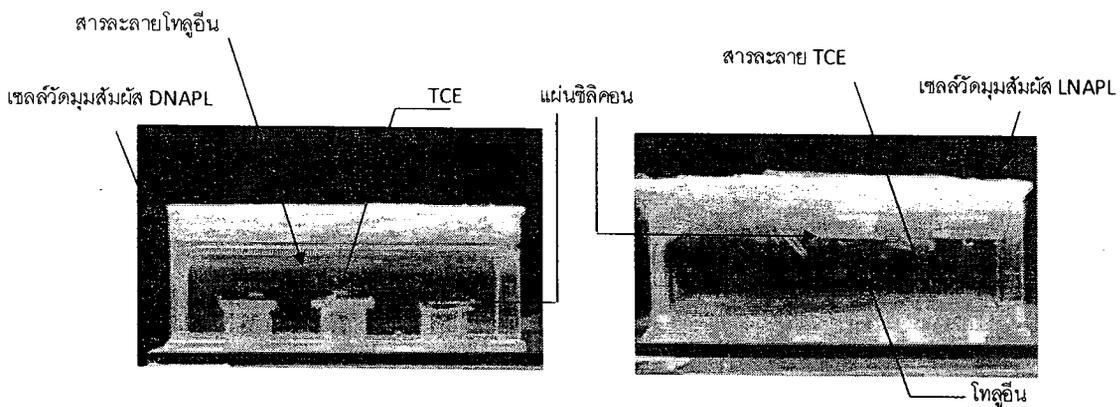


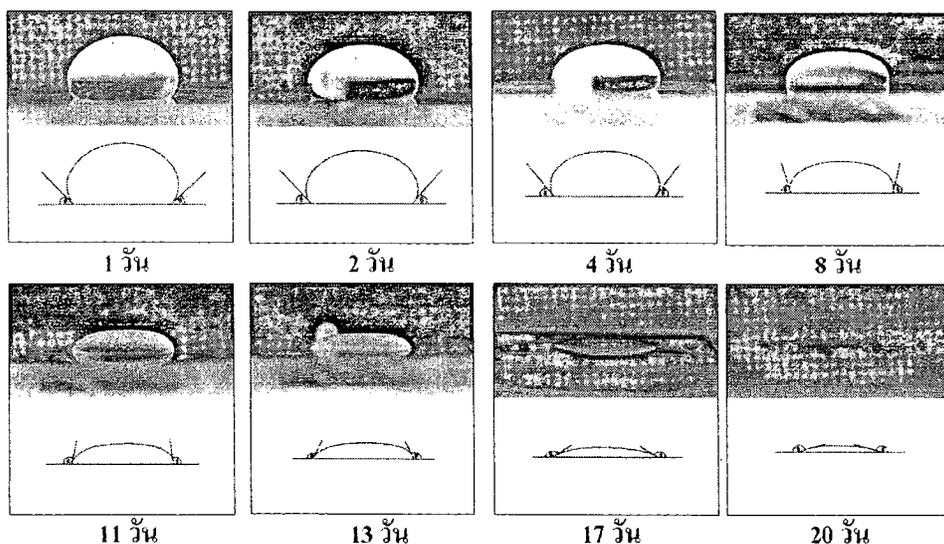
### Executive Summary

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นศึกษาลักษณะการปนเปื้อนของของเหลวที่ไม่ใช่ น้ำ (nonaqueous phase liquids, NAPLs) เมื่อมีการปนเปื้อนใต้ผิวดินแบบผสม โดยเน้นศึกษาการเปลี่ยนแปลงมุมสัมผัส (contact angle) ระหว่างของเหลวที่ไม่ใช่ น้ำ (nonaqueous phase liquid, NAPL) และของแข็งเมื่อมีการปนเปื้อนแบบผสม ใต้ผิวดิน โดย NAPL ที่ทำการศึกษามีทั้งแบบ dense nonaqueous phase liquid (DNAPL) ซึ่งใช้ trichloroethylene (TCE) เป็นตัวแทน และ light nonaqueous phase liquid (LNAPL) ซึ่งใช้ toluene เป็นตัวแทน นอกจากนี้ยังศึกษาความสัมพันธ์เชิง hysteresis ระหว่างความดันคาปิลลารี กับ water saturation และ ความสามารถในการซึมผ่านสัมพัทธ์ (relative permeability) สำหรับการปนเปื้อนของเหลวที่ไม่ใช่ น้ำแบบผสม โดยทั้งสองประเด็นนี้มีผลต่อการวางแผนการฟื้นฟูพื้นที่ปนเปื้อนในโอกาสต่อไป

ในการวัดมุมสัมผัส ทำการวัดในเซลล์วัดมุมสัมผัส ดังแสดงในภาพที่ E1 จากนั้นหามุมสัมผัสเทียบกับเวลา ดังภาพ E2 จากการศึกษาการวัดมุมสัมผัส (contact angle) พบว่า เมื่อพื้นผิวของแข็งที่อิมมิดีในน้ำปนเปื้อน NAPL และสัมผัสกับ NAPL อีกชนิด มุมสัมผัสที่เกิดขึ้นในตอนเริ่มต้นเป็นแบบเปียกน้ำหรือ strongly water-wet เมื่อเวลาผ่านไป ทำให้มุมสัมผัสของ NAPL เป็นลักษณะการเปียกแบบเปียกน้ำมันหรือ strongly oil-wet ดังนั้นลักษณะการเปียกนั้นสามารถเปลี่ยนแปลงได้ เมื่อดินที่อิมมิดีด้วยน้ำ มี NAPL มาเกาะติด NAPL อาจทำให้พื้นผิวของดินเปลี่ยนแปลงไปตามคุณสมบัติของ NAPL เมื่อทำการหาความสัมพันธ์ระหว่างมุมสัมผัส และ เวลาในการปนเปื้อนพบว่ามุมสัมผัสค่อนข้างคงที่เมื่อเริ่มต้นและมีการเปลี่ยนแปลงโดยค่อนข้างคงที่ในภายหลัง ปรากฏการณ์นี้สามารถอธิบายด้วย film theory นอกจากนี้มุมสัมผัสในตอนเริ่มต้นเป็น advancing angle เทียบได้กับมุมขณะที่ NAPL รุกเข้าไปยังโครงข่าย (network) ของดิน เมื่อเวลาผ่านไปขณะที่มวลของ NAPL ลดลงเป็น receding angle เทียบกับมุมระหว่าง NAPL ถอยออกจากโครงข่ายของดิน ค่ามุม advancing และ receding angle ดังแสดงในตารางมรา E1



ภาพที่ E1 ภาพการทดลองเซลล์วัดมุมสัมผัสสำหรับ ก) DNAPL และ ข) LNAPL



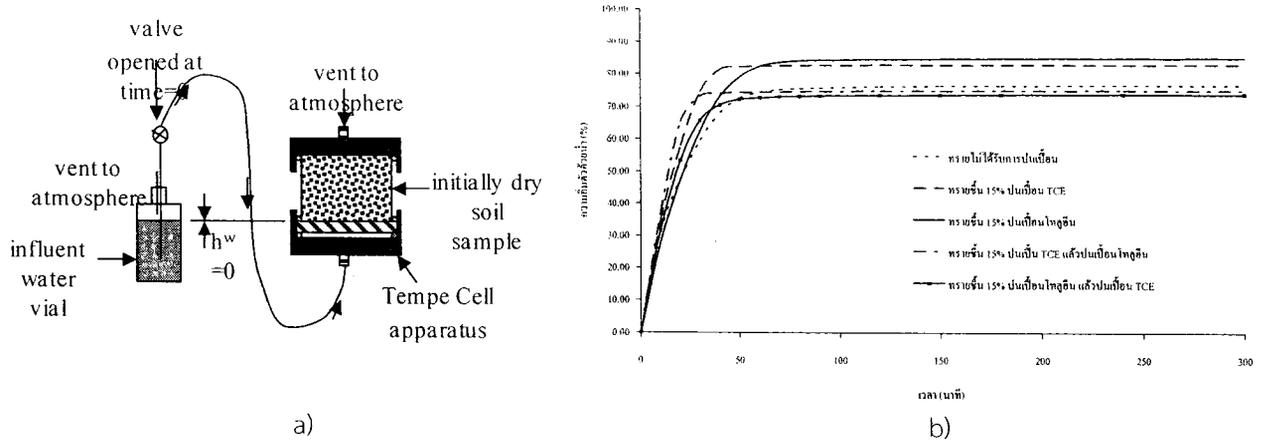
ภาพที่ E2 TCE บนแผ่นซิลิกอนซึ่งล้อมรอบด้วยน้ำ ความละเอียดของภาพ 0.03 cm/pixel

ตารางที่ E1 มุมสัมผัสเริ่มต้น (advancing angle) และมุมสัมผัสสุดท้าย (receding angle) ของการทดลองวัดมุมสัมผัส NAPL บนของแข็งซึ่งล้อมรอบด้วยของเหลวอีกชนิด

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

สำหรับการศึกษา wettability โดยการวัดอัตราการเติมน้ำ (imbibition rate) ซึ่งเป็นการวัดความอึดตัวด้วยน้ำ (เปอร์เซ็นต์) เทียบกับเวลา โดยทำการวัดในเซลล์จำลองการปนเปื้อนใต้ดิน (ภาพที่ E3a) ภาพที่ E3b แสดงให้เห็นว่า การปนเปื้อน LNAPL อย่างเดียวและ DNAPL อย่างเดียวจะมีค่าความอึดตัวด้วยน้ำเฉลี่ยเท่ากับ 84.98 % และ 82.96 % ตามลำดับ ซึ่งสูงกว่าตัวกลางที่ไม่ได้รับการปนเปื้อนเลยที่ค่าความอึดตัวด้วย

น้ำเฉลี่ยเท่ากับ 76.66 % และตัวกลางที่ไม่ได้รับการปนเปื้อนจะมีค่าความอิ่มตัวด้วยน้ำสูงกว่าตัวกลางที่ได้รับการปนเปื้อนแบบผสมทั้งแบบที่ปนเปื้อน DNAPL ก่อนแล้วปนเปื้อน LNAPL และแบบที่ปนเปื้อน LNAPL ก่อนแล้วปนเปื้อน DNAPL ที่ค่าความอิ่มตัวด้วยน้ำเฉลี่ยเท่ากับ 75.09 % และ 73.88 % ตามลำดับ ทั้งนี้ พบว่าการทดลองนี้เป็นไปตามสมการลาปลาซและสามารถสรุปได้ว่าการปนเปื้อนแบบผสมทำให้แรงที่ผิวสัมผัสระหว่างของเหลวและมุมสัมผัสระหว่างพื้นผิวและของเหลวเปลี่ยนแปลงไป เป็นเหตุให้ความดันคาปิลลารีเพิ่มสูงขึ้นความอิ่มตัวด้วยน้ำจึงลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีการปนเปื้อนเชิงเดี่ยว ส่งผลให้ความสามารถเปียกได้มีการเปลี่ยนแปลงไปกลายเป็นสามารถเปียกน้ำได้น้อยลง

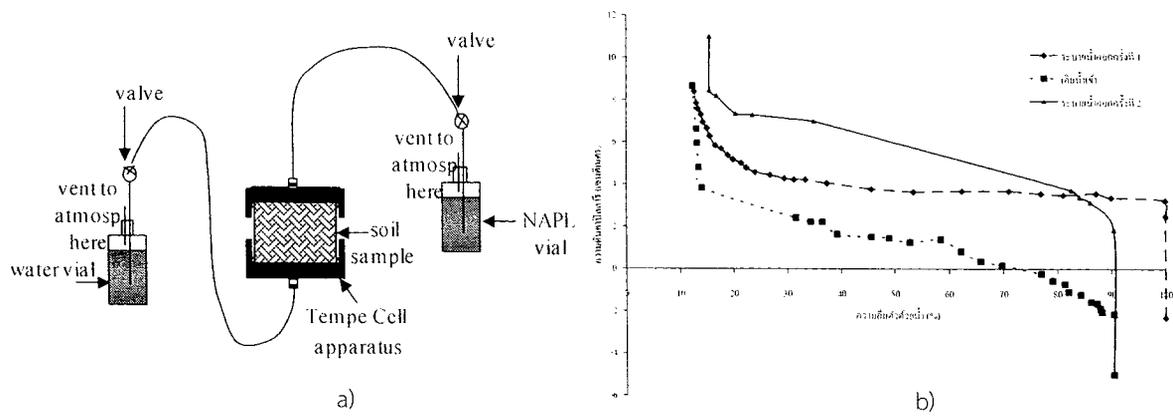


ภาพที่ E3 a) รูปแบบการติดตั้งอุปกรณ์วัดอัตราการเติมน้ำและ b) อัตราการเติมน้ำของการปนเปื้อนในลักษณะต่างๆ

ในการศึกษาการเปลี่ยนแปลงความดันคาปิลลารีและความอิ่มตัวด้วยน้ำ ซึ่งเป็นการศึกษาไฮสเตรอซิสของการปนเปื้อนซ้ำ (ภาพที่ 4a และ 4b) จากนั้นทำการหาค่าดัชนี USBM เพื่อพิจารณาสถานะ wettability ของการปนเปื้อน เมื่อทำการวิเคราะห์โดยใช้การเปรียบเทียบดัชนีชี้วัดที่ได้จากการทดลองที่ใช้ระบบการทดลองชนิดเดียวกัน แต่มีสารที่ตกค้างอยู่ในตัวกลางและที่ไม่มีตกค้างอยู่ในตัวกลาง พบว่า ระบบน้ำ-โทลูอิน มีค่า USBM Index = 1.36 และ ระบบน้ำ-ไตรคลอโรเอทิลีน (เมื่อมีไตรคลอโรเอทิลีนตกค้างอยู่ในตัวกลาง) มีค่า USBM Index = 0.50 ค่าดัชนีที่ลดลงแสดงให้เห็นว่า มีความไม่ชอบน้ำเพิ่มขึ้น ส่วนระบบน้ำ-ไตรคลอโรเอทิลีน มีค่า USBM Index = 0.395 และระบบน้ำ-ไตรคลอโรเอทิลีน (เมื่อมีโทลูอินตกค้างอยู่ในตัวกลาง) มีค่า USBM Index = -1.63 ดัชนีที่มีค่าลดลงแสดงให้เห็นว่า มีความไม่ชอบน้ำเพิ่มขึ้น ซึ่งผลการทดลองนี้ได้ไปสอดคล้องกับการทดสอบอัตราการเติมน้ำที่ว่า ความสามารถเปียกได้จะมีค่าเปลี่ยนแปลงไปเป็นไม่ชอบน้ำเพิ่มขึ้น เมื่อมีการปนเปื้อนแบบผสมระหว่าง LNAPL และ DNAPL

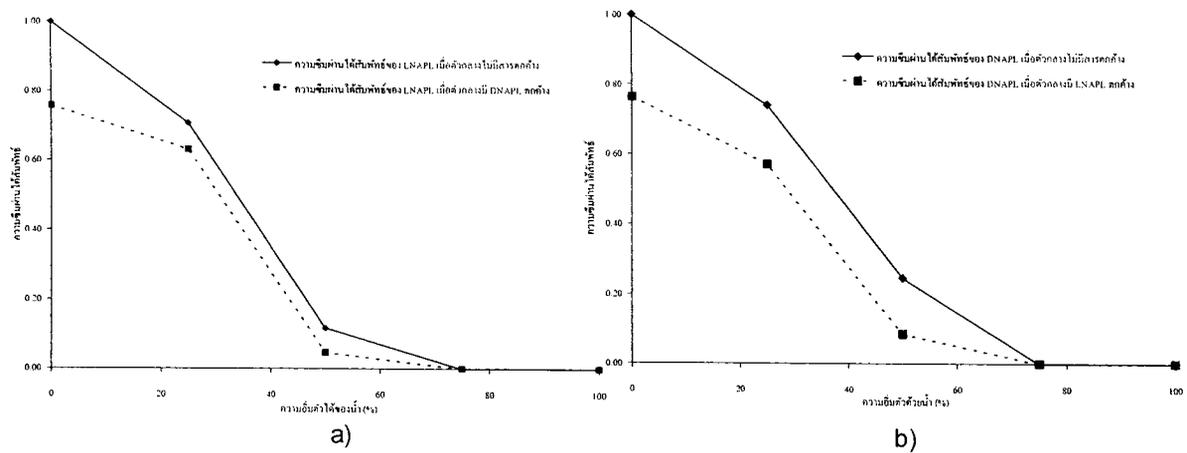
นอกจากนี้ภาพที่ E5 แสดงความซึมผ่านได้สัมพัทธ์ของ NAPL ผ่านตัวกลางที่อิ่มตัวด้วยน้ำที่ระดับต่างๆ ที่ผ่านการซึมผ่านของ NAPL มาก่อนหน้า พบว่ามีค่าน้อยกว่าความซึมผ่านได้สัมพัทธ์ของ NAPL เมื่อตัวกลางไม่มีสารตกค้าง ซึ่งให้เห็นว่า เมื่อมีการปนเปื้อน NAPL ก่อน จะทำให้การเคลื่อนที่ของ NAPL มีการ

เปลี่ยนแปลงเป็นขาลงไปจากการปนเปื้อน NAPL เพียงอย่างเดียว โดยเป็นปรากฏการณ์ในทางเดียวกันทั้งการปนเปื้อนก่อนหน้าแบบ DNAPL (E5a) และ แบบ LNAPL (E5b)



ภาพที่ E4 a) รูปแบบการติดตั้งอุปกรณ์วัดความตึงผิวและค่าพิลาไรและค่ามุมสัมผัสด้วยน้ำ และ b) ลักษณะ

ฮิสเตอรีซิสของการปนเปื้อน



ภาพที่ E5 a) ความซึมผ่านได้สัมพัทธ์ที่มีและไม่มี การปนเปื้อน a) DNAPL และ b) LNAPL มาก่อนหน้า