

วัตถุประสงค์

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นศึกษาลักษณะการปนเปื้อนของของเหลวที่ไม่ใช่น้ำ (nonaqueous phase liquids, NAPLs) เมื่อมีการปนเปื้อนใต้ผิวดินแบบผสม โดยเน้นศึกษาการเปลี่ยนแปลงมุมสัมผัส (contact angle) ระหว่างของเหลวที่ไม่ใช่น้ำ (nonaqueous phase liquid, NAPL) และของแข็งเมื่อมีการปนเปื้อนแบบผสมใต้ผิวดิน (ดังปรากฏในวัตถุประสงค์ที่ 1 และ 2) และศึกษาความสัมพันธ์เชิง hysteresis ระหว่างความดันคาปิลลารี กับ water saturation และ ความสามารถในการซึมผ่านสัมพัทธ์ (relative permeability) สำหรับการปนเปื้อนของเหลวที่ไม่ใช่น้ำแบบผสม (วัตถุประสงค์ที่ 3 ถึง 5) โดยทั้งสองประเด็นนี้มีผลต่อการวางแผนการฟื้นฟูพื้นที่ปนเปื้อนในโอกาสต่อไป

1. ศึกษาความสามารถในการละลายน้ำของ NAPL ที่สภาวะสมดุลเพื่อกำหนดระยะเวลาที่เหมาะสมในการถ่ายภาพการเปลี่ยนแปลง wettability
2. ศึกษาผลกระทบต่อพื้นที่ฟื้นฟูพื้นที่ปนเปื้อนเมื่อมุมสัมผัส (contact angle) ระหว่างของเหลวที่ไม่ใช่น้ำ (nonaqueous phase liquid, NAPL) และของแข็งมีการเปลี่ยนแปลงเมื่อมีการปนเปื้อนแบบผสม
3. ศึกษาความสามารถแยกได้จากความสัมพันธ์เชิงฮิสเทอรีซิสระหว่างความดันคาปิลลารีกับการอิ่มตัวด้วยน้ำ, ความสามารถในการซึมผ่านสัมพัทธ์ (relative permeability) และอัตราการเติมน้ำ (imbibition rate) เมื่อมีการปนเปื้อนของเหลวที่ไม่ใช่น้ำ (NAPL) เพียงชนิดเดียว
4. ศึกษาความสามารถแยกได้จากความสัมพันธ์เชิงฮิสเทอรีซิสระหว่างความดันคาปิลลารีกับการอิ่มตัวด้วยน้ำ, ความสามารถในการซึมผ่านสัมพัทธ์ (relative permeability) และอัตราการเติมน้ำ (imbibition rate) สำหรับการปนเปื้อนของเหลวที่ไม่ใช่น้ำแบบผสม
5. ศึกษาการเปลี่ยนแปลงความสามารถแยกได้ระหว่างการปนเปื้อนของเหลวที่ไม่ใช่น้ำแบบผสม และการปนเปื้อนของเหลวที่ไม่ใช่น้ำ (NAPL) เพียงชนิดเดียว จากความสัมพันธ์เชิงฮิสเทอรีซิสระหว่างความดันคาปิลลารีกับการอิ่มตัวด้วยน้ำ, ความสามารถในการซึมผ่านสัมพัทธ์ (relative permeability) และอัตราการเติมน้ำ (imbibition rate)

วิธีทดลอง

วิธีการวิจัยแบ่งเป็น 2 ส่วนหลักคือการทดลองความสามารถเปียกได้ (wettability) และ การทดลอง imbibitions rate, capillary pressure และความอึมตัวด้วยน้ำ โดยมีรายละเอียดดังนี้

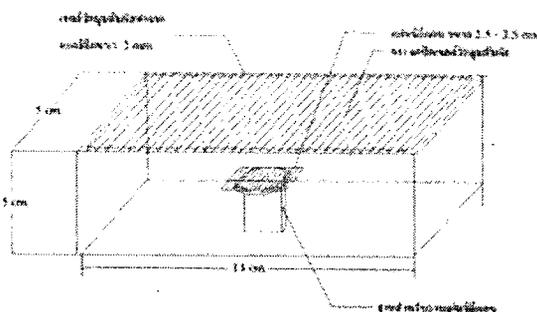
การทดลองส่วนที่ 1 การทดลองความสามารถเปียกได้ (wettability) มีการทดลองทั้งสิ้น 3 ส่วนดังนี้

การทดลอง 1.1 การวัดค่าอัตราการละลายน้ำของ NAPL

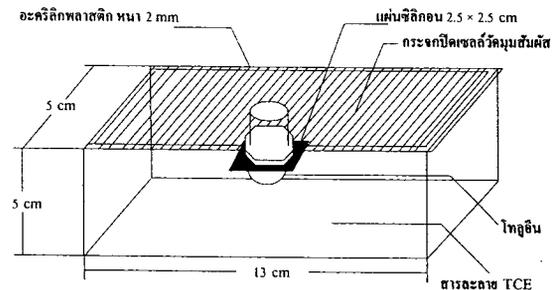
การวัดค่าอัตราการละลายน้ำของ TCE ซึ่งเป็นตัวแทนของ DNAPL และโทลูอินซึ่งเป็นตัวแทนของ LNAPL โดย หาค่าพื้นที่ใต้กราฟโครมาโตกราฟจากค่าความเข้มข้นมาตรฐานของ TCE เตรียม TCE ปริมาตร 50 ml ใส่ในขวด 1,000 ml เติมน้ำ 950 ml เขย่า 15 นาทีและตั้งทิ้งไว้เป็นเวลา 2 วัน ในน้ำจะมีความเข้มข้นของ TCE เท่ากับค่าความสามารถในการละลายน้ำของ TCE 1,100 mg/l (Pankow and Cherry, 1995) จากนั้นนำมาปรับความเข้มข้นในขวดปรับปริมาตร จากความเข้มข้น 1,100 mg/l เป็น 550, 275, 140, 70 และ 35 mg/l และนำความเข้มข้นที่ได้ไปวิเคราะห์หาพื้นที่ใต้กราฟโครมาโตกราฟจากเครื่อง Gas Chromatography

การทดลอง 1.2 การเปรียบเทียบความแตกต่างของมุมสัมผัสระหว่าง NAPL กับของแข็งเมื่อสารปนเปื้อนเพียงสารเดียว (ภายใต้ น้ำใต้ดินจำลอง) และสารปนเปื้อนแบบผสม (ภายใต้ สารละลาย NAPL)

1. ทำความสะอาดแผ่นซิลิคอนและแผ่นควอตซ์ (Powers and Tamblin, 1995) โดยเผาในเตาเผา 450 องศา เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ล้างด้วยกรดไนตริกเข้มข้นและแช่ในอ่างอัลตราโซนิก ล้างด้วย sodium hydroxide 10 M ล้างด้วย isopropanol ในระหว่างแต่ละขั้นตอนล้างออกด้วยน้ำกลั่น

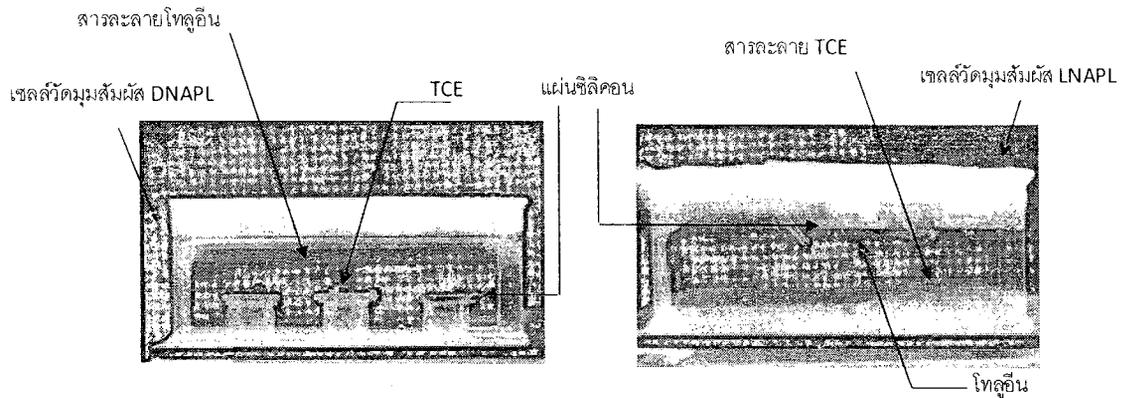


ก)



ข)

ภาพที่ 1 แบบของเซลล์วัดมุมสัมผัสสำหรับ ก) DNAPL และ ข) LNAPL



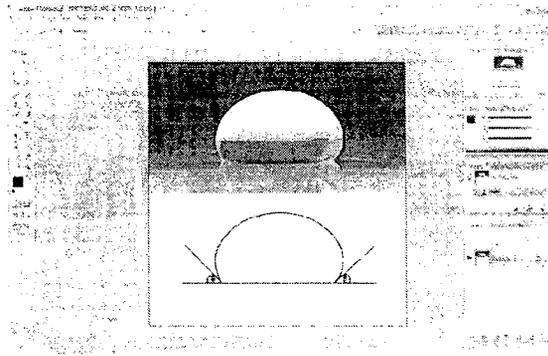
ภาพที่ 2 ภาพการทดลองเซลล์วัดมุมสัมผัสสำหรับ ก) DNAPL และ ข) LNAPL

2. การวัดมุมสัมผัสระหว่าง TCE กับแผ่นซิลิโคน ภายใต้ น้ำ, มุมสัมผัสระหว่าง TCE กับแผ่นควอตซ์ ภายใต้ น้ำ ดังแสดงในภาพที่ 1
 - 2.1. นำแผ่นซิลิโคนและแผ่นควอตซ์วางบนแท่นกลางเซลล์วัดมุมสัมผัส ทิ้งให้อิ่มตัวด้วยน้ำอย่างน้อย 2 วัน เพื่อจำลองสภาพอิ่มตัวด้วยน้ำ
 - 2.2. ใช้ gas tight syringe หยด TCE ขนาด 150 μl ลงบนแผ่นซิลิโคนและควอตซ์ภายในเซลล์วัดมุมสัมผัส บรรจุน้ำใต้ดินจำลองโดยใช้น้ำกลั่นที่ปราศจากไอออนและแก๊ส (DDD water; distilled, deionized, degassed water)
3. การวัดมุมสัมผัสระหว่าง TCE กับแผ่นซิลิโคน ภายใต้สารละลายโทลูอีน, มุมสัมผัสระหว่าง TCE กับแผ่นควอตซ์ ภายใต้สารละลายโทลูอีน แสดงในภาพที่ 1 ก และภาพที่ 2 ก
 - 3.1. นำแผ่นซิลิโคนและแผ่นควอตซ์ วางบนแท่นกลางเซลล์วัดมุมสัมผัส ทิ้งให้อิ่มตัวด้วยสารละลายโทลูอีน ความเข้มข้น 421 mg/l อย่างน้อย 2 วัน
 - 3.2. ใช้ gas tight syringe หยด TCE ขนาด 150 μl ลงบนแผ่นซิลิโคนและควอตซ์ภายในเซลล์วัดมุมสัมผัส บรรจุสารละลายโทลูอีนความเข้มข้น 421 mg/l
4. การวัดมุมสัมผัสระหว่างโทลูอีนกับแผ่นซิลิโคน ภายใต้ น้ำ, มุมสัมผัสระหว่างโทลูอีนกับแผ่นควอตซ์ ภายใต้ น้ำ ดังแสดงในภาพที่ 2
 - 4.1. นำแผ่นซิลิโคนและแผ่นควอตซ์วางบนแท่นกลางเซลล์วัดมุมสัมผัส ทิ้งให้อิ่มตัวด้วยน้ำอย่างน้อย 2 วัน

- 4.2. ใช้ gas tight syringe หยดโหลอื่นขนาด 150 μ l ลงบนแผ่นซิลิคอนและควอตซ์ภายในเซลล์วัดมุมสัมผัส บรรจุ DDD water
5. มุมสัมผัสระหว่างโหลอื่นกับแผ่นซิลิคอนภายใต้สารละลาย TCE, มุมสัมผัสระหว่างโหลอื่นกับแผ่นควอตซ์ ภายใต้สารละลาย TCE
 - 5.1. นำแผ่นซิลิคอนและแผ่นควอตซ์ วางบนแท่นกลางเซลล์วัดมุมสัมผัส ทิ้งให้อิ่มตัวด้วยสารละลาย TCE ความเข้มข้น 1,100 mg/l อย่างน้อย 2 วัน
 - 5.2. ใช้ gas tight syringe หยดโหลอื่นขนาด 150 μ l ลงบนแผ่นซิลิคอนและควอตซ์ภายในเซลล์วัดมุมสัมผัส บรรจุสารละลาย TCE ความเข้มข้น 1,100 mg/l
6. ถ่ายภาพการเปลี่ยนแปลงของมุมสัมผัส วัดมุมสัมผัสจากรูปดิจิทัลด้วยโปรแกรม Photoshop CS2

การทดลอง 1.3 การเปรียบเทียบความแตกต่างของมุมสัมผัสระหว่างน้ำกับของแข็งที่ยังไม่ผ่านการปนเปื้อน NAPL ซึ่งล้อมรอบด้วยอากาศ และมุมสัมผัสระหว่างน้ำกับของแข็งที่ผ่านการปนเปื้อน NAPL ซึ่งล้อมรอบด้วยอากาศ

1. มุมสัมผัสระหว่างน้ำกับแผ่นซิลิคอนที่ไม่มีการปนเปื้อน TCE ซึ่งล้อมรอบด้วยอากาศ, มุมสัมผัสระหว่างน้ำกับแผ่นควอตซ์ที่ไม่มีการปนเปื้อน TCE ซึ่งล้อมรอบด้วยอากาศ ทำโดยใช้ gas tight syringe หยดน้ำขนาด 150 μ l ลงบนแผ่นซิลิคอนและควอตซ์ที่ไม่มีการปนเปื้อน TCE และโหลอื่น
2. มุมสัมผัสระหว่างน้ำกับแผ่นซิลิคอนที่ไม่มีการปนเปื้อนโหลอื่น ซึ่งล้อมรอบด้วยอากาศ, มุมสัมผัสระหว่างน้ำกับแผ่นควอตซ์ที่ไม่มีการปนเปื้อนโหลอื่น ซึ่งล้อมรอบด้วยอากาศ โดยใช้ gas tight syringe หยดน้ำขนาด 150 μ l ลงบนแผ่นซิลิคอนและควอตซ์ที่ไม่มีการปนเปื้อนโหลอื่น
3. มุมสัมผัสระหว่างน้ำกับแผ่นซิลิคอนที่มีการปนเปื้อน TCE ซึ่งล้อมรอบด้วยอากาศ, มุมสัมผัสระหว่างน้ำกับแผ่นควอตซ์ที่มีการปนเปื้อน TCE ซึ่งล้อมรอบด้วยอากาศ โดยใช้ gas tight syringe หยดน้ำขนาด 150 μ l ลงบนแผ่นซิลิคอนและควอตซ์ที่มีการปนเปื้อน TCE
4. มุมสัมผัสระหว่างน้ำกับแผ่นซิลิคอนที่มีการปนเปื้อนโหลอื่น ซึ่งล้อมรอบด้วยอากาศ, มุมสัมผัสระหว่างน้ำกับแผ่นควอตซ์ที่มีการปนเปื้อนโหลอื่น ซึ่งล้อมรอบด้วยอากาศ โดยใช้ gas tight syringe หยดน้ำขนาด 150 μ l ลงบนแผ่นซิลิคอนและควอตซ์ที่มีการปนเปื้อนโหลอื่น
5. ถ่ายภาพมุมสัมผัส
6. วัดมุมสัมผัสจากรูปดิจิทัลด้วยโปรแกรม Photoshop CS2 ดังภาพที่ 3

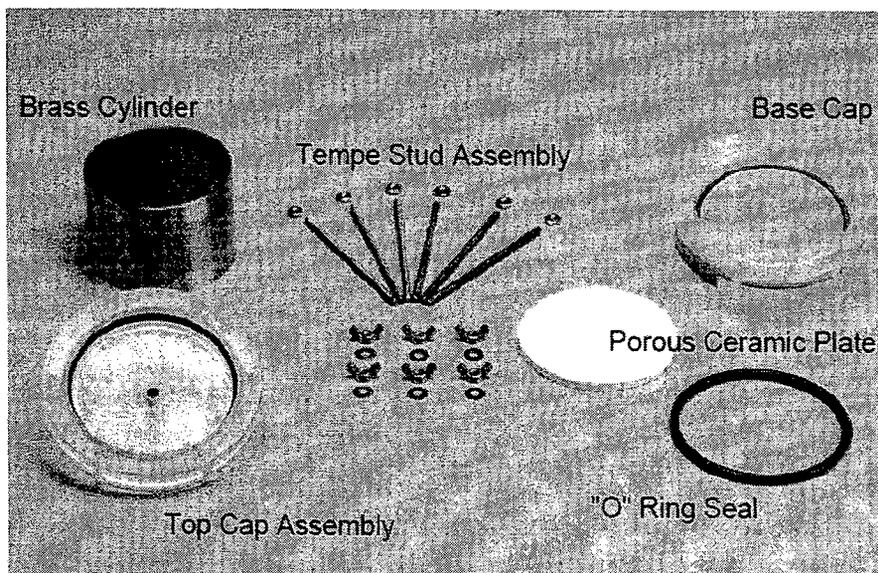


ภาพที่ 3 การวัดมุมสัมผัสจากรูปดิจิทัลด้วยโปรแกรม Photoshop CS2

การทดลองส่วนที่ 2 การทดลอง imbibitions rate, capillary pressure และความอืดตัวด้วยน้ำ
อุปกรณ์และสารเคมีที่ใช้ในการทดสอบอัตราการเติมน้ำ

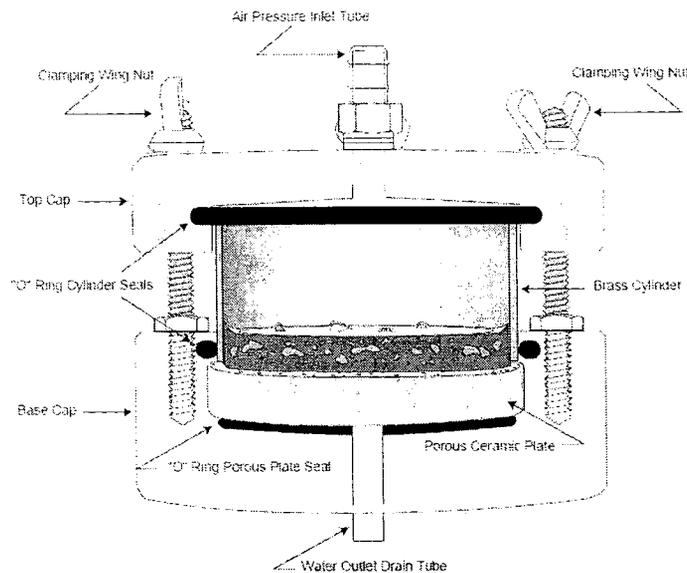
1. Tempe[®] Cell สำหรับทดสอบอัตราการเติมน้ำ (Soilmoisture Equipment Corp., U.S.A.)

ภาพที่ 4 แสดงชิ้นส่วนอุปกรณ์ Tempe[®] Cell โดยแบ่งออกเป็น 3 ส่วน 1. ฝาปิดด้านบนและด้านล่างทำจากวัสดุ plexiglass มีแหวนยางรูปตัว “ O ” อยู่ด้านในทำหน้าที่ป้องกันการรั่วซึม 2. ทรงกระบอกทองเหลืองทำหน้าที่บรรจุตัวกลาง 3. แผ่นเซรามิก ขนาด 0.5 บาร์ ภาพที่ 5 แสดงอุปกรณ์ Tempe[®] Cell ที่ประกอบแล้ว



ภาพที่ 4 ชิ้นส่วนอุปกรณ์ Tempe[®] Cell

ที่มา : Soilmoisture Equipment Corp., U.S.A.



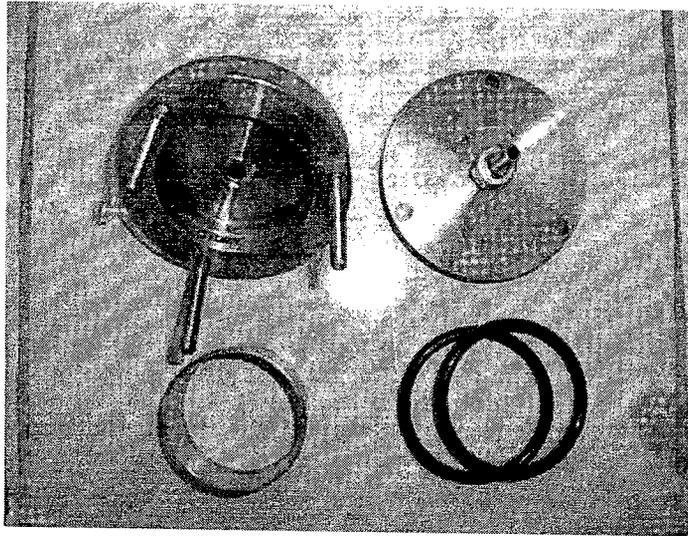
ภาพที่ 5 ภาพตัด Tempe[®] Cell ที่ประกอบแล้ว

ที่มา : Soilmoisture Equipment Corp., U.S.A.

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

อุปกรณ์และสารเคมีที่ใช้ในการหาความสัมพันธ์ระหว่างความตึงคาปิลลารี และความอิมิตัวด้วยน้ำ

1. อุปกรณ์ที่ดัดแปลงมาจาก Tempe[®] Cell ผลิตจาก stainless steel โดยแบ่งออกเป็น 3 ส่วน 1. ฝาปิดด้านบนและด้านล่างทำจากวัสดุ stainless steel มีแหวนยางรูปตัว “ O ” อยู่ด้านในทำหน้าที่ป้องกันการรั่วซึม 2. ทรงกระบอก stainless steel ทำหน้าที่บรรจุตัวกลาง แสดงดังภาพที่ 6



ภาพที่ 6 อุปกรณ์ที่ดัดแปลงมาจาก Tempe[®] Cell ผลิตจาก stainless steel

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

10. ทรายชนิด Ottawa sand (Fisher Scientific[®]) ที่สะอาดและมีปริมาณสารอินทรีย์ต่ำ เม็ดทรายมีขนาดอยู่ในช่วงตะแกรงเบอร์ 20 – 30 (เส้นผ่านศูนย์กลาง 0.58 – 0.84 มิลลิเมตร) ค่าความถ่วงจำเพาะ 2.65 มีมวลโมเลกุลเท่ากับ 60.08
11. ตลับเมตร อ่านได้ละเอียด 0.05 มิลลิเมตร

อุปกรณ์และสารเคมีที่ใช้ในการหาความซึมผ่านได้สัมพัทธ์

1. อุปกรณ์ที่ดัดแปลงมาจาก Tempe[®] Cell ผลิตจาก stainless steel โดยแบ่งออกเป็น 3 ส่วน 1. ฝาปิดด้านบนและด้านล่างทำจากวัสดุ stainless steel มีแหวนยางรูปตัว “ O ” อยู่ด้านในทำหน้าที่ป้องกันการรั่วซึม 2. ทรงกระบอก stainless steel ทำหน้าที่บรรจุตัวกลาง
2. บิวเรต
3. PTFE membrane ขนาด 0.45 ไมโครเมตร
4. นาฬิกาจับเวลาระบบดิจิทัล
5. น้ำกลั่นปราศจากไอออน(deionized distilled water) มี pH เฉลี่ยเท่ากับ 6.82
6. สารโทลูอีน
7. สารไตรคลอโรเอทธีลีน
8. ทรายชนิด Ottawa sand (Fisher Scientific[®]) ที่สะอาดและมีปริมาณสารอินทรีย์ต่ำ เม็ดทรายมีขนาดอยู่ในช่วงตะแกรงเบอร์ 20 – 30 (เส้นผ่านศูนย์กลาง 0.58 – 0.84 มิลลิเมตร) ค่าความถ่วงจำเพาะ 2.65 มีมวลโมเลกุลเท่ากับ 60.08
9. ตู้อบไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส

วิธีการ วิธีการทดลองแบ่งออกเป็น 3 ส่วน

การทดลอง 2.1 การทดสอบอัตราการเติมน้ำของตัวกลาง

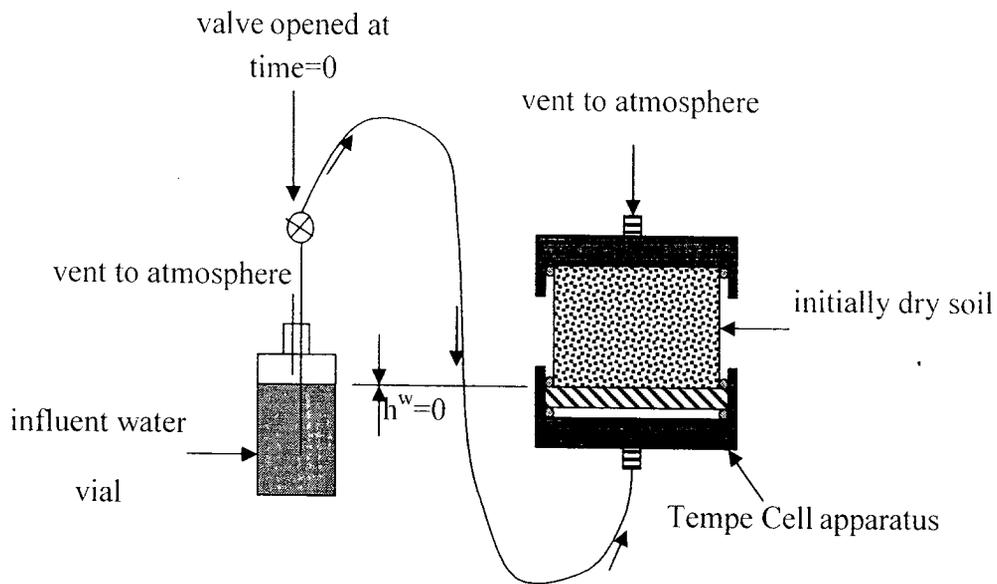
การทดลองนี้ได้พัฒนามาจาก Powers and Tamblin, 1995 โดยการจัดเตรียมตัวอย่างตัวกลางปนเปื้อนนั้น จะใช้ Ottawa sand เป็นตัวกลาง และทำให้ตัวกลางได้รับการปนเปื้อนเสมือนการปนเปื้อนใต้ผิวดิน ซึ่งส่วนมากในระบบใต้ผิวดินตัวกลางจะมีความชื้นอยู่ก่อนที่จะมีการปนเปื้อน ดังนั้นพื้นผิวของตัวกลางจึงต้องถูกทำให้มีความชื้นก่อนที่จะได้รับสารปนเปื้อน โดยนำตัวกลางบรรจุลงใน

ขวดที่บัสแสง แล้วเติมน้ำ 15% (ปริมาตรน้ำ/ปริมาตรช่องว่าง) จากนั้นแล้วจึงเติม NAPL โดยการฉีดให้ค่อยๆไหลขึ้นจากด้านล่างขึ้นด้านบน แล้วปิดขวดให้แน่นบมทิ้งไว้เป็นเวลา 14-60 วัน เพื่อให้เกิดการดูดซับระหว่างตัวกลางกับสารปนเปื้อน โดยช่วงเวลา 14-60 วันนี้เป็นช่วงเวลาที่มี NAPL มีการเปลี่ยนแปลงมุมสัมผัสกับผิวตัวกลางน้อยมาก เมื่อครบกำหนดแล้วนำตัวกลางมาล้างน้ำเพื่อกำจัด NAPL ส่วนเกินออก แล้วนำตัวกลางทิ้งไว้ให้แห้งที่อุณหภูมิห้องจนตัวกลางมีน้ำหนักใกล้เคียงกับน้ำหนักก่อนการปนเปื้อน การทดลองแต่ละแบบแสดงดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 การทดลองเพื่อศึกษาการปนเปื้อนแบบต่างๆ

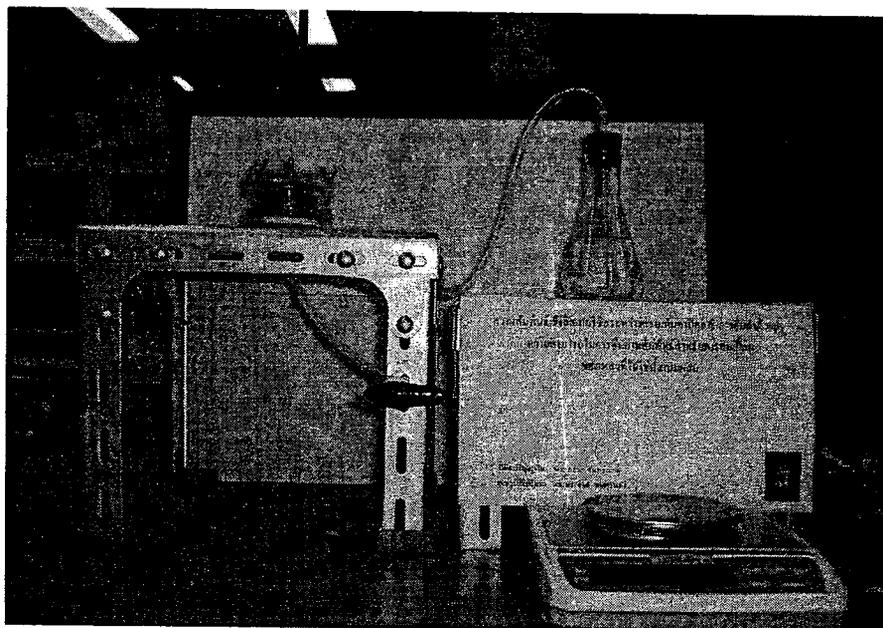
ตัวอย่างที่	ลักษณะการปนเปื้อน
1	ไม่มีการปนเปื้อน
2	ความชื้น 15% ปนเปื้อน LNAPL
3	ความชื้น 15% ปนเปื้อน DNAPL
4	ความชื้น 15% ปนเปื้อนครั้งที่1 ด้วย LNAPL ครั้งที่2 ด้วย DNAPL
5	ความชื้น 15% ปนเปื้อนครั้งที่1 ด้วย DNAPL ครั้งที่2 ด้วย LNAPL

การติดตั้งอุปกรณ์วัดอัตราการเติมน้ำนั้นจะทำการติดตั้ง Tempe[®] Cell เข้ากับขวดบรรจุน้ำ ที่มีระดับของผิวน้ำอยู่ในระดับเดียวกับผิวนบนของแผ่นเซรามิคของ Tempe[®] Cell (ก่อนที่จะบรรจุแผ่นเซรามิคลงไปนั้นจะต้องทำให้แผ่นเซรามิคอ้อมตัวด้วยน้ำด้วยอุปกรณ์ดูดอากาศ) โดยมีวาล์วคอยควบคุมการเข้า - ออกของน้ำ แสดงดังภาพที่ 7



ภาพที่ 7 รูปแบบการติดตั้งอุปกรณ์วัดอัตราการเติมน้ำ

การทดสอบอัตราการเติมน้ำจะทดสอบในสภาวะที่ประกอบด้วยอากาศ และตัวกลางที่ไม่ปนเปื้อน ภาพที่ 8 ตัวกลางที่แห้งจะถูกบรรจุลงกระบอกเก็บตัวอย่างดิน ซึ่งวางอยู่บนแผ่นเซรามิก ใน Tempe[®] Cell ทำการชั่งน้ำหนักขวดบรรจุน้ำในขณะที่ปิดวาล์วก่อนเริ่มการทดลอง เมื่อเริ่มทดลองให้เปิดวาล์วแล้วเริ่มจับเวลาทันที จากนั้นทำการชั่งน้ำหนักขวดบรรจุน้ำอย่างสม่ำเสมอจนครบ 300 นาที มวลของน้ำที่หายไปจากขวดบรรจุน้ำจะถูกนำมาใช้คำนวณค่าความอิ่มตัวด้วยน้ำในตัวอย่างทรายเทียบกับเวลา โดยการทดลองนี้จะทำการทดลองทั้งหมด 3 ครั้ง



ภาพที่ 8 แสดงชุดการทดสอบอัตราการเติมน้ำ

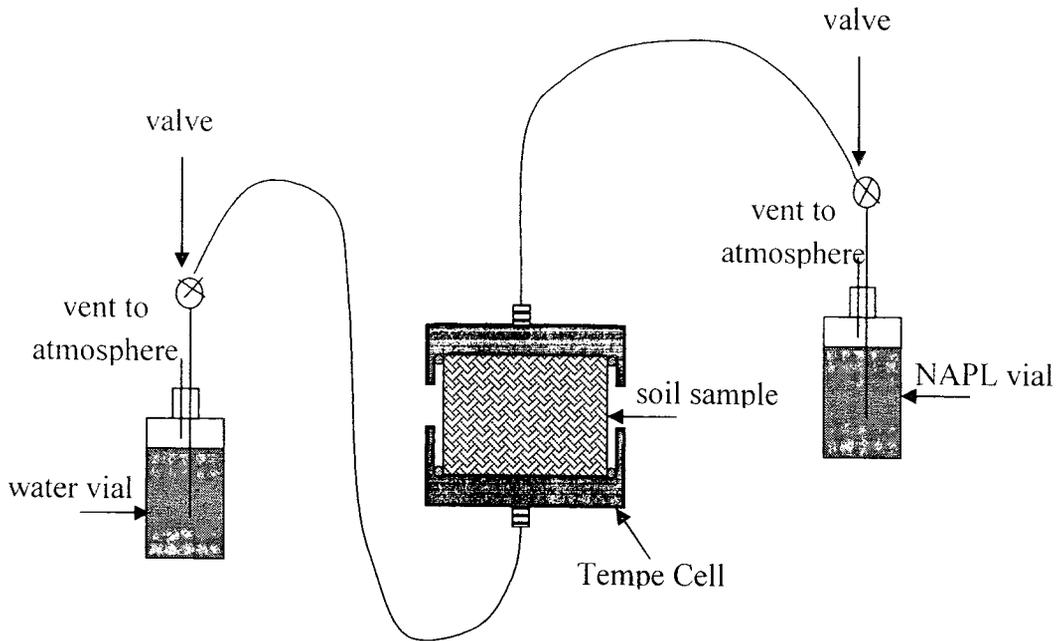
1. การจัดเตรียมตัวกลางที่ไม่ปนเปื้อน ตัวกลางที่ใช้ในการทดลอง เป็นทราย Ottawa sand ที่ทราบคุณลักษณะทางเคมี และฟิสิกส์ นำมาผ่านการอบไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 16 ชั่วโมง
2. การจัดเตรียมตัวกลางที่มีการปนเปื้อน LNAPL ตัวกลางที่ใช้ในการทดลอง เป็นทราย Ottawa sand ที่ทราบคุณลักษณะทางเคมี และฟิสิกส์ นำมาผ่านการอบไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 16 ชั่วโมง ชั่งน้ำหนักตัวกลาง แล้วบรรจุลงไปในขวดทึบแสง เติมน้ำ 15% (ปริมาตรน้ำ/ปริมาตรช่องว่าง) จากนั้นแล้วจึงเติม LNAPL โดยให้สารโทลูอินเป็นตัวแทนของ LNAPL โดยฉีดให้ค่อยๆไหลขึ้นจากด้านล่างขึ้นด้านบน แล้วปิดขวดให้แน่นบ่มทิ้งไว้เป็นเวลา 14-60 วัน เมื่อครบกำหนดแล้วนำตัวกลางมาล้างน้ำเพื่อกำจัดโทลูอินส่วนเกินออก แล้วนำตัวกลางทิ้งไว้ให้แห้งที่อุณหภูมิห้องจนตัวกลางมีน้ำหนักใกล้เคียงกับน้ำหนักก่อนการปนเปื้อน
3. การจัดเตรียมตัวกลางที่มีการปนเปื้อน DNAPL ตัวกลางที่ใช้ในการทดลอง เป็นทราย Ottawa sand ที่ทราบคุณลักษณะทางเคมี และฟิสิกส์ นำมาผ่านการอบไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 16 ชั่วโมง ชั่งน้ำหนักตัวกลาง แล้วบรรจุลงไปในขวดทึบแสง เติมน้ำ 15% (ปริมาตรน้ำ/ปริมาตรช่องว่าง) จากนั้นแล้วจึงเติม DNAPL โดยให้สารไตรคลอโรเอทธีลีนเป็นตัวแทนของ DNAPL โดยฉีดให้ค่อยๆไหลขึ้นจากด้านล่างขึ้นด้านบน แล้วปิดขวดให้แน่นบ่มทิ้งไว้เป็นเวลา 14-60 วัน เมื่อครบกำหนดแล้วนำตัวกลางมาล้างน้ำเพื่อกำจัดไตรคลอโรเอทธีลีนส่วนเกินออก แล้วนำตัวกลางทิ้งไว้ให้แห้งที่อุณหภูมิห้องจนตัวกลางมีน้ำหนักใกล้เคียงกับน้ำหนักก่อนการปนเปื้อน
4. การจัดเตรียมตัวกลางที่มีการปนเปื้อนครั้งที่ 1 ด้วย LNAPL และครั้งที่ 2 ด้วย DNAPL ตัวกลางที่ใช้ในการทดลอง เป็นทราย Ottawa sand ที่ทราบคุณลักษณะทางเคมี และฟิสิกส์ นำมาผ่านการอบไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 16 ชั่วโมง ชั่งน้ำหนักตัวกลาง แล้วบรรจุลงไปในขวดทึบแสง เติมน้ำ 15% (ปริมาตรน้ำ/ปริมาตรช่องว่าง) จากนั้นแล้วจึงเติม LNAPL โดยให้สารโทลูอินเป็นตัวแทนของ LNAPL โดยฉีดให้ค่อยๆไหลขึ้นจากด้านล่างขึ้นด้านบน แล้วปิดขวดให้แน่นบ่มทิ้งไว้เป็นเวลา 14-60 วัน เมื่อครบกำหนดแล้วนำตัวกลางมาล้างน้ำเพื่อกำจัดโทลูอินส่วนเกินออก แล้วนำตัวกลางทิ้งไว้ให้แห้งที่อุณหภูมิห้องจนตัวกลางมีน้ำหนักใกล้เคียงกับน้ำหนักก่อนการปนเปื้อน หลังจากนั้นนำตัวกลางที่มีการปนเปื้อนครั้งที่ 1 ด้วย LNAPL มาทำการปนเปื้อนครั้งที่ 2 ด้วย DNAPL โดยนำตัวกลางไปชั่งน้ำหนัก แล้วบรรจุลงไปในขวดทึบแสง เติมน้ำ 15% (ปริมาตรน้ำ/ปริมาตรช่องว่าง) จากนั้นแล้วจึงเติม DNAPL โดยให้สารไตรคลอโรเอทธีลีนเป็นตัวแทนของ DNAPL โดยฉีดให้ค่อยๆไหลขึ้นจากด้านล่างขึ้นด้านบน แล้วปิดขวดให้แน่นบ่มทิ้งไว้เป็นเวลา 14-60 วัน เมื่อครบกำหนดแล้วนำตัวกลางมาล้างน้ำเพื่อกำจัดไตรคลอโรเอทธีลีนส่วนเกินออก แล้วนำตัวกลางทิ้งไว้ให้แห้งที่อุณหภูมิห้องจนตัวกลางมีน้ำหนักใกล้เคียงกับน้ำหนักก่อนการปนเปื้อน

5. การจัดเตรียมตัวกลางที่มีการปนเปื้อนครั้งที่ 1 ด้วย DNAPL และครั้งที่ 2 ด้วย LNAPL ตัวกลางที่ใช้ในการทดลอง เป็นทราย Ottawa sand ที่ทราบคุณลักษณะทางเคมี และฟิสิกส์ นำมาผ่านการอบไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 16 ชั่วโมง ซึ่งน้ำหนักตัวกลาง แล้วบรรจุลงไปในขวดทึบแสง เติมน้ำ 15% (ปริมาตรน้ำ/ปริมาตรช่องว่าง) จากนั้นแล้วจึงเติม DNAPL โดยให้สารไตรคลอโรเอทิลีนเป็นตัวแทนของ DNAPL โดยฉีดให้ค่อยๆไหลขึ้นจากด้านล่างขึ้นด้านบน แล้วปิดขวดให้แน่นบ่มทิ้งไว้เป็นเวลา 14-60 วัน เมื่อครบกำหนดแล้วนำตัวกลางมาล้างน้ำเพื่อกำจัดไตรคลอโรเอทิลีนส่วนเกินออก แล้วนำตัวกลางทิ้งไว้ให้แห้งที่อุณหภูมิห้องจนตัวกลางมีน้ำหนักใกล้เคียงกับน้ำหนักก่อนการปนเปื้อน หลังจากนั้นนำตัวกลางที่มีการปนเปื้อนครั้งที่ 1 ด้วย DNAPL มาทำการปนเปื้อนครั้งที่ 2 ด้วย LNAPL โดยนำตัวกลางไปชั่งน้ำหนัก แล้วบรรจุลงไปในขวดทึบแสง เติมน้ำ 15% (ปริมาตรน้ำ/ปริมาตรช่องว่าง) จากนั้นแล้วจึงเติม LNAPL โดยให้สารโทลูอินเป็นตัวแทนของ LNAPL โดยฉีดให้ค่อยๆไหลขึ้นจากด้านล่างขึ้นด้านบน แล้วปิดขวดให้แน่นบ่มทิ้งไว้เป็นเวลา 14-60 วัน เมื่อครบกำหนดแล้วนำตัวกลางมาล้างน้ำเพื่อกำจัดโทลูอินส่วนเกินออก แล้วนำตัวกลางทิ้งไว้ให้แห้งที่อุณหภูมิห้องจนตัวกลางมีน้ำหนักใกล้เคียงกับน้ำหนักก่อนการปนเปื้อน

การทดลอง 2.2 การหาความสัมพันธ์ระหว่างความดันคาปิลลารี และความอึมตัวด้วยน้ำ

การทดลองนี้ได้พัฒนามาจาก Powers and Tamblin, 1995 โดยการประดิษฐ์อุปกรณ์ที่พัฒนามาจากอุปกรณ์ Tempe[®] Cell ด้วยวัสดุ stainless steel มีกระดาดทรงอยู่ส่วนล่างของเซลล์เพื่อใช้เป็นทางผ่านของน้ำ ขณะที่ด้านบนมี PTFE membrane อยู่เพื่อให้เป็นทางผ่านของ NAPL แสดงดังภาพที่ 9 การทดลองนี้จะได้กราฟความดันคาปิลลารีเปรียบเทียบกับความอึมตัวด้วยน้ำ เพื่อใช้ในการหาดัชนีชี้วัดความสามารถเปียกได้ของตัวกลาง

ขั้นตอนการทดลองโดยทั่วไปได้มีการพัฒนามาจาก Wilson et al. (1990) โดยการวัดมวลที่เข้าแทนที่ การทดลองนั้นเริ่มต้นจากการนำตัวกลางที่แห้งมาบรรจุลงในเซลล์แล้วเติมน้ำเข้าไปในตัวกลางให้อึมตัวด้วยน้ำ 100% จากนั้นต่ออุปกรณ์ท่อเข้าที่ส่วนบนและส่วนล่างของเซลล์ โดยส่วนบนนั้นต่อท่อเข้ากับภาชนะบรรจุ NAPL ส่วนท่อที่ต่อเข้าทางด้านล่างนั้นต่อเข้ากับภาชนะบรรจุ น้ำ ความดันคาปิลลารีถูกควบคุมด้วยการขยับขึ้น - ลงของภาชนะบรรจุ น้ำและภาชนะบรรจุ NAPL ความอึมตัวด้วยน้ำจะถูกวัดจากการเปลี่ยนแปลงของมวลของน้ำที่อยู่ในภาชนะบรรจุ น้ำ เพื่อให้มั่นใจว่าไม่มีการสูญเสียมวลของน้ำ และ NAPL ออกสู่บรรยากาศ จึงได้จัดทำภาชนะที่มีลักษณะเช่นเดียวกับภาชนะที่ใช้บรรจุของเหลวในการทดลองส่วนนี้อีกชุด เพื่อควบคุมการสูญเสียจากการระเหยของของเหลวในภาชนะที่ต่อเข้ากับเซลล์วัดความดันคาปิลลารี



ภาพที่ 9 อุปกรณ์หาความสัมพันธ์ระหว่างความดันคาปิลลารี และความอิมต้วด้วยน้ำ

1. การหาความสัมพันธ์ระหว่างความดันคาปิลลารี และความอิมต้วด้วยน้ำ ด้วยระบบ LNAPL - น้ำ

อุปกรณ์วัดความดันคาปิลลารีที่บรรจุตัวกลางอิมต้วด้วยน้ำ 100% จะถูกเชื่อมต่อเข้ากับภาชนะบรรจุ น้ำทางส่วนล่างของเซลล์ ส่วนทางด้านบนนั้นถูกต่อเชื่อมกับภาชนะบรรจุ LNAPL ซึ่งใช้โทลูอินเป็นตัวแทน ในการทดลองนี้จะแบ่งการทดลองออกเป็น 4 ส่วน เริ่มจาก ระบายน้ำออกครั้งที่ 1 จนค่าความดันคาปิลลารีสูงขึ้นและไม่สามารถระบายออกได้ จากนั้นให้น้ำน้ำเข้าจนความดันมีค่าต่ำลงและน้ำไม่สามารถเข้าไปในเซลล์ได้ และสุดท้ายระบายน้ำออกอีกครั้งเป็นครั้งที่ 2 การนำน้ำเข้าไปในเซลล์และระบายออกจากเซลล์นั้นอาศัยแรงดันที่เกิดจากการขยับขึ้น - ลงของภาชนะบรรจุของเหลวทั้ง 2 ชนิดอย่างช้าๆ จนระดับของของเหลวในภาชนะหยุดนิ่ง แล้วจึงวัดระดับความสูงของของเหลวทั้งสองเพื่อนำมาคำนวณหาความดันคาปิลลารี และนำภาชนะบรรจุของเหลวมาชั่งน้ำหนักเพื่อคำนวณหา ระดับความอิมต้ว (ปริมาตรของเหลว/ปริมาตรช่องว่าง) สุดท้ายนำผลการทดลองที่ได้ไปสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความดันคาปิลลารี และความอิมต้วด้วยน้ำ ด้วยระบบ LNAPL - น้ำ เพื่อคำนวณหาพื้นที่ใต้กราฟ แล้วนำมาวิเคราะห์หาค่าดัชนีชี้วัดความสามารถเปียกได้

2. การหาความสัมพันธ์ระหว่างความดันคาปิลลารี และความอิมต้วด้วยน้ำ ด้วยระบบ DNAPL - น้ำ

อุปกรณ์วัดความดันคาปิลลารีที่บรรจุตัวกลางอิมต้วด้วยน้ำ 100% จะถูกเชื่อมต่อเข้ากับภาชนะบรรจุ น้ำทางส่วนล่างของเซลล์ ส่วนทางด้านบนนั้นถูกต่อเชื่อมกับภาชนะบรรจุ DNAPL ซึ่งใช้ไตรคลอโรเอทิลีนเป็นตัวแทน ในการทดลองนี้จะแบ่งการทดลองออกเป็น 4 ส่วน เริ่มจาก ระบายน้ำออกครั้งที่ 1 จนค่า

ความดันคาปิลลารีสูงขึ้นและไม่สามารถระบายออกได้ จากนั้นให้น้ำน้ำเข้าจนความดันมีค่าต่ำลงและน้ำไม่สามารถเข้าไปในเซลล์ได้ และสุดท้ายระบายน้ำออกอีกครั้งเป็นครั้งที่ 2 การนำน้ำเข้าไปในเซลล์และระบายออกจากเซลล์นั้นอาศัยแรงดันที่เกิดจากการขยับขึ้น - ลงของภาชนะบรรจุของเหลวทั้ง 2 ชนิดอย่างช้าๆ จนระดับของของเหลวในภาชนะหยุดนิ่ง แล้วจึงวัดระดับความสูงของของเหลวทั้งสองเพื่อนำมาคำนวณหาความดันคาปิลลารี และนำภาชนะบรรจุของเหลวมาชั่งน้ำหนักเพื่อคำนวณหา ระดับความอิมัตว์ (ปริมาตรของเหลว/ปริมาตรช่องว่าง) สุดท้ายนำผลการทดลองที่ได้ไปสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความดันคาปิลลารี และความอิมัตว์ด้วยน้ำ ด้วยระบบ DNAPL - น้ำ เพื่อคำนวณหาพื้นที่ใต้กราฟ แล้วนำมาวิเคราะห์หัดชนีชี้วัดความสามารถเปียกได้

3. การหาความสัมพันธ์ระหว่างความดันคาปิลลารี และความอิมัตว์ด้วยน้ำ ด้วยระบบ LNAPL - น้ำ เมื่อมี DNAPL ตกค้างอยู่ในตัวกลาง

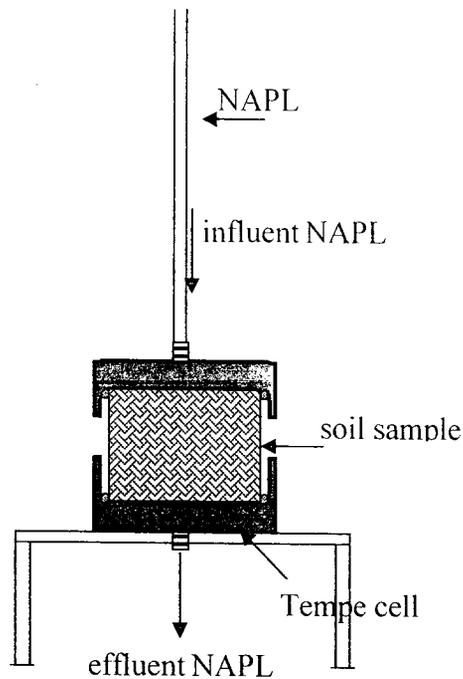
อุปกรณ์วัดความดันคาปิลลารีที่บรรจุตัวกลางอิมัตว์ด้วยน้ำ 100% จะถูกเชื่อมต่อเข้ากับภาชนะบรรจุ น้ำทางส่วนล่างของเซลล์ ส่วนทางด้านบนนั้นถูกต่อเชื่อมกับภาชนะบรรจุ LNAPL ซึ่งใช้โทลูอินเป็นตัวแทน ในการทดลองนี้จะแบ่งการทดลองออกเป็น 4 ส่วน เริ่มจาก ระบายน้ำออกครั้งที่ 1 จนค่าความดันคาปิลลารีสูงขึ้นและไม่สามารถระบายออกได้ จากนั้นให้น้ำน้ำเข้าจนความดันมีค่าต่ำลงและน้ำไม่สามารถเข้าไปในเซลล์ได้ และสุดท้ายระบายน้ำออกอีกครั้งเป็นครั้งที่ 2 การนำน้ำเข้าไปในเซลล์และระบายออกจากเซลล์นั้นอาศัยแรงดันที่เกิดจากการขยับขึ้น - ลงของภาชนะบรรจุของเหลวทั้ง 2 ชนิดอย่างช้าๆ จนระดับของของเหลวในภาชนะหยุดนิ่ง แล้วจึงวัดระดับความสูงของของเหลวทั้งสองเพื่อนำมาคำนวณหาความดันคาปิลลารี และนำภาชนะบรรจุของเหลวมาชั่งน้ำหนักเพื่อคำนวณหา ระดับความอิมัตว์ (ปริมาตรของเหลว/ปริมาตรช่องว่าง) สุดท้ายนำผลการทดลองที่ได้ไปสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความดันคาปิลลารี และความอิมัตว์ด้วยน้ำ ด้วยระบบ LNAPL - น้ำ เพื่อคำนวณหาพื้นที่ใต้กราฟ แล้วนำมาวิเคราะห์หัดชนีชี้วัดความสามารถเปียกได้ จากนั้นทำการถอดอุปกรณ์ท่อที่เชื่อมต่อกับภาชนะบรรจุ LNAPL แล้วนำท่อมาต่อเชื่อมกับภาชนะบรรจุ DNAPL โดยให้ ไตรคลอโรเอทิลีนเป็นตัวแทนของ DNAPL ต่อเข้ากับเซลล์วัดความดัน แล้วเริ่มการทดลองต่อ โดยเริ่มทำการระบายน้ำออกครั้งที่ 1 จนค่าความดันคาปิลลารีสูงขึ้นและไม่สามารถระบายออกได้ จากนั้นให้น้ำน้ำเข้าจนความดันมีค่าต่ำลงและน้ำไม่สามารถเข้าไปในเซลล์ได้ และสุดท้ายระบายน้ำออกอีกครั้งเป็นครั้งที่ 2 การนำน้ำเข้าไปในเซลล์และระบายออกจากเซลล์นั้นอาศัยแรงดันที่เกิดจากการขยับขึ้น - ลงของภาชนะบรรจุของเหลวทั้ง 2 ชนิดอย่างช้าๆ จนระดับของของเหลวในภาชนะหยุดนิ่ง แล้วจึงวัดระดับความสูงของของเหลวทั้งสองเพื่อนำมาคำนวณหาความดันคาปิลลารี และนำภาชนะบรรจุของเหลวมาชั่งน้ำหนักเพื่อคำนวณหา ระดับความอิมัตว์ (ปริมาตรของเหลว/ปริมาตรช่องว่าง) สุดท้ายนำผลการทดลองที่ได้ไปสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความดันคาปิลลารี และความอิมัตว์ด้วยน้ำ ด้วยระบบ DNAPL - น้ำ เพื่อคำนวณหาพื้นที่ใต้กราฟ แล้วนำมาวิเคราะห์หัดชนีชี้วัดความสามารถเปียกได้

4. การหาความสัมพันธ์ระหว่างความดันคาปิลลารี และความอิมิตัวด้วยน้ำ ด้วยระบบ DNAPL – น้ำ เมื่อมี LNAPL ตกค้างอยู่ในตัวกลาง

อุปกรณ์วัดความดันคาปิลลารีที่บรรจุตัวกลางอิมิตัวด้วยน้ำ 100% จะถูกเชื่อมต่อเข้ากับภาชนะบรรจุ น้ำทางส่วนล่างของเซลล์ ส่วนทางด้านบนนั้นถูกต่อเชื่อมกับภาชนะบรรจุ DNAPL ซึ่งใช้ไดรคลอโรเอทิลีนเป็นตัวแทน ในการทดลองนี้จะแบ่งการทดลองออกเป็น 4 ส่วน เริ่มจาก ระบายน้ำออกครั้งที่ 1 จนค่าความดันคาปิลลารีสูงขึ้นและไม่สามารถระบายออกได้ จากนั้นให้นำน้ำเข้าจนความดันมีค่าต่ำลง และน้ำไม่สามารถเข้าไปในเซลล์ได้ และสุดท้ายระบายน้ำออกอีกครั้งเป็นครั้งที่ 2 การนำน้ำเข้าไปในเซลล์ และระบายออกจากเซลล์นั้นอาศัยแรงดันที่เกิดจากการขยับขึ้น – ลงของภาชนะบรรจุของเหลวทั้ง 2 ชนิดอย่างช้าๆ จนระดับของของเหลวในภาชนะหยุดนิ่ง แล้วจึงวัดระดับความสูงของของเหลวทั้งสองเพื่อนำมาคำนวณหาความดันคาปิลลารี และนำภาชนะบรรจุของเหลวมาชั่งน้ำหนักเพื่อกำหนดหาระดับความอิมิตัว (ปริมาตรของเหลว/ปริมาตรช่องว่าง) สุดท้ายนำผลการทดลองที่ได้ไปสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความดันคาปิลลารี และความอิมิตัวด้วยน้ำ ด้วยระบบ DNAPL – น้ำ เพื่อกำหนดหาพื้นที่ใต้กราฟ แล้วนำมาวิเคราะห์หัดชนีชีวิตความสามารถเปียกได้ จากนั้นทำการถอดอุปกรณ์ท่อที่เชื่อมต่อกับภาชนะบรรจุ DNAPL แล้วนำท่อมาต่อเชื่อมกับภาชนะบรรจุ LNAPL โดยให้ไหลอื่นเป็นตัวแทนของ LNAPL ต่อเข้ากับเซลล์วัดความดัน แล้วเริ่มการทดลองต่อ โดยเริ่มทำการระบายน้ำออกครั้งที่ 1 จนค่าความดันคาปิลลารีสูงขึ้นและไม่สามารถระบายออกได้ จากนั้นให้นำน้ำเข้าจนความดันมีค่าต่ำลงและน้ำไม่สามารถเข้าไปในเซลล์ได้ และสุดท้ายระบายน้ำออกอีกครั้งเป็นครั้งที่ 2 การนำน้ำเข้าไปในเซลล์ และระบายออกจากเซลล์นั้นอาศัยแรงดันที่เกิดจากการขยับขึ้น – ลงของภาชนะบรรจุของเหลวทั้ง 2 ชนิดอย่างช้าๆ จนระดับของของเหลวในภาชนะหยุดนิ่ง แล้วจึงวัดระดับความสูงของของเหลวทั้งสองเพื่อนำมาคำนวณหาความดันคาปิลลารี และนำภาชนะบรรจุของเหลวมาชั่งน้ำหนักเพื่อกำหนดหาระดับความอิมิตัว (ปริมาตรของเหลว/ปริมาตรช่องว่าง) สุดท้ายนำผลการทดลองที่ได้ไปสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความดันคาปิลลารี และความอิมิตัวด้วยน้ำ ด้วยระบบ LNAPL – น้ำ เพื่อกำหนดหาพื้นที่ใต้กราฟ แล้วนำมาวิเคราะห์หัดชนีชีวิตความสามารถเปียกได้

การทดลอง 2.3 การหาความซึมผ่านได้สัมพัทธ์

โดยการประดิษฐ์อุปกรณ์ที่พัฒนามาจากอุปกรณ์ Tempe[®] Cell ด้วยวัสดุ stainless steel มี PTFE membrane อยู่ที่ส่วนล่าง และส่วนบนของเซลล์เพื่อให้เป็นทางผ่านของ NAPL ที่บรรจุอยู่ในบิวเรต แสดงดังภาพที่ 10 การทดลองนี้จะได้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความซึมผ่านได้สัมพัทธ์ของ NAPL เปรียบเทียบกับความอิมิตัวด้วยน้ำของตัวกลางที่ระดับต่างๆ



ภาพที่ 10 อุปกรณ์ทดสอบความซึมผ่านได้สัมพัทธ์

1. ความซึมผ่านได้สัมพัทธ์ของ LNAPL ผ่านตัวกลางที่อิ่มตัวด้วยน้ำที่ระดับต่างๆ

นำตัวกลางที่ผ่านการอบที่ 105 องศาเซลเซียส บรรจุลงในเซลล์วัดความดันคาปิลลารี เติมน้ำลงในตัวกลางแล้วคนผสมกับตัวกลางให้ทั่วถึง กำหนดให้ตัวกลางอิ่มตัวด้วยน้ำที่ระดับ 0%, 25%, 50%, 75% และ 100% แล้วปล่อยให้ LNAPL ที่ใช้โทลูอีนเป็นตัวแทน ที่บรรจุอยู่ในบิวเรต ไหลผ่านเซลล์แล้วจับเวลา สุดท้ายนำมาผลการทดลองมาเขียนกราฟความซึมผ่านได้สัมพัทธ์เทียบกับความอิ่มตัวด้วยน้ำ

2. ความซึมผ่านได้สัมพัทธ์ของ DNAPL ผ่านตัวกลางที่อิ่มตัวด้วยน้ำที่ระดับต่างๆ

นำตัวกลางที่ผ่านการอบที่ 105 องศาเซลเซียส บรรจุลงในเซลล์วัดความดันคาปิลลารี เติมน้ำลงในตัวกลางแล้วคนผสมกับตัวกลางให้ทั่วถึง กำหนดให้ตัวกลางอิ่มตัวด้วยน้ำที่ระดับ 0%, 25%, 50%, 75% และ 100% แล้วปล่อยให้ DNAPL ที่ใช้ไตรคลอโรเอทิลีนเป็นตัวแทน ที่บรรจุอยู่ในบิวเรตไหลผ่านเซลล์แล้วจับเวลา สุดท้ายนำมาผลการทดลองมาเขียนกราฟความซึมผ่านได้สัมพัทธ์เทียบกับความอิ่มตัวด้วยน้ำ

3. ความซึมผ่านได้สัมพัทธ์ของ LNAPL ผ่านตัวกลางที่อิ่มตัวด้วยน้ำที่ระดับต่างๆ ที่ผ่านการซึมผ่านของ DNAPL มาก่อนหน้า

นำตัวกลางที่ผ่านการอบที่ 105 องศาเซลเซียส บรรจุลงในเซลล์วัดความดันคาปิลลารี เติมน้ำลงในตัวกลางผสมกับตัวกลางให้ทั่วถึง กำหนดให้ตัวกลางอิมิตัวด้วยน้ำที่ระดับ 0%, 25%, 50%, 75% และ 100% แล้วปล่อยให้ LNAPL ที่ให้โพลีอินเป็นตัวแทน ที่บรรจุอยู่ในบิวเรตไหลผ่านเซลล์แล้วจับเวลา จากนั้นนำตัวกลางชุดเดิมมาทดสอบการซึมผ่านด้วย DNAPL ที่ให้ไตรคลอโรเอทิลีนเป็นตัวแทนไหลผ่านเซลล์พร้อมกับจับเวลา สุดท้ายนำผลการทดลองมาเขียนกราฟความซึมผ่านได้สัมพัทธ์เทียบกับความอิมิตัวด้วยน้ำ

4. ความซึมผ่านได้สัมพัทธ์ของ DNAPL ผ่านตัวกลางที่อิมิตัวด้วยน้ำที่ระดับต่างๆ ที่ผ่านการซึมผ่านของ LNAPL มาก่อนหน้า

นำตัวกลางที่ผ่านการอบที่ 105 องศาเซลเซียส บรรจุลงในเซลล์วัดความดันคาปิลลารี เติมน้ำลงในตัวกลางผสมกับตัวกลางให้ทั่วถึง กำหนดให้ตัวกลางอิมิตัวด้วยน้ำที่ระดับ 0%, 25%, 50%, 75% และ 100% แล้วปล่อยให้ DNAPL ที่ให้ไตรคลอโรเอทิลีนเป็นตัวแทน ที่บรรจุอยู่ในบิวเรต ไหลผ่านเซลล์แล้วจับเวลา จากนั้นนำตัวกลางชุดเดิมมาทดสอบการซึมผ่านด้วย LNAPL ที่ให้โพลีอินเป็นตัวแทนไหลผ่านเซลล์พร้อมกับจับเวลา สุดท้ายนำผลการทดลองมาเขียนกราฟความซึมผ่านได้สัมพัทธ์เทียบกับความอิมิตัวด้วยน้ำ

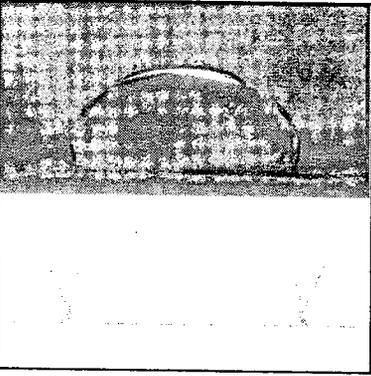
ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

ส่วนที่ 1 การวัดมุมสัมผัสเมื่อมีการปนเปื้อนแบบผสมจากของเหลวที่ไม่ใช่น้ำ

1) มุมสัมผัสและสภาพผิว (sensitivity) ของการวัดมุม

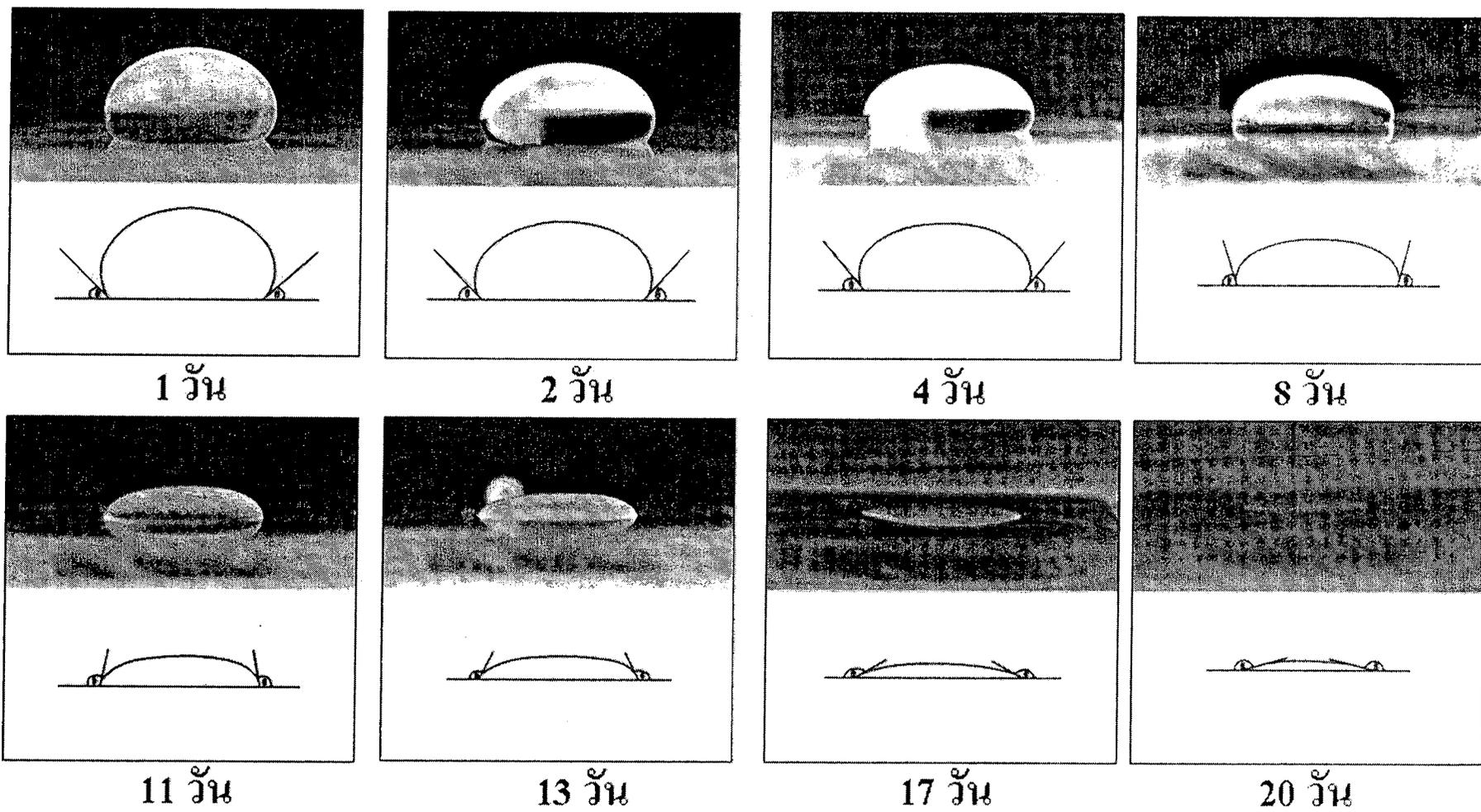
ในการวัดมุมอาจทำให้ผลของมุมที่ได้เกิดความคลาดเคลื่อนเนื่องจาก sensitivity ของการวัดมุมดังแสดงในตารางที่ 2 จากการทดลองวัดพบว่า sensitivity ของการวัดอยู่ที่มุม 1.9°

ตารางที่ 2 sensitivity (สภาพผิว) ของการวัดมุมโดยการใช้โปรแกรม Adobe Photoshop CS2

ภาพ	ครั้งที่	มุมสัมผัส(องศา)	
		ซ้าย	ขวา
	1	71.0	68.7
	2	72.9	70.1
	3	70.8	70.4
	$\Delta\theta = 2.1$	$\Delta\theta = 1.7$	
		สภาพผิวของมุมเฉลี่ย =	
		1.9	

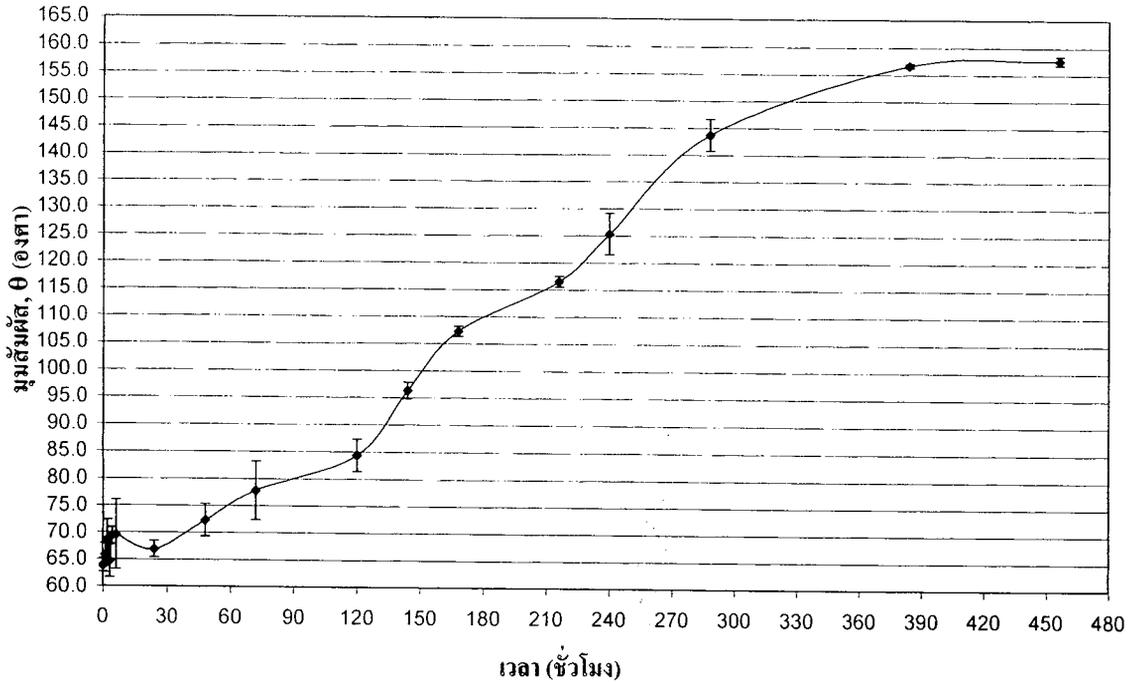
2) มุมสัมผัสของ TCE บนแผ่นซิลิคอนซึ่งล้อมรอบด้วยน้ำ

ภาพที่ 11 แสดงภาพถ่าย TCE บนแผ่นซิลิคอน และการเปลี่ยนแปลงตามเวลา โดยถ่ายภาพทุกชั่วโมง ในระยะแรก หลังจากนั้นถ่ายภาพทุกวันจน TCE มีมวลลดลงจนเหลือน้อยมาก และมุมสัมผัสค่อนข้างคงที่ ซึ่งการลดลงของ TCE เกิดจากการถ่ายเทมวล (mass transfer) ใช้เวลาทั้งสิ้น 20 วัน



ภาพที่ 11 TCE บนแผ่นซิลิคอนซึ่งล้อมรอบด้วยน้ำ ความละเอียดของภาพ 0.03 cm/pixel

สร้างกราฟระหว่างมุมสัมผัสของ TCE เทียบกับที่เวลาต่าง ๆ ดังแสดงในภาพที่ 12

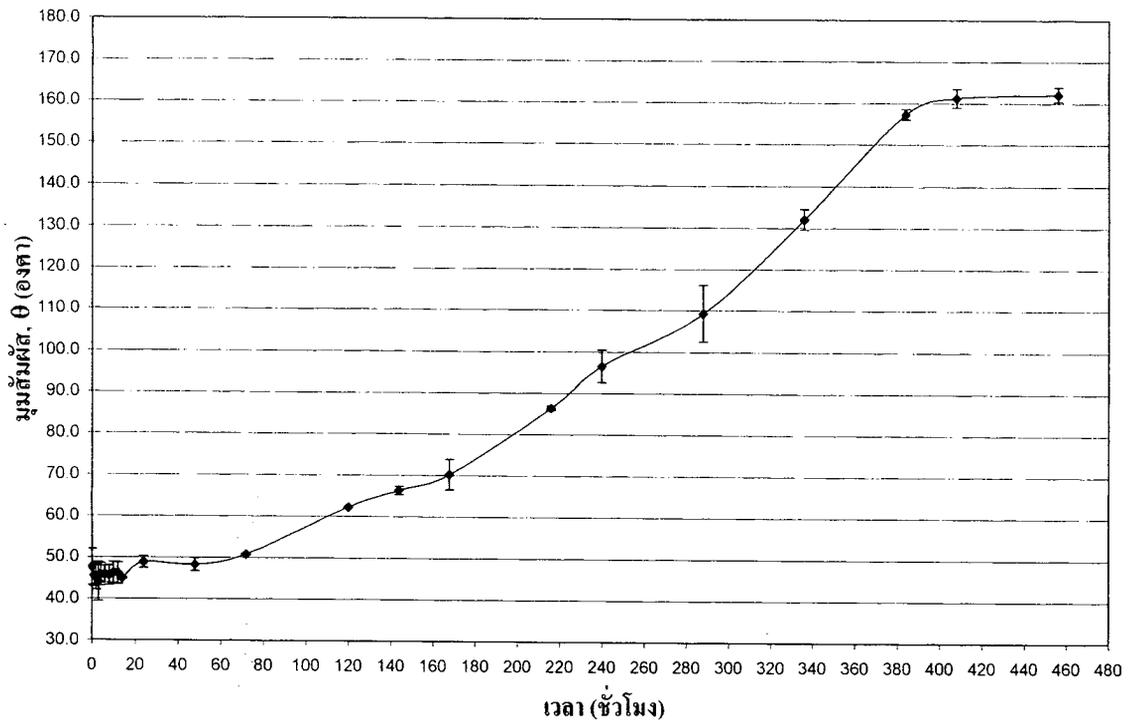


ภาพที่ 12 มุมสัมผัสของ TCE บนแผ่นซิลิโคนซึ่งล้อมรอบด้วยน้ำเทียบกับเวลา

จากการทำการทดลอง 3 ครั้ง ทำให้ได้ค่าเฉลี่ย และ SD ดังแสดงในรูป เมื่อสังเกตผลจากภาพที่ 12 ในแต่ละช่วงเวลา พบว่ามุมสัมผัสในตอนเริ่มต้นมีค่าคงที่ไปจนถึงเวลา 24 ชั่วโมง ด้วยความชันของกราฟเป็นศูนย์ มีมุมสัมผัส 63.9 องศา หลังจากผ่าน 24 ชั่วโมงไปจนถึงชั่วโมงที่ 288 มุมสัมผัสเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ด้วยความชันของกราฟ 0.3 และเพิ่มขึ้นอย่างช้า ๆ จนกระทั่งที่เวลา 456 ชั่วโมง มุมสัมผัสคงที่ 157.6 องศาด้วยความชันเป็นศูนย์

3) มุมสัมผัสของ TCE บนแผ่นควอตซ์ ซึ่งล้อมรอบด้วยน้ำ

จากการวัดมุมเมื่อระยะเวลาเปลี่ยนไปซึ่งมีลักษณะคล้ายภาพที่ 11 สร้างกราฟระหว่างมุมสัมผัสของ TCE เทียบกับที่เวลาต่าง ๆ ดังแสดงในภาพที่ 13

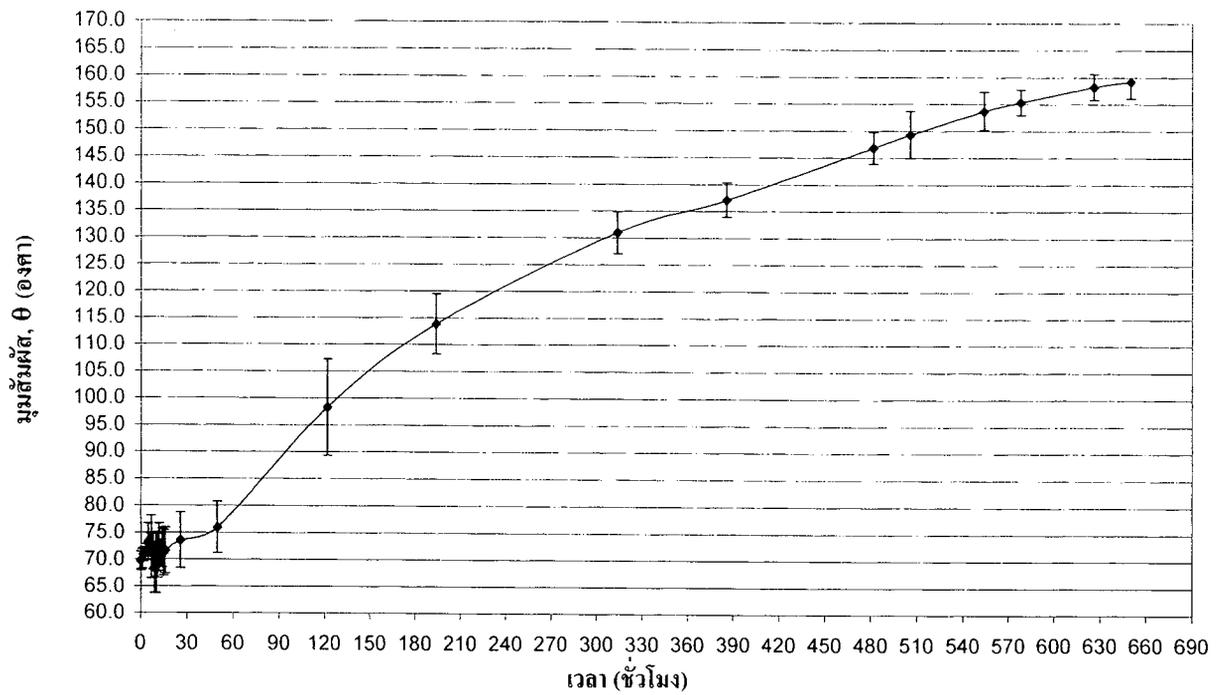


ภาพที่ 13 มุมสัมผัสของ TCE บนแผ่นควอตซ์ ซึ่งล้อมรอบด้วยน้ำเทียบกับเวลา

เมื่อสังเกตผลจากภาพที่ 13 ในแต่ละช่วงเวลา พบว่ามุมสัมผัสในตอนเริ่มต้นมีค่าคงที่ไปจนถึงเวลา 14 ชั่วโมง ด้วยความชันของกราฟเป็นศูนย์ มีมุมสัมผัส 45.7 องศา หลังจากผ่าน 14 ชั่วโมงไปจนถึงชั่วโมงที่ 24 มุมสัมผัสเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ด้วยความชันของกราฟ 0.4 และเพิ่มขึ้นอย่างช้า ๆ จนกระทั่งที่เวลา 456 ชั่วโมง มุมสัมผัสคงที่ 162.0 องศาด้วยความชันเป็นศูนย์

4) มุมสัมผัสของ TCE บนแผ่นซิลิคอน ซึ่งล้อมรอบด้วยสารละลายโทลูอีน

จากการวัดมุมเมื่อระยะเวลาเปลี่ยนไปซึ่งมีลักษณะคล้ายภาพที่ 11 สร้างกราฟระหว่างมุมสัมผัสของ TCE เทียบกับที่เวลาต่าง ๆ ดังแสดงในภาพที่ 14

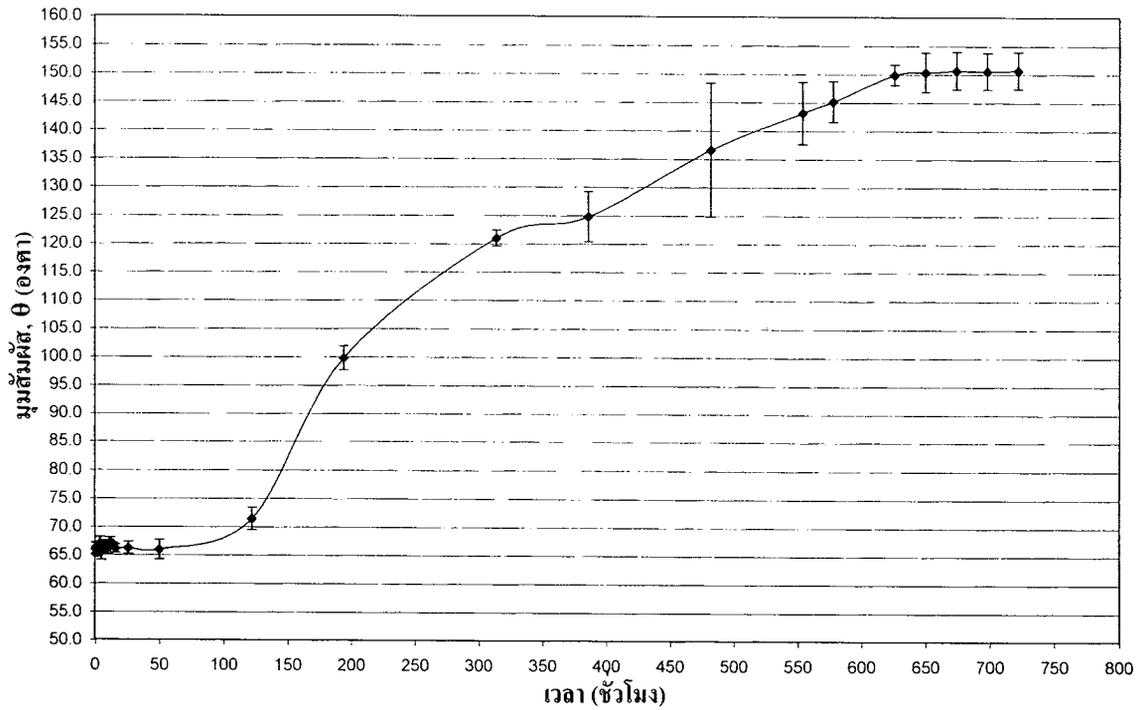


ภาพที่ 14 มุมสัมผัสดของ TCE บนแผ่นซิลิโคน ซึ่งล้อมรอบด้วยสารละลายโทลูอีนเทียบกับเวลา

เมื่อสังเกตผลจากภาพที่ 14 ในแต่ละช่วงเวลา พบว่ามุมสัมผัสดในตอนเริ่มต้นมีค่าคงที่ไปจนถึงเวลา 16 ชั่วโมง ด้วยความชันของกราฟเป็นศูนย์ มีมุมสัมผัสด 71.2 องศา หลังจากผ่าน 16 ชั่วโมงไปจนถึงชั่วโมงที่ 626 มุมสัมผัสดเพิ่มขึ้นอย่างช้า ๆ ด้วยความชันของกราฟ 0.1 หลังจาก 626 ชั่วโมง มุมสัมผัสดคงที่ 159.2 องศาด้วยความชันเป็นศูนย์

5) มุมสัมผัสดของ TCE บนแผ่นควอตซ์ ซึ่งล้อมรอบด้วยสารละลายโทลูอีน

จากการวัดมุมเมื่อระยะเวลาเปลี่ยนไปซึ่งมีลักษณะคล้ายภาพที่ 11 สร้างกราฟระหว่างมุมสัมผัสดของ TCE เทียบกับที่เวลาต่าง ๆ ดังแสดงในภาพที่ 15

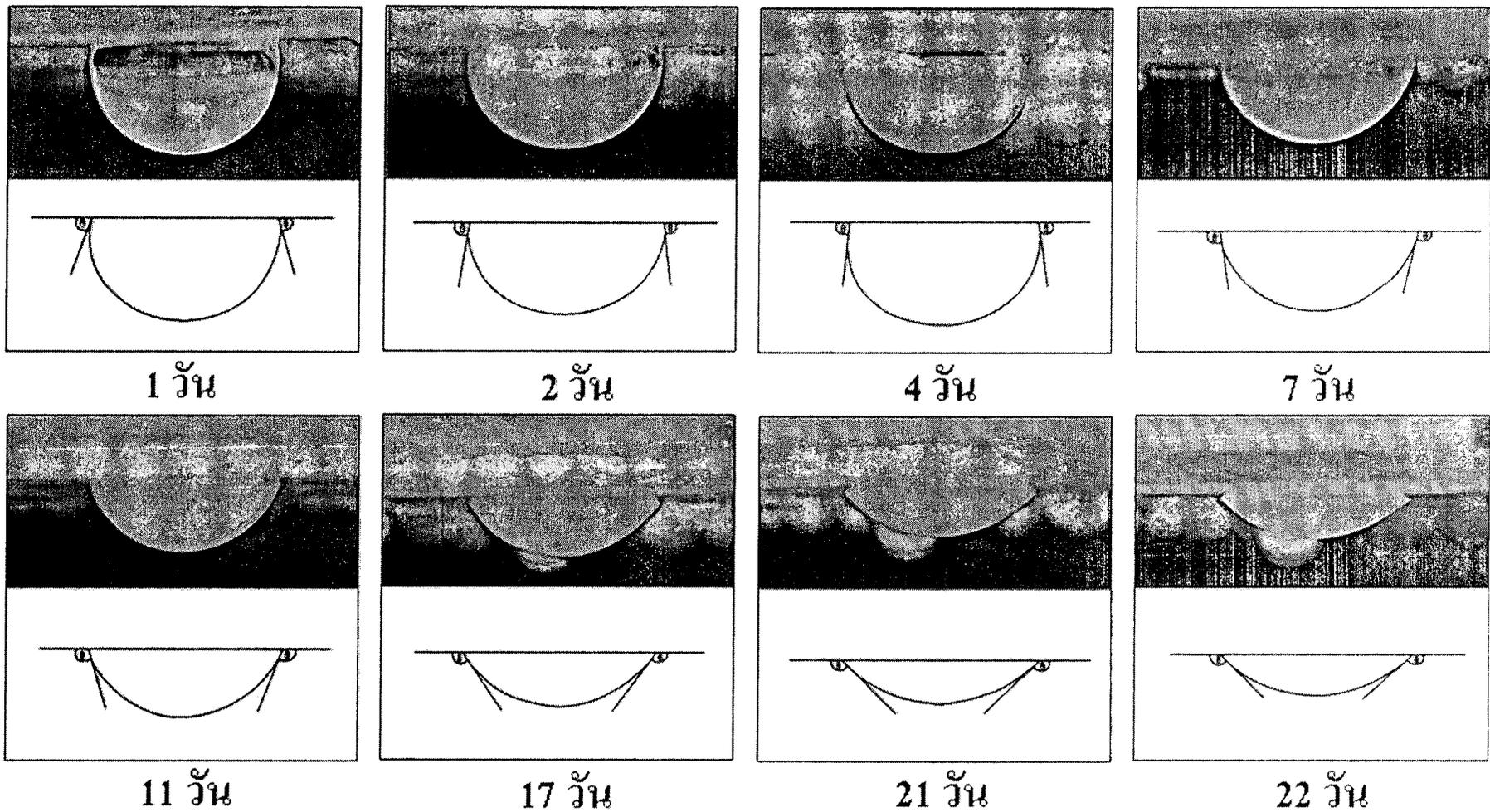


ภาพที่ 15 มุมสัมผัศของ TCE บนแผ่นควอตซ์ ซึ่งล้อมรอบด้วยสารละลายโทลูอินเทียบกับเวลา

เมื่อสังเกตผลจากภาพที่ 15 ในแต่ละช่วงเวลา พบว่ามุมสัมผัศในตอนเริ่มต้นมีค่าคงที่ไปจนถึงเวลา 50 ชั่วโมง ด้วยความชันของกราฟเป็นศูนย์ มีมุมสัมผัศ 66.3 องศา หลังจากผ่าน 50 ชั่วโมงไปจนถึงชั่วโมงที่ 626 มุมสัมผัศเพิ่มขึ้นอย่างช้า ๆ ด้วยความชันของกราฟ 0.1 หลังจาก 626 ชั่วโมง มุมสัมผัศคงที่ 150.7 องศาด้วยความชันเป็นศูนย์

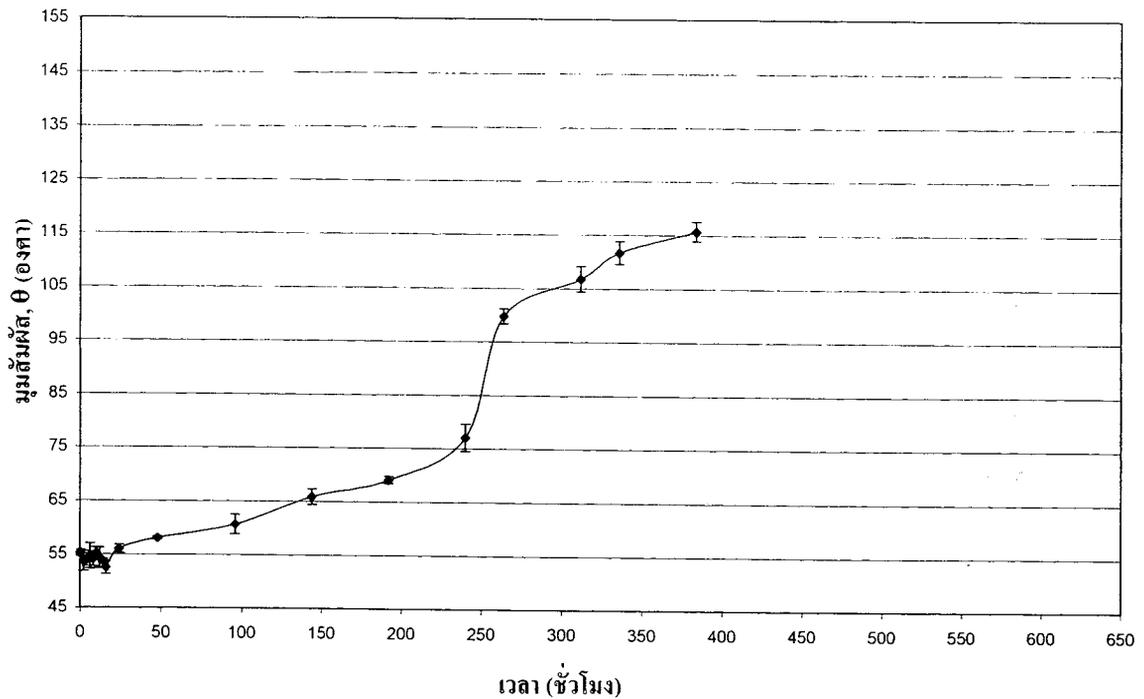
6) มุมสัมผัศของโทลูอินบนแผ่นซิลิคอน ซึ่งล้อมรอบด้วยน้ำ

ภาพที่ 16 แสดงภาพถ่าย โทลูอิน บนแผ่นซิลิคอน สังเกตได้ว่าโทลูอินซึ่งเป็น LNAPL เบากว่าน้ำจึงลอยขึ้นไปด้านบน contact angle cell และมีผิวสัมผัศแผ่นซิลิคอนซึ่งติดอยู่ด้านบนของ contact angle cell



ภาพที่ 16 โทลูอินบนแผ่นควอตซ์ซึ่งล้อมรอบด้วยสารละลาย TCE ความละเอียดของภาพ 0.03 cm/pixel

สร้างกราฟระหว่างมุมสัมผัสของโทลูอินเทียบกับที่เวลาต่าง ๆ ดังแสดงในภาพที่ 17

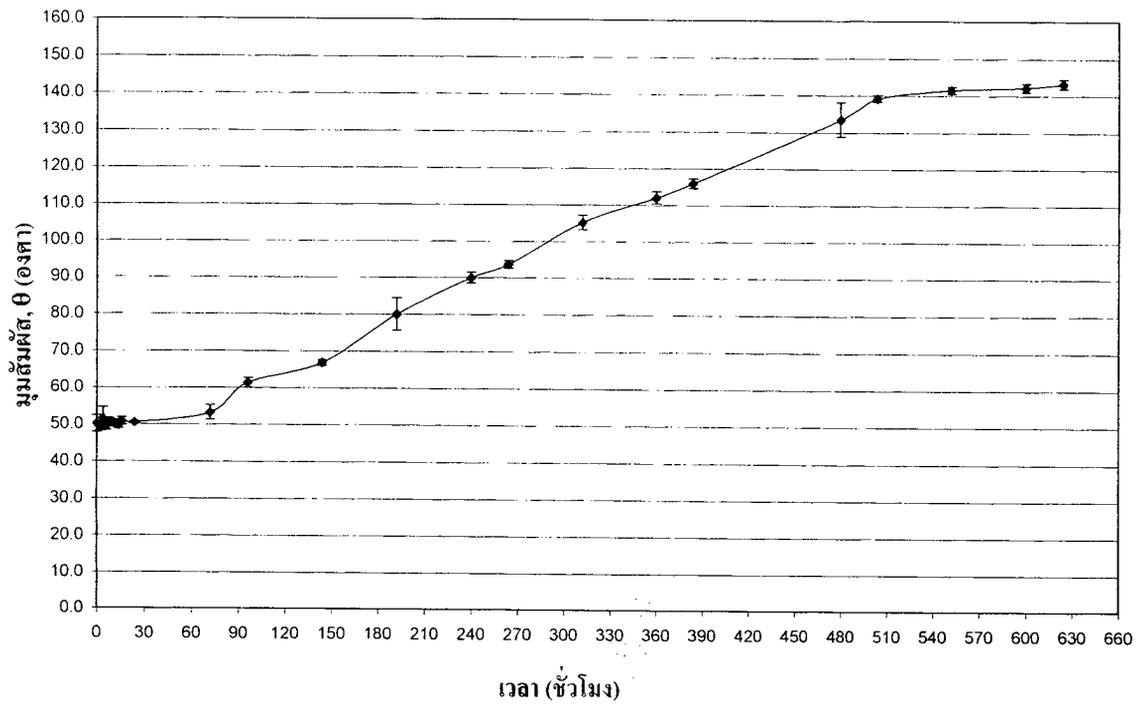


ภาพที่ 17 มุมสัมผัสของโทลูอินบนแผ่นซิลิคอน ซึ่งล้อมรอบด้วยน้ำ

เมื่อสังเกตผลจากภาพที่ 17 ในแต่ละช่วงเวลา พบว่ามุมสัมผัสในตอนเริ่มต้นมีค่าคงที่ไปจนถึงเวลา 24 ชั่วโมง ด้วยความชันของกราฟเป็นศูนย์ มีมุมสัมผัส 55.2 องศา หลังจากผ่าน 24 ชั่วโมงไปจนถึงชั่วโมงที่ 192 มุมสัมผัสเพิ่มขึ้นอย่างช้า ๆ และเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วไปจนถึงชั่วโมงที่ 264 จากนั้นมุมสัมผัสจะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ เมื่อเวลาผ่านไปเกิดการถ่ายเทมวล ทำให้ toluene มีมวลลดลง และมุมสัมผัสเริ่มคงที่ที่เวลา 552 ชั่วโมง มุมสัมผัสคงที่ที่ 138.5 องศา

7) มุมสัมผัสของโทลูอินบนแผ่นควอตซ์ ซึ่งล้อมรอบด้วยน้ำ

สร้างกราฟระหว่างมุมสัมผัสของโทลูอินเทียบกับที่เวลาต่าง ๆ ดังแสดงในภาพที่ 18

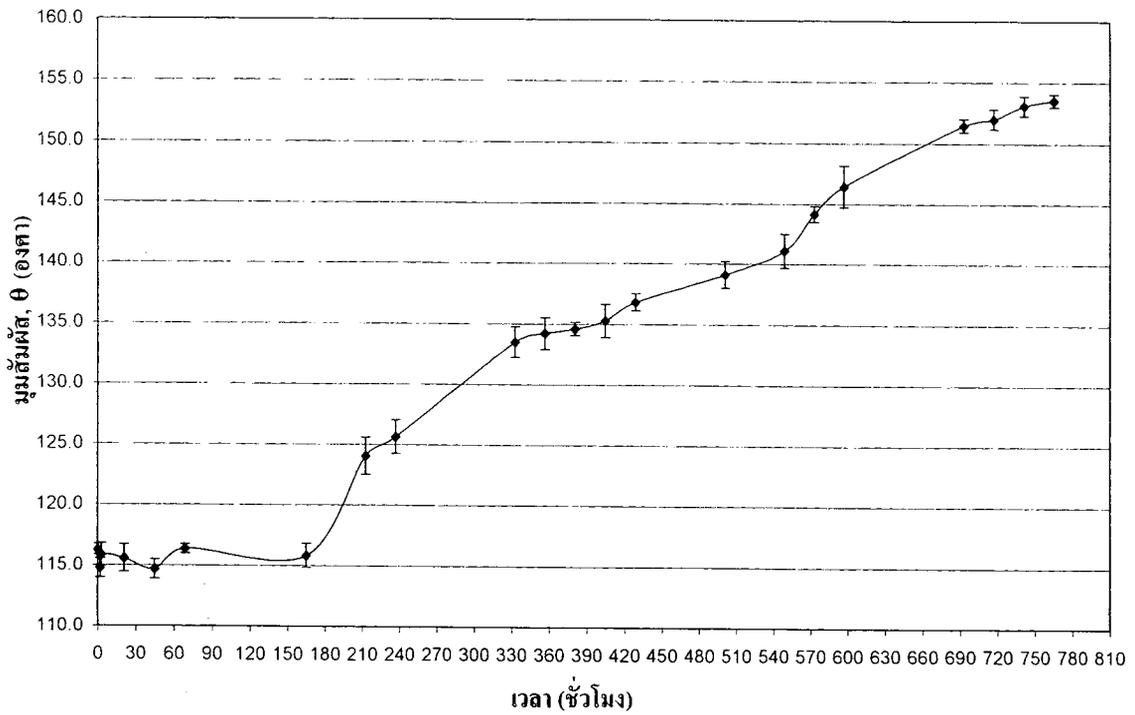


ภาพที่ 18 มุมสัมผัสของโพลีอินบนแผ่นควอตซ์ ซึ่งล้อมรอบด้วยน้ำเทียบกับเวลา

เมื่อสังเกตผลจากภาพที่ 18 ในแต่ละช่วงเวลา พบว่ามุมสัมผัสในตอนเริ่มต้นมีค่าคงที่ไปจนถึงเวลา 24 ชั่วโมง ด้วยความชันของกราฟเป็นศูนย์ มีมุมสัมผัส 50.2 องศา หลังจากผ่าน 24 ชั่วโมงไปจนถึงชั่วโมงที่ 504 มุมสัมผัสเพิ่มขึ้นอย่างช้า ๆ และเมื่อผ่าน 504 ชั่วโมง มุมสัมผัสจะเริ่มคงที่ 143.2 องศา ด้วยความชันของกราฟเป็นศูนย์

8) มุมสัมผัสของโพลีอินบนแผ่นซิลิคอน ซึ่งล้อมรอบด้วยสารละลาย TCE

สร้างกราฟระหว่างมุมสัมผัสของโพลีอินเทียบกับที่เวลาต่าง ๆ ดังแสดงในภาพที่ 19

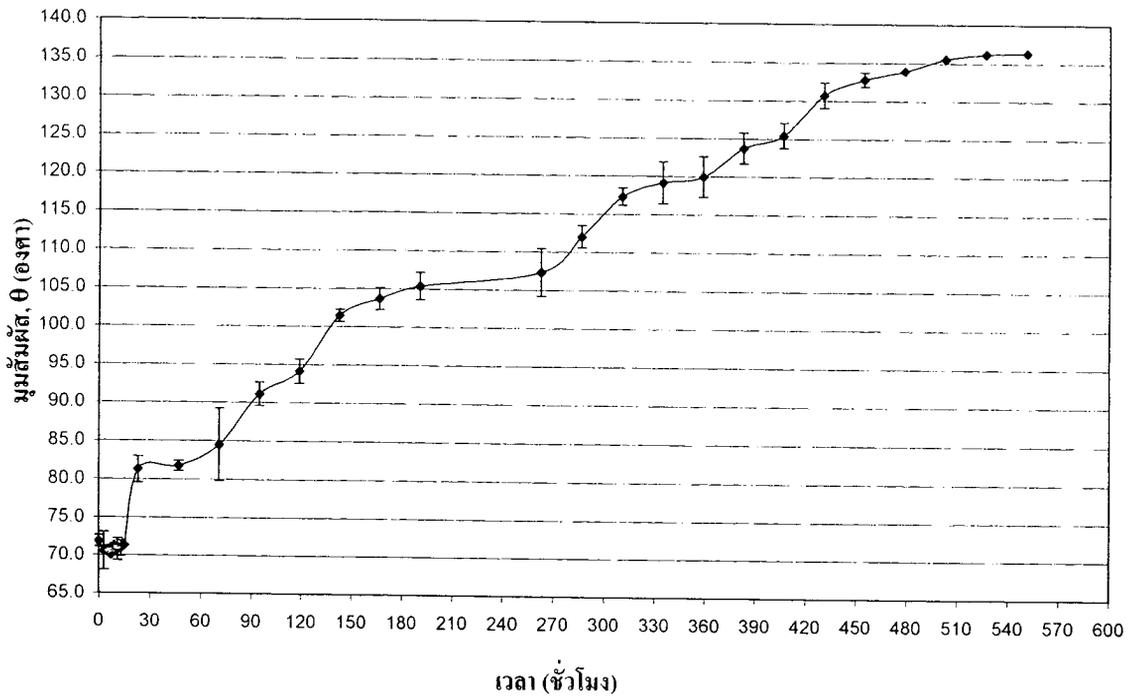


ภาพที่ 19 มุมสัมผัสของโทลูอินบนแผ่นซิลิคอน ซึ่งล้อมรอบด้วยสารละลาย TCE เทียบกับเวลา

เมื่อสังเกตผลจากภาพที่ 19 พบว่ามุมสัมผัสในตอนเริ่มต้นมีค่าคงที่ไปจนถึงเวลา 165 ชั่วโมง ด้วยความชันของกราฟเป็นศูนย์ มีมุมสัมผัส 115.4 องศา หลังจากผ่าน 165 ชั่วโมง ไปจนถึงชั่วโมงที่ 741 มุมสัมผัสเพิ่มขึ้นอย่างช้า ๆ ด้วยความชันของกราฟ 0.1 หลังจาก 765 ชั่วโมง มุมสัมผัสคงที่ 153.5 องศาด้วยความชันเป็นศูนย์

9) มุมสัมผัสของโทลูอินบนแผ่นควอตซ์ ซึ่งล้อมรอบด้วยสารละลาย TCE

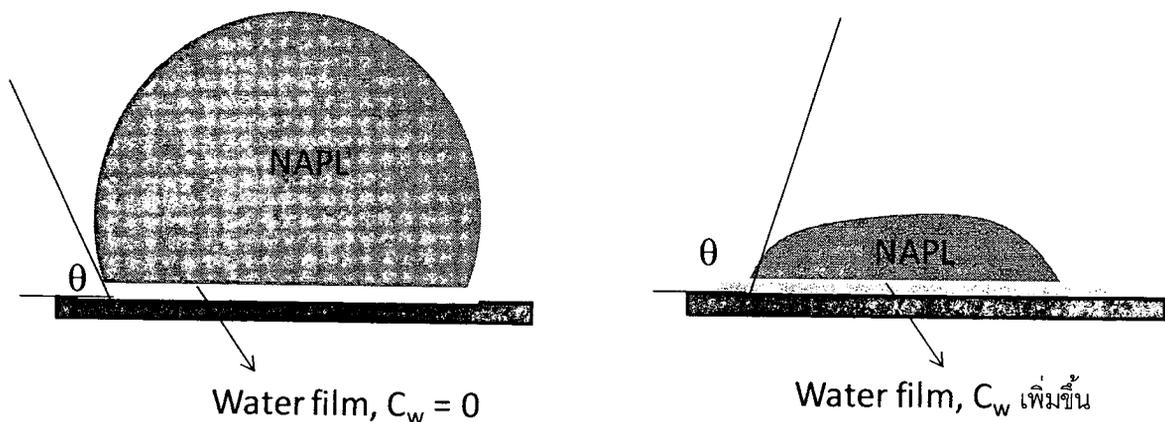
ภาพมุมสัมผัสของ toluene บนแผ่นควอตซ์ที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา ดังแสดงในภาพที่ 16 จากนั้นสร้างกราฟระหว่างมุมสัมผัสของโทลูอินเทียบกับที่เวลาต่าง ๆ ดังแสดงในภาพที่ 20



ภาพที่ 20 มุมสัมผัสของโพลีอินบนแผ่นควอตซ์ ซึ่งล้อมรอบด้วยสารละลาย TCE

เมื่อสังเกตผลจากภาพที่ 20 พบว่ามุมสัมผัสในตอนเริ่มต้นมีค่าคงที่ไปจนถึงเวลา 15 ชั่วโมง ด้วยความชันของกราฟเป็นศูนย์ มีมุมสัมผัส 70.9 องศา หลังจากผ่าน 15 ชั่วโมง ไปจนถึงชั่วโมงที่ 503 มุมสัมผัสเพิ่มขึ้นอย่างช้า ๆ ด้วยความชันของกราฟ 0.1 หลังจาก 503 ชั่วโมง มุมสัมผัสคงที่ 136.3 องศาด้วยความชันเป็นศูนย์

จากกราฟจะเห็นได้ว่ามุมสัมผัสค่อนข้างคงที่เมื่อเริ่มต้นและมีการเปลี่ยนแปลงโดยค่อนข้างคงที่ในภายหลัง หากอธิบายด้วย film theory อาจเนื่องจากในตอนเริ่มต้นพื้นผิวของของแข็งมีฟิล์มของน้ำ (water film) เคลือบอยู่ซึ่งมีความเข้มข้นของ NAPL เป็นศูนย์ และเมื่อเวลาผ่านไปการละลาย (dissolution) มีผลทำให้ NAPL เข้าไปแทรกตัวอยู่ในน้ำทำให้ค่าความเข้มข้นของสารละลาย NAPL (solute NAPL) ในน้ำบริเวณ water film (C_w) มากขึ้น และ adhesive force ซึ่งเป็นแรงดึงดูดระหว่างอนุภาคของของเหลวด้วยกัน ดังนั้น NAPL จึงแผ่บนผิวของแข็งได้มากขึ้น ดังแสดงในภาพที่ 21



ภาพที่ 21 ลักษณะการเปลี่ยนแปลงขนาดของมุมสัมผัสบนพื้นผิวของแข็ง

มุมสัมผัสในตอนเริ่มต้นเป็น advancing angle เทียบได้กับมุมขณะที่ NAPL รุกเข้าไปยังโครงข่าย (network) ของดิน เมื่อเวลาผ่านไปขณะที่มวลของ NAPL ลดลงเป็น receding angle เทียบกับมุมระหว่าง NAPL ถอยออกจากโครงข่ายของดิน มวล NAPL ลดลงโดยที่ฐานของของเหลวที่แผ่นบนของแข็งเท่าเดิม แต่มวลลดลงทำให้มุมสัมผัสมากขึ้น

ตารางที่ 3 มุมสัมผัสเริ่มต้น (advancing angle) และมุมสัมผัสสุดท้าย (receding angle) ของการทดลองวัดมุมสัมผัส NAPL บนของแข็งซึ่งล้อมรอบด้วยของเหลวอีกชนิด

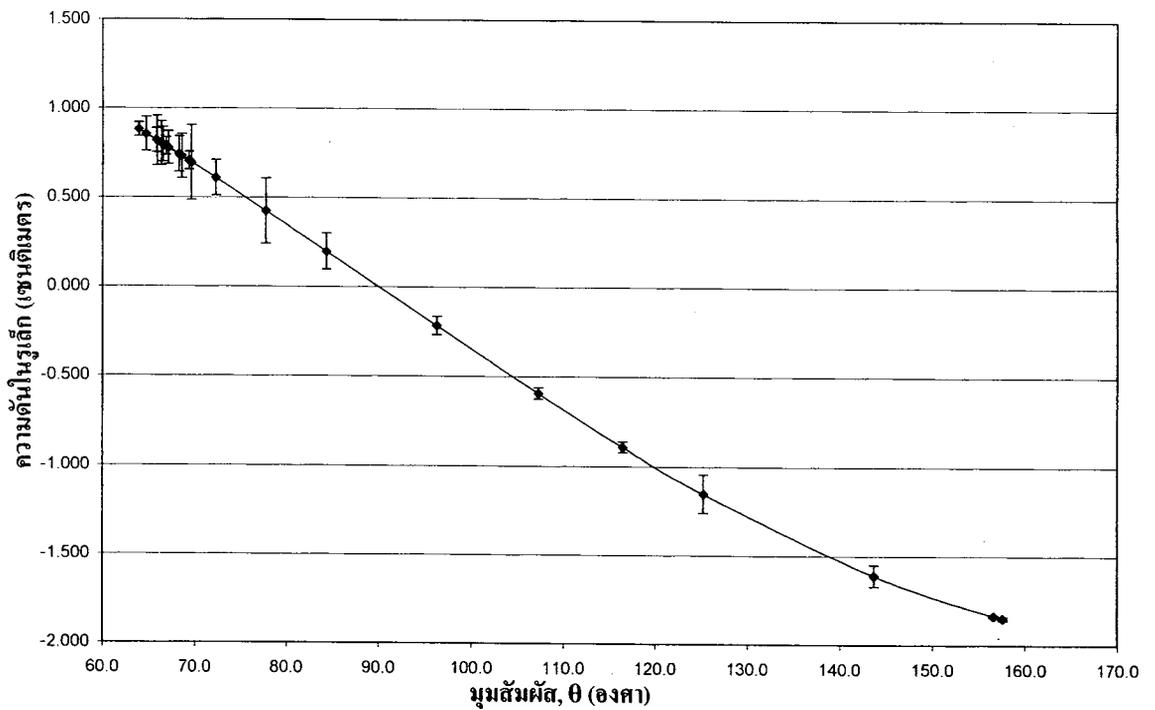
ระบบ	มุมสัมผัสเริ่มต้น (advancing angle), องศา	มุมสัมผัสสุดท้าย (receding angle), องศา
pure phase TCE บนแผ่นซิลิคอน ล้อมรอบด้วยน้ำ	63.9	157.6
pure phase TCE บนแผ่นควอตซ์ ล้อมรอบด้วยน้ำ	45.7	162.0
pure phase TCE บนแผ่นซิลิคอน ล้อมรอบด้วยสารละลาย toluene	71.2	159.2
pure phase TCE บนแผ่นควอตซ์ ล้อมรอบด้วยสารละลาย toluene	66.3	150.7
pure phase toluene บนแผ่นซิลิคอน ล้อมรอบด้วยน้ำ	55.2	138.5
pure phase toluene บนแผ่นควอตซ์ ล้อมรอบด้วยน้ำ	50.2	143.2
pure phase toluene บนแผ่นซิลิคอน ล้อมรอบด้วยสารละลาย TCE	115.4	153.5
pure phase toluene บนแผ่นควอตซ์ ล้อมรอบด้วยสารละลาย TCE	70.9	136.3

จากตารางที่ 3 แสดงให้เห็นว่าลักษณะการเปียกของพื้นผิวของซิลิคอนและควอตซ์ที่อิมมิดด้วยน้ำ เริ่มต้นเป็นลักษณะ strongly water-wet ซึ่งซิลิคอนและควอตซ์ที่อิมมิดด้วยสารละลาย NAPL เริ่มต้นเป็น intermediate wet เมื่อเวลาผ่านไป ลักษณะการเปียกทั้งสองแบบจะเปลี่ยนเป็น strongly oil-wet ซึ่งมีลักษณะเดียวกันตลอดการทดลอง ซึ่ง Power and Tamblin (1995) อธิบายถึงลักษณะการเปียกเกิดจากการเกาะติดของ NAPL ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงและไม่ขี้ขั้ว การเกาะติดของโมเลกุลเหล่านี้เปลี่ยนพื้นผิวของแข็งจากชอบน้ำ (hydrophilic) เป็นผิวที่ไม่ชอบน้ำ (hydrophobic) ได้

จากการทดลองหาการละลายน้ำของ NAPL พบว่าเมื่อเวลาผ่านไป 1 ชั่วโมง มวลของ NAPL สามารถแทรกตัวอยู่ในน้ำได้จนมีความสามารถในการละลายสูงสุด (solubility limit) ในพื้นที่ที่เกิดการปนเปื้อนจริงของ NAPL ในน้ำใต้ดินมีการถ่ายเทมวลของ NAPL ไปสู่น้ำและอากาศทำให้เกิดความเข้มข้นของ NAPL ในน้ำ มุมสัมผัสจึงเปลี่ยนดังที่เกิดขึ้นในการทดลอง ส่วนในชั้นดินที่อิมมิดด้วยน้ำถ้ามีการไหลของน้ำใต้ดินทำให้ความเข้มข้นของ NAPL ในน้ำเปลี่ยนด้วยเช่นกัน แต่ถ้าไม่มีการถ่ายเทมวลของ NAPL ในน้ำใต้ดินทำให้ความเข้มข้นของ NAPL คงที่ มุมสัมผัสจึงคงที่

นอกจากนี้มุมสัมผัสยังสัมพันธ์กับความดันคาпилลารี (capillary pressure, P_c , N/m^2) ซึ่งเป็นตัวกำหนดลักษณะการปนเปื้อนของ NAPL โดยความดันคาпилลารีสามารถอธิบายได้ดังสมการลาปลาซ (Laplace equation), $P_c = (2\sigma_{nw} \cos\theta)/r$ เมื่อ P_N คือ ความดัน NAPL (เมตร), P_w คือ ความดันน้ำ (เมตร), r คือ รัศมีของช่องว่างที่มีน้ำอยู่และ NAPL ต้องแทรกผ่าน (เมตร) จากสมการลาปลาซ ความดันคาпилลารีแปรผันตรงกับ $\cos\theta$ ดังนั้นเมื่อมุมสัมผัสมากขึ้น θ มีค่าเพิ่มขึ้น $\cos\theta$ มีค่าลดลง ทำให้ความดันคาпилลารีลดลงด้วย จะเห็นได้ว่าเมื่อเวลาเปลี่ยนไปมุมสัมผัสจะเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ จนกระทั่งมีการเปลี่ยนแปลงอย่างไม่มีนัยสำคัญ นั่นคือคงที่ที่เวลาหนึ่ง ก็จะทำให้ความดันคาпилลารีมีค่าคงที่ด้วยเช่นกัน ดังนั้นการศึกษา wettability โดยการวัดมุมสัมผัสก็จะสามารถนำไปใช้ในการออกแบบการปั๊มและการบำบัดพื้นที่ปนเปื้อนได้จริง

จากรูปเมื่อมุมสัมผัสมีค่ามากขึ้นทำให้ค่า cosine มีค่าน้อยลงความดันคาпилลารีจึงลดลง จนกระทั่งมุมสัมผัสมากกว่า 90 องศา cosine มีค่าติดลบและความดันคาпилลารีติดลบ คือความดันขณะที่มวลของ NAPL ลดลงและแผ่นผิวของแข็งมากขึ้น ในพื้นที่จริงเมื่อ NAPL เกาะติดที่อนุภาคของดินและมีการถ่ายเทมวลของ NAPL ในชั้นดินไม่อ้อมตัวและเนื่องจากการไหลของน้ำใต้ดินทำให้ NAPL ,มวลลดลง น้ำสามารถไหลผ่านช่องว่างของดินได้ง่ายขึ้น และ NAPL ถูกชะไปกับน้ำใต้ดินได้ง่ายขึ้น



ภาพที่ 22 ความดันในรูเล็กเทียบกับมุมสัมผัสของ TCE บนแผ่นซิลิโคน ซึ่งล้อมรอบด้วยน้ำ

เมื่อเปรียบเทียบมุมสัมผัสบนพื้นผิวที่ต่างกันคือซิลิโคนและควอตซ์พบว่า พื้นผิวของซิลิโคนมีค่ามุมสัมผัสมากกว่า เนื่องจากควอตซ์มีความเป็น water wetting solid มากกว่าซิลิโคน ซึ่งพบว่ามีผลไปในทางเดียวกันทั้งการปนเปื้อน NAPL อย่างเดียวและปนเปื้อนผสม

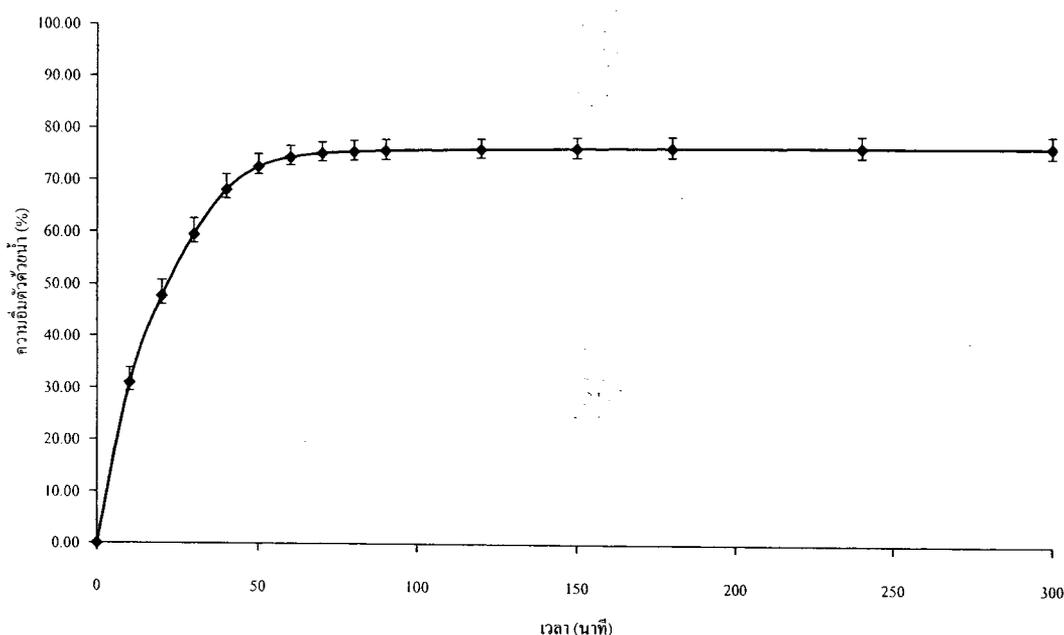
เมื่อเปรียบเทียบมุมสัมผัสของ TCE และ toluene พบว่าความสัมพันธ์ระหว่างมุมสัมผัสและเวลาของ TCE มีความชันมากกว่าทำให้การเปลี่ยนแปลงมุมสัมผัสของ TCE เร็วกว่า toluene เนื่องจาก TCE ละลายน้ำได้เร็วกว่า toluene และพบว่าผลไปในทางเดียวกันทั้งการปนเปื้อน NAPL สารเดียวหรือการปนเปื้อน NAPL แบบผสม และของแข็งที่เป็นซิลิโคนหรือควอตซ์

เมื่อเปรียบเทียบมุมสัมผัสของการปนเปื้อนแบบสารเดียวและแบบผสมพบว่า การปนเปื้อนแบบสารเดียวมีการเปลี่ยนแปลงมุมสัมผัสเร็วกว่าเมื่อเทียบกับเวลา แสดงให้เห็นว่า NAPL ปนเปื้อนสารเดียวละลายน้ำได้เร็วกว่าการปนเปื้อนแบบสารผสม นอกจากนี้การปนเปื้อนแบบสารเดียวมุมสัมผัสของ NAPL กับดินที่มีการปนเปื้อนผสมมีค่ามากกว่า ทำให้ความดันคาпилลารีในช่องว่างระหว่างอนุภาคดินมีค่าน้อยกว่า และ NAPL แผ่ลงบนผิวดินมากกว่าดังนั้นในพื้นที่จริงที่มีการปนเปื้อน NAPL แบบผสมทำให้น้ำใต้ดินสามารถชะ NAPL ที่ติดอยู่ที่ผิวดินไปได้ง่ายกว่าการปนเปื้อนเพียงสารเดียว

ส่วนที่ 2 การทดลอง imbibitions rate, capillary pressure และความอึมตัวด้วยน้ำ

ส่วนที่ 1 การทดสอบอัตราการเติมน้ำ

ในการทดสอบอัตราการเติมน้ำนี้ เพื่อให้ได้ผลการทดลองที่ถูกต้อง จึงได้ทำการทดลองซ้ำทั้งหมด 3 ครั้งในแต่ละรูปแบบการทดลอง โดยใช้การทดลองของตัวกลางที่ไม่ปนเปื้อนเป็นมาตรฐานการทดลองเพื่อเปรียบเทียบความแม่นยำทางสถิติ จากการทดลองพบว่าอัตราการเติมน้ำเมื่อทดลองกับตัวกลางไม่ปนเปื้อนจะมีค่าเท่าอึมตัวด้วยน้ำสูงสุดเท่ากับ $76.66 \pm 2.12\%$ โดยมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเฉลี่ยตลอดช่วงการทดลองเท่ากับ 2.03% ดังภาพที่ 23 อย่างไรก็ตาม อัตราการเติมน้ำจะมีการเปลี่ยนแปลงเสมอเมื่อตัวกลางเปลี่ยนไปหรือของเหลวเปลี่ยนไป



ภาพที่ 23 ผลการทดสอบอัตราการเติมน้ำเฉลี่ยของทรายไม่ปนเปื้อน

จากการทดลองการหาอัตราการเติมน้ำที่การปนเปื้อนในรูปแบบต่างๆ จะได้ผลการทดลอง ดังแสดงในภาพที่ 24 ซึ่งเป็นการเปรียบเทียบระหว่างความอึมตัวด้วยน้ำเฉลี่ยกับเวลา เมื่อพิจารณาในช่วง 50 นาทีแรกของการทดลอง จะพบว่าความอึมตัวด้วยน้ำของตัวกลางที่ไม่ได้รับการปนเปื้อนจะมีค่าต่ำที่สุด โดยตัวกลางที่ได้รับการปนเปื้อน TCE แล้วปนเปื้อนโทลูอินมีค่าความอึมตัวด้วยน้ำสูงสุด ตามด้วยตัวกลางที่ปนเปื้อน TCE อย่างเดียว จากนั้นเป็นตัวกลางที่ปนเปื้อนโทลูอิน แล้วปนเปื้อน TCE และสุดท้ายเป็นตัวกลางที่ปนเปื้อนโทลูอินอย่างเดียว ทำให้สามารถสรุปได้ว่า ตัวกลางที่ปนเปื้อน DNAPL ก่อน LNAPL มีอัตราการเติมน้ำมากกว่าตัวกลางที่ปนเปื้อน LNAPL ก่อน DNAPL และตัวกลางที่ปนเปื้อนแบบผสมเมื่อปนเปื้อนสารชนิดใดก่อนก็จะมีอัตราการเติมน้ำสูงกว่าตัวกลางที่ปนเปื้อนสารชนิดนั้นเพียงสารเดียว และตัวกลางที่ไม่มีการปนเปื้อนจะมีอัตรา

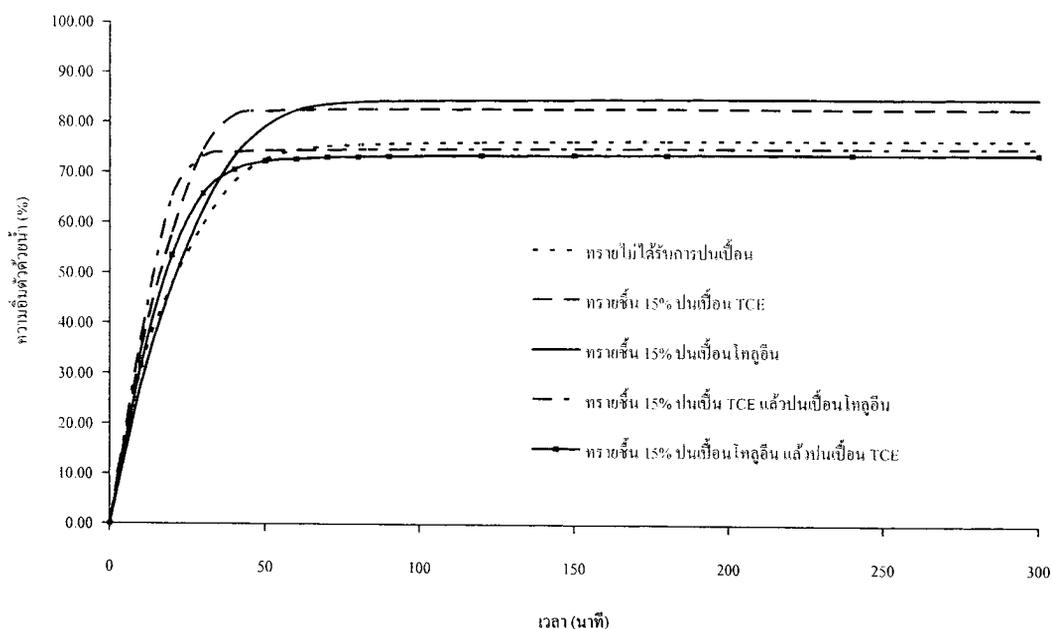
การเติมน้ำต่ำกว่าตัวกลางที่มีการปนเปื้อน และเมื่อพิจารณาอัตราการเติมน้ำด้วยสมการของลาปลาซจะพบว่า มุมสัมผัสระหว่างพื้นผิวและของเหลว และแรงที่ผิวสัมผัสระหว่างของเหลวเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดความแตกต่างของอัตราการเติมน้ำ

เมื่อการทดลองเข้าสู่สมดุลจนตัวอย่างทรายมีสภาพอิ่มตัวคงที่แล้ว พบว่าการปนเปื้อนในแต่ละแบบจะมีค่าความอิ่มตัวด้วยน้ำไม่เท่ากัน ค่าความอิ่มตัวด้วยน้ำของตัวกลางปนเปื้อนโทลูอินมีค่าเฉลี่ยสูงสุดที่ระดับ 84.98% มากกว่าตัวกลางปนเปื้อน TCE ที่อิ่มตัวด้วยน้ำที่ 82.96% ซึ่งมากกว่าค่าความอิ่มตัวด้วยน้ำของตัวกลางที่ไม่มีการปนเปื้อนด้วยความอิ่มตัวด้วยน้ำที่ 76.66% และมากกว่าค่าความอิ่มตัวด้วยน้ำที่ 75.09% ของตัวกลางปนเปื้อน TCE ก่อนแล้วจึงปนเปื้อน Toluene ส่วนค่าความอิ่มตัวด้วยน้ำของตัวกลางปนเปื้อน Toluene ก่อนแล้วจึงปนเปื้อน TCE มีค่าต่ำที่สุดที่ 73.88% จากสมการของลาปลาซพบว่าตัวกลางที่อิ่มตัวด้วยน้ำน้อยจะมีความดันคาปิลลารีสูงกว่าตัวกลางที่อิ่มตัวด้วยน้ำมาก ทำให้สามารถเรียงลำดับความดันคาปิลลารีจากมากไปน้อยได้ โดยตัวกลางที่ปนเปื้อนโทลูอินก่อน แล้วปนเปื้อน TCE จะมีความดันคาปิลลารีมากกว่าตัวกลางที่ปนเปื้อนTCE ก่อน แล้วปนเปื้อนโทลูอิน ตามด้วยตัวกลางที่ไม่มีการปนเปื้อน และตัวกลางปนเปื้อน TCE โดยตัวกลางปนเปื้อนโทลูอินมีความดันคาปิลลารีต่ำที่สุด

ตารางที่ 4 ผลการทดลองหาอัตราการเติมน้ำ

ตัวอย่างที่	ลักษณะการปนเปื้อน	ความอิ่มตัวด้วยน้ำสูงสุดเฉลี่ย (%)	แรงระหว่างผิวสัมผัส (mN/m)	มุมสัมผัส (°)	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าความอิ่มตัวด้วยน้ำ(%)
1	ทรายไม่ได้รับการปนเปื้อน	76.66	^a น้ำ-อากาศ = 72	^b 110.1	^a น้ำ-อากาศ = 72
2	ทรายชั้น15% ปนเปื้อนTCE	82.96	^a TCE-น้ำ = 38	ไม่มีข้อมูล	^a TCE-น้ำ = 38
3	ทรายชั้น15% ปนเปื้อนโทลูอิน	84.98	^c โทลูอิน-น้ำ =36.1	ไม่มีข้อมูล	^c โทลูอิน-น้ำ =36.1
4	ทรายชั้น15% ปนเปื้อนTCE ก่อนแล้วปนเปื้อนโทลูอิน	75.09	ไม่มีข้อมูล	ไม่มีข้อมูล	ไม่มีข้อมูล
5	ทรายชั้น15% ปนเปื้อนโทลูอิน ก่อนแล้วปนเปื้อน TCE	73.88	ไม่มีข้อมูล	ไม่มีข้อมูล	ไม่มีข้อมูล

^a Dane et al., 1994, ^b Amirfazli et al., 1998, ^c Guy et al.,1996



ภาพที่ 24 ผลการทดสอบอัตราการเติมน้ำของการปนเปื้อนในลักษณะต่างๆ

จากตารางที่ 4 เมื่อพิจารณาโดยใช้สมการของลาปลาซ จะพบว่า การทดลองนี้เป็นไปตามทฤษฎีของลาปลาซ เมื่อรัศมีคาปิลลารีไม่มีผลกระทบกับการเปลี่ยนแปลงของความดันคาปิลลารีจากการบรรจุตัวกลางในลักษณะเดิมทุกอย่าง ดังนั้นสิ่งที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของความดันคาปิลลารีจึงประกอบด้วยแรงที่ผิวสัมผัสระหว่างของเหลวและมุมสัมผัสระหว่างพื้นผิวและของเหลว ซึ่งแรงระหว่างผิวสัมผัสที่ลดลงมีผลให้ความดันคาปิลลารีเพิ่มขึ้นส่งผลให้ความอิ่มตัวด้วยน้ำมีค่าสูงขึ้นดังเช่นการทดลองที่ 1, 2 และ 3 ในส่วนของมุมสัมผัสเมื่อมุมสัมผัสลดลงทำให้ความดันคาปิลลารีสูงขึ้นจึงส่งผลให้ความอิ่มตัวด้วยน้ำมีค่าสูงขึ้นเช่นกัน จึงสามารถสรุปได้ว่า การปนเปื้อนแบบผสมทำให้แรงที่ผิวสัมผัสระหว่างของเหลวและมุมสัมผัสระหว่างพื้นผิวและของเหลวเปลี่ยนแปลงไป เป็นเหตุให้ความดันคาปิลลารีเพิ่มสูงขึ้นความอิ่มตัวด้วยน้ำจึงลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับ การปนเปื้อนเชิงเดี่ยว ส่งผลให้ความสามารถเปียกได้มีการเปลี่ยนแปลงไปกลายเป็นสามารถเปียกน้ำได้น้อยลง

การทดลองส่วนที่ 2 การหาความสัมพันธ์ระหว่างความดันคาปิลลารี และความอิ่มตัวด้วยน้ำ

1. การหาความสัมพันธ์ระหว่างความดันคาปิลลารี และความอิ่มตัวด้วยน้ำ ด้วยระบบ LNAPL - น้ำ

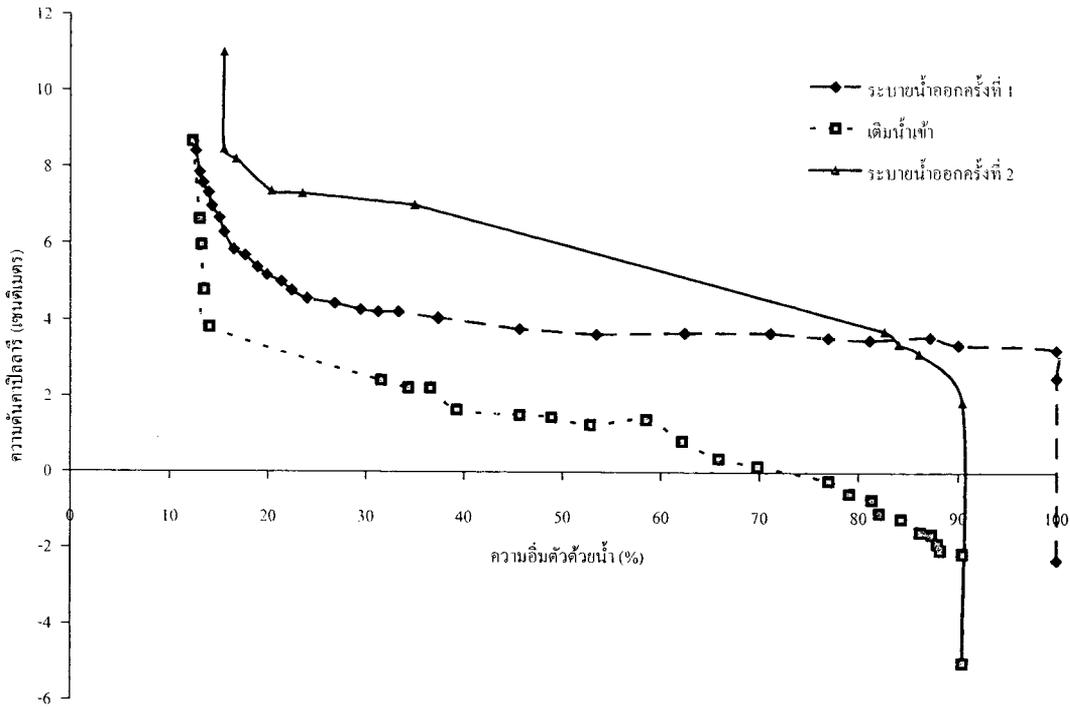
การทดลองเริ่มต้นจากตัวกลางที่มีความอิ่มตัวด้วยน้ำ 100% จากนั้นทำการระบายน้ำออกจากตัวกลางครั้งแรกโดยใช้แรงดันจากสารโทลูอิน แล้วทำการเติมน้ำเข้าสู่ตัวกลาง และสุดท้ายทำการระบายน้ำออกเป็นครั้งที่ 2 ด้วยแรงดันจากสารโทลูอิน

จากภาพที่ 25 ที่เส้นกราฟระบายน้ำออกครั้งที่ 1 ความอิ่มตัวด้วยน้ำเริ่มต้นจาก 100% ที่ความดันคาปิลลารี -2.30 เซนติเมตร จนความดันคาปิลลารีมีค่าเพิ่มขึ้นถึง 2.49 เซนติเมตร ความอิ่มตัวด้วยน้ำจึงเริ่มลดลง จากนั้นความอิ่มตัวด้วยน้ำได้ลดลงไปเรื่อยๆ พร้อมกับความดันคาปิลลารีที่เพิ่มขึ้น จนสุดท้ายถึงความดันคาปิลลารีที่ไม่สามารถระบายน้ำได้ที่ 8.66 เซนติเมตร และมีความอิ่มตัวด้วยน้ำที่เหลืออยู่ในตัวกลาง 12.33%

ที่เส้นกราฟเติมน้ำเข้า ความอิ่มตัวด้วยน้ำเริ่มต้นจาก 12.33% ที่ความดันคาปิลลารี 8.66 เซนติเมตร จากนั้นเมื่อเติมน้ำเข้าสู่ตัวกลาง ความอิ่มตัวด้วยน้ำจึงเพิ่มขึ้นจนถึงระดับสูงสุดที่ 90.42% ที่ความดันคาปิลลารี -2.14 เซนติเมตร สามารถหาพื้นที่ใต้กราฟ (A2) ได้ 18.10 cm^2

ที่เส้นกราฟระบายน้ำออกครั้งที่ 2 ความอิ่มตัวด้วยน้ำเริ่มต้นจาก 90.42% ที่ความดันคาปิลลารี -5.00 เซนติเมตร จนความดันคาปิลลารีมีค่าเพิ่มขึ้นถึง 1.85 เซนติเมตร ความอิ่มตัวด้วยน้ำจึงเริ่มลดลง จากนั้นความอิ่มตัวด้วยน้ำได้ลดลงไปเรื่อยๆ พร้อมกับความดันคาปิลลารีที่เพิ่มขึ้น จนสุดท้ายถึงความดันคาปิลลารีที่ไม่สามารถระบายน้ำได้ที่ 8.45 เซนติเมตร และมีความอิ่มตัวด้วยน้ำที่เหลืออยู่ในตัวกลาง 15.48% สามารถหาพื้นที่ใต้กราฟ (A1) ได้ 419.81 cm^2

จากการทดลองนี้ได้ค่าดัชนี USBM เท่ากับ 1.36 แสดงว่าตัวกลางมีความสามารถเปียกได้แบบ เปียกน้ำ เมื่อตัวกลางอยู่ในระบบ LNAPL - น้ำ



ภาพที่ 25 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันคาปิลลารีและความอิ่มตัวด้วยน้ำ

โดยการทดลองด้วยระบบ LNAPL – น้ำ

2. การหาความสัมพันธ์ระหว่างความดันคาปิลลารี และความอิ่มตัวด้วยน้ำ ด้วยระบบ DNAPL – น้ำ

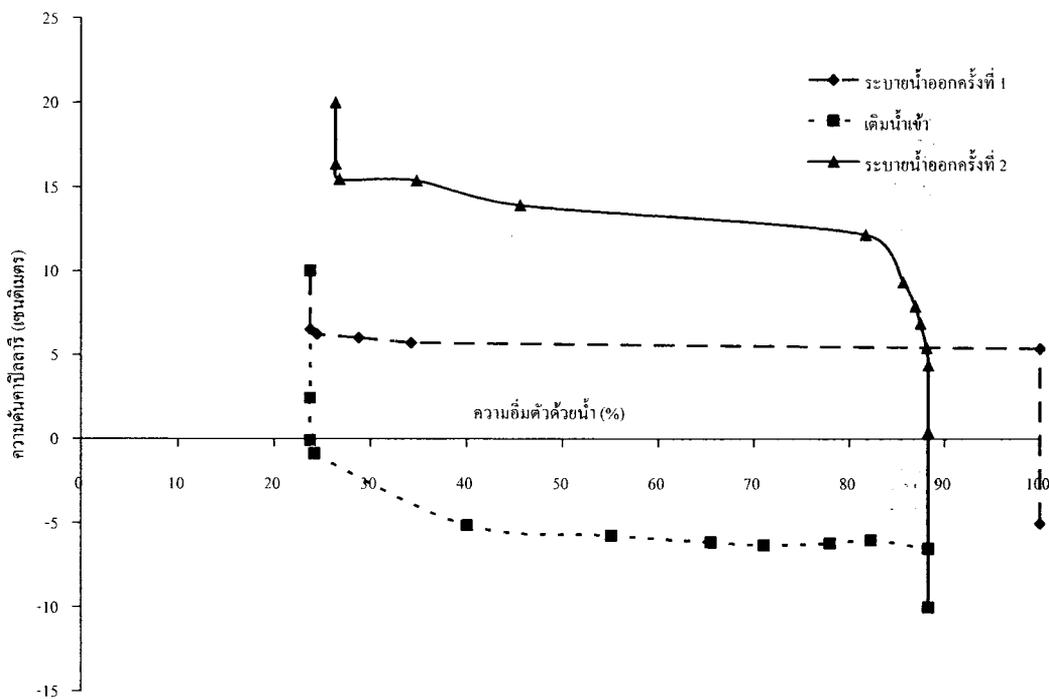
การทดลองเริ่มต้นจากตัวกลางที่มีความอิ่มตัวด้วยน้ำ 100% จากนั้นทำการระบายน้ำออกจากตัวกลางครั้งแรกโดยใช้แรงดันจากสารไตรคลอโรเอทิลีน แล้วทำการเติมน้ำเข้าสู่ตัวกลาง และสุดท้ายทำการระบายน้ำออกเป็นครั้งที่ 2 ด้วยแรงดันจากสารไตรคลอโรเอทิลีน

จากภาพที่ 26 ที่เส้นกราฟระบายน้ำออกครั้งที่ 1 ความอิ่มตัวด้วยน้ำเริ่มต้นจาก 100% ที่ความดันคาปิลลารี -5.00 เซนติเมตร จนความดันคาปิลลารีมีค่าเพิ่มขึ้นถึง 5.36 เซนติเมตร ความอิ่มตัวด้วยน้ำจึงเริ่มลดลง จากนั้นความอิ่มตัวด้วยน้ำได้ลดลงไปเรื่อยๆ พร้อมกับความดันคาปิลลารีที่เพิ่มขึ้น จนสุดท้ายถึงความดันคาปิลลารีที่ไม่สามารถระบายน้ำได้ที่ 6.52 เซนติเมตร และมีความอิ่มตัวด้วยน้ำที่เหลืออยู่ในตัวกลาง 23.72%

ที่เส้นกราฟเติมน้ำเข้า ความอิ่มตัวด้วยน้ำเริ่มต้นจาก 23.72% ที่ความดันคาปิลลารี 10.00 เซนติเมตร จากนั้นเมื่อเติมน้ำเข้าสู่ตัวกลาง ความอิ่มตัวด้วยน้ำจึงเริ่มเพิ่มขึ้น ที่ระดับความดันคาปิลลารี -0.08 เซนติเมตร ความอิ่มตัวด้วยน้ำเพิ่มขึ้นจนถึงระดับสูงสุดที่ 88.27% ที่ความดันคาปิลลารี -6.49 เซนติเมตร สามารถหาพื้นที่ใต้กราฟ (A2) ได้ 327.56 cm^2

ที่เส้นกราฟระบายน้ำออกครั้งที่ 2 ความอึดตัวด้วยน้ำเริ่มต้นจาก 88.27% ที่ความดันคาปิลลารี - 10.00 เซนติเมตร จนความดันคาปิลลารีมีค่าเพิ่มขึ้นถึง 4.38 เซนติเมตร ความอึดตัวด้วยน้ำจึงเริ่มลดลง จากนั้นความอึดตัวด้วยน้ำได้ลดลงไปเรื่อยๆ พร้อมกับความดันคาปิลลารีที่เพิ่มขึ้น จนสุดท้ายถึงความดันคาปิลลารีที่ไม่สามารถระบายน้ำได้ที่ 16.37 เซนติเมตร และมีความอึดตัวด้วยน้ำที่เหลืออยู่ในตัวกลาง 26.36% สามารถหาพื้นที่ใต้กราฟ (A1) ได้ 814.31 cm^2

จากการทดลองนี้ได้ค่าดัชนี USBM เท่ากับ 0.395 แสดงว่าตัวกลางมีความสามารถเปียกได้แบบ เปียกน้ำ เมื่อตัวกลางอยู่ในระบบ DNAPL - น้ำ



ภาพที่ 26 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันคาปิลลารีและความอึดตัวด้วยน้ำ โดยการทดลองด้วยระบบ DNAPL - น้ำ

3. การหาความสัมพันธ์ระหว่างความดันคาปิลลารี และความอึดตัวด้วยน้ำ ด้วยระบบ LNAPL - น้ำ เมื่อมี DNAPL ตกค้างอยู่ในตัวกลาง

การทดลองในส่วนนี้เป็นการทดลองที่ต่อจากการทดลองหาความสัมพันธ์ระหว่างความดันคาปิลลารี และความอึดตัวด้วยน้ำในระบบ DNAPL - น้ำ โดยเริ่มต้นมีสารไตรคลอโรเอทิลีนตกค้างอยู่ในตัวกลาง 9.75% ดังนั้นความอึดตัวด้วยน้ำจึงเริ่มต้นที่ 90.25% จากนั้นทำการระบายน้ำออกจากตัวกลางครั้งแรกโดยใช้

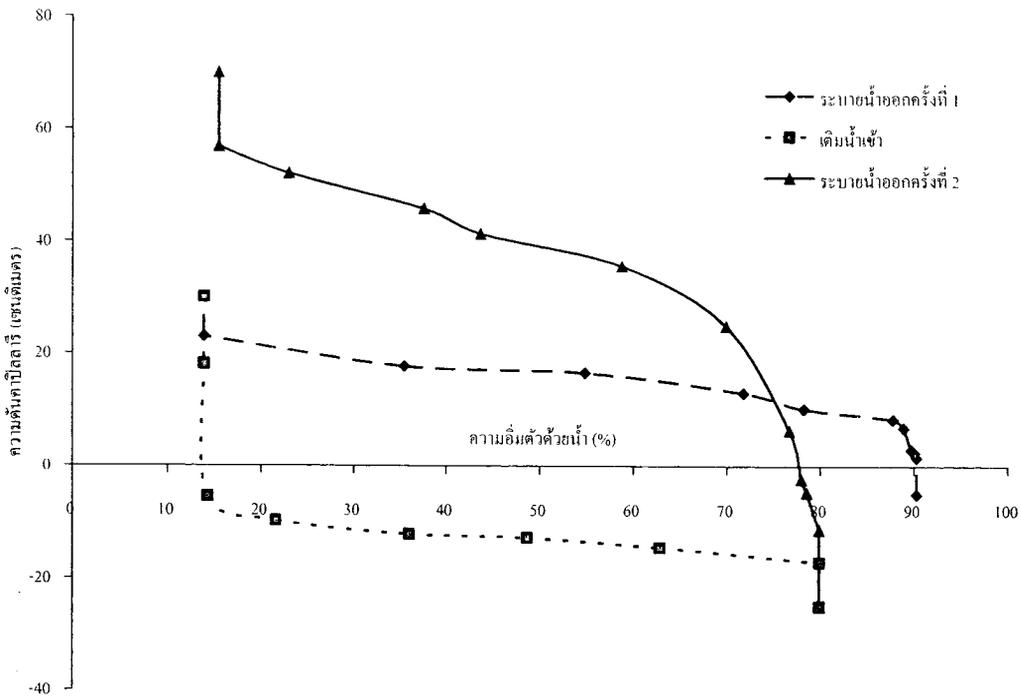
แรงดันจากสารโทลูอิน แล้วทำการเติมน้ำเข้าสู่ตัวกลาง และสุดท้ายทำการระบายน้ำออกเป็นครั้งที่ 2 ด้วยแรงดันจากสารโทลูอิน

จากภาพที่ 27 ที่เส้นกราฟระบายน้ำออกครั้งที่ 1 ความอิ่มตัวด้วยน้ำเริ่มต้นจาก 90.25% ที่ความดันคาปิลลารี -5.00 เซนติเมตร จนความดันคาปิลลารีมีค่าเพิ่มขึ้นถึง 1.58 เซนติเมตร ความอิ่มตัวด้วยน้ำจึงเริ่มลดลง จากนั้นความอิ่มตัวด้วยน้ำได้ลดลงไปเรื่อยๆ พร้อมกับความดันคาปิลลารีที่เพิ่มขึ้น จนสุดท้ายถึงความดันคาปิลลารีที่ไม่สามารถระบายน้ำได้ที่ 22.99 เซนติเมตร และมีความอิ่มตัวด้วยน้ำที่เหลืออยู่ในตัวกลาง 13.84%

ที่เส้นกราฟเติมน้ำเข้า ความอิ่มตัวด้วยน้ำเริ่มต้นจาก 13.84% ที่ความดันคาปิลลารี 30.00 เซนติเมตร จากนั้นเมื่อเติมน้ำเข้าสู่ตัวกลาง ความอิ่มตัวด้วยน้ำจึงเพิ่มขึ้นจนถึงระดับสูงสุดที่ 79.87% ที่ความดันคาปิลลารี -17.14 เซนติเมตร สามารถหาพื้นที่ใต้กราฟ (A2) ได้ 760.15 cm^2

ที่เส้นกราฟระบายน้ำออกครั้งที่ 2 ความอิ่มตัวด้วยน้ำเริ่มต้นจาก 79.87% ที่ความดันคาปิลลารี -25.00 เซนติเมตร จนความดันคาปิลลารีมีค่าเพิ่มขึ้นถึง -11.29 เซนติเมตร ความอิ่มตัวด้วยน้ำจึงเริ่มลดลง จากนั้นความอิ่มตัวด้วยน้ำได้ลดลงไปเรื่อยๆ พร้อมกับความดันคาปิลลารีที่เพิ่มขึ้น จนสุดท้ายถึงความดันคาปิลลารีที่ไม่สามารถระบายน้ำได้ที่ 56.89 เซนติเมตร และมีความอิ่มตัวด้วยน้ำที่เหลืออยู่ในตัวกลาง 15.38% สามารถหาพื้นที่ใต้กราฟ (A1) ได้ 2418.73 cm^2

จากการทดลองนี้ได้ค่าดัชนี USBM เท่ากับ 0.50 แสดงว่าตัวกลางมีความสามารถเปียกได้แบบ เปียกน้ำ เมื่อตัวกลางอยู่ในระบบ LNAPL - น้ำ และเมื่อมี DNAPL ตกค้างอยู่ในตัวกลาง



ภาพที่ 27 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันคาพิลลารีและความอิ่มตัวด้วยน้ำ ด้วย LNAPL - น้ำ
เมื่อมี DNAPL ตกค้างอยู่ในตัวกลาง

4. การหาความสัมพันธ์ระหว่างความดันคาพิลลารี และความอิ่มตัวด้วยน้ำ ด้วยระบบ DNAPL - น้ำ เมื่อมี LNAPL ตกค้างอยู่ในตัวกลาง

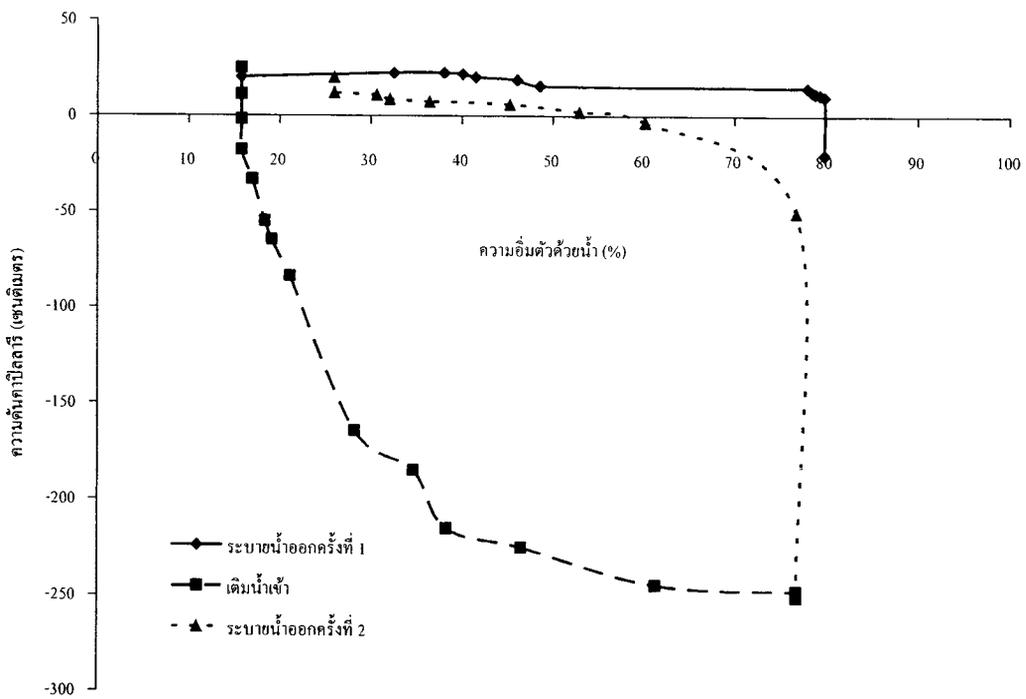
การทดลองในส่วนนี้เป็นการทดลองที่ต่อจากการทดลองหาความสัมพันธ์ระหว่างความดันคาพิลลารี และความอิ่มตัวด้วยน้ำในระบบ LNAPL - น้ำ โดยเริ่มต้นมีสารโทลูอินตกค้างอยู่ในตัวกลาง 20.17% ดังนั้น ความอิ่มตัวด้วยน้ำจึงเริ่มต้นที่ 79.83% จากนั้นทำการระบายน้ำออกจากตัวกลางครั้งแรกโดยใช้แรงดันจาก สารไตรคลอโรเอทิลีน แล้วทำการเติมน้ำเข้าสู่ตัวกลาง และสุดท้ายทำการระบายน้ำออกเป็นครั้งที่ 2 ด้วยแรงดันจากสารไตรคลอโรเอทิลีน

จากภาพที่ 28 ที่เส้นกราฟระบายน้ำออกครั้งที่ 1 ความอิ่มตัวด้วยน้ำเริ่มต้นจาก 79.83% ที่ความดันคาพิลลารี -20.00 เซนติเมตร จนความดันคาพิลลารีมีค่าเพิ่มขึ้นถึง 11.25 เซนติเมตร ความอิ่มตัวด้วยน้ำจึงเริ่มลดลง จากนั้นความอิ่มตัวด้วยน้ำได้ลดลงไปเรื่อยๆ พร้อมกับความดันคาพิลลารีที่เพิ่มขึ้น จนสุดท้ายถึงความดันคาพิลลารีที่ไม่สามารถระบายน้ำได้ที่ 20.18 เซนติเมตร และมีความอิ่มตัวด้วยน้ำที่เหลืออยู่ในตัวกลาง 15.78%

ที่เส้นกราฟเติมน้ำเข้า ความอิ่มตัวด้วยน้ำเริ่มต้นจาก 15.78% ที่ความดันคาปิลลารี 25.00 เซนติเมตร จากนั้นเมื่อเติมน้ำเข้าสู่ตัวกลาง ความอิ่มตัวด้วยน้ำจึงเพิ่มขึ้นจนถึงระดับสูงสุดที่ 76.76% ที่ความดันคาปิลลารี -246.89 เซนติเมตร สามารถหาพื้นที่ใต้กราฟ (A2) ได้ 8252.19 cm²

ที่เส้นกราฟระบายน้ำออกครั้งที่ 2 ความอิ่มตัวด้วยน้ำเริ่มต้นจาก 76.76% ที่ความดันคาปิลลารี -250.00 เซนติเมตร จนความดันคาปิลลารีมีค่าเพิ่มขึ้นถึง -50.27 เซนติเมตร ความอิ่มตัวด้วยน้ำจึงเริ่มลดลง จากนั้นความอิ่มตัวด้วยน้ำได้ลดลงไปเรื่อยๆ พร้อมกับความดันคาปิลลารีที่เพิ่มขึ้น จนสุดท้ายถึงความดันคาปิลลารีที่ไม่สามารถระบายน้ำได้ที่ 12.05 เซนติเมตร และมีความอิ่มตัวด้วยน้ำที่เหลืออยู่ในตัวกลาง 25.99% สามารถหาพื้นที่ใต้กราฟ (A1) ได้ 192.86 cm²

จากการทดลองนี้ได้ค่าดัชนี USBM เท่ากับ -1.63 แสดงว่าตัวกลางมีความสามารถเปียกได้แบบ เปียกสารอินทรีย์ เมื่อตัวกลางอยู่ในระบบ DNAPL - น้ำ และเมื่อมี LNAPL ตกค้างอยู่ในตัวกลาง



ภาพที่ 28 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันคาปิลลารี และความอิ่มตัวด้วยน้ำ ด้วย DNAPL - น้ำ
เมื่อมี LNAPL ตกค้างอยู่ในตัวกลาง

การทดลองหาความสามารถเปียกได้โดยใช้การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความดันคาปิลลารี กับความอิ่มตัวด้วยน้ำ โดยการวิเคราะห์ร่วมกับดัชนีชี้วัดความสามารถเปียกได้แบบยูเอสบีเอ็ม ได้ผลสรุปดังตารางที่ 5

ตารางที่ 5 ดัชนีชี้วัดความสามารถเปียกได้แบบ USBM โดยคำนวณจากความสัมพันธ์
ระหว่างความดันคาปิลลารีและความอึดตัวด้วยน้ำ

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

เมื่อทำการวิเคราะห์โดยการใช้การเปรียบเทียบดัชนีชี้วัดที่ได้จากการทดลองที่ใช้ระบบการทดลองชนิดเดียวกัน แต่มีสารที่ตกค้างอยู่ในตัวกลางและที่ไม่มีตกค้างอยู่ในตัวกลาง พบว่า ระบบน้ำ-โทลูอิน มีค่า USBM Index = 1.36 และ ระบบน้ำ-โทลูอิน (เมื่อมีไตรคลอโรเอทรีนตกค้างอยู่ในตัวกลาง) มีค่า USBM Index = 0.50 ค่าดัชนีที่ลดลงแสดงให้เห็นว่า มีความไม่ชอบน้ำเพิ่มขึ้น ส่วนระบบน้ำ-ไตรคลอโรเอทรีน มีค่า USBM Index = 0.395 และระบบน้ำ-ไตรคลอโรเอทรีน (เมื่อมีโทลูอินตกค้างอยู่ในตัวกลาง) มีค่า USBM Index = -1.63 ดัชนีที่มีค่าลดลงแสดงให้เห็นว่า มีความไม่ชอบน้ำเพิ่มขึ้น ซึ่งผลการทดลองนี้ได้ไปสอดคล้องกับการทดสอบอัตราการเติมน้ำที่ว่า ความสามารถเปียกได้จะมีค่าเปลี่ยนแปลงไปเป็นไม่ชอบน้ำเพิ่มขึ้น เมื่อมีการปนเปื้อนแบบผสมระหว่าง LNAPL และ DNAPL

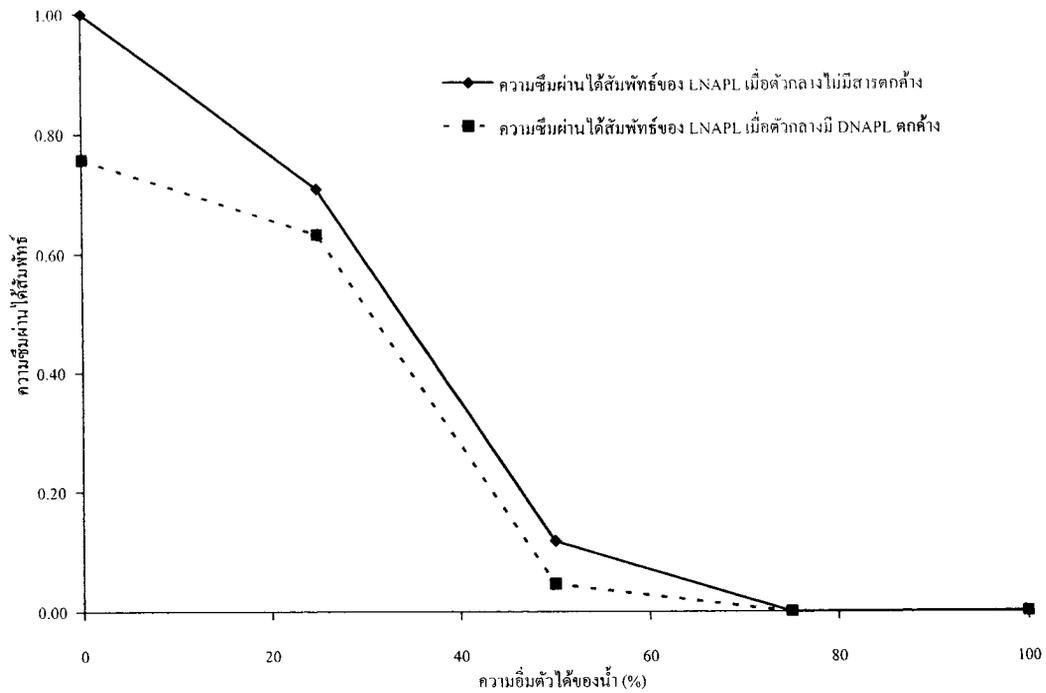
การทดลองส่วนที่ 3 การหาความซึมผ่านได้สัมพัทธ์

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

จากภาพที่ 29 ที่เส้นกราฟความซึมผ่านได้สัมพัทธ์ของ LNAPL เมื่อตัวกลางไม่มีสารตกค้างพบว่า ที่ความอึดตัวด้วยน้ำ 0% มีค่าความซึมผ่านได้สัมพัทธ์อยู่ที่ 1.00 เมื่อเพิ่มความอึดตัวด้วยน้ำของตัวกลางนั้น มีผลทำให้ค่าความซึมผ่านได้สัมพัทธ์มีค่าลดลง และค่าความซึมผ่านได้สัมพัทธ์มีค่าเท่ากับ 0 เมื่อความอึดตัวด้วยน้ำมีค่าตั้งแต่ 75% ขึ้นไป

ที่เส้นกราฟความซึมผ่านได้สัมพัทธ์ของ LNAPL เมื่อตัวกลางมี DNAPL ตกค้าง พบว่า ที่ความอึดตัวด้วยน้ำ 0% มีค่าความซึมผ่านได้สัมพัทธ์อยู่ที่ 0.76 เมื่อเพิ่มความอึดตัวด้วยน้ำของตัวกลางนั้น มีผลทำให้ค่า

ความซึมผ่านได้สัมพัทธ์มีค่าลดลง และค่าความซึมผ่านได้สัมพัทธ์มีค่าเท่ากับ 0 เมื่อความอิ่มตัวด้วยน้ำมีค่าตั้งแต่ 75% ขึ้นไป



ภาพที่ 29 ความซึมผ่านได้สัมพัทธ์ของ LNAPL ผ่านตัวกลางที่อิ่มตัวด้วยน้ำที่ระดับต่างๆ และความซึมผ่านได้สัมพัทธ์ของ LNAPL ผ่านตัวกลางที่อิ่มตัวด้วยน้ำที่ระดับต่างๆ ที่ผ่านการซึมผ่านของ DNAPL มาก่อนหน้า

ตารางที่ 6 ผลการทดลองหาความซึมผ่านได้สัมพัทธ์ของ LNAPL

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

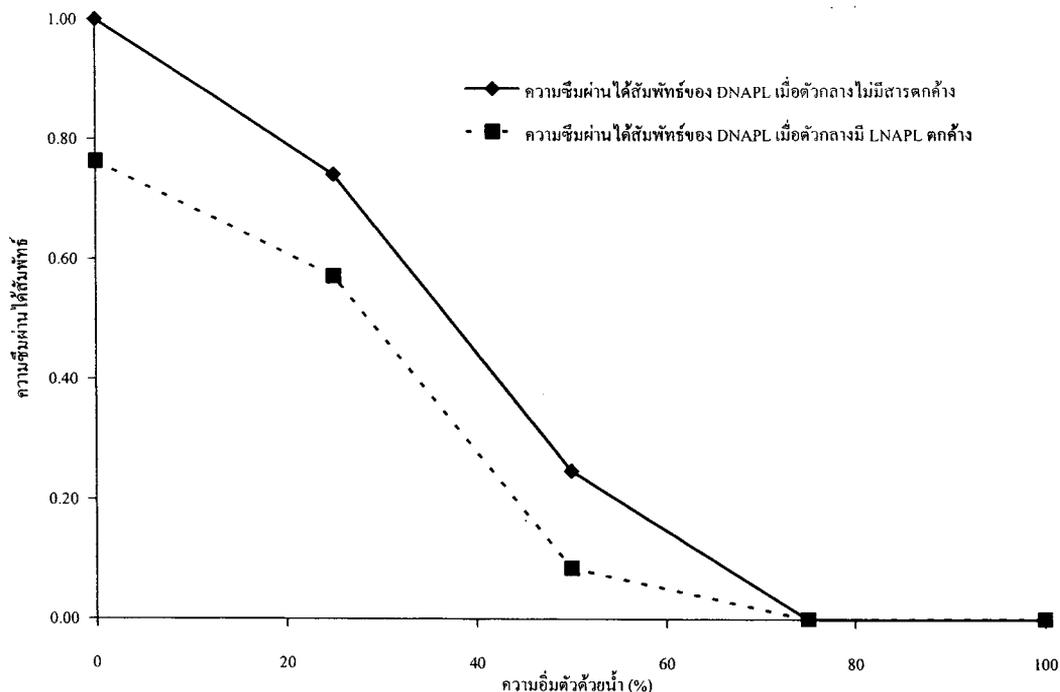
จากตารางที่ 6 และภาพที่ 29 ความซึมผ่านได้สัมพัทธ์ของ LNAPL ผ่านตัวกลางที่อิ่มตัวด้วยน้ำที่ระดับต่างๆ ที่ผ่านการซึมผ่านของ DNAPL มาก่อนหน้า มีค่าน้อยกว่าความซึมผ่านได้สัมพัทธ์ของ LNAPL เมื่อตัวกลางไม่มี

สารตกค้าง ชี้ให้เห็นว่า เมื่อมีการปนเปื้อน DNAPL ก่อน จะทำให้การเคลื่อนที่ของ LNAPL มีการเปลี่ยนแปลง เป็นช้าลงไปจากการปนเปื้อน LNAPL เพียงอย่างเดียว

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

จากภาพที่ 30 ที่เส้นกราฟความซึมผ่านได้สัมพัทธ์ของ DNAPL เมื่อตัวกลางไม่มีสารตกค้างพบว่า ที่ความอิ่มตัวด้วยน้ำ 0% มีค่าความซึมผ่านได้สัมพัทธ์อยู่ที่ 1.00 เมื่อเพิ่มความอิ่มตัวด้วยน้ำของตัวกลางนั้น มีผลทำให้ค่าความซึมผ่านได้สัมพัทธ์มีค่าลดลง และค่าความซึมผ่านได้สัมพัทธ์มีค่าเท่ากับ 0 เมื่อความอิ่มตัวด้วยน้ำมีค่าตั้งแต่ 75% ขึ้นไป

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



ภาพที่ 30 ความซึมผ่านได้สัมพัทธ์ของ DNAPL ผ่านตัวกลางที่อิ่มตัวด้วยน้ำที่ระดับต่างๆ และความซึมผ่านได้สัมพัทธ์ของ DNAPL ผ่านตัวกลางที่อิ่มตัวด้วยน้ำที่ระดับต่างๆ ที่ผ่านการซึมผ่านของ LNAPL มาก่อนหน้า

ตารางที่ 7 ผลการทดลองหาความซึมผ่านได้สัมพัทธ์ของ DNAPL

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

จากตารางที่ 7 และภาพที่ 30 ความซึมผ่านได้สัมพัทธ์ของ DNAPL ผ่านตัวกลางที่อิ่มตัวด้วยน้ำที่ระดับต่างๆ ที่ผ่านการซึมผ่านของ LNAPL มาก่อนหน้า มีค่าน้อยกว่าความซึมผ่านได้สัมพัทธ์ของ DNAPL เมื่อตัวกลางไม่มีสารตกค้าง ซึ่งให้เห็นว่า เมื่อมีการปนเปื้อน LNAPL ก่อน จะทำให้การเคลื่อนที่ของ DNAPL มีการเปลี่ยนแปลงเป็นข้างลงไปจากการปนเปื้อน LNAPL เพียงอย่างเดียว

สรุป

งานวิจัยนี้เป็นการเน้นศึกษา wettability หรือความสามารถเปียกได้ของพื้นผิวเมื่อมี NAPL ของสารปนเปื้อนผสม โดยเฉพาะที่มีการผสมระหว่าง NAPL ที่เบากว่าน้ำ (LNAPL) และหนักกว่าน้ำ (DNAPL) ซึ่งเป็นการศึกษาที่ใกล้เคียงกับสภาพการปนเปื้อนตามความเป็นจริงมากขึ้น จากการศึกษาการวัดมุมสัมผัส (contact angle) พบว่า เมื่อพื้นผิวของแข็งที่อิมตัวในน้ำปนเปื้อน NAPL และสัมผัสกับ NAPL อีกชนิด มุมสัมผัสที่เกิดขึ้นในตอนเริ่มต้นเป็นแบบเปียกน้ำหรือ strongly water-wet เมื่อเวลาผ่านไป ทำให้มุมสัมผัสของ NAPL เป็นลักษณะการเปียกแบบเปียกน้ำมันหรือ strongly oil-wet ดังนั้นลักษณะการเปียกนั้นสามารถเปลี่ยนแปลงได้ เมื่อดินที่อิมตัวด้วยน้ำ มี NAPL มาเกาะติด NAPL อาจทำให้พื้นผิวของดินเปลี่ยนแปลงไปตามคุณสมบัติของ NAPL เมื่อทำการหาความสัมพันธ์ระหว่างมุมสัมผัส และเวลาในการปนเปื้อนพบว่ามุมสัมผัสค่อนข้างคงที่เมื่อเริ่มต้นและมีการเปลี่ยนแปลงโดยค่อนข้างคงที่ในภายหลัง ปรากฏการณ์นี้สามารถอธิบายด้วย film theory นอกจากนี้มุมสัมผัสในตอนเริ่มต้นเป็น advancing angle เทียบได้กับมุมขณะที่ NAPL รุกเข้าไปยังโครงข่าย (network) ของดิน เมื่อเวลาผ่านไปขณะที่มวลของ NAPL ลดลงเป็น receding angle เทียบกับมุมระหว่าง NAPL ถอยออกจากโครงข่ายของดิน

สำหรับการศึกษา wettability โดยการวัดอัตราการเติมน้ำ (imbibition rate) ซึ่งเป็นการวัดความอิมตัวด้วยน้ำ (เปอร์เซ็นต์) เทียบกับเวลา โดยทำการวัดในเซลล์จำลองการปนเปื้อนใต้ดิน ซึ่งพบว่า การปนเปื้อน LNAPL อย่างเดียวและ DNAPL อย่างเดียวจะมีค่าความอิมตัวด้วยน้ำเฉลี่ยเท่ากับ 84.98 % และ 82.96 % ตามลำดับ ซึ่งสูงกว่าตัวกลางที่ไม่ได้รับการปนเปื้อนเลยที่ค่าความอิมตัวด้วยน้ำเฉลี่ยเท่ากับ 76.66 % และตัวกลางที่ไม่ได้รับการปนเปื้อนจะมีค่าความอิมตัวด้วยน้ำสูงกว่าตัวกลางที่ได้รับการปนเปื้อนแบบผสม ทั้งแบบที่ปนเปื้อน DNAPL ก่อนแล้วปนเปื้อน LNAPL และแบบที่ปนเปื้อน LNAPL ก่อนแล้วปนเปื้อน DNAPL ที่ค่าความอิมตัวด้วยน้ำเฉลี่ยเท่ากับ 75.09 % และ 73.88 % ตามลำดับ ทั้งนี้พบว่าการทดลองนี้เป็นไปตามสมการลาปลาซและสามารถสรุปได้ว่าการปนเปื้อนแบบผสมทำให้แรงที่ผิวสัมผัสระหว่างของเหลวและมุมสัมผัสระหว่างพื้นผิวและของเหลวเปลี่ยนแปลงไป เป็นเหตุให้ความดันคาปิลลารีเพิ่มสูงขึ้นความอิมตัวด้วยน้ำจึงลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีการปนเปื้อนเชิงเดียว ส่งผลให้ความสามารถเปียกได้มีการเปลี่ยนแปลงไป กลายเป็นสามารถเปียกน้ำได้น้อยลง

ในการศึกษาการเปลี่ยนแปลงความดันคาปิลลารีและความอิมตัวด้วยน้ำ ซึ่งเป็นการศึกษาฮิสเตอร์ซิสของการปนเปื้อนซ้ำ จากนั้นทำการหาค่าดัชนี USBM เพื่อพิจารณาสถานะ wettability ของการปนเปื้อน เมื่อทำการวิเคราะห์โดยใช้การเปรียบเทียบดัชนีชี้วัดที่ได้จากการทดลองที่ใช้ระบบการทดลองชนิดเดียวกัน แต่มีสารที่ตกค้างอยู่ในตัวกลางและที่ไม่มีตกค้างอยู่ในตัวกลาง พบว่า ระบบน้ำ-โทลูอีน มีค่า USBM Index = 1.36 และ ระบบน้ำ-โทลูอีน (เมื่อมีไตรคลอโรเอทิลีนตกค้างอยู่ในตัวกลาง) มีค่า USBM Index = 0.50 ค่าดัชนีที่ลดลงแสดงให้เห็นว่า มีความไม่ชอบน้ำเพิ่มขึ้น ส่วนระบบน้ำ-ไตรคลอโรเอทิลีน มีค่า USBM Index = 0.395 และระบบน้ำ-ไตรคลอโรเอทิลีน (เมื่อมีโทลูอีนตกค้างอยู่ในตัวกลาง) มีค่า USBM Index = -1.63 ดัชนีที่มีค่าลดลงแสดงให้เห็นว่า มีความไม่ชอบน้ำเพิ่มขึ้น ซึ่งผลการทดลองนี้ได้ไปสอดคล้องกับการทดสอบ

อัตราการเติมน้ำที่ว่า ความสามารถเปียกได้จะมีค่าเปลี่ยนแปลงไปเป็นไม่ชอบน้ำเพิ่มขึ้น เมื่อมีการปนเปื้อนแบบผสมระหว่าง LNAPL และ DNAPL

ข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยในอนาคต

ในปัจจุบันการปนเปื้อนในลักษณะของการปนเปื้อนผสมตอดิและน้ำใต้ดินที่เกิดขึ้นในประเทศไทย มีหลายหน่วยงานเข้ามาศึกษาความเป็นไปได้ในการฟื้นฟูพื้นที่ปนเปื้อนดังกล่าว อย่างไรก็ตามด้วยข้อจำกัดด้านเวลาและงบประมาณซึ่งใช้งบประมาณแผ่นดินทำให้การศึกษาดังกล่าวไม่สามารถบรรยายละเอียดที่สำคัญในการฟื้นฟูพื้นที่ปนเปื้อนได้

งานวิจัยที่จะเกิดขึ้นในอนาคตควรเน้นการศึกษาวิจัยด้วยแบบจำลองระดับ pilot scale ที่มีขนาดใหญ่กว่า lab scale ดังที่ผู้วิจัยได้นำเสนอผล ณ ที่นี้ อย่างไรก็ตาม การศึกษาวิจัยในระดับ pilot scale ในด้านการปนเปื้อนดินและน้ำใต้ดิน (subsurface contamination) นี้ต้องกระทำในรูปแบบการปนเปื้อนในพื้นที่มิใช่การศึกษาแบบ column experiment เพื่อลดความผิดพลาดด้านต่างๆ อาทิเช่น การไหลของของเหลวแบบ preferential flow ซึ่งเป็นประเด็นหลักที่ทำให้ผลการทดลองแตกต่างจากการปนเปื้อนในพื้นที่จริง นอกจากนี้ยังต้องกระทำอย่างระมัดระวังเพื่อป้องกันการปนเปื้อนจากการทดลองในบริเวณพื้นที่ศึกษาโดยพื้นที่ศึกษาต้องได้รับอนุญาตจากองค์การที่ดูแลและปกป้องด้านสิ่งแวดล้อมระดับประเทศ ตัวอย่างพื้นที่ศึกษาดังกล่าวเช่นบริเวณ Waterloo ประเทศ Canada