่ายภาพวัดมุมสัมผัสของหยดสาร TCE ทุกวันจนเสร็จสิ้นการทดลอง ดังแสดงในภาพที่ 73 พบว่ากราฟแสดงค่ามุมสัมผัสทั้งสองด้านเพิ่มมากขึ้น จนชี้วัดได้ว่าพื้นผิวหินปูนในระบบการทดลองนี้มีความสามารถชอบเปียกแบบผสม (neutral wet) จากภาพถ่าย ณ เวลา ชั่วโมงที่ 720 จะมีค่ามุมสัมผัสด้านซ้ายเท่ากับ 125.70 องศา ขณะที่ค่ามุมสัมผัสทางด้านขวาเท่ากับ 89.58 องศา ส่วนสาเหตุค่ามุมสัมผัสทางด้านซ้ายของหยดสาร TCE มีค่ามากกว่า 90 องศา เป็นเพราะว่าบริเวณพื้นผิวที่หยดสาร TCE เข้าไปเกาะติดคล้ายกับว่ามีเศษผงฝุ่นหินปูนมาเกาะรวมกันบนพื้นผิวหินปูนที่มีการเกาะติดของสาร TCE รวมไปถึงผงฝุ่นยังมีการแทรกซึมเข้าไปในหยดสาร TCE ทำให้ผลการทดลองค่ามุมสัมผัสสุดท้ายทางด้านซ้ายมีค่ามากกว่า 90 องศา ($\theta > 90^\circ$)

จากผลการทดลองการวัดมุมสัมผัสของหยดสาร TCE บนพื้นผิวหินปูน ที่ล้อมรอบด้วยสารละลายโทลูอินที่มีปริมาณมากกว่าค่าการละลายได้สูงสุดในฐานที่ 2 ดังแสดงในภาพที่ 74 ซึ่งเป็นกราฟแสดงค่ามุมสัมผัสทุกช่วงเวลาทำการทดลอง พบว่า ณ ชั่วโมงที่ 0 การเริ่มต้นสัมผัสของหยดสาร TCE มีค่ามุมสัมผัสเริ่มต้นด้านซ้าย 37.33 องศา และมีค่ามุมสัมผัสเริ่มต้นด้านขวา 24.69 องศา ซึ่งมีค่ามุมสัมผัสชี้วัดถึงความสามารถในการเปียกน้ำอย่างมาก (strongly water wet) ในช่วงเริ่มต้น เมื่อเวลาผ่านไป ณ ช่วงเวลา 16 ชั่วโมงแรกในภาพที่ 75 หยดสาร TCE บนพื้นผิวหินปูนยังคงมีมุมสัมผัสเปลี่ยนแปลงน้อยมากโดยมีค่ามุมสัมผัส ณ เวลา ชั่วโมงที่ 16 มีค่ามุมสัมผัสด้านซ้าย 50.92 องศา และมีค่ามุมสัมผัสด้านขวา 37.72 องศา ซึ่งเมื่อทำการหาค่าความชันในกราฟช่วงนี้จะมีค่ามากกว่า 1 เล็กน้อยในค่ามุมสัมผัสด้านซ้าย และมีค่าความชันน้อยกว่า 1 ในค่ามุมสัมผัสด้านขวา แต่เส้นกราฟยังคงมีแนวโน้มขนานไปแนวแกน X จากนั้นเมื่อทำการถ่ายภาพหยดสาร TCE ทุกวันจนเสร็จสิ้นการทดลองในฐานนี้ ดังแสดงในภาพที่ 76 พบว่ากราฟเริ่มมีค่ามุมสัมผัสทั้งสองด้านเพิ่มมากขึ้น จนชี้วัดได้ว่าพื้นผิวหินปูนในระบบการทดลองนี้มีความสามารถชอบ

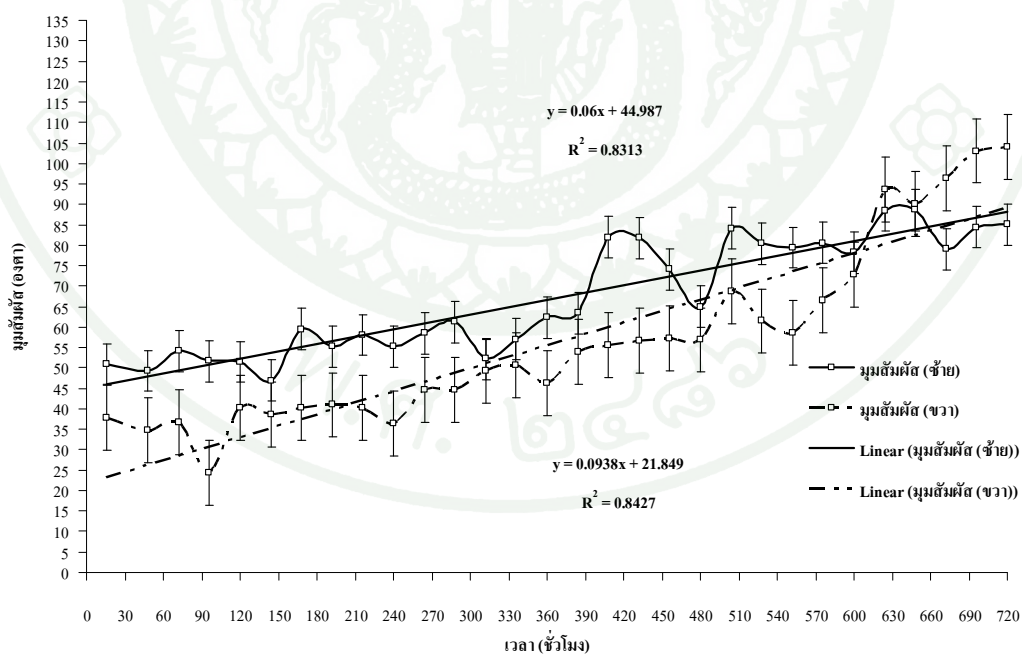
เปียกแบบผสม (neutral wet) จากภาพถ่าย ณ เวลาชั่วโมงที่ 720 มีค่ามุลัมผัสผิสด้านซ้าย 85.11 องศา และมีค่ามุลัมผัสผิสด้านขวา 104.05 องศา ตามลำดับ



ภาพที่ 74 กราฟแสดงการหามุลัมผัสผิสด้าน TCE ที่กระทำบนพื้นผิวหินปูนที่ล้อมรอบด้วยสารละลายโทลูอินเกินค่าการละลายได้สูงสุดเทียบกับการเปลี่ยนแปลงทุกช่วงเวลาในฐานที่ 2

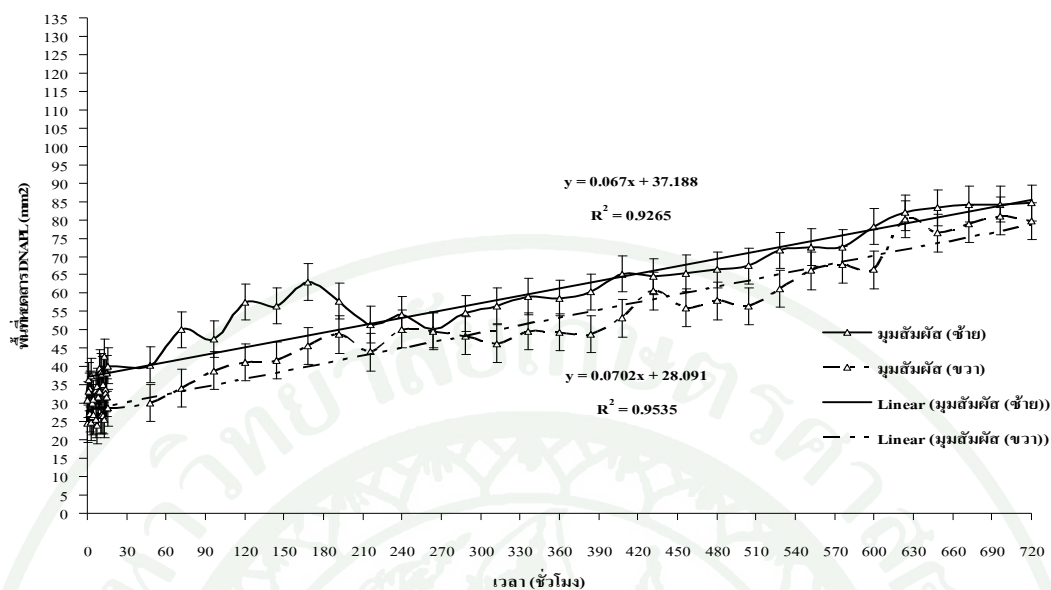


ภาพที่ 75 กราฟแสดงการหาหมุ่สัมผัสหดยศาร TCE ที่กระทำบนพื้นผิวหินปูนที่ล้อมรอบด้วยสารโทลูอินเกินค่าการละลายได้สูงสุดเทียบกับช่วงเวลา 16 ชั่วโมงแรกในฐานะที่ 2

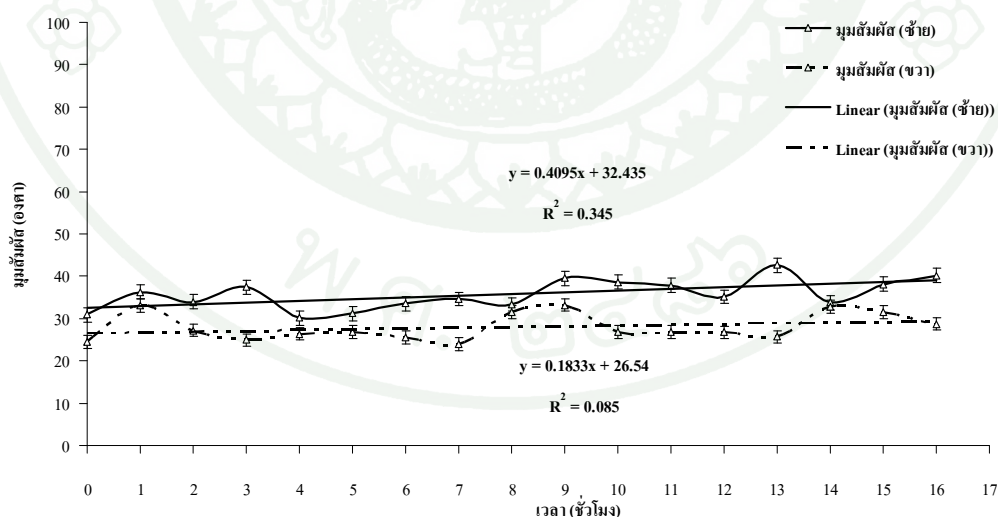


ภาพที่ 76 กราฟแสดงการหาหมุ่สัมผัสหดยศาร TCE ที่กระทำบนพื้นผิวหินปูนที่ล้อมรอบด้วยสารละลายโทลูอินเกินค่าการละลายได้สูงสุดเทียบกับช่วงเวลา 16-720 ชั่วโมงในฐานะที่ 2

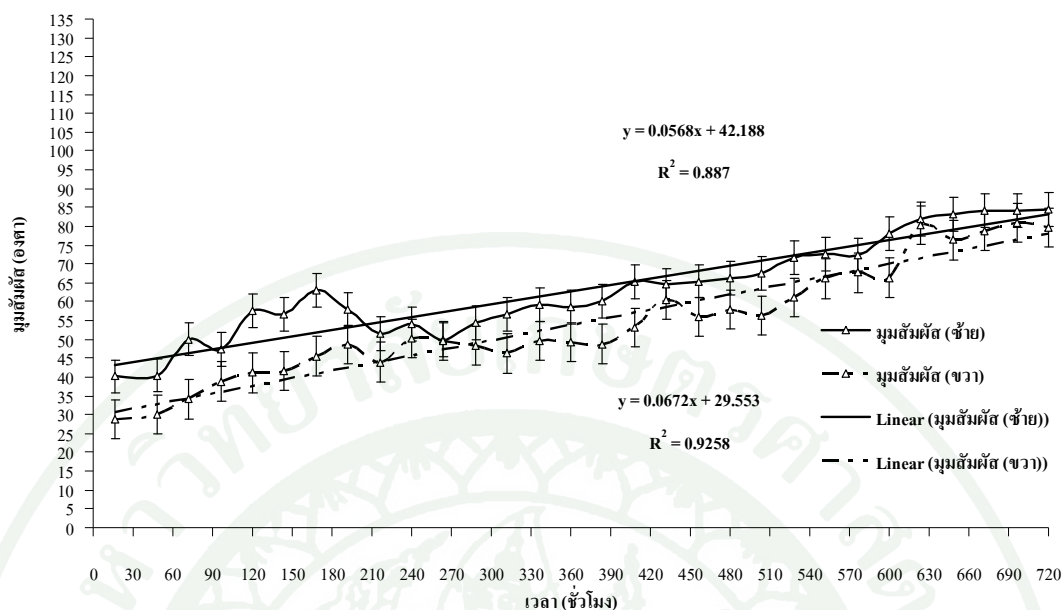
ผลการทดลองการวัดมุมสัมผัสของหยดสาร TCE บนพื้นผิวหินปูน ที่ล้อมรอบด้วยสารละลายโทลูอินที่มีปริมาณมากกว่าการละลายได้สูงสุดในฐานที่ 3 ดังแสดงในภาพที่ 77 กราฟแสดงค่ามุมสัมผัสทุกช่วงเวลาทำการทดลอง พบว่าการเริ่มต้นสัมผัสของหยดสาร TCE มีค่ามุมสัมผัสเริ่มต้นด้านซ้าย 30.91 องศา และมีค่ามุมสัมผัสด้านขวาเริ่มต้นมีค่า 24.42 องศา ซึ่งมีความมุมสัมผัสชี้วัดถึงความสามารถชอบเปียกน้ำอย่างมาก (strongly water wet) เมื่อเวลาผ่านไป ณ ช่วงเวลา 16 ชั่วโมงแรกในภาพที่ 78 หยดสาร TCE บนพื้นผิวหินปูนยังคงมีมุมสัมผัสเปลี่ยนแปลงน้อยมากโดยมีค่ามุมสัมผัส ณ เวลา ชั่วโมงที่ 16 เท่ากับ 40.17 องศา ในมุมสัมผัสด้านซ้าย และ 28.77 องศา ในมุมสัมผัสด้านขวา ซึ่งเมื่อทำการหาค่าความชันในกราฟช่วงนี้จะมีค่าน้อยกว่า 1 ทั้งสองด้านมุมสัมผัส และเส้นกราฟยังคงมีแนวโน้มขนานไปแนวแกน X จากนั้นเมื่อทำการถ่ายภาพหยดสาร TCE ทุกวันจนเสร็จสิ้นการทดลอง ดังแสดงในภาพที่ 79 พบว่ากราฟมีค่ามุมสัมผัสทั้งสองด้านเพิ่มมากขึ้น จนชี้วัดได้ว่าพื้นผิวหินปูนในระบบการทดลองนี้มีความสามารถชอบเปียกแบบผสม (neutral wet) จากภาพถ่าย ณ เวลา ชั่วโมงที่ 720 มีค่ามุมสัมผัสด้านซ้าย 84.57 องศา และมีค่ามุมสัมผัสทางด้านขวา 79.68 องศา ตามลำดับ



ภาพที่ 77 กราฟแสดงการหาหมุ่สัมพัทธ์สลายสาร TCE ที่กระทำบนพื้นผิวหินปูนที่ล้อมรอบด้วยสารละลายโทลูอินเกินค่าการละลายได้สูงสุดเทียบกับการเปลี่ยนแปลงทุกช่วงเวลาในฐานที่ 3



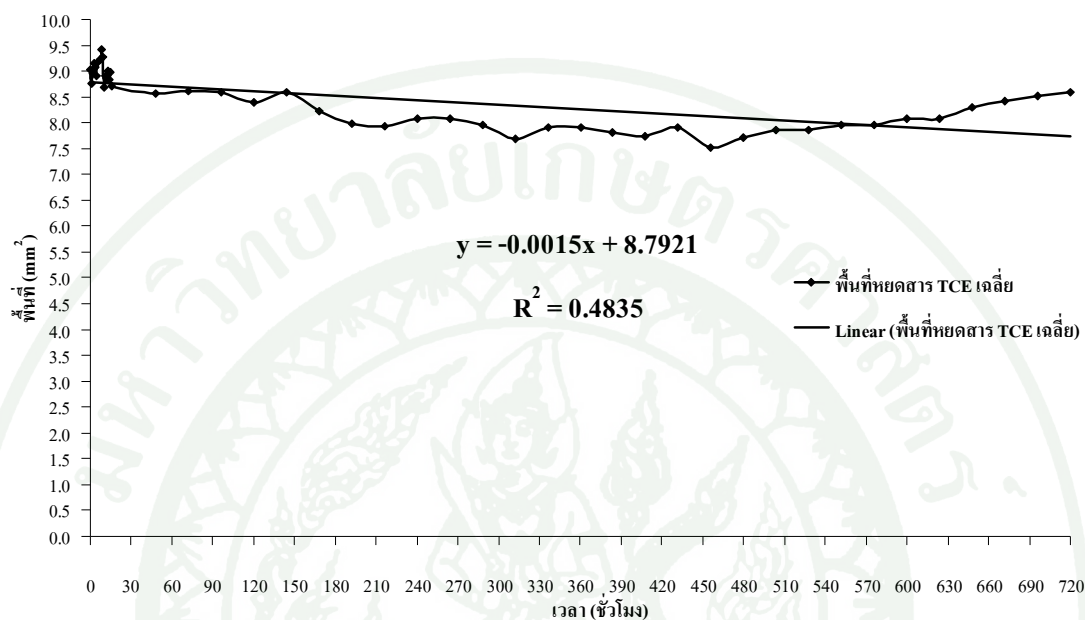
ภาพที่ 78 กราฟแสดงการหาหมุ่สัมพัทธ์สลายสาร TCE ที่กระทำบนพื้นผิวหินปูนที่ล้อมรอบด้วยสารโทลูอินเกินค่าการละลายได้สูงสุดเทียบกับช่วงเวลา 16 ชั่วโมงแรกในฐานที่ 3



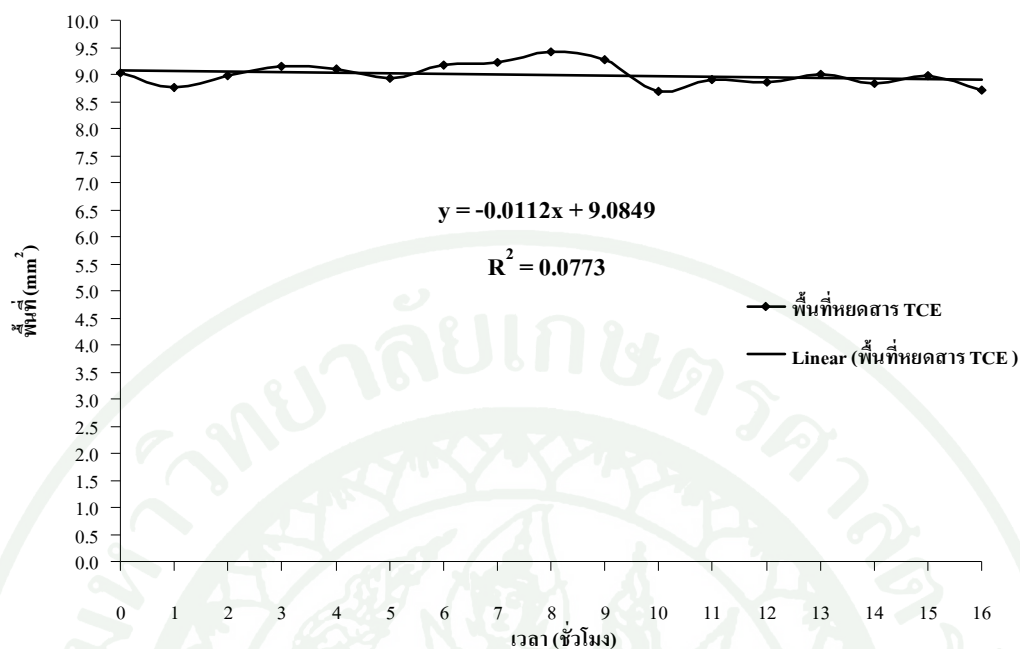
ภาพที่ 79 กราฟแสดงการหาโมมสัมพัทธ์ของสาร TCE ที่กระทำบนพื้นผิวหินปูนที่ล้อมรอบด้วยสารละลายโทลูอินเกินค่าการละลายได้สูงสุดเทียบกับเวลาหลังจากผ่านไป 16 ชั่วโมงแรกจนเสร็จสิ้นการทดลองในฐานที่ 3

เมื่อทำการวัดพื้นที่เฉลี่ยของหยดสาร TCE เทียบกับทุกเวลาการทดลองในระบบการปนเปื้อนสาร NAPL ผสม โดยมีการปนเปื้อนด้วยสารโทลูอินที่มากกว่าค่าการละลายสูงสุด ดังแสดงในภาพที่ 80 จะพบว่าเส้นกราฟมีแนวโน้มค่อนข้างคงที่ (ขนานไปตามแนวแกน X) หมายความว่า หยดสาร TCE มีการสูญเสียมวลสารน้อยมากเนื่องมาจากเกิดการสร้างสภาวะระบบปิดได้เองในระบบการทดลองนี้หลังจากมีการเติมสารโทลูอินที่มีปริมาณมากกว่าค่าการละลายได้สูงสุด ทำให้สามารถมองเห็นสารปนเปื้อนโทลูอินลอยอยู่บนผิวน้ำด้วยความหนาประมาณ 5 มิลลิเมตร จึงส่งผลให้มีการถ่ายเทมวลสาร TCE ระบายออกสู่อากาศภายในเซลล์และภายนอกเซลล์ได้น้อยมาก จะมีแค่เพียงการถ่ายเทสู่ขอบเขตติดต่อกับรอบหยดสาร TCE ได้แก่ สารละลายโทลูอินซึ่งล้อมรอบหยดสาร TCE และรูพรุนของพื้นผิวหินปูนเท่านั้น เริ่มต้นการทดลองสามารถวัดพื้นที่เฉลี่ยของหยดสาร TCE ได้เท่ากับ 9.03 mm^2 จากนั้นเมื่อทำการแสดงรายละเอียดในแต่ละช่วงเวลา โดยในช่วงเวลา 16 ชั่วโมงแรก ยังคงมีแนวโน้มการสูญเสียมวลสาร TCE ค่อนข้างน้อยมาก โดยวัดพื้นที่ ณ ชั่วโมงที่ 16 ได้เท่ากับ 8.70 mm^2 ดังแสดงในภาพที่ 81 หลังจากนั้นทำการทดลองหาพื้นที่ของหยดสาร TCE หลังจากผ่านชั่วโมงที่ 16 ไปจนกระทั่งเสร็จสิ้นการทดลอง จะพบว่าเหลือมวลสาร

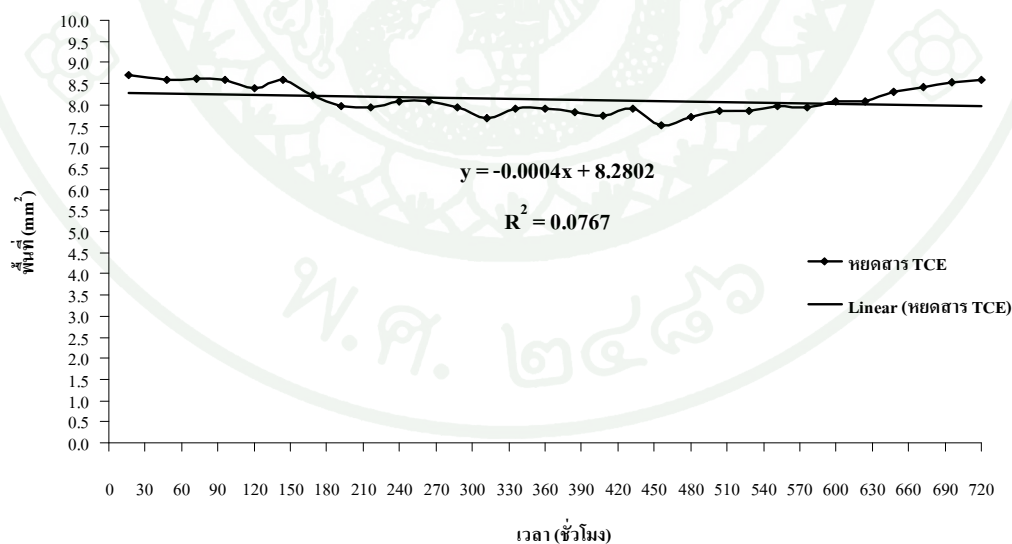
ค่อนข้างมาก เมื่อทำการวัดพื้นที่ ณ ชั่วโมงที่ 720 จะมีมวลสารเหลือเท่ากับ 8.59 mm^2 ดังแสดงให้เห็นจากภาพที่ 82



ภาพที่ 80 กราฟแสดงการหาพื้นที่เฉลี่ยของหดยดสาร TCE บนพื้นผิวหินปูนที่ล้อมรอบด้วยสารละลายไทลูอินเกินค่าการละลายได้สูงสุดเทียบกับการเปลี่ยนแปลงทุกช่วงเวลา



ภาพที่ 81 กราฟแสดงการหาพื้นที่เฉลี่ยของหยดสาร TCE บนพื้นผิวหินปูนที่ล้อมรอบด้วยสารละลายไทลูอินเกินค่าการละลายสูงสุดเทียบกับการเปลี่ยนแปลงช่วงเวลา 16 ชั่วโมงแรก



ภาพที่ 82 กราฟแสดงการหาพื้นที่เฉลี่ยของหยดสาร TCE บนพื้นผิวหินปูนที่ล้อมรอบด้วยสารละลายไทลูอินเกินค่าการละลายสูงสุดเทียบกับการเปลี่ยนแปลงเวลาหลังผ่าน 16 ชั่วโมงแรกจนเสร็จสิ้นการทดลอง

จากผลการทดลองการวัดมุมสัมผัสหาคัดสาร TCE แบบก้าวหน้าและมุมสัมผัสหาคัดสาร TCE แบบถดถอยบนพื้นผิวหินปูน พื้นผิวซิลิกอน และพื้นผิวควอตซ์ ภายใต้ระบบการปนเปื้อนแบบผสม ซึ่งล้อมรอบด้วยสารละลายโทลูอิน สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 11

ตารางที่ 11 มุมสัมผัสเริ่มต้น (advancing contact angle) และมุมสัมผัสสุดท้าย (receding contact angle) ของการทดลองวัดมุมสัมผัส TCE บนพื้นผิวหินปูน ซึ่งล้อมรอบด้วยสารละลายโทลูอินที่มีปริมาณมากกว่าค่าการละลายได้สูงสุด

ระบบ	มุมสัมผัสเริ่มต้น (advancing contact angle), องศา			มุมสัมผัสสุดท้าย (receding contact angle), องศา	
	ฐาน	ซ้าย	ขวา	ซ้าย	ขวา
1. หาคัดสาร TCE บนพื้นผิวหินปูน ล้อมรอบด้วยสารละลายโทลูอิน	1	70.23	48.14	125.7	89.58
	2	37.33	24.69	85.11	104.05
	3	30.91	24.42	84.57	79.68
1.1 มุมสัมผัสเฉลี่ย (องศา)		46.16	32.42	98.46	91.10
1.2 มุมสัมผัสเฉลี่ยรวม (องศา)		39.29		94.78	
1.3 wettability assessment		strongly water wet		neutral wet	
3. หาคัดสาร TCE บนแผ่นซิลิกอน ล้อมรอบด้วยสารละลายโทลูอิน (จิรายุ, 2009)	เฉลี่ย	71.2		159.2	
4. หาคัดสาร TCE บนแผ่นควอตซ์ ล้อมรอบด้วยสารละลายโทลูอิน (จิรายุ, 2009)	เฉลี่ย	66.3		150.7	

ผลการทดลองจากตารางที่ 11 เมื่อทำการเปรียบเทียบพื้นผิววัตถุ 3 พื้นผิว ซึ่งได้นำมาใช้ในการหาค่ามุมสัมผัส ได้แก่ พื้นหินปูน พื้นผิวซิลิกอน (จิรายุ, 2009) และพื้นผิวควอตซ์ (จิรายุ, 2009)

พบว่ายังคงเป็นไปในแนวทางเดียวกับระบบการปนเปื้อนด้วยสาร NAPL เพียงชนิดเดียว ซึ่งเมื่อทำการถ่ายภาพพร้อมกับวัดมุมสัมผัสเริ่มต้นของหยดสาร TCE พื้นผิวหินปูนจะมีค่าความสามารถชอบเปียกน้ำ (strongly water wet) มากกว่าพื้นผิวควอตซ์และพื้นผิวซิลิโคนตามลำดับ และเมื่อทำการทดลองจนถึงการวัดมุมสัมผัสแบบถดถอย พื้นผิวหินปูนมีความสามารถชอบเปียกผสม (neutral wet) แต่มีสัดส่วนความชอบเปียกน้ำมากกว่าชอบเปียกน้ำมัน ขณะที่พื้นผิวควอตซ์และพื้นผิวซิลิโคนจะมีความสามารถชอบเปียกด้วยน้ำมันอย่างมาก (NAPL wet) โดยมีค่ามุมสัมผัสสุดท้ายสูงถึง 150.7 องศา และ 159.2 องศา ตามลำดับ

เมื่อเปรียบเทียบผลการทดลองหาความสัมพันธ์ความสามารถเปียกได้ของ NAPL ปนเปื้อนผสมในชั้นตัวกลางหินปูน โดยใช้วิธีการทดลองหาความสัมพันธ์ระหว่างความดันคาปิลลารีและความอึดตัวด้วยน้ำจากการทดลอง 2 วัฏจักรระหว่างกลไกการระบายน้ำและการเติมน้ำ ซึ่งมีลำดับการได้รับแรงดันจากสารปนเปื้อน LNAPL ก่อนได้รับแรงดันจากสารปนเปื้อน DNAPL กับน้ำ ดังแสดงผลการทดลองในตารางที่ 8 และวิธีการวัดมุมสัมผัสของหยดสาร DNAPL บนพื้นผิวหินปูน ซึ่งล้อมรอบด้วยสารละลายโทลูอินที่มีปริมาณมากกว่าค่าการละลายได้สูงสุด ดังแสดงผลการทดลองในตารางที่ 11 พบว่าผลการทดลองทั้งสองวิธีมีแนวโน้มเป็นไปในแนวทางเดียวกันกับการวิเคราะห์เปรียบเทียบรูปแบบการทดลองของชั้นตัวกลางที่ปนเปื้อน DNAPL เพียงชนิดเดียว กล่าวคือ จากการคำนวณค่าดัชนี USBM ทั้ง 2 วัฏจักร จากพื้นที่ใต้กราฟกลไกการระบายน้ำและการเติมน้ำของระบบชั้นตัวกลางได้รับความดันจากสารโทลูอิน ก่อนได้รับความดันจากสาร TCE กับน้ำ (ระบบการทดลอง โทลูอิน-น้ำ-TCE-น้ำ) โดยมีค่าดัชนี $USBM_1$ เท่ากับ 0.30 และดัชนี $USBM_2$ เท่ากับ 1.71 สามารถชี้วัดได้ว่าพื้นผิวหินปูนมีความสามารถชอบเปียกน้ำได้มากขึ้น (strongly water wet) ขณะที่ทำการทดลองวัดมุมสัมผัสเริ่มต้น ($\theta < 39.29^\circ$) จนกระทั่งถึงการทดลองวัดมุมสัมผัสสุดท้ายที่มีการเปลี่ยนแปลงไปตามเวลา พบว่าพื้นผิวหินปูนมีแนวโน้มชอบเปียกแบบผสม ($\theta < 94.78^\circ$) แต่มีความชอบเปียกน้ำมากกว่าชอบเปียกน้ำมัน และจากการวิเคราะห์ในเรื่องการบำบัดสาร NAPL ออกจากชั้นตัวกลาง จะพบว่าการบำบัดสาร TCE เป็นสิ่งที่ทำได้ยากกว่าการบำบัดสารโทลูอิน จากการพิจารณาการใช้ความดันคาปิลลารีของสาร TCE ในการระบายน้ำมากกว่าความดันคาปิลลารีของสารโทลูอิน ซึ่งระดับความดันคาปิลลารีสุดท้ายในการระบายน้ำออกจากชั้นตัวกลางมีค่าประมาณ 17.77 เซนติเมตร และเทียบกับผลการวัดมุมสัมผัส มีผลทำให้พื้นผิวหินปูนชอบเปียกน้ำ โดยมีค่าองศามุมสัมผัสน้อยกว่า 90 องศา ($\theta < 90^\circ$)

ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่าพื้นผิวหินปูนเมื่อมีการปนเปื้อนด้วยสาร DNAPL ทั้งในรูปแบบการปนเปื้อน NAPL เพียงชนิดเดียวและการปนเปื้อน NAPL แบบผสม จะมีแนวโน้มความสามารถชอบเปียกน้ำมากกว่าชอบเปียกน้ำมัน โดยมีค่าองศาการสัมผัสผิวน้อยกว่า 90 องศา ($\theta < 90^\circ$) เป็นส่วนใหญ่

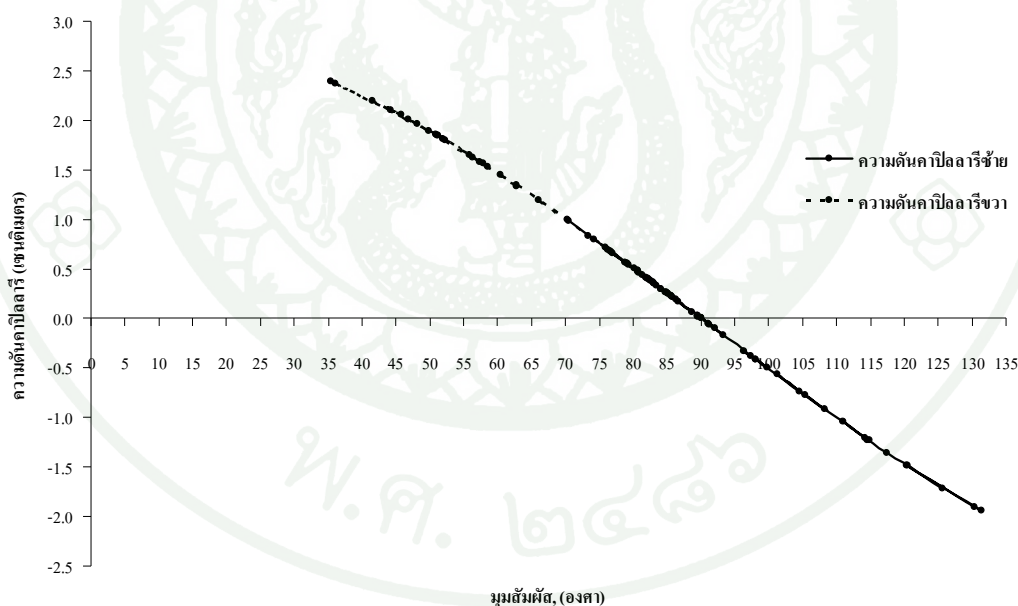
การทดลองทั้งสองวิธีมีปัจจัยองค์ประกอบหลายอย่างที่แตกต่างกัน จนอาจไม่สามารถเปรียบเทียบกันได้อย่างแม่นยำเช่น การคำนึงถึงเรื่องช่องว่างในชั้นตัวกลาง (volume void) ระดับแรงดันคาปิลลารีของสารที่ใช้ในการทดลอง (ในที่นี้คือสาร TCE) กลไกการแทนที่ของสารในชั้นตัวกลางระหว่างการทดลอง แรงดึงระหว่างผิวสัมผัสของสารและชั้นตัวกลาง กลไกการปนเปื้อนผสมของสาร NAPL ลักษณะรายละเอียดการแปลผลการทดลอง ซึ่งล้วนมีผลให้การแปลผลการทดลองที่ออกมามีความแตกต่างกันไปบ้างแต่ก็มีแนวโน้มไปในแนวทางเดียวกัน

การทดลองสุดท้ายคือการหาค่าความสัมพันธ์ระหว่างความดันคาปิลลารีกับมุมสัมผัสจากสมการลาปลาซในสมการที่ 26 ของหดยศสาร TCE บนพื้นผิวหินปูนภายใต้ระบบการปนเปื้อนสาร NAPL แบบผสม ซึ่งถูกล้อมรอบด้วยสารละลายโทลูอิน จำนวน 3 ฐานการทดลอง ดังแสดงผลการทดลองตามภาพที่ 83 ซึ่งเป็นผลการทดลองฐานที่ 1 ภาพที่ 84 ซึ่งเป็นผลการทดลองฐานที่ 2 และภาพที่ 85 ซึ่งเป็นผลการทดลองฐานที่ 3 ตามลำดับ

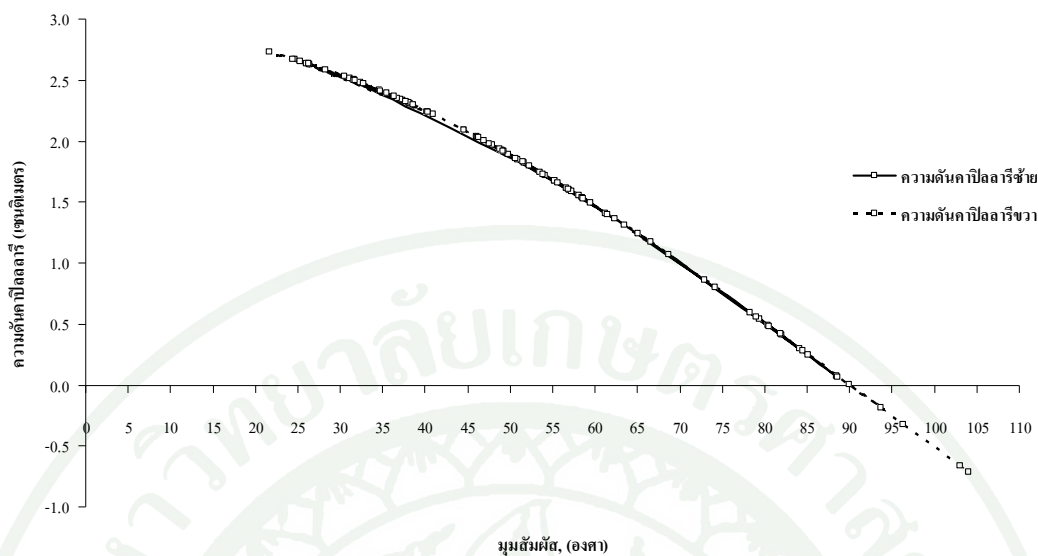
จากผลการทดลองพบว่าเมื่อมีผลไปในแนวทางเดียวกันทั้ง 3 ฐานการทดลอง รวมไปถึงในระบบการปนเปื้อนสาร NAPL เพียงชนิดเดียวด้วย ตามทฤษฎีสมการลาปลาซได้อธิบายความดันคาปิลลารีสัมพันธ์กับมุมสัมผัส ซึ่งกล่าวไว้ในส่วนวิจารณ์ผลการทดลองภาพที่ 64-66 แล้ว จากผลการทดลองพื้นผิวหินปูน พบว่าจะมีการชะล้างได้สาร NAPL บนพื้นผิวยากกว่า พื้นผิวซิลิโคน รวมทั้งพื้นผิวควอตซ์ เนื่องจากค่ามุมสัมผัสที่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลาการทดลอง ยังคงบ่งชี้ถึงพื้นผิวหินปูนมีความสามารถชอบเปียกผสมในสัดส่วนการเปียกน้ำมากกว่าการชอบเปียกแบบน้ำมัน กล่าวคือมีค่ามุมสัมผัสน้อยกว่าหรือเท่ากับ 90 องศา ($\theta \leq 90^\circ$) และมีผลไปในแนวทางเดียวกันทั้ง 3 ฐานการทดลอง ส่งผลให้มีค่าความดันคาปิลลารีมากกว่าหดยศสาร TCE บนพื้นผิวซิลิโคนและควอตซ์

ในส่วนผลการทดลองความดันคาปิลลารีกับมุมสัมผัสทั้ง 3 ฐานการทดลอง พบว่า ทั้ง 3 การทดลองมีค่าความดันคาปิลลารีสุดท้ายใกล้เคียงกันมาก แต่ก็มีค่าความดันคาปิลลารีสุดท้ายในฐาน

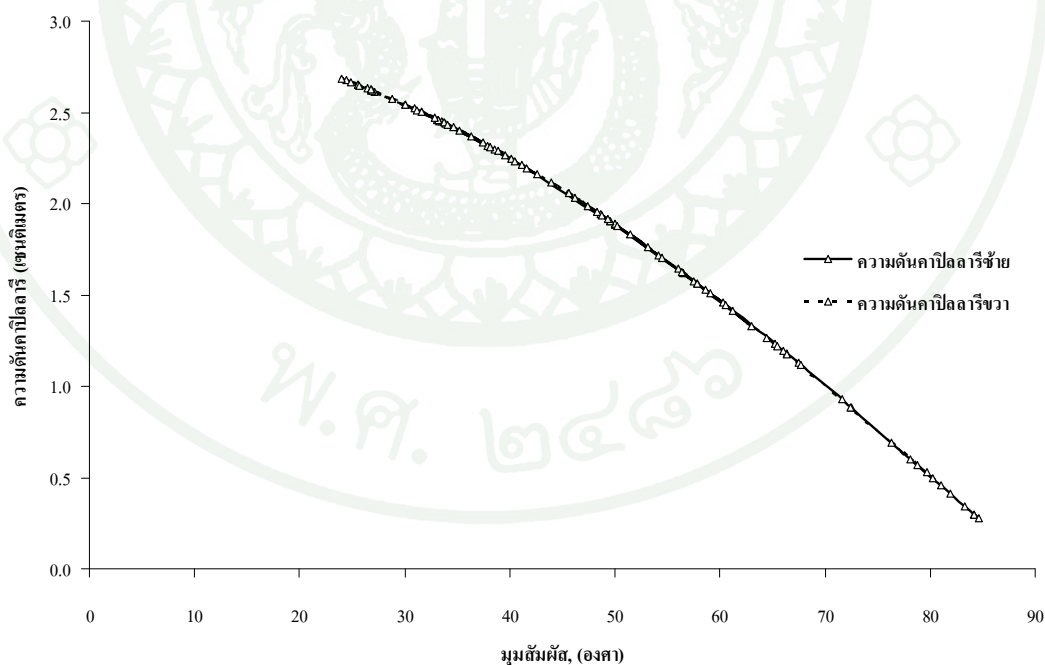
ที่ 1 ของมุมสัมผัสทางด้านซ้ายที่อาจเกิดความผิดพลาดจากการที่มีเศษฝุ่นผงหินปูนเข้าไปเกาะติด และแทรกซึมอยู่ในหยดสาร TCE เป็นต้น นอกจากนี้ปัจจัยที่เป็นข้อจำกัดในการทดลอง ได้แก่ สาเหตุจากสภาพความขรุขระของพื้นผิวหินปูนที่มีความแตกต่างกัน ความหลากหลายของสภาพพื้นที่ที่เลือกหินปูนมาทำการทดลอง ถึงแม้จะเป็นบริเวณเดียวกัน แต่ก็อาจมีส่วนผสมในเนื้อหินแตกต่างกัน รวมไปถึงการเปลี่ยนแปลงของแต่ละพื้นที่ที่ไม่เหมือนกัน ซึ่งทำให้เกิดความแตกต่างกันของผลการทดลองทั้ง 3 ฐาน แต่จากภาพรวมก็มีแนวโน้มไปในแนวทางเดียวกัน โดยฐานที่ 1 มีค่าความดันคาปิลลารีสุดท้าย -1.71 เซนติเมตร ที่มุมสัมผัสทางด้านซ้าย และมีความดันคาปิลลารีสุดท้าย 0.02 เซนติเมตร ที่มุมสัมผัสทางด้านขวา ณ เวลาทำการทดลองชั่วโมงที่ 720 ขณะที่ฐานที่ 2 มีค่าความดันคาปิลลารีสุดท้าย 0.25 เซนติเมตร ที่มุมสัมผัสทางด้านซ้าย และมีความดันคาปิลลารีสุดท้าย -0.71 เซนติเมตร ที่มุมสัมผัสทางด้านขวา ณ เวลาทำการทดลองชั่วโมงที่ 720 ส่วนฐานที่ 3 มีค่าความดันคาปิลลารีสุดท้าย 0.28 เซนติเมตร ที่มุมสัมผัสทางด้านซ้าย และมีความดันคาปิลลารีสุดท้าย 0.53 เซนติเมตร ที่มุมสัมผัสทางด้านขวา ณ เวลาทำการทดลองชั่วโมงที่ 720



ภาพที่ 83 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันคาปิลลารีกับมุมสัมผัสของหยดสาร TCE บนพื้นผิวหินปูน ซึ่งล้อมรอบด้วยสารละลายโทลูอิน ฐานที่ 1



ภาพที่ 84 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันคัปโลรีกับมุมสัมพัทธ์ของหยดสาร TCE บนพื้นผิวหินปูน ซึ่งล้อมรอบด้วยสารละลายโทลูอิน ฐานที่ 2



ภาพที่ 85 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันคัปโลรีกับมุมสัมพัทธ์ของหยดสาร TCE บนพื้นผิวหินปูน ซึ่งล้อมรอบด้วยสารละลายโทลูอิน ฐานที่ 3

สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุป

จากผลการทดลองความสามารถเปียกได้ในชั้นตัวกลางหินปูนด้วยวิธีการหาคัดชั้น USBM จากกราฟส่วนโค้งฮิสเทอรีซิสระหว่างความสัมพันธ์ความดันคาปิลลารี-ความอึดตัวด้วยน้ำ ที่เกิดจากกลไกการระบายน้ำและการเติมน้ำในชั้นตัวกลางในระบบการทดลองต่างๆ กับวิธีการวัดมุมสัมผัสและหาพื้นที่หยดสาร TCE บนพื้นผิวหินปูนในระบบการทดลองต่างๆ สามารถสรุปผลการทดลองได้ดังนี้

1. ผลการทดลองหาความสัมพันธ์ระหว่างความดันคาปิลลารีและความอึดตัวด้วยน้ำในระบบแรงดันสารโทลูอินกับน้ำ (LNAPL-water system) สามารถชี้วัดได้ว่าชั้นตัวกลางชอบเปียกแบบผสม (neutral wetting solid) จากการวิเคราะห์คัดชั้น USBM ทั้ง 2 วัฏจักร ขณะที่ระบบแรงดันสาร TCE กับน้ำ (DNAPL-water system) สามารถชี้วัดได้ว่าชั้นตัวกลางชอบเปียกน้ำมากขึ้น (strongly water wetting solid) จากการวิเคราะห์คัดชั้น USBM 2 วัฏจักร ส่วนระบบความดันคาปิลลารีการปนเปื้อน NAPL แบบผสมคือ 1.ระบบชั้นตัวกลางได้รับความดันจากสารโทลูอินก่อนได้รับความดันจากสาร TCE กับน้ำ (LNAPL-water-DNAPL-water system) สามารถชี้วัดได้ว่าชั้นตัวกลางชอบเปียกน้ำมากขึ้น (strongly water wetting solid) ซึ่งวิเคราะห์จากคัดชั้น USBM 2 วัฏจักรเช่นเดียวกับระบบชั้นตัวกลางที่ได้รับความดันจากสาร TCE เพียงชนิดเดียวกับน้ำ 2.ระบบชั้นตัวกลางที่ได้รับความดันคาปิลลารีจากสาร TCE ก่อนได้รับความดันคาปิลลารีจากสารโทลูอินกับน้ำ (DNAPL-water-LNAPL-water system) สามารถชี้วัดได้ว่าชั้นตัวกลางชอบเปียกน้ำน้อยลง (neutral wetting solid) จากการวิเคราะห์คัดชั้น USBM 2 วัฏจักร

2. ผลการทดลองหาค่ามุมสัมผัสของหยดสารไตรคลอโรเอทิลีนบนพื้นผิวหินปูน ในระบบการปนเปื้อนด้วยสาร NAPL เพียงชนิดเดียวและระบบการปนเปื้อนด้วยสาร NAPL แบบผสม จำนวนซ้ำการทดลองอย่างละ 3 ฐานการทดลองในแต่ละระบบ พบว่าในระบบการปนเปื้อนด้วยสาร NAPL เพียงชนิดเดียว และล้อมรอบด้วยน้ำ สามารถชี้วัดค่ามุมสัมผัสเริ่มต้นว่าพื้นผิวหินปูนมีความสามารถชอบเปียกแบบน้ำอย่างมาก (strongly water wetting solid) ทั้ง 3 ฐานการทดลอง และสามารถชี้วัดค่ามุมสัมผัสสุดท้ายว่าพื้นผิวหินปูนมีความสามารถชอบเปียกแบบผสม (neutral water wetting solid) ในสัดส่วนที่ชอบเปียกน้ำมากกว่าชอบเปียกน้ำมัน ขณะที่ผลการทดลองในระบบการ

ปนเปื้อนด้วยสาร NAPL แบบผสม และล้อมรอบด้วยสารละลายโทลูอินที่มากกว่าค่าความสามารถการละลายได้สูงสุด เพื่อจำลองระบบปิด สามารถชี้วัดค่ามุมสัมผัสเริ่มต้นว่าพื้นผิวหินปูนชอบเปียกแบบน้ำอย่างมาก (strongly water wetting solid) ทั้ง 3 ฐานการทดลอง และสามารถชี้วัดค่ามุมสัมผัสสุดท้ายว่าพื้นผิวหินปูนชอบเปียกแบบผสม (neutral water wetting solid) ในสัดส่วนที่ชอบเปียกน้ำมากกว่าชอบเปียกน้ำมัน เช่นเดียวกับการทดลองระบบการวัดมุมสัมผัสที่มีการปนเปื้อน NAPL เพียงชนิดเดียว

3. ผลการทดลองการหาค่าความสามารถเปียกได้สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานทางวิศวกรรมในการบำบัดพื้นที่ปนเปื้อนจริงได้ โดยการนำค่าความดันคาปิลลารีไปใช้ในสมการ Darcy's Law เพื่อหาความเร็วการไหลของน้ำใต้ดินในระบบที่ประกอบด้วยหลายเฟส และนำความเร็วการไหลของน้ำใต้ดินไปใช้ในสมการสมดุลมวล (mass balance equation) ซึ่งเป็นสมการที่เกี่ยวข้องกับการเคลื่อนย้ายตัวของ NAPL และ Pankow and Cherry (1996) ได้อธิบายถึงการใช้แบบจำลองเชิงตัวเลข (numerical modeling) ซึ่งเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพและมีค่าใช้จ่ายน้อย โดยการใช้สมการสมดุลมวลและขั้นตอนวิธีเชิงคอมพิวเตอร์ (computational algorithm) วิเคราะห์เพื่อให้เกิดความเข้าใจเกี่ยวกับกระบวนการในการเคลื่อนตัวของ NAPL มากขึ้น และพฤติกรรมการเคลื่อนตัวของ NAPL ที่เป็นไปได้ รวมถึงสามารถลดค่าใช้จ่ายในการลงทุนและเกิดแนวทางการบำบัดพื้นที่ปนเปื้อนไปในทางที่ถูกต้อง โดยนำมาซึ่งการใช้ระยะเวลาบำบัดสั้นลงด้วย

ข้อเสนอแนะ

1. การทดลองหาความสัมพันธ์ระหว่างความดันคาปิลลารีและความอิ่มตัวด้วยน้ำในระบบแรงดันการปนเปื้อนสารไตรคลอโรเอธิลีนเพียงชนิดเดียวและระบบแรงดันการปนเปื้อนสาร NAPL แบบผสมควรมีการทำการทดสอบหาระดับความสูงต่อการระบายน้ำและการเติมน้ำเข้าออกจากชั้นตัวกลางให้แน่นอนและปลอดภัยต่อการรั่วหรือนิกขาดของวัสดุกรองสารเช่น กระดาษกรอง PTFE filter เป็นต้น ซึ่งจะทำให้ผลการทดลองมีความถูกต้องแม่นยำมากขึ้น

2. พื้นผิวหินปูนที่ใช้ในการวัดมุมสัมผัสควรเป็นพื้นผิวที่เรียบ ปราศจาก ผงฝุ่นหินปูน และควรเป็นตัวอย่างหินปูนที่มีจากก้อนเดียวกัน เพื่อป้องกันการผิดพลาดจากตัวแปรนอกกระบวนการทดลอง

3. ในการถ่ายภาพเพื่อวัดมุมสัมผัสหอยคดสารไตรคลอโรเอธิลีนบนพื้นผิวหินปูน ควรมีการทดลองฟังก์ชันในตัวกล้องถ่ายภาพให้แน่ใจและปรับค่าได้ถูกต้องก่อนทำการถ่ายภาพเก็บผลการทดลองต่อไป เพื่อให้ได้ความคมชัดของสเกล และภาพหอยคดสาร นอกจากนี้แล้วควรทำการใช้สเกลที่ละเอียดมากขึ้นเพื่อป้องกันผลความผิดพลาดจากการคำนวณวัดพื้นที่ เป็นต้น



เอกสารและสิ่งอ้างอิง

- กฤษฎา ชูติมา. 2529. **หลักเคมีทั่วไป เล่ม 2**. พิมพ์ครั้งที่ 8. หจก. โรงพิมพ์ชวน-พิมพ์, กรุงเทพฯ.
- กรมทรัพยากรน้ำบาดาล. 2550. **โครงการศึกษาวิจัยการประเมินความเสี่ยงของการปนเปื้อนของสารเคมีในน้ำใต้ดินบริเวณ ต.กลางดง อ.ปากช่อง จ.นครราชสีมา**. คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. กรุงเทพฯ
- กรณีการ์ สิริสิงห. 2549. **เคมีของน้ำ น้ำโสโครก และการวิเคราะห์**. พิมพ์ครั้งที่ 4. วิชาการพิมพ์ บางซื่อ, กรุงเทพฯ.
- กษม จันทน์เนียม. 2552. **ความสัมพันธ์เชิงฮิสเทอรีซิสระหว่างความดันคาปิลลารี - การอิ่มตัวด้วยน้ำ - ความสามารถในการซึมผ่านสัมพัทธ์สำหรับการปนเปื้อนของเหลวที่ไม่ใช่น้ำแบบผสม**. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- เกรียงศักดิ์ อุดมสินโรจน์. 2546. **ของเสียอันตราย (Hazardous waste)**. พิมพ์ครั้งที่ 1. ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยรังสิต, กรุงเทพฯ.
- จิรายุ คงสมแก้ว. 2552. **ความสามารถเปียกได้ของพื้นผิวด้วยวิธีการวัดมุมสัมผัสเมื่อมีการปนเปื้อนแบบผสมจากของเหลวที่ไม่ใช่น้ำ**. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- ทบวงมหาวิทยาลัย. 2526. **เคมี เล่ม 1**. พิมพ์ครั้งที่ 2. สำนักพิมพ์อักษรเจริญทัศน์, กรุงเทพฯ.
- รัชฎา รุจิพัฒน์พงศ์. 2540. **หินปูนและโคลไ่มต์กับการนำไปใช้ประโยชน์ในภาคใต้**. รายงานวิจัย. สำนักงานกรมทรัพยากรธรณีเขต 1 สงขลา. กรมทรัพยากรธรณี. กระทรวงอุตสาหกรรม.
- วิบูลย์ แก่นท้าว. 2551. **การศึกษาทางเลือกการจำกัดขอบเขต (Containment) การปนเปื้อนในบริเวณ ต.กลางดง อ.ปากช่อง จ.นครราชสีมา**. ปัญหาอิสระปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

วีระพล เต็มสมบัติ. 2533. **หลักอุทกวิทยา (Principal of Hydrology)**. พิมพ์ครั้งที่ 1.
ฟิสิกส์เซ็นเตอร์, กรุงเทพฯ.

ศุภสิทธิ์ นาคเสน. 2546. **กล้องดิจิตอลแบบสมบูรณ์**. ครั้งที่ 1. อินโฟเพรส, นนทบุรี.

สมพงษ์ จันทรโพธิ์ศรี. 2542. **เคมีอินทรีย์ เล่ม 1**. สำนักพิมพ์ศูนย์ส่งเสริมวิชาการ, กรุงเทพฯ.

อรวินท์ เมฆพิรุณ. 2549. **108 เทคนิคการถ่ายภาพด้วยกล้องดิจิตอล**. โปรวิชั่น, กรุงเทพฯ.

Abriola, L.M. and A.H. Demand. 2000. The migration and entrapment of DNAPLs in physically and chemically heterogeneous porous media. **Final report U.S. department of energy**. Project Number: 54680 Grant Number: DE-FG07-96ER14702, 1-23.

Adamson, A.W. 1982. **Physical chemistry of surfaces**. Fourth edition. Wiley. New york, NY.

Anderson, W.G. 1986. Wettability literature survey. Part 2: Wettability measurements. **J. Pet. Technol.** 38 (11): 1246-1262.

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 A: Physicochemical and Engineering Aspects**. Elsevier Science Publishers. 142 (1998) 183-188.

Bradford, S.A. and F.J. Leij. 1995. Fractional wettability effects on two- and three-fluid capillary pressure-saturation relations. **Journal of Contamination hydrology**. 20: 89-109.

Bikerman, J.J. 1970. **Physical Surfaces**. Academic press, New York.

Boulding, J.R. and J.S. Ginn. 2004. **Practical Handbook of soil, vadose zone, and ground-water contamination**. 2nd edition. Lewis Publishers. Florida.

- Cohen, R.M., J.W. mercer, And J. Matthews. 1993. **DNAPL site evaluation**. C.K. Smoley. Boca Raton. FL.
- Crocker, M.E. and L.M. Marchin. 1988. Wettability and adsorption characteristics of crude-oil asphaltenes and polar fractions. **J. Pet. Technol.** 40 (4): 470-474.
- Dane, J.H., M. Oostrom, and B.C. Missildine. 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.
- David, S.N. and R.J.M. Dewiest. 1966. **Hydrogeology**. John Wiley & Sons, Inc. New York.
- Demond, A.H. and Ryder, J.L. 2008. Wettability hysteresis and its implications for DNAPL source zone distribution. **Journal of contamination hydrology**. 102: 39-48.
- Domenico, P.A. and F.W. Schwartz. 1990. **Physical and Chemical Hydrogeology**. John Wiley & Sons, Inc. Singapore.
- Domenico, P.A. and F.W. Schwartz. 1998. **Physical and Chemical hydrogeology**. 2nd edition. John wiley & sons, INC. New York.
- Donaldson, E.C., R.D. Thomas. And P.B. Lorenz. 1969. Wettability determination and its effect on recovery efficiency. **Soc. Pet. Eng. J.** 9: 13-20.
- Dullien, F.A.L. 1979. **Porous media, fluid transport and pore structure**. Academic Press. New York, NY.
- Fetter, C.W. 1999. **Contaminant hydrology**. Second edition. Prentice-Hall, Inc. New Jersey.

- Freeze, R. A. and J.A. Cherry. 1979. **Groundwater**. Prentice-Hall, Inc., New Jersey.
- Guy, D.W., R.J. Crawford. and D.E. Mainwaring. 1996. The wetting behavior of several organic liquids in water on coal surfaces. **Fuel** **75 (2)**, 238-242.
- Harr, M.E. 1962. **Groundwater and seepage**. McGraw-hill book company., New York.
- Ishakoglu, A. and A.F. Baytas. 2004. The influence of contact angle on capillary-saturation relation in porous medium including various liquids. **International journal of engineering science**. 43: 744-755.
- Israelachvili, J.N. 1991. **Intermolecular and surface forces**. 2nd edition. Academic Press. San Diego.
- Kueper, B.H. and E.O. Frind. 1991b. Two-phase flow in heterogeneous porous media, 2. Model application. **Water Resource Research**, 27, 1059-1070.
- Lago, M. and M. Araujo. 2001. **Physica A**. 289: 1-17.
- Lagrega, M.D., P.L. Buckingham and J.C. Evans. 1994. **Hazardous waste management. International editions**. McGraw-hill, INC. New York.
- Lehr, J., M. Hyman., T.E. Gass. and W. Seever. 2002. **Hanbook of complex environmental remediation problems**. McGraw-Hill, Inc. New York, NY.
- Lord, D.L., K.F. Hayes., A.H. Demond. and A. Salehzadeh. 1997. Influence of organic acid solution chemistry on subsurface transport properties. 1. surface and interfacial tension. **Environ. Sci. Technol.** 31: 2045-2051.

- Manaskaya, S.M. and T.V. Drozdova. 1968. **Geochemistry of organic substances**. Pergamon Press. New York. 347 pp.
- 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**. 6: 107-163.
- Morrow, N.R., Chatzis, I., Taber, J.J., 1988. Entrapment and mobilization of residual oil in bead packs. **SPE Reservoir Engineering** 3 (3): 927-934.
- Pankow J.F. and J.A. Cherry. 1996. **Dense Chlorinated Solvents and other DNAPLs in Groundwater**. Waterloo press, Oregon, USA.
- Parks, G.A. and P.C. de Bruyn. 1962. The zero point of charge of oxides. **The journal of Physical Chemistry**. 66, 967-973.
- Pinder, G.F. and M.A. Celia. 2006. **Subsurface hydrology**. John wiley & sons, INC. New York.
- Powers, S.E. and M.E. Tamblin. 1995. **Wettability of porous media after exposure to synthetic gasolines**. Elsevier Science B.V., USA.
- Robin, M. and X. Koci. 1996. Wettability heterogeneities on planar minerals: application to reservoir rocks. In: **Morrow, N.R. (Ed.), Proceeding of 3rd international symposium on reservoir wettability and its effect on oil recovery**. University of Wyoming, Laramie, NY, pp. 47-53.
- Rose, W. and R.W. Heins. 1962. **Moving interfaces and contact angle rate-dependency**. J. Colloid Sci. 17: 39-48.

Sawyer, C.N., P.L. Mccarty, and G.F. Parkin. 2003. **Chemistry for environmental engineering and science**. 5th edition. Mcgraw-Hill. New York, NY.

Schellenberg K., C. Leuenberger, and R.P. Schwarzenbach. 1984. **Sorption of chlorinated phenols by natural sediments and aquifer materials**. Environ. Sci. Technol. 18(9):652-657.

Schwartz, F.W. and H. Zhang. 2003. **Fundamentals of groundwater**. John wiley & sons, INC. New York.

Schwille, F. 1988. **Dense Chlorinated Solvents in Porous and Fractured Media**. Lewis, Chelsea, Mich., 146 pp.

Sellers, K. 1999. **Fundamentals of Hazardous waste site remediation**. Lewis Publishers, Florida.

Snoeyink, V.L. and D. Jenkins. 1980. **Water chemistry**. John wiley & sons, INC. New York.

Soilmoisture Equipment Corporation (SEC). 2003. **Commercial Publications**. SEC, Santa Barbara, USA.

Soo, H. and C.J. Radke. 1984. **Ind, Eng, Chem, Fundam**. 23: 342.

Testa, S.M. 1994. **Geological aspects of hazardous waste management**. CRC Press, Inc. Boca Raton, Florida.

Testa, S.M. and D.L. Winegardner. 2001. **Restoration of petroleum contaminated aquifers**. **Lewis: petroleum hydrocarbons and organic compounds**. 2nd edition. Lewis Publishers, Chelsea. MI. 464 pp.

Thomas, G.W. 1982. **Principles of hydrocarbon reservoir simulation**. Int. Human Resour. Dev. Corp., Boston, Mass., 207 pp.

Todd, D.K. and L.W. Mays. 2005. **Groundwater hydrology**. 3rd edition. John Wiley & Sons, INC, New York.

U.S. EPA (Environmental Protection Agency). 1987a. **The enhanced stream water quality models, QUAL2E, and QUAL2E-UNCUS**. Documentation and user model. EPA/600/3-87/007. Athens. GA.

U.S. EPA (Environmental Protection Agency). 1992a. **Background Document for Finite Source Methodology for Wastes Containing Metals**. HWEP-S0040. Office of Solid Waste, Washington, DC.

Valentine, R.L. 1986. **Nonbiological transformation in: vadose zone modeling of organic pollutants**. Lewis publisher. Chelsea, MI, pp. 223-243.

Velea, D., F.D. Shields. and J.M. Sabatier. 2000. Elastic wave velocities in partially saturated ottawa sand: experimental results and modeling. **Soil Sci. Soc. Am. J.** 64: 1226-1234.

Vivas, O.L.R., M.E. Castro-Rosario., S.P. Hernandez-Rivera., J.G. Briano-Peralta., N.K. Mehta., and F. Patron. 2006. **Microscopic mass transfer of TNT on Ottawa sand**. Master of science in chemistry, Puerto Rico.

Xu et al., 2006. Experimental investigation of oil compositional and surfactant effects on wettability at reservoir conditions. **CSA (2005)**. Dept Pet Eng. Louisiana State University, USA.

Wikimedia Foundation Inc., 2009. **Calcium carbonate**. Wikipedia. Available source: http://en.wikipedia.org/wiki/Calcium_carbonate, June 1, 2009.





ตัวอย่างการคำนวณ

1. การคำนวณหาค่าช่องว่างทั้งหมดในชั้นตัวกลาง (Volume void) เพื่อใช้ในการทดลองการทดสอบอัตราการเติมน้ำและการทดลองความสัมพันธ์ระหว่างความดันคาปิลลารีและความอิ่มตัวด้วยน้ำ

1.1 ทรายออกตาวา (Ottawa sand) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.59-0.85 มิลลิเมตร

หาปริมาตรทรายออกตาวาจากสูตร	$D = \frac{M}{V}$	กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร
ความหนาแน่นทรายออกตาวา	= 2.65	กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร
มวลของทรายบรรจุลง cylinder tube	= 117	กรัม
ดังนั้น สามารถคำนวณปริมาตรทราย	= $\frac{117g}{2.65g/cm^3}$	
	= 44.15	ลูกบาศก์เซนติเมตร
คำนวณหาช่องว่างทั้งหมดในชั้นตัวกลาง	= ปริมาตรทั้งหมด – ปริมาตรของทรายออกตาวา	
Volume void	= Total volume – volume sand	
	= $\pi \frac{D^2}{4} h - 44.15 cm^3$	
	= $3.14 \times \frac{(5.4)^2}{4} \times 3 - 44.15 cm^3$	
	= $68.74 cm^3 - 44.15 cm^3$	
	= 24.59	ลูกบาศก์เซนติเมตร

1.1 หินปูน (Ottawa sand) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.48 มิลลิเมตร

หาปริมาตรหินปูนจากสูตร	$D = \frac{M}{V}$	กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร
ความหนาแน่นทรายออกตาวา	= 2.71	กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร
มวลของหินปูนบรรจุลง cylinder tube	= 97.50	กรัม
ดังนั้น สามารถคำนวณปริมาตรหินปูน	= $\frac{97.50g}{2.71g/cm^3}$	
	= 35.98	ลูกบาศก์เซนติเมตร

คำนวณหาช่องว่างทั้งหมดในชั้นตัวกลาง = ปริมาตรทั้งหมด – ปริมาตรของทรายออกตาวา

Volume void = Total volume – volume Crystalline limestone

$$= \pi \frac{D^2}{4} h - 35.98 \text{ cm}^3$$

$$= 3.14 \times \frac{(5.4)^2}{4} \times 3 - 35.98 \text{ cm}^3$$

$$= 68.74 \text{ cm}^3 - 35.98 \text{ cm}^3$$

$$= 32.76 \text{ ลูกบาศก์เซนติเมตร}$$

2. การคำนวณปริมาณน้ำหรือบัพเฟอร์ที่ต้องเติมลงในชั้นตัวกลาง 15 % ความชื้น (v/v) ของ ปริมาตรชั้นตัวกลางทั้งหมด

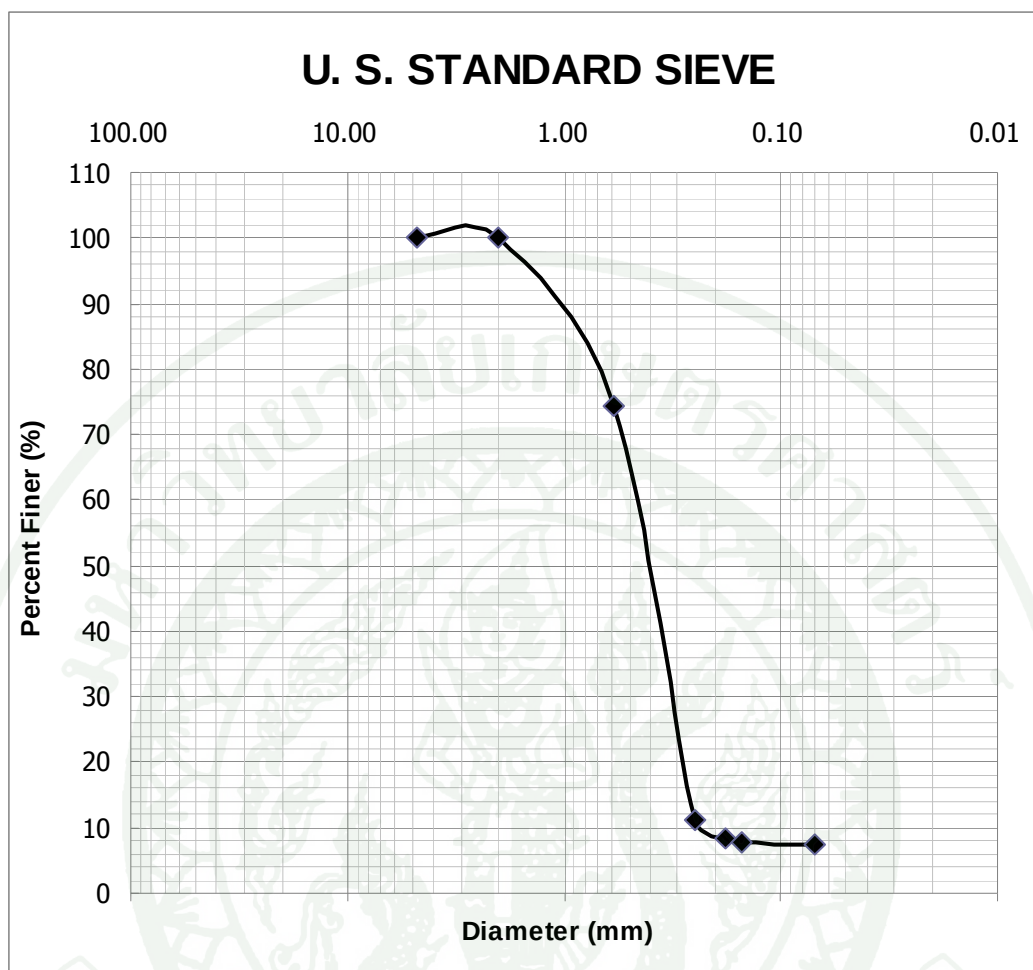
$$\begin{aligned} \text{ปริมาณน้ำหรือบัพเฟอร์ในชั้นตัวกลาง} &= \frac{15}{100} \times 24.59 \text{ mL} \\ &= 3.69 \text{ mL} \end{aligned}$$

ตารางผนวกที่ ก1 การคำนวณหาความหนาแน่นหินปูน ต.กลางดง อ.ปากช่อง จ.นครราชสีมา
โดยใช้วิธีการทดลองแรงลอยตัวในน้ำ (Buoyancy techniques)

การหาความหนาแน่นหินปูน ตำบลกลางดง อำเภอ ปากช่อง จ. นครราชสีมา โดยใช้เทคนิค แรงลอยตัวในน้ำ				
Parameter	สูตร	sample # 1	sample # 2	
น้ำหนักหินสภาพอิ่มตัวด้วยผิวแห้ง, B, W_{sat} (g)	#	112.24	152.26	
น้ำหนักตัวอย่างหินในน้ำ, C, W_{sub} (g)	#	70.85	96.14	
น้ำหนักตัวอย่างหิน อบแห้งชั่งในอากาศ, A, W_s (g)	#	112.10	152.13	
Bulk Specific Gravity (สภาพแห้ง)	$A / (B-C)$	2.71	2.71	
Bulk Specific Gravity (อิ่มตัวผิวแห้ง)	$B / (B-C)$	2.71	2.71	
Apparent Specific Gravity	$A / (A-C)$	2.72	2.72	
Volume void	$W_{sat} - W_s$	0.14	0.13	
Volume rock	$W_{sat} - W_{sub} / \rho_w$	41.39	56.12	
Absorption	$(Volume Void / W_s) * 100$	0.12	0.09	
Porosity	$((B-A) / A) * 100$	0.12	0.09	
Unit weight (Dry)	$W_s / (W_{sat} - W_{sub})$	2.71	2.71	
Unit weight (Sat)	$W_{sat} / (W_{sat} - W_{sub})$	2.71	2.71	
specific Gravity	Unit weight (Dry) / (1 - (Porosity / 100))	2.71	2.71	
Average Unit weight (Dry)		2.71		
Average Unit weight (Sat)		2.71		
Average specific Gravity		2.71		

ตารางผนวกที่ ก2 การวิเคราะห์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (Sieve analysis) ชั้นตัวกลางรูปพรุน
หินปูน ต. กลางดง อ. ปากช่อง จ.นครราชสีมา

Sieve No.	Sieve Opening	Weight of Soil Retained, gm	Cumulative Retained, gm	Cumulative Retained, %	Percent Finer
1/2"	12.70	0.00	0.00	0.00	100.00
#4	4.76	0.00	0.00	0.00	100.00
#10	2.00	0.00	0.00	0.00	100.00
#30	0.59	256.82	256.82	25.68	74.32
#60	0.25	632.09	888.91	88.89	11.11
#80	0.18	26.57	915.48	91.55	8.45
#100	0.15	8.36	923.84	92.38	7.62
#200	0.07	1.93	925.77	92.58	7.42
PAN	PAN	73.98	999.75	99.98	0.02
D ₁₀ =	0.25 mm	D ₃₀ =	0.31 mm	D ₆₀ =	0.48 mm



ภาพผนวกที่ ก1 กราฟแสดงผลการทดลอง Sieve Analysis ของชั้นตัวกลางหินปูนขนาด 20-30 mesh



ภาคผนวก ข
 ตารางบันทึกผลการทดลอง

ตารางผนวกที่ ข1 ผลการทดสอบอัตราการเติมน้ำที่ค่า pH 4.9 ในชั้นตัวกลางที่ได้รับการปนเปื้อนสาร NAPL รูปแบบต่างๆ

ครั้งที่	เวลารวม (min)	ค่าความอิ่มตัวด้วยน้ำเฉลี่ย (%)				
		Non- exposure pH 4.9	Toluene pH 4.9	TCE pH 4.9	Before Toluene after TCE pH 4.9	Before TCE after Toluene pH 4.9
1	0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2	10	14.96	10.16	8.19	10.40	10.75
3	20	27.17	16.86	13.83	17.70	17.36
4	30	37.28	22.24	18.14	23.53	22.51
5	40	45.03	26.87	21.48	27.49	27.61
6	50	51.60	31.15	24.47	30.83	31.59
7	60	56.59	34.54	26.68	33.74	35.15
8	70	60.43	36.99	28.62	36.43	37.66
9	80	63.36	39.21	30.45	38.96	40.49
10	90	65.50	41.16	31.77	41.07	42.69
11	120	69.20	46.50	35.15	46.14	47.60
12	150	70.90	50.23	37.63	50.71	50.85
13	180	71.72	53.39	39.57	53.82	54.72
14	210	72.29	55.57	41.13	56.81	56.65
15	240	72.51	57.63	42.49	59.00	58.28
16	270	72.87	59.23	43.50	60.58	59.67
17	300	73.11	60.16	44.12	61.34	60.52

ตารางผนวกที่ ข2 ผลการทดสอบอัตราการเติมน้ำที่ค่า pH 6.7 ในชั้นตัวกลางที่ได้รับการ
ปนเปื้อนสาร NAPL รูปแบบต่างๆ

ครั้งที่	เวลา รวม (min)	ค่าความอิ่มตัวด้วยน้ำเฉลี่ย (%)				
		Non- exposure pH 6.7	Toluene pH 6.7	TCE pH 6.7	Before	Before TCE
					Toluene after TCE pH 6.7	after Toluene pH 6.7
1	0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2	10	23.62	9.37	10.34	9.88	8.36
3	20	37.12	14.92	16.98	17.82	14.29
4	30	49.14	19.84	22.32	24.38	18.79
5	40	56.24	23.71	26.69	28.58	23.47
6	50	63.14	27.53	30.47	33.08	26.78
7	60	67.84	31.57	33.33	36.15	29.70
8	70	71.50	33.96	36.02	38.97	32.42
9	80	73.43	36.78	38.42	41.57	34.75
10	90	74.57	38.67	40.31	44.14	36.98
11	120	76.54	44.30	45.82	49.31	42.29
12	150	77.34	49.10	50.27	53.68	46.69
13	180	77.72	52.67	53.93	57.12	50.13
14	210	77.93	55.65	56.87	59.90	53.40
15	240	78.14	58.01	58.93	62.17	56.03
16	270	78.23	60.61	60.49	64.19	58.04
17	300	78.35	60.95	61.08	65.49	58.47

ตารางผนวกที่ ข3 ผลการทดสอบอัตราการเติมน้ำที่ค่า pH 8.0 ในชั้นตัวกลางที่ได้รับการ
ปนเปื้อนสาร NAPL รูปแบบต่างๆ

ครั้งที่	เวลารวม (min)	ค่าความอิ่มตัวด้วยน้ำเฉลี่ย (%)				
		Non- exposure pH 8.0	Toluene pH 8.0	TCE pH 8.0	Before Toluene after TCE pH 8.0	Before after TCE Toluene pH 8.0
1	0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2	10	18.38	16.20	12.23	8.93	14.29
3	20	32.10	27.74	19.18	15.60	24.56
4	30	41.68	36.07	25.00	20.94	31.97
5	40	50.08	42.65	30.40	24.70	36.68
6	50	57.29	48.09	33.92	27.63	40.88
7	60	61.54	51.80	37.42	30.02	43.60
8	70	64.94	54.94	39.95	32.43	46.05
9	80	68.38	57.32	42.19	34.29	47.41
10	90	70.90	59.39	44.26	36.32	48.68
11	120	73.87	63.60	49.38	40.48	51.13
12	150	74.95	66.08	52.82	43.61	52.67
13	180	75.62	67.40	55.29	45.89	53.76
14	210	76.22	68.00	56.89	47.90	54.68
15	240	76.57	68.38	58.71	49.89	55.38
16	270	76.90	68.91	60.18	51.49	55.90
17	300	77.01	69.17	60.64	52.00	56.28

ตารางผนวกที่ ๔4 ผลการทดสอบอัตราการเติมน้ำ ในชั้นตัวกลางที่ไม่ได้รับการปนเปื้อนสาร NAPL ที่มีการเปลี่ยนแปลงค่า pH

ครั้งที่	เวลารวม (min)	ค่าความอิ่มตัวด้วยน้ำเฉลี่ย (%)		
		non pH 4.9	non pH 6.7	non pH 8.0
1	0	0.00	0.00	0.00
2	10	14.96	23.62	18.38
3	20	27.17	37.12	32.10
4	30	37.28	49.14	41.68
5	40	45.03	56.24	50.08
6	50	51.60	63.14	57.29
7	60	56.59	67.84	61.54
8	70	60.43	71.50	64.94
9	80	63.36	73.43	68.38
10	90	65.50	74.57	70.90
11	120	69.20	76.54	73.87
12	150	70.90	77.34	74.95
13	180	71.72	77.72	75.62
14	210	72.29	77.93	76.22
15	240	72.51	78.14	76.57
16	270	72.87	78.23	76.90
17	300	73.11	78.35	77.01

ตารางผนวกที่ ข5 ผลการทดสอบอัตราการเติมน้ำ ในชั้นตัวกลางที่ได้รับการปนเปื้อนสาร LNAPL ที่มีการเปลี่ยนแปลงค่า pH

ครั้งที่	เวลารวม (min)	ค่าความอิ่มตัวด้วยน้ำเฉลี่ย (%)		
		Tol pH 4.9	Tol pH 6.7	Tol pH 8.0
1	0	0.00	0.00	0.00
2	10	10.16	9.37	16.20
3	20	16.86	14.92	27.74
4	30	22.24	19.84	36.07
5	40	26.87	23.71	42.65
6	50	31.15	27.53	48.09
7	60	34.54	31.57	51.80
8	70	36.99	33.96	54.94
9	80	39.21	36.78	57.32
10	90	41.16	38.67	59.39
11	120	46.50	44.30	63.60
12	150	50.23	49.10	66.08
13	180	53.39	52.67	67.40
14	210	55.57	55.65	68.00
15	240	57.63	58.01	68.38
16	270	59.23	60.61	68.91
17	300	60.16	60.95	69.17

ตารางผนวกที่ ข6 ผลการทดสอบอัตราการเติมน้ำ ในชั้นตัวกลางที่ได้รับการปนเปื้อนสาร
DNAPL ที่มีการเปลี่ยนแปลงค่า pH

ครั้งที่	เวลารวม (min)	ค่าความอิ่มตัวด้วยน้ำเฉลี่ย (%)		
		TCE pH 4.9	TCE pH 6.7	TCE pH 8.0
1	0	0.00	0.00	0.00
2	10	8.19	10.34	12.23
3	20	13.83	16.98	19.18
4	30	18.14	22.32	25.00
5	40	21.48	26.69	30.40
6	50	24.47	30.47	33.92
7	60	26.68	33.33	37.42
8	70	28.62	36.02	39.95
9	80	30.45	38.42	42.19
10	90	31.77	40.31	44.26
11	120	35.15	45.82	49.38
12	150	37.63	50.27	52.82
13	180	39.57	53.93	55.29
14	210	41.13	56.87	56.89
15	240	42.49	58.93	58.71
16	270	43.50	60.49	60.18
17	300	44.12	61.08	60.64

ตารางผนวกที่ ข7 ผลการทดสอบอัตราการเติมน้ำ ในชั้นตัวกลางที่ได้รับการปนเปื้อนสาร LNAPL ก่อน ต่อมาทำการปนเปื้อนด้วยสาร DNAPL ที่มีการเปลี่ยนแปลงค่า pH

ครั้งที่	เวลารวม (min)	ค่าความอิ่มตัวด้วยน้ำเฉลี่ย (%)		
		Tol to TCE pH 4.9	Tol to TCE pH 6.7	Tol to TCE pH 8.0
1	0	0.00	0.00	0.00
2	10	10.40	9.88	8.93
3	20	17.70	17.82	15.60
4	30	23.53	24.38	20.94
5	40	27.49	28.58	24.70
6	50	30.83	33.08	27.63
7	60	33.74	36.15	30.02
8	70	36.43	38.97	32.43
9	80	38.96	41.57	34.29
10	90	41.07	44.14	36.32
11	120	46.14	49.31	40.48
12	150	50.71	53.68	43.61
13	180	53.82	57.12	45.89
14	210	56.81	59.90	47.90
15	240	59.00	62.17	49.89
16	270	60.58	64.19	51.49
17	300	61.34	65.49	52.00

ตารางผนวกที่ ข8 ผลการทดสอบอัตราการเติมน้ำ ในชั้นตัวกลางที่ได้รับการปนเปื้อนสาร DNAPL ก่อนต่อมาทำการปนเปื้อนด้วยสาร LNAPL ที่มีการเปลี่ยนแปลงค่า pH

ครั้งที่	เวลารวม (min)	ค่าความอิ่มตัวด้วยน้ำเฉลี่ย (%)		
		TCE to Tol pH 4.9	TCE to Tol pH 6.7	TCE to Tol pH 8.0
1	0	0.00	0.00	0.00
2	10	10.75	8.36	14.29
3	20	17.36	14.29	24.56
4	30	22.51	18.79	31.97
5	40	27.61	23.47	36.68
6	50	31.59	26.78	40.88
7	60	35.15	29.70	43.60
8	70	37.66	32.42	46.05
9	80	40.49	34.75	47.41
10	90	42.69	36.98	48.68
11	120	47.60	42.29	51.13
12	150	50.85	46.69	52.67
13	180	54.72	50.13	53.76
14	210	56.65	53.40	54.68
15	240	58.28	56.03	55.38
16	270	59.67	58.04	55.90
17	300	60.52	58.47	56.28

ตารางผนวกที่ ข9 ผลการทดลองส่วนโค้งฮิสเทอรีซิสหาความสัมพันธ์ระหว่างความดันคาปิลลารีและความอิ่มตัวด้วยน้ำในกระบวนการระบายน้ำและการเติมน้ำเข้าออกชั้นตัวกลางหินปูน ในระบบแรงดันสารโทลูอินและน้ำ (LNAPL-น้ำ-LNAPL-น้ำ)

กระบวนการ	ความดันคาปิลลารี (cm)	ความอิ่มตัวด้วยน้ำ (%)
การระบายน้ำครั้งที่ 1	0.46	100.00
	1.13	99.24
	2.10	98.72
	2.36	95.48
	2.73	90.38
	3.29	87.06
	4.06	83.97
	4.73	79.73
	5.39	73.11
	5.76	52.56
	6.52	48.78
	7.29	44.75
การเติมน้ำครั้งที่ 1	7.29	44.75
	6.42	44.78
	5.56	44.99
	4.79	45.45
	3.93	45.88
	3.16	46.25
	2.29	47.10
	1.43	47.99
	0.56	47.68
	-0.30	46.92
	-1.17	48.32

ตารางผนวกที่ ข9 (ต่อ)

กระบวนการ	ความดันคาปิลลารี (cm)	ความอิ่มตัวด้วยน้ำ (%)
การเติมน้ำครั้งที่ 1 (ต่อ)	-1.84	59.71
	-2.50	65.14
	-3.07	68.68
	-3.83	77.90
	-4.70	85.47
	-5.37	89.16
	-6.23	91.03
	-6.90	95.85
	-7.76	96.70
	-8.63	98.29
	-9.50	100.00
	-10.26	100.00
	-11.13	100.00
	-11.13	100.00
	-10.26	99.97
	-9.40	99.73
	-8.53	99.66
	-7.66	99.73
การระบายน้ำครั้งที่ 2	-6.80	99.45
	-5.93	99.42
	-5.17	98.57
	-4.30	98.26
	-3.43	97.59
	-2.57	96.95
	-1.80	96.09
	-0.94	94.81

ตารางผนวกที่ ข9 (ต่อ)

กระบวนการ	ความดันคาปิลลารี (cm)	ความอืดตัวด้วยน้ำ (%)
การระบายน้ำครั้งที่ 2 (ต่อ)	-0.07	93.86
	0.70	91.48
	1.56	88.92
	2.43	79.79
	3.19	70.15
	3.96	64.01
	4.83	60.78
	5.69	58.79
	6.46	57.45
	7.32	56.14
	8.19	55.25
	8.96	54.27
	9.72	53.08
	10.29	47.41
	10.29	47.41
	10.29	47.31
การเติมน้ำครั้งที่ 2	9.32	46.00
	8.46	46.21
	7.69	46.40
	6.82	46.67
	5.96	47.04
	5.09	47.65
	4.33	48.32
	3.46	49.33
	2.69	49.82
	1.93	52.20

ตารางผนวกที่ ข9 (ต่อ)

กระบวนการ	ความดันคาปิลลารี (cm)	ความอิ่มตัวด้วยน้ำ (%)
การเติมน้ำครั้งที่ 2 (ต่อ)	1.06	53.30
	-0.57	59.37
	-1.34	64.38
	-2.10	69.14
	-2.67	80.34
	-3.53	84.37
	-4.10	92.95
	-4.67	96.76
	-5.53	99.02
	-6.30	99.54
	-7.16	99.54
	-8.03	99.42
	-8.90	99.36
	-9.76	99.36
	-10.63	99.51

ตารางผนวกที่ ข10 ผลการทดลองส่วนโค้งฮิสเทอริซิสหาความสัมพันธ์ระหว่างความดันคาปิลลารีและความอิ่มตัวด้วยน้ำในกระบวนการระบายน้ำและการเติมน้ำเข้าออกชั้นตัวกลางหินปูน ในระบบแรงดันสารไดรคัลโรเอธิลีนและน้ำ (DNAPL-น้ำ-DNAPL-น้ำ)

กระบวนการ	ความดันคาปิลลารี (เซนติเมตร)	ความอิ่มตัวด้วยน้ำ (%)
การระบายน้ำครั้งที่ 1	-2.00	100.00
	-0.64	99.48
	0.83	99.36
	2.29	99.21
	3.76	99.11
	5.22	99.11
	6.59	98.44
	8.05	98.44
	9.42	97.86
	10.88	96.25
	12.35	96.12
	13.81	95.36
	15.28	95.02
	16.74	94.78
	22.40	92.83
	24.63	77.20
	26.10	74.88
	27.46	72.01
	28.93	69.69
	30.39	65.32

ตารางผนวกที่ ข10 (ต่อ)

กระบวนการ	ความดันคาปีลลารี (เซนติเมตร)	ความอืดตัวด้วยน้ำ (%)
การเติมน้ำครั้งที่ 1	30.39	65.32
	27.46	66.18
	26.00	67.19
	24.53	67.28
	23.17	67.55
	21.70	68.22
	20.24	68.22
	18.77	68.22
	17.31	68.35
	14.38	68.59
	11.45	69.35
	9.98	69.66
	8.62	69.81
	7.15	70.51
	5.69	71.76
	4.22	72.95
	2.96	75.06
	1.49	75.55
	0.13	79.18
	-1.14	82.88
	-2.30	91.12
	-3.66	94.54
	-5.03	98.26
	-6.49	100.00
	-7.86	100.00

ตารางผนวกที่ ข10 (ต่อ)

กระบวนการ	ความดันคาปีลลารี (เซนติเมตร)	ความอึดตัวด้วยน้ำ (%)
การระบายน้ำครั้งที่ 2	-7.86	100.00
	-6.39	100.00
	-4.93	100.00
	-3.46	100.00
	-2.00	100.00
	-0.54	100.00
	0.93	99.91
	2.39	99.88
	3.86	99.94
	5.32	99.54
	6.59	96.09
	7.95	90.48
	9.42	90.38
	10.88	89.65
	12.35	89.44
	13.81	89.04
	15.28	88.92
	16.74	88.34
	18.21	87.76
	19.57	86.51
	21.04	85.59
	22.40	84.71
	23.87	83.49
	25.23	82.05
	26.60	81.26
	27.96	79.24

ตารางผนวกที่ ข10 (ต่อ)

กระบวนการ	ความดันคาปีลลารี (เซนติเมตร)	ความอิ่มตัวด้วยน้ำ (%)
การระบายน้ำครั้งที่ 2	29.33	77.47
	30.59	73.29
(ต่อ)	30.59	73.29
	29.13	74.39
	27.66	74.73
	26.20	74.73
	24.73	74.85
	23.27	74.85
	21.80	74.97
	20.44	75.21
	18.97	75.64
	17.51	75.82
การเติมน้ำครั้งที่ 2	16.04	76.04
	14.58	76.37
	13.11	76.59
	11.65	77.11
	10.18	77.44
	8.82	77.72
	7.35	78.48
	5.99	78.85
	4.62	79.95
	3.16	81.56
	1.89	88.06
	0.43	90.84
	-0.84	97.44
	-2.20	97.99

ตารางผนวกที่ ข10 (ต่อ)

กระบวนการ	ความดันคาปีลลารี (เซนติเมตร)	ความอึดตัวด้วยน้ำ (%)
	-3.56	98.99
การเติมน้ำครั้งที่ 2 (ต่อ)	-5.03	99.30
	-6.39	99.85
	-7.86	100.00

ตารางผนวกที่ ข11 ผลการทดลองส่วนโค้งฮิสเทอริซิสหาความสัมพันธ์ระหว่างความดันคาปิลลารีและความอิ่มตัวด้วยน้ำในกระบวนการระบายน้ำและการเติมน้ำเข้าออกชั้นตัวกลางหินปูน ในระบบได้รับแรงดันสารโทลูอินก่อนได้รับสารไทรคลอโรเอธิลีน และน้ำ (LNAPL-น้ำ-DNAPL-น้ำ)

กระบวนการ	ความดันคาปิลลารี (เซนติเมตร)	ค่าความอิ่มตัวด้วยน้ำ (%)
การระบายน้ำครั้งที่ 1	-4.60	100.00
	-3.73	99.97
	-2.87	99.63
	-2.00	99.36
	-1.23	98.63
	-0.37	97.59
	0.50	96.92
	1.36	96.25
	2.23	92.55
	3.10	92.49
	3.86	89.50
	3.73	67.95
	4.39	58.88
	4.86	49.79
	5.63	43.32
	6.39	39.53
	7.26	37.52
	8.12	36.14
	8.99	34.52

ตารางผนวกที่ ข11 (ต่อ)

กระบวนการ	ความดันคาปิลลารี (เซนติเมตร)	ค่าความอิ่มตัวด้วยน้ำ (%)
การเติมน้ำครั้งที่ 1	8.99	34.52
	8.12	33.94
	7.26	34.16
	6.39	34.49
	5.63	34.83
	4.76	35.35
	3.89	35.93
	3.13	36.54
	2.26	37.88
	1.40	37.76
	0.53	38.34
	-0.34	40.60
	-1.10	43.89
	-1.77	47.92
	-2.53	51.22
	-3.20	56.23
	-3.77	68.74
	-4.23	79.30
	-4.90	84.16
	-6.69	84.16
การระบายน้ำครั้งที่ 2	-5.23	84.55
	-3.76	84.07
	-2.30	84.13
	-0.84	84.13
	0.53	83.39
	1.99	83.24
	3.46	83.18

ตารางผนวกที่ ข11 (ต่อ)

กระบวนการ	ความดันคาปีลลารี (เซนติเมตร)	ค่าความอิ่มตัวด้วยน้ำ (%)
การระบายน้ำครั้งที่ 2 (ต่อ)	4.92	82.97
	6.39	82.72
	7.85	82.39
	9.22	81.81
	10.68	78.51
	12.15	77.35
	13.51	74.63
	13.98	43.44
	15.04	34.98
	16.41	31.72
	17.77	29.00
	17.77	29.00
การเติมน้ำครั้งที่ 2	16.31	29.64
	14.84	30.10
	13.38	30.31
	11.91	31.26
	10.55	32.63
	9.18	36.02
	8.12	44.96
	6.95	55.37
	5.59	57.91
	4.32	61.60
	3.26	71.86
	1.79	76.56
	0.43	80.16
	-1.04	81.11

ตารางผนวกที่ ข11 (ต่อ)

กระบวนการ	ความดันคาปิลลารี (เซนติเมตร)	ค่าความอิ่มตัวด้วยน้ำ (%)
การเติมน้ำครั้งที่ 2 (ต่อ)	-2.40	82.97
	-3.86	84.95
	-5.23	85.32
	-6.69	85.56
	-8.16	85.78

ตารางผนวกที่ ข12 ผลการทดลองส่วนโค้งฮิสเทอรีซิสหาความสัมพันธ์ระหว่างความดันคาปิลลารีและความอิ่มตัวด้วยน้ำในกระบวนการระบายน้ำและการเติมน้ำเข้าออกชั้นตัวกลางหินปูน ในระบบได้รับแรงดันสารไตรคลอโรเอธิลีนก่อนได้รับสารโทลูอิน และน้ำ (DNAPL-น้ำ-LNAPL-น้ำ)

กระบวนการ	ความดันคาปิลลารี (เซนติเมตร)	ค่าความอิ่มตัวด้วยน้ำ (%)
การระบายน้ำครั้งที่ 1	-7.76	100.00
	-6.29	100.03
	-4.83	100.00
	-3.36	99.97
	-1.90	99.94
	-0.44	99.94
	1.03	99.30
	2.49	99.18
	3.96	99.08
	5.32	98.78
	6.49	92.09
	7.95	90.66
	9.42	90.23
	10.88	89.62
	12.35	87.79
	12.21	49.45
	13.38	41.82
	14.54	35.90
	16.01	31.90
	17.27	27.75
การเติมน้ำครั้งที่ 1	17.27	27.75
	15.81	28.21
	14.34	28.21

ตารางผนวกที่ ข12 (ต่อ)

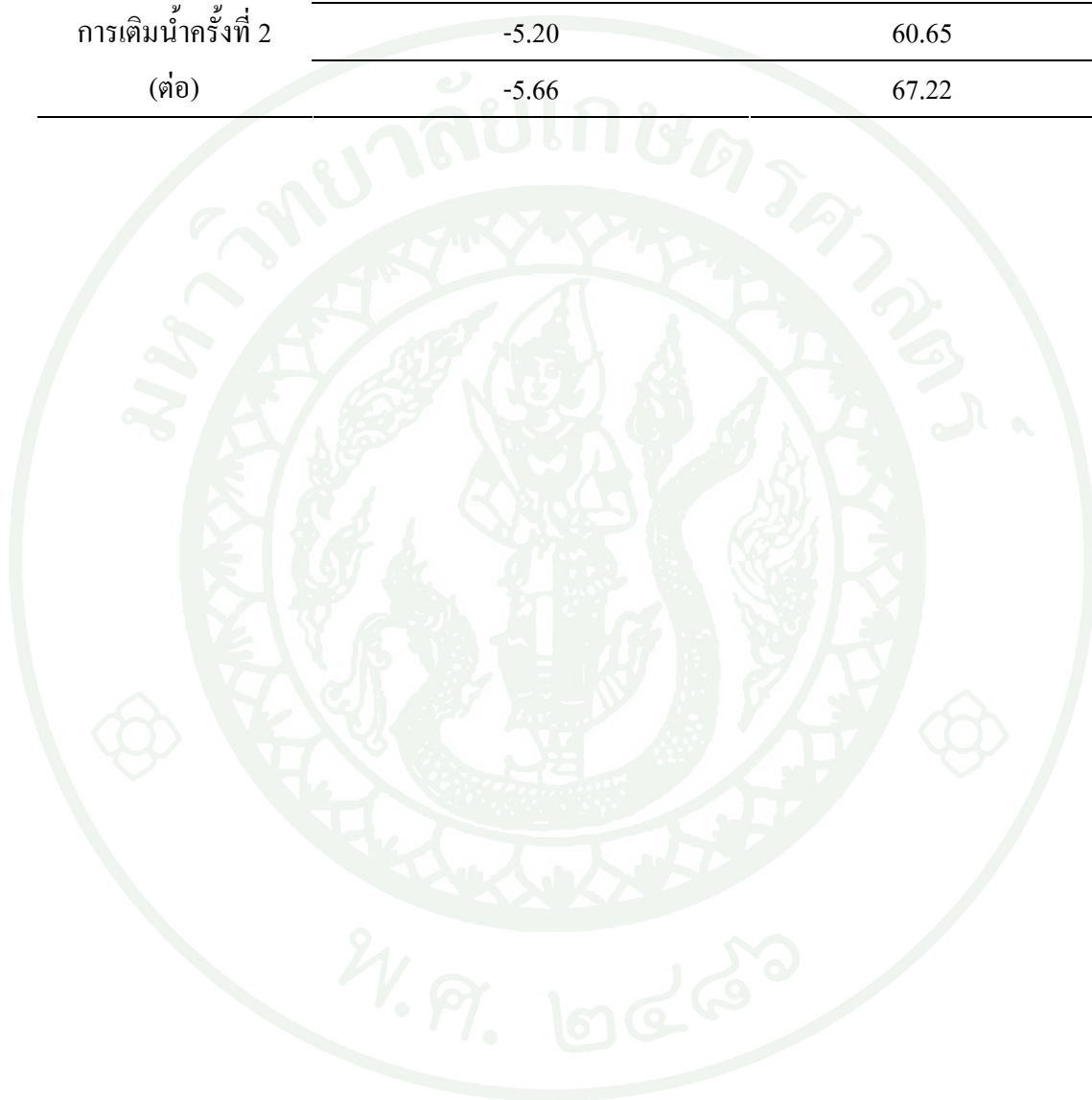
กระบวนการ	ความดันคาปีลลารี (เซนติเมตร)	ค่าความอิ่มตัวด้วยน้ำ (%)
การเติมน้ำครั้งที่ 1 (ต่อ)	12.88	28.57
	11.41	28.75
	10.15	31.56
	8.88	34.83
	7.52	36.87
	6.15	40.72
	4.79	44.47
	3.42	48.57
	2.26	53.97
	0.89	56.44
	-0.47	57.91
	-1.94	58.06
	-3.40	58.15
	-4.76	59.31
	-6.23	59.62
	-7.59	59.89
	-5.80	59.89
	-4.93	59.34
	-4.07	58.70
	-3.20	58.76
การระบายน้ำครั้งที่ 2	-2.33	57.91
	-1.57	57.05
	-0.70	54.79
	-0.04	49.63
	0.83	46.67
	1.60	43.10

ตารางผนวกที่ ข12 (ต่อ)

กระบวนการ	ความดันคาปีลลารี (เซนติเมตร)	ค่าความอิ่มตัวด้วยน้ำ (%)
การระบายน้ำครั้งที่ 2 (ต่อ)	2.26	37.76
	2.93	33.61
	3.69	30.49
	4.56	28.30
	5.43	26.47
	6.29	24.66
	7.16	23.38
	7.92	21.92
	8.69	20.51
	8.69	20.51
การเติมน้ำครั้งที่ 2	7.82	20.57
	6.96	20.88
	6.09	21.28
	5.23	21.70
	4.46	22.22
	3.59	22.44
	2.73	22.95
	1.86	24.11
	1.10	25.15
	0.23	27.11
	-0.54	30.74
	-1.30	33.27
	-1.97	37.06
	-2.23	47.99
	-2.90	52.66
	-3.57	56.87

ตารางผนวกที่ ข12 (ต่อ)

กระบวนการ	ความดันคาปีลลารี (เซนติเมตร)	ค่าความอิ่มตัวด้วยน้ำ (%)
	-4.43	58.33
การเติมน้ำครั้งที่ 2	-5.20	60.65
(ต่อ)	-5.66	67.22



ตารางผนวกที่ ข13 ผลการทดลองวัดมุมสัมผัสระหว่างสาร TCE บนพื้นผิวหินปูน ล้อมรอบ
ด้วยน้ำใต้ดินจำลอง ฐาน 1

เวลา (ชั่วโมง)	พื้นที่ (mm ²)	มุมสัมผัส (θ , องศา) (ซ้าย)	มุมสัมผัส (θ , องศา) (ขวา)	cos θ (ซ้าย)	cos θ (ขวา)	ความดัน คาปิลลารี (เซนติเมตร) (ซ้าย)	ความดัน คาปิลลารี (เซนติเมตร) (ขวา)
0	8.40	23.14	25.84	0.92	0.92	2.70	2.70
1	9.63	23.22	23.37	0.92	0.92	2.70	2.70
2	8.90	24.73	22.75	0.99	0.91	2.90	2.67
3	7.68	27.33	27.37	0.99	0.89	2.91	2.61
4	8.45	23.50	21.20	0.99	0.92	2.91	2.69
5	7.62	22.86	25.09	0.99	0.92	2.91	2.71
6	7.97	23.72	29.46	0.99	0.92	2.91	2.69
7	7.82	23.09	26.86	0.99	0.92	2.91	2.70
8	8.04	25.34	28.55	0.99	0.90	2.91	2.65
9	7.95	24.90	28.35	0.99	0.91	2.91	2.66
10	7.78	20.46	30.55	0.99	0.94	2.91	2.75
11	7.62	18.46	31.10	0.99	0.95	2.91	2.79
12	7.16	23.06	29.44	0.99	0.92	2.91	2.70
13	7.80	23.20	28.18	0.99	0.92	2.91	2.70
14	8.49	22.71	38.27	0.99	0.92	2.90	2.71
15	8.04	30.08	40.35	0.99	0.87	2.91	2.54
16	6.85	29.05	34.93	0.99	0.87	2.92	2.57
48	6.64	34.85	30.10	0.99	0.82	2.92	2.41
72	5.29	31.95	29.20	1.00	0.85	2.92	2.49
96	4.99	36.95	34.68	1.00	0.80	2.93	2.35
120	4.35	37.03	41.34	1.00	0.80	2.93	2.34
144	3.56	42.66	32.08	1.00	0.74	2.93	2.16

ตารางผนวกที่ ข13 (ต่อ)

เวลา (ชั่วโมง)	พื้นที่ (mm ²)	มุมสัมผัส (θ , องศา) (ซ้าย)	มุมสัมผัส (θ , องศา) (ขวา)	cos θ (ซ้าย)	cos θ (ขวา)	ความดัน คาปิลลารี (เซนติเมตร) (ซ้าย)	ความดัน คาปิลลารี (เซนติเมตร) (ขวา)
168	3.01	40.50	36.84	1.00	0.76	2.93	2.23
192	3.93	33.73	31.92	1.00	0.83	2.93	2.44
216	2.28	216.00	2.28	1.00	-0.81	2.93	-2.38
240	1.98	33.05	32.55	1.00	0.84	2.94	2.46
264	1.57	37.85	35.30	1.00	0.79	2.94	2.32
288	1.20	42.11	40.11	1.00	0.74	2.94	2.18
312	0.87	312.00	0.87	1.00	0.67	2.94	1.97
336	0.73	336.00	0.73	1.00	0.91	2.94	2.68
360	0.42	-	-	-	-	-	-
384	0.31	-	-	-	-	-	-

ตารางผนวกที่ ข14 ผลการทดลองวัดมุมสัมผัสระหว่างสาร TCE บนพื้นผิวหินปูน ล้อมรอบ
ด้วยน้ำใต้ดินจำลอง ฐาน 2

เวลา (ชั่วโมง)	พื้นที่ (mm ²)	มุมสัมผัส (θ , องศา) (ซ้าย)	มุมสัมผัส (θ , องศา) (ขวา)	cos θ (ซ้าย)	cos θ (ขวา)	ความดัน คาปิลลารี (เซนติเมตร) (ซ้าย)	ความดัน คาปิลลารี (เซนติเมตร) (ขวา)
0	10.84	26.05	27.45	0.98	0.90	2.88	2.64
1	10.04	38.37	34.29	0.98	0.78	2.89	2.30
2	10.21	32.66	31.92	0.98	0.84	2.89	2.47
3	9.85	35.32	35.19	0.99	0.82	2.89	2.40
4	9.49	39.26	34.74	0.99	0.77	2.90	2.27
5	9.79	28.85	26.84	0.99	0.88	2.89	2.57
6	8.52	30.75	22.17	0.99	0.86	2.90	2.52
7	8.29	42.24	23.36	0.99	0.74	2.91	2.17
8	9.51	27.72	20.48	0.99	0.89	2.90	2.60
9	9.75	28.96	35.57	0.99	0.87	2.89	2.57
10	9.39	24.66	35.13	0.99	0.91	2.90	2.67
11	10.24	27.11	29.67	0.98	0.89	2.89	2.61
12	9.21	24.48	23.02	0.99	0.91	2.90	2.67
13	9.75	24.27	32.00	0.99	0.91	2.89	2.68
14	9.21	31.23	29.60	0.99	0.86	2.90	2.51
15	8.62	27.68	26.18	0.99	0.89	2.90	2.60
16	8.38	25.75	32.57	0.99	0.90	2.91	2.65
48	8.05	19.63	24.91	0.99	0.94	2.91	2.77
72	7.33	26.07	22.95	0.99	0.90	2.91	2.64
96	5.45	30.10	28.62	1.00	0.87	2.92	2.54
120	4.78	30.65	23.40	1.00	0.86	2.93	2.53
144	4.13	38.50	37.85	1.00	0.78	2.93	2.30

ตารางผนวกที่ ข14 (ต่อ)

เวลา (ชั่วโมง)	พื้นที่ (mm ²)	มุมสัมผัส (θ , องศา) (ซ้าย)	มุมสัมผัส (θ , องศา) (ขวา)	cos θ (ซ้าย)	cos θ (ขวา)	ความดัน คาปิลลารี (เซนติเมตร) (ซ้าย)	ความดัน คาปิลลารี (เซนติเมตร) (ขวา)
168	3.52	46.03	39.44	1.00	0.69	2.93	2.04
192	3.17	26.31	30.98	1.00	0.90	2.93	2.63
216	2.90	26.99	35.42	1.00	0.89	2.93	2.62
240	2.37	26.14	34.09	1.00	0.90	2.93	2.64
264	1.87	37.00	39.80	1.00	0.80	2.94	2.35
288	1.39	36.10	28.05	1.00	0.81	2.94	2.37
312	1.00	45.76	47.00	1.00	0.70	2.94	2.05
336	0.70	61.98	68.01	1.00	0.47	2.94	1.38
360	0.51	79.03	86.32	1.00	0.19	2.94	0.56
384	0.32	92.22	91.57	1.00	-0.04	2.94	-0.11
408	0.16	-	-	-	-	-	-

ตารางผนวกที่ ข15 ผลการทดลองวัดมุมสัมพัทธ์ระหว่างสาร TCE บนพื้นผิวหินปูน ล้อมรอบ
ด้วยน้ำใต้ดินจำลอง ฐาน 3

เวลา (ชั่วโมง)	พื้นที่ (mm ²)	มุมสัมพัทธ์ (θ , องศา) (ซ้าย)	มุมสัมพัทธ์ (θ , องศา) (ขวา)	cos θ (ซ้าย)	cos θ (ขวา)	ความดัน คาปิลลารี (เซนติเมตร) (ซ้าย)	ความดัน คาปิลลารี (เซนติเมตร) (ขวา)
0	9.62	27.05	33.16	0.99	0.89	2.90	2.62
1	10.62	38.83	39.78	0.98	0.78	2.89	2.29
2	10.66	37.38	41.41	0.98	0.79	2.89	2.33
3	10.55	44.64	44.07	0.98	0.71	2.89	2.09
4	10.81	45.36	46.25	0.98	0.70	2.88	2.06
5	12.86	35.71	33.42	0.97	0.81	2.86	2.38
6	13.82	31.35	34.69	0.97	0.85	2.85	2.51
7	8.50	38.38	33.63	0.99	0.78	2.90	2.30
8	8.81	32.89	34.75	0.99	0.84	2.90	2.47
9	8.16	36.68	37.88	0.99	0.80	2.91	2.36
10	7.57	49.44	54.26	0.99	0.65	2.91	1.91
11	9.71	37.04	34.87	0.99	0.80	2.89	2.34
12	9.45	43.25	36.60	0.99	0.73	2.90	2.14
13	9.85	43.73	42.26	0.99	0.72	2.89	2.12
14	8.44	36.52	31.45	0.99	0.80	2.91	2.36
15	8.86	41.66	41.42	0.99	0.75	2.90	2.19
16	8.50	37.88	37.95	0.99	0.79	2.90	2.32
48	9.61	33.28	28.08	0.99	0.84	2.90	2.46
72	7.73	29.88	30.22	0.99	0.87	2.91	2.55
96	6.02	33.24	34.75	0.99	0.84	2.92	2.46
120	5.49	37.33	29.97	1.00	0.80	2.92	2.34
144	4.69	30.31	31.44	1.00	0.86	2.93	2.54

ตารางผนวกที่ ข15 (ต่อ)

เวลา (ชั่วโมง)	พื้นที่ (mm ²)	มุมสัมผัส (θ , องศา) (ซ้าย)	มุมสัมผัส (θ , องศา) (ขวา)	cos θ (ซ้าย)	cos θ (ขวา)	ความดัน คาปิลลารี (เซนติเมตร) (ซ้าย)	ความดัน คาปิลลารี (เซนติเมตร) (ขวา)
168	4.37	39.32	33.78	1.00	0.77	2.93	2.27
192	2.65	37.16	48.37	1.00	0.80	2.93	2.34
216	3.61	34.35	26.08	1.00	0.83	2.93	2.42
240	3.21	31.24	30.52	1.00	0.86	2.93	2.51
264	2.80	26.25	31.36	1.00	0.90	2.93	2.63
288	2.32	31.30	33.51	1.00	0.85	2.93	2.51
312	2.01	21.07	32.63	1.00	0.93	2.94	2.74
336	1.63	32.75	34.97	1.00	0.84	2.94	2.47
360	1.25	32.80	36.68	1.00	0.84	2.94	2.47
384	1.01	42.49	40.31	1.00	0.74	2.94	2.17
408	0.72	41.59	30.64	1.00	0.75	2.94	2.20
432	0.47	69.27	60.41	1.00	0.35	2.94	1.04
456	0.30	72.13	81.83	1.00	0.31	2.94	0.90
480	0.09	-	-	-	-	-	-

ตารางผนวกที่ ข16 ผลการทดลองวัดมุมสัมผัสระหว่างสาร TCE บนพื้นผิวหินปูน ล้อมรอบ
ด้วยสารละลายโพลูอินเกินค่าความสามารถละลายได้สูงสุด ฐาน 1

เวลา (ชั่วโมง)	พื้นที่ (mm ²)	มุมสัมผัส (θ , องศา) (ซ้าย)	มุมสัมผัส (θ , องศา) (ขวา)	cos θ (ซ้าย)	cos θ (ขวา)	ความดัน คาปิลลารี (เซนติเมตร) (ซ้าย)	ความดัน คาปิลลารี (เซนติเมตร) (ขวา)
0	8.44	70.23	48.14	0.34	0.67	0.99	1.96
1	7.94	76.66	41.53	0.23	0.75	0.68	2.20
2	8.34	82.42	44.30	0.13	0.72	0.39	2.10
3	8.99	76.97	45.72	0.23	0.70	0.66	2.05
4	8.61	80.66	35.38	0.16	0.82	0.48	2.39
5	8.34	82.18	36.03	0.14	0.81	0.40	2.38
6	8.46	84.93	49.80	0.09	0.65	0.26	1.90
7	8.57	83.04	50.86	0.12	0.63	0.36	1.85
8	9.45	80.65	51.97	0.16	0.62	0.48	1.81
9	9.33	79.30	51.19	0.19	0.63	0.55	1.84
10	7.82	79.19	46.75	0.19	0.69	0.55	2.01
11	8.33	82.84	52.30	0.12	0.61	0.37	1.80
12	8.39	82.06	57.81	0.14	0.53	0.41	1.56
13	8.61	83.13	58.52	0.12	0.52	0.35	1.53
14	8.09	80.62	51.06	0.16	0.63	0.48	1.85
15	8.22	80.89	55.91	0.16	0.56	0.46	1.65
16	8.04	82.61	57.42	0.13	0.54	0.38	1.58
48	8.58	85.79	56.33	0.07	0.55	0.22	1.63
72	8.01	75.91	62.88	0.24	0.46	0.72	1.34
96	8.18	84.79	60.36	0.09	0.49	0.27	1.45
120	7.91	88.65	62.77	0.02	0.46	0.07	1.34
144	8.14	85.62	70.50	0.08	0.33	0.22	0.98

ตารางผนวกที่ ข16 (ต่อ)

เวลา (ชั่วโมง)	พื้นที่ (mm ²)	มุมสัมผัส (θ , องศา) (ซ้าย)	มุมสัมผัส (θ , องศา) (ขวา)	cos θ (ซ้าย)	cos θ (ขวา)	ความดัน คาปิลลารี (เซนติเมตร) (ซ้าย)	ความดัน คาปิลลารี (เซนติเมตร) (ขวา)
168	7.81	89.50	66.10	0.01	0.41	0.03	1.19
192	7.82	89.60	79.16	0.01	0.19	0.02	0.55
216	7.49	90.00	73.42	0.00	0.29	0.00	0.84
240	7.68	93.27	80.15	-0.06	0.17	-0.17	0.50
264	7.36	90.00	74.18	0.00	0.27	0.00	0.80
288	7.28	98.11	78.88	-0.14	0.19	-0.41	0.57
312	7.04	96.42	81.39	-0.11	0.15	-0.33	0.44
336	7.17	98.10	76.27	-0.14	0.24	-0.41	0.70
360	7.08	99.83	81.81	-0.17	0.14	-0.50	0.42
384	7.08	97.36	85.12	-0.13	0.09	-0.38	0.25
408	7.08	108.21	86.26	-0.31	0.07	-0.92	0.19
432	7.17	105.30	76.83	-0.26	0.23	-0.78	0.67
456	6.78	101.21	83.46	-0.19	0.11	-0.57	0.33
480	6.94	104.58	84.14	-0.25	0.10	-0.74	0.30
504	6.97	114.85	84.15	-0.42	0.10	-1.23	0.30
528	7.08	114.65	85.68	-0.42	0.08	-1.23	0.22
552	7.18	110.92	86.68	-0.36	0.06	-1.05	0.17
576	7.33	114.28	85.11	-0.41	0.09	-1.21	0.25
600	6.49	117.46	90.00	-0.46	0.00	-1.35	0.00
624	6.93	130.46	91.24	-0.65	-0.02	-1.91	-0.06
648	6.82	131.35	92.02	-0.66	-0.04	-1.94	-0.10
672	6.89	120.31	91.11	-0.50	-0.02	-1.48	-0.06
696	7.13	120.47	89.55	-0.51	0.01	-1.49	0.02

ตารางผนวกที่ ข16 (ต่อ)

เวลา (ชั่วโมง)	พื้นที่ (mm ²)	มุมสัมผัส (θ , องศา) (ซ้าย)	มุมสัมผัส (θ , องศา) (ขวา)	$\cos \theta$ (ซ้าย)	$\cos \theta$ (ขวา)	ความดัน คาปิลลารี (เซนติเมตร) (ซ้าย)	ความดัน คาปิลลารี (เซนติเมตร) (ขวา)
720	7.13	125.70	89.58	-0.58	0.01	-1.71	0.02

ตารางผนวกที่ ข17 ผลการทดลองวัดมุมสัมผัสระหว่างสาร TCE บนพื้นผิวหินปูน ล้อมรอบ
ด้วยสารละลายโพลูอินเกินค่าความสามารถละลายได้สูงสุด ฐาน 2

เวลา (ชั่วโมง)	พื้นที่ (mm ²)	มุมสัมผัส (θ , องศา) (ซ้าย)	มุมสัมผัส (θ , องศา) (ขวา)	cos θ (ซ้าย)	cos θ (ขวา)	ความดัน คาปิลลารี (เซนติเมตร) (ซ้าย)	ความดัน คาปิลลารี (เซนติเมตร) (ขวา)
0	9.52	37.33	24.69	0.80	0.91	2.34	2.67
1	9.37	35.41	37.65	0.82	0.79	2.39	2.33
2	9.21	31.07	25.28	0.86	0.90	2.52	2.66
3	9.03	38.18	30.46	0.79	0.86	2.31	2.53
4	9.25	32.38	21.59	0.84	0.93	2.48	2.73
5	9.24	31.55	26.23	0.85	0.90	2.50	2.63
6	9.53	31.61	32.71	0.85	0.84	2.50	2.47
7	9.49	53.50	37.04	0.59	0.80	1.75	2.34
8	9.11	47.91	25.97	0.67	0.90	1.97	2.64
9	9.05	49.81	34.62	0.65	0.82	1.90	2.42
10	9.05	47.58	26.42	0.67	0.90	1.98	2.63
11	9.14	49.19	31.72	0.65	0.85	1.92	2.50
12	8.98	49.01	38.05	0.66	0.79	1.93	2.31
13	8.82	45.99	28.23	0.69	0.88	2.04	2.59
14	9.01	46.19	40.36	0.69	0.76	2.03	2.24
15	9.11	48.79	26.20	0.66	0.90	1.93	2.64
16	8.94	50.93	37.72	0.63	0.79	1.85	2.32
48	8.45	49.28	34.74	0.65	0.82	1.92	2.41
72	8.87	54.08	36.71	0.59	0.80	1.72	2.35
96	8.71	51.68	24.38	0.62	0.91	1.82	2.68
120	8.48	51.51	40.24	0.62	0.76	1.83	2.24
144	8.74	46.86	38.55	0.68	0.78	2.01	2.30

ตารางผนวกที่ ข17 (ต่อ)

เวลา (ชั่วโมง)	พื้นที่ (mm ²)	มุมสัมผัส (θ , องศา) (ซ้าย)	มุมสัมผัส (θ , องศา) (ขวา)	cos θ (ซ้าย)	cos θ (ขวา)	ความดัน คาปิลลารี (เซนติเมตร) (ซ้าย)	ความดัน คาปิลลารี (เซนติเมตร) (ขวา)
168	8.15	59.51	40.23	0.51	0.76	1.49	2.24
192	7.99	55.21	40.97	0.57	0.76	1.68	2.22
216	7.84	58.08	40.27	0.53	0.76	1.55	2.24
240	8.16	55.26	36.37	0.57	0.81	1.67	2.36
264	8.49	58.52	44.56	0.52	0.71	1.53	2.09
288	8.11	61.28	44.58	0.48	0.71	1.41	2.09
312	7.88	52.23	49.18	0.61	0.65	1.80	1.92
336	8.02	57.04	50.69	0.54	0.63	1.60	1.86
360	8.29	62.36	46.34	0.46	0.69	1.36	2.03
384	7.92	63.49	53.93	0.45	0.59	1.31	1.73
408	7.73	81.94	55.57	0.14	0.57	0.41	1.66
432	8.26	81.82	56.59	0.14	0.55	0.42	1.62
456	7.54	74.15	57.18	0.27	0.54	0.80	1.59
480	7.87	65.04	56.83	0.42	0.55	1.24	1.61
504	8.21	84.13	68.73	0.10	0.36	0.30	1.07
528	8.10	80.42	61.50	0.17	0.48	0.49	1.40
552	8.02	79.41	58.66	0.18	0.52	0.54	1.53
576	8.05	80.56	66.51	0.16	0.40	0.48	1.17
600	8.65	78.28	72.93	0.20	0.29	0.60	0.86
624	8.91	88.54	93.64	0.03	-0.06	0.08	-0.19
648	9.60	88.65	90.00	0.02	0.00	0.07	0.00
672	9.73	79.01	96.35	0.19	-0.11	0.56	-0.32

ตารางผนวกที่ ข17 (ต่อ)

เวลา (ชั่วโมง)	พื้นที่ (mm ²)	มุมสัมผัส (θ , องศา) (ซ้าย)	มุมสัมผัส (θ , องศา) (ขวา)	$\cos \theta$ (ซ้าย)	$\cos \theta$ (ขวา)	ความดัน คาปิลลารี (เซนติเมตร) (ซ้าย)	ความดัน คาปิลลารี (เซนติเมตร) (ขวา)
696	9.37	84.48	103.09	0.10	-0.23	0.28	-0.66
720	9.82	85.11	104.05	0.09	-0.24	0.25	-0.71

ตารางผนวกที่ ข18 ผลการทดลองวัดมุมสัมผัสระหว่างสาร TCE บนพื้นผิวหินปูน ล้อมรอบ
ด้วยสารละลายโพลูอินเกินค่าความสามารถละลายได้สูงสุด ฐาน 3

เวลา (ชั่วโมง)	พื้นที่ (mm ²)	มุมสัมผัส (θ , องศา) (ซ้าย)	มุมสัมผัส (θ , องศา) (ขวา)	cos θ (ซ้าย)	cos θ (ขวา)	ความดัน คาปิลลารี (เซนติเมตร) (ซ้าย)	ความดัน คาปิลลารี (เซนติเมตร) (ขวา)
0	9.13	30.91	24.42	0.86	0.91	2.52	2.67
1	8.97	36.33	33.10	0.81	0.84	2.37	2.46
2	9.35	33.90	27.17	0.83	0.89	2.44	2.61
3	9.42	37.38	24.87	0.79	0.91	2.33	2.66
4	9.40	30.09	26.40	0.87	0.90	2.54	2.63
5	9.17	31.21	26.78	0.86	0.89	2.51	2.62
6	9.53	33.53	25.57	0.83	0.90	2.45	2.65
7	9.60	34.64	23.94	0.82	0.91	2.42	2.68
8	9.67	33.33	31.58	0.84	0.85	2.45	2.50
9	9.46	39.54	33.17	0.77	0.84	2.27	2.46
10	9.17	38.59	26.75	0.78	0.89	2.30	2.62
11	9.28	37.84	26.87	0.79	0.89	2.32	2.62
12	9.17	35.15	26.73	0.82	0.89	2.40	2.62
13	9.55	42.63	25.66	0.74	0.90	2.16	2.65
14	9.43	33.74	32.79	0.83	0.84	2.44	2.47
15	9.58	38.11	31.55	0.79	0.85	2.31	2.50
16	9.12	40.17	28.77	0.76	0.88	2.24	2.57
48	8.70	40.46	29.99	0.76	0.87	2.23	2.54
72	9.00	50.04	34.09	0.64	0.83	1.89	2.43
96	8.86	47.43	38.84	0.68	0.78	1.99	2.29
120	8.80	57.54	41.16	0.54	0.75	1.58	2.21
144	8.92	56.53	41.63	0.55	0.75	1.62	2.20

ตารางผนวกที่ ข18 (ต่อ)

เวลา (ชั่วโมง)	พื้นที่ (mm ²)	มุมสัมผัส (θ , องศา) (ซ้าย)	มุมสัมผัส (θ , องศา) (ขวา)	$\cos \theta$ (ซ้าย)	$\cos \theta$ (ขวา)	ความดัน กาปิลลารี (เซนติเมตร) (ซ้าย)	ความดัน กาปิลลารี (เซนติเมตร) (ขวา)
168	8.72	63.03	45.58	0.45	0.70	1.33	2.06
192	8.13	57.87	48.68	0.53	0.66	1.56	1.94
216	8.45	51.39	43.97	0.62	0.72	1.83	2.11
240	8.40	54.17	50.19	0.59	0.64	1.72	1.88
264	8.39	49.97	49.59	0.64	0.65	1.89	1.90
288	8.46	54.49	48.35	0.58	0.66	1.71	1.95
312	8.16	56.54	46.23	0.55	0.69	1.62	2.03
336	8.54	59.10	49.56	0.51	0.65	1.51	1.91
360	8.38	58.64	49.36	0.52	0.65	1.53	1.91
384	8.43	60.26	48.76	0.50	0.66	1.46	1.94
408	8.38	65.22	53.14	0.42	0.60	1.23	1.76
432	8.31	64.47	60.53	0.43	0.49	1.27	1.44
456	8.23	65.41	55.98	0.42	0.56	1.22	1.64
480	8.35	66.35	57.88	0.40	0.53	1.18	1.56
504	8.36	67.43	56.39	0.38	0.55	1.13	1.63
528	8.42	71.61	61.18	0.32	0.48	0.93	1.42
552	8.66	72.53	66.06	0.30	0.41	0.88	1.19
576	8.47	72.43	67.70	0.30	0.38	0.89	1.11
600	9.13	78.17	66.37	0.21	0.40	0.60	1.18
624	8.42	81.90	80.21	0.14	0.17	0.41	0.50
648	8.47	83.28	76.34	0.12	0.24	0.34	0.69
672	8.65	84.23	78.84	0.10	0.19	0.30	0.57
696	9.06	84.21	81.03	0.10	0.16	0.30	0.46
720	8.82	84.57	79.68	0.09	0.18	0.28	0.53

ประวัติการศึกษา และการทำงาน

ชื่อ –นามสกุล	พชร วงศ์ธานี
วัน เดือน ปี ที่เกิด	28 พฤศจิกายน 2526
สถานที่เกิด	เชียงใหม่
ประวัติการศึกษา	วิทยาศาสตรบัณฑิต (ชีววิทยา)
ตำแหน่งหน้าที่การงานปัจจุบัน	-
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	-
ผลงานดีเด่นและรางวัลทางวิชาการ	-
ทุนการศึกษาที่ได้รับ	ทุนพัฒนาศักยภาพในการทำงานวิจัยของอาจารย์รุ่นใหม่ ประจำปีงบประมาณ 2550